

TESIS CON. 39  
FALLAS DE ORIGEN 29.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Escuela Nacional de Estudios Profesionales  
"ACATLAN"

"POZOS DE ABSORCION. SOLUCION PARA LA  
ELIMINACION DE AGUAS NEGRAS EN LA PENINSU-  
LA DE YUCATAN".

## TESIS

Que para obtener el Título de:

**INGENIERO CIVIL**

Presenta:

**Juan Velázquez Arcos**



Acatlán, Edo. de Méx.

1987



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 está 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.

INTRODUCCION	
CAPITULO I. GENERALIDADES	3
1.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	3
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
1.2 MANEJO DEL AGUA EN YUCATAN	3
1.2.1 EPOCA PRECORTESIANA	3
1.2.2 FASE MODERNA	5
1.3 CARACTERISTICAS DE LA PENINSULA DE YUCATAN	6
1.3.1 ASPECTOS NATURALES	6
1.4 ANTECEDENTES TEORICOS	11
1.4.1 CAUSAS DE LA CONTAMINACION DE AGUA	11
1.4.2 FACTORES FISICO-QUIMICOS DE LA CONTAMINACION	15
1.4.3 CONSIDERACIONES SOBRE EL KARST	17
1.4.4 FLUJO DE AGUA EN SUELOS	21
CAPITULO II. PLANEAMIENTO Y DISEÑO DEL SISTEMA	26
2.1 CONVENIENCIA LOCAL	26
2.1.1 ESTUDIOS PREVIOS	26
2.1.2 ACUIFERO RECEPTOR	35
2.1.3 FACTORES ECONOMICOS	40
2.1.4 HIDRAULICA DE POZOS DE INYECCION	42
2.2 CONSIDERACIONES SOBRE EL AGUA DE INYECCION	61
2.2.1 ASPECTOS QUIMICOS Y EXTENSION SUPERFICIAL	61
2.2.2 CAUDAL DE INYECCION E INCREMENTO DE PRESION	64
2.2.3 SISTEMA DE ELIMINACION	65
2.3 EL CASO DE LA CIUDAD DE MERIDA	68
2.3.1 EXPERIENCIAS ANTERIORES	68
2.3.2 CORRELACION DE ESTUDIOS	70
CAPITULO III. MEDIDAS PARA PREVENIR LA CONTAMINACION	77
3.1 ENFOQUE SOCIAL	77
3.1.1 ANTECEDENTES	77
3.1.2 DAÑOS ECONOMICOS DE LA CONTAMINACION	78
3.2 LEGISLACION AMBIENTAL	79
3.2.1 SITUACION MUNDIAL	79
3.2.2 REGLAMENTACION EN MEXICO	80
3.3 RECURSOS TECNICOS	83
3.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES	83
3.3.2 CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS DESEABLES	84
3.3.3 ACCIONES PREVENTIVAS O CORRECTIVAS	88
CAPITULO IV. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y DE OPERACION MAS IMPORTANTES	90
4.1 PROCESO CONSTRUCTIVO	90
4.1.1 PERFORACION	90
4.1.2 MATERIALES Y EQUIPO	94
4.2 PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS Y DE FUNCIONAMIENTO	101
4.2.1 INSTALACION DEL POZO DE INYECCION	101
4.2.2 DESARROLLO DE POZOS	102
4.2.3 COLMATACION	103
4.2.4 VIGILANCIA DE LOS POZOS DE INYECCION	104
4.2.5 RECOMENDACIONES FINALES	105
CONCLUSIONES	107
ANEXOS	109
REFERENCIAS	110
BIBLIOGRAFIA	114

## INTRODUCCION.

Los aspectos de drenaje urbano, eliminación de desechos industriales o municipales ha sido resuelto tradicionalmente mediante el diseño de sistemas colectores y de descarga en un punto determinado. Estos puntos de descarga son por lo general; un río, el Mar, lagos, lagunas, etc., sin embargo, existen otras posibilidades no tan explotadas aún, tal es el caso de los pozos de absorción a profundidad. Ello se debe entre otras causas a la poca información con que se cuenta para el diseño y evaluación adecuada de los parámetros que intervienen en un proyecto de esta naturaleza.

El presente trabajo está orientado a analizar la alternativa de los pozos de absorción como una solución al problema de desechos de aguas negras en la Península de Yucatán, la idea surge a raíz de algunos documentos que han sido publicados sobre el tema y de estudios parciales que se han realizado en la zona peninsular.

En el Capítulo I se ha hecho una descripción de las características físicas de la zona, se dan los antecedentes teóricos, además de describir brevemente la problemática del manejo del agua que se ha tenido en Yucatán.

En el Capítulo II se aborda el problema en su aspecto técnico, se definen las características locales deseables, las condiciones que debe reunir el acuífero receptor de las aguas negras, los aspectos hidráulicos de la inyección y los factores de costo más importantes a tomar en cuenta. En este mismo Capítulo se describe esquemáticamente un sistema de eliminación de aguas negras para la Ciudad de Mérida, Yucatán y se analizan las posibilidades de instrumentación del sistema.

Particular importancia se le ha dado al aspecto de la contaminación del medio, por lo cual se ha dedicado un capítulo completo al análisis de los mecanismos de control de tal contaminación, éstos ligados desde luego, con los problemas que pudieran producir los pozos de absorción.

En el Capítulo IV se hace una descripción de los aspectos constructivos de mayor importancia en pozos. No se intentó ampliar demasiado este apartado debido a que los pozos de absorción no deben diferir en mucho de los pozos de extracción en términos constructivos, aquí más bien se resalta los aspectos que deben atenderse en forma diferente que como se hace con los pozos de bombeo.

La prospección y evaluación de cuerpos de agua subterránea así como la perforación y construcción de pozos, son áreas que por sí solas hacen una especialidad, los aspectos teóricos para la primera y los aspectos prácticos para la segunda puede decirse que se encuentran en una etapa de conocimiento muy avanzada. No

asi para la inyección de líquidos al subsuelo, donde una revisión de la bibliografía existente lo demuestra. Es por ello que la esencia de este trabajo radica en tratar de usar lo que hasta ahora se ha investigado en la materia y que algunos autores definen como "el estado del arte" en pozos de absorción.

## CAPITULO I. GENERALIDADES.

### 1.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.

#### 1.1.1. OBJETIVO GENERAL.

Analizar la alternativa considerada mas adecuada para la eliminación de aguas residuales en la Península de Yucatán.

#### 1.1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

Definir factores limitantes y favorables para la utilización de los pozos de absorción como un mecanismo para la eliminación de aguas residuales en la Península de Yucatán.

Estimar en que medida el sistema basado en pozos de absorción puede ser aplicado a las ciudades más importantes que se encuentran localizadas en la Península.

Plantear la localización más adecuada de un sistema de pozos de absorción para la Ciudad de Mérida, fundamentandose para ello en estudios que ya han sido realizados con anterioridad.

Definir en forma general las características de diseño, construcción y operación que son necesarias para un adecuado funcionamiento del sistema planteado.

Sugerir medidas tendientes a disminuir el grado de contaminación provocado por el desecho de aguas residuales.

### 1.2. MANEJO DEL AGUA EN YUCATAN.

#### 1.2.1. EPOCA PRECORTESIANA.

La parte Norte de la Península de Yucatán (Fig. 1), presenta un medio ambiente que influyó las costumbres de los primeros habitantes de la zona. La ausencia de suelo fértil, la falta de agua potable y la carencia de otros recursos naturales hacen de ésta tierra una sofisticada civilización.

La necesidad de agua fue constante y su mala distribución tanto por temporada de lluvia como por áreas de precipitación, ocasionó que los sacerdotes Mayas y la gente común dedicara gran tiempo y esfuerzo a proveerse de este líquido. El constante esfuerzo por obtener agua es sugerido por el nombre de un gran numero de lugares, los cuales terminan en la palabra chen (pozo), ha (agua) y d'znót (cenote). Por ejemplo Kanachen significa necesidad de pozo, Tamchen significa pozo muy profundo. Nacheha significa lugar donde el agua esta distante y Yoczonot significa en el fondo del cenote.

Los mayas pertenecieron a una de las pocas civilizaciones que utilizaron extensivamente el agua subterránea. Por ejemplo, el sitio arqueológico de Dzibichaltum, tiene un cenote cuyo nivel de agua tiene pocos centímetros arriba del nivel del mar, donde una pequeña capa de agua dulce, flota sobre agua salada. Esta fue la fuente de agua potable para un centro de población de varios miles de habitantes. La elevación de este lugar es de solamente 2 o 3 metros arriba del nm'. En contraste el cenote sagrado de Chichen-itza tiene una forma elíptica y diámetros entre 50 y 70 m. El nivel del agua se encuentra alrededor de 20 m bajo la superficie. Esta gran profundidad y las paredes verticales hicieron que el agua de este cenote fuera prácticamente inobtenible, sin embargo, los habitantes de chichen-itza lo utilizaron para su abastecimiento. Estos pozos naturales suplementados con las aguadas, fueron la única fuente de agua en la mayor parte del norte de Yucatán. Esto no ocurrió en el noroeste, que por largos períodos ha estado prácticamente inhabitado. Al igual que como en otras antiguas civilizaciones, entre los Mayas el manejo del agua estuvo íntimamente ligado con la religión. Su principal dios, Chac, era el dios del agua a quien los sacerdotes Mayas oraban y ofrecían rituales y sacrificios para que los asistiera, principalmente a sobrepasar las severas sequías. Los mayas fueron los primeros hombres de América que realizaron trabajos para controlar el agua, construyeron pequeños acueductos y canales que fueron utilizados para conducir el agua hacia las zonas pobladas, construyeron también aguadas de diferentes dimensiones, a las que denominaron chultuns los cuales consistían en depresiones naturales poco profundas, generalmente circulares de fondo plano, algunas de las cuales fueron cubiertas de piedra y arcilla impermeable para impedir que el agua se infiltrara al subsuelo. La mayoría de los chultuns se encuentran bajo los centros ceremoniales de poblados pequeños principalmente hacia la parte sur de Yucatán. La capacidad de muchos chultuns es de 30 mil litros. De acuerdo a cálculos basados en lluvias mensuales y tomando en cuenta el consumo por individuo, un chultun podría abastecer unas 25 personas por año, siendo que las poblaciones grandes requerían de abastecer entre 2 mil y 6 mil gentes.

Los Mayas desarrollaron abastecimientos a partir de las muchas cuevas y cavernas, construyeron accesos en los lados de ella en la parte alta, por donde el agua era acarreada en jarras de barro. El agua para las ceremonias religiosas era obtenida de las cavernas, ya que creían que el agua que escurría dentro de las cuevas era agua virgen, no contaminada, que nunca había sido tocada por el hombre. Para ello eran puestos jarrones con agua en las cuevas con el objeto de almacenar los escurrimientos. Mientras más inaccesibles eran estos lugares, eran más sagrados.

Los tres grandes logros de la civilización maya fueron, el diseño y la construcción de centros ceremoniales, el desarrollo de un preciso calendario perpetuo independientemente del de los indios

y, el uso del concepto del cero; en ellos el agua es un tema dominante. Por ejemplo, los símbolos que representan el agua como son tortugas, conchas de mar y jarrones, son un ornato arquitectónico común. Los Mayas entendieron el concepto del año del agua, su calendario basado en conocimientos astronómicos, les permitió determinar el principio y el final de la temporada de lluvias lo cual permitía llevar a cabo las siembras y cosechas de maíz en el mejor tiempo posible.

Al igual que los mayas, los conquistadores españoles encararon serios problemas de abastecimiento de agua a su llegada a la Península en 1517. El largo período (20 años) requerido por los españoles para conquistar Yucatán se debió entre otras cosas a estos factores. Los Mayas quemaban sus casas y tapaban los pozos con piedras, acarreaban jarrones y se iban a la selva donde ellos obtenían agua de las cavernas. Los españoles se fatigaban rápidamente al viajar a través de este difícil terreno y sufrían durante 3 o 4 días que les llevaba reparar los pozos.

### 1.2.2. FASE MODERNA.

En los últimos años del siglo pasado, el incremento de la población como resultado de la gran demanda mundial del henequén, propició la construcción de miles de pozos. Las primeras bombas mecánicas operadas con máquinas de vapor, fueron introducidas en el año de 1865. En 1880 fue instalado el primer papalote o veleta en el patio de una casa en la Ciudad de Mérida. Este hecho constituyó un aspecto histórico en el uso del agua en Yucatán. En el año de 1950, Mérida, con más de 20 mil veletas, era ya conocida como la Ciudad de los papalotes. Estos han sido abandonados en su mayor parte, debido a la contaminación producida por los dispositivos de desecho como fosas sépticas, generalmente adyacentes a cada papalote.

Por muchos años la mayor parte de de la Ciudad fue abastecida por medio de carritos tirados por caballos, los que transportaban barriles con agua que era vendida a la población. En 1946 se inició el plan para el actual abastecimiento de agua y ahora la Ciudad cuenta con un campo de pozos electrificados y un sistema de distribución de agua potable. En 1959 se iniciaron estudios que permitieron obtener información hidrológica para determinar los problemas que se pueden presentar en el uso y manejo del agua. Los estudios se han encaminado a delimitar y configurar la lente de agua dulce que descansa sobre la salada, por medio de la medición de perfiles de conductividad eléctrica en pozos y cenotes; obtención de datos climatológicos de temperatura, precipitación y evaporación, elaborar planos con la profundidad al nivel del agua así como la elevación al nivel estático sobre el nivel del mar a partir de los primeros bancos de nivel de



precisión instalados en la Península, formar planos que muestran las características químicas del agua subterránea y su interpretación, así como estimar el consumo de agua subterránea.

Otro de los problemas que afronta la Península, es la localización de áreas y dispositivos para depositar las aguas negras de las principales ciudades. Su eliminación se realiza por medio de pozos superficiales a través de los cuales las aguas de desecho se infiltran hasta el acuífero y lo contaminan. El agua subterránea en la Península en general es de buena calidad con respecto a su contenido de materia orgánica, excepto en ciudades y poblaciones, donde su grado de contaminación aumenta mientras la población es mayor.

La mayor parte de la extracción de agua en las zonas costeras, principalmente en el estado de Quintana Roo, se está haciendo por medio de pozos de diseño especial con ademe ciego en toda su longitud sellado en el fondo penetrando solo unos pocos metros dentro del acuífero y permitiendo la entrada de agua dulce al pozo solamente en su parte superior a través de aberturas rectangulares con el labio inferior a la elevación 0.0 m sobre el nivel del mar. De esta manera el pozo funciona únicamente como cárcamo colector de agua dulce, sin permitir el descenso inconveniente del nivel freático de abatirse bajo el nivel del mar propiciaría el ascenso de la intrusión salina. Usando este tipo de captación, es posible eliminar automáticamente la intrusión de agua salada al pozo.

### 1.3. CARACTERISTICAS DE LA PENINSULA DE YUCATAN.

#### 1.3.1. ASPECTOS NATURALES.

##### A) PERFIL TOPOGRAFICO.

A partir de los bancos de nivel existentes (Ref. 2.) se observa que la Península tiene alturas máximas del orden de 30 metros sobre el nivel del mar hacia la parte central y que disminuyen hacia las costas. En el perfil entre Mérida y Puerto Juárez, en los alrededores del poblado de Leona Vicario, existe una zona con alturas entre 4 y 10 metros sobre el nivel del mar, la cual corresponde a una depresión regional de forma alargada, que se extiende desde la laguna de Yalahán al norte, hasta el río hondo al sur, entre México y Belice. Esta depresión puede ser la consecuencia de fallas regionales, orientadas NE-SW.

##### (B) GEOLOGIA

La Península de Yucatán es una plataforma cubierta por sedimentos calcáreos de edad terciaria. Las rocas más antiguas que afloran son calizas del paleoceno, sobre estas rocas se encuentra la formación Chichén-Itzá. El eoceno integrado por una serie de

calizas masivas de color blanco , microcristalinas con algunos horizontes de calizas lacustres, margas yesos y anhidritas. El mioceno superior está representado por la formación Bacalar, constituida por calizas margosas blancas, suaves, con módulos duros y yesos en la parte inferior. Sobre esta unidad se encuentran las formaciones Carrillo Puerto y Estero-Franco del Plioceno. La primera está formada hacia la parte inferior por una coquina de 1 m de espesor, cubierta por una caliza muy dura rica en penrópilas. Hacia arriba se localizan calizas cada vez mas impuras, a menudo arcillosas, de colores que van del amarillento al rojizo, formando suelos letríticos. Los niveles superiores están representados por calizas blancas duras y masivas.

La formación Estero-Franco, está constituida por calizas y dolomías amarillentas, que en ocasiones presentan módulos de calcita con estructura sacaróide. Sobre estas rocas se encuentran una serie de estructuras de moluscos y coquinas masivas de color blanco, que fueron depositadas durante el pleistoceno y el Reciente. Las rocas más nuevas consisten en depósitos cuaternarios, localizados hacia la parte Norte y Oeste.

#### *(C) TECTONICA*

Los ejes tectónicos de la Península de Yucatán se agrupan en dos direcciones prácticamente perpendiculares: Una orientada aproximadamente S30W, localizada a lo largo de la costa oriental, que incluye la fosa marina que bordea hacia el Este, en la que se han desarrollado una serie de fallas, evidenciadas por estudios magnetométricos realizados por PEMEX, así como por alineamiento del Río Hondo, la Laguna de Bacalar y las Bahías de Chetumal y la ascención. La otra orientación está representada por la sierrita de Ticúl, cuyo eje topográfico va de NW a SE (S60E). Estos dos sistemas se presentan también en fracturas de diferentes dimensiones que afectan a las calizas de la costa del Mar Caribe, en especial en la Caleta de Xel-ha, Q.R., donde se ha producido una serie de canales a partir del fracturamiento en las direcciones citadas.

#### *(D) INTRUSION SALINA*

A lo largo de las líneas de costa, el agua de los acuíferos se encuentra descansando sobre el agua de mar debido a la diferencia de densidades. El contacto entre las dos masas de agua, conocido como interface salina se encuentra en equilibrio dinámico, por lo cual, las modificaciones en las condiciones originales del acuífero, producen cambios en la posición del contacto entre las dos masas de agua. La profundidad a la cual se encuentra la interface esta dada por la relación  $h_e = 40h_i$ , donde  $h_i$  es la elevación de la superficie del agua, medida a partir del nivel del mar y  $h_e$  es la profundidad de la interface bajo el mismo nivel de referencia.

calizas masivas de color blanco , microcristalinas con algunos horizontes de calizas lacustres, margas yesos y anhidritas. El mioceno superior está representado por la formación Bacalar, constituida por calizas margosas blancas, suaves, con módulos duros y yesos en la parte inferior. Sobre esta unidad se encuentran las formaciones Garrillo Puerto y Estero-Franco del Plioceno. La primera está formada hacia la parte inferior por una coquina de 1 m de espesor, cubierta por una caliza muy dura rica en penrópidas. Hacia arriba se localizan calizas cada vez mas impuras, a menudo arcillosas, de colores que van del amarillento al rojizo, formando suelos letríticos. Los niveles superiores están representados por calizas blancas duras y masivas.

La formación Estero-Franco, está constituida por calizas y dolomías amarillentas, que en ocasiones presentan módulos de calcita con estructura sacaróide. Sobre estas rocas se encuentran una serie de estructuras de moluscos y coquinas masivas de color blanco, que fueron depositadas durante el pleistoceno y el Reciente. Las rocas más nuevas consisten en depósitos cuaternarios, localizados hacia la parte Norte y Oeste.

### C) TECTONICA

Los ejes tectónicos de la Península de Yucatán se agrupan en dos direcciones prácticamente perpendiculares: Una orientada aproximadamente S30W, localizada a lo largo de la costa oriental, que incluye la fosa marina que bordea hacia el Este, en la que se han desarrollado una serie de fallas, evidenciadas por estudios magnetométricos realizados por PEMEX, así como por alineamiento del Río Hondo, la Laguna de Bacalar y las Bahías de Chetumal y la ascención. La otra orientación está representada por la sierrita de Ticul, cuyo eje topográfico va de NW a SE (S60E). Estos dos sistemas se presentan también en fracturas de diferentes dimensiones que afectan a las calizas de la costa del Mar Caribe, en especial en la Caleta de Xel-ha, Q.R., donde se ha producido una serie de canales a partir del fracturamiento en las direcciones citadas.

### (D) INTRUSION SALINA

A lo largo de las líneas de costa, el agua de los acuíferos se encuentra descansando sobre el agua de mar debido a la diferencia de densidades. El contacto entre las dos masas de agua, conocido como interface salina se encuentra en equilibrio dinámico, por lo cual, las modificaciones en las condiciones originales del acuífero, producen cambios en la posición del contacto entre las dos masas de agua. La profundidad a la cual se encuentra la interface esta dada por la relación  $he=40h_1$ , donde  $h_1$  es la elevación de la superficie del agua, medida a partir del nivel del mar y  $he$  es la profundidad de la interface bajo el mismo nivel de referencia.

#### (E) HIDROLOGIA SUBTERRANEA

La Península de Yucatán está formada por rocas calcáreas del terciario. Estas, debido a su gran permeabilidad y a la formación de la región, originan la existencia de un acuífero calizo con nivel muy cercano a la superficie en casi toda la zona, excepto en la parte sur donde las profundidades máximas son del orden de 100 m, disminuyendo dicha profundidad en forma radial hacia las costas.

A lo largo de la ruta Mérida-Puerto Juárez existen 32 aprovechamientos, en los que la altura del nivel estático con respecto al nivel del mar está al rededor de 2.30 entre Mérida y Xochel: A 3 nivel del mar entre Xochel y Valladolid y de 4 a 0.0, de Santo Domingo a Puerto Juárez. De estas observaciones y tomando en cuenta la relación  $h_e = 40h_i$  se deduce que la lente de agua dulce bajo la Península, tiene espesores que varían de 0 a 160 m, y características como:

(1) La transmisibilidad del acuífero es muy grande.

(2) El flujo del agua subterránea es de forma radial desde el área entre Valladolid y Santo Domingo hasta las costas del Golfo de México y Mar Caribe.

(3) Como se anotó anteriormente la altura del nivel estático, con respecto al nivel del mar varía de 0 m en las costas a 4 m en la parte central de la Península.

(4) Los escurrimientos superficiales no existen, por lo cual se infiltra en prácticamente toda la Península un volumen igual a la diferencia entre la lámina de lluvia y la evaporación.

(5) De estudios anteriores se sabe que estos volúmenes infiltrados corresponden descargas casi simultáneas hacia el mar y en cantidades similares.

#### (F) AGUAS DE DESECHO

La eliminación de aguas negras, como se viene efectuando, contamina el acuífero de agua dulce. En varias ocasiones, se ha pensado en la posibilidad de conducir estas aguas al mar, mediante tuberías que tendrían que depositar los residuos a varios km de la costa, donde el mar tuviera una profundidad suficiente, pero esto constituye una inversión costosa. La solución aparente que se presenta a este problema, es el tratamiento de las aguas negras y la inyección de los residuos a pozos de absorción (REF. 3) a profundidades tales que la salinidad del agua supere las 2000 ppm, donde los desechos por su alta densidad pierden su tendencia a subir.

#### (G) CLIMATOLOGIA

La precipitación media anual en el Noreste, cerca de Progreso, es de 500 mm; en la porción Noroeste, cerca de Chan-Xcan es de 1500 mm, y hacia el sur es de 1200 mm. Con estos datos se calculó la precipitación media anual en el área: 1050 mm, por lo que respecta a la temperatura media anual resultó ser de 16° C. Por el método de L. Turc se obtuvo que la evapotranspiración real es de 954 mm, pero se ajustó por condiciones propias de la zona a 900 mm.

#### (H) EXTRACCION

Habiendo estimado la población de la zona en un millón y cuarto de habitantes y, suponiendo que cada uno utilice 100 litros por día (esta dotación podría parecer baja, sin embargo, en la Península existe un alto déficit en el suministro de agua, por lo que esta cantidad puede considerarse como un promedio) se obtiene un consumo de 50 millones de m<sup>3</sup> que, sumados a los 300 millones que se extraen para riego y abrevadero, dan un total de 350 millones de m<sup>3</sup> por año.

#### (I) ECUACION DE BALANCE VOLUMETRICO

En base a los datos hidrológicos superficiales se estableció la siguiente ecuación de balance volumétrico  $(P-Er)A=VI$  donde P es la precipitación; Er la evaporación real; A el área y VI el volumen infiltrado. La precipitación menos la evaporación real es igual a 150 mm los cuales multiplicados por los 62,240 Km<sup>2</sup> que corresponden al área de la mitad Norte de la Península da un volumen de agua infiltrada al acuífero de alrededor de 9350 millones de m<sup>3</sup> cada año. Esta cantidad menos los 350 millones de m<sup>3</sup> utilizados, da un volumen disponible de agua que va al mar de 9000 millones de m<sup>3</sup> por año, que equivale a un caudal instantáneo de 254 m<sup>3</sup>/seg.

#### (J) HIDROGEOQUIMICA

En la zona costera se localiza el agua sodico-clorurada originada por la contaminación de agua de mar que hay bajo el acuífero; el segundo tipo contiene agua mixta, que corresponde a una área de transición entre la zona costera y la parte central de la Península y el tercero tiene un agua de la familia cálcica bicarbonatada, ya que circula por rocas calizas.

Existen zonas esporádicas como la Norte de Chetumal y al Noroeste de Valladolid, con agua CaSO<sub>4</sub> (cálcica sulfatada) por la presencia de horizontes de yeso y anhidrita entre las formaciones calcáreas. El agua subterránea se estratifica de acuerdo a su densidad, lo cual, está en función entre otras cosas, de la salinidad. Así el agua con mayor contenido de sales tiende a ocupar las partes bajas, mientras que la menos salada, flota sobre la primera.

En la parte central de la Península, Únicamente en los cenotes de Sayab-Ucú, Kol-Ac, Unión Libre y Valladolid el agua dulce varía de 0 a 25 m; la zona con mezcla de agua dulce-agua salada varía de 7 a 20 m, y el agua salada se encuentra a profundidades mayores, entre 8 y 35 m. En investigaciones realizadas (Ref. 4) hacia las costas de la Península, han sido detectados distintos cuerpos de agua de diferente salinidad, Hacia la parte superior se encuentra agua dulce con menos de 1000 ppm. Bajo ésta se encuentra un horizonte que corresponde a una zona de mezcla de agua dulce y salada. En cenotes lo suficientemente profundos, puede detectarse agua salada en el fondo, la cual tiene concentraciones mayores de 2100 ppm, de sólidos totales disueltos.

La población de Cancún Quintana Roo es abastecida de agua potable por medio de 13 pozos perforados a 25 km al Este de la costa, a orilla de la carretera Puerto Juárez-Valladolid. El estrato de agua dulce, se presenta en los pozos 4, 11 y 13 con un espesor de menos de 1 m. El horizonte de mezcla de agua dulce salada, se observa en todos los pozos, con un espesor que varía de pocos cm a 7 m.

#### *(K) CARACTERISTICAS BIOLÓGICAS DEL AGUA*

En general, el agua subterránea de la Península es de buena calidad respecto a su contenido de materia orgánica, excepto en ciudades y poblaciones, donde las aguas negras municipales son infiltradas al acuífero por medio de fosas sépticas y cenotes. El grado de contaminación aumenta mientras la población es más grande, es por ello que el mayor problema se registra en la Ciudad de Mérida en donde el Dr. José Herrera Díaz, en su trabajo titulado "Enfermedades Hídricas" (1960), al analizar las estadísticas de mortandad infantil, observó que el 4% de las defunciones en niños menores de 6 años, fueron ocasionadas por enfermedades hídricas. Actualmente este porcentaje ha disminuido, sin desaparecer, debido a que la Ciudad ya cuenta con un sistema de agua potable; mas no de alcantarillado, por lo cual el acuífero aún tiene un alto grado de contaminación (Ref. 5).

#### *(L) CARACTERISTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS*

Al comparar resultados de análisis efectuados, es posible dividir el área en dos partes: Parte central de la Península y zona costera. En la parte central, el agua es general de buena calidad respecto a los constituyentes físicos y químicos. Sin embargo, existen en zonas aisladas, concentraciones altas de STD y sulfatos que hacen que esta agua no sea apropiada para uso potable. En la zona costera existen en algunos casos concentraciones altas de STD, donde predominan el Sodio y el Cloro, haciéndola inapropiada para usos domésticos. Esto, como se

menciono anteriormente, se debe a que el agua dulce se encuentra en espesores muy delgados "flotando" sobre el agua de mar, lo cual ha acarreado problemas de abastecimiento de agua, por ello, la extracción de agua subterránea debe hacerse mediante dispositivos especiales.

#### 1.4. ANTECEDENTES TEORICOS.

##### 1.4.1. CAUSAS DE CONTAMINACION DE AGUA SUBTERRANEA.

La contaminación del agua subterránea es un proceso continuo natural (Ref. 6), que ha sufrido un incremento con el desarrollo de las actividades del hombre, el cual ha permitido la semidestrucción de acuíferos naturales muy importantes.

Las aguas subterráneas contienen elementos químicos no propios de su estructura original, entre ellos; sales disueltas que son arrastradas del suelo y rocas por la acción del agua de lluvia. En zonas de alta precipitación, la acción filtrante del suelo impide que grandes cantidades de sales penetren hasta los mantos acuíferos subterráneos. Sin embargo, en zonas de baja precipitación, la acción solvente del agua provoca que gran cantidad de sales si sea transportada. Más aún en regiones como la Península de Yucatán donde el drenaje natural de la tierra está restringido y donde se encuentran formaciones de roca altamente solubles, también se presentan efectos negativos en la calidad del agua, entre los que pueden mencionarse están:

#### (A) INTRUSION SALINA

Al observar el nivel estático en la Península de Yucatán se estimó la profundidad del agua marina de acuerdo con el Principio de las Lentes Convergentes; idealizando el fenómeno en la figura No. 2 tenemos:

$$H=h+t$$

(1)

donde; H es la altura del agua dulce bajo el nivel del mar, y t es la altura del agua dulce sobre el mismo. Considerando además que G es la densidad del agua del mar que varía de 1.024 a 1.026 y que 1 m<sup>3</sup> de agua de mar pesa 1026.4 Kg y un m<sup>3</sup> de agua dulce pesa 1001.4 Kg, tenemos entonces que la relación de dichos pesos es:

$1026.4/1001.4=1.025$  es decir, el agua salada pesa 1.025 veces más que el agua dulce; por lo tanto una columna de agua salada de L metros podrá equilibrar una columna de 1.025 m de agua dulce, y como  $H=1.025L$  entonces:

$$H=GL$$

(2)

Iguando las ecuaciones 1 y 2, considerando que  $L=h$ , y despejando a  $h$ , tenemos:

$$h = t / (G - 1) \quad (3)$$

Siendo la ecuación No. 3 la expresión matemática del Principio de las Lentes Convergentes. Para determinar el valor de  $t$  es preciso conocer las profundidades del nivel estático y la cota de la boca del pozo. Por ejemplo; si  $t=1$ , entonces  $h=1/(1.025-1)=40m$ , de lo que podemos concluir que por cada metro de agua dulce sobre el nivel del mar, habrá 40 m de agua salada bajo el nivel del mismo.

Por otra parte si en un punto localizado a  $X$  distancia de la costa se efectúa una extracción, en dicho punto se formaran dos conos; uno de depresión en la parte superior y otro de succión en la parte inferior cuyos vértices son  $t_1$  y  $h_1$  respectivamente. Cuando  $t=t_1$  y  $h_1=0$ , teóricamente el agua salada habrá llegado al nivel del mar provocando la destrucción de agua dulce (Fig .3).

Sabiendo que;  $h_1 = t_1 / (G - 1) = t_1 / 0.025$ , entonces como consecuencia el descenso de la superficie piezométrica de agua salada asciende una cantidad igual a  $h-h_1$ , por lo tanto:

$$h - h_1 = (t - t_1) / 0.025. \quad (4)$$

Si por ejemplo, hacemos  $t-t_1=0.90$  m, entonces;  $h-h_1=0.90/0.025=36m$ . Esto quiere decir que si el agua dulce que se encuentra sobre el nivel del mar desciende 0.90 m por efecto de un bombeo excesivo, el agua de mar que se encuentra debajo del agua dulce ascenderá 36 m. Esta relación no siempre es cierta, debido a que el equilibrio no es rigurosamente hidrostático, sino hidrodinámico, por lo tanto el agua de la masa flotante se mueve a través de la red de flujo y en este caso la densidad ( $G$ ) del agua de mar será igual a 1; luego entonces,  $h_1=t/(1-1)$  lo cual es indeterminado.

Con el fin de determinar la capacidad límite de extracción en un punto determinado, se procurara que el abatimiento  $t$  nunca alcance el valor de  $t_1$  y se fijen valores para  $t$ , de tal suerte que la profundidad del pozo no sobrepase el valor de  $h$ , evitando así el contacto con el cono intrusivo. De acuerdo con este principio y con pruebas de campo ha sido estudiado el nivel estático de la Península de Yucatán y en particular de la Ciudad de Mérida.

#### (B) INTERCONEXION DE ACUIFEROS

En el subsuelo existen depósitos de agua altamente mineralizada y en ocasiones con altos contenidos de grasas u otros materiales tóxicos, colindantes con acuíferos de buena calidad, que generalmente se extrae en buenas cantidades, esta situación



provoca diferencias de presión hidrostática que culmina con la aportación de aguas contaminadas hacia el acuífero de agua limpia. La interconexión puede ser producida por la perforación de pozos que permitan el paso de agua contaminada hacia acuíferos de buena calidad, por fallas geológicas u otros movimientos del mismo tipo.

#### *(C) MOVIMIENTOS GEOLOGICOS*

Debido entre otros, al aumento de temperatura producido en zonas volcánicas, que incrementan la presión de los acuíferos y aceleran en ocasiones las reacciones químicas que se traducen en aumento de minerales. Aunque no está comprobado, se presume que el arsénico en forma coloidal unido a los suelos arcillosos es desprendido de éstos por las altas presiones que se traducen en los asentamientos de tierra.

#### *(D) RIEGO CON AGUAS SUPERFICIALES*

Las aguas de corrientes superficiales, aunque no estén severamente contaminadas, contienen elementos orgánicos e inorgánicos utilizados por los organismos acuáticos como alimento. Estas sales suspendidas y disueltas son benéficas para el crecimiento de plantas y animales; sin embargo, de llegar a infiltrarse en los mantos freáticos produce cierto grado de contaminación. Cuando el suelo ha alcanzado su punto de saturación con respecto a los contaminantes en las aguas superficiales, estos empiezan a ser drenados hacia las aguas subterráneas aumentando sus impurezas. La contaminación producida en esta forma se refleja de la misma manera que en la de infiltración natural.

#### *(E) RIEGO CON AGUAS SUPERFICIALES*

El elemento que mayor efecto tiene sobre las aguas subterráneas es el nitrógeno, ya que se ha detectado como uno de los elementos que por su estructura molecular en las diferentes formas que se presenta penetra más los estratos porosos. En las aguas provenientes de usos domésticos, se presentan grandes concentraciones de compuestos nitrogenados que al ser esparcidos en el suelo mediante riego, pueden provocar condiciones severas de contaminación en los mantos acuíferos. Otro contaminante son los detergentes, ya que se ha encontrado que la mayoría de las sustancias activas al azul de metileno, pueden penetrar a grandes profundidades los estratos el subsuelo y, por tanto, contaminar los mantos acuíferos subterráneos.

#### *(F) RIEGO CON AGUA SUBTERRANEA*

El aumento en la concentración de sales disueltas en el agua, debido al efecto de la evaporación y evapotranspiración provoca que al utilizarse este líquido para riego se acumule cierta

cantidad de sales en la superficie de la tierra. Esta concentración aumentará en la medida que se continúe la práctica de riego, hasta llegar a un límite que no puede ser tolerado por las plantas. En este momento las sales son lavadas de los terrenos, produciéndose aguas con altísima concentración de sales, éstas frecuentemente se infiltran al subsuelo con el lógico incremento de la contaminación en los acuíferos.

#### *(G) ELIMINACION DE DESECHOS INDUSTRIALES*

Las aguas residuales que no reciben tratamiento son en general encauzadas hacia escurrimientos superficiales, estas aguas son utilizadas en muchos lugares para riego con el deterioro ya antes explicado.

#### *(H) DESCARGA EN POZOS DE ABSORCION*

El análisis de la contaminación producida por este fenómeno se trata en este trabajo ya que es el tema principal. En general, la contaminación estará en función únicamente de la capacidad de asimilación del acuífero de los elementos contaminantes en la descarga.

#### *(I) DESCARGA EN LAGUNAS DE INFILTRACION Y EVAPORACION*

Todas las condiciones mencionadas en el inciso (A) se presentan en el vertido de aguas residuales en lagunas de infiltración y evaporación. El aumento en la posibilidad de infiltración por los largos tiempos de retención que se tienen y el aumento en la concentración de elementos contaminantes debido a los efectos de la evaporación, afectan directamente la rapidez e incremento de la contaminación de las aguas subterráneas.

#### *(J) ELIMINACION DE DESECHOS SOLIDOS*

Entre los desechos que más altamente contribuyen a la contaminación de los mantos acuíferos son los que contienen altos porcentajes de material orgánico, como empacadoras de conservas. Con el agua de lluvia a temperatura ambiente se realizan algunas reacciones bioquímicas produciéndose varios compuestos como ácidos orgánicos, compuestos químicos solubles, etc., que son arrastrados hacia el subsuelo incorporándose a los cuerpos de agua. En estas condiciones pueden reproducirse gran cantidad de microorganismos sobre todo bacterias y virus, que pueden penetrar hasta los mantos acuíferos.

#### 1.4.2. FACTORES FISICO-QUIMICOS QUE RIGEN LA CONTAMINACION.

Los factores fisico-químicos que intervienen en la modificación de la composición del agua natural son muchos y muy diversos, por lo que el análisis de todos ellos no es posible en un trabajo como el que nos ocupa. Sin embargo en este punto se describen aquellos de mayor relevancia en un estudio de contaminación de agua subterránea.

##### (A) TIPOS DE REACCIONES EN EL AGUA. EQUILIBRIO QUIMICO

Existen principalmente dos tipos de reacciones para alcanzar y mantener el equilibrio químico en la composición de las aguas: Reacciones reversibles, que pueden alcanzar el equilibrio químico en las condiciones naturales que prevalecen en la superficie terrestre o cerca de ella.

El segundo tipo de reacciones comprende aquellas cuyo equilibrio es difícil de alcanzar. Pueden abarcar procesos relativamente complejos y velocidades de reacción bajas. Los diferentes tipos de reacción son importantes, ya que es posible definir los efectos al introducir materiales contaminantes a los acuíferos.

##### (B) SOLUBILIDAD

Se define como la máxima cantidad de soluto que puede estar permanente en solución bajo condiciones fijas de presión y temperatura y en presencia de material no disuelto, del cual proviene el soluto. El producto de solubilidad es una forma de constante equilibrio para la solución de un compuesto determinado. Las constantes de solubilidad de los materiales del subsuelo así como los factores que la modifican son de gran importancia en los estudios de contaminación, ya que la principal causa de adición de materiales contaminantes al agua freática se debe a la dilución de sales y elementos contenidos en los estratos de suelo por la acción de agua de lluvia que se infiltra.

##### (C) ADSORCION E INTERCAMBIO IONICO

Este tipo de reacciones ocurren entre un soluto en solución y una superficie. Se han desarrollado (Ref. 7) varias ecuaciones para valorar la adsorción, las cuales se denominan isotermas de adsorción debido a que sus parámetros están evaluados a temperatura constante. Entre las más conocidas está la siguiente:

$$x/m = R \cdot C^n$$

(5)

donde;  $x/m$  es el peso de iones adheridos por unidad de peso de adsorbente.  $C$  es la concentración de adsorbato remanente en la solución y  $R$  y  $n$  son constantes.

Otra isoterma menos empírica es la de Langmuir, la cual asume que la adsorción es proporcional a la superficie del adsorbente no cubierta por el adsorbato, su ecuación es:

$$x = R \cdot s \cdot C$$

(6)

donde  $s$  es la capacidad total del intercambio por unidad de peso del adsorbente.

Estas expresiones pueden utilizarse para calcular la capacidad de adsorción de iones simples, pero tienen poco valor para estudios de intercambio iónico. Cuando dos o más iones compiten para intercambiar posiciones, se puede usar una expresión de la Ley de Acción de las Masas para describir su equilibrio. Las partículas de suelo tienen cierta capacidad para adsorber elementos contenidos en el agua que se infiltra. Así mismo, los elementos en el estrato del subsuelo tienen capacidad de intercambiar iones, lo que provoca que algunos elementos contenidos en el agua que se infiltra se unan a las partículas del suelo por medio de cargas electrostáticas. Estos dos aspectos intervienen grandemente en los procesos de contaminación, ya que gran cantidad de los elementos contaminantes que se infiltran son retenidos en los estratos del suelo evitando su transporte. Es obvio que la capacidad de adsorción e intercambio iónico de los elementos del suelo es limitada; por tanto, después de agotada esta capacidad, los elementos que originalmente eran retenidos, penetran hasta las aguas subterráneas (Ref. 8).

#### (D) POTENCIAL HIDROGENO

Es la expresión en unidades logarítmicas de la concentración efectiva de los iones de hidrógeno. Se define el pH como el logaritmo negativo de base 10 de la concentración de iones hidrógeno. El agua pura se encuentra ligeramente disociada en iones  $H^+$  y  $OH^-$ , de tal manera que su constante de equilibrio puede expresarse:

$$(H^+) (OH^-) / (H_2O) = -14.00$$

(7)

Si la solución es neutra se tiene que  $(H^+) = (H^-)$  y como la solución está muy diluida se puede considerar que  $(H_2O) = 1$  de aquí que el pH neutro sea igual a 7.0. El pH de las aguas neutrales está determinado por la relación de equilibrio del sistema agua sales disueltas y las reacciones químicas que ocurren en el sistema que involucran iones hidrógeno. Así, suponiendo que las aguas subterráneas se encuentran en equilibrio químico con la fase sólida y el pH está determinado por las relaciones de equilibrio, el pH de las aguas provenientes de la recarga o de inyección puede afectar la cantidad de sólidos disueltos, alterando en consecuencia, la calidad del agua.

#### (F) CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

Es la propiedad que presenta una sustancia para transportar la corriente eléctrica. La conductividad del agua se modifica al aumentar la cantidad de sólidos disueltos o bien por medio del tipo de iones en solución. En la zona de recarga de un acuífero, el agua presenta valores de conductividad pequeños, los que aumentan a medida que el agua fluye a través del acuífero ya que durante el flujo, el agua disuelve las formaciones que la confinan. Esta característica se ha utilizado para determinar el sentido del flujo en los acuíferos. En forma similar, la conductividad tiende a aumentar con la profundidad de los pozos, debido a que durante el proceso de infiltración del agua a través de los estratos del suelo, éstas disuelven sales que se le incorporan. Observaciones en este sentido ayudan a determinar el cambio de la calidad del agua con la profundidad.

#### 1.4.3. CONSIDERACIONES SOBRE EL KARST.

##### (A) IMPORTANCIA PRACTICA DEL KARST.

El conocimiento de las peculiaridades hidrológicas del Karst tiene una importancia creciente, no solo por el interés de estas formaciones, sino también por la influencia en una serie variada de problemas geotécnicos y otros. Los fenómenos kársticos son el conjunto de transformaciones que se producen en una región caliza como consecuencia de la circulación del agua (Ref. 9). La generación de estos fenómenos es precisamente una de las diferencias fundamentales que existe entre la circulación cárstica y cualquier tipo de circulación de aguas de fisura; los fenómenos kársticos se producen como resultado del equilibrio del sistema agua-caliza. El agua es el elemento generador o activo, mientras que la caliza es el medio donde se desarrollan los fenómenos. El fenómeno kárstico se produce mientras existe circulación hídrica; cuando la circulación se detiene, el fenómeno kárstico deja de producirse.

##### (B) GEOLOGIA DE LA CALIZA

La caliza es el elemento permanente del fenómeno kárstico. Es el medio de circulación del agua kárstica en el interior de la masa de la caliza y es el dominio donde tiene lugar la larga y compleja evolución subterránea. No puede desprejarse el conocimiento de este medio kárstico si quiere conocerse, el desarrollo del Karst, puesto que en él tiene lugar el complejo conjunto de fenómenos físico-químico-geológicos que se denomina carstificación. No obstante la hegemonía que hoy tiene la caliza en el planeta, es una roca de formación relativamente reciente en comparación con las rocas silíceas, cuyos orígenes lejanos hay que buscarlos en la evolución endógena de la tierra. La caliza es un material fundamentalmente organógeno, y por consiguiente se ha desarrollado paralelamente a la evolución biológica desde la

aparición de la vida en la tierra, así vemos que las calizas más antiguas aparecen en el planeta en el precámbrío II, hace unos 2000 millones de años, y se desarrollan ampliamente en el silúrico (hace 350 millones de años) con la formación de los primeros arrecifes coralinos.

Con el nombre de caliza se designa en realidad un conjunto de rocas de composición a veces bastante heterogénea, si bien en toda ella domina el  $\text{CaCO}_3$ . Las calizas están pues constituidas principalmente por calcita. En las verdaderas calizas el contenido de carbonato de calcio excede el 95%, el resto está constituido por  $\text{MgCO}_3$  (carbonato de magnesio), sílice, alúmina, óxidos de hierro y magnesio, álcalis y otros componentes en mucha menor proporción.

El término más próximo a las calizas son las dolomías, que se forman cuando la cantidad de  $\text{MgCO}_3$  se eleva al 40%. Entre calizas y dolomías existe una gama de términos intermedios que se denominan colectivamente calizas dolomíticas. Igualmente, cuando el sílice aumenta desproporcionadamente, se forman las calizas planíticas o calizas silíceas, cuyo límite extremo son las planitas cuando la sustitución de  $\text{CaCO}_3$  por el  $\text{SiO}_2$  ha sido casi total. La caliza es una roca compleja no solo en su composición química, sino también en su contenido mineral. Así se tienen; Minerales carbonatados (calcita, argonito, dolomita, ankerita, siderita), Minerales silíceos (cuarzo, feldespatos y arcillas) y diversos accesorios (Glaucónota, pirita, betones) > Entre los minerales carbonatados, los más importantes por lo frecuente, son, la calcita y el argonito, pero siempre con mayor porcentaje del primero se encuentran las rocas. En cuanto a la dolomita, cuando la roca tiene elevada proporción, es llamada ya dolomía.

El origen de las calizas es muy variado, ante todo se trata de una roca sedimentaria, formada en cuencas marinas y lacustres. Puede ser detrítica, puede ser roca de precipitación química o bioquímica, o calizas litoquímicas, pero la caliza por excelencia es una roca organógena, formada por la concentración de millares y millares de caparazones de foraminíferos, acumulaciones de conchas de moluscos o de braquiópodos, o por construcción de arrecifes coralinos. Otros muchos grupos geológicos pueden contribuir a la generación de caliza, como los briozos, los Tabulados, los estromatopóridos, todos ellos recifales. Las calizas sometidas a los procesos de metamorfismo, pueden cambiar totalmente de características y aún de composición. La transformación más elemental consiste en un enriquecimiento de  $\text{CaCO}_3$  (hasta 98.6%). Una transformación mayor consiste en su enriquecimiento en sílice y generación en silicatos de calcio, originándose las anfibolitas y oficalcitas, rocas que difieren ya mucho de las calizas.

Para dar una idea de la clasificación textural de las calizas, Folks (Ref. 9) considera cinco tipos: I. Rocas con predominio de aloquímicos y cemento de calcita espática; II. Rocas con predominio de aloquímicos y micrita; III. Rocas con predominio de micrita; IV. Rocas organogéneas recifales y V. Rocas ampliamente dolomitizadas.

Como toda roca sedimentaria la caliza tiene dos tipos de estructura; (1) Congénita o sedimentaria, producida durante la sedimentación; (2) Tectónica o mecánica, producida por acciones orogénicas, posteriores casi siempre a la sedimentación. La estructura congénita se manifiesta ante todo por la presencia de planos de estratificación y por la disposición interna de los elementos macroscópicos del material sedimentario. La disposición interna de los elementos macroscópicos constituye la estructura interna del estrato, que varía según el origen de la caliza. De acuerdo a su estructura las calizas pueden ser, calizas detríticas, calizas vaporíticas y calizas organógenas. La estructura congénita está a menudo alterada por la estructura tectónica, producida por un conjunto de fuerzas que han actuado posterior a la sedimentación. La caliza es una roca de plasticidad media y variable, puesto que cambiará en relación con la estructura congénita. Así, las rocas calizas en bancos delgados tienen un grado de plasticidad muy superior a las calizas masivas. Aquellas se plegan fácilmente, éstas en cambio se rompen. En una serie de caliza pues, la plasticidad del conjunto está en razón inversa del espesor de los estratos. En las calizas más plásticas se desarrollan plegues, en las más rígidas roturas y en las de plasticidad media, roturas y plegues al mismo tiempo.

La caliza aparece involucrada en toda clase de estructuras tectónicas y, por consiguiente, se encuentra en todos los estilos tectónicos de tipo alpino, interviniendo en toda clase de plegamientos. Las calizas tienen también, a veces, estilo disarmonico cuando se plegan en capas delgadas entre otras mas potentes, y estilo extrusivo, cuando un anticlinal de caliza perfora una capa de margas o arcillas suprayacentes.

### (C) FENOMENOS KARSTICOS

Ya se ha mencionado que las posibilidades de disolución de la caliza dependen de dos factores; (1) Composición química del agua, y (2) Acidez del agua kárstica. El contenido de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  de la caliza es esencial para la disolución, las calizas muy puras son muy solubles. Los problemas de solubilidad de las calizas pueden entenderse al amparo de las siguientes consideraciones: Bajo las condiciones normales, la presión de una atmósfera, equivale a la presión parcial de  $\text{CO}_2$  de 0.0003 atmósferas. A esta presión se disuelven alrededor de 63 ppm de  $\text{CaCO}_3$  por litro. Un pequeño incremento en la presión parcial de  $\text{CO}_2$  representa un importante aumento de solubilidad de  $\text{CaCO}_3$ . Generalmente los porcentajes de

CO<sub>3</sub>Ca del agua subterránea no exceden de 400 ppm, y la mayoría no alcanza los 200 ppm. La solubilidad de la caliza solo puede realizarse bajo la forma de bicarbonato de calcio, puesto que el CaCO<sub>3</sub> es complementamente insoluble. Al hablar de agua kárstica debe tenerse presente que el CO<sub>2</sub> contenido es el principal responsable de esa transformación.

La erosión kárstica dependerá de las características de circulación del agua en la caliza. Las aguas cautivas circulan por los conductos kársticos llenandolos totalmente y, por tanto, el agua discurre a presión hidrostática, puesto que por un punto determinado del conducto gravita una columna de agua, con una presión total superior a la atmosférica. Las aguas kársticas libres circulan impulsadas exclusivamente por la acción gravitatoria. El trabajo de erosión de las aguas cautivas viene determinado por un componente vertical, de cuya magnitud dependerá la cantidad de aquella. Esta componente equivale evidentemente a la presión hidrostática en un punto dado del conducto kárstico, y su valor viene dado por el peso de la columna de agua de sección unitaria y con una altura igual a la existente entre el punto considerado y el nivel piezométrico. Existen varias formas de erosión por agua cautiva, pero las formas normales son las arrosariadas o con forma de embudidos. La circulación libre presenta algunas diferencias, pero se cumplen las mismas leyes (erosión ascendente, máxima pendiente y mínima resistencia, y adquisición de un perfil de equilibrio).

El conjunto del medio calizo, la fisuración, el agua circulante y el trabajo de disolución y erosión inherentes a la circulación kárstica, constituyen lo que podemos denominar un aparato kárstico. El prototipo de aparato kárstico debiera concebirse desarrollado sobre una masa de calizas horizontales, sobre la masa caliza se establecieron una serie de zonas o puntos de adsorción, de tal modo que por ellos penetrará el agua pluvial o la de escurrimiento, circulando a continuación a través de las fisuras hasta emerger hasta el contacto de la caliza con el substrato impermeable. Las formas de absorción corresponden a dos tipos distantes; Formas cerradas, en la cual la absorción se realiza lentamente, y formas abiertas en las que el agua puede penetrar en masa. Las principales formas de adsorción son; cerradas (Dolinas, Ovalas, Poljes, Valles ciegos, Perdidas y Valles muertos), Abiertas (Simas, Sumideros, Cuevas, Ponor, Marinos) y Aloctonas (Cañones).

El segundo grupo de formas del aparato kárstico son las formas de conducción. Son las mas importantes desde el punto de vista de la circulación, puesto que por ellas el agua es conducida en su recorrido desde las superficies de absorción hasta las surgencias. Son, por lo tanto, las que tienen el máximo interés desde el punto de vista hidrogeológico. Las formas de conducción son ante todo formas estructurales, admitiendo generalmente, dos tipos de circulación; los sistemas circulatorios localizados,



constituidos por conductos grandes, penetrables al hombre, y la reserva estática inferior del karst o capa kárstica, formada por conductos no penetrables. El primer tipo tiene una serie de variantes muy diversas, su existencia requiere características estructurales particulares de la caliza en que se desarrollan, tal es el caso de las dolomías hetagilencas o las de la Bahía de Alcudia en Mallorca España. El segundo tipo de conductos puede tener la forma de conductos embrionarios aislados, redes de endiduras o capas kársticas. Los tres tipos puede ser considerados si se quiere como fases evolutivas de un mismo proceso, especialmente los dos primeros, puesto que la conjugación de conductos aislados puede formarse una red, y de la anastomosis de redes puede llegarse a constituir una capa kárstica.

#### 1.4.4. FLUJO DE AGUA EN SUELOS.

##### (A) FLUJO UNIFORME

La Ley de Darcy muestra la existencia de una relación lineal entre el gradiente hidráulico y la velocidad de descarga del flujo a través del medio poroso. Establece su aplicabilidad solo dentro de los límites del flujo laminar, dado que el carácter del flujo es definido por el Número de Reynolds, varios investigadores (Ref. 10) han hecho ver que el límite de dicho número para que un flujo cambia de laminar a turbulento oscila entre 1 y 12 si en la ecuación siguiente debida a Reynolds;

$$R = v \cdot D \cdot \rho / \mu$$

(10)

Se substituyen los valores de  $\rho$  y  $\mu$  para el agua y se acepta  $v = 0.25$  cm/seg, se tiene  $R \leq 1$  con tal de que  $D$  no sobrepase el valor de 0.4 mm, que corresponde a una arena gruesa. Así queda garantizada la validez de la Ley de Darcy para los suelos finos, hasta el tamaño de la arena gruesa por lo menos. Cabe mencionar que la naturaleza laminar del flujo de agua a través del suelo representa un caso excepcional en la hidráulica ingenieril.

Las ecuaciones hidrodinámicas que rigen el flujo del agua a través de los suelos son representadas a continuación mediante un tratamiento matemático sencillo. Considerese una región de flujo, de la que forma parte un elemento (Fig. 7) de dimensiones  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ . Supongase que la velocidad  $V$  con que el agua pase por el elemento posee tres componentes,  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  y que éstas son solo función de  $x$ ,  $y$  y  $z$  respectivamente, pero no del tiempo, ni de ninguna otra variable (FLUJO ESTABLECIDO). En estas condiciones, si en las caras I las componentes de la velocidad del agua son  $V_x$ ,  $V_y$  y  $V_z$ , en las caras II estas mismas componentes serían:

$$V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx \quad (11a)$$

$$V_y + \frac{\partial V_y}{\partial y} dy \quad (11b)$$

$$V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} dz \quad (11c)$$

Admitiendo suelo saturado y no compresibilidad de éste y del agua y considerando que el gasto que pasa por una sección puede expresarse por el producto del área por la velocidad del flujo, entonces:

$$V_x dy dz + V_y dx dz + V_z dx dy = (V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx) dy dz + (V_y + \frac{\partial V_y}{\partial y} dy) dx dz + (V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} dz) dx dy$$

reduciendo terminos semejantes:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

Esta ecuación juega un papel importante en la teoría de flujo de agua y se conoce con el nombre de ecuación de continuidad. Si ahora se supone válida la Ley de Darcy se podrá escribir para la velocidad de descarga del agua a través del elemento:

$$V = -k \frac{\partial h}{\partial l} \quad (13)$$

En la que K es el coeficiente de permeabilidad; normalmente a 15.5' C; h, la altura diferencial entre dos secciones transversales verticales; y l, la distancia horizontal entre dichas secciones. Con lo cual expresando el gradiente hidráulico a través de sus tres componentes, da lugar a:

$$V_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (14a)$$

$$V_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (14b)$$

$$V_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (14c)$$

En las ecuaciones anteriores se ha supuesto el caso mas general en que el suelo se considera anisótropo en lo referente a su permeabilidad. Introduciendo estas últimas ecuaciones en la de continuidad se tiene:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (15)$$

Ecuación que describe matemáticamente el flujo en la región considerada. Si el problema se asume bidimensional (por conveniencia) y se considera que el suelo a través del que ocurre el flujo en estudio, es además, isotrópico en lo referente a la permeabilidad, entonces la ecuación anterior se transforma en:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \text{OPER2 } h = 0 \quad (16)$$

Ecuación matemática que se le conoce con el nombre de ecuación de Laplace. A partir de la figura 16 puede obtenerse una expresión que proporcione el gasto que pasa a través del elemento en el

tiempo dt. Teniendo en cuenta que el gasto puede expresarse como el producto del área de la sección por la velocidad del flujo, que el suelo es isótropo y dando un tratamiento bidimensional:

$$dq = k\left(\frac{\partial h}{\partial x} dy + \frac{\partial h}{\partial y} dx\right) \quad (17)$$

#### (B). FLUJO UNIFORME

Dupuit aplico la ley de Darcy a flujo no uniforme y desarrollo su teorema el cual dice:

$$V = k(l - \frac{\partial y}{\partial x}) \quad (18)$$

en el que x e y son las coordenadas de la superficie libre del agua subterránea en un acuífero libre o la superficie piezométrica en un acuífero confinado. El teorema es aplicable mientras las pendientes sean pequeñas, tanto que la tangente pueda ser substituida por el seno, y mientras las componentes del flujo vertical puedan ser despreciadas. En consecuencia, se asume que el flujo horizontal se está moviendo a través de secciones verticales. Según Bauman (Ref. 11) el teorema de Dupuit para flujo no uniforme conduce a resultados satisfactorios, siempre y cuando la condición de flujo pueda ser aproximada fuera de un flujo neto. Esto y su simplicidad explican su popularidad y amplio uso, ocasionalmente, sin embargo, más allá de las fronteras de su aplicabilidad.

#### (C) FLUJO NO ESTABLECIDO

Ya que la velocidad del agua subterránea es del orden de un milésimo de metro por segundo, la carga de velocidad es despreciable y puede siempre ser ignorada. Por lo tanto, el teorema de Bernoulli en su forma usual no es aplicable y ni siquiera reproduce el fenómeno los cuales están predichos sobre la existencia de una carga de velocidad significativa.

La descarga de flujo no establecido es una variable y la ecuación de la curva de superficie o línea freática es de la forma general  $y=f(x,t)$ . Si el flujo a través de la sección vertical únicamente es considerado, entonces para cualquier tiempo particular t la pendiente de la superficie del agua es  $\frac{\partial y}{\partial x}$ . A cualquier distancia particular x desde el origen el valor del levantamiento de la superficie del agua es  $\frac{\partial y}{\partial t}$ . En consecuencia, cada cambio en la columna de agua y, debe estar ligado a un cambio correspondiente en la descarga siempre y cuando el agua se considere incompresible.

La figura 8 muestra una sección longitudinal de un perfil de parte del prisma de agua subterránea para el caso general de una base inclinada. La línea sólida representa la superficie del agua

en el tiempo  $t$  y la línea quebrada al  $t+dt$ . Todas las partículas de agua que han pasado la sección I-I' al tiempo  $t$  están pasando la sección II-II' al tiempo  $t+dt$ .

Una partícula superficial que estuvo en I al tiempo  $t$  debe estar en II al tiempo  $t+dt$  y debe haberse movido una distancia vertical  $dy$  durante este intervalo. Esta distancia vertical es debida a dos causas: (1) la pendiente que cambia con la distancia  $x$  solo para algún tiempo dado y cuyo valor es  $(\partial y / \partial x) dx$ ; y (2) el cambio con el tiempo para cualquier  $x$  dada entre I' e II', cuyo valor es  $(\partial y / \partial t) dt$ . Entonces la distancia diferencial total es:

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x} dx + \frac{\partial y}{\partial t} dt \quad (19)$$

como  $dx = V dt$ , el valor de la elevación con el tiempo es:

$$dy/dt = V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} \quad (20)$$

la pendiente superficial para cualquier tiempo dado es obtenida sustituyendo  $dx/V$  por  $dt$  en la ecuación anterior, con lo que resulta:

$$dy/dx = \frac{\partial y}{\partial x} + 1/V \frac{\partial y}{\partial t} \quad (21)$$

mientras que las ecuaciones 20 y 21 describen completamente el cambio en la pendiente superficial con el tiempo y distancia, ellas no dicen nada acerca de la condición del flujo. La descarga  $q_1$  a través de la sección I-I' puede diferir de la descarga  $q_2$  a través de la sección II-II' por una cantidad infinitesimal  $dq$ . Durante un período de tiempo  $dt$ ,  $d$  debe ser igual al incremento en el volúmen de un prisma de sección transversal horizontal de área por unidad de ancho,  $1 \cdot dx$ . Este incremento en el volúmen, por lo tanto, aumenta a  $+ B dt (\partial y / \partial t) dx$  ( $B$  representa la porosidad) el cual debe ser igual al decremento en  $-$  durante el mismo período  $dt$ . Entonces:

$$- \frac{\partial q}{\partial t} dx dt = B \frac{\partial y}{\partial t} dt dx \quad (22)$$

pero  $q = v \cdot y$  donde  $y$  es el tirante vertical del prisma para cualquier distancia  $x$  y tiempo  $t$ . Entonces la ecuación 22 puede ser escrita:

$$\frac{\partial (V \cdot y)}{\partial x} = -B \frac{\partial y}{\partial t} \quad (23)$$

La ecuación 23 expresa la ley de continuidad, es decir, agua no es ganada ni perdida en el curso del flujo de agua subterránea no establecido. Introduciendo la ecuación de Dupuit en la ecuación 12 resulta:

$$k \frac{\partial y}{\partial x} (1 - \frac{\partial y}{\partial x}) = -B \frac{\partial y}{\partial t} \quad (24)$$

y

$$\frac{\partial y}{\partial t} = k/B(y \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + (\frac{\partial y}{\partial x})^2 - l \frac{\partial y}{\partial x}) \quad (25)$$

la cual es generalmente conocida como la ecuación de Boussinesq y en la cual  $x$  e  $y$  son las coordenadas de la superficie libre del agua subterránea (o piezométrica).

La ecuación 25 no es integrable por métodos de cálculo exacto. Considerando el hecho de que, normalmente en flujo de agua subterránea, la pendiente de la superficie del agua y la altura del cabalgamiento relacionados a la profundidad inicial del agua subterránea son pequeños,  $(\frac{\partial y}{\partial x})^2$  puede ser despreciado y  $y=a_0$ , por tanto, la ecuación 25 se reduce a:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = k/B (a_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - l \frac{\partial y}{\partial x}) \quad (26)$$

considerando además que el término  $l(\frac{\partial y}{\partial x})$  es normalmente del mismo orden de magnitud que  $(\frac{\partial y}{\partial x})^2$ , entonces, aparentemente puede ser también despreciado. Realmente estos dos términos son de signo opuesto en tanto que  $l$  e  $\frac{\partial y}{\partial x}$  son de igual signo. Su diferencia entonces es del más alto orden de pequeñez. En consecuencia, el despreciar ambos términos es, probablemente una aproximación más acertada que el despreciar  $(\frac{\partial y}{\partial x})^2$  solamente, la excepción de esta regla y su significancia debe estar referida a su propio lugar. Con esto despreciado (o para  $l=0$ ), la ecuación 26 resulta en:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = k/B a_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (29)$$

La cual es idéntica en forma con la ecuación diferencial para el flujo de calor a través de una barra prismática no irradiada.

## CAPITULO II. PLANEAMIENTO Y DISEÑO DEL SISTEMA.

### 2.1. CONVENIENCIA LOCAL.

#### 2.1.1. ESTUDIOS PREVIOS.

##### A) CONSIDERACIONES GENERALES

La factibilidad de pozos de inyección como una solución a un problema particular de disposición de desechos depende de (1) la geología y conveniencia Ingeniería de sitios ventajosos para la inyección, (2) el volumen y características físicas y químicas del desperdicio, (3) economía, y (4) consideraciones legales. Este punto enfatiza los aspectos de factibilidad de los pozos de inyección de desechos líquidos que son particular importancia para geólogos e Ingenieros.

Las características geológicas generales que dictan la conveniencia de áreas para los pozos pueden ser delineados. Estudios más detallados son necesarios para mostrar la distribución, profundidad y características físicas de zonas específicas de inyección potencial dentro de las áreas que son consideradas generalmente convenientes. Detalles geológicos locales y estudios de Ingeniería de esas zonas de inyección potencial son necesarios antes que una recomendación pueda ser hecha en lo que se refiere a conveniencia local.

Puede decirse que casi todos los tipos de roca pueden bajo circunstancias favorables, tener suficiente porosidad y permeabilidad para ceder o aceptar grandes volúmenes de fluido. Las rocas sedimentarias especialmente aquellas depositadas en una evolución marina, es mas posible que tengan las características geológicas convenientes para inyección de desechos. Estas características son: (1) una zona de infiltración con suficiente permeabilidad, espesor y superficie para actuar como un depósito de almacenamiento de líquido a presiones de inyección seguras, y (2) una zona de recarga la cual esté abajo del nivel de la circulación de agua dulce y esté confinada verticalmente por rocas que son, para propósitos prácticos impermeables para líquidos residuales.

El confinamiento vertical es importante no solamente para la protección de recursos hídricos utilizables, sino también para la protección de minerales que pudieran ser explotados. El movimiento lateral de desperdicios sobre tales recursos naturales también debe ser considerado.

Arenisca, caliza y dolomía son comunmente lo suficientemente porosas y permeables en estado no fracturado para ser zonas de inyección convenientes. Esquistos, dolomías, calizas fracturadas naturalmente y otras rocas también pueden ser satisfactorias.

La profundidad mínima de inyección, el espesor necesario del estrato confinante, y la mínima salinidad del agua en la zona de inyección no han sido bien establecidos cuantitativamente, y puede ser posible especificar esas condiciones solamente para casos individuales. La profundidad mínima puede ser considerada como aquella para la cual una zona portadora de agua salina está presente; ello puede variar desde unas decenas a varios cientos de m. La salinidad mínima del agua en la zona de inyección probablemente debe ser especificada por agencias reguladoras en la mayoría de los Estados, pero debe ser menor de 1000 mg de sólidos disueltos por litro de agua, excepto bajo circunstancias poco comunes. Agua conteniendo menos de 500 mg/l de sólidos disueltos han sido en algunos casos consideradas aceptables. La salinidad mínima puede ser fijada a un nivel más alto que 1000 mg/l de sólidos disueltos, para proporcionar un margen de seguridad y porque agua con varias veces este contenido de sólidos disueltos es usada en ciertas áreas para propósitos domésticos, industriales o agrícolas.

Russel (Ref. 12), ha establecido que un estrato confinante de solo 3 a 6 m de espesor puede proporcionar un buen sello para retener aceite y gas. Esos lechos confinantes delgados generalmente pueden no ser satisfactorios para contener residuos inyectados porque ellos pueden ser muy susceptibles a fracturamiento hidráulico, y aun un pequeño defecto puede desbalancearlos en sentido vertical. Afortunadamente, en muchos lugares, decenas o cientos de m de estrato impermeable encierran zonas de inyección potencial y virtualmente aseguran su segregación.

El espesor y permeabilidad necesaria para alojar fluidos a el gasto de inyección pueden ser estimados a partir de ecuaciones desarrolladas por Ingenieros petroleros e hidrólogos subterráneos. La geometría de la zona también determina su conveniencia para inyección de desechos. Una lente gruesa de arenisca altamente permeable puede no ser satisfactoria para inyección si es pequeña y está rodeada por lechos impermeables, porque la presión que aparece en los lechos es alta en comparación con una mantilla de arenisca.

Puede ser deseable inyectar residuos en una estructura geológica conocida. Bajo condiciones favorables esta práctica puede ayudar a asegurar el confinamiento de los residuos en una área específica y también admitir la recuperación de los sólidos disueltos en una forma económicamente posible. Desechos de peso específico relativamente altos almacenados en sinclinales cerrados no pueden tender a salir hacia arriba en estratos cargados de agua dulce y no pueden moverse lateralmente en formas anticlinales cargadas de hidrocarburos bajo condiciones hidrostáticas. En adición a la estratigrafía, estructura y propiedades de la roca, los cuales son factores rutinariamente considerados en estudios subterráneos, la hidrodinámica del

acuífero debe ser significativo en la evaluación de sitios para pozos de inyección. La presencia de un gradiente hidrodinámico natural en la zona de inyección puede causar que el residuo inyectado sea distribuido asimétricamente en torno al pozo perforado y transportado a través del acuífero aún después de que la inyección haya cesado. El enmarañamiento del fluido es modificado bajo condiciones hidrodinámicas. Varios aspectos del movimiento subsuperficial de fluidos naturales o desechos inyectados bajo un gradiente hidrodinámico han sido discutidos.

La mezcla de fluidos removidos y depuestos durante el movimiento a través de medios porosos puede causar muy abundante distribución de desechos en la zona de inyección que por otra parte deben ser anticipados. Se conoce que la dispersión ocurre en areniscas isotrópicas homogéneas esencialmente y puede conducir a distribución lateral particularmente rápida de desechos en areniscas heterogéneas y fracturadas o estratos cavernosos. Absorción de constituyentes residuales mediante acuíferos minerales retardan la propagación del desecho desde el sitio de inyección.

Los modelos matemáticos ahora disponibles son satisfactorios para predecir adecuadamente el movimiento del residuo en la mayoría de los acuíferos naturales solamente bajo restrictivas, circunstancias físicas simplificadas (Ref.6), aún si el conocimiento de la física del movimiento del fluido en acuíferos naturales estuviera considerablemente más avanzado, la determinación de los parámetros físicos que caracterizan una zona de inyección pueden ser un problema si unos cuantos datos no estuvieran disponibles. Esas restricciones no hacen, sin embargo, imposible la estimación cuantitativa del gasto y dirección del movimiento del residuo inyectado.

La máxima presión a la que los fluidos pueden ser inyectados sin causar fracturamiento hidráulico puede ser el factor que limita el gasto de admisión, y la vida de operación de un pozo de inyección. La presión de inyección a la cual el fracturamiento hidráulico puede ocurrir está relacionado directamente a la magnitud de la tensión de la roca regional y la resistencia natural de la zona de inyección. En algunas áreas, la presión a la cual el fracturamiento hidráulico puede ocurrir puede ser estimado antes de taladrar, sobre bases empíricas. Otras consideraciones en la determinación de sitios convenientes son (1) la presencia de presión natural del fluido anormalmente alta y temperatura tal que pueda hacer difícil o antieconómica la inyección ; (2) la incidencia local de terremotos que pueden causar movimiento a lo largo de fallas y averiar a las conveniencias subterráneas del pozo; (3) la presencia de pozos abandonados, inapropiadamente terminados que penetran la zona de inyección y proporcionan un medio para el escape de desechos



inyectados; y (4) la mineralogía de la zona de inyección y química de las aguas intersticiales, las cuales pueden determinar la inyectabilidad de un desecho específico.

#### (B) RECONOCIMIENTOS GEOLOGICOS

Mediante los reconocimientos geológicos es posible obtener conclusiones hidrogeológicas de una región, pudiéndose avanzar en forma rápida gracias al desarrollo que ha tenido a últimas fechas la fotointerpretación; sin embargo, en cualquier estudio siempre serán necesarios los reconocimientos de campo, que permiten afinar lo observado en fotografías. En la exploración, el geólogo se sirve de la petrografía, estratigrafía, geología estructural y de la geomorfología. La petrografía constituye uno de los rengiones más importantes dentro de los reconocimientos geológicos, ya que mediante ella, es posible determinar la porosidad y la permeabilidad característica de los diferentes tipos de roca, eliminando en función de dichas características, las zonas que no presentan condiciones favorables para la inyección de agua al subsuelo. La porosidad determina la cantidad de agua que puede almacenarse y la permeabilidad la facilidad con que ésto puede hacerse. La tabla 2.1 muestra una clasificación general de algunos tipos de roca en función de su porosidad y su permeabilidad (Ref. 13).

TABLA 2.1 PROPIEDADES ACUIFERAS DE ALGUNAS ROCAS COMUNES

PERMEABILIDAD	POROSIDAD
Permeabilidad máxima	Porosidad máxima
gravas bien clasificadas	arcillas blandas
basalto poroso	limos
caliza carstificada	tobas
arenas bien clasificadas	arenas bien clasificadas
arenas y gravas mal clasificadas	arenas y gravas mal clasificadas
rocas cristalinas fracturadas	arenisca
limos y tobas	basalto poroso
arcillas	caliza carstificada
roca cristalina masiva	roca cristalina fracturada
	roca cristalina masiva
permeabilidad mínima	porosidad mínima

La estratigrafía es un instrumento esencial para la protección hidrogeológica de extensas regiones de rocas sedimentarias o volcánicas. La posición y el espesor de los horizontes acuíferos así como la continuidad de las capas confinantes revisten particular importancia.

La geología estructural, junto con la estratigrafía, se utiliza en la localización de los horizontes acuíferos que hayan sido desplazados por los movimientos tectónicos. Los estudios estructurales son también utilizados para localizar zonas de

fracturación en rocas compactas pero frágiles; o bien en la localización de fallas en materiales no consolidados que en ocasiones pueden formar barreras hidrológicas, las cuales tienen su importancia en el estudio del movimiento del agua subterránea.

La geomorfología es indispensable en la investigación hidrogeológica de áreas pleistocenas y de depósitos recientes; la presencia de sedimentos permeables de origen glacial y los acarreos fluvio-glaciales pueden ser cartografiados estudiando la geomorfología regional. Las dunas estables, los depósitos en forma de terraza, los antiguos cordones de playa y otros sedimentos permeables, también se reflejan morfológicamente de una manera clara.

### *(C) RECONOCIMIENTOS HIDROLOGICOS*

Los estudios hidrológicos resultan de gran utilidad en la exploración de agua subterránea, ya que pueden aportar información acerca de la cantidad de agua útil para la recarga de los acuíferos, de la facilidad con que se produce la misma y de la localización y cuantificación del volumen de agua subterránea que se descarga en la superficie. La cantidad de agua útil para la recarga, esta íntimamente relacionada con la precipitación, así como con las aguas superficiales que circulan en corrientes permanentes. En general, la localización del agua subterránea depende en mucho de las condiciones hidrológicas que priven en una región ya que en función de éstas, habrá una mayor o menor recarga útil. Por ejemplo, una región desértica tendrá menos posibilidades en cuanto a la existencia de agua subterránea, que las que tengan una región húmeda aunque en ambas el medio geológico sea similar. La facilidad con que se produzca la recarga, es otra variable hidrológica importante que depende de las características del tipo de terreno de las áreas en que tienen lugar la misma; un caso desfavorable la constituyen las superficies impermeables, tales como las arcillas y las cuarcitas que permiten que el escurrimiento superficial sea rápido, impidiendo una recarga adecuada. De lo anterior se desprende que para alcanzar resultados óptimos, es necesario realizar en forma conjunta los reconocimientos, ya que si algunas regiones presentan condiciones geológicas favorables, posiblemente en el aspecto hidrológico no sea así.

### *(D) METODOS GEOFISICOS*

Los métodos geofísicos proporcionan una evidencia indirecta de las formaciones subterráneas, indicando la posibilidad de que éstas constituyan acuíferos; estos métodos no dan una medida directa del tipo de rocas, permeabilidad, porosidad o densidad de ninguna formación, sino más bien detectan alguna otra propiedad de los materiales que varían con los factores que determinan que ellas pueden ser lo suficientemente porosas y permeables.

Los métodos geofísicos pueden aplicarse en forma superficial o mediante perforaciones, contándose entre los principales (Ref 14); el magnético, el gravimétrico, radioactivo, geotérmico, eléctrico y sísmico. Cada uno de ellos se basa en el hecho de que las diferentes rocas y formaciones minerales, ofrecen reacciones distintas y medibles a los campos de fuerza utilizados. En los problemas referentes a la exploración del agua subterránea, los más empleados son el eléctrico y el sísmico.

El método eléctrico resistivo es el más utilizado en la exploración del agua subterránea, ya que los instrumentos son relativamente baratos y para los trabajos de campo solo son necesarios de 3 a 5 hombres. Existen diferentes arreglos en la disposición de los instrumentos utilizados siendo los más comunes la configuración Wenner y la de Schlumberger (Fig. 9).

Los valores relativos de la resistividad eléctrica pueden ser interpretados en términos de la geología general del subsuelo a profundidades limitadas y varían ampliamente dependiendo del material, densidad, porosidad, tamaño de los poros, de la forma de los estratos, del contenido de agua, de su calidad y de su temperatura. Las rocas ígneas y las metamórficas tienen valores comprendidos entre  $10E2$  y  $10E8$  ohm-m, las sedimentarias y las no consolidadas de  $10$  a  $10E4$  ohm-m. Para mayor detalle se da la siguiente lista;

#### VALORES APROXIMADOS DE LA RESISTIVIDAD DE ALGUNOS MATERIALES

MATERIAL	RESISTIVIDAD ohm-m
Grafito	$3E-04$
Pirita	$1E-03$
Salmuera	$5E-02$
Arcilla	$1E 00$
Yeso	$1E+01$
Agua dulce	$5E+01$
Gravas y arenas saturadas de agua dulce	$1E+02$
Serpentina	$3E+02$
Caliza	$1E+03$
Granito	$1E+06$
Cuarzo	$1E+11$
Calcita	$5E+12$

En formaciones relativamente porosas, la resistividad se mide mejor por su contenido y calidad de agua que por la resistividad misma de la formación. Las resistividades reales se determinan a partir de las aparentes, las cuales se pueden calcular por la medición de la corriente y del potencial entre pares de electrodos colocados en la superficie de la tierra. El procedimiento que se sigue para medir una diferencia de potencial entre dos electrodos (P en la fig. 18) es aquel que resulta de aplicar una corriente a otros dos electrodos (C en la fig.18) que

se colocan alineados con los de potencial. Si la resistividad es uniforme en cualquier punto de la zona subsuperficial por debajo de los electrodos, el campo eléctrico tiene una mayor penetración en el suelo, obteniéndose una resistividad aparente un tanto diferente. Para la configuración Wenner la resistividad aparente esta dada por:

$$RO^*a=2*PI^*a^*V/l \quad (28)$$

siendo a, l y V la distancia entre los electrodos, la corriente aplicada y la diferencia de potencial respectivamente. Para la configuración Schlumberger la resistividad aparente se determina mediante la expresion;

$$RO^*a=PI^*((L/2)^2 -(b/2)^2)*V / (b^*l) \quad (29)$$

en donde L representa el espacio entre los electrodos de corriente y b el espacio entre los de potencial. Teóricamente debe verificarse que  $L \gg b$ , pero para fines prácticos basta que  $L \geq 5b$ .

La configuración Wenner con separación intereléctrica constante, es la que mejor se adapta al estudio de límites verticales recubiertos por depósitos de espesor no superior a 30 m. Para el estudio de límites horizontales, tales como el nivel freático o la superficie de rocas estratificadas, es más útil el método de sondeos verticales en los que se usa la configuración Schlumberger manteniendo fijo el punto medio de la línea de electrodos de potencial, mientras que mediante incrementos sucesivos se van separando los electrodos de corriente, obteniéndose las resistividades de los diferentes estratos a profundidades sucesivamente mayores (Fig. 10). Las limitaciones que se deben considerar al emplear el método resistivo son: La localización en el área de estudio de tuberías metálicas, cables, líneas de transmisión de alto voltaje, cercas con postes de metal, etc., ya que, producen perturbaciones que influyen al tomar las medidas; es necesario contar también con información suplementaria procedente de perforaciones de otros métodos geofísicos a fin interpretar estructuras geológicas complejas; la profundidad de penetración que se alcanza con la mayoría de los instrumentos portátiles es inferior a los 450 m, ya que no existen fuentes de alimentación de suficiente potencia, además de que cuando las líneas de emisión sobrepasan distancias moderadas, no existe una garantía de que las condiciones geológicas se mantengan.

La función principal del registro eléctrico en la localización de cuerpos con agua subterránea, es poder determinar el espesor de los diferentes materiales que forman la columna litológica por atravesar durante la perforación, facilitar las correlaciones y estimar el carácter químico del fluido intersticial. El registro eléctrico esta constituido por una curva de potencial natural

(SP) en el carril izquierdo y tres curvas de resistividad en los carriles de la parte derecha. Tanto el potencial natural como las resistividades son registradas instantáneamente en una sola corrida o viaje de la sonda que se hace siempre desde el fondo del pozo a la superficie. Las mediciones de los parámetros mencionados, solo pueden efectuarse en los pozos que no tienen ademe o tubería de revestimiento y que estén llenos de un fluido conductivo.

La curva de potencial espontáneo es el registro de los potenciales naturales que se generan en el pozo, siendo la representación de las diferencias de potencial que existe entre un electrodo con potencial fijo colocado en la superficie y otro que se introduce al pozo. Las variaciones de las curvas reflejan las diferencias de potencial entre puntos dentro del agujero frente a rocas porosas y puntos frente a cuerpos arcillosos. Cuando las rocas atravesadas están constituidas por capas de arcillas o lutita, se observa que tienen aproximadamente el mismo potencial, lo cual provoca que en la curva de potencial espontáneo, aparezca casi una línea vertical llamada línea base de lutitas.

El potencial natural (SP), no se puede registrar en pozos de lodos no conductivos porque tales lodos no forman conexión eléctrica entre el electrodo del SP y la formación, además, si las resistividades del filtrado de lodo y el agua de formación son del mismo valor, las desviaciones del SP, serán pequeñas y la curva será achatada sin variaciones apreciables. En general la curva de potencial espontáneo permite detectar capas permeables, ubicar su límite y permitir la correlación entre ellas, determinar en forma aproximada la resistividad o bien la salinidad del agua contenida en las rocas y además, dar valores cualitativos del contenido arcilloso de una capa. La unidad de medida para esta curva es en milivolts y no tiene cero absoluto, por tal motivo se utiliza en la línea base de arcillas para su contabilidad.

De acuerdo al principio electroquímico que genera los potenciales dentro del pozo, se puede considerar como una regla; si la curva de potencial es negativa el agua contenida en la roca es más salada que la del lodo de perforación; en cambio si es positiva, el agua intersticial es menos salada o dulce que la del lodo y si no tiene expresión en uno u otro sentido, el agua intersticial es muy semejante a la del lodo de perforación.

Aunque el potencial electroquímico no es influenciado por la porosidad, la amplitud de la curva SP si es indirectamente afectada, una disminución en la porosidad de la roca, incrementa su resistividad reduciendo la amplitud de la curva SP. Haciendo un resumen y mientras no se puedan aplicar las determinaciones

cuantitativas de las curvas del SP, es permisible utilizar cualitativamente el potencial espontáneo de acuerdo con las siguientes reglas generales:

(1) Los acuíferos que presentan un SP positivo bien definido o estable, casi invariablemente contienen agua de menor salinidad que la contenida en el fluido de perforación.

(2) Si la curva de potencial SP en los acuíferos penetrados por un agujero, se presenta cada vez más negativo con la profundidad, indica que la salinidad de los acuíferos se incrementa con ésta.

(3) Los acuíferos que presentan un franco y amplio SP negativo, generalmente contienen aguas mucho más saladas que donde el SP tiene una baja amplitud o es positivo.

(4) En los intervalos en donde la amplitud del SP, frente a los acuíferos potentes, permanece constante con respecto a la profundidad, todas las aguas de formación tienen aproximadamente la misma salinidad.

(5) Los cambios erráticos en la salinidad provocan que la amplitud del SP sea pequeña, pudiendo o no corresponder a cambios significativos en la salinidad del agua.

Las curvas de resistividad normal corta, normal larga y lateral, se miden contándose de la línea izquierda como cero y creciendo hacia la derecha, en escalas que pueden ser; 0-20, 0-50, 0-200 o 0-2000 ohms-m. El objetivo de contar con estas tres curvas de resistividad, es que cada una de ellas, investiga horizontalmente a diferentes profundidades, obteniendo información con las tres curvas en distancias que van de; 0.40 a 5.70 m, alrededor del pozo, lográndose así la interpretación cualitativa de los diferentes tipos de fluidos que pueden alojarse alrededor de un pozo. La curva o curvas de resistividad, se toman simultáneamente con la de potencial espontáneo y su conjunto es, el registro eléctrico.

En la exploración del agua subterránea, el método sísmico resulta más exacto que el eléctrico. El principio se basa en la reacción que tienen las masas geológicas, frente a las vibraciones inducidas artificialmente en la superficie de la tierra, por el impacto de un instrumento pesado o por la explosión de una carga de dinamita, que produce ondas sísmicas o de choque que viajan a diferentes velocidades a través de los materiales que constituyen el subsuelo, siendo posible detectar los diferentes estratos y determinar inclusive el espesor de las primeras dos o tres capas superficiales. Este método solo se puede aplicar si la velocidad de las ondas sísmicas aumenta con la profundidad.

Dentro de los métodos sísmicos se tiene el de reflexión y el de refracción, siendo el más utilizado este último. En el método sísmico de refracción los geófonos o detectores de las ondas sísmicas, se alinean a partir del punto de tiro según una recta única. Si los materiales son homogéneos e isotrópicos, los frentes de las ondas originadas a partir de la explosión serán esféricos y estarán centrados en el punto de tiro; si este no es el caso y se encuentran variaciones litológicas (Fig. 11), las ondas se refractarán según la ley:  $V_1/V_2 = \text{Sen } i / \text{Sen } r$ . La primera onda sísmica es detectada en el punto A y sigue una trayectoria a través del medio G, pero más allá del punto B, las ondas siguen parte de su trayectoria a través del medio H en la cual la velocidad de propagación es mayor debido a la mayor densidad del material que lo constituye. Si se representan gráficamente los tiempos de llegada en función de la distancia a la fuente de energía, se obtiene una curva llamada dromocrónica en la cual la inversa de las pendientes de las rectas, representa la velocidad de propagación correspondiente a cada uno de los estratos por los cuales viajan las ondas sísmicas. El cambio en la velocidad y la distancia horizontal en la cual ocurre este cambio, proporcionan los datos para calcular la profundidad a la cual se produce un cambio de formación (Fig. 12).

El espesor de la capa superior o profundidad en que se produce el primer cambio en la formación geológica, se calcula mediante la fórmula:

$$d = X_c / 2 * ((V_2 - V_1) / (V_2 + V_1)) * 0.5 \quad (30)$$

Donde d es la profundidad en m, V1 es la velocidad de la onda de choque en la capa superior en m/seg, V2 es la velocidad de la onda de choque en la segunda capa en m/seg, y Xc distancia en m, en la cual se produce un cambio de velocidad indicado en la dromocrónica, en geofísica recibe el nombre de distancia crítica. Las ecuaciones en que la dromocrónica presenta 3 o más inflexiones resultan similares aunque de mayor complejidad.

El uso más frecuente del método sísmico es para determinar la profundidad al basamento, desplazamiento del nivel freático a lo largo de fallas y fronteras laterales de los acuíferos (Ref. 15).

## 2.1.2. ACUIFERO RECEPTOR.

### (A) CARACTERISTICAS PRINCIPALES

Aunque todas las rocas tienen capacidad para alojar agua en sus poros, solo bajo ciertas circunstancias la cantidad de ésta es suficientemente considerable para catalogarla como acuíferos. Las

rocas sedimentarias ofrecen por lo regular grandes ventajas para la inyección de desechos líquidos. De ellas, las calizas, areniscas y dolomitas, tienen suficiente porosidad para aceptar grandes volúmenes de aguas residuales. Las rocas poseen asimismo gran porosidad y permeabilidad, lo que permite la inyección de líquidos a estas formaciones. Sin embargo, comúnmente los acuíferos en formaciones de origen volcánico contienen agua de buena calidad que no debe ser mezclada con residuos líquidos.

Por lo que corresponde al confinamiento superior e inferior requerido para el acuífero receptor, se ha encontrado (Ref. 16) que arcilla, sal, lutitas no fracturadas, gis, mármol y bentonita pueden ser buenos sellos que impidan el movimiento vertical de los contaminantes; las calizas y lutitas pueden proveer un estrato impermeable adecuado. Sin embargo, debido a que estas rocas presentan comúnmente fracturas o canales, su utilización debe ser evaluada cuidadosamente en cada caso.

Por otro lado el agua que se inyecta a los acuíferos, ocupará el poro de las formaciones rocosas, por lo que esencialmente su capacidad de almacenamiento está relacionada directamente con sus características físicas y principalmente su porosidad. El radio y por tanto el área necesaria de un acuífero para almacenar un volumen de aguas residuales, esta dado por la siguiente fórmula:

$$V=B*n*PI*R^2$$

(31)

Donde R es el radio del acuífero a donde se inyecta, V el volumen del líquido inyectado, B el espesor del estrato a que se inyecta y  $\eta$  la porosidad del estrato (siempre y cuando esté seco el acuífero). Esta fórmula es válida únicamente bajo condiciones homogéneas del acuífero. En la inyección de desechos líquidos al subsuelo, la incógnita que se presenta es determinar hacia donde va el agua inyectada. Existen varias respuestas posibles: (1) El agua es parcialmente comprimida a altas presiones, (2) los gases no disueltos que se encuentran ocluidos en los poros de las rocas son comprimidos, (3) las rocas son parcialmente deformadas y en algunos casos parcialmente elevadas y (4) los fluidos originalmente en los poros son desplazados.

Como se puede observar, el flujo de agua que se inyecta está relacionado directamente por la permeabilidad (Transmisividad) y a la presión a que se inyecta. El intervalo en que varía el flujo de inyección es muy amplio y difícil de cuantificar, se puede decir que el más frecuente está entre 5 y 20 lps. Sin embargo, se tienen datos de flujo hasta de 40 lps, a una presión de 35 Kg/Cm<sup>2</sup>. Como se observa, el factor que se puede modificar es la presión que resulta proporcional al flujo de inyección. A medida que se aumenta la presión se tiene mayor eficiencia en la inyección; sin embargo, existe un límite para el cual se producen fracturas y desplazamientos de las formaciones rocosas, este fracturamiento debe ser evitado al máximo, ya que puede ocasionar



(sobre todo si su dirección es vertical) la interconexión con acuíferos limpios. Muchos factores influyen en la presión de fracturamiento así como en la dirección de las fracturas (Ref. 17). Por ello es bastante difícil llegar a evaluar dicha presión. Un cálculo que puede dar idea del rango en que se encuentra se obtiene multiplicando la densidad de la roca por la profundidad. Sin embargo, la forma más utilizada para determinar esta presión consiste en efectuar una prueba de bombeo inyectando el líquido al acuífero a diferentes presiones, con lo cual puede obtenerse una curva como la que aparece en la figura 13. El punto S donde la gráfica cambia a mayor pendiente (aumenta el flujo de inyección sin aumento grande de presión), se obtiene la presión crítica de inyección. Se recomienda utilizar el 75% de esta presión como presión de trabajo. En algunos casos, donde se tiene cierto control, se permite y conviene el fracturamiento sobre todo si se produce en forma horizontal (Ref. 18).

#### *(B) INYECCION EXISTENTE EN ACUIFEROS.*

Segun Warner (Ref. 12), en 1965 la mayoría de los pozos de inyección existentes tenían una profundidad comprendida entre 250 y 2000 m, pudiendo llegar excepcionalmente a 3600 m. La profundidad está en función de la geología existente en las cercanías del lugar donde se produce el agua residual a inyectar y de la viabilidad económica de la inyección. Aparentemente los espesores de inyección más utilizados son de 55 m. Los caudales de inyección varían con las necesidades, tipo de agua residual a inyectar, profundidad y características del material permeable, situándose entre 0.01 lps, hasta más de 40 lps, estando los valores más frecuentes entre 5 y 20 lps. Los niveles permeables por carstificación son los que permiten los mayores caudales alcanzando en algunos casos hasta 100 lps, con presiones del orden de 3 atmósferas. En Florida, se inyectan aguas residuales industriales pretratadas y aguas residuales urbanas en niveles calizos profundos muy fracturados con caudales de hasta varias decenas de lps. Las presiones de inyección medidas en la cabeza del pozo pueden llegar a casi 300 atmósferas, pero es raro que sobrepasen las 70 atmósferas, siendo las más comunes en torno a 13 atmósferas.

El volumen más importante de aguas residuales que se inyectan mediante pozos profundos corresponde a las aguas saladas producidas en la minería del petróleo. El segundo gran grupo está constituido por las salmueras residuales del tratamiento de minerales potásicos. Las aguas residuales industriales siguientes en orden pueden ser de características, concentración y origen muy diverso, pero en general están asociadas a refinerías de petróleo y gas, industrias químicas, farmacéuticas y de tratamiento metalúrgico. La industria nuclear, en especial las plantas de tratamiento de combustibles irradiados, dan origen a aguas residuales radioactivas con características propias que deben recibir consideraciones especiales por su peligrosidad y

elevada generación de calor. En el último orden se encuentra la inyección de aguas residuales municipales tratadas. Entre los líquidos de plantas químicas se encuentran las salmueras sódicas, cálcicas y magnésicas, los fenoles, clorofenoles, bifenoles, las soluciones caústicas, los ácidos orgánicos e inorgánicos y en especial el acético, los licores de papeleras y los efluentes de producción de fibras artificiales.

Dado que la inyección profunda es una operación no exenta de riesgos y que en definitiva muchas veces no es más que un almacenamiento en depósitos naturales cuya capacidad no es infinita, es importante destacar que solo deben inyectarse aquellos líquidos tóxicos que no puedan depurarse mediante otros medios económicamente viables y que en lo posible debe reducirse el volumen llevándolos a la misma concentración compatible con la inyección.

### (C) ASPECTOS GEOLOGICOS E HIDROLOGICOS

En el lugar donde se desea efectuar una inyección profunda de líquidos residuales, sean tóxicos o con menor grado de contaminación, debe existir un nivel de almacenamiento (Ref. 19) que cumpla con las siguientes condiciones:

(1) Que posea suficiente porosidad, permeabilidad, espesor y extensión superficial como para permitir caudales de inyección de interés y volúmenes almacenables suficientes.

(2) Que se trate de un acuífero confinado que contenga agua o minerales sin valor económico y sea tal que el techo sea lo suficientemente impermeable para que no se produzcan futuros perjuicios a acuíferos superiores con agua dulce o con otras aguas o minerales de interés económico.

(4) Que el acuífero sea confinado en toda su extensión y en ese caso, que el agua que se desplace y expulse debido a la inyección no tenga características perjudiciales.

(5) Que el flujo natural no haga aflorar las aguas inyectadas y que no existan fallas o zonas de fracturas que afecten el nivel confinante.

En forma general se considera que los acuíferos cautivos profundos con aguas salobres o saladas son aptos como almacén. Un nivel poroso no es necesariamente apto para la inyección, pues puede tener permeabilidad demasiado baja e incluso nula para efectos prácticos. Por ello debe considerarse siempre la porosidad eficaz (de poros interconectados) y no la total.

El almacenamiento preciso puede conseguirse por alguno o por una combinación de los siguientes mecanismos; (1) desplazamiento del agua existente, haciéndola aflorar en algún lugar, mar, río, lago u otro acuífero. En este caso el almacenamiento es función del

volúmen y de la porosidad eficaz. (2) Compresión del fluido existente. Se consiguen volúmenes interesantes solo si el acuífero es muy extenso, ya que son del orden de  $1E-03$  o  $1E-04$  de la porosidad eficaz total. (3) Expansión del acuífero por aumento de presión del fluido, en general flexionando la corteza terrestre. El volúmen creado puede ser muy importante si el área afectada es grande, y es del orden de  $1E-01$  a  $1E-02$  de la porosidad eficaz.

En el primer caso se pueden almacenar grandes cantidades de líquido, pero se requiere que el agua desplazada no origine problemas; lo cual sucede si se trata de agua dulce o si el afloramiento es en el mar. En los casos segundo y tercero existe un límite que es el riesgo de la fracturación hidráulica de la formación con ruptura del confinamiento, y además, la capacidad útil es menor que la que proporciona la porosidad eficaz.

Las areniscas y dolomías pueden ser porosas en abundancia. Pueden presentar porosidad por fracturación las calizas, conglomerados y en ciertas ocasiones las pizarras. Las pizarras y otras rocas volcánicas pueden compartir ambas condiciones.

Suelen ser buenos niveles confinantes: Pizarras no fracturadas, arcillas, margas y niveles de sal, yeso y anhidrita. Las calizas y dolomías compactas pueden ser buenos niveles confinantes pero es preciso confirmar la ausencia de fracturas y de carstificación para que no se presente localmente una permeabilidad vertical. En ocasiones ciertos materiales impermeables pueden contener en su interior zonas aptas para recibir líquidos residuales, ya sea naturalmente (Niveles detriticos o paleocanales), ya sea artificialmente mediante fracturación hidráulica (en margas, pizarras, granitos, etc.) o creando cavidades por disolución (en domos salinos).

Desde un punto de vista más local, los pozos en materiales permeables por fisuración, con o sin carstificación, son más favorables en zonas de esfuerzos altos, así como en vértices anticlinales o en el ángulo superior de flexiones. Las antiguas superficies de erosión fossilizadas, en especial si se trata de materiales calcáreos, pueden dar lugar a permeabilidades elevadas. La existencia de niveles de agua surgente a elevada presión o la presencia de temperaturas elevadas puede impedir la inyección profunda. Ambas suelen crecer con la profundidad y de ahí la existencia de un límite de la profundidad útil aún existiendo por debajo niveles permeables. Esa profundidad útil depende del líquido a inyectar y de la hidrología local.

#### **(D) SISTEMAS DE RECARGA A PROFUNDIDAD**

Estos sistemas son esencialmente los pozos verticales, aunque también se emplean pozos de drenes radiales y en algunos casos, galerías de infiltración. El sistema ofrece otros inconvenientes

que han hecho que se desarrolle mas lentamente que el de recarga en superficie, aunque en muchos lugares es el sistema mas importante. El sistema presenta mayor costo de construcción y mantenimiento y se requiere utilizar agua de mejor calidad para aminorar los problemas de colmatación, dado que la superficie filtrante es mucho menor. Sin embargo, es una forma de recarga insustituible cuando el terreno está formado por una alternancia de niveles permeables e impermeables. Ello ha llevado a que el método se desarrolle en ese tipo de medios y actualmente se aplica en muchas partes del mundo (Ref. 20). Quizá sea Israel por las características peculiares de sus acuíferos, donde se práctica con mayor profusión. Una ventaja de recarga por pozos, decisiva en muchos casos, es que el terreno es pequeño en comparación con la recarga por extensión, siendo fundamental donde los terrenos y zonas urbanas son caras.

A través de un pozo vertical se pueden recargar todas las capas que se desee. En ocasiones no se recargan directamente las capas que más se bombean, sino indirectamente a través de otras menos explotadas, pues con ello se logra un mayor recorrido del agua en el acuífero, evitando problemas de contaminación y logrando una mezcla más homogénea. Ello exige, claro está, que el agua pueda pasar con cierta facilidad de un lugar a otro, y que los niveles de inyección tengan una transmisibilidad y nivel piezométrico apropiados al agua a recargar y a los niveles previstos; en principio conviene evitar la inyección a presión elevada, pues es cara y puede ser origen de problemas de construcción o funcionamiento (Ref. 21).

Los caudales que se pueden infiltrar por pozos varían con la naturaleza del acuífero y suelen ser menores que los de bombeo, aunque no necesariamente. El rendimiento de los pozos de recarga es función de la permeabilidad del acuífero y del estado de colmatación del propio pozo.

### 2.1.3. FACTORES ECONOMICOS.

Los costos de inyección profunda como es usual se dividen en costos fijos y costos variables. Los costos fijos son:

#### (A) COSTOS DE EXPLORACION INICIAL

Este costo depende de la cantidad y calidad de los datos existentes previos y de la profundidad del nivel de inyección mas apropiado. Si resultan positivos, los ensayos normales pueden suponer un costo adicional que introduzca un incremento en el

precio del m lineal. Los traslados de maquinaria y preparación del terreno es un costo importante a tomar en cuenta; y que varia mucho con el lugar y las obras que se tengan que realizar.

#### **(B) INSTALACION DE POZO**

Depende de la profundidad, dificultad, número de entubaciones, número de cementaciones y del tipo de tubería de inyección a instalar. Este costo debe añadirse a los costos de perforación. Puede incluirse aquí el costo debido al desarrollo del pozo el cual es sumamente variable.

#### **(C) COSTO DEL SISTEMA DE INYECCION EXTERIOR AL POZO**

Incluye la bomba de inyección, en general centrífuga, manómetros, sistema de control y recambios del fluido inerte, etc.

#### **(D) COSTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA A INYECTAR**

Incluye balsas de almacenamiento para casos de averías o en casos de exceso de producción (desechos) depende de las características del agua residual y del grado de sedimentación, floculación, filtración, etc., que sea preciso y disminuye con el caudal a tratar.

#### **(E) COSTO DE LAS CONDUCCIONES**

Son aquellas desde el lugar donde se produce el agua residual a inyectar, hasta los pozos de inyección, incluyendo registros, caseta de mando y transmisiones eléctricas. Si la distancia es grande puede suponer una inversión importante a veces la mayor, en especial si deben evitarse a toda costa rupturas y fugas. El costo depende del caudal a transportar, de la presión y del terreno. Además debe tenerse presente el costo de abandono de pozo.

#### **(F) GASTOS GENERALES**

Incluye taller de reparaciones y costos de ingeniería y supervisión que pueden variar entre el 10% y el 30% de la inversión total. Como aproximación tosca, la inversión se puede desglosar en: Perforación 15%; entubación y acabado 10%; control, ensayos y desarrollo 25%; bombas y conexiones 25%; honorarios 5% y gastos administrativos 20%.

Los costos fijos dependen de la vida de la instalación que es muy difícil de fijar, en especial por lo que respecta al pozo. El manejo de líquidos corrosivos y salmueras introduce otra incertidumbre en la estimación de la vida útil. Para tuberías e instalaciones pueden admitirse una vida útil de 30 años y quizá solo 20 con líquidos corrosivos. Para los pozos pueden admitirse entre 15 y 20 años, aunque en ocasiones se establecen cálculos

para una vida de 40 a 50 años. A estos gastos fijos es necesario aumentar los gastos del personal de mantenimiento y operación y los seguros e impuestos. Los gastos fijos pueden suponer entre el 10 y el 20% de la inversión.

Siguiendo con el orden los costos variables comprenden:

#### (G) MANTENIMIENTO DEL POZO Y DEL SISTEMA DE INYECCION

Incluye reparaciones, limpieza y desarrollo periódico del pozo. Son muy difíciles de evaluar a priori si no se tiene suficiente experiencia en una región y pueden variar a lo largo de la operación.

#### (H) GASTOS DEL TRATAMIENTO

Segun el tipo y la intensidad de este es como varía.

#### (I) REPARACIONES EN LAS CONDUCCIONES

La frecuencia y costo dependen de los materiales empleados, criterios de diseño y de la corrosividad del agua, pudiendo variar entre el 1 y el 10% de la inversión.

#### (J) GASTOS DE LA ENERGIA DE BOMBEO

El costo de inyección depende del número de horas anuales de funcionamiento, de la potencia de los equipos y de la eficiencia con que éstos operen. Es importante tener en cuenta que los costos del capital pueden llegar fácilmente al 80% del costo de la inyección, pero que también en muchos otros casos los gastos de mantenimiento y reposiciones puede suponer hasta el 50 o 60%. Un análisis detallado de costos puede consultarse en la Ref. 22.

### 2.1.4. HIDRAULICA DE POZOS DE INYECCION.

#### (A) COMPARACION CON POZOS DE BOMBEO

En vista de la larga historia de los pozos de bombeo y la corta historia de los pozos de inyección, se comprende que estos últimos sean frecuentemente considerados como pozos de bombeo inversos. Realmente los pozos de inyección o recarga tienen su propia idiosincracia y características totalmente distintas a la de los pozos de bombeo o de agua como suele llamarseles.

Un pozo de bombeo se considera en equilibrio si la superficie freática o pendiente piezométrica permanece constante para un gasto constante de extracción. La forma del cono de depresión entonces permanece inalterado. Si el pozo se extiende en un acuífero libre hasta el fondo del estrato impermeable como se muestra en la figura 14 y sus perforaciones son continuas, un

Incremento fuerte en el gasto de bombeo y por tanto de pendiente; puede eventualmente causar un gasto máximo crítico más allá del cual el pozo es incapaz de liberar más agua. Independientemente de la capacidad del bombeo. Esto es debido a que el agua debajo del cono de depresión ha alcanzado la profundidad crítica  $h_c$ , es decir, el tirante mínimo necesario para la conducción del flujo correspondiente a el gasto máximo de bombeo para ese pozo (Ref. 23).

Como también se indica en la figura 14, la pendiente de un pozo en un acuífero artesiano puede extenderse por debajo de la capa de arcilla confinante, lo cual evidencia una situación malsana, no solamente desde el punto de vista de hidrología subterránea, sino también de estabilidad de suelos.

La figura 16 muestra en forma simplificada un pozo de inyección, al igual que en la figura 14, aparecen un acuífero confinado y uno libre, inicialmente inalterado, semi-infinito y horizontal. Es a la vez aparente que las dos facciones notables típicas para un pozo de agua, a saber, equilibrio y tirante crítico, no son aplicables a un pozo de inyección. Para un gasto firme de recarga la forma del cono de inyección no permanece constante, sino experimenta continuos aplastamientos de sus pendientes, lo que implica que se expande si el acuífero es libre. Asimismo, si el acuífero es confinado, el cono piezométrico de inyección invariablemente aplana sus pendientes y el bulbo del pozo de recarga se expande desplazando de ese modo el agua subterránea original. La figura 15 muestra el aplanamiento del cono de inyección para una recarga continua.

Los acuíferos horizontales deben ser considerados particularmente académicos; principalmente debido a su simplicidad, presta auxilio para mostrar diferencias fundamentales entre pozos de agua y pozos de inyección. Realmente no el mejor acuífero natural, libre o confinado, es horizontal. Todos ellos se extienden de un área de recarga natural a un área de descarga natural. Áreas de recarga son depósitos de alta permeabilidad y porosidad a lo largo de las pendientes y formas de montañas, y las áreas de descarga tienen forma de superficies de coladura, arriba y abajo de ríos, lagos y océanos, en general, la mayoría de todos los acuíferos, cambian de libres a confinados en la mayoría de ellos se extienden del área de recarga al área de descarga.

La pendiente de acuíferos importantes es normalmente pequeña, rara vez exceden de 10 m/Km. Bajo esas condiciones la composición de un pozo de agua no es significativamente diferente de aquel en un acuífero horizontal. Los contornos del cono de depresión deben ser ligeramente elípticos en lugar de circulares, pero el equilibrio puede rápidamente establecerse después de un período de flujo inestable. En contradicción, la ejecución de un pozo de recarga en un acuífero inclinado difiere radicalmente.

Paradójicamente, sin embargo, es solamente con un acuífero inclinado que un pozo de recarga puede alcanzar el equilibrio. Teóricamente el tiempo requerido para conseguirlo es infinito, lo cual, incidentalmente, es también cierto para pozos de bombeo. Estrictamente hablando, uno debería por lo tanto referirse al casi equilibrio que debe establecerse en tiempo finito.

Las principales distinciones entre un pozo de inyección y un pozo de bombeo son que; con el primero, un punto de estancamiento debe establecerse por sí mismo aguas arriba del pozo y una corriente debe emanar a partir de ahí hacia aguas abajo y sus fronteras se asemejan a dos asíntotas. Matemáticamente, la misma validez solamente que a la inversa de un pozo de agua (Ref. 24). El punto de estancamiento debe estar aguas abajo del pozo de agua y debe ser realmente un punto de separación o estancamiento negativo. El cono de inyección debe ser un cono de depresión; y el llenado de los poros no saturados puede tener su contraparte en el drenaje de los poros saturados. Físicamente sin embargo y posiblemente, tanto química como biológicamente, los dos casos pueden diferir radicalmente en que el agua de recarga es agua extraña y el agua extraída es agua original. Para un gasto dado de recarga y flujo subterráneo inicial, la distancia  $X_0$  del pozo de recarga a el punto de estancamiento y la distancia  $W_0$  entre las dos asíntotas se muestran en la figura 16, la cual también muestra tres intermitencias, estados transitorios en forma de bulbos superpuestos sobre las líneas de corriente y los contornos equipotenciales de la fuente de flujo de agua subterránea. Esta figura esta basada sobre condiciones de recarga las cuales se piensa son más o menos típicas, a saber;  $K=1.55$  m/Hr,  $A_0=30$  m,  $l=0.0025$  y  $Q_0=113$  m<sup>3</sup>/Hr, por lo tanto de las ecuaciones 32 y 33 mostradas en la figura 16:  $W_0=975$  m y  $X_0=-155$  m.

Aunque la figura 16 representa la conformación de un pozo de recarga en un acuífero libre inclinado, las premisas esenciales se aplican a acuíferos confinados también, siendo éstas: La influencia del control del agua de recarga sobre el agua subterránea original, la separación entre las dos causas para que el agua de recarga actúe como una isla semi-infinita, la extensión del efecto flotante aguas arriba del pozo de recarga y la aceleración del agua subterránea original alrededor de la isla.

La diferencia entre recarga de acuíferos libres y confinados es la ausencia de almacenamiento en el último de los dos. En consecuencia, la transmisión de presión en un acuífero confinado es más inmediata.

El efecto que un pozo de recarga simple puede tener sobre una corriente de agua subterránea en un acuífero abierto, podría multiplicarse si una hilera de tales pozos, fuera localizada en un acuífero confinado. En efecto, el flujo de agua subterránea original puede ser completamente checado, especialmente si los pozos de recarga fueran espaciados a menos que  $W_0$  m, y las



fronteras de las islas adyacentes fueran intersectadas. Por lo tanto, mediante mecanismos de pozos de recarga de esta manera arreglados, en un acuífero, confinado, puede establecerse una barrera que prevenga el movimiento de agua subterránea original indeseable. Su aplicación a cuerpos de agua subterránea extraña, por ejemplo, agua de mar, debe ser tratada con especialidad (Ref. 25).

Los pozos de recarga en acuíferos confinados, no esopados para el control de flujo, sino para recarga solamente, deben ser espaciados a suficiente distancia para evitar constricción indeseable de flujo de agua subterránea original y efecto ascendente resultante de ellos. En consecuencia, tal espaciamiento no debe ser menor de  $2W_0$ .

Por otra parte, los problemas que se presentan cuando se trata del estudio del flujo de agua en el subsuelo, relativamente ha sido resuelto para pozos de bombeo, ya que la teoría correspondiente ha logrado grandes avances gracias a la hidráulica de pozos. En teoría, al inyectar agua por medio de un pozo a un acuífero confinado, se forma en torno a aquel un cono de recarga, análogo al cono de depresión de un pozo normal, pero invertido, de tal suerte que la ecuación de la superficie piezométrica, puede encontrarse partiendo de las mismas ideas usadas para pozos de extracción. Bajo este supuesto, al desarrollar las ecuaciones resultan iguales tanto para descarga como para recarga (Ref. 26), por lo que al comparar los gastos de extracción e inyección, resultan idénticos, siempre y cuando los respectivos conos de recarga y descarga sean iguales. Sin embargo, como podrá observarse más adelante, rara vez se ratifica esta afirmación teórica y los pozos de inyección no alcanzan gastos análogos a los pozos de extracción aun bajo las mismas circunstancias, y es que entre recarga y extracción existen más diferencias que una simple inversión del flujo. Cuando se inyecta agua a presión se pueden producir fracturamientos en la roca que modifican las características de permeabilidad del acuífero, modificando con ello los gastos de recarga. Asimismo, cuando se extrae agua de un pozo, las partículas más finas del acuífero son arrastradas hacia adentro del pozo, por lo que la formación en torno al mismo, tiende a ser más permeable con el tiempo; en la recarga por lo contrario, esas partículas más finas tienden a formar en torno al pozo una capa más impermeable. Además, el agua de recarga comúnmente lleva gran cantidad de aire en suspensión lo que también tiende a reducir la permeabilidad del acuífero durante el proceso de inyección. Por otra parte, diferencias químicas del agua inyectada respecto a la existente en el subsuelo hace que se produzcan cambios iónicos. También el contenido de bacterias que forman aglomeraciones de regular tamaño y constituyen obstáculos alrededor del pozo y otras más. Todas estas consideraciones hacen necesario adecuar las teorías de pozos de bombeo para ser usadas en pozos de recarga, modificarlas y formular nuevas. Sin embargo, el estado del arte

actual esta limitado en este sentido dado que se requiere de un trabajo experimental costoso. Por ello, en este trabajo se trata de resaltar los avances ya existentes y formular apoyado en éstos un mecanismo que permita dar idea de los valores cuantitativos que han de tomarse en cuenta para el diseño de pozos de inyección.

Actualmente se cuenta con la ley fundamental que gobierna el flujo de líquidos ligeramente compresibles en formaciones permeables, la cual ha sido usada (Ref.27) para formular tres funciones unitarias que como se vera más adelante, sirven de base para el análisis de almacenamiento a través de pozos de inyección. Las funciones unitarias dan información cuantitativa sobre; (1) El cambio de presión en el pozo o formación como un resultado del valor unitario de inyección durante un período de tiempo dado, (2) la cantidad de fluido que puede ser dispuesto por unidad de presión aumentada en un intervalo de tiempo dado, y (3) El efecto de una alargada persistencia de la presión de inyección.

Predicciones correctas de presiones y cambios de presión son posibles si se provee suficiente información, la cual es obtenible de las características físicas de la formación, los fluidos de ésta y los fluidos de inyección. Los valores numéricos de dichas características pueden variar considerablemente. Es por ello que para simplificar los cálculos son usados factores de conversión, tanto que las soluciones que más adelante se dan, pueden ser usadas para resolver la mayoría de los problemas, independientemente de los valores numéricos de las características encontradas.

#### (B) DISPOSICION DE FLUIDOS

Las siguientes formulaciones se refieren a fluidos de densidad uniforme, comunmente denominados como "Fluidos Newtonianos", cuya viscosidad es función de la temperatura y en un grado muy pequeño de la presión. De capital interés es el agua, en la que todas las especies de sales pueden ser disueltas en tanto que ellas no alteren materialmente sus propiedades características. Suspensiones y soluciones cuyos constituyentes pueden reaccionar con las formaciones o los fluidos no son consideradas.

Las relaciones entre las tasas de disposición y características de las formaciones que se daran para fluidos newtonianos pueden aplicarse para suspensiones por considerables períodos de tiempo, sin embargo, el hecho de que una formación porosa pueda actuar como un cedazo y eventualmente quedar obstruida, debe inducirnos a no practicar aplicaciones que no están garantizadas.

La profundidad y porosidad de las formaciones determina la cantidad de fluido que puede ser almacenado por unidad de volumen. La permeabilidad y densidad de la formación más la

viscosidad del fluido determina la fuerza requerida por unidad de disposición. Sobre los otros factores que afectan la relación tiempo-presión (tamaño de almacenamiento, compresibilidad de los fluidos y de las formaciones) la influencia del tamaño del almacenamiento, es probablemente la más difícil de definir. Debido a que los fluidos a ser inyectados son solo ligeramente compresibles (5E-05 a 1E-04 por atmósfera), es obvio que solo acuíferos de considerable extensión pueden ser usados satisfactoriamente.

En los procesos de inyección, los fluidos presentes en las formaciones, como ya se dijo, son desplazados por un volumen aproximadamente igual de líquidos inyectados. Debido a que los volúmenes son tan aproximadamente iguales, un conocimiento del contenido de fluido por unidad de volumen de roca del acuífero da una primera aproximación del volumen que puede ser ocupado por el fluido inyectado. La eficiencia con que el fluido inyectado desplaza al fluido ya presente aumenta con la homogeneidad de la formación y por extensión con su permeabilidad absoluta, semejante a la saturación de una formación portadora de fluido que aumenta con el aumento de la permeabilidad. La presencia de pequeñas grietas y otras variaciones en la permeabilidad puede causar que la disposición de líquidos avance irregularmente. Por lo tanto, las operaciones de inyección deben ser tomadas en cuenta en acuíferos de considerable extensión solamente después de que sus características sobre un amplia área hayan sido estudiadas para obtener representaciones significativas.

El flujo de tales líquidos ligeramente compresibles obedece la misma ecuación diferencial que por ejemplo, la conducción de calor, que ampliamente ha sido estudiada (Ref. 27). La ecuación establece que la diferencia en los volúmenes de líquidos fluyendo dentro y fuera de un espacio entre dos anillos concéntricos hipotéticos alrededor de un pozo generado, es igual a la expansión de fluidos en dicho espacio. Lo más importante es la linealidad de la ecuación fundamental, que permite gran libertad en el uso de una solución. Antiguamente una solución era obtenida, pudiendo ser multiplicada o dividida por una constante o transferirse en el tiempo para ajustarse a una variedad de condiciones de operación. En resumen, las soluciones pueden ser superpuestas. Sin embargo, ello no es necesario para comprender la manera en que las soluciones fueron derivadas, pero sí deben ser claramente definidas las condiciones para las cuales ellas son válidas.

#### (C) SOLUCIONES ESTANDAR (FUNCIONES UNITARIAS)

Los depósitos subterráneos difieren en muchos aspectos, la permeabilidad puede ser tan baja como un mili-darcy o tan alta como varios darcys; el espesor puede variar desde unos cuantos centímetros a varias decenas de metros; la porosidad puede variar desde un bajo porcentaje a tanto como el 30%, y la viscosidad del fluido puede estar cerca de un centipoise en formaciones someras a

bajas temperaturas, o unas cuantas decenas de centipoises en formaciones a más de 3000 m de profundidad teniendo una temperatura de más de 100' C. Es claro que son necesarias soluciones que puedan ser hechas para ajustar cualquier condición del depósito y que, además, pueden ser usadas para reflejar las variaciones en los valores durante las operaciones de inyección.

Si  $t$  es el tiempo,  $qt$  el gasto,  $Qt$  el volúmen, todos en unidades adimensionales, entonces sus valores numéricos pueden ser encontrados mediante el uso del siguiente sistema de factores de conversión (Ref. 29), donde  $T$  es el tiempo en segundos,  $qT$  el gasto de inyección en  $\text{cm}^3/\text{seg}$  (por centímetro de formación) y  $QT$  el volúmen de fluido en  $\text{cm}^3$ . En las fórmulas siguientes, la permeabilidad en darcys esta denotada por  $k$ , la viscosidad (para condiciones de almacenamiento) en centipoises mediante  $u$ , la porosidad como una fracción decimal por  $B$ , la compresibilidad en  $\text{vol}/\text{vol}/\text{atmósfera}$  por  $C$ , el radio del pozo al cuadrado en  $\text{cm}^2$  por  $rw^2$  y el espesor de la formación en  $\text{cm}$  por  $h$ .

$$\text{Factor de conversión Tiempo; } t = k * T / (u * B * C * rw^2) \quad (34)$$

$$\text{Factor de conversión Gasto; } qt = qT * u / (2 * \pi * k * h) \quad (35)$$

$$\text{Factor de conversión Volúmen; } Qt = QT / (2 * \pi * B * C * h * rw^2) \quad (36)$$

Debido a que es necesario para determinar los efectos de variaciones y también interrupciones en el gasto del fluido dispuesto las tres funciones unitarias  $P_t$ ,  $Q_t$  y  $p_T$  fueron definidas y calculadas (Ver Ref. 28).

La función  $P_t$  da el cambio de presión acumulativa para el radio del pozo, cuando desde un tiempo cero progresivamente, una unidad de gasto de producción ha sido substraído, o una unidad de gasto de fluido ha sido inyectado en una formación de espesor unitario. Los valores numéricos de esta función estan dados en la tabla 2.2 y aparecen también en la figura 17, donde el incremento de presión esta punteada contra el logaritmo del tiempo. El incremento de presión es lineal para todos los tiempos mayores de 100 para un rango de  $1.151 = 0.5 * \ln(10)$  atmósferas por ciclo. Este incremento lineal es debido al hecho de que para  $t > 100$  la función puede ser representada por  $-0.5 * Ei(-0.25 * t)$  y también por  $(0.5 * \ln(t) + 0.4045)$ . Para comparación, esas dos aproximaciones de la función  $P_t$  tambien estan dadas en la tabla 2.2.

TABLA 2.2 CAMBIO DE PRESION ACUMULATIVA EN ATMOSFERAS COMO UNA FUNCION DEL TIEMPO ADIMENSIONAL  $t$  (PARA USO DE  $-1/2 Ei(-1/4t)$  Y  $1/2 \ln(t) + 0.4045$ ).

TIEMPO $t$	$P_t$	$-1/2 Ei(-1/4t)$	$1/2 \ln(t) + 0.4045$
------------	-------	------------------	-----------------------

.010	.1081	-	-
.015	.1312	-	-
.020	.1503	-	-
.030	.1818	-	-
.040	.2077	-	-
.060	.2499	-	-
.080	.2846	-	-
.100	.3144	.01246	-
.150	.3753	.03917	-
.200	.4245	.07321	-
.300	.5028	.14630	-
.400	.5650	.21610	-
.600	.6628	.33760	-
.800	.7394	.43780	-
1.000	.8030	.52210	-
1.500	.9278	.68730	-
2.000	1.0234	.81170	-
3.000	1.1678	.99470	-
4.000	1.2765	1.12850	-
6.000	1.4377	1.32100	-
8.000	1.5573	1.45980	-
10.000	1.6554	1.56830	1.55580
15.000	1.8324	1.76690	1.75850
20.000	1.9615	1.90860	1.90240
30.000	2.1481	2.10930	2.10510
40.000	2.2831	2.25210	2.24890
50.000	2.4762	2.45380	2.45170
80.000	2.6148	2.59720	2.59550
100.000	2.7231	2.70840	2.70710
150.000	2.9204	2.91070	2.90980
200.000	3.0626	3.05430	3.05370
300.000	3.2627	3.25690	3.25640
400.000	3.4051	3.40060	3.40020
600.000	3.6064	3.60320	3.60300
800.000	3.7495	3.74700	3.74680
1000.000	3.8606	3.85850	3.85840

NOTA: Desde  $t=1,000$  en adelante, las diferencias entre los valores de  $P_t$  y los valores de  $-1/2 E_i(-1/4t)$  y  $1/2 \ln(t)+0.4045$  son tan pequeñas que pueden ser despreciadas. Por lo tanto, desde  $t=1,000$  en adelante, las caídas de presión pueden ser calculadas más fácilmente a partir de la última fórmula. Para valores de  $t$  más pequeños que .010, use  $P_t=2*(t/\pi)^{0.5}-(t/2) + t^{(3/2)} / (2*\pi^{.5})$ .

La función  $Q_t$  da el volumen acumulativo de fluido substraído o inyectado en el interior de una formación de espesor unitario si desde un tiempo cero la presión a contraface del pozo fuera disminuida (o aumentada) en una atmósfera. Los valores numéricos de esta función estan dados en la tabla 2.3.

TABLA 2.3. FUNCION Qt. FLUJO ACUMULATIVO (O VOLUMEN INYECTADO)  
 POR ATMOSFERA COMO UNA FUNCION DEL TIEMPO ADIMENSIONAL t.

t	Qt	t E05	Qt E04	t E10	Qt E10
.010	.117	.010	.030	.010	.001
.015	.146	.015	.041	.015	.002
.020	.169	.020	.053	.020	.002
.030	.210	.030	.076	.030	.003
.040	.245	.040	.098	.040	.004
.060	.305	.060	.139	.060	.006
.080	.357	.080	.180	.080	.008
.100	.404	.100	.219	.100	.010
.150	.508	.150	.316	.150	.014
.200	.598	.200	.409	.200	.019
.300	.756	.300	.589	.300	.028
.400	.896	.400	.765	.400	.037
.600	1.144	.600	1.105	.600	.054
.800	1.365	.800	1.435	.800	.071
1.000	1.568	1.000	1.759	1.000	.088
1.500	2.029	1.500	2.549	1.500	.132
2.000	2.445	2.000	3.319	2.000	.171
3.000	3.200	3.000	4.818	3.000	.252
4.000	3.888	4.000	6.282	4.000	.333
6.000	5.148	6.000	9.135	6.000	.491
8.000	6.148	8.000	11.922	8.000	.647
10.000	7.402	10.000	14.662	10.000	.801
15.000	9.949	15.000	21.366	15.000	1.300
20.000	12.316	20.000	27.923	20.000	1.739
30.000	16.741	30.000	40.746	30.000	2.500
40.000	20.884	40.000	53.301	40.000	3.333
60.000	28.658	60.000	77.874	60.000	4.800
80.000	35.991	80.000	101.315	80.000	6.400
100.000	43.025	100.000	125.680	100.000	7.407
150.000	59.744	150.000	183.890		
200.000	75.653	200.000	240.990		
300.000	105.789	300.000	352.970		
400.000	134.519	400.000	482.890		
600.000	189.325	600.000	680.450		
800.000	241.784	800.000	892.800		

La función pT da el decremento de presión en un pozo producido por un gasto unitario cuyo radio ha sido agrandado mediante trabajos de rehabilitación. Se asume que en el interior de la ampliación del radio efectivo, la porosidad de la formación no es afectada por los trabajos de rehabilitación, la permeabilidad es aumentada a infinito y la compresibilidad de los fluidos inyectados es la misma que la de los fluidos presentes en la formación.

(D) APLICACIONES DE LAS FUNCIONES Pt Y Qt.

Se asume que (1) la formación usada para la disposición se encuentra a unos 200 m de profundidad; (2) los fluidos de la formación están bajo una presión de 24 kg/cm<sup>2</sup>; (3) el espesor de la zona permeable es de 95 m; (4) la zona usada tiene una permeabilidad promedio de 1.8 m/día (1.478 darcys) y una porosidad del 17%; (5) el fluido tiene una viscosidad de 0.7E-04 kg-seg/m<sup>2</sup> (0.656 centipoises) a una temperatura de almacenamiento de 40° C; y (6) la compresibilidad del fluido y de la formación se estima en 4E-05 cm<sup>2</sup>/kg (4.453E-05/atmosfera). Cada pozo debe ser terminado a 12 pulgadas de diámetro atravesando la totalidad del espesor permeable. Con lo cual se definen los siguientes parámetros:

H=200 m  
 P=24 kg/cm<sup>2</sup>  
 h=9500 cm  
 k=1.478 darcys

B=0.17  
 u=0.656 Centipoises  
 C=4.453E-05/atm  
 r=15.24 cm

El problema radica en saber si 1 m<sup>3</sup>/seg puede ser inyectado al acuífero, sin incrementos excesivos de presión. Si más de un pozo es requerido, cuántos pozos deben ser perforados y cual puede ser el efecto de la distancia entre los pozos de inyección con relación a su historia de presión.

Para resolver esos problemas y similares, el gasto de inyección es expresado en cm<sup>3</sup>/seg, 1 m<sup>3</sup>/seg = 1E06 cm<sup>3</sup>/seg = qT. De donde; el gasto adimensional por unidad de espesor vale:

$$qt = ((1E06 * 0.656) / (2 * \pi * 1.478 * 9500)) = 7.436$$

Para determinar la presión de inyección ha ser esperada después de 1 día, 1 año, 2 años, etc., esos tiempos son convertidos en unidades adimensionales mediante el factor de conversión para tiempo, usando las características de la formación, del fluido y del pozo anteriormente enumeradas. Para esas condiciones el tiempo adimensional es relacionado con el tiempo en segundos mediante la fórmula:

$$t = (k * T / (B * u * C * r * w^2)) = 1.478 * T / (0.17 * 0.656 * 4.453E-05 * 15.24^2) = 1281 * T$$

Para todos esos tiempos (aún 1 día hace  $t > 1000$ ), la fórmula usada para calcular el incremento de presión en  $\text{kg/cm}^2$  es:

$$P_t = (0.5 \cdot \ln(t) + 0.4045) \cdot 1.033 \quad (37)$$

Como  $T = 86400$  seg para un día entonces  $t = 110.7 \cdot 10^6$  luego  $P_t = (0.5 \cdot \ln(110.7 \cdot 10^6) + 0.4045) \cdot 1.033 = 10 \text{ kg/cm}^2$ , por lo que el incremento total de presión delta P al final del día es  $7.436$  veces la  $P_t$  obtenida, es decir:  $\text{delta } P = 7.436 \cdot P_t$ , resultando  $\text{delta } P = 7.436 \cdot 10 = 74.36 \text{ kg/cm}^2$ . Al continuar la inyección de un  $\text{m}^3/\text{seg}$ , el incremento de presión al final de los años sucesivos fue calculado y se muestra en la tabla 2.4.

TABLA 2.4. INCREMENTO DE PRESION DEBIDA AL GASTO DE INYECCION

PERIODO	tE09	Pt (Kg/cm <sup>2</sup> )	DELTA P (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	40.40	13.03	96.91
2	80.85	13.39	99.57
3	121.28	13.60	101.13
4	161.70	13.75	102.23
5	202.13	13.86	103.09
6	242.45	13.96	103.79
7	282.98	14.04	104.38
8	323.40	14.11	104.89
9	363.83	14.17	105.35
10	404.25	14.22	105.75

INDICA AL FINAL DEL AÑO

Por una de varias razones puede ser deseable limitar el incremento de presión causado por la inyección. Si las condiciones lo permiten, la inyección debe ser interrumpida por un año, tiempo durante el cual el incremento debe casi desaparecer, como se muestra en la tabla 2.5

TABLA 2.5 DISMINUCION DE LA PRESION DEBIDO AL REPOSO

PERIODO	tE09	IC P Kg/CM <sup>2</sup>	GASTO (CM <sup>3</sup> /s)	IC P (Kg/cm <sup>2</sup> )
11	444.68	106.12	1E06-1E06	106.12-96.91 =9.81
12	485.10	106.45	1E06-1E06	106.45-99.57 =6.88
13	525.53	106.76	1E06-1E06	106.76-101.13 =5.63
14	565.95	107.04	1E06-1E06	107.04-102.23 =4.81
15	606.38	107.31	1E06-1E06	107.31-103.79 =3.52
16	646.80	107.56	1E06-1E06	107.56-104.38 =3.18



Para el cálculo de los efectos de tal interrupción, el procedimiento seguido es el mismo que se usa cuando el caudal se incrementa, es decir se acepta la ley de superposición de causas y efectos. La interrupción es considerada equivalente a seguir continuando la inyección y al mismo tiempo extraer el mismo caudal, con lo cual se hace el gasto de inyección cero. La tabla muestra que casi el 91% del incremento de presión ha desaparecido después de un año de iniciado ésta. De acuerdo con lo anterior, es claro que después de 10 años de inyección, un día de interrupción, reduce el incremento de presión, bajando a 31.39 Kg/cm<sup>2</sup> (105.75-74.36).

El incremento total en la presión que puede ser aceptada satisfactoriamente depende principalmente de la profundidad de la formación. Por lo tanto, la importante interrogante comúnmente es expresada de manera diferente: Suponiendo que un incremento de presión de 20 Kg/cm<sup>2</sup> (máximo 30 Kg/cm<sup>2</sup>) puede aceptarse satisfactoriamente, ¿Que tanto fluido puede ser depositado durante los años sucesivos?

Para obtener respuestas cualitativas, puede ser usada la curva  $Q_t$  ya que es esta función la que da la cantidad acumulativa inyectada, si a partir de un tiempo cero una presión diferencial de una atmósfera es mantenida, es decir la presión contra la formación es reducida (caso de extracción) o aumentada en una atmósfera.

El problema es resuelto primero expresando el tiempo para el que la información de presión es requerida en unidades dimensionales; mirando sobre los valores de  $Q_t$  para ese tiempo en particular y multiplicando éstos por el factor de conversión del volumen. Los valores necesarios están dados en la tabla 2.3 y gráficamente se muestran en la figura 27.

Una presión de inyección de 20 Kg/cm<sup>2</sup> resulta en un valor de  $Q_t$  de  $20 \cdot 2PI \cdot B \cdot C \cdot h \cdot r_w \cdot 2 \cdot Q_t$  con lo cual se obtiene

$$Q_t = 20 \cdot 2PI \cdot 0.17 \cdot 4.453E-05 \cdot 9500 \cdot 232.26 \cdot Q_t; \quad QT = 2100 \cdot Q_t.$$

Al obtener los correspondientes valores de  $Q_t$  para cada año sucesivo es posible calcular la cantidad total inyectada al final de cada año usando la ecuación anteriormente obtenida. Los resultados se muestran en la tabla 2.6

TABLA 2.6 CANTIDAD TOTAL INYECTADA POR AÑOS EN M3

AÑO	tE09	QtE09	QT(cm3)	INY/ANUAL (CM3)
1	40.43	3.36	7.06	7.06
2	80.85	6.53	13.72	6.66

3	121.28	10.13	21.28	7.56
4	161.70	14.02	29.45	8.17
5	202.13	17.55	36.86	7.41
6	242.45	20.62	43.30	6.44
7	282.98	23.71	49.78	6.48
8	323.40	26.95	56.60	6.82
9	363.83	30.32	63.70	7.10
10	404.25	33.65	70.65	6.95

VALORES OBTENIDOS DE LA TABLA 2.3 MEDIANTE INTERPOLACION.

Como puede observarse este volumen aumenta casi proporcionalmente al tiempo, por lo que el gasto de inyección anual resulta casi igual para todos los años, siendo el gasto medio de 7.065E06 m<sup>3</sup> por año o lo que es igual 224 lps. Si la presión usada para la inyección fuera aumentada en 10 Kg/cm<sup>2</sup> (de 20 a 30 Kg/cm<sup>2</sup>) al final del segundo año, la cantidad adicional inyectada durante los años sucesivos debe ser un medio más grande que el volumen inyectado durante los primeros años. Esto se muestra en la tabla 2.7.

TABLA 2.7 INCREMENTO DEL VOLUMEN INYECTADO EN FUNCION DEL INCREMENTO DE PRESION.

AÑO	PRESION (Kg/cm <sup>2</sup> )	Qt(m <sup>3</sup> )E06	TOTAL (m <sup>3</sup> ) E06
1	20	7.06	7.06
2	20	13.72	13.72
3	30	21.28+6.86=	28.14
4	30	29.45+10.64=	40.09
5	30	36.86+14.73=	51.59
6	30	43.30+18.43=	61.73
7	30	49.78+21.65=	71.43
8	30	56.60+24.89=	81.49
9	30	63.70+28.30=	92.00
10	30	70.75+31.85=	102.60

Con lo que el gasto medio resultaría de 325 lps.

(E) INTERFERENCIA DE POZOS (MAS DE UN POZO DE INYECCION)

Inyectando 1 m<sup>3</sup>/seg, durante 10 años incrementa la presión en los pozos en 105.75 Kg/cm<sup>2</sup>, lo cual ciertamente debe ser considerado excesivo para un almacenamiento con una presión original de 24 Kg/cm<sup>2</sup>. En consecuencia, más de un pozo de inyección es requerido, por lo cual es necesario considerar que pueden resultar interferencias de presión. La relación tiempo-presión en

la formación que rodea un pozo dentro del cual un fluido es inyectado a gasto unitario esta dada por la Integral exponencial (Comúnmente conocida como la función  $Ei$ )

$$-1/2 Ei(-r^2/4t) \quad (38)$$

En esta fórmula  $t$  es el mismo tiempo adimensional discutido antes, pero  $r$  es la distancia entre los pozos de inyección expresada en múltiplos de su radio. Abundantes valores de la función  $Ei$  aparecen en la Referencia 30. Suficientes valores para la mayoría de los trabajos están dados en la tabla 2.8 y se muestran en la figura 19.

TABLA 2.8  $pT$  Y  $-1/2 Ei(-x)$  REPRESENTAN LOS CAMBIOS DE PRESION EN ATMOSFERAS (DONDE  $x$  ES EL VALOR NUMERICO DE  $1/4t$  O  $r^2/4t$ ).

$x$	$-1/2 Ei(-x)$	$t$	$pT$
.010	2.019000	.010	.17270
.015	1.819000	.015	.25090
.020	1.677000	.020	.32570
.030	1.480000	.030	.46750
.040	1.341000	.040	.06009
.060	1.148000	.060	.08486
.080	1.013000	.080	.10770
.100	.911500	.100	.12920
.150	.732200	.150	.17730
.200	.611300	.200	.21980
.300	.452800	.300	.29320
.400	.351200	.400	.35560
.600	.227200	.500	.41030
.800	.155300	.600	.45910
1.000	.109700	.700	.50320
1.200	.079200	.800	.54350
1.400	.058110	.900	.58070
1.600	.043150	1.000	.61520
1.800	.032360	1.500	.75830
2.000	.024450	2.000	.86890
2.500	.012460	2.500	.95930
3.000	.006524	3.000	1.03600
4.000	.001890	4.000	1.16100
4.300	.001316	6.000	1.34400
4.600	.000921	8.000	1.47700
5.000	.000574	10.000	1.58200
5.300	.000404	15.000	1.77700
5.600	.000285	20.000	1.91600
6.000	.000180	30.000	2.14400
6.300	.000128	40.000	2.25500
7.000	.000058	60.000	2.45600
8.000	.000019	80.000	2.60000
9.000	.000062	100.000	2.71700

10.000

.000002

La superposición puede ser usada como antes. En consecuencia el incremento de presión puede ser calculado asumiendo que un total de 250 lps deben ser inyectados en 10 pozos; esta cantidad se incrementara en 250 lps al final del tercero, quinto y séptimo año. El incremento de presión anual según la condición descrita anteriormente puede tabularse a partir de la siguiente información:

250 lps =  $2.5E05$  cm<sup>3</sup>/seg, de donde  $qT = 2.5E04$ /pozo, luego entonces el gasto adimensional por unidad de espesor vale:

$$qt = (2.5 * E04 * 0.656) / (2PI * 1.478 * 9500) = 0.1859$$

Por lo que tomando valores para  $P_t$  de la tabla 2.4 y considerando que para 25 lps,  $\Delta P = 0.1859 p_t$ , tenemos:

TABLA 2.9 INCREMENTO DE PRESION DEBIDO AL GASTO DE INYECCION

PERIODO	DELTA P	GASTO (lps)	Inc P (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	2.42	25	2.423
2	2.49	25	2.489
3	2.53	25	2.528
4	2.56	50	4.979
5	2.58	50	5.060
6	2.60	75	7.648
7	2.61	75	7.655
8	2.62	100	10.150
9	2.63	100	10.274
10	2.64	100	10.359

El período corresponde al final del año.

Los valores de la función  $P_t$  fueron tomadas de la tabla 2.4

El cálculo detallado del incremento  $\text{Inc P}$  aparece en la figura 20 inciso B.

FIG. 20 INCREMENTO DE PRESION SEGUN CONDICION DE OPERACION (KG/CM<sup>2</sup>).

A) 2.423 2.489 2.528 2.556 2.577 2.595 2.610 2.622 2.634 2.644

A                      A                      O                      S

(1)   (2)   (3)   (4)   (5)   (6)   (7)   (8)   (9)   (10)

B)	2.423	2.489	2.528	2.556	2.577	2.595	2.610	2.622	2.634	2.644
				2.423	2.489	2.528	2.556	2.577	2.595	2.610
					2.429	2.489		2.528	2.556	2.577
								2.423	2.489	2.528
	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2.423	2.489	2.528	4.979	5.066	7.546	7.655	10.159	10.274	10.359

- A) Incremento de presión sin variación de gasto Q=100 lps.  
 B) Incremento de presión según política de gastos descritos.

A esos incrementos deben ser sumados otros resultantes de la inyección del fluido en el interior de los otros dos pozos vecinos (se asume que la configuración de los pozos es tal que forman triángulos entre sí). Supongase que los pozos fueran perforados a 950 m de distancia entre las esquinas de un triángulo equilátero. Esta distancia es igual a 6234 veces el radio de los pozos, de manera que es necesario revisar los valores numéricos de  $-1/2 Ei(-r^2/4t)$  con lo cual da  $-1/2 Ei(-38.86E08/4t)$ .

De acuerdo con la tabla 2.8,  $x=r^2/4t$ , a partir de lo cual se obtiene  $-1/2 Ei(-x)$ , con lo cual puede constituirse la tabla 2.10

TABLA 2.10 INCREMENTO DE PRESION DEBIDO A INTERFERENCIA

ARO	t E 09	x E-04	-1/2 Ei(-x)	DELTA P	INC. TOTAL
1	40.43	2.40	3.87	1.48	= 1.48
2	80.85	1.20	4.18	1.61	= 1.61
3	121.28	.80	4.31	1.65	= 1.65
4	161.70	.60	4.37	1.68+1.48	= 3.16
5	202.13	.48	4.40	1.69+1.61	= 3.30
6	242.45	.40	4.43	1.70+1.65+1.48	= 4.83
7	282.98	.34	4.45	1.71+1.68+1.61	= 5.00
8	323.40	.30	4.46	1.71+1.69+1.65+1.48	= 6.53
9	363.83	.27	4.47	1.72+1.70+1.68+1.61	= 6.71
10	404.25	.24	4.48	1.72+1.71+1.69+1.65	= 6.77

NOTA. Los valores de  $-1/2 Ei(-x)$  fueron tomados de la ref. 30.

La cuarta columna de la tabla precedente, da el incremento de presión en atmósferas por unidad de gasto de inyección en uno de los pozos perforados. Ese incremento debe ser multiplicado por 0.1869 para ajustar los gastos que no son unitarios, por 1.033 para obtener Kg/cm<sup>2</sup> y por 2 debido a la inyección en los pozos vecinos. Los resultados están dados en la primera columna de la tabla bajo el encabezado DELTA P. La inyección de 25 lps al inicio del cuarto, sexto y octavo años causa los incrementos adicionales mostrados individualmente en las siguientes tres columnas.

El incremento de presión total en un pozo de inyección (por encima de la presión original) se aproxima al incremento resultante a partir de la inyección en el pozo mismo y la interferencia de los pozos vecinos.

TABLA 2.11 INCREMENTOS DE PRESION TOTAL

PERIODO	DELTA (KG/CM2)	DELTA (Kg/cm2)	TOTAL (Kg/cm2)
1	2.42	1.48	3.90
2	2.49	1.61	4.10
3	2.53	1.65	4.18
4	4.98	3.16	8.14
5	5.07	3.30	8.37
6	7.55	4.83	12.38
7	7.66	5.00	12.66
8	10.15	6.53	16.68
9	10.27	6.71	16.98
10	10.36	6.77	17.13

INCREMENTO DE PRESION EN UN POZO.  
INCREMENTO DE PRESION DEBIDO A INTERFERENCIA.

haber sido inyectado todo el fluido en un solo pozo, la presión debería haberse incrementado en  $3 \times 10.36 = 31.08$  Kg/cm<sup>2</sup>. El uso de los pozos separados 950 m reduce la presión de inyección máxima en  $31.08 - 17.13 = 13.95$  Kg/cm<sup>2</sup> a el final del décimo año.

Para proporcionar un conocimiento más profundo en el efecto de la distancia de pozo, el efecto de la interferencia ha sido calculado asumiendo una distancia entre pozos de (A) 5000 m, (B) 10000 m y (C) 15000 m. Se supone también que los gastos de inyección fueron incrementados como antes. En la tabla 2.12 se muestran los cálculos para el caso (A) aunque también aparecen los resultados para los dos casos restantes.

TABLA 2.12 EFECTOS DE INTERFERENCIA PARA 5000, 10000 Y 15000 m.

PERIODO	t E09	x E-03	-1/2 EI(-x)	INTERFERENCIA	A	B	C
1	40.43	6.656	2.067	.79=	.790	.310	.150
2	80.85	3.328	2.133	.82=	.820	.460	.270
3	121.28	2.219	2.156	.83=	.830	.510	.340
4	161.70	1.664	2.167	.83+.79=	1.620	.540	.460
5	202.13	1.331	2.173	.83+.82=	1.650	.620	.500
6	242.45	1.110	2.178	.84+.83+.82=	2.490	.650	.540
7	282.98	.951	2.181	.84+.83+.83=	2.500	.670	.570
8	323.40	.832	2.183	.84+.83+.83+.79=	3.290	.690	.590

9	363.83	.740	2.185	.84+.84+.83+.83=3.340	.710	.600
10	404.25	.666	2.187	.84+.84+.83+.83=3.340	.730	.610

Como puede observarse a partir de la tabla anterior, la distancia entre pozos de inyección debe ser de varios miles de metros si se desea que la interferencia sea mantenida por debajo de niveles apreciables. Los resultados obtenidos son para la formación, fluido y características del pozo previamente descritas. Dichos resultados pueden ser diferentes si las características toman valores diferentes.

#### (F) ESTIMULACION DE POZO (LA FUNCION pT)

En lugar de usar más de un pozo de inyección se considera que es posible mejorar los gastos de inyección, mediante estimulación. Ello puede lograrse mediante la acidización o bien ampliándolo. Para calcular los efectos, se asume que la acidización causa un alargamiento del radio efectivo de la barrenación, por ejemplo, desde un radio de 3 pulgadas hasta 3, 6 o 15 metros. En el interior de este radio, se considera que solamente la permeabilidad de la formación es incrementada tanto, que puede ser considerada como infinita en comparación con su valor fuera del radio efectivo. Como una mayor simplificación, la porosidad se considera inafectada.

La curva pT da el incremento de presión por unidad del gasto de inyección como una función del tiempo t (exactamente igual que la función pT) tomando en cuenta la compresibilidad de los fluidos dentro del radio agrandado del pozo. Los valores numéricos para la curva están dados en la tabla 2.8 y su configuración se muestra en la figura 17.

Si esta relación pT es usada, el tamaño del radio agrandado puede ser obtenido a partir de observaciones de presión durante pruebas de inyección (a gasto constante) antes y después de descargar. Puede asumirse que el radio del pozo es incrementado de 6 pulgadas a 60 m, es decir agrandarlo 400 veces. Tal incremento disminuye los valores del tiempo adimensional mediante un factor de  $400^2=160000$ . Mientras las condiciones dadas previamente para Pt dieron un tiempo adimensional t de 110.7E06 unidades por día, ahora este tiempo es reducido a 691.74 unidades por día. Del mismo modo, mientras el incremento de presión siguió casi inmediatamente la relación  $1/2 \ln(t)$ , después de la estimulación puede tomar la presión en el pozo prácticamente un día entero para aumentar a el punto donde la ley  $1/2 \ln(t)$  prevalece (ver figura 17). Por lo tanto, pruebas de varios días de duración son requeridas para determinar el mejoramiento por estimulación. También, como ambas curvas pueden ser representadas mediante la función  $1/2 \ln(t)$  (pero una t es 160,000 veces más pequeña que la otra) la máxima mejoría debe ser igual a  $1/2 \ln(160,000)=5.99$

atmósferas. Para las condiciones en la formación y pozos discutidos, esta mejoría equivale a  $0.1859 \times 5.99 \times 1.033 = 1.15$  Kg/cm<sup>2</sup>.

Asumiendo como antes que el gasto de inyección de 25 lps durante los 3 primeros años es incrementado en esa cantidad cada 2 años, la tabla 2.13 puede ser compuesta usando los valores de pT y Pt calculados a partir de la relación  $1/2 \ln(t)$ .

TABLA 2.13 EFECTO DE LA ESTIMULACION DEL POZO

ARO	t E09	Pt	INC. PRESION	t E03	Pt	INC P	MEJOR
1	40.43	13.03	2.4 = 2.4	252	6.80	1.30	1.10
2	80.86	13.39	2.5 = 2.5	506	7.20	1.30	1.20
3	121.28	13.60	2.5 = 2.5	758	7.40	1.40	1.10
4	161.70	13.75	2.6+2.4 = 5.0	1000	7.60	2.70	2.30
5	202.13	13.86	2.6+2.5 = 5.1	1300	7.70	2.80	2.30
6	242.45	13.96	2.6+2.5+2.4 = 7.5	1515	7.80	4.20	3.30
7	282.98	14.04	2.6+2.6+2.5 = 7.7	1769	7.90	4.30	3.40
8	323.40	14.11	2.6+2.6+2.5+2.4 = 10.1	2021	7.90	5.80	4.30
9	363.83	14.17	2.6+2.6+2.6+2.5 = 10.3	2274	8.00	5.90	4.40
10	404.25	14.22	2.6+2.6+2.6+2.5 = 10.3	2527	8.00	5.90	4.40

El efecto benéfico de la estimulación del pozo es evidente, la reducción de la presión permanece constante en 4.4 Kg/cm<sup>2</sup> por cada 25 lps inyectados.

#### (G) TAMAÑO DEL ALMACENAMIENTO

En la discusión anterior se asumió que el almacenamiento puede ser considerado de extensión infinita, pero esto obviamente no es correcto. Sin embargo, trabajar con las funciones unitarias descritas (Funciones estrictamente válidas para almacenamientos infinitos) han producido buenos resultados en muchos casos.

Asumiendo que las personas encargadas de inyectar grandes volúmenes de fluido pueden elegir almacenamientos apacibles de extensión muy grande. No obstante, los almacenamientos elegidos pueden tener tales características y ser de semejante extensión que sus límites se interpongan durante operaciones de disposición. Por lo tanto, algunos instrumentos que reconozcan indicios anticipados de tales fenómenos es esencial.

Es fácil comprender que cuando el fluido es inyectado a un almacenamiento circular de extensión limitada el incremento de presión al principio no puede ser diferenciado de los incrementos observados en un almacenamiento infinito. Sin embargo, después de que la presión rebota ondas desde la frontera, el incremento de



presión debe acelerarse (eso es, desviarse por encima de la curva  $P_t = 1/2 \ln(t)$  válida para operaciones en un almacenamiento infinito) y, finalmente, debido a que la inyección está a un gasto constante, la presión debe aumentar a una tasa constante por unidad de tiempo. Por lo tanto, la observación precisa de presiones de inyección para cualquier indicio de aceleración en el valor del incremento es esencial. Si un incremento inusual es sospechoso, pruebas de presión de falla deben ser realizadas. Ellas son muy informativas y simples; es necesario solamente suspender operaciones y obtener registros precisos del comportamiento de presión como función del tiempo empleado. Si las presiones observadas son graficadas contra el logaritmo del tiempo empleado dividido por el tiempo total, los puntos deben formar una línea recta.

Extendiendo esta relación al punto donde el tiempo empleado dividido por el tiempo total es unitario debe dar la presión original del almacenamiento si no ha ocurrido aceleración del incremento de presión. Sin embargo, cualquier exceso por encima de la presión original del almacenamiento en ese punto, indica un almacenamiento limitado, cuyo tamaño puede ser calculado a partir del exceso de presión observado y la cantidad total de fluido inyectado. El valor del incremento debe ser el factor importante a determinarse si las operaciones pueden ser registradas y, también, para cuanto tiempo.

Es claro a partir de lo anterior, que la inyección de desechos líquidos en formaciones permeables es factible, y que bajo condiciones propicias cantidades considerables de desechos líquidos pueden ser almacenados satisfactoriamente sin causar un incremento excesivo sobre la presión original del almacenamiento. Los cambios de presión próximos al pozo y para cualquier punto en la formación pueden ser pronosticados porque el efecto del gasto de inyección y cambios de éste pueden ser estimados para cualquier punto en la formación permeable. La exactitud de esas estimaciones depende del conocimiento de las características de la formación, el fluido de la formación y el fluido inyectado.

Incremento excesivo sobre la presión original del almacenamiento. Los cambios de presión próximos al pozo y para cualquier punto en la formación pueden ser pronosticados porque el efecto del gasto de inyección y cambios de éste pueden ser estimados para cualquier punto en la formación permeable. La exactitud de esas estimaciones depende del conocimiento de las características de la formación, el fluido de la formación y el fluido inyectado.

## 2.2 CONSIDERACIONES SOBRE EL AGUA DE INYECCION

### 2.2.1. ASPECTOS QUIMICOS Y EXTENSION SUPERFICIAL.

## (A) ASPECTOS QUIMICOS

Las aguas inyectadas y/o su mezcla por dispersión con el agua natural existente en el acuífero, pueden ser en ocasiones incrustantes o agresivas. Si son incrustantes depositan materiales en los espacios vacíos y los colmatan progresivamente, reduciendo la permeabilidad; bajo este punto de vista son más afectados los materiales permeables por porosidad que los permeables por fisuración. En ocasiones pueden producirse polimeraciones que actúan aumentando la viscosidad y reduciendo la permeabilidad. Los gases liberados por ciertas reacciones químicas o por un aumento en la temperatura también reducen la permeabilidad, aunque las altas presiones reinantes ayuden a mantenerlos disueltos. No es fácil prever la interacción del agua inyectada con el material permeable y/o con el agua natural, así como posibles autorreacciones, ya que las condiciones reales ambientales pueden ser muy diferentes de las que se pueden simular en laboratorio. Sin embargo, los ensayos de laboratorio son con frecuencia útiles como primera aproximación. En especial cuando se trata de inyectar aguas residuales industriales muy distintas de las existentes naturalmente en el acuífero receptor. Si es posible, los ensayos deben realizarse a la temperatura y presión de la formación y durar de 8 a 24 horas. Cuando se tema una interacción entre el agua inyectada y el agua existente en la zona interfacial, puede procederse a la inyección previa de un agua compatible con ambas en cantidad suficiente como para formar una separación, por lo menos mientras el frente de agua inyectada este cerca del pozo, que es donde la reducción de permeabilidad es menos deseable.

La interacción con el acuífero puede producirse por disolución, ataque o intercambio iónico con la fase sólida. Las aguas ácidas son especialmente agresivas a los minerales carbonatados, no produciéndose problemas especiales excepto por liberación de gases (CO<sub>2</sub>) si la presión no es lo suficientemente alta, o por producción de precipitados insolubles a consecuencia del cambio de pH, como puede suceder con el Fe y el Mn. La interacción con otros minerales es más difícil, excepto con aguas muy alcalinas. Para evitar algunas de estas precipitaciones conviene un pretratamiento del agua a inyectar, como por ejemplo, eliminar SO<sub>4</sub>= si el agua del acuífero contiene Ba y Sr, airear para eliminar Fe<sup>++</sup>, ablandar, o desgasificar para eliminar carbonatos.

El efecto del agua inyectada sobre las arcillas del acuífero puede ser muy importante, pues puede modificar su naturaleza. En general, una reducción de salinidad disminuye la permeabilidad en un grado variable según el tipo de arcilla; el aumento del pH tiene un efecto similar. El mineral de la arcilla más afectado es la montmorillonita y el menos la caolinita. Las variaciones en la fuerza iónica también afectan, aún con pequeños cambios de

salinidad. Este efecto puede estudiarse haciendo circular el líquido a inyectar a través de testigos de material acuífero durante 24 horas, a la temperatura del acuífero.

El terreno puede reaccionar con el agua inyectada reteniendo por adsorción o por cambio iónico ciertos iones, unos con más fuerza que otros; es especialmente válido para iones pesados, como los de Cs, Sr, Ce, etc., o muchas materias orgánicas. Si estas sustancias retenidas pierden su toxicidad y peligrosidad con el tiempo, como los radioisótopos (desintegración) o sustancias orgánicas (oxidaciones y acciones bacterianas), el acuífero ayuda a la depuración.

Las bacterias existentes en el nivel de inyección o las que aporta el líquido que se inyecta, pueden favorecer ciertas reacciones que dan origen a precipitados o a polímeros. Tal sucede con las bacterias sulfatorreductoras, ferrosas y las productoras de lodos sacáricos. En ocasiones se habla de fenómenos osmóticos a través de los niveles confinantes, pero se tiene poca evidencia del fenómeno y en todo caso su acción es pequeña a corto y mediano plazos.

#### (B) EXTENSION SUPERFICIAL DEL AGUA INYECTADA

El agua inyectada se almacena alrededor del pozo de inyección. Si el pozo es completo y el acuífero es homogéneo e isotropo, ocupa todo el espesor y forma un cilindro alrededor del mismo, cuyo radio  $r$ , se obtiene de:

$$V = \pi r^2 b m$$

(39)

Siendo  $V$  el volumen total inyectado,  $b$  el espesor de la inyección,  $m$  la porosidad eficaz y  $\pi r^2 b$  el volumen del acuífero afectado por la inyección.

En el frente de agua inyectado se produce una difusión y dispersión. Si el acuífero está estratificado, el frente progresa irregularmente de acuerdo con la relación  $K/m$ , siendo  $K$  la permeabilidad y  $m$  la porosidad eficaz. La mayor irregularidad en la distribución se presenta en niveles kársticos o con grandes fisuras, donde se pueden formar profundas digitaciones.

Si el pozo es de penetración parcial, el frente de agua inyectada avanza limitándose inicialmente a la zona donde se inyecta y poco a poco se va extendiendo verticalmente hasta que a suficiente distancia ocupa todo el espesor del acuífero. La existencia de un flujo natural en el acuífero receptor arrastra el volumen de agua inyectada, que ya no es de forma cilíndrica concéntrica en el pozo. Pero con frecuencia este efecto es despreciable en acuíferos profundos en los cuales el agua suele

ser casi estática. El estudio de detalle puede hacerse con modelos de simulación pero es preciso disponer de suficientes datos para que sean representativos (Ref. 6).

## 2.2.2. CAUDAL DE INYECCION E INCREMENTO DE PRESION.

### (A) CAUDAL

La hidrodinámica de la inyección profunda viene regulada por las mismas leyes y fórmulas que para los pozos en acuíferos cautivos sustituyendo el descenso por la presión de inyección, dada en altura de agua medida sobre el nivel piezométrico inicial.

En ausencia de colmatación del pozo, inyectando a caudal constante, la presión va aumentado logarítmicamente si el acuífero es de gran extensión y perfectamente cautivo. Si se alcanza algún límite de potencial constante, el caudal de admisión disminuye con el tiempo, pudiendo llegar a estabilizarse en caso de alcanzarse un límite de potencial constante. Si la velocidad de entrada del fluido en la formación es elevada, o si el acuífero es dañado durante la perforación o construcción en los alrededores del pozo, se tiene una pérdida de carga equivalente a las pérdidas del pozo.

El cociente entre el caudal de inyección y el incremento de presión en la zona de inyección (caudal específico de inyección o *Índice de inyectividad*) es un valor de gran interés para conocer la evolución del pozo. Debiéndose comparar datos referidos a los mismos tiempos de inyección. Si no existen pérdidas en el pozo el índice de inyectabilidad es independiente de la presión, tal como sucede si los caudales admitidos son pequeños y la superficie filtrante es grande. El índice de inyectividad específica (índice de inyectividad / longitud filtrante) sirve para comparar pozos en una misma formación, y se trata de un valor proporcional a la permeabilidad media.

La progresiva colmatación del pozo se traduce por una disminución del índice de inyectividad, pero también disminuye con el tiempo a causa del aumento progresivo del potencial hidráulico, de modo similar a la variación temporal del caudal específico de un pozo de bombeo. Antes de concluir que la disminución del índice de inyectividad es por colmatación es preciso efectuar ensayos a caudales variables. Al comparar presión de inyección en la cabeza del pozo y en la formación receptora, debe tenerse en cuenta la pérdida de carga de circulación por la tubería de inyección, que puede llegar a ser muy importante.

### (B) PRESION MAXIMA DE INYECCION

Como ya ha sido mencionado la máxima presión de inyección viene fijada por (1) el peligro de fracturación hidráulica, (2) Resistencia del pozo, cementaciones y sistema de inyección y (3) por la legislación existente. En general, el punto 1 es el más restrictivo. La fracturación hidráulica del nivel de inyección puede ocasionar a veces grietas en los niveles confinantes y de ahí su peligrosidad. Normalmente las fracturas se producen según planos normales a las tensiones principales menores regionales, o sea que contienen el esfuerzo principal mayor. En zonas sometidas a compresión lateral estas fracturas pueden ser horizontales o verticales, pero en zonas en donde el esfuerzo principal es el del peso de los materiales suprayacentes, las fracturas suelen ser verticales. La existencia de debilidades previas tales como fallas, diaclasas, etc., pueden condicionar la fracturación, y también pueden hacerlo los planos de estratificación.

El peso del material suprayacente origina presiones del orden de 0.23 atm/m de profundidad, y la mayoría de materiales fracturan entre 0.13 y 0.41 atm/m, pero a veces puede producirse ya a presiones menores, incluso hasta menos de 0.11 atm/m, lo cual puede ser debido a situaciones anómalas. En terreno saturado esta presión no puede ser menor que 0.10 atm/m, la cual corresponde a la presión hidrostática. Estas presiones se refieren al nivel de inyección. Si este es de gran espesor en comparación con la profundidad, la presión se refiere al techo de la formación, ya que la densidad del terreno es mayor que la del fluido que llena el pozo. La presión de inyección medida en la cabeza de sondeo es igual a la medida en el nivel de inyección menos el peso de la columna del fluido, menos las pérdidas de carga de circulación. La densidad del fluido a inyectar juega un papel muy importante, y la propia columna del fluido puede originar fracturación hidráulica si su densidad es suficiente.

La presión máxima de inyección se puede determinar experimentalmente hallando el índice de inyectividad a medida que se aumenta la presión, cuando aquel aumenta bruscamente es que se ha producido fracturación hidráulica, aunque también pueden jugar otras situaciones enunciadas anteriormente o la fluencia los cierres u obturadores. En general, si se sobrepasa la máxima presión durante cortos intervalos de tiempo no se daña la formación e incluso el ensayo es reproducible.

### 2.2.3. SISTEMA DE ELIMINACION

El sistema para la eliminación de agua residual inyectándola bajo la superficie, consiste en un sistema colector, una planta de tratamiento y uno o varios pozos de inyección. El sistema colector debe ser resistente a los agentes corrosivos, así como

proporcionar un flujo eficiente y contar con un fácil acceso a cualquiera de sus partes con el fin de poder efectuar revisiones o reparaciones rápidamente.

Un sistema para el tratamiento de las aguas servidas es de capital importancia dada la necesidad de cuidar las instalaciones, por un lado, de la corrosión e incrustaciones y por otro, la calidad del agua que debiera depositarse. Además que ello favorece la no obturación del pozo por precipitación de sólidos suspendidos. La planta de tratamiento debe localizarse estratégicamente, contar con la capacidad suficiente y el proceso de tratamiento físico y químico sea adecuado de acuerdo con las características que hayan sido fijadas en el proyecto y/o de acuerdo a normas legales.

El centro de almacenamiento es requerido en cualquier proyecto para inyección de agua para el control de las fluctuaciones en la producción de agua residual así como para propiciar el asentamiento de los sólidos en suspensión.

La selección de los pozos inyectoros debe obedecer a las condiciones de conveniencia local, economía y consideraciones legales. Geología, litología, espesor, continuidad de la formación, posición estratigráfica, profundidad y las propiedades físicas.

La ecuación de Darcy, desarrollada por Querio y Power (Ref. 31) para calcular el gasto de inyección considerando un flujo radial de un fluido incompresible y de una sola fase en condiciones de flujo estable es:

$$Q = (2.693 \text{ E-}05 * k * h * (P_w - P_e)) / (w * \text{Log}(R_e / R_w)) \quad (40)$$

Siendo; Q el gasto en lps, h el espesor de la formación en metros, k la permeabilidad en darcys,  $P_w$  la presión dinámica en Kg/cm<sup>2</sup>,  $P_e$  la presión estática en Kg/cm<sup>2</sup>, w es la viscosidad del fluido en Kg-seg<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>,  $R_e$  la distancia a la cual se tiene la  $P_e$  en metros y  $R_w$  el radio del pozo en metros.

El gasto de inyección es directamente proporcional al producto  $k * h$ , el cual representa la capacidad de la formación. La variación del gasto de inyección y la capacidad de la formación para varios diferenciales de presión se muestran en la figura 21.

La presión de inyección es influenciada en forma directa a la presión del acuífero y esta dada por:

$$P_i = P_w - P_h - P_f \quad (41)$$

Donde  $P_i$  es la presión de inyección,  $P_w$  es la presión de fondo original,  $P_h$  es la presión de la columna del fluido y  $P_f$  es la caída de presión causada por fricción, todas en unidades congruentes.

Los centros colectores consisten en tanques o pilas recubiertas que tienen el objeto de almacenar o controlar las fluctuaciones en la producción del agua. también sirve para propiciar el asentamiento del material en suspensión. De los centros colectores el agua pasa a la planta de tratamiento. El número y dimensiones de este equipo estará determinado por el volúmen y características del agua a tratar, así como por los requerimientos del agua a inyectar. Dependiendo de estos factores son dos los tipos de plantas utilizables; plantas de sistema cerrado y plantas de sistema abierto. El sistema de tratamiento cerrado es aquel en el que el agua por inyectar no tiene contacto con el aire, esto es con el fin de evitar la solución del oxígeno del aire y el desprendimiento de los gases disueltos en el agua. con esto se disminuye la corrosión y se suprime la oxidación del fierro o del sulfuro contenidos en el agua. Cuando el agua contiene apreciables cantidades de iones calcio, la liberación del bióxido de carbono origina una precipitación de carbonato de calcio. Estos sistemas son utilizados cuando se requiere un tratamiento del agua mínimo. Generalmente solo se emplean filtros para eliminar la materia en suspensión y reactivos inhibidores de corrosión y de materia orgánica. En la figura 22 se muestra el diagrama de flujo de este tipo de sistema.

El sistema de tratamiento abierto, proporciona al agua el contacto con el oxígeno, esto es con el fin de favorecer la oxidación de los compuestos ferrosos para que precipiten como férricos y sean eliminados. Se logra también el desprendimiento de los gases ácidos corrosivos y las condiciones requeridas por medio de aditivos químicos. En este tipo de sistemas se efectúan los tratamientos del agua, tales como aereación, sedimentación, filtración, deaereación y la adición de reactivos químicos. Esto implica que se lleve un control de su funcionamiento por personal preparado y responsable para que al presentarse alguna falla en el equipo o alguna variación en la calidad del agua sean corregidas inmediatamente. En la figura 23 se muestra el diagrama de flujo de este sistema.

Después de haber determinado el área y la formación donde se efectuara la inyección, se escoge el punto para el pozo inyector. Como ya se subrayó anteriormente, debe tenerse cuidado en la localización precisa de la formación donde se localizará la inyección y en el revestimiento y cementación adecuada del pozo para prevenir la contaminación de acuíferos de agua dulce o de otros yacimientos. El agua algunas veces se inyecta directamente a través de la tubería de revestimiento. Pero generalmente se

inyecta por otra tubería la cual es anclada a la de revestimiento con un empacador. El espacio anular se puede llenar con un agua inhibidora de la corrosión para proteger a estas tuberías.

En la mayoría de los campos petroleros, donde se tiene el problema de la eliminación del agua producida, existirán pozos secos o abandonados que pueden utilizarse como inyectores. Será un ahorro utilizar estos pozos, más aún si están terminados en la formación elegida. Se puede verificar la inyección por el espacio anular de un pozo productor. Solamente deben ser usados para solucionar en forma temporal la eliminación de volúmenes pequeños de agua. Cualquiera de este tipo de pozos puede ser utilizado teniendo cuidado de proteger las tuberías de inyección revisténdolas contra la corrosión. Es también importante, al hacer un diseño de esta naturaleza, utilizar el tipo de bombas adecuadas, para inyectar el agua y para resistir la acción corrosiva de ésta. Los vástagos de acero monel y pistones de caucho son los más convenientes para usarse.

### 2.3. EL CASO DE LA CIUDAD DE MERIDA

#### 2.3.1. EXPERIENCIAS ANTERIORES

La inyección de aguas residuales a través de pozos, en zonas parecidas a Yucatán, se han llevado a cabo en la Península de la Florida, E.U.A. (Ref. 32). Tales experiencias son importantes para entender de una mejor manera este problema. En este sitio el subsuelo está formado por acuíferos cavernosos y dolomitas de muy alta transmisividad separadas entre sí por gruesas capas, prácticamente impermeables, de margas y calizas densas. En el centro y sur de la Península, los acuíferos más profundos contienen aguas de alta salinidad. En la parte sur, existen zonas cavernosas las que al ser perforadas dan la sensación de estar en rocas sueltas de gran tamaño, las cuales han sido denominadas en los medios de perforación como *zonas de bloques*.

#### (A) ZONA BELLE GLADE

Es una de las principales zonas en las cuales se han llevado a cabo este tipo de trabajos, tiene un sistema de pozos que fue terminado en 1966, con objeto de inyectar las aguas residuales provenientes principalmente de una planta de Furfural construida en conexión con una central azucarera de las más grandes del mundo. El agua residual es esencialmente una solución diluida de ácido acético con pequeñas cantidades de otras sustancias orgánicas solubles y materiales insolubles (pequeñas fibras de bagaso y cera). Sus características son las siguientes:

Demanda Bioquímica de Oxígeno	(DBO)	4000-16000 mg/l
Demanda Química de Oxígeno	(DQO)	4000-26000 mg/l
Sólidos en Suspensión (promedio)	(SS)	1500 mg/l
Potencial de Hidrógeno	(PH)	2 a 5



Temperatura	(T)	7' a 100' C
Caudal promedio	(Q)	50 lps

Este fue el primer sistema de inyección de aguas residuales en el sur de Florida. El sistema consiste en un pozo de inyección de unos 600 m de profundidad y un pozo que se utiliza para observación de 430 m de profundidad, situado a 23 m de distancia del primero.

En enero de 1970 se empezaron a notar pequeños cambios en los parámetros de vigilancia del pozo de observación, los cambios continuaron agudizándose, indicando el movimiento de los líquidos inyectados hacia el pozo de observación. Los cambios máximos notados entre enero de 1970 y julio de 1971, fueron: DBO de 25 a 730 mg/l, DQO de 40 a 900 mg/l y PH de 7.6 a 6.4.

Debido a estos cambios, en el verano de 1971 se decidió modificar el pozo de inyección. La modificación que fue terminada en enero de 1972, consistió en profundizar el pozo de inyección y extender el encamizado y cementado hasta los 591 m. Mientras se hacían estas modificaciones se usó el pozo de repuesto para la inyección. El pozo original de inyección empezó a bombear de nuevo en enero de 1972, discontinuándose la inyección del pozo de repuesto. Desde entonces se ha notado una pequeña reducción en la demanda química de oxígeno en muestras obtenidas semanalmente del pozo de observación, de 900 a 750 y un ligero aumento del pH de 6.4 a 6.8, la demanda bioquímica de oxígeno y la conductividad eléctrica han permanecido aproximadamente al mismo nivel de junio de 1971.

#### (B) ZONA MIAMI DADE

Este sistema está compuesto de dos pozos situados al sur de Miami, separados entre sí por una distancia de 6 Km, los cuales reciben aguas tratadas de dos plantas municipales de aguas negras. El primero recibe agua de la planta Sunset Park situada a 8 Km de la costa, teniendo una capacidad de 133 lps y es del tipo de lodos activados. El segundo recibe el afluente de la planta Kendale Lakes situada al suroeste de Miami. Esta planta es del mismo tipo que la Sunset Park. Ambos pozos de construcción similar, comienzan con tres camisas concéntricas debidamente cementadas terminadas a una profundidad del orden de los 1000 m. La calidad del líquido a inyectar en ambas instalaciones, es prácticamente igual y puede resumirse como sigue:

Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	30 mg/l
Turbiedad, expresada en unidades Jackson	50
Conductividad eléctrica en micro-ohms/cm	<1000
Residuo de Cloro, como Cl	.50 mg/l
Coliformes, MPN/100 ml	<50
Aceite y grasa	<15 mg/l

A continuación se enumeran algunas características físicas y de funcionamiento de algunos de los pozos de inyección existentes en los Estados Unidos. Los datos corresponden a desechos industriales y domésticos.

#### DATOS DE POZOS DE INYECCION EXISTENTES EN LOS ESTADOS UNIDOS

GASTOS DE INYECCION	DIAMETRO	PROFUNDIDAD	PORCENTAJE
7.89	15.2	0- 308	5
18.90	20.3	308- 616	32
37.90	25.4	616-1232	27
75.70	30.5	1232-1848	28
126.20	35.6	1848-3696	6
189.30	40.6	>3696	2

### 2.3.2. CORRELACION DE ESTUDIOS

#### (A) PERMEABILIDAD

En 1979 la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (Ref.33), encargó a un grupo de técnicos realizaran un trabajo consistente en determinar las características de permeabilidad del subsuelo de la zona de Mérida en el Estado de Yucatán y la posibilidad de inyectar aguas residuales, mediante la perforación de pozos de inyección. Para la realización del trabajo se llevaron a cabo dos perforaciones exploratorias dentro de la Ciudad de Mérida. Una de ellas fue unos 10 Km al norte de la Ciudad dentro del conjunto habitacional Codermex, la profundidad de dicho pozo alcanzo los 262 m.

Con el objeto de conocer la calidad del agua subterránea así como el tipo de roca que la contiene se realizó un muestreo de agua y de corte de la formación durante la perforación, utilizando para ello el sistema de doble tubería tipo Con-Cor, el cual permite obtener muestras simultáneas a la perforación. Se muestreo agua en la descarga a intervalos de 5 minutos hasta la profundidad de 27 m y cada 3 minutos hasta 259 m.

Por lo que se refiere a la muestra de roca, se tomaron éstas a cada metro de profundidad y se destinaron a estudios petrográficos y paleontológicos. A partir de los análisis petrográficos, se obtuvo que los primeros 130 m están constituidos por horizontes de calizas, mientras que de 130 a 262 m, predominan lutitas calcáreas.

En cuanto al agua, las muestras se obtuvieron sifonando con aire a cada 5 m de profundidad, siendo analizadas químicamente con el objeto de conocer su composición. Los valores medios resultantes tanto para la parte superior del acuífero, como para niveles más profundos fueron:

PROFUNDIDAD DE MUESTREO m	CONCENTRACION MEDIA EN PARTES POR MILLON			
	STD	CALCIO	CLORUROS	SULFATOS
de 10 a 60	1200	240	400	160
de 60 a 262	4000	700	3000	400

Del análisis de las gráficas de salinidad, se determinó que el acuífero de agua dulce tiene un espesor de 60 m a partir del nivel estático. A mayor profundidad la calidad del agua registrada es muy variable, encontrándose máximos del orden de 1500 ppm y mínimos de 2000 ppm de sólidos totales disueltos. Sin tomar en cuenta estos valores extremos, se observa que existe una alternancia de valores de 2500 a 5000 ppm de Sólidos Totales Disueltos (STD), con una tendencia a incrementarse conforme se profundiza.

En base a los análisis efectuados, se clasificó a las rocas del subsuelo de acuerdo a su carácter hidrogeológico en dos zonas; una permeable y otra impermeable, la primera se ubicó desde la superficie hasta los 130 m de profundidad, intervalo en el cual se encuentran horizontes de rocas calcáreas con conductos de disolución y fracturas. De los 130 m hasta la profundidad total, se clasificó como zona impermeable, debido a que esta constituido por lutitas calcáreas que no presentan indicios de permeabilidad.

Por lo que se refiere a la calidad del agua y de acuerdo a lo expuesto en párrafos anteriores, la separación existente entre el agua dulce (10-70 m) y el agua salada (70-130 m) se denomina *Interfase salina*.

Para clasificar las características de permeabilidad de los diferentes horizontes atravesados, se tomaron en cuenta las características geológicas, hidrológicas y geoquímicas obtenidas. En base a esto, el lugar más apropiado para la inyección de aguas residuales, corresponde a la parte inferior del acuífero salobre, esta agua tiene alrededor de 4000 ppm de STD, la cual al mezclarse con los residuos de inyección, podría originar una mezcla de mayor densidad que tendería a permanecer en la parte baja.

Para realizar las pruebas de permeabilidad, fue necesario equipar un pozo localizado a una distancia de 30 m del pozo de exploración, el cual cuenta con 40 m de profundidad y 9 1/2" de diámetro. El equipo de bombeo instalado en dicho pozo, consistió en una bomba de turbina con columna y descarga de 6" de diámetro, así como las conexiones válvula de control de gasto. Se observó

el nivel estático a una profundidad de 5.7 m. Una vez instalada la bomba se inyectó un gasto de 12 lps sin presión durante 3 horas, observándose que el nivel estático no sufrió ninguna variación. Ya teniendo conocimiento de la profundidad a que era factible inyectar agua (entre 90 y 130 m) se procedió a terminar el pozo. Posteriormente, se efectuó una segunda prueba de permeabilidad, en la cual se logró inyectar un gasto de 17 lps con una presión de 1 Kg/cm<sup>2</sup>.

La otra perforación que se mencionó al principio de este inciso se localizó a 7.4 Km al suroeste del centro de la Ciudad de Mérida, contando con una profundidad de 181m. Dada la cercanía con el pozo Codermex y su similitud litológica, se consideró a los sedimentos cortados, de la misma edad, o sea a la secuencia de rocas calizas superiores del Mioceno inferior y a las lutitas calcáreas que la subyacen, del Oligoceno Superior. Durante la perforación de este pozo, se obtuvieron muestras de agua que demostraron que hasta los 40 m la salinidad del agua es prácticamente uniforme y menor de 1000 ppm de STD. De 50 a 70 m se advierte un incremento de hasta 1800 ppm de STD.

A partir de los anteriores datos, se consideró como acuífero de agua dulce a la parte superior, entre el nivel estático y los 49 m de profundidad, mientras que por debajo de 49 m, se consideró agua salada, la cual debe tener cierta mezcla del agua superior y por lo tanto, su concentración real de sales debe ser mayor. A partir del corte litológico se clasificó al paquete de sedimentos entre la superficie y los 151 m como horizontes permeables que de acuerdo al grado de carsticidad constituyen un acuífero de buen potencial, a excepción del horizonte arcilloso encontrado entre los 69 y 71 m, el cual se considera como impermeable. De los 151 m, hasta la profundidad total de 181 m, se tiene una lutita calcárea plástica, la cual se consideró como impermeable.

Para conocer la permeabilidad del acuífero en sus estratos inferiores, a fin de determinar la factibilidad de inyección de aguas residuales, se efectuó una prueba mediante un empacador mecánico, para ello, basados en los resultados del corte litológico y los análisis químicos, se seleccionó la profundidad de 74 m, tomando en cuenta la presencia del horizonte de lutitas impermeables entre los 69 y 71 m, el cual podría servir de sello al horizonte donde se pretende inyectar el agua residual. Posteriormente, se perforó un pozo de abastecimiento a 36 m de profundidad, localizado a una distancia de 30m, siendo equipado con una descarga de 6" de diámetro, después, se inyectó a través de una tubería de 4" de diámetro, un caudal de 15 lps sin ejercer presión. Conociendo que existe permeabilidad en el tramo probado, el pozo fue terminado. Finalmente se efectuó una segunda prueba con la cual fue posible inyectar 35 lps por gravedad.

#### **(B) CARACTERISTICAS FISICAS**

También fue llevado un programa de investigaciones geofísicas con el fin de conocer a detalle las características físicas de los materiales del subsuelo. Se emplearon métodos geoelectricos de resistividad (Ref. 34), señalando los sitios más adecuados para la ejecución de las investigaciones de acuerdo con la geología local imperante. Así fueron ejecutados 31 sondeos eléctricos verticales (SEV) agrupados en 6 secciones geoelectricas, su ubicación se muestra en la figura 24. El objetivo básico de esta prospección geofísica fue diferenciar los materiales permeables de los impermeables, conocer su espesor y su posición, así como sus características de saturación y continuidad, para poder determinar de esta manera la estructura geológica subterránea y en consecuencia, poder proponer la ubicación de los pozos de absorción necesarios para el sistema de alcantarillado de la Ciudad de Mérida, así como su profundidad y demás caracteres.

En la prospección se utilizó el método geoelectrico de resistividad, empleando arreglos tipo Schlumberger, en este caso y para lograr los fines buscados la apertura máxima de la línea de emisión de la corriente AB fue de 1080 m. El trabajo de campo consistió en efectuar líneas de exploración geoelectrica empleando los SEV, los cuales consisten como ya se ha discutido en puntos anteriores, en una serie de determinaciones de resistividad aparente desde la superficie del terreno efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y con una creciente separación entre los electrodos de emisión y recepción. Con ello, se estuvo en condiciones de obtener una serie de medidas las cuales procesadas y correlacionadas con la geología local, nos permiten inferir las características de los materiales del subsuelo (ver anexo 2).

Los valores de resistividades aparentes se gráficán en papel bilogarítmico, estando éstas en el eje de las ordenadas y la distancia  $AB/2$  en el eje de las abscisas. La interpretación de los datos se hace de dos maneras; cualitativa y cuantitativamente. La primera proporciona información valiosa acerca de la estructura georresistiva del subsuelo, lo que permite visualizar la estructuración de éste, empleando perfiles de isorresistividades aparentes y perfiles de resistividades reales con lo que es posible formar planos en los que se puede observar las variaciones de la resistividad con la profundidad explorada. La interpretación cuantitativa tiene como fin determinar los espesores y resistividades reales que conforman el corte geoelectrico. Para obtener estos parámetros existen diversas maneras siendo común emplear el método de superposición (o reducción), el cual consiste en la comparación de las curvas de resistividades aparentes ( $AB/2$ ), con curvas teóricas calculadas a partir de modelos matemáticos del subsuelo. Existen otras formas como es a través del algoritmo de la curva de resistividades medias o empleando la anti-transformada de Hankel (Ref. 35).

Del procesamiento de la información y su interpretación se elaboran; gráficas distancia de emisión contra resistividad aparente en coordenadas cartesianas, configuración de resistividades aparentes para cada perfil geoelectrico y curvas de emisión de la corriente contra resistividad aparente en escala logarítmica. Un ejemplo se da en la figura 10.

Para la interpretación cuantitativa se utilizaron los esquemas de resistividades en coordenadas cartesianas o isoresistividades lo que permitió determinar los cambios litológicos de los horizontes del subsuelo y definir así las estructuras de interés práctico. La elaboración de los perfiles geoelectricos, dieron por resultado la diferenciación de 4 unidades geoelectricas, observandose en ellas las siguientes condiciones:

La unidad No. I que se detecto superficialmente y que presento valores de resistividad del orden de 70-90, 2-57, 170-200, 50-100 y 30-70 ohm-m y espesores que fluctuan entre 1 y 4 m; fue relacionada con rocas de naturaleza calcárea alteradas.

La unidad No. II se detecto en toda la zona estudiada, se relacionó con depósitos sedimentarios calcáreos con alto contenido arcilloso, probablemente lutitas calcáreas con valores de resistividad de 2-10, 7-14, 12-72, 17-25, 4-19, y 8-27 ohm-m y espesores variables de 10 a 70 m en los sondeos Nos. 1, 4, 7, 10, 13, 16 y espesor desconocido en algunas zonas porque fue la última área detectada.

La unidad No. III se relacionó con rocas calizas fracturadas y con fracturas y cavidades de disolución. Generalmente se localizó esta unidad a profundidades promedio de 50 a 147 m y presentó valores de resistividad de 75-70, 65-99, 70-150, 35-80, 40-75, y 37-69 ohm-m.

Finalmente, la unidad No. IV, presento valores de resistividades de 17-25, 40-50, 39-47, 12-19, 22-27 ohm-m y espesores variables de 10 a 70 m, se relaciono con rocas calizas deleznales, posiblemente cretas con interrelaciones arcillosas.

Despues de haber efectuado la interpretación final, se concluyó que el conjunto litológico detectado desde la superficie del terreno y ubicado en el subsuelo a profundidad, presentó características litológicas homogéneas en toda la zona estudiada.

#### (C) LOCALIZACIÓN DE POZOS

Como resultado del estudio geofísico, la zona que mejores características presentó para la ubicación de pozos de absorción esta considerada como la unidad geoelectrica No. III, la cual se detecto a profundidades de 50 a 170 m y que se relacionó con rocas calizas fracturadas y con cavidades de disolución con buena permeabilidad. Así mismo, se consideró que a profundidades

variables se detecto una zona confinante que presenta características hidrogeológicas de impermeabilidad, definida como la unidad geoelectrica II, que se relaciono con depósitos sedimentarios calcáreos con alto contenido arcilloso y que probablemente corresponden a lutitas calcáreas cuyos espesores, en las zonas confinantes varían de 2 a 35 m (Fig. 25).

Por otro lado y tomando como base los resultados de la prospección geofísica efectuada, se logró detectar la interface salina entre los 32 y 67 m de profundidad. Se concluyó que el acuífero localizado en el subsuelo de la Ciudad de Mérida, se encuentra emplazado en rocas calizas, de probable edad terciaria, con características de buena permeabilidad, saturación y agua de buena calidad hasta una profundidad promedio de 5 a 40 m y de aquí hasta una profundidad media de 80 m, el agua presenta alto contenido de salinidad. Además a profundidades promedio de 50 a 170 m, el subsuelo presento una zona de rocas calizas fracturadas y con cavidades de disolución aptas para la ubicación de los pozos de inyección.

Se sugirió la perforación de los pozos en los sitios donde se efectuaron los sondeos eléctricos verticales Nos. 4, 7, 8 y 6, ubicados éstos donde se propone localizar la planta de tratamiento. Asimismo se propuso efectuar perforaciones exploratorias, con el mismo fin en los sitios donde se efectuaron los sondeos Nos. 12, 13, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24 y 25, los cuales presentaron buenas condiciones para su perforación. Finalmente se recomendó efectuar al término de las perforaciones, el correspondiente registro eléctrico para conocer con más detalle las condiciones de las formaciones litológicas encontradas, así como efectuar una definición litológica basándose en las muestras obtenidas de la perforación.

*Los pozos de núcleo o de exploración que fueron perforados, tienen como finalidad recuperar por medio de núcleos, las capas del subsuelo. En la Ciudad de Mérida se perforaron 11 pozos de núcleo, de los cuales 5 alcanzaron una profundidad de 500 m, 3 de 300 m, 1 de 150 m, otro de 120 m y el último de 30 m. Su finalidad fue la de obtener muestras de las formaciones geológicas atravesadas, para que con el análisis de laboratorio se conozcan sus propiedades físicas, lo cual permitió detectar horizontes que de acuerdo con su permeabilidad forman los acuíferos de agua dulce, de agua salobre y de agua salada. Y también para detectar los horizontes impermeables que sirven de separación entre el agua dulce y el agua salada.*

La perforación de los pozos de absorción como su nombre lo indica, tienen como objetivo llegar hasta una profundidad en la que de acuerdo con los datos proporcionados por el muestreo se encuentre una formación (para el caso de Mérida) que sea capaz de recibir las aguas negras, es decir, debe llevarse hasta donde de acuerdo con la prueba de bombeo y las características de

recepción del acuífero satisfaga las necesidades específicas de cada proyecto. En la ciudad de Mérida fueron perforados 4 pozos de absorción, la instrumentación de ellos se muestra en la figura No. 26.

En la zona también fueron perforados pozos de monitoreo, los cuales sirven principalmente para poder detectar la posible contaminación en la zona de inyección. Esto se logra mediante la extracción de agua a diferentes profundidades con un muestreador y posteriormente con análisis químicos y biológicos del agua extraída; estos pozos también proporcionan información geológica, piezométrica y geoquímica de los estratos cruzados durante la perforación, conocimiento de los valores de permeabilidad apoyados en los resultados de las pruebas correspondientes y respuestas de los acuíferos durante las cementaciones e inyecciones.



## CAPITULO III. MEDIDAS PARA PREVENIR CONTAMINACION

### 3.1. ENFOQUE SOCIAL

#### 3.1.1. ANTECEDENTES

Se sabe (Ref. 36) de varios antecedentes sobre la contaminación. En el año 25 a. c. Vitruvio exigía que el agua debía estar limpia de sustancias tóxicas y perjudiciales, ser fresca, clara e incolora y de sabor agradable. En 79 d. c. Plinio el Viejo, murió envenenado por óxidos de azufre observando una erupción del Vesubio. Ciertas epidemias periódicas diezmaron la población de algunos continentes, principalmente de Europa, obviamente ello se debió a la contaminación biológica de alimentos y otros factores.

Al llegar las huestes de Federico Barbarroja a Roma en 1167, el Tiber y las regiones pantanosas aledañas a la ciudad exhalaban vapores venenosos, que no perjudicaron a los invasores germanos. En 1932 Carlos VI de Francia, publicó un edicto prohibiendo la emisión de humos mal olientes. No fue sino hasta 1510 que en Rouen Francia, se tomaron ciertas medidas en contra del humo de la hulla. Hacia el siglo XVIII, Santa Hildegarda opinó que las aguas del Rhin, de ser usadas sin hervir, podrían producir fluidos nocivos en el cuerpo. Por esa misma época, Boleu escribió un poema sobre Paris, lamentandose de sus insoportables ruidos diurnos y nocturnos.

La historia moderna de la contaminación ambiental registra varios hechos de este tipo que han despertado por fin, el interés institucional en el problema. El caso de la Ciudad de Londres se remonta a siglos: Se sabe que en 1273, Eduardo I, decreto el Acta de la Hulla, en la que se prohibió su quema excesiva. Este viejo problema ambiental alcanzó importancia inmediatamente despues de la Revolución Industrial. En general, puede decirse que advino una degradación creciente del medio ambiente, sobre todo, en las áreas ocupadas por núcleos industriales.

México desafortunadamente, tiene también episodios trágicos al respecto. En 1953, se conoció un caso de la contaminación del sistema de agua potable de un multifamiliar en el D.F., las aguas negras contaminaron las potables y se produjo un brote de Infección Intestinal aguda en los residentes.

En agosto de 1962 en la Ciudad de Torreón, algunos habitantes acudieron a las autoridades locales de salud pública pues aproximadamente el 60 % de ellos presentaban diversas afecciones de la piel y otros órganos. Para entonces ya otras personas habían perecido por intoxicación provocada por Arsénico, procedente de una compañía metalúrgica situada en las cercanías.

Hacia los años cincuentas los problemas de Londres y la agudización del problema de Los Angeles movieron definitivamente a la opinión pública y a los gobiernos al estudio y solución al

fenómeno de la contaminación. Organismos Internacionales como la Organización Mundial de la Salud, La Organización para la Alimentación y la Agricultura y la Organización Meteorológica Mundial, empezaron a realizar estudios específicos y a dar ayudas a diversos países con problemas de contaminación.

Hoy día, prácticamente todos los países tienen, según sus urgencias, agencias gubernamentales dedicadas al problema del medio ambiente, en la mayoría de las naciones altamente desarrolladas, esas agencias están al más alto nivel.

Cada vez con más frecuencia han sido formalizados tratados bilaterales y multinacionales para abatir contaminaciones específicas hasta que, en 1972, tuvo lugar la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. Esta reunión que hoy se le conoce como Conferencia de Estocolmo, obtuvo tres logros importantes: (1) La declaración sobre el medio humano; (2) El Plan de Acción para el Medio Humano basado en cinco áreas previamente aprobadas por el Comité Preparatorio; Asentamientos Humanos; Administración de Recursos Ambientales; Contaminantes de significación Internacional; educación, entrenamiento e Información; desarrollo y medio ambiente; y (3) la recomendación del establecimiento del Consejo de Administración para los programas relativos al medio humano.

Estos tres logros, así como el que atañe a la celebración, el 5 de Junio de cada año, el Día Mundial del Medio Ambiente, fueron acogidos por La Asamblea General de las Naciones Unidas y dieron origen al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

### 3.1.2. DAÑOS ECONÓMICOS DE LA CONTAMINACION

Los daños económicos de la contaminación y el deterioro del medio son muy complejos. En el primer caso, los gastos que la contaminación produce, en sí, son múltiples. Pensando en su impacto económico directo, consistente en la atención de las enfermedades y afecciones causadas, el ausentismo del trabajo, el costo de lavar o sustituir la ropa sucia o prematuramente envejecida, la pintura o remozamiento de exteriores afectados, y el daño a los bienes y valores de la cultura y la civilización que se perjudican, transforman o desaparecen.

En segundo lugar, los costos del deterioro o de la degradación de los ecosistemas son imponderables e incalculables; no está el hombre en condiciones de evaluar el daño a los bosques que se talan; a las selvas que desaparecen bajo la aplastante exigencia del progreso a ultranza; a las playas y estuarios que degrada; a los suelos que erosiona por descuido o que no evita que se erosionen; a los mares, ríos, esteros, bahías, lagos y lagunas que maltrata bajo la absurda suposición de que la belleza es eterna. Todos estos costos de la degradación ecológica no pueden ser traducidos a cifras corrientes. Comúnmente se olvida que,

quizás las futuras generaciones no tendrán necesidad de evaluar esas pérdidas por la sencilla razón de que el daño será irremediable.

### 3.2. LEGISLACION AMBIENTAL

#### 3.2.1. SITUACION MUNDIAL

La atención mundial a los problemas de la contaminación ambiental es reciente. La Conferencia sobre el Medio Humano efectuada en Estocolmo en 1972, con la participación de más de 1000 delegados de más de 120 países, observadores de diversas dependencias de la ONU y más de 100 organismos internacionales no gubernamentales, emitió su Proclama cuyo punto 2 dice textualmente: *La protección y mejoramiento del medio humano es una cuestión fundamental, que afecta el bienestar de los pueblos y al desarrollo económico del mundo entero, un deseo urgente de los pueblos y un deber de todos los gobiernos.* Asimismo, expidió su Declaración de Principios, compuesta de 16 párrafos, y aprobó las Recomendaciones para la Acción dirigidas a la Asamblea General, a la propia Secretaría General de la ONU, a los organismos internacionales competentes y a los gobiernos de los países.

En la Declaración de Principios de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano destacan, por su importancia, los números 20, 21 y 22 que a continuación se transcriben:

*Principio 20. Se deben fomentar en todos los países, especialmente en los países en desarrollo, la investigación y desarrollo científico referentes a los problemas ambientales, tanto nacionales como multinationales. A este respecto, el libre intercambio de información científica actualizada y de experiencias sobre la transferencia debe ser objeto de apoyo y asistencia, a fin de facilitar la solución de los problemas ambientales; las tecnologías ambientales deben ponerse a disposición de los países en desarrollo en condiciones que favorezcan su amplia difusión sin que constituyan una carga económica para esos países.*

*Principio 21. De conformidad con la Carta de las Naciones Unidas y con los principios de derecho internacional, los Estados tienen el derecho soberano de explotar sus propios recursos en aplicación de su propia política ambiental y la obligación de asegurar que las actividades que se lleven a cabo dentro de su jurisdicción o bajo su control, no perjudiquen al medio de otros Estados o de zonas situadas fuera de toda jurisdicción nacional.*

*Principio 22. Los Estados deben cooperar para continuar desarrollando el derecho internacional en lo que se refiere a la responsabilidad y a la indemnización de las víctimas de la contaminación y otros daños ambientales, que las actividades realizadas dentro de la jurisdicción o bajo control de tales Estados causen a zonas situadas fuera de su jurisdicción.*

En cuanto a las Disposiciones Institucionales y Financieras para la Cooperación Internacional en lo relativo al Medio Ambiente. La Asamblea General decidió establecer un Consejo de Administración del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Fijó, asimismo, las principales funciones y atribuciones del Consejo, que son las siguientes:

(1) Promover la cooperación internacional en relación con el medio ambiente y recomendar, cuando proceda, políticas al respecto.

(2) Trazar las directrices generales para la dirección y coordinación de las Naciones Unidas.

(3) Recibir y examinar los informes periódicos del Director Ejecutivo del PNUMA sobre la aplicación de los programas relativos, dentro del sistema de las Naciones Unidas.

(4) Estudiar continuamente las condiciones ambientales en todo el mundo, con el fin de conseguir que los problemas de importancia internacional que surjan en esa esfera, reciban apropiada consideración por parte de los gobiernos.

(5) Estimular a las comunidades científicas internacionales y a los círculos de especialistas que sean pertinentes, para que contribuyan a la adquisición, evaluación e intercambio, de conocimientos e información sobre el medio ambiente.

(6) Mantener constantemente en estudio las repercusiones que para los países en desarrollo puedan tener las políticas y las medidas nacionales e internacionales, así como el problema de los costos adicionales que pueda significar para tales países la ejecución de los programas y proyectos, respecto de los cuales procurara asegurarse de que son compatibles con los planes y prioridades de esos países en materia de desarrollo.

(7) Examinar y aprobar anualmente el programa de utilización de recursos del Fondo para el Medio Ambiente.

### 3.2.2. REGLAMENTACION EN MEXICO

Aparentemente hacia el año de 1273 ya existían ordenamientos legales en materia de contaminación en Londres. En nuestro país existen indicios desde la época del Presidente Juárez, como puede observarse en la ley promulgada el 2 de diciembre de 1867, en la que se establece la importancia del desagüe del Valle de México para solucionar los problemas de las inundaciones y evitar las pestes y epidemias. En épocas más recientes se previeron algunas formas de contaminación en la Ley Federal de Ingeniería Sanitaria de 1948 y el Código Sanitario publicado en marzo de 1955. El 11

de marzo de 1971 fue expedida la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental, la cual tubo como finalidad esencial, prevenir las enfermedades, proteger la salud pública y conservar el equilibrio ecológico.

El 29 de marzo de 1973 fue expedida a través del Diario Oficial de la Federación el Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación de Aguas. A continuación se exponen algunos de los conceptos más importantes sobre las mismas.

La ley regula no solo la prevención y control de la contaminación, sino también el mejoramiento, conservación y restauración del medio ambiente, actividades que son declaradas de interés público. El objetivo es prohibir los contaminantes y sus causas, cualquiera que sea su procedencia u origen, que en forma directa o indirecta sean capaces de producir el deterioro del medio ecológico; es decir, que puedan alterar o modificar las características naturales del aire, del agua, de la tierra, perjudicando o afectando la vida, la salud y el bienestar humano, la flora y la fauna, o bien que degraden la calidad de los elementos vitales, de los bienes o de los recursos.

Para proteger esos objetivos, la Ley otorga Facultades al Ejecutivo Federal para dictar los decretos y reglamentos necesarios para clasificar y evaluar las fuentes de contaminación, señalando las normas y procedimientos técnicos para el control de los contaminantes, para poner en vigor las medidas, procesos y técnicas adecuadas para la prevención de la contaminación; y para regular el uso de combustibles, de vehículos y de motores de combustión interna.

Esta ley prohíbe descargar sustancias que alteren las condiciones naturales de aire, agua y suelo, rebasando los límites permitidos por los reglamentos. *En materia de aguas, prohíbe arrojar a los depósitos o infiltrar en terrenos, aguas residuales contaminantes, señalando que se dictarán medidas para el uso o aprovechamiento de éstas y se fijarán las condiciones que deben cumplir para ser arrojadas en las redes colectoras.*

La Ley prohíbe en materia de suelos, descargar, depositar o infiltrar contaminantes en los mismos, sin sujetarse a las normas correspondientes, determinando que cuando se acumulen desperdicios deberán tomarse medidas precautorias para evitar alteraciones indeseables del proceso biológico y los trastornos en el uso del suelo o en la capacidad hidráulica de cualquier cuerpo de agua.

Cuestión muy importante es la inclusión en la Ley, de la facultad que tiene toda persona para denunciar ante la autoridad correspondiente cualquier hecho que, en los términos legales, origine contaminación, es decir, la Ley concede acción popular.

Son suplementarios de la Ley y sus Reglamentos, la Ley Federal de Ingeniería Sanitaria, y las demás leyes y sus reglamentaciones que rijen en materia de tierras, agua, aire, flora y fauna.

La Ley Federal de Aguas reglamentaría del Artículo 27 Constitucional, incluye en sus preceptos, diversas disposiciones tendientes a prevenir cualquier contaminación de las aguas así como el destino y uso que se les debe dar, pero es el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de aguas, el que regula los ordenamientos contenidos en el Capítulo Tercero de la Ley. De conformidad con el artículo 2o, su aplicación compete al Ejecutivo Federal, por conducto de la Secretaría de Salud, en coordinación con la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Señala que para preservar y restaurar la calidad de los cuerpos receptores deberá realizarse, tanto el tratamiento de aguas residuales para el control de sólidos sedimentables, grasas y aceites, materia flotante, temperatura y pH en los máximos tolerables establecidos por el propio ordenamiento, como la determinación y cumplimiento de las condiciones particulares de las descargas de esas aguas residuales, de conformidad con los estudios que la autoridad realice de los cuerpos receptores, su capacidad de asimilación, sus características de dilución y otros factores.

En el propio reglamento se determinan los valores máximos permisibles de sustancias tóxicas en los cuerpos receptores, incluyendo plaguicidas y radioactividad. En los términos del Artículo 30 del Reglamento, se han creado Comisiones Consultivas en las cuencas o regiones, para estudiar y opinar sobre la prevención y control de la contaminación de las aguas, así como sobre la clasificación del agua de los cuerpos receptores, según su uso.

Para hacer aplicable el Reglamento sobre la contaminación de las aguas el Gobierno (SECOFI) tiene establecidas las siguientes normas oficiales entre muchas otras:

*Determinación de sólidos sedimentables en aguas residuales (DGN-AA-4-1973), Determinación de grasas y aceites en aguas residuales (DGN-AA-5-1973), Determinación del valor del pH de las aguas residuales (DGN-AA-8-1973), Determinación de materia flotante en aguas residuales (DGN-AA-6-1973), Determinación de la temperatura en aguas residuales (DGN-AA-7-1973), Método de muestreo de aguas residuales (DGN-AA-3-1975), Determinación de oxígeno disuelto en agua (DGN-AA-12-1975), Determinación de sólidos disueltos totales en agua (DGN-AA-29-1975), Determinación de nitrógeno total en aguas (DGN-AA-26-1975), Método de muestreo en cuerpos receptores (DGN-AA-14-1975).*

Datos importantes sobre las reformas y adiciones practicadas a la Ley es posible encontrarlas en las referencias 37, 38 y 39.

### 3.3. RECURSOS TECNICOS.

#### 3.3.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Los daños causados al medio ambiente por la inyección de desechos al subsuelo ha obligado a la elaboración de normas y reglamentos que regulen la construcción y operación de los dispositivos usados para tal fin (Ref.40). Debido a que cada lugar por sus características físicas y geológicas, presenta condiciones completamente diferentes a otros, no es posible establecer reglamentos estrictos que se apliquen en todos los casos.

Específicamente, para autorizar la construcción de un pozo profundo para la inyección de desechos, la mayoría de los Estados de la Unión Americana, requiere de un análisis completo de las condiciones del acuífero a que se inyecta, así como los posibles daños que podrán causarse por esta operación. En muchos casos, debido a la incertidumbre de los efectos de inyección, es necesario la construcción de pozos de observación que permitan evaluar el funcionamiento del pozo de inyección con respecto al ambiente que lo rodea. Así pues en México como en otros países, existen algunas disposiciones al respecto, éstas como se ha mencionado, dependen de varios factores, pero en general, la autorización para construir y operar un pozo de inyección debe estar basada en la siguiente información:

- (1) Características físicas y geológicas de la formación, como lo es; el material que lo forma, la transmisividad, capacidad de almacenamiento, posición con respecto a los acuíferos del agua potable y confinamiento.
- (2) Pruebas de bombeo para determinar la presión de inyección.
- (3) Corte geológico del pozo.
- (4) Características del estrato confinante, especialmente espesor y tipo de material.
- (5) Análisis físico-químico y bacteriológico del agua contenida en el acuífero.
- (6) Volúmenes de desechos líquidos a inyectar.
- (7) Análisis físico-químicos y bacteriológicos de los desechos a inyectar.
- (8) Resultados de pruebas de laboratorio que determinen los efectos del mezclado de las aguas del acuífero con los desechos líquidos.

Con la información anterior, se realiza una evaluación del proyecto y se determinan las características de las precauciones necesarias que permitan un buen control durante la construcción y operación.

### 3.3.2. CARACTERISTICAS FISICO QUIMICAS DESEABLES

Como regla general, *Cualquier desperdicio destinado a su eliminación en el suelo debe quedar confinado entre las fronteras del sitio de eliminación o en el subsuelo directamente bajo la superficie dentro de las fronteras del sitio de eliminación, y no debe contaminar, degradar o entrar directa o indirectamente en cantidades dañinas cualquier agua superficial más allá de las fronteras del sitio de eliminación o cualquier agua subterránea.*

Estos estandares estan ideados para aplicarse a los desechos doméstico, municipales, agrícolas o industriales. Las substancias que se definen como contaminantes, sedimentables, flotantes, degradantes o tóxicas, deben ser removidas de estas aguas ya sea antes o como resultado del proceso de eliminación en el suelo. La regla anterior es aplicable a todos los desechos y cuerpos receptores.

Las reglas siguientes se aplican a la eliminación de desechos en el suelo que no estan especificadas como exentas en otra sección, a cualquier agua residual que pueda recibir desechos de la eliminación en el suelo directa o indirectamente y aguas subterráneas con una concentración de cloro que no exceda de 100 mg/ml, o cualquier agua subterránea utilizada como fuente de abastecimiento de agua potable sin importar la concentración de cloro.

#### (A) LAGUNAS DE ALMACENAMIENTO O DE POLUMIENTO (MADURACION)

Los desechos líquidos o efluentes pueden ser eliminados en lagunas antes y después del tratamiento, o ser retenidas en lagunas de maduración como partes del mismo tratamiento. Sin embargo, no se debe permitir que los desechos penetren al agua subterránea, o sean descargados a un sistema de eliminación en el suelo sin tener el pretratamiento mínimo que se describe más adelante. En todos los casos se debe proveer de una laguna de almacenamiento que debe ser construída, regulada y utilizada, para almacenar por lo menos 6 días el flujo de diseño sin derramarse. El fondo y costado de las lagunas de almacenamiento y maduración, deben ser impermeables al agua y a los contaminantes comunes, o tener permeabilidad no mayor de 0.2 mm/día. Esto es aproximadamente un 10% de la precipitación diaria menos la evapotranspiración promediada durante un año, y es la cantidad de percolación que se puede esperar sea diluída 9 a 1 por agua subterránea disponible en forma natural.



## **(B) TRATAMIENTO PREVIO**

Antes de que se permita su entrada al agua subterránea o que sean descargadas hacia cualquier sistema de eliminación de suelo, los desechos líquidos deben ser tratados para tener:

- (1) Una DBO de no más de 10 ppm.
- (2) Una concentración de sólidos suspendidos no mayor de 5 ppm.
- (3) Una turbiedad de no más de 5 Unidades Jackson.
- (4) Un total de no más de 3 ppm de nitrógeno en formas diferentes a nitratos.
- (5) Ningun contaminante en concentraciones tales que el proceso final de eliminación no redujera a niveles de no contaminación.
- (6) Ninguna sustancia en concentraciones tales que interfieran con un proceso de purificación necesario en el sistema de eliminación del suelo.
- (7) Un proceso de desinfección tal que el número de coliformes totales no sea mayor de un nivel máximo permisible de 23/100 ml, cuando se analicen por el método del tubo múltiple (Ref.41). Cloración usada como desinfectante debe ser aplicada cuando la turbiedad no sea mayor a su SSTU y de total de -N-NO3 no mayor de 3 ppm. La cloración debe ser suficiente para mantener una concentración de cloro residual de no menos de 1 ppm por 30 minutos a gasto medio. Los coliformes totales son el principal estándar para desinfección. Mientras el uso de cloración es requerido, su tiempo de contacto y su residuo es secundario de manera de coliformes y debe ser usado bajo las concentraciones de DBO, sólidos suspendidos, turbiedad, etc., descritos antes.

## **(C) ESTANDARES PARA LA ELIMINACION DEL SUELO.**

Para todos los efluentes se requiera la aprobación del departamento correspondiente, para un sitio profundo de eliminación antes de expedir el permiso de construcción y operación. Para lo cual debe suministrarse al departamento la siguiente información:

- (1) Estudios geológicos e hidrológicos del lugar, incluyendo estratigrafía, características del suelo, profundidad del manto freático, profundidad del acuífero confinado (si existe), localización y características de las lentes de agua y las alturas extremas altas y bajas del manto freático en el ciclo anual.
- (2) Propiedades de percolación e infiltración de los suelos.

- (3) Capacidad disponible de los suelos para aceptar agua.
- (4) Terreno disponible para satisfacer las demandas presentes y futuras.
- (5) Uso presente y potencial de la tierra colindante.
- (6) Una investigación reciente y precisa, conteniendo una descripción legal del sitio de eliminación.

Esta información será utilizada por el Departamento para fijar las fronteras dentro de las cuales la contaminación y los desechos en cantidades perjudiciales deben ser confinados como lo indica la Regla General. Las fronteras de un sitio de diseminación deben estar al menos a 90 m de una fuente de abastecimiento privada o de un pozo, y al menos 305 m de una fuente de abastecimiento público. Se deben realizar las pruebas necesarias para demostrar que no existe y/o no se detecta flujo del efluente desde el punto de eliminación hacia el agua potable. Los desechos y los efluentes deben quedar contenidos en el lugar para no producir contaminación transmitida por varias personas fuera del lugar.

Generalmente debe existir una cobertura vegetativa saludable, de crecimiento vigoroso en el sitio de eliminación antes de iniciar ésta y debe mantenerse en condiciones que permita la remoción de contaminantes. El crecimiento vegetal debe ser utilizado y removido periódicamente.

Para efluentes que tengan el tratamiento previo mínimo requerido, además de cumplir con la Regla General, un sistema de eliminación de suelo debe purificar estos desechos líquidos, de tal manera que antes que penetren o atraviesen las fronteras del lugar de eliminación hacia el agua subterránea, este efluente tenga:

- (1) Una concentración total de nitrógeno no mayor de 10 ppm.
- (2) Una concentración total de nitrógeno de no más de 3 ppm. antes de introducirse a cualquier cuerpo receptor superficial.
- (3) Un número de coliformes fecales menor de 2 por 100 ml.
- (4) Un contenido de cloruro no mayor de 250 ppm o no mayor al del agua subterránea al que se incorpora el que sea mayor.

Antes de obtener el permiso de operación, se debe demostrar a satisfacción del departamento correspondiente que el sistema de eliminación producirá y mantendrá un efluente como el descrito anteriormente. Debe existir suficiente terreno, vegetación y características geológicas e hidrológicas para este propósito.

Los permisos de construcción, operación u operación temporal serán denegados por cualquiera de los siguientes motivos:

- (1) No utilización de la cobertura de cultivo vegetativo, o si se propone.
- (2) Un rango de aplicación mayor de 102 mm por semana o 0.88 m<sup>3</sup>/seg por 40 hectáreas.
- (3) Para efluentes con tratamiento previo mínimo requerido, más tratamiento para remover nitrógeno a una concentración de nitrógeno total no mayor de 3 ppm.

Además de cumplir con la Regla General, el sistema de eliminación de suelo debe purificar el efluente de tal manera que antes de penetrar las fronteras, tenga; un número de coliformes fecales menor de 2 por 100 ml y un contenido de cloruros no mayor de 250 ppm o no mayor al del agua subterránea a que se incorpora, el que sea mayor.

#### (D) MONITOREO

Se debe establecer un sistema de estaciones de monitoreo y pozos aprobado por el Departamento; debe ser adecuado para determinar la dirección del flujo desde el sitio de eliminación y para determinar si el efluente tiene la calidad requerida cuando penetra al subsuelo en el lugar de eliminación después del tratamiento previo y cuando éste atraviesa las fronteras superficiales del sitio de eliminación.

Cuando menos un pozo deberá establecerse para interceptar el flujo dominante desde el sitio a cada pozo privado o fuente de agua dentro de los 150 m del lugar. Por los primeros dos años de operación del sistema, cada pozo debe ser analizado semanalmente para; nitrógeno total, N-NO<sub>3</sub>, cloruros, coliformes fecales, conductividad, pH y otros parámetros según convenga. Durante los seis primeros meses de operación, los pozos de monitoreo en la proximidad de las fuentes de agua potable deben ser analizados para los estándares de agua potable semanalmente, y después mensualmente.

Si el sistema falla en el tratamiento de los desechos o si el tratamiento previo es deficiente en cualquier aspecto, o si la calidad del efluente final es inferior que los estándares por un período de 24 horas o más, o por un tiempo total de 48 por mes, no se deben hacer nuevas conexiones al sistema por 30 días o hasta que la deficiencia sea corregida, lo que resulte más largo.

Si contaminantes del sistema llegan a penetrar un abastecimiento de agua o un pozo de agua, no se deben realizar nuevas conexiones por 30 días o hasta que la situación sea remediada y el Departamento quede convencido que esto no volverá a ocurrir nunca, lo que resulte más largo.

### 3.3.3. ACCIONES PREVENTIVAS O CORRECTIVAS

En el capítulo I se indicaron algunos mecanismos de contaminación de agua subterránea, aquí se indicará la medida en que cada uno de dichos mecanismos puede ser contrarrestado o disminuido.

#### (A) INTRUSION SALINA

Este tipo de contaminación es fácilmente detectable por el aumento de salinidad en las formaciones, el método para combatir este tipo de contaminación ha sido la formación de *barreras* mediante la inyección de agua dulce a los acuíferos (Ref.42), o la extracción en gran escala de agua contaminada.

#### (B) INTERCONEXION DE ACUIFEROS

Las formas de control son aquellas que tienden a equilibrar las presiones hidrostáticas, con el fin de evitar el intercambio de fluidos.

#### (C) MOVIMIENTOS GEOLOGICOS

Los efectos de contaminación debido a este fenómeno son muy difíciles de cuantificar y por ende de combatir, sin embargo reconocimientos de monitoreo pueden dar la pauta a seguir.

#### (D) RIEGO CON AGUA SUPERFICIALES

Sus efectos son similares a la infiltración natural, no se considera de gran importancia su control.

#### (E) RIEGO CON AGUAS RESIDUALES

Para los elementos que contienen este tipo de aguas, la acción biológica de los micro-organismos presentes es importante, ya que ambos compuestos (nitrógeno y detergentes) son degradables, lo que provoca su utilización biológica degradando parte de los mismos hasta convertirlos en material inerte. El control más efectivo en el avance de estos micro-organismos es la porosidad de los estratos del suelo.

#### (F) RIEGO CON AGUA SUBTERRANEA

La manera de combatir el efecto negativo, es mediante la construcción de drenes que interceptan los flujos de agua antes que penetren a través del subsuelo hasta los mantos acuíferos.

#### *(G) ELIMINACION DE DESECHOS INDUSTRIALES LIQUIDOS*

El efecto de los elementos contaminantes, disminuye bastante debido a la dilución que se realiza de los elementos, ya que las concentraciones decrecen. El efecto disminuirá proporcionalmente al grado de dilución alcanzado.

#### *(H) DESCARGA EN POZOS DE ABSORCION*

Cualquier elemento que degrade las condiciones del acuífero hasta restringir su utilización actual, debe ser eliminado, en estas condiciones, la autorización para verter aguas residuales a pozos de absorción debe basarse en un examen minucioso de las características del subsuelo hacia donde se pretenden canalizar los residuos, con objeto de evitar al máximo la contaminación de los acuíferos limpios.

#### *(I) DESCARGAS EN LAS LAGUNAS DE INFILTRACION Y EVAPORACION*

Los métodos usados para controlar los efectos contaminantes son variables, tendientes en general a evitar la infiltración por medio de revestimientos. Formaciones geológicas naturales que confinen la infiltración a cierto nivel o a contrarrestar los efectos nocivos de los contaminantes usando materiales que inhiban su penetración en el subsuelo. Esto último puede lograrse mediante la utilización de recubrimientos que absorban los contaminantes para después disponer de ellos en forma sólida mediante el cambio periódico del material del recubrimiento.

#### *(J) ELIMINACION DE DESECHOS SOLIDOS*

Para el control, se tiene únicamente la prevención de infiltración del agua de lluvia que pudiere disolver los elementos contaminantes.

#### *(K) MINERIA Y EXPLOTACION DE PETROLEO*

La eliminación de aguas residuales se realiza generalmente de dos maneras, la primera es la reinyección de los residuos al subsuelo y la segunda es descargándola hacia depresiones donde se produce.

CAPITULO IV. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y DE OPERACION MAS IMPORTANTES.

4.1. PROCESO CONSTRUCTIVO.  
4.1.1. PERFORACION

(A) FUNDAMENTOS

Para la selección del equipo de perforación adecuado se debe tener en consideración que el subsuelo está formado por materiales rocosos que cubren toda la gama litológica, lo mismo es hablar de formaciones Igneas, Sedimentarias o Metamórficas. En terminos generales consideremos las sugerencias siguientes para perforar con éxito las formaciones predominantes:

Las rocas Igneas pueden ser perforadas con equipo de percusión o rotatorias, empleando el martillo y como fluido de perforación aire o espumante. Sin embargo, como generalmente todas estas rocas se encuentran cubiertas por aluviones de espesores variables, de acuerdo con la permeabilidad y su indice de almacenamiento, es recomendable de estudiar la conveniencia de perforarlas. Cuando las formaciones anteriores presentan alternancias, no cambia el criterio de utilizar el equipo mencionado, siendo factible el variar del sistema de perforación neumático al convencional.

Las rocas sedimentarias marinas, entre las cuales se cuenta a las calizas, margas, conglomerados, areniscas y lutitas. Tomando en cuenta que las calizas por su composición tienen una permeabilidad secundaria y localizada, solo mediante estudios hidrogeológicos detallados podrian perforarse con éxito. Puede emplearse el sistema de percusión o el rotatorio neumático con martillo y el de *doble tubo* o *Con-Cor* y el rotatorio convencional.

De las rocas metamórficas, las mas conocidas son las de origen metamórfico regional, estando representadas por pizarras, filitas, Esquistos y Gneisses. Dentro de este grupo se consideran no productoras por su naturaleza arcillosa la Filita y la Pizarra; los Esquistos y Gneisses, pueden servir cuando han desarrollado una permeabilidad secundaria. Para perforarlas, en general se recomienda el empleo de equipos rotatorios.

Los aluviones son formaciones no consolidadas formadas generalmente por alternancias de capas de gravas, arenas y arcillas o depositos heterogéneos de las mismas. Es conveniente perforarlos empleando equipos rotatorios de circulación directa utilizando lodos bentoníticos como fluidos de perforación.

Todo lo anteriormente expuesto, se debiera consicerar como recomendaciones generales, ya que no se han mencionado los problemas que presentan los fracturamientos, tanto en las rocas Igneas y Metamórficas, como las zonas de disolución en algunas

Sedimentarias. En ambos casos, si al estar empleando equipos rotatorios las pérdidas de circulación no son controlables, obligaran a cambiar el tipo de perforación del sistema rotatorio al convencional. Es necesario determinar los objetivos de la perforación, ya que de ello depende la selección del equipo adecuado de acuerdo con; su capacidad, herramienta por utilizar, tipo de fluido de perforación y en consecuencia, el diseño del pozo.

Cuando se tiene que perforar en formaciones deleznable, se recurre al equipo rotatorio, estando la capacidad de éste en función de la profundidad a perforar. La ventaja de este equipo radica en el empleo de lodos bentoníticos como fluido de perforación, estos lodos provocan un enjarre en las paredes del pozo ayudando a estabilizarlos. Sin embargo, si se tiene un mal control del lodo se corre el riesgo de obturar los acuíferos, por lo que es muy recomendable su estricto control.

#### (B) EQUIPOS DE PERFORACION DE MAYOR USO

Los equipos de perforación llamados, de *exploración* o *diamante* los hay de 3 tipos; percusión, rotación y combinados, con diámetros de +- 2", 2 1/4" a 4 1/2" y 4" respectivamente. Para los primeros, las profundidades que alcanzan son del orden de los 80 m, los segundos más de 500m y los combinados limitados a +- 120 m. Como para fines exploratorios se requiere que el agujero permita el paso del electrodo del aparato de registros eléctricos, debe emplearse equipo de rotación. Los equipos de percusión, prácticamente obsoletos, constan esencialmente de un triple de fierro tubular del que pende una polea a través de la cual, un malacate accionado por un motor impulsa un cable de acero a cuyo extremo se fija la sarta de perforación, formada por una zapata cortadora a la que se acoplan tubos huecos llamados varillas. El muestreo se realiza a través del interior del varillaje golpeandolo con el *martinete* sobre una cabeza golpeadora aplanada.

Los equipos rotatorios compuestos principalmente de una cabeza rotatoria, accionada mecánica o hidráulicamente; un malacate de maniobras, una cabeza de gato, una unidad de potencia de tipo automotriz, una bomba triplex condicionada a volumen o presión. Además un *Swivel* o cabeza giratoria, varilla de penetración, barriles muestreadores, tubería de ademe, zapatas cortadoras y brocas de los tipos, triconico, de mano, de diamante, con refuerzos de carburo de tungsteno, rimas, etc. Si se usa una broca de diamante, barrenas de roles o martillos neumáticos, se emplean lodos espumantes, productos químicos o aire como fluidos de perforación. Para evitar el deterioro de los diamantes la máquina debe mantenerse sobre patines durante la operación y no sobre un camión. Cualquiera de estos dos sistemas permite la recuperación de muestras inalteradas; no así el sistema combinado o neumático en el que es necesario utilizar aire para

la recuperación de ellas, obteniéndose fracturadas. Este sistema proporciona buenos resultados en materiales compactos y secos, no así en el tipo cavernoso o deleznable.

El equipo rotatorio consta de mástil o torre de perforación, una mesa rotatoria y una plataforma donde se instalan malacates con tambores para trabajo y cuchareo, una bomba de lodos y una caja de transmisión de potencia. La unidad debe tener tomas de fuerza para transmitir la potencia del o de los motores a la bomba de lodos, a los tambores, la mesa rotatoria y al sistema de alimentación de la presión descendente (pull-down), pudiendo reemplazar este por el sistema de barras de peso (drill-collars), que a diferencia del pull-down en la que se ejerce la presión en la parte superior de la sarta de perforación, los drill-collars van inmediatamente después de la barrena, originando con esto que no haya flambeco de la sarta de perforación.

La estructura de la instalación de estos equipos es de acero estructural para trabajo pesado, soldada eléctricamente con miembros cruzados y reforzados. Sobre ella se montan la bomba de lodos, los malacates con tambores para trabajo y cuchareo, el mástil y los cilindros hidráulicos para su operación; la mesa rotatoria y opcionalmente un compresor y un motor adicional al del camión o dos motores, de acuerdo con el modelo y capacidad del equipo. Así como los controles, tablero de instrumentos, caja para herramientas, etc. Bajo la misma, se instalan las cajas de transmisión, tomas de fuerza y demás accesorios para la correcta y eficiente operación y trabajo del equipo. En las figuras No. 27, 28 y 29 se ilustran algunos de esos equipos.

La moderna máquina perforadora de tipo rotatorio que utiliza doble tubería de perforación (dos tubos concéntricos) se conoce como perforadora tipo CON-COR (Continus Coring) o sea de muestreo continuo. Tiene, como característica fundamental, el poder funcionar con circulación de fluidos controlados e cualquiera de tres diferentes maneras, cada una de las cuales puede adaptarse para aplicarse en procedimientos específicos de perforación como sigue:

(1) Circulación confinada inversa; el agujero que se está perforando, se circunda y aísla alrededor de la barrena por medio de una caja inductora o portabarrena cilíndrica. También puede utilizarse arriba de la barrena un empaque elástico especial. Con esos aislamientos, todos los fluidos de circulación, en las operaciones de perforación se establecen y encausan por el interior de la tubería doble de perforación y los fluidos, agua o lodos que hay en el pozo, o más bien, ocupando el espacio anular entre la pared del pozo y la sarta de la tubería de perforación, permanecen prácticamente estáticos. Los fluidos que se aplican para la perforación, en la operación de este



equipo pueden ser; aire, agua, mezclas de aire con agua, lodos, mezclas de espumante o cualquier otro elemento gas o líquido. (Ver figura No. 30)

En este sistema los fluidos penetran en su circulación descendente por el espacio anular que queda entre el doble tubo de perforación y retornan a la superficie, con muy alta velocidad por el tubo interior, pasando a través del cabezal rotatorio hidráulico *Swivel*, para salir hacia la manguera de descarga. Este procedimiento de circulación se utiliza, tanto para iniciar el pozo, como para perforarlo, atravesando también zonas permeables con pérdidas de circulación con espesores hasta de 25 m. se puede perforar, además con martillos neumáticos o bien con barrenas cortadoras de núcleos o corazones, con extracción continua de éstos y puede emplearse para otros objetivos, tales como muestreos aislados de acuíferos de diferentes salinidades.

(2) Sifoneo con circulación inversa; el fluido para sifoneo puede ser aire u otro gas. El aire o gas penetra en descenso por el interior del espacio anular de la doble tubería y, a cierta profundidad en el pozo o profundidades que se fijen por conveniencia, se provoca la difusión del aire o gas hacia el tubo interior de la tubería doble de perforación, para aligerar la columna del líquido contenida en él. Esta columna líquida, así aligerada, se eleva con grandes incrementos de velocidad a medida que se desplaza por los líquidos más pesados, no aligerados, que están contenidos y provienen del espacio anular entre las paredes del pozo y la sarta de la tubería de perforación. Lo anterior ocasiona que los líquidos de dicho espacio anular, se desplacen rápidamente hacia el fondo de la barrena y dicho flujo recolecta y encausa los cortes de ella, ya sea núcleos o corazones, o las esquirlas de los recortes de la perforación, haciéndolas penetrar hacia la garganta del tubo interior y viajar, en sentido ascendente, por el interior de éste y, manteniendo el sifoneo de aire o gas, se les fuerza a subir para salir, finalmente y a muy alta velocidad, pasando por el cabezal hidráulico giratorio siendo expulsados hacia la manguera de descarga. En este procedimiento de circulación, el espacio anular entre pozo y sarta de perforación, se mantiene prácticamente lleno de líquido. El agua que puede producir una formación acuífera así perforada, se utiliza para este propósito. Este sistema de perforación, con doble tubería, permite el sifoneo con circulación inversa para varios objetivos, como son; la propia perforación, que es más eficiente y rápida pues no se remueven los cortes de la perforación; también es muy útil para operaciones de pesca, extracción de agua para pruebas de producción y salinidad y su empleo en la extracción de recortes en la barrena, extracción de arenas, lodos, azolves, y desarrollo del pozo para lograr el mayor incremento posible en su rendimiento productivo.

(3) Circulación directa o convencional; con la doble tubería el fluido de perforación circula penetrando y descendiendo hacia el pozo, bien sea por el espacio anular entre dicha doble tubería o bien a través de esta y también por el tubo interior, encauzándose hacia la superficie inferior del corte de la barrena, para retornar a la superficie con velocidad moderada, fluyendo por el espacio anular entre la tubería de perforación y la pared del pozo, en la misma forma que se establece la circulación directa de perforación de cualquier otro equipo rotatorio que opera con tubería simple, convencional de perforación.

Los equipos de percusión constan básicamente de un mástil o torre telescópica compuesta de dos secciones fácilmente izables que descansan sobre la máquina al ser transportada, una doble línea de elevación, una para la operación de las herramientas de perforación y la otra para cuchareo; un sistema de balanceo con blea Pitman con accionamiento de cable y una fuente de poder, la máquina se opera a través de controles localizados generalmente en la parte posterior derecha de la unidad y para su transporte rápido puede montarse sobre una estructura de camión.

#### 4.1.2. MATERIALES Y EQUIPO

##### (A) TUBERIAS

Los pozos presentan a lo largo del tiempo variaciones y descensos en sus niveles de bombeo en virtud del origen y constitución geológica de los acuíferos, o también, como en el caso de los pozos de inyección, necesidad de profundizar más. En vista de ello se diseña el pozo con una *Camara de Bombeo* adecuada a esas fluctuaciones (caso de pozos de explotación). Es necesario determinar entonces longitudes y uniones de tubos. La unión entre tubos, si son del mismo diámetro se hace por medio de soldadura, si son diferentes diámetros, deben emplearse piezas especiales. También se usan tuberías en la instalación del propio pozo que funcionan como ademe. Las características de éstas son las siguientes:

(1) La lámina de fabricación de tubería ciega y cedazo debe ser nueva y contar con los siguientes espesores de acuerdo al diámetro; 3/16" para D=10", 1/4" para D=12" y 14", 1/4" y 1/16" para D=16".

(2) Cada tramo de tubería debe tener sus extremos lisos, con bisel a 30° y una sola costura longitudinal soldada por resistencia eléctrica.

(3) La longitud de cada tramo será de 6.10 m aproximadamente.

(4) El diámetro de tuberías y cedazos quedará establecido en el proyecto ejecutivo.

(5) La porción ranurada de los cedazos sera de 5.60 m.

(6) Los cedazos seran ranurados o de persiana sencilla con ranuras alternas y discontinuas.

(7) Las ranuras tendran una longitud minima de 2" y el ancho de la abertura de 1/8", 3/16" o 1/4".

(8) El area de infiltración promedio por metro sera: 240 cm<sup>2</sup> para el cedazo de 12" de diámetro, 250 cm<sup>2</sup> par el cedazo de 14" de diámetro y 300 cm<sup>2</sup> para el cedazo de 16" de diámetro.

Las tuberías de contra ademe son las tuberías lisas que se emplean en los trabajos de perforación para evitar derrumbes en las paredes o para el confinamiento de acuíferos o formaciones que se requiera aislar por medio de cementantes. En el primer caso pueden tener caracter provisional o no, dependiendo de la conveniencia local del rescate; no así en el segundo, que de antemano esta programada su instalación definitiva en el pozo. Por cuanto a normas son iguales a las de tubería lisa para ademe.

El ademado de los pozos se realiza utilizando barras, ésto obedece a que las tuberías carecen de coples, por lo tanto los tramos de tubería se colocan a tope y se unen por medio de tres cordones de soldadura eléctrica, depositados en los espacios que para ello forman los biseles. A manera de refuerzo primordialmente, se distribuyen y sueldan en la forma descrita y del mismo material que el ademe, tres o cuatro placas, los tramos así unidos, deberan formar un cilindro vertical de tal suerte que ya al calibrarse no presenta una desviación mayor de 1/2 grado por cada 100 m de longitud.

#### **(B) LODOS DE PERFORACION**

El empleo de lodos en los trabajos de perforación por el sistema rotatorio es de gran importancia, por lo cual se han hecho estudios y registros cuidadosos sobre el comportamiento de diversas sustancias (Ref. 43) y se ha obtenido como resultado, el ahorro del tiempo y la simplificación del problema en estos trabajos.

La arcilla y el agua son los principales componentes del lodo de perforación, este material se encuentra en la naturaleza en forma de sedimentos no consolidados, que se han reducido por la alteración de las rocas que contienen silicatos. Algunas arcillas no son adecuadas para formar lodos de perforación, por lo que se le agregan otros materiales, que químicamente se componen en su mayor parte de silicatos de aluminio hidratado, que varían en porcentaje de sílice, alumina y agua; también se presentan como impurezas algunos óxidos metálicos, clasificandose en dos grupos:

l de las caolinitas y el de las montmorillonitas. De acuerdo a la actividad que efectúan, podemos describir las siguientes funciones de acuerdo a orden de importancia:

1) Extracción de los detritos; la elevación de los detritos del fondo del pozo a la superficie depende principalmente del mantenimiento de la densidad, viscosidad y velocidad del lodo entre la tubería de perforación y las paredes del pozo, siendo factores importantes el tamaño y la densidad de los detritos (a mayor densidad, viscosidad y velocidad del lodo, la extracción era más efectiva).

2) La Impermeabilización y enjarre de las paredes, la cual evita derrumbes en formaciones no consolidadas. El enjarre debe ser impermeable y delgado para permitir el paso de las herramientas de perforación y asegurar la estabilidad del pozo, ya que un enjarre muy grueso presenta varios problemas; empaque de la arena, destrucción del enjarre cuando se saca la tubería, lo que puede ocasionar derrumbes de las paredes en las formaciones arenosas por pérdida de agua en el fluido y reducciones del diámetro del pozo en las lutitas. Como el enjarre es el resultado del efecto de filtración del lodo de perforación al ser forzado a penetrar en la formación, el espesor del enjarre depende de la diferencia entre las presiones; hidrostática de la columna del lodo y la del fluido contenido en la formación, así como de las propiedades tanto de la formación como las coloidales del lodo. Un lodo pesado con gran cantidad de arcillas en suspensión, deposita en las paredes del pozo más arcilla que un lodo pesado con poco porcentaje de material arcilloso; un flujo laminar permite el enjarre, en cambio un flujo turbulento excava y erosiona las paredes.

3) Refrigeración de la barrena; al girar la barrena sufre calentamientos debido a la fricción y sufre desgastes durante el proceso de perforación. Por tanto los lodos reducen el desgaste, absorbiendo el calor a través de la circulación y mientras menos porcentaje de arena contenga, más efectiva será su función de refrigeración.

4) Otras funciones dentro de las múltiples que cumple el lodo en los trabajos de perforación puede mencionarse la lubricación de la tubería de perforación, durante la cual el lodo evita que la tubería friccioné contra las paredes del pozo, la suspensión de los detritos cuando se interrumpe la circulación, para lo cual el lodo debe tener propiedades tixotrópicas y el lodo no debe tener acción corrosiva y su acción abrasiva debiera ser mínima para evitar que el equipo de perforación se deteriore.

Entre las características de mayor importancia de los lodos de perforación sobresalen las siguientes:

(5) La densidad que depende de la cantidad y el peso de los sólidos en suspensión; variando de 1.08 a 1.38 a poca profundidad, pero en casos específicos se requiere de lodos más densos, por ejemplo, cuando al cortarse formaciones permeables, están contienen agua con mayor presión que la hidrostática del lodo, capaz de destruir el enjarre aprisionando la barrena con los derrumbes producidos.

(6) Las cualidades de los lodos (lubricación, impermeabilidad, etc.) dependen de las propiedades coloidales, éstas a su vez dependen de la calidad de las arcillas empleadas y del contenido de sales que el agua puede tener. No existe una unidad para medir el valor coloidal de un lodo, pero sí puede medirse el valor coloidal relativo, el método más empleado es la prueba de enjarre, en la que por una presión determinada, se fuerza al lodo a pasar por un papel filtro, el cual solo permite el paso de cierta cantidad de agua lo que origina la formación de una película la cual da idea de las propiedades coloidales.

(7) La floculación es la propiedad que tienen las sustancias que se encuentran emulsionadas o en disolución coloidal ya que al precipitarse sus partículas no se funden unas con otras, el grado de la dispersión de los coloides disminuye con la floculación, permitiendo así el agrupamiento de éstos, formando agregados que modifican las propiedades de enjarre y viscosidad.

(8) Si el lodo es contaminado con sales solubles, puede ocasionar floculación, mala calidad del enjarre, gran pérdida de agua y disminución de la resistividad del lodo. Cuando un lodo contiene más del 5% de arena perjudica los trabajos de perforación, pudiendo provocar enjarres muy gruesos, pérdidas de agua, empaques de la barrena y deterioro del equipo en contacto con el lodo.

(9) Las variaciones del pH produce cambios en sus propiedades físicas, como es su dispersión en el agua, viscosidad, resistencia gelatinosa y su acción corrosiva.

Un aspecto importante para la operación de los lodos es que la viscosidad recomendable para perforaciones con profundidades máximas de 500 m varíe entre 38 y 40 cm<sup>2</sup>/seg, logrando así mayor rapidez de perforación, eliminación de arenas, lo que evita enjarres falsos; cuando se perforan arenas o gravas gruesas, deberá aumentarse la viscosidad, siendo la recomendable de 48 a 50 cm<sup>2</sup>/seg.

#### (C) CEMENTADO DE LOS POZOS

Intimamente ligado a la perforación y terminación de pozos, está el uso del cemento, estas operaciones deben realizarse cuando en el curso de la perforación se pretenda aislar los acuíferos de alta salinidad o bien para evitar la contaminación de los acuíferos de buena calidad factibles de inyección.

La cementación de un pozo consiste en inyectar cemento, de manera que este ocupe el espacio anular comprendido entre la tubería de ademe y las paredes del agujero. Para lograr un buen trabajo de cementación es indispensable analizar cada uno de los factores que intervienen para que sea realizada con éxito, entre ellas se tienen; el cemento en sí, la correcta relación agua cemento, el uso del equipo adecuado y las características del pozo.

La correcta relación que debe tener una lechada, es de gran importancia para la obtención de una buena cementación; al prepararla es necesario usar la suficiente cantidad de agua para asegurar una buena hidratación o hidrólisis de los elementos constituyentes, el cemento común requiere aproximadamente un 20% de su peso en agua, para lograr la hidratación completa, pero se ha demostrado (Ref. 44) que el cemento requiere el doble del agua para ser bombeable. En ocasiones pueden usarse lechadas gruesas utilizando poca cantidad de agua; estas mezclas ayudan a desplazar el lodo por delante, teniendo menor peligro de contaminaciones con el fluido de perforación, pero también se corre el riesgo de que el cemento empiece a fraguar antes de haber alcanzado la profundidad deseada. Otras veces la lechada puede contener 70% de agua, pero requiere suficiente reposo para el fraguado, además tiene el inconveniente de que se infiltra a través de formaciones permeables (como es el caso de Mérida).

Los cementantes están sujetos a las reacciones químicas originadas por la contaminación con agua del subsuelo que contengan sales en disolución, y si esta contaminación se efectúa durante el desplazamiento del cemento, sus propiedades pueden ser alteradas y en casos extremos no lograr fraguar. Las soluciones diluidas de cloruros, reducen el tiempo de fraguado; las de calcio y magnesio son mucho más activas que las de sodio en estas condiciones. Por lo contrario, con soluciones sulfuradas puede retardar el tiempo de fraguado, así como pequeños porcentajes de las mismas pueden acelerarlo. Además, la contaminación con sales alcalinas influye también en el tiempo del fraguado y al quedar en contacto con ellas, sufrir después cuarteaduras. La falta de solidez en el cemento también puede deberse a una expansión después de su fraguado, como resultado de una tardía recristalización de cal y magnesio libres en el cementante mismo, por ello, más del 5% del magnesio se considera perjudicial en el cemento portland. Los efectos posibles en cementaciones ocasionadas por estas reacciones pueden no apreciarse al principio, pero posteriormente puede presentarse el desmoronamiento y desintegración del cemento.

Por lo que respecta a la contaminación de la lechada con el fluido de perforación, reduce en gran medida la resistencia del cemento, siempre conviene evitar el contacto directo, inyectando antes de la lechada un colchon de agua para desalojar el fodo contenido en el pozo y a la vez limpiar las paredes del agujero. La presión actuante sobre la lechada influye en el fraguado del cemento, ya que la columna hidrostática origina grandes presiones acelerando el tiempo de fraguado. Una alta presión origina pérdida de agua en la lechada según el tipo de formaciones existentes. El tiempo de fraguado del cemento, también es afectado por la temperatura, y como ésta aumenta normalmente con la profundidad del pozo, puede originar problemas durante la cementación, ocasionando un fraguado prematuro no pudiendo con ello unir adecuadamente la tubería con la pared del agujero.

Para determinar la cantidad de cemento a emplear, se considera lo siguiente: cada saco de cemento de 50 Kg mezclado con 40 a 50% de su peso en agua, es igual a 36.5 litros de lechada con una densidad de 1.8 a 1.9, de acuerdo con ello y con el volumen por llenar se determina la cantidad. Debe considerarse el exceso por pérdidas en operación y canalización en el fondo así como por penetración en las formaciones.

Para desalojar recortes y materiales desprendidos por los raspadores, una vez que la tubería que se va a cementar se encuentra en el fondo del agujero se le conecta en su extremo superior, una cabeza de cementar construida con anterioridad que consiste en un tramo de tubería de contra-ademe, una tapa de placa de acero cuyo diámetro debe ser una pulgada mayor que el tubo, teniendo en su periferia muescas que servirán para dar paso a fijar tornillos en ellas, con ojos en su base para poder ser soldadas al tubo y tener accionamiento de bisagra; su longitud debe ser tal, que al estar en posición vertical sobresalgan de la tapa y se fijan fácilmente a ella mediante tornillos y cuercas. En el centro de la tapa se soldara una asa para su fácil movimiento. Soldada a una de las paredes del tubo de la cabeza de cementar irá un niple, y atornillado a éste una válvula de paso a la que también se atornillará otro niple que servirá de unión con la manguera de perforación. Inmediatamente se circula agua limpia hasta que los recortes hayan sido expulsados quedando el pozo listo para su cementación.

Para realizar la inyección el cemento se aloja en una tolva o embudo en cuyo extremo inferior se conecta la manguera de presión del agua, a fin de que ésta arrastre a su paso el cemento en forma de lechada. Esta lechada se deposita en una fosa donde se continúa su agitado para posteriormente ser bombeada al interior del contra-ademe a través de la cabeza de cementar. Una vez terminada la inyección, se levanta la tapa de la cabeza de cementar. El espacio comprendido entre las paredes interiores de la tubería de contra-ademe y el tapon de madera, será ocupado por un empaque de algún material sellante que se fijara a las paredes

del tapon. Para desplazar éste y la lechada contenida en el interior del tubo, se volverá a colocar la tapa de la cabeza de cementar y a través de la bomba de lodos se inyectará este fluido hasta que la lechada derrame por la boca del pozo; lo que indicara que ya ha ocupado totalmente el espacio anular por cementar. Al seguir inyectando lodo y no salir porque el tapon ha llegado al fondo de la tubería, el manómetro de la bomba registrara un incremento de presión, mismo que se aprovechara cerrando bruscamente la valvula de paso, con el objeto de que la presión del cemento antes de fraguar no invierta la circulación y levante el tapon de madera.

En general, las técnicas de cementado en la industria de pozos de agua se han convertido en una tecnología especializada cuya complejidad esta ligada a la profundidad del pozo. En la construcción de un pozo, la cementación es una fase sumamente importante y más aun si se trata de pozos destinados a la inyección de agua residual, es por ello que es conveniente mencionar aquí algunas de la prácticas de cementación inadecuadas que más comunmente se presentan así como la forma probable de corrección (Ref. 45):

(1) La tubería del revestimiento del pozo es cortada al nivel o debajo del nivel de la superficie y no se sella pudiendo penetrar agua superficial. *Corrección:* Debe cortarse por encima y sellarse.

(2) La tubería subterránea se instala en aperturas no selladas, pudiendo penetrar agua superficial y subsuperficial. *Corrección:* Debe cuidarse que la apertura del pozo este herméticamente sellada lo cual permite además renovar la tubería sin necesidad de excavar.

(3) La apertura no sellada alrededor de la tubería de revestimiento permite el flujo descendente de las aguas superficiales. *Corrección:* Se elimina sellando las aperturas anulares entre la tubería de revestimiento, el barreno y la tubería corta.

(4) Las aguas corrosivas de los drenajes y fuentes similares fluyen fácilmente por la grava hacia el pozo, atacando la tubería de revestimiento y drenan hacia la apertura anular dentro de la arcilla y por medio de grietas en la roca hacia el pozo. *Corrección:* Se evita sellando las aperturas anulares entre el barreno, tubería de revestimiento y tubería corta así como las grietas en la roca y otras aperturas en la tubería.

(5) Las formaciones friables o de esquistos tienden a derrumbarse o pandearse provocando taponamiento de las oquedades. *Corrección:* Sellando con cemento las cavidades se evita correctamente el pandeo y derrumbes. En la figura 31 se esquematizan estos problemas.



Finalmente, debe cuidarse que el agua para la mezcla este libre de aceite u otras materias orgánicas y el contenido mineral disuelto se recomienda menor a 2000 ppm. En ocasiones, como en el caso de Yucatán, se puede requerir la adición de arena u otro material que abulte para permitir que la lechada establezca un puente en las aberturas de mayor tamaño sin excesiva pérdida de fluidos; los aditivos bentoníticos sirven en algunos de estos casos.

Existen diversos métodos o procedimientos para la cementación; método de la tubería de la producción, método de la tubería de revestimiento interno, método del receptáculo tipo, etc., la aplicación de uno u otro es función de condiciones específicas. Sin embargo, uno de los problemas común en la cementación de tuberías de revestimiento de gran diámetro es la flotación. Para contrarrestar este fenómeno puede aumentarse la densidad de los fluidos desplazados. Sin embargo esta operación es costosa, aunque con el conocimiento de las diversas propiedades de los materiales de lechada el costo puede reducirse bastante.

## 2.2. PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS Y DE FUNCIONAMIENTO.

### 2.2.1. INSTALACION DEL POZO DE INYECCION

En general son aprovechados los sondeos de reconocimiento, tal cual o ensanchando el diámetro. Con frecuencia el sondeo está pensado de tal forma que las entubaciones y cementaciones realizadas ya son las definitivas. El pozo se reviste con tubería de acero resistente a las presiones del terreno y a la presión máxima de inyección, según las normas fijadas en proyecto, y el exterior se cementa. La cementación realizada debe probarse a presión para asegurar su calidad, la cual puede también recomprobarse mediante la inyección de trazadores radioactivos.

Cuando se precisa aislar acuíferos de agua dulce de otros acuíferos de agua dulce o salada, o bien se deben atravesar niveles de sal y es preciso evitar a toda costa cualquier circulación exterior de agua, se procede a entubar por tramos, cementando con cuidado cada uno de los niveles que se desea proteger. Estas entubaciones se deben realizar ya durante la perforación de exploración. Si el nivel de inyección es roca consolidada, no es preciso entubarlo, lo cual facilita operaciones posteriores de limpieza. Puede tener el mismo diámetro de la perforación o menor, y a veces es una zona expresamente perforada con precauciones para evitar perjudicarla (perforación a rotación con agua limpia con circulación directa o inversa, a percusión, con turbina, etc.). Aunque no se entube, es corriente colocar una rejilla de fácil extracción. Si el nivel de

Inyección se derrumba o produce arenas, se procede a revestirlo con una rejilla resistente a la corrosión y al aplastamiento, con o sin macizo de gravas.

La inyección puede hacerse directamente a través de la entubación del pozo, que queda así sometido a la corrosión del líquido vertido. Puede procederse a la protección interior del tubo con resinas, plásticos o goma, pero no siempre es satisfactoria y de garantía. Para mayor seguridad, la inyección se efectúa a través de un tubo concéntrico que llega hasta el nivel de inyección. Este tubo suele ser de material resistente a la corrosión, a la presión del fluido y a los esfuerzos que genera su propio peso. Se puede utilizar acero revestido de resinas, plásticos o goma, y recientemente tubería de fibra de vidrio con resinas epoxi y revestido con tejido acrílico; resulta algo frágil y resiste hasta 120 grados centígrados, con un peso de solo el 25% de la tubería de acero. El anillo entre este tubo y la entubación se llena de fluido no corrosivo, como agua con inhibidor o aceite mineral. En el extremo inferior se coloca un obturador mecánico para evitar la difusión de los líquidos, aunque si se emplea aceite mineral no es preciso, pues la propia interfaz de separación actúa de cierre hidráulico.

La presión de ese líquido debe controlarse a fin de no perjudicar el obturador mecánico o no desplazar el cierre hidráulico. Si conviene puede tenerse en circulación el fluido inerte, renovándolo sin necesidad de parar el pozo. En caso de corrosión del tubo interior, éste puede reemplazarse con facilidad. No se tienen datos reales sobre el posible uso de protección catódica. En muchos países existen normas sobre la instalación y cementación del pozo, en México existe algo al respecto.

#### 4.2.2. DESARROLLO DE POZOS

Una vez concluida la instalación del pozo, se procede a la limpieza del nivel de inyección con agua limpia con o sin polifosfatos, ayudando si es preciso con pistoneo, rascado, chorros de agua, bombeo con aire comprimido o bomba, etc. Si la formación es calcárea o dolomítica o se trata de una arenisca de cemento calcáreo, puede procederse al desarrollo (estimulación) con ácido clorhídrico mediante las técnicas usuales de acidificación, y que suele realizarse por personal especializado. Algunas veces se ha empleado el ácido fluorhídrico, solo o mezclado con clorhídrico, en niveles silíceos o de areniscas, pero el manejo es difícil y su aplicación muy restringida. En ocasiones se procede a la fracturación hidráulica, introduciendo arena calibrada para evitar el cierre de las fracturas; las operaciones deben hacerse con precauciones, a fin de evitar daños a los niveles confinantes. El empleo de explosivos no es recomendable, aunque aun se usan con cierta frecuencia.

#### 4.2.3. COLMATACION

La progresiva reducción del índice de inyectividad es un fenómeno general en los pozos de inyección y es debido a los diferentes fenómenos que producen una reducción de permeabilidad (colmatación). Con frecuencia conviene un pretratamiento químico del agua de inyección para eliminar Fe y Mn, ajustar el pH, además de una decantación y filtración con eliminación de algas, mohos, bacterias, etc.

El aire o los gases arrastrados o aportados por el agua de inyección, si se desprenden disminuyen la permeabilidad del acuífero; además el aire arrastrado produce un aumento de la corrosividad del agua y crea un ambiente oxidante que puede ocasionar precipitación de Fe y Mn en el acuífero. Si existe un importante arrastre de gases, se produce una reducción de la carga de inyección al bajar la densidad del fluido inyectado.

En general se procura que en el sistema de inyección no existan tramos o lugares en donde se pueda producir succión de aire, si es preciso se intercala un desaireador.

Los sólidos en suspensión son un principal origen de colmatación, ya que son retenidos por el terreno en las proximidades del pozo, en especial si se trata de un medio poroso. Basta 1 ppm de sólidos en suspensión para que se depositen alrededor de 300 Kg de materiales anuales en las inmediaciones de un pozo que inyecta un caudal de 100 lps, relleno más del 50% de los poros de un espesor de 20 cm de material alrededor de un pozo de 400 mm de diámetro, siendo la porosidad eficaz de 0.1 y la longitud de la zona filtrante de 100m. El agua a inyectar se debe decantar y si es preciso flocular y filtrar. Conviene eliminar las partículas de más de 25 micras de diámetro. En acuíferos kársticos se llega a inyectar con 20 ppm de sólidos en suspensión, pero en general se procura que estén por debajo de 5 ppm. En ocasiones, la colmatación es producida por arena depositada en el propio pozo y procedente del acuífero en momentos de paro de la inyección; se puede evitar con un buen desarrollo previo y la elección de una rejilla y macizo de grava adecuados y resistente a la corrosión.

La colmatación puede tener un origen orgánico, tal como bacterias, algas, mohos, larvas, etc., o es el resultado de su actividad, tal como la deposición de sulfuro de hierro originado por bacterias reductoras de sulfatos. Si tal problema existe, es preciso clorar el agua a inyectar, teniendo cuidado para que no se produzcan precipitados.

El proceso de descolmatación difiere poco de los procesos de desarrollo de pozos. En general basta el bombeo con aire comprimido o el pistoneo, ayudados con chorros de agua, polifosfatos o ácido según el tipo de colmatación, aunque se

recomienda repetir la acidificación. La colmatación producida por microorganismos debe ser tratada con cloro o hipoclorito, con o sin otros aditivos.

Se puede recuperar la capacidad (índice de inyectividad) inicial si el proceso de colmatación no ha avanzado excesivamente. No conviene realizarlos con excesiva frecuencia porque reducen el tiempo de utilización del pozo y suponen un gasto considerable. El proceso de la colmatación puede seguirse a través del índice de inyectividad.

#### 4.2.4. VIGILANCIA DE LOS POZOS DE INYECCION

La mejor forma de vigilar el comportamiento de los pozos de inyección es controlar los caudales y volúmenes inyectados, así como la presión de inyección y la existente en el anillo del fluido inerte, si este existe. En ausencia de fallas y de colmatación, el índice inyectividad debe permanecer constante:

Índice de inyectividad = caudal  $Q$  / incremento de presión en la zona filtrante ( $\Delta p$ )

El incremento de presión en la zona filtrante viene dado por:

$\Delta p =$  presión en la zona filtrante ( $p_1$ ) - presión hidrostática inicial ( $p_2$ )

siendo  $\Delta p =$  presión en cabeza ( $p_{11}$ ) + presión ejercida por la columna del líquido ( $p_{12}$ ) - caída de presión en la circulación por el tubo ( $p_{13}$ ).

El valor  $p_2$  va creciendo con el tiempo en un acuífero perfectamente cautivo, por razones puramente hidrodinámicas. También puede crecer si el líquido inyectado es más denso que el que existe naturalmente en la formación, a medida que ésta se va llenando. Puede suceder al contrario si aquel es más ligero.

Una disminución progresiva del índice de inyectividad, a un ritmo mayor que el que corresponde a la formación del cono de inyección, indica colmatación. Un incremento brusco en el índice indica fracturación hidráulica o ruptura de algún elemento del pozo. Los cambios de presión en el fluido inerte tienen un significado similar, y en caso de utilizar agua con aditivos, es útil controlar su composición.

Conviene controlar los niveles de calidad del agua de pozos y manantiales próximos, en especial en los acuíferos de agua dulce superiores y los situados en los posibles afloramientos del nivel de inyección. Los aumentos de salinidad o el desplazamiento de aguas naturales de mala calidad pueden obligar a abandonar el

pozo de inyección. El incremento de nivel en los acuíferos de agua dulce superpuestos indica una recarga proveniente del nivel de inyección y señala un peligro de contaminación.

La construcción de pozos de observación para seguir el avance del frente de inyección es en general de dudosa utilidad práctica, y en acuíferos con fuerte flujo natural o permeabilidad muy anisotropa los resultados son de difícil interpretación. Además, su costo es muy elevado y con frecuencia prohibitivo. Es más razonable y útil el establecimiento de piezómetros en los niveles de agua dulce y en los posibles afloramientos del nivel de inyección. En todo caso deben seguirse las normas y exigencias que imponga la licencia de explotación por parte del organismo competente.

#### 4.2.6. RECOMENDACIONES FINALES

Es importante, a la hora de dimensionar el filtro y el macizo de gravas, tener en cuenta que el flujo seguirá el camino inverso que un pozo de bombeo, aunque es corriente en muchos casos la recarga y el bombeo alternativamente. El bombeo se hace algunas veces solo para limpiar de lodo las inmediaciones del pozo y el macizo de gravas, pero también es frecuente su uso para extracción de agua en determinadas épocas (pozo de doble uso o dual).

Lo anterior hace que muchos pozos de recarga tengan instaladas bombas para extracción, en cuyo caso la inyección se realiza a través algunas veces de la bomba y de la misma conducción utilizada para el bombeo; ello da lugar a unas pérdidas de carga adicionales que impiden que el rendimiento de la inyección sea el mismo que el del bombeo en el mismo pozo.

Para evitar las pérdidas a través de las bombas se puede utilizar un cabezal de inyección con un by-pass, que permite inyectar a través del conducto de bombeo y entre la bomba y las paredes del pozo, o una tubería especialmente dispuesta, además de poder alternar el bombeo y la inyección, sin perder tiempo en el cambio. Esta condición es importante si el agua que se utiliza es algo turbia y es necesario hacer la limpieza del pozo de recarga con cierta frecuencia; cuando el agua de recarga es de buena calidad y la descolmatación se hace unas pocas veces al año el problema carece de importancia.

Otros efectos que colaboran al fenómeno de disminución del rendimiento son: el aire arrastrado por la entrada de agua, la colmatación progresiva y para grandes velocidades de infiltración, el flujo no de Darcy y turbulento a través del macizo de gravas, puesto que en caso de inyección el régimen turbulento del descenso tiende a mantenerse inicialmente, produciéndose una pérdida de carga mayor que en el caso del

bombeo en el que el cambio se hace de laminar a turbulento; no obstante, en general este último efecto suele tener poca importancia en cuanto a crear condiciones distintas en el bombeo y en la recarga para un mismo caudal.

El efecto de entrada de aire durante la inyección es un problema que conviene evitar. Además de la disminución de la permeabilidad a causa del aire que va llenando los poros del terreno, éste se va acumulando bajo los niveles impermeables o poco permeables a la presión que corresponde a las condiciones de inyección; al cesar ésta se puede liberar y salir bruscamente, arrastrando agua del propio pozo, de forma explosiva si la columna de agua es insuficiente para amortiguar el efecto.

La caída libre del agua en el pozo debe evitarse prolongando la conducción por debajo del nivel freático del acuífero y también evitando que el agua arrastre aire en las conducciones.

En los acuíferos libres en materiales sueltos es preciso tomar precauciones para evitar posibles asentamientos de terreno en las proximidades del pozo de recarga, en especial si durante el desarrollo (o durante el bombeo si el pozo es de uso doble) se ha extraído mucha arena; dicha compactación puede ser brusca y cuando se produce, en general coincide con el cese de la recarga.

En los pozos que inyectan agua a presión en acuíferos cautivos, debe cementarse bien el pozo hasta la superficie para evitar que el agua recargada se escape al exterior entre la pared del pozo y la entubación. En los acuíferos libres, la posibilidad de inyectar agua a presión viene limitada por la necesidad de que el cono de inyección no alcance la superficie del terreno; para salvar el escape del agua por la sobre-elevación de inyección junto al pozo, conviene disponer de una solera de hormigón bien cimentada.

En general, los pozos de inyección lo hacen en un único nivel o tramo de un acuífero, estando separados de los otros niveles acuíferos por cementaciones apropiadas.

## CONCLUSIONES.

LA PENINSULA DE YUCATAN ES UNA REGION GEOLOGICA CONSTITUIDA POR ROCAS DE ORIGEN MARINO, QUE POR UNA PARTE OFRECEN GRAN RESISTENCIA A LA EXCAVACION Y POR OTRA PRESENTAN UNA GRAN PERMEABILIDAD SECUNDARIA.

LAS CAPAS ACUIFERAS PUEDEN DEFINIRSE COMO UNA CAPA DE AGUA DULCE DE 0 A 160 METROS DE ESPESOR, DESCANSANDO SOBRE OTRA DE ALTA SALINIDAD PRODUCTO DE LA INTRUSION DEL AGUA DEL MAR; EXISTEN ASI MISMO ZONAS CONFINADAS POR LENTES ARCILLOSOS DONDE EL AGUA ALMACENADA PRESENTA CARACTERISTICAS FISICO, QUIMICAS Y BACTERIOLOGICAS PROPIAS.

LOS FLUJOS SUBTERRANEOS TIENEN DIRECCION PREFERENCIAL CUASI HORIZONTAL.

EN PRACTICAMENTE TODAS LAS POBLACIONES DE LA PENINSULA EL MANEJO Y TRATAMIENTO DE LAS AGUAS NEGRAS ES INEXISTENTE, PROLIFERANDO EL USO DE FOSAS SEPTICAS EN LAS PRINCIPALES POBLACIONES.

DE ESTUDIOS GEOHIDROLOGICOS ANTERIORES Y EXPERIENCIAS DE POZOS DE INYECCION EN MIAMI FLORIDA Y MERIDA YUCATAN PARA AGUA RESIDUAL DOMESTICA E INDUSTRIAL RESPECTIVAMENTE, SE ESTUDIO LA ALTERNATIVA DE INFILTRAR LAS AGUAS NEGRAS DE MERIDA A PROFUNDIDADES DONDE NO PUDIERA CONTAMINAR EL ACUIFERO DE AGUA DULCE.

LOS RESULTADOS INDICARON LA POSIBILIDAD DE INYECTAR CAUDALES DEL ORDEN DE 20 LITROS POR SEGUNDO POR POZO.

SI BIEN POR LA MAGNITUD DEL CAUDAL DE AGUAS NEGRAS GENERADO POR LA CIUDAD DE MERIDA EL COSTO DE ESTA ALTERNATIVA ES MUY ALTO, PARA POBLACIONES MENORES RESULTA ATRACTIVO YA QUE SE PUEDEN MANEJAR LAS AGUAS Y MEDIANTE UN TRATAMIENTO PRIMARIO INFILTRARLAS A PROFUNDIDADES DONDE NO CONTAMINEN LA CAPA DE AGUA DULCE DEL ACUIFERO, REDUNDANDO EN UN IMPORTANTE BENEFICIO PARA LA POBLACION.

LOS POZOS DE ABSORCION ES UNA ALTERNATIVA QUE MERECE SER CONSIDERADA COMO UNA SOLUCION A LOS PROBLEMAS DE ELIMINACION DE FLUIDOS A NIVEL GENERAL, SUPEDITADO SIEMPRE A LAS CONDICIONES LOCALES QUE PREVALEZCAN, AL COSTO DE LOS SISTEMAS Y COMO ALGO DE SINGULAR IMPORTANCIA A LA NO CONTAMINACION DEL MEDIO.

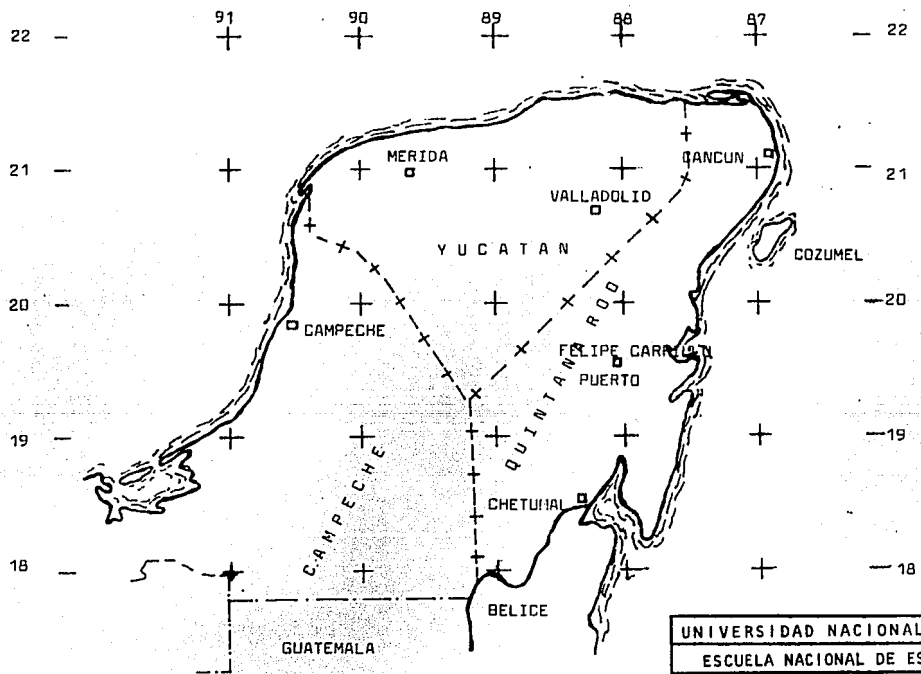
LOS POZOS DE ABSORCION SI ES UNA SOLUCION A LA ELIMINACION DE AGUAS NEGRAS EN LA PENINSULA DE YUCATAN, YA QUE SE HA DEMOSTRADO QUE ES POSIBLE LA INYECCION DE AGUA A ESTRATOS PROFUNDOS. SIN EMBARGO DEBE RECONOCERSE QUE PARA PODER AFIRMAR QUE ES LA SOLUCION OPTIMA, ES NECESARIO SE REALICE UNA MAYOR INVESTIGACION A NIVEL INSTITUCIONAL, DE DONDE PUEDAN OBTENERSE MODELOS

MATEMATICOS QUE; CALIBRADOS CON EXPERIMENTACION EN LABORATORIO Y EN PROTOTIPOS, PERMITAN PREDECIR CON MAYOR CERTIDUMBRE EL COMPORTAMIENTO HIDRAULICO DEL AGUA INYECTADA.

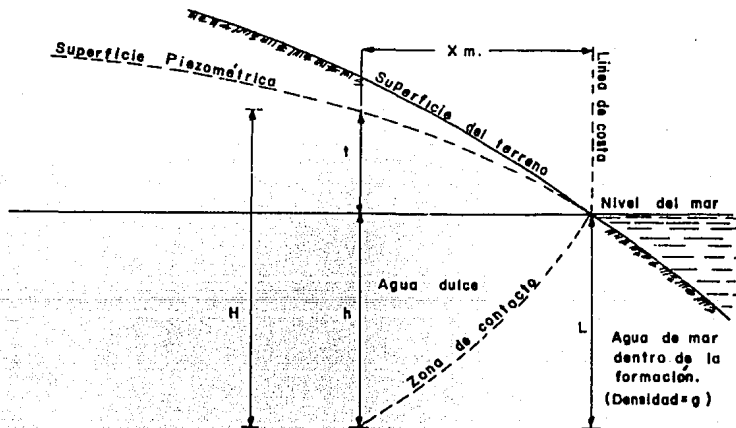
EN LA CIUDAD DE MERIDA DEBEN CONTINUARSE LA PERFORACION DE POZOS CON EL FIN DE PODER REALIZAR PRUEBAS DE BOMBEO DE MAYOR DURACION CON DIFERENCIALES DE PRESION TAMBIEN MAS ALTOS. DEFINIR LOS ANGOS ESPECIFICOS DE FRACTURACION HIDRAULICA DEL SUELO Y ESTIMAR MAS PRECISAMENTE LOS CAUDALES PROBABLES DE INYECCION SI ES QUE SE QUIERE CONTINUAR CON ESTE PROYECTO.







UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES		
CROQUIS DE LOCALIZACION		
Esc:	Fig. No.1	Fecha: SEP/87
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS.		



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

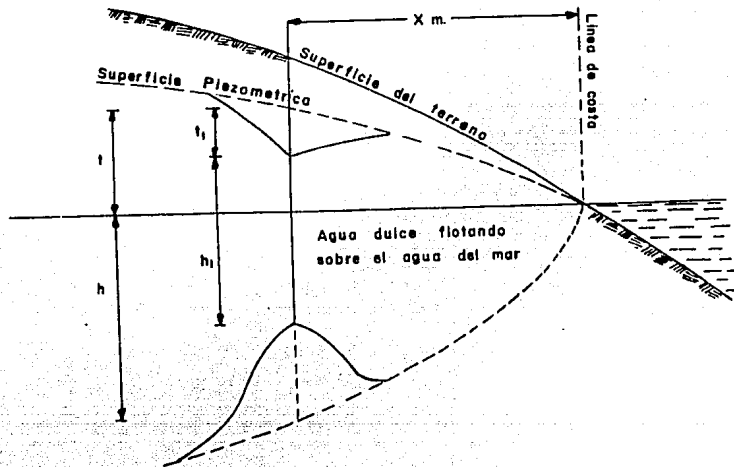
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



ESQUEMATIZACION DEL PRINCIPIO  
DE LAS LENTES CONVERGENTES

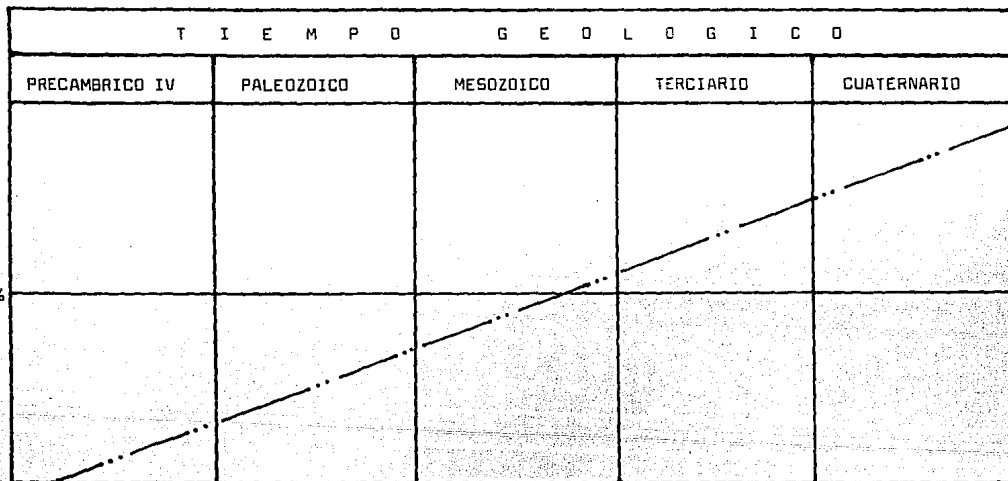
Esc: Fig. No. 2 Fecha: SEP/87

Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES		
	INTRUSION SALINA	
	Esc:	Fig. No. 3
	Fecha: SEP/87	
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS		

PORCENTAJE EN LA LITOSFERA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



DISTRIBUCION DE LAS CALIZAS EN EL TIEMPO GEOLOGICO.

Esc: Fig. No.4 Fecha:SEP/87  
 Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS.

LINEAS DE EVOLUCION GEOLOGICA

P R E V A L E C I E N D O

CALIZA

$CO_3Mg$

CALIZA DOLOMITICA

DOLOMIA

ARCILLA

CALIZA MARGOSA

MARGA

CUARZO

CALCARENITAS

ARENISCA

$SiO_2$

CALIZAS CON NODULOS DE SILEX

FIANITAS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

4 LINEAS DE EVOLUCION LITOLÓGICA DE LAS CALIZAS.



Esc:

Fig.No.5

Fecha:SEP/87

Dibujó JUAN VELAZQUEZ ARCOS

TAMAÑO GRANO	DETRITICAS	POROSIDAD	QUIMICAS (EVAPORITICA)	ORGANISMOS	ORGANOGENAS
GRUESO	CONGLOMERADO POLIGENICO CONGLOMERADO CALCAREO PUDINGA BRENCHA	ROCOSAS	TRAVERTINOS TOBAS CALIZAS TOBACEAS	MACRO-ORGANISMOS	KLINTITA LUMAQUELAS CALIZAS DE ALGAS CALIZAS DE FUCOIDES
MEDIO	CALCARENITA MOLASA	POCO ROCOSAS	ESTALAGMITAS	MICRO-ORGANISMOS	CALIZAS NUMOLITICAS CALIZA ORBITOLINICA CALIZA FUSOLINICA
FINO	CALIZA LITOGRAFICA	COM-PACTO	CALIZA COMPACTA CORTEZA	MICRO-ORGANISMOS	CALIZA DE MICRO-FORAMINIFEROS

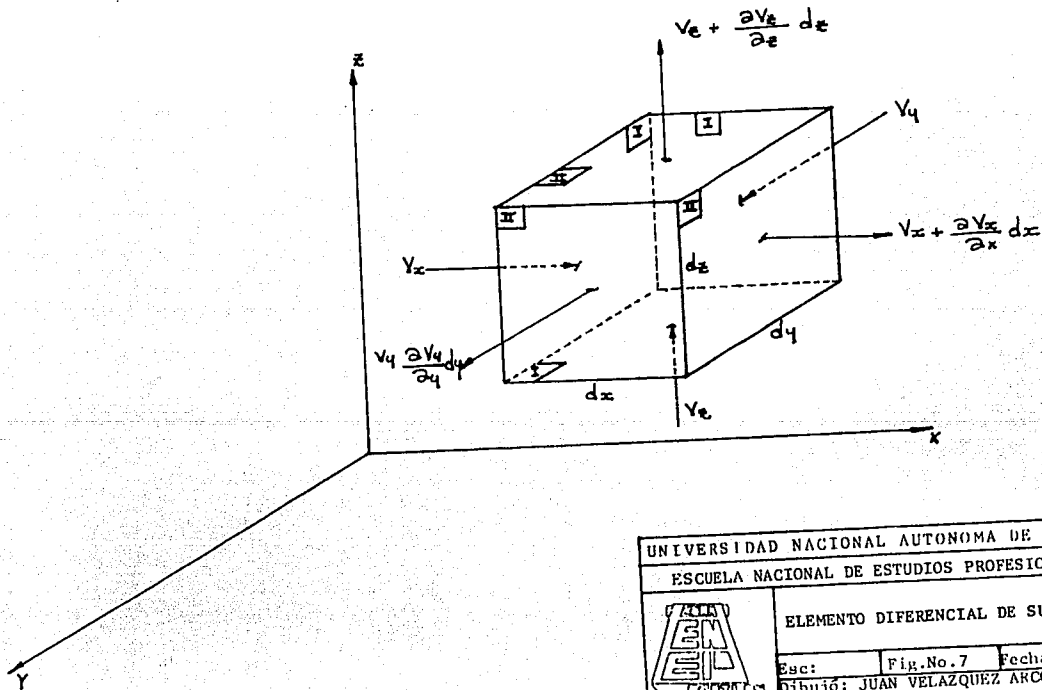
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



TIPOS ESTRUCTURALES DE CALIZAS

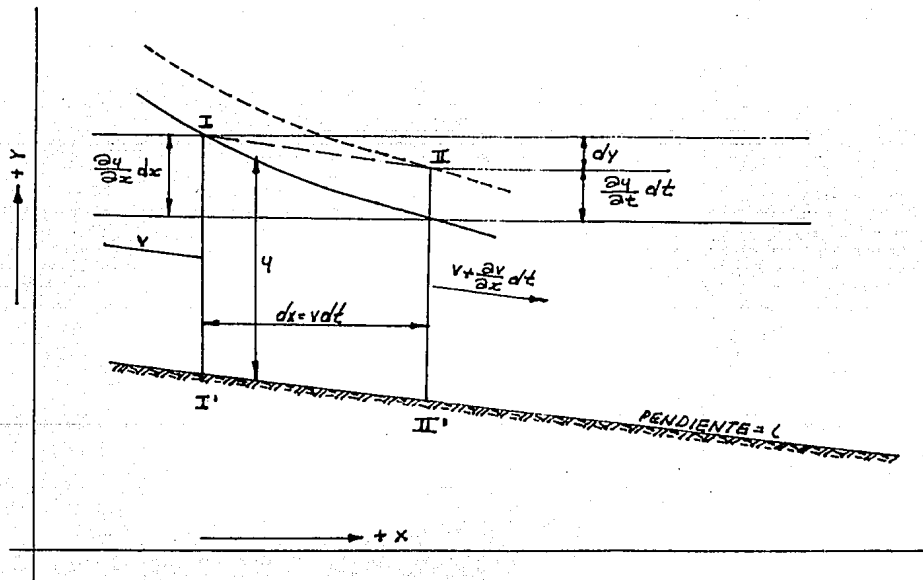
Esc: Fig. No. 6 Fecha: SEP/87

Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS.

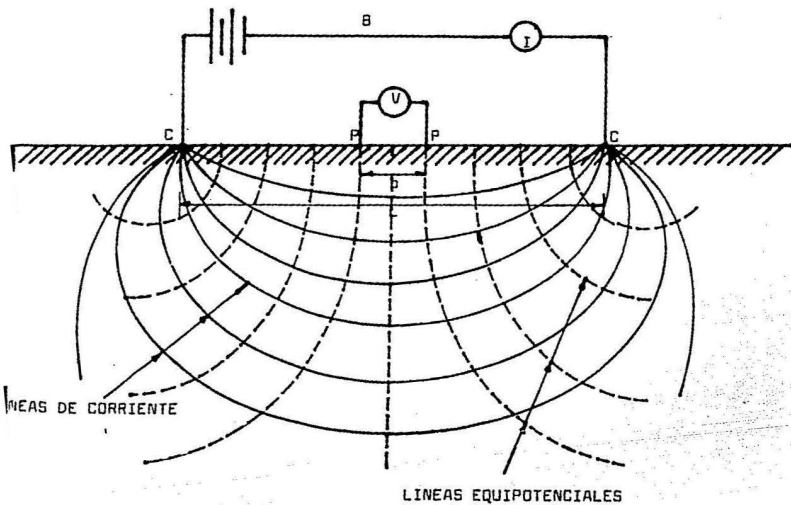
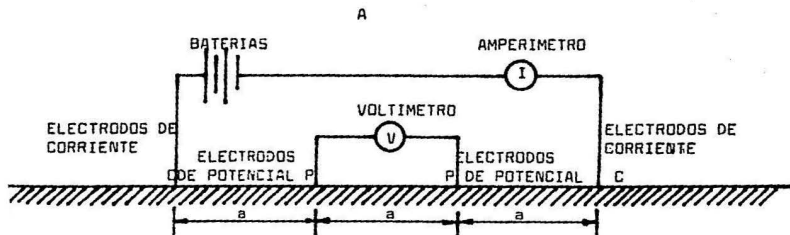


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES		
ELEMENTO DIFERENCIAL DE SUELO		
Esc:	Fig.No. 7	Fecha: SEP/87
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS.		





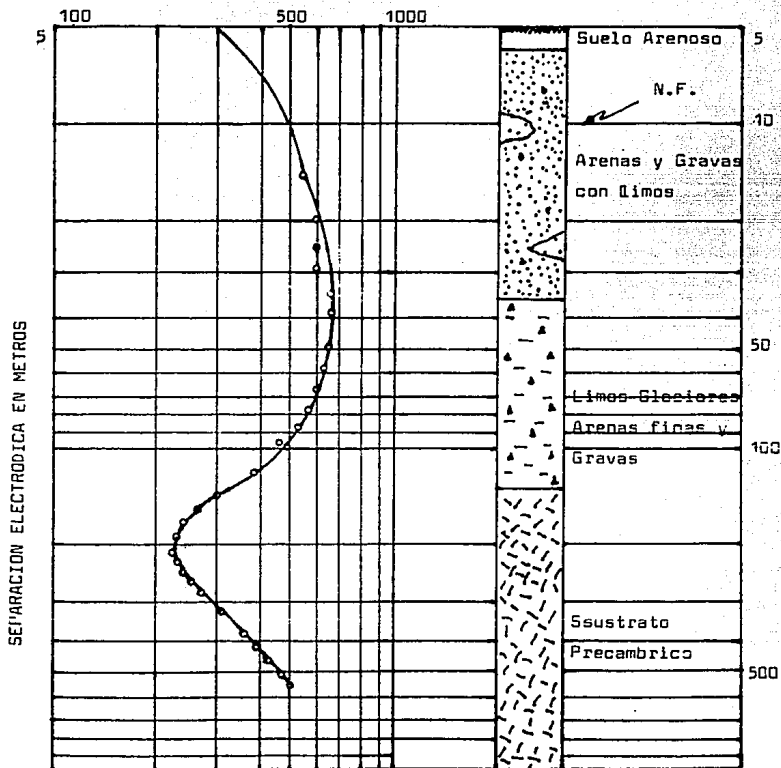
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES		
PRISMA DE AGUA SUBTERRANEA EN FLUJO NO ESTABLECIDO		
Esc:	Fig. No.8	Fecha:SEP/87
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS.		



CONFIGURACION WENNER  
 CONFIGURACION SCHLUMBERGER

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES		
DISPOSICION COMUN DE LOS ELECTRODOS.		
Esc:	Fig. No. 9	Fecha: SEP/87
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS		

RESISTIVIDADES APARENTES EN FUNCION  
DE LA SEPARACION ELECTRODICA.



RESISTIVIDAD APARENTE

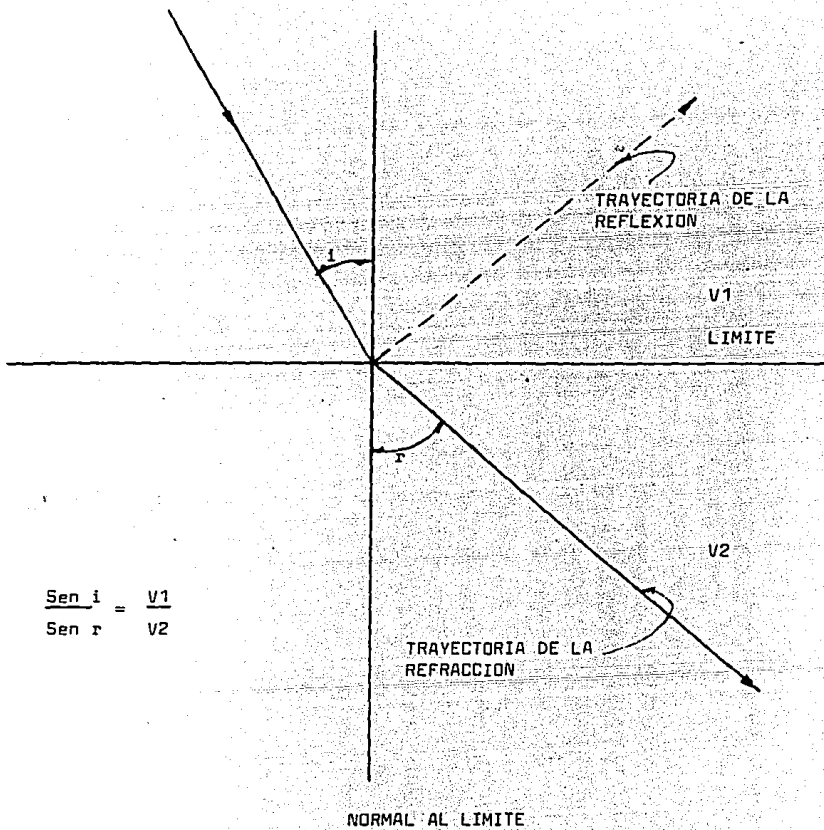
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



METODO DE LOS SONDEOS  
ELECTRICOS VERTICALES

Esc: Fig. No. 10 Fecha: SEP/87  
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS



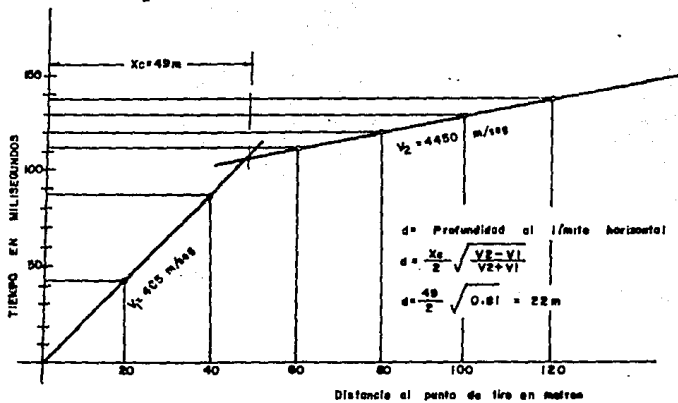
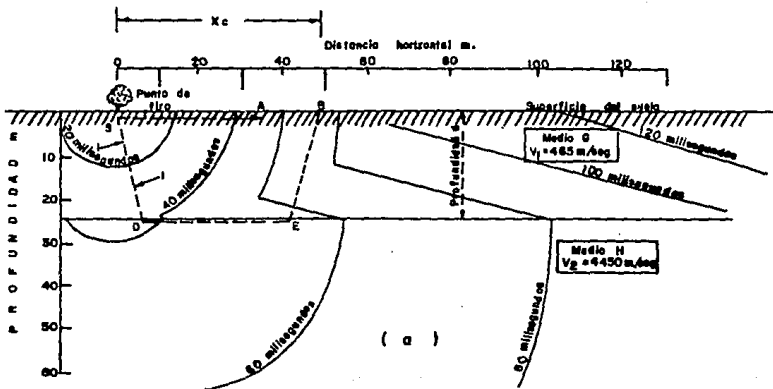
$$\frac{\text{Sen } i}{\text{Sen } r} = \frac{V1}{V2}$$

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



METODO SIMICO DE REFLEXION

Esc: Fig. No.11 Fecha:SEP/87  
 Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS



( b )

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

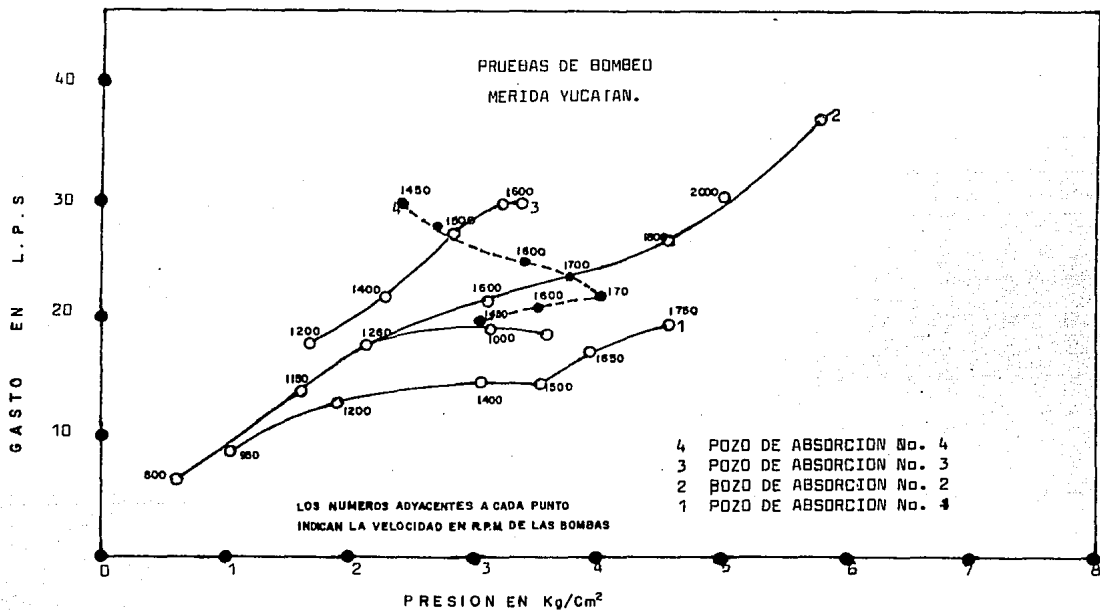
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES




FRENTES DE ENERGIA Y DROMOCRONICA

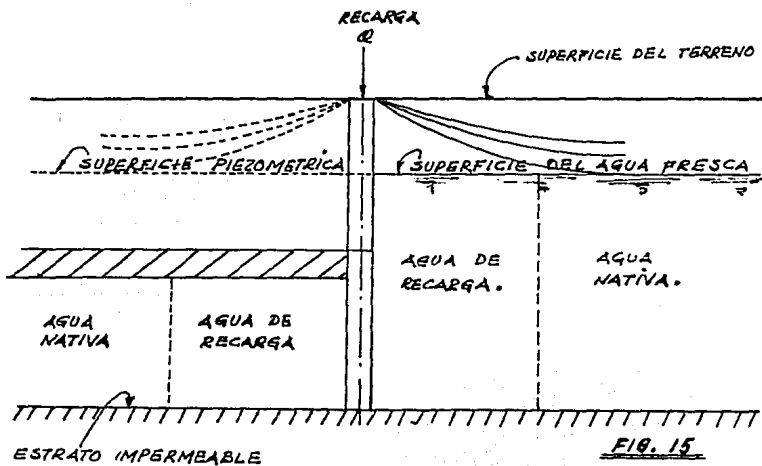
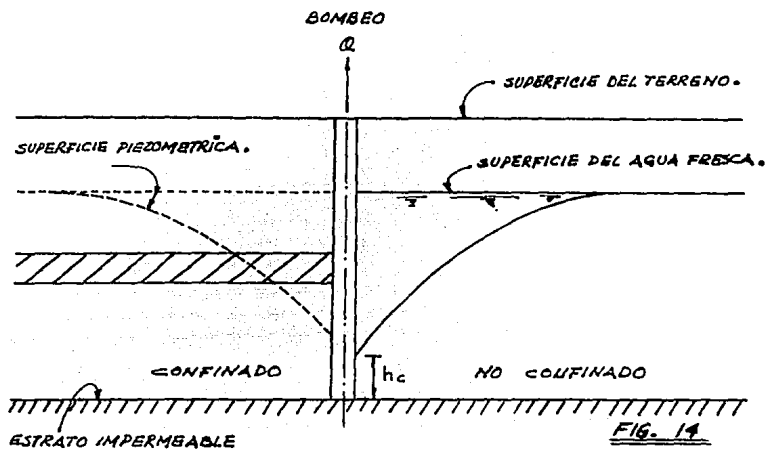
Esc: Fig. No. 12 Fecha: SEP/87

Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS



- 4 POZO DE ABSORCION No. 4
- 3 POZO DE ABSORCION No. 3
- 2 POZO DE ABSORCION No. 2
- 1 POZO DE ABSORCION No. 4

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES		
	INYECCION DE AGUA DULCE EN POZOS	
Esc:	Fig. No.13	Fecha:SEP/87
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS		

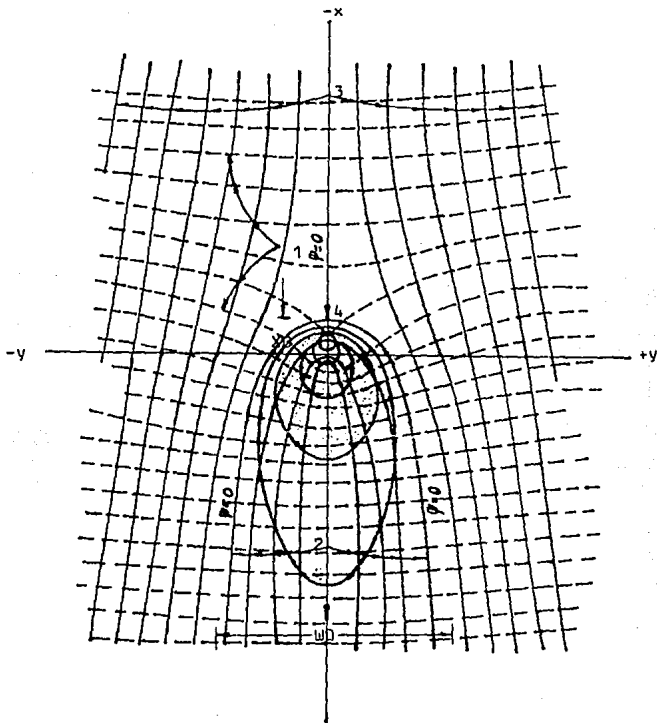


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



POZOS DE BOMBEO E INYECCION  
 GRAFICA COMPARATIVA

Esc: \_\_\_\_\_ Fig. No 14 y 15 Fecha: SEP/87  
 Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS



- 1 LINEAS QUIPOTENCIALES
- 2 LINEAS DE CORRIENTE PARA  $a$
- 3 LINEAS DE CORRIENTE PARA  $Ka0i$
- 4 PUNTO DE ESTANCAMIENTO

$$X0 = -h0' / \pi \quad (32)$$

$$2h0 = q0 / Ka0i \quad (33)$$

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

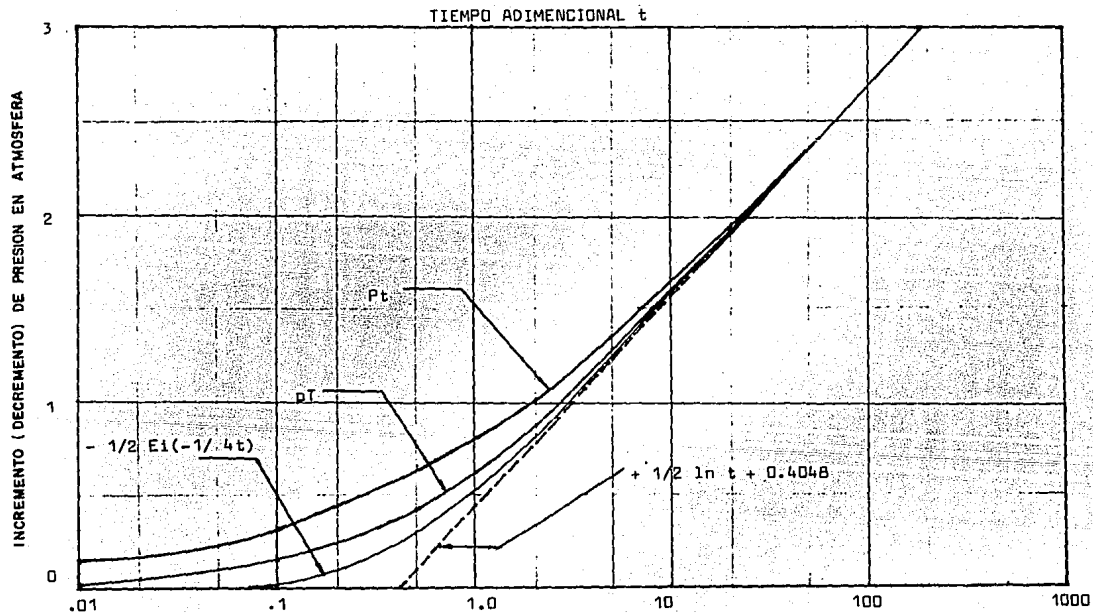
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



FLUJO NETO (METODO DE RANKINE)

Esc:	Fig. No.16	Fecha SEP/87
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS		





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

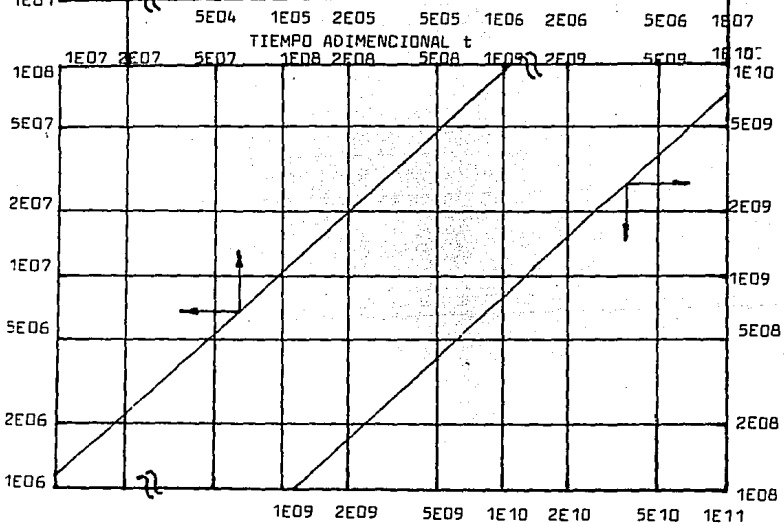
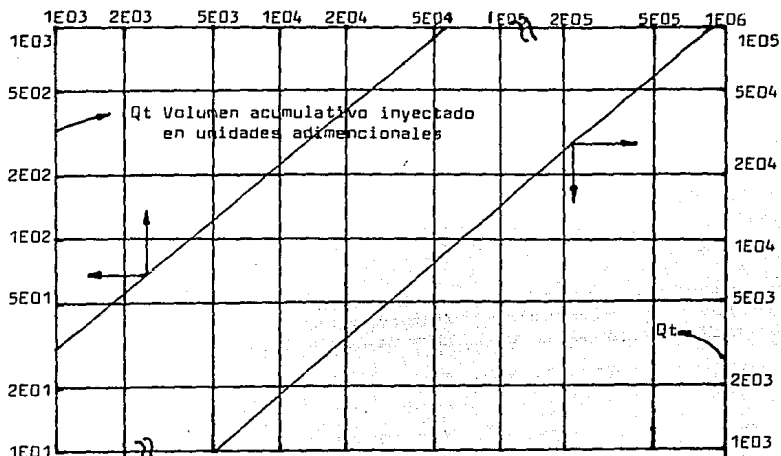
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



FUNCIONES  $P_t$  y  $P_T$

Esc: Fig. No. 17 Fecha: SEP/87

Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

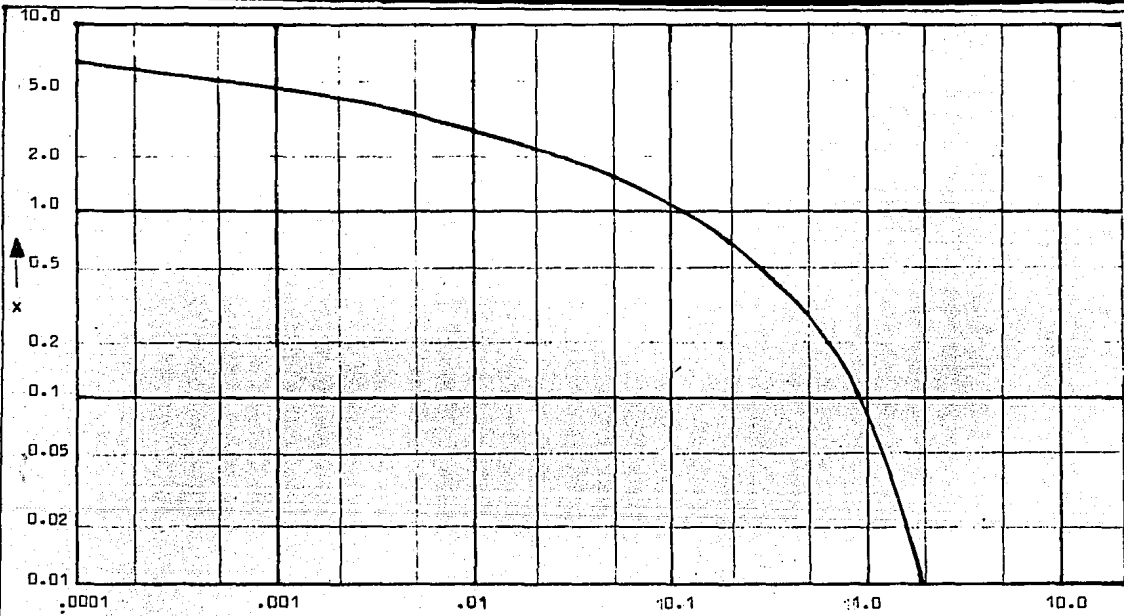
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



FUNCION  $Q_t$

Esc: Fig. No. 18 Fecha: SEP/87

Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS

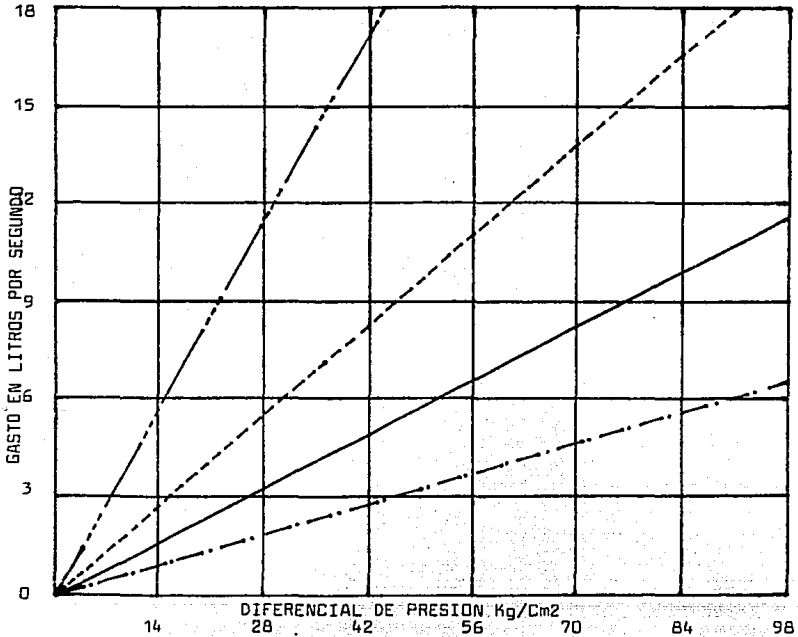


INCREMENTO (DECREMENTO) DE PRESION :  $1/2 E_i(-X)$ , en ATMOSFERAS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES		
CURVA $-1/2 E_i(-X)$		
Esc:	Fig. No.19	Fecha:SEP/87
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS		




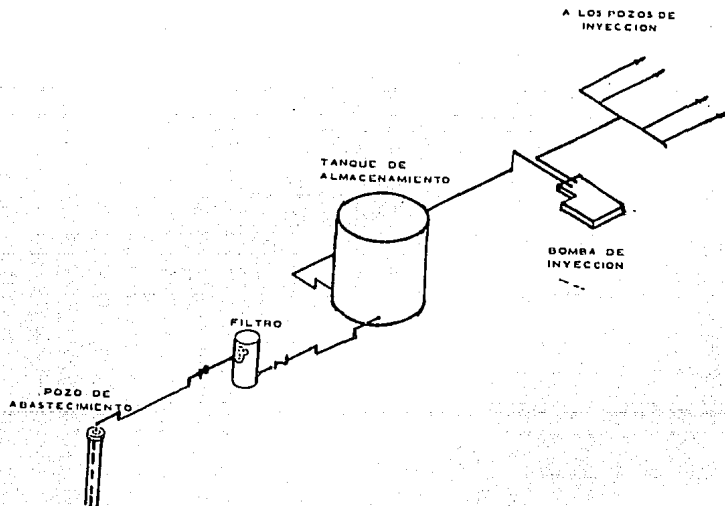
APLICACION DE LA ECUACION DE  
 QUERIO Y POWUER



- Kh = 7.30
- . - . - Kh = 6.0
- Kh = 3.0
- ..... Kh = 2.0

(Kh en Darcy's por metro)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES		
	GASTOS DE INYECCION EN FUNCION DE K x h	
Esc:	Fig. No.21	Fecha:SEP/87
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS		



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

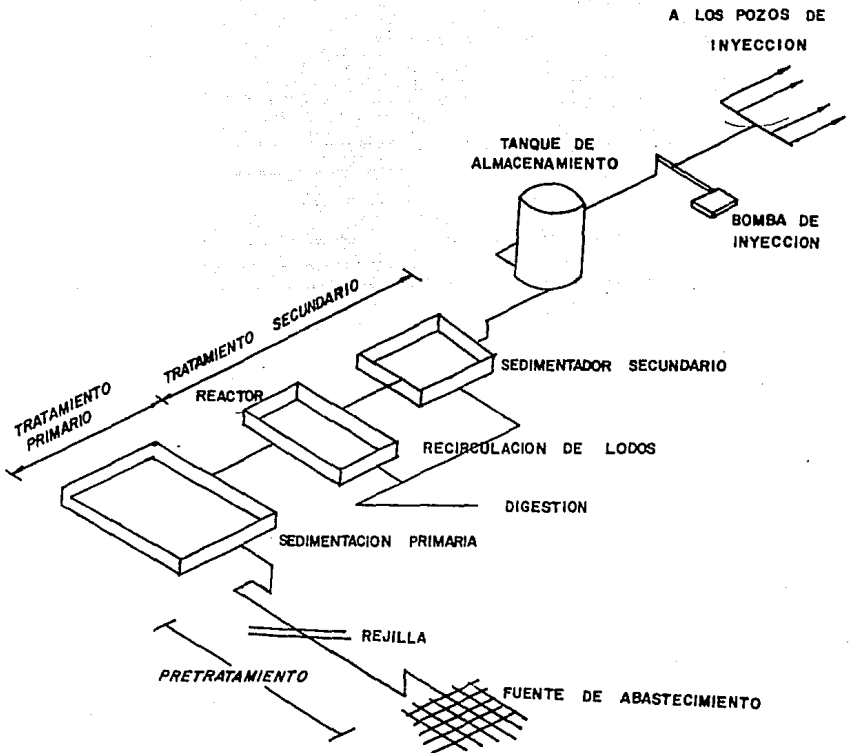
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



DIAGRAMA DE FLUJO DE  
UN SISTEMA CERRADO.

Esc: Fig. No.22 Fecha: SEP/87

Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS



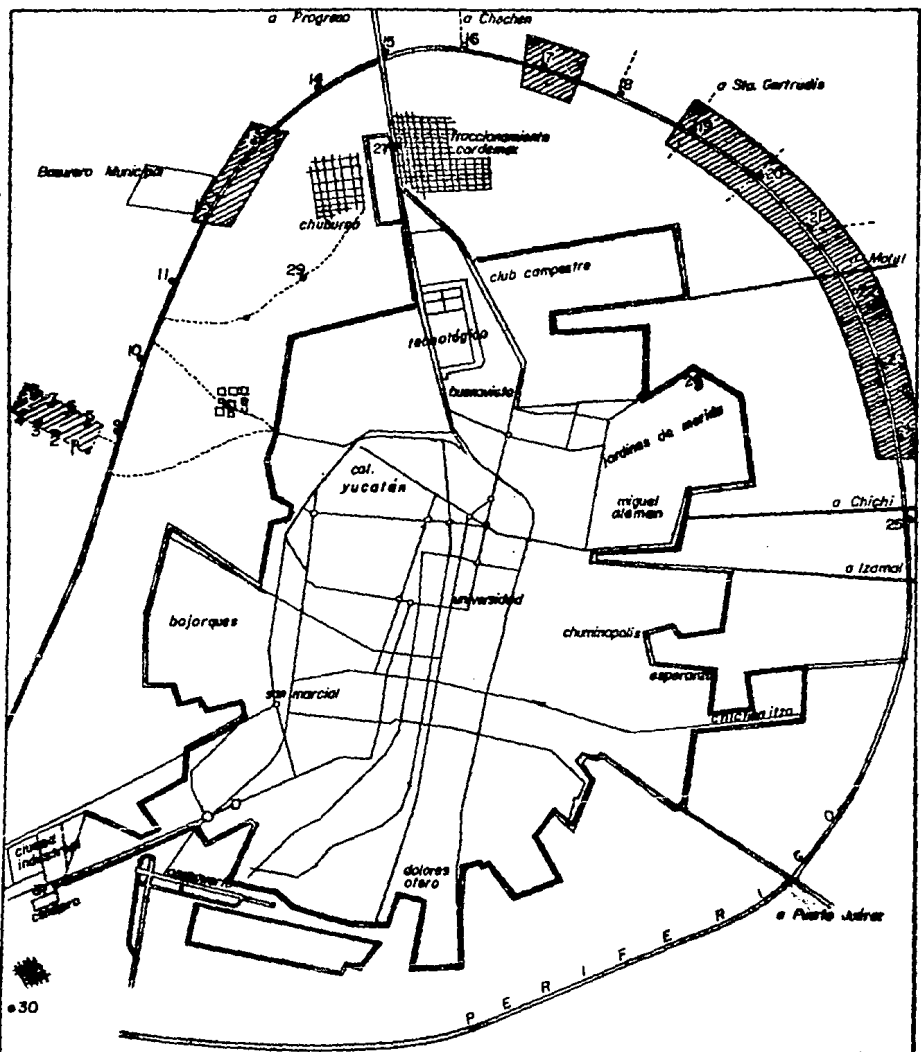
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



DIAGRAMA DE FLUJO DE UN SISTEMA ABIERTO.

Esc: Fig. No.23 Fecha:SEP/87  
 Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS



● SONDEO  
 ■ ZONA PROBABLE DE INYECCION

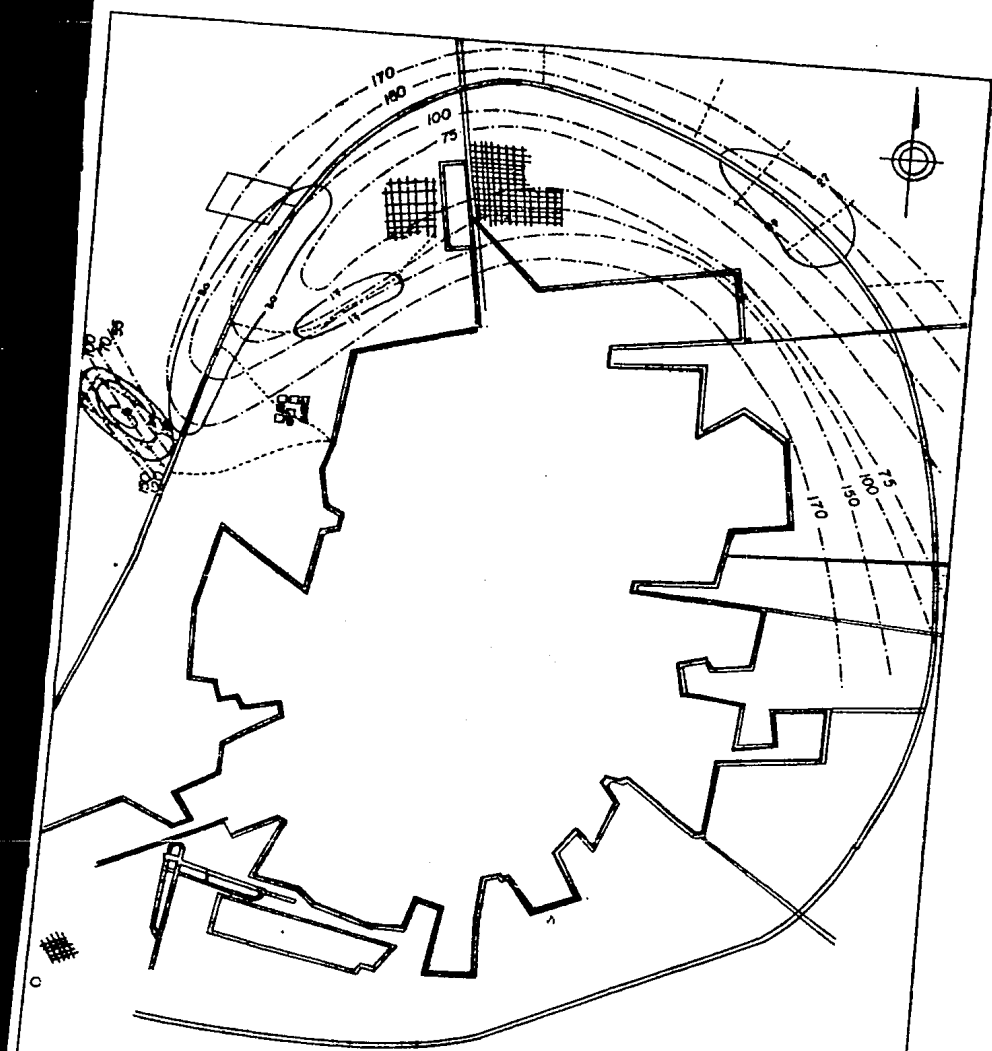
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



LOCALIZACION DE SONDEOS ELECTRICOS

Esc: Fig. No. 24 Fecha: SEP/87

Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS



75  
100  
150  
170

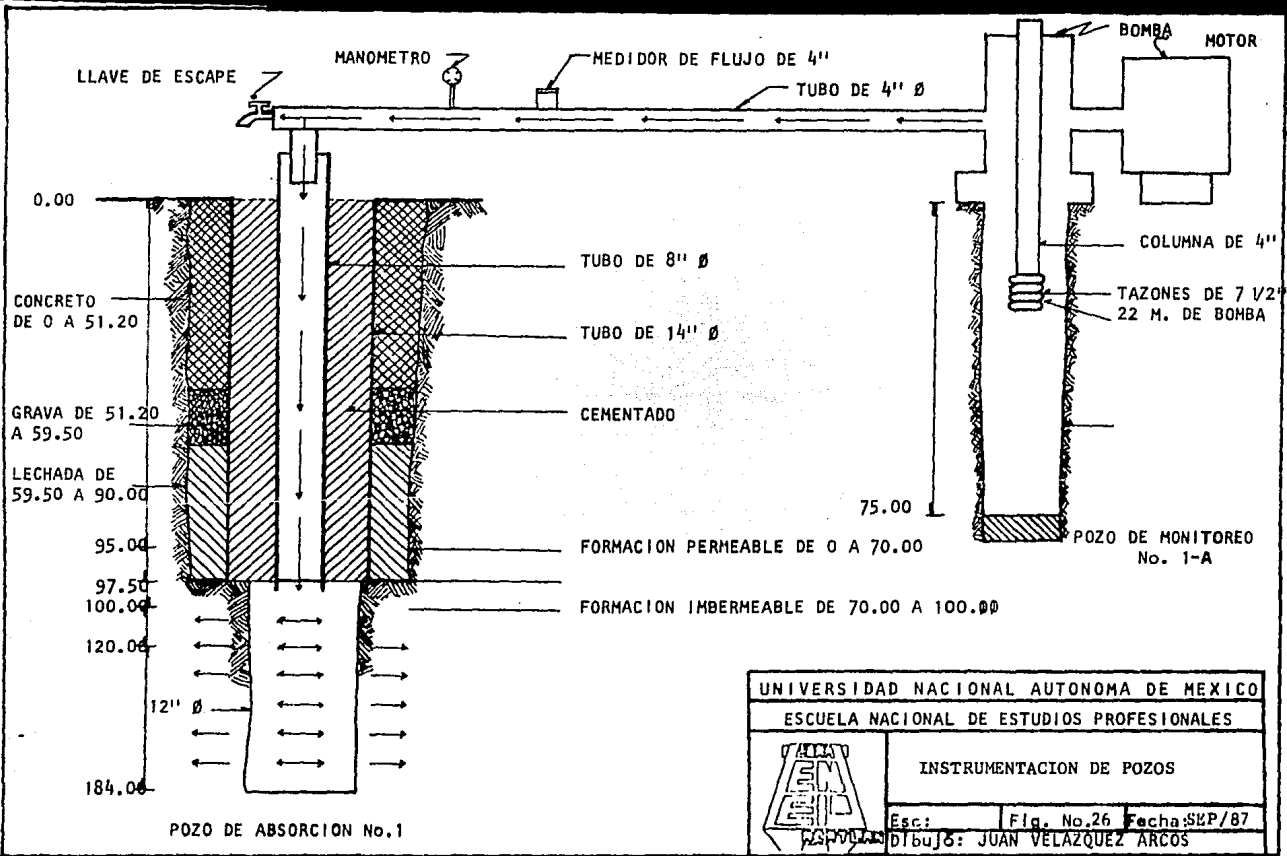
curvas de profundidades de  
zona de absorcion  
curvas de zonas confinantes

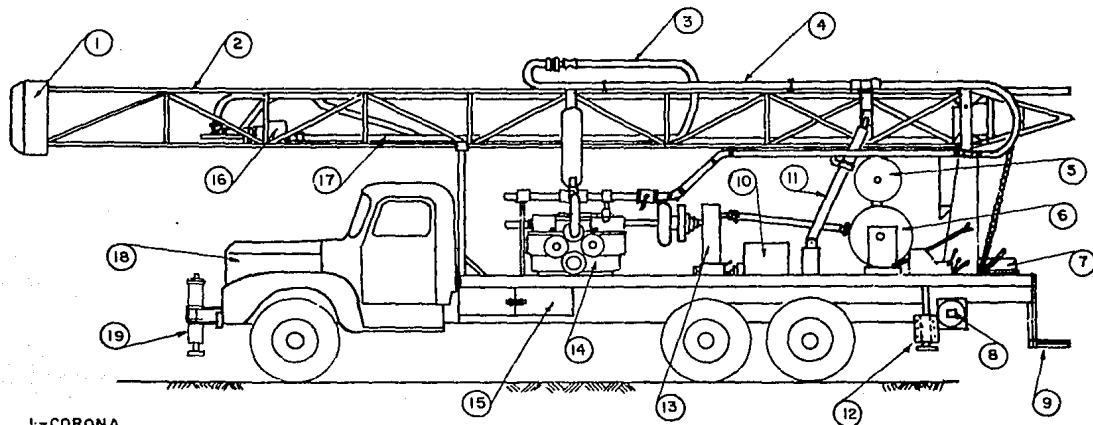
PUENTE

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES		
ZONAS DE INYECCION		
Esc:	Fig. No.25	Fecha:SEP/87
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS		









1-CORONA

2-MASTIL

3-MANGUERA DE PRESION

4-STAND PIPE

5-TAMBOR DE CUCHAREO

6-TAMBOR DE PERFORACION

7-MESA ROTARIA

8-PULLDOWN

9-PLATAFORMA

10-TRANSMISION HIDRAULICA

11-CILINDROS HIDRAULICOS

12 Y 19-GATOS NIVELADORES

13-CAJA DE TRANSMISION

14-BOMBA DE LODOS

15-CAJA DE HERRAMIENTAS

16--SWIVEL

17- KELLY

18-UNIDAD DE POTENCIA

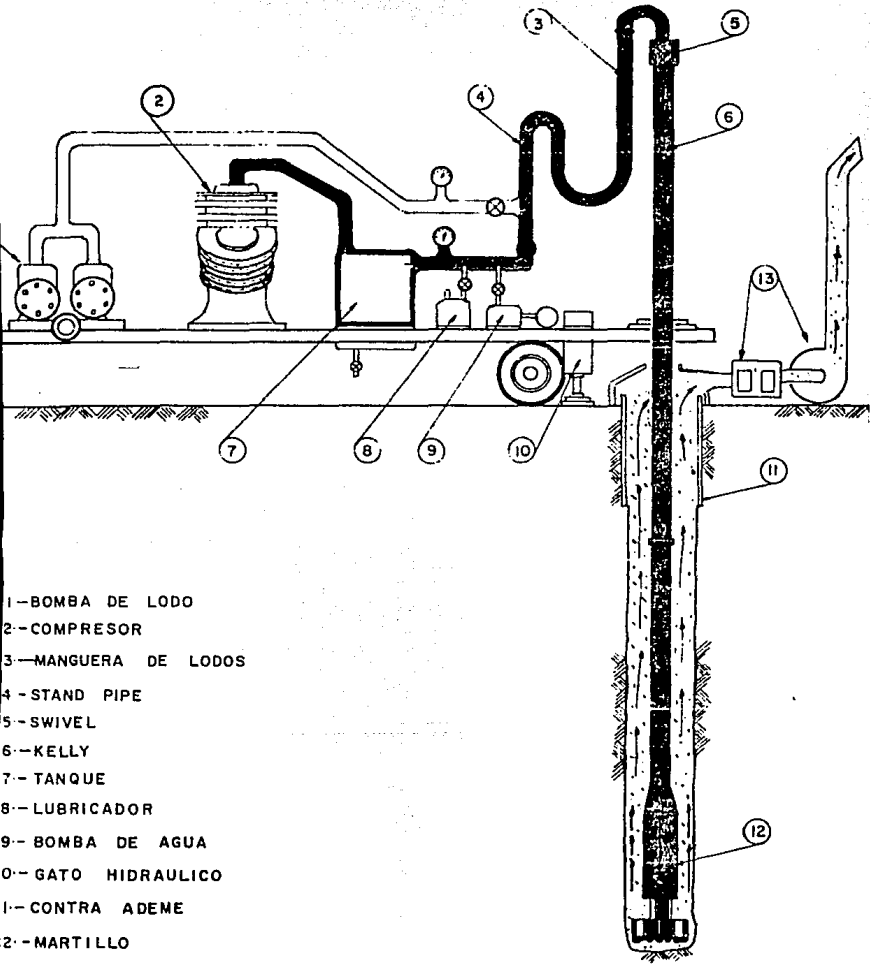
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

EQUIPO AUTOTRANSPORTADO

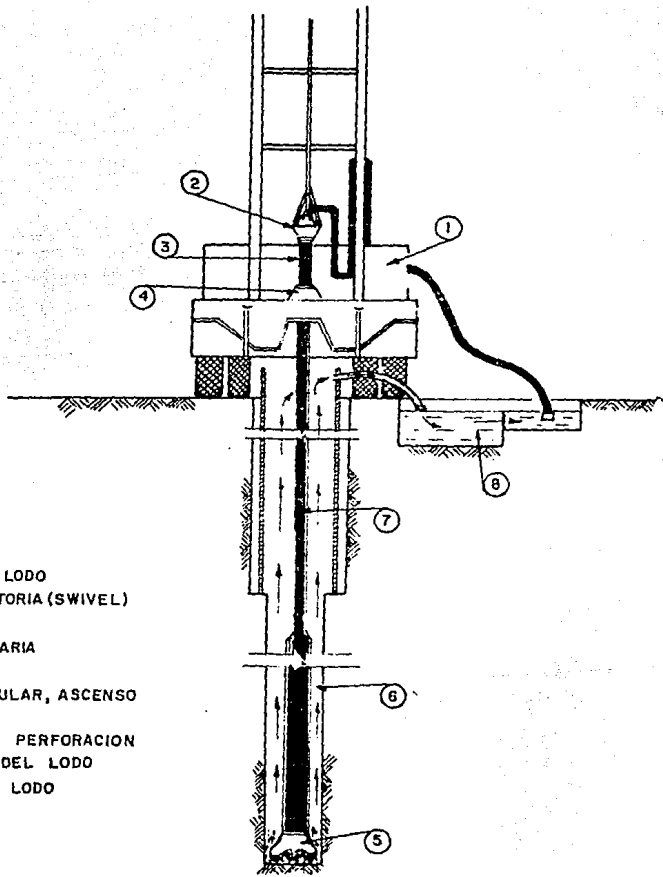
Esc: Fig. No. 27 Fecha:

Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS



- 1-BOMBA DE LODO
- 2-COMPRESOR
- 3-MANGUERA DE LODOS
- 4-STAND PIPE
- 5-SWIVEL
- 6-KELLY
- 7-TANQUE
- 8-LUBRICADOR
- 9-BOMBA DE AGUA
- 10-GATO HIDRAULICO
- 11-CONTRA ADEME
- 12-MARTILLO
- 13-COLECTOR DE POLVOS

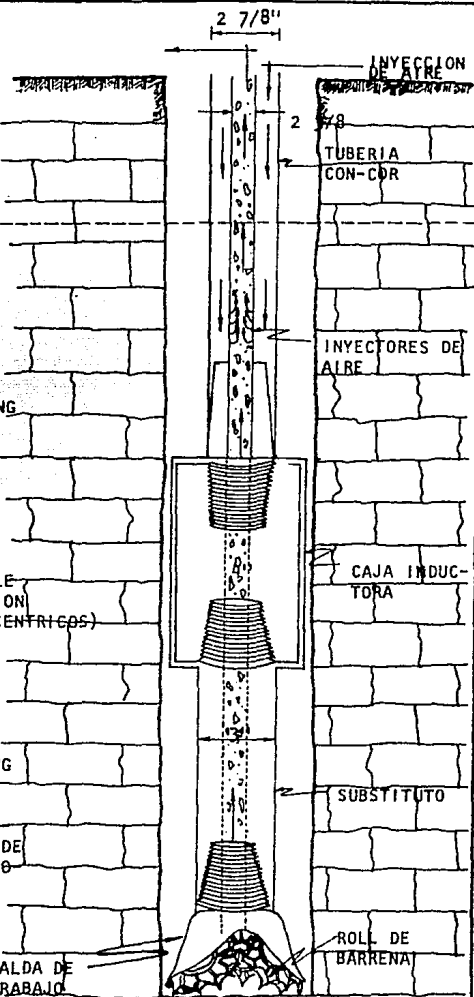
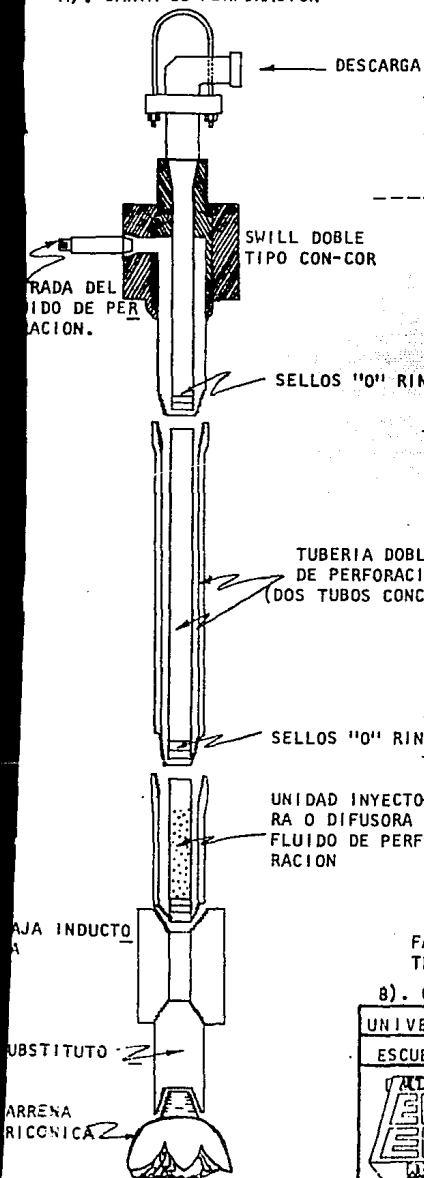
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES		
ESQUEMA DE UN EQUIPO ROTATORIO NEUMATICO.		
Esc:	Fig. No. 28	Fecha: SEP/87
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS		



- 1--BOMBA DE LODO
- 2--UNION GIRATORIA (SWIVEL)
- 3--KELLY
- 4--MESA ROTARIA
- 5--BARRENA
- 6--ESPACIO ANULAR, ASCENSO DEL LODO
- 7--TUBERIA DE PERFORACION DESCENSO DEL LODO
- 8--FOSAS DE LODO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES		
	SISTEMA DE LODOS	
	EQUIPO ROTATORIO CONVENCIONAL	
	Esc:	Fig. No. 29
Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS		

A). SARTA DE PERFORACION



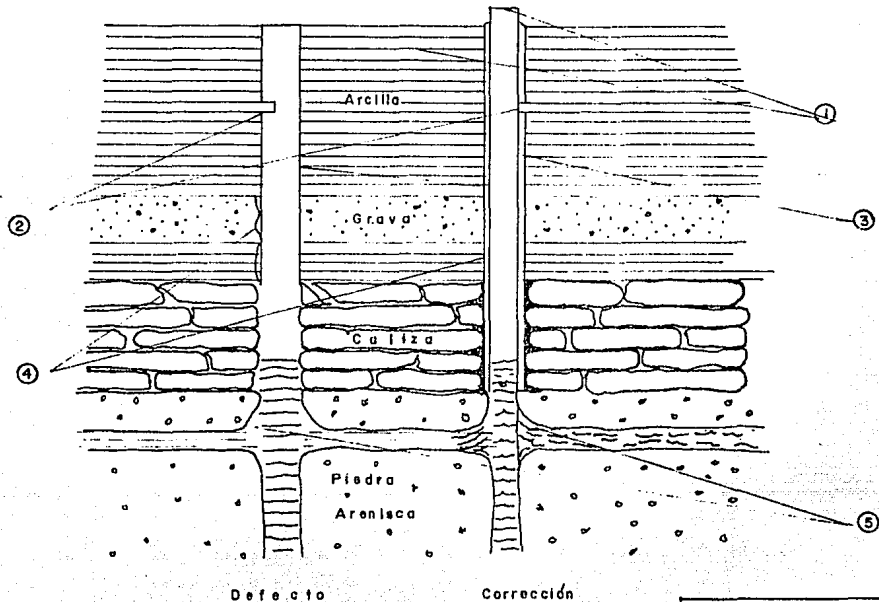
B). OBTENCION DEL RECORTE Y AGUA DEL ACUIFERO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



CIRCULACION CONFINADA INVERSA

Esc: Fig. No. 30 Fecha: SEP/87  
 Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES



CEMENTACION

Esc:                      Fig. No.31                      Fecha:SEP/87

Dibujó: JUAN VELAZQUEZ ARCOS.

#### REFERENCIAS

1. Irigoyen Renan BAJO EL SIGNO DEL CHAAC Zamma 1970.
2. Lesser I. J. M. ESTUDIO HIDROGEOLOGICO E HIDROGEOQUIMICO DE LA PENINSULA DE YUCATAN S.A.R.H. Proyecto CCONACYT NSF-704.
3. Lesser I. J. M. POZOS DE INYECCION LA POSIBLE SOLUCION A LA ELIMINACION DE AGUAS NEGRAS EN LA PENINSULA DE YUCATAN. Boletín de divulgación técnica No. 8. S.R.H.
4. Francisco Illescas Pascal ESTUDIO FISICO-QUIMICO DE LAS AGUAS DE YUCATAN Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, México, 1950.
5. D.G.U.A.P.C. LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE MERIDA YUCATAN. Boletín de divulgación técnica No. 8. Secretaría de Recursos Hidráulicos 1975.
6. D.G.U.A.P.C. MECANISMOS DE CONTAMINACION DE AGUA SUBTERRANEA. Secretaría de Recursos Hidráulicos 1974.
7. Gehm Bregman HANDBOOK OF WATER RESOURCES AND POLLUTION CONTROL.
8. Marino M. A. DISTRIBUTION OF CONTAMINANTS IN POROUS MEDIA FLOW. Water Resources Research, Vol. 20 Octubre 1974.
9. Noel Llopis Liado FUNDAMENTOS DE HIDROGEOLOGIA CARSTICA.
10. Muskat M. THE FLOW OF HOMOGENEOUS FLUIDS THROUGH POROUS MEDIA. Mc. Graw Hill Book Co. 1962.
11. Baumann, P. TECHNICAL DEVELOPMENT IN GROUND WATER RECHARGE.
12. Warner D. L. REGULATORY ASPECTS OF LIQUID WASTE INJECTION INTO SALINE ACUIFERS. Water Resources Research Vol. 6 Octubre 1970.

Jaime A. Tinajero Gonzalez. ASPECTOS FUNDAMENTALES EN EL ESTUDIO DEL AGUA SUBTERRANEA. Curso Intensivo Universidad de Sonora México. 1981.

Dobrin M. B. INTRODUCTION TO GEOPHYSICAL PROSPECTING. Mc. Graw Hill Book Co. London 1952.

Bruckshaw, J. Mc.G. THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO GEOLOGY. Proc. Geol. Assoc., Vol. 59 (1948).

Adinoff, J. DISPOSAL DE ORGANIC CHEMICAL WASTES TO UNDERGROUND FORMATIONS. Waste conf. proc., Purdue, 1954. Purdue University Exterior Service No. 87.

Howard G. C. HIDRAULIC FRACTURING. Cor., Fast., Society of Petroleum Engineer of AIME 1970.

Rusel D. G. PRESSURE BUILDUP AND FLOW TEST IN WELLS. Society of Petroleum Engineers of AIME 1967.

A.A.P.G. SUBSURFACE DISPOSAL IN GEOLOGIC BASINS A STUDY OF RESERVOIR STRATA. American Association of Petroleum Geologist. Tulsa Oklahoma, U.S.A. 1968.

Baumann, P. BASINS RECHARGE IN GROUND WATER DEVELOPMENT. A symposium. Transactions of American Society of Civil Engineers. Vol. 122 1957.

Baumann P. THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF WELL RECHARGE. Transactions of American Society of Civil Engineers. Vol. 128 part I 1963.

Vargas Alcantara Vicente. TECNICAS Y ANALISIS DE COSTOS DE POZOS PROFUNDOS Y AGUAS SUBTERRANEAS. Editorial Limusa 1976.

Toodol D. K. WATER WELLS AND INJECTION WELLS. The Water Enciclopedia. Water Information Center. Port Washington New York 1970.

David Keith Todd. GROUND WATER HIDROLOGY Mc. Graw Hill Book Co. 1962.



25. Richter R. C. ARTIFICIAL RECHARGE OF GROUND WATER RESERVOIRS IN CALIFORNIA. Journal of Irrigation and Drainage Division 1959.
26. Badillo E. J. FLUJO DE AGUA EN SUELOS. Editorial Limusa México 1974.
27. Carlaw, H. S. CONDUCTION OF HEAT IN SOLIDS. Oxford University Press. London and New York 1947.
28. Everdingen A. F. Van and Hurst W. THE APPLICATION OF THE LAPLACE TRANSFORMATION TO FLOW PROBLEMS IN RESERVOIRS IN PETROLEUM DEVELOPMENT AND TECHNOLOGY. Institute Mining Metall Engineer Petroleum Transactions Vol. 186. 1949.
29. Everdingen Van A. F. FLUID MECHANICS OF DEEP WELL DISPOSALS. Subsurface Disposal, in Geologic Basins- A Study of Reservoirs Strata. Published by the American Association of Petroleum Geologists. Tulsa Oklahoma, USA., 1968.
30. MATHEMATICAL TABLES PROJECT. Tables of Sine, Cosine and Exponential Integrals. Federal Works Agency Works Project for the City of New York 1940.
31. Horner Williams L. POZA RICA FIELD ENGINEERING. Study for Water Inyección. Petroleos Mexicanos 1967.
32. Barraclough J. T. WASTE INJECTION INTO A DEEP LIMESTONE IN NORTHWESTERN FLORIDA. Ground Water, vol. 4 No. 1 1966.
33. S.A.H.O.P. ESTUDIO EN LA CIUDAD DE MERIDA ESTADO DE YUCATAN PARA DEFINIR LA PERMEABILIDAD DEL SUELO. Diciembre de 1981.
34. Vazquez Zúñiga J. A. REGISTROS GEOFISICOS DE POZOS. Dirección General de Programas de Infraestructura Hidráulica S.A.R.H. 1981.
35. Carreño A. de la O. GEOFISICA ELECTRICA.

36. S.S.A. LA CONTAMINACION EN MEXICO. Subsecretaria de Mejoramiento del Ambiente. México D.F., 1975.
37. Juárez V. J. LEY FEDERAL DE AGUAS: ANTECEDENTES REFORMAS Y APLICACION. Ingeniería Hidráulica en México Vol. 1. num. 2 II Epoca 1986.
38. LEGISLACION SOBRE CONTAMINACION AMBIENTAL. Ediciones Andrade México 1986.
39. Olaz P. A. REFORMAS A LA LEGISLACION FISCAL EN MATERIA DE AGUAS. Ingeniería Hidráulica en México Vol. 1. num. 2 II Epoca 1986.
40. A.S.M.E. PROPOSED STANDARS: LAND DISPOSAL OF EFLUENTS. Mayo de 1975.
41. A.P.H.A. STANDAR METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND SEWAGE. American Public Healt Asociation Washington D.C.
42. Baumann, Paul GROUND WATER MOVEMENT CONTROLLED THROUGH SPREADING. Transactions of American Society of CIVIL Engineers Vol. 122. 1957.
43. Andres Benton Cuellar FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION Curso de Perforación de Pozos para Agua. División de de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería UNAM. 1985.
44. Shryock S. H. and K. A. Slage PROBLEM RELATED TO SQUEEZE CEMENTING. Well Completions. Vol. 1 No. 5a Dallas Texas 1978 Edition.
45. Jay Lehr y Michael Campbell WATER WELL TECNOLOGY. Water Well Journal. Edición anual 1982.

## BIBLIOGRAFIA

1. Custodio Emilio Llamas. HIDROLOGIA SUBTERRANEA. Vol. I y II.
2. Jimenez Granado Rafael A. PERFORACION DE POZOS PROFUNDOS S.R.H. 1977
3. S.A.H.O.P. INFORME DEL AVANCE DE PERFORACION DE POZOS EN MERIDA YUCATAN. Informe Interno Departamento de Fuentes de Abastecimiento 1982.
4. S.E.D.U.E. EVALUACION DE LA INYECCION DE AGUA DULCE EN EL ACUIFERO SALADO PARA EL PROGRAMA DE ABSORCION DE AGUAS NEGRAS EN LA CIUDAD DE MERIDA YUCATAN. Nota Informativa. Direccion General de Agua Potable y Alcantarillado. 1983.
5. CHEMICAL CONTRAINTS OF GROUNDWATER MANAGEMENT IN THE YUCATAN PENINSULA MEXICO. Mexico City 1978.
6. Pearse A. S. Edwin P. C. THE CENOTES OF YUCATAN A ZOOLOGICAL AND HYDROGRAPHYC SURVEY. Published by Carnegie Institution of Washington. February 1936.
7. Warner Don L. DEEP WEEEL INJECTION OF LIQUID WASTE, A REVIV OF EXISTING KNOWLEDGE AND AN EVALUATION OF RESEARCH NEEDS. Cincinnati Ohio, Division Water Supply and Pollution Control, U.S. Public Health Service Pub. 999-WP-21.
8. Forrest F. Craig, Jr. ASPECTOS DE INGENIERIA DE LA INYECCION DE AGUA. Monografia Vol. III Serie Henry L. Doherty.