



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

“ACATLÁN”

“EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA
Y UN EJEMPLO DE APLICACIÓN”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
SERAFÍN GONZÁLEZ RAMÍREZ

ASESOR : DR. JOSÉ MARÍA CHÁVEZ AGUIRRE

SANTA CRUZ ACATLÁN, EDC. DE MEX.

FEBRERO DEL 2000





Universidad Nacional
Autónoma de México

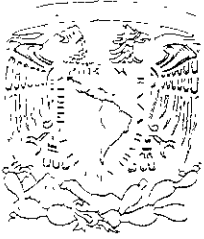


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES "ACATLÁN"
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

SR. SERAFIN GONZÁLEZ RAMÍREZ
ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
P R E S E N T E

Por medio de este escrito me complace notificarle que esta Jefatura de Programa tuvo a bien asignarle el tema de tesis: "EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA Y UN EJEMPLO DE APLICACIÓN", el cual se desarrollará como sigue:

- Introducción
- Capítulo 1. Conceptos Geohidrológicos Generales
- Capítulo 2. Calidad del agua subterránea
- Capítulo 3. Conceptos básicos para el diseño de la captación
- Capítulo 4. Perforación
- Capítulo 5. Aforo del pozo
- Capítulo 6. Selección del equipo de bombeo
- Capítulo 7. Ejemplo de aplicación
- Conclusiones y Recomendaciones
- Bibliografía

Asimismo fue designado como asesor de Tesis el Dr. José María Chávez Aguirre, profesor de esta Institución.

Solicito a usted tomar nota que en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título de trabajo realizado. Esta comunicación deberá publicarse en el interior de la tesis.

Sin otro particular, me es grato reiterarle las seguridades de mi más fina y atenta consideración.

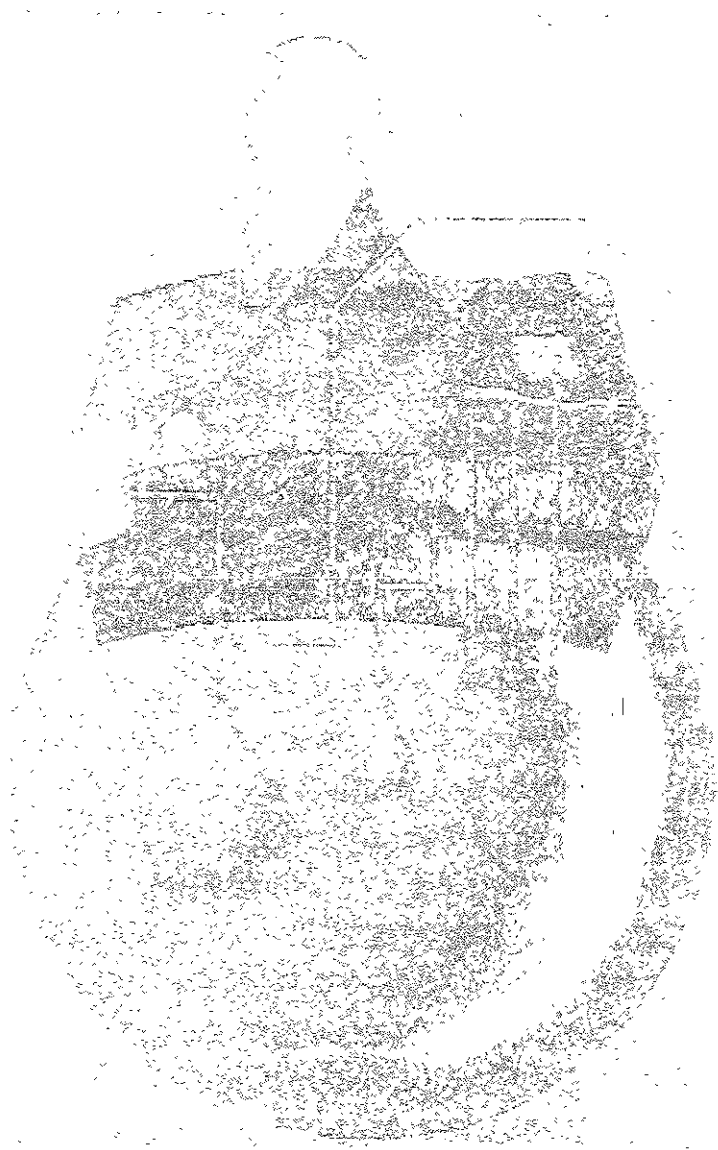
ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
ACATLÁN, EDO. DE MÉXICO A 24 DE ENERO DEL 2000

JEFE DE PROGRAMA

ING. ENRIQUE DEL CASTILLO FRAGOSO



EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA Y UN EJEMPLO DE APLICACIÓN



DEDICATORIAS

A MI MADRE:

Siempre he contado contigo en las buenas y en las malas. Gracias por ese apoyo incondicional y por tus sabios consejos.

A MIS HERMANOS:

A pesar de las adversidades, siempre han estado presentes en situaciones difíciles, ante las tempestades, me han ayudado a caminar. El presente es una muestra de gratitud por los esfuerzos compartidos.

A VIOLETA:

El arquero ve al blanco en la senda del infinito y os arguea con su poder para que su flecha cumpla con su objetivo.

Por enseñarme a no claudicar y por escalar la montaña a mi lado. La culminación de esta meta representa la primera de tantas que alcanzaremos juntos.

A MIS AMIGOS Y PROFESORES DE LA UNIVERSIDAD:

Por compartir sus consejos, conocimientos y enseñanzas.

AGRADECIMIENTOS

AL DR. JOSÉ MARÍA CHÁVEZ AGUIRRE:

Por sus opiniones, puntos de vista y el tiempo dedicado para que el presente trabajo tomara forma.

AL PERSONAL QUE LABORA EN LA C. F. E.

Departamento de Geohidrología:

ING. VÍCTOR MATA VLLAVICENCIO
ING. FERNANDO RAMÍREZ JIMÉNEZ
FIS. TOMAS CHÁVEZ RAMÍREZ
ING. FRANCISCO GAMA MARTÍNEZ
ING. MARIO PATRICIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ
ING. JOSÉ EFREN AGUIRRE BARRAGÁN

Por brindarme las herramientas necesarias y la oportunidad de conocer el ámbito geohidrológico.

Departamento de Apoyo Técnico:

ING. LUIS CAMPILLO SALDAÑA

Por su contribución en distintas fuentes de documentación y exhortación en salir adelante.

AL ING. JORGE ESTEBAN ATEHALA MOLANO:

Agradezco su participación, colaboración y consejos.

AL ING. ALEJANDRO LEON RAMÍREZ:

Por sus comentarios y sugerencias antes, durante y después de los seminarios de tesis.

AL ING. EECTOR MORENO ALFARO:

Por compartir sus conocimientos y experiencias sobre el tema.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GEOHIDROLÓGICOS GENERALES	
1.1. CICLO HIDROLÓGICO	4
1.2. EXPLORACIÓN GEOLÓGICA	6
1.2.1. EXPLORACIÓN DIRECTA	7
1.2.2. EXPLORACIÓN INDIRECTA	10
1.3. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	12
1.3.1. POROSIDAD	12
1.3.2. PERMEABILIDAD	13
1.3.3. FRACTURAMIENTO	17
1.3.4. MEDIO GRANULAR	19
1.3.5. KARSTICIDAD	20
1.4. CENSO DE APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS	22
1.5. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA	23
1.5.1. TIPOS DE ACUÍFEROS	23
1.5.2. CONTENIDO DE AGUA Y GRADO DE SATURACIÓN	24
1.5.3. RENDIMIENTO ESPECÍFICO (S_y)	25
1.5.4. RETENCIÓN ESPECÍFICA	25
1.5.5. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S)	26
1.5.6. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K)	27

1.5.7. TRANSMISIVIDAD (T)	28
1.6. MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA	29
1.6.1. LEY DE DARCY	29
1.6.2. VELOCIDAD DE FLUJO	30
1.6.3. DIRECCIÓN DE FLUJO	31
1.6.4. ECUACIÓN DE BALANCE DEL AGUA SUBTERRÁNEA	31
1.6.5. PIEZOMETRÍA	31
1.6.6. PRUEBAS DE BOMBEO	32
1.6.6.1. MÉTODO DE THEIS	33
1.6.6.2. MÉTODO DE JACOB	34

CAPÍTULO 2. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

2.1. TOMA DE MUESTRAS	36
2.2. ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICOS Y BACTERIOLÓGICOS	36
2.3. CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD	37
2.3.1. CALIDAD FÍSICA	37
2.3.2. CALIDAD BACTERIOLÓGICA	37
2.3.3. CALIDAD QUÍMICA	37
2.4. CLASIFICACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA	38
2.4.1. LEGISLACIÓN DEL AGUA PARA USO Y CONSUMO - POTABILIDAD	38
2.4.2. USOS AGRÍCOLAS	39
2.4.3. USOS PARA ABREVADEROS	41
2.4.4. USOS INDUSTRIALES	41

CAPÍTULO 3. CONCEPTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE LA CAPTACIÓN

3.1. CONSIDERACIONES GENERALES DE POZOS	50
3.2. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA	50
3.3. ESQUEMA GENERAL DE UN POZO	55
3.4. DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DEL POZO	55
3.4.1. INFORMACIÓN REQUERIDA	55
3.4.2. PROFUNDIDAD Y DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN	56
3.4.3. ADEME	56
3.4.4. SECCIÓN DE ADMISIÓN	60
3.4.5. FILTROS	64
3.4.6. ESTABILIZADORES	66
3.4.7. PROTECCIÓN SANITARIA	66
3.4.8. CÁMARA DE BOMBEO	67

CAPÍTULO 4. PERFORACIÓN

4.1. CONSIDERACIONES PARA SELECCIONAR EL MÉTODO DE PERFORACIÓN	68
4.2. PERFORACIÓN POR PERCUSIÓN	68
4.2.1. EQUIPO Y HERRAMIENTAS DE PERFORACIÓN	69
4.2.2. PROCEDIMIENTO DE PERFORACIÓN	70
4.2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS EQUIPOS DE PERCUSIÓN	70

4.3. PERFORACIÓN POR ROTACIÓN	71
4.3.1. EQUIPO Y HERRAMIENTAS DE PERFORACIÓN	71
4.3.2. PROCEDIMIENTO DE PERFORACIÓN	72
4.3.3. ADITAMENTOS	75
4.3.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS EQUIPOS DE ROTACION	76

CAPÍTULO 5. AFORO DEL POZO

5.1. DESARROLLO	77
5.2. AFORO	78
5.3. PRUEBAS DE BOMBEO	86

CAPÍTULO 6. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO

6.1. EQUIPO DE BOMBEO PARA POZOS	89
6.1.1. BOMBAS EYECTORAS	91
6.1.2. BOMBAS SUMERGIBLES	93
6.1.3. BOMBAS TIPO TURBINA DE EJE VERTICAL	94
6.2. CRITERIO DE SELECCIÓN	98
6.2.1. INFORMACIÓN REQUERIDA	98
6.2.2. PROCEDIMIENTO PARA ELEGIR EL EQUIPO DE BOMBEO ADECUADO	99

CAPÍTULO 7. EJEMPLO DE APLICACIÓN

7.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	102
7.2. UBICACIÓN	105
7.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS	107
7.4. CARACTERÍSTICAS HDROGEOLOGÍCAS	109
7.5. LOCALIZACIÓN DEL POZO	121
7.6. DISEÑO DEL POZO	122
7.7. DESARROLLO Y EVALUACIÓN DEL POZO	129
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	135
BIBLIOGRAFÍA	139

INTRODUCCIÓN

Actualmente varios estados de la República Mexicana tienen problemas de escasez de agua, lo que trae como consecuencia rezagos en distintos sectores. Diversos lugares han sido declarados como zonas de desastre, en algunas localidades ciudadanos y campesinos caminan kilómetros para acarrear agua, para satisfacer sus necesidades básicas, por ejemplo, en el estado de San Luis Potosí, principalmente en las zonas media y del altiplano, los niños y habitantes salen a pedir en las carreteras o caminos, agua, refresco o cerveza, en lugar de dinero; en el estado de Chihuahua, el sector agropecuario ha sufrido pérdidas extraordinarias, en el Distrito Federal, algunas colonias tienen que esperar hasta ocho días para recibir el suministro de dicho recurso por medio de pipas o rindeo en horarios establecidos; en Sinaloa, los incendios forestales destruyen hectáreas de bosques y recursos naturales, mientras que en algunos municipios, ciudades o estados, el líquido es desperdiciado, existen fugas de agua que no se arreglan oportunamente, falta mantenimiento en la red hidráulica y se contaminan ríos, entre otros aspectos que empeoran aún más la situación.

Un dato interesante es el proporcionado por el periódico La Jornada, en su publicación del 27 de mayo de 1999: en zonas del poniente del Distrito Federal, los habitantes reciben en promedio 280 litros/hora/día, en Iztapalapa dicha cantidad se reduce a 110 litros/hora/día y en la parte alta de la delegación la cifra es de 50 litros/hora/día. Aunque este problema se resolverá con la puesta en marcha de tres pozos, se sabe que el costo real del agua para los capitalinos, es de veintidós pesos por metro cúbico.

Tres cuartas partes de nuestro cuerpo están formadas por agua, sin dicho recurso la muerte sería irremediable, pues cada persona requiere 2.5 litros por día para subsistir ya que sus funciones son las de regular la temperatura del cuerpo, la respiración, la digestión, el funcionamiento de las glándulas, la lubricación de las articulaciones y constituye una gran parte de la protección del embrión antes de nacer. Sin el agua el hombre pierde su apetito, además dificultaría la obtención de sus alimentos.

Para el año de 1997, México contaba con una población de más de 90 millones de habitantes y un índice de crecimiento anual de 2.5%, lo cual quiere decir que cada año nacen más de 2 millones de niños, lo que implica mayores necesidades en todos los sectores: industrial, energético, de servicios, etcétera.

Se estima que para el año 2012, en la Cuenca del Valle de México vivirán 45 millones de personas; los requerimientos anuales de agua serán de 3 mil millones de metros cúbicos adicionales al caudal que se tiene en el presente. Se calcula que ese año México tendrá 150 millones de habitantes que en materia de energía eléctrica significa la necesidad de generar 100 millones de kw, de los cuales 80 millones serán de origen termoeléctrico y 20 hidroeléctrico. Por otra parte, Pemex y la industria en general requerirán cinco veces más agua. Para frenar el problema se debe optimizar dicho recurso y fomentar una cultura sobre el uso adecuado del líquido y el medio ambiente.

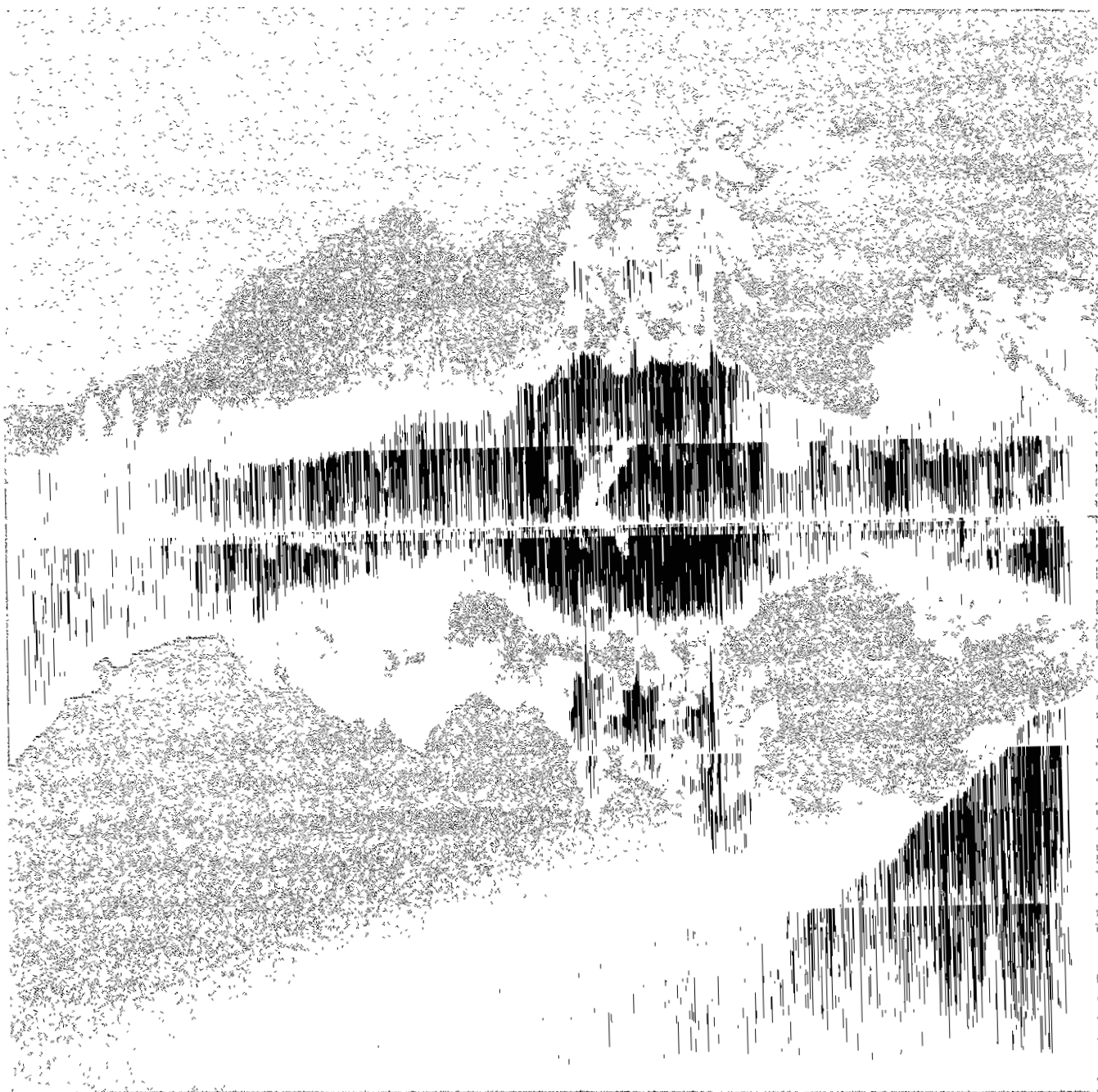
Como alternativas para solucionar los problemas anteriores, se almacena agua en distintas presas, se hacen tratamientos de aguas negras, residuales, se extrae agua del subsuelo, entre otras, pero el crecimiento de la población e industria ha originado un consumo de agua mayor que la disponible, lo que ha ocasionado el abatimiento de los mantos acuíferos en algunas ciudades de México, otra consiste en desalar el agua del mar como se hace en el estado de Baja California Sur, donde se intensifican esfuerzos para potabilizar el agua.

Los datos antes mencionados reflejan cuán importante es el agua para el ser humano y el desarrollo de un país en sus distintos sectores, con ello se pretende hacer conciencia para cuidar dicho líquido en el presente y para futuras generaciones, haciendo su uso de manera racional. Ya que cada día es más costosa y difícil de obtener en cantidades significativas, se debe garantizar su calidad según sea el uso al que se le destina. Por lo anterior el tema elegido es interesante porque muestra el procedimiento, los trabajos que se efectúan en campo y los estudios necesarios para decidir si es factible construir una obra de captación de aguas subterráneas y evaluar su posible rendimiento, además el tema involucra aspectos técnicos, económicos, sociales, entre otros; requiere de otras materias como geología, geofísica, perforación, química, mecánica de suelos y otras que complementan el tema, lo que en conjunto permite al ingeniero tener la habilidad para evaluar la obra, pues su construcción resolvería parte de la problemática descrita.

Para el tema a tratar sólo es de interés el agua subterránea. En esta tesis se muestra el procedimiento para su extracción cuantificando el potencial de un acuífero, que consiste en caracterizar geohidrológicamente los materiales que conforman el subalveo del Río Papagayo del sitio denominado Obra de Toma, lo que permitirá analizar la factibilidad de ubicar obras hidráulicas (pozos Ranney) para la captación de agua, con las cuales la Comisión Nacional del Agua pretende explotar $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$, para el caso del ejemplo de aplicación, que es donde se aplican los conceptos desarrollados en los capítulos primero al sexto. En el capítulo 1 se proporcionan los conceptos básicos de Geohidrología para lo cual se definen los tipos de roca que pueden constituir un acuífero, así como algunos métodos directos e indirectos para lograr su identificación en una zona determinada; en el capítulo 2 se dan a conocer las condiciones de calidad del agua en el acuífero por medio de muestreos y análisis físico-químicos, para determinar su clasificación con base a la normatividad vigente a fin de establecer su uso potencial; en el capítulo 3 se dan las bases necesarias para el diseño del pozo y se establecen dimensiones y características de los elementos que lo conforman, con el propósito de obtener el mejor aprovechamiento del acuífero con el mínimo costo posible, tomando como base la demanda del caudal y las características geohidrológicas del entorno. El capítulo 4, muestra las herramientas necesarias para seleccionar el equipo y el método adecuado de perforación, en función del tipo de material, diámetro del pozo y profundidad por perforar. El capítulo 5 consiste en definir el adecuado funcionamiento del pozo y del acuífero, con el propósito de determinar el caudal óptimo de explotación y los niveles de operación del mismo. El capítulo 6, da la pauta para elegir el equipo de bombeo adecuado para la extracción del agua subterránea, en función del caudal óptimo de explotación establecido a través del aforo; finalmente, en el capítulo 7 se muestra, mediante un ejemplo práctico enfocado a un caso en particular, la secuencia a considerar para el diseño de una obra de captación, la cual será de uso provisional.

Capítulo I

Conceptos Geohidrológicos Generales



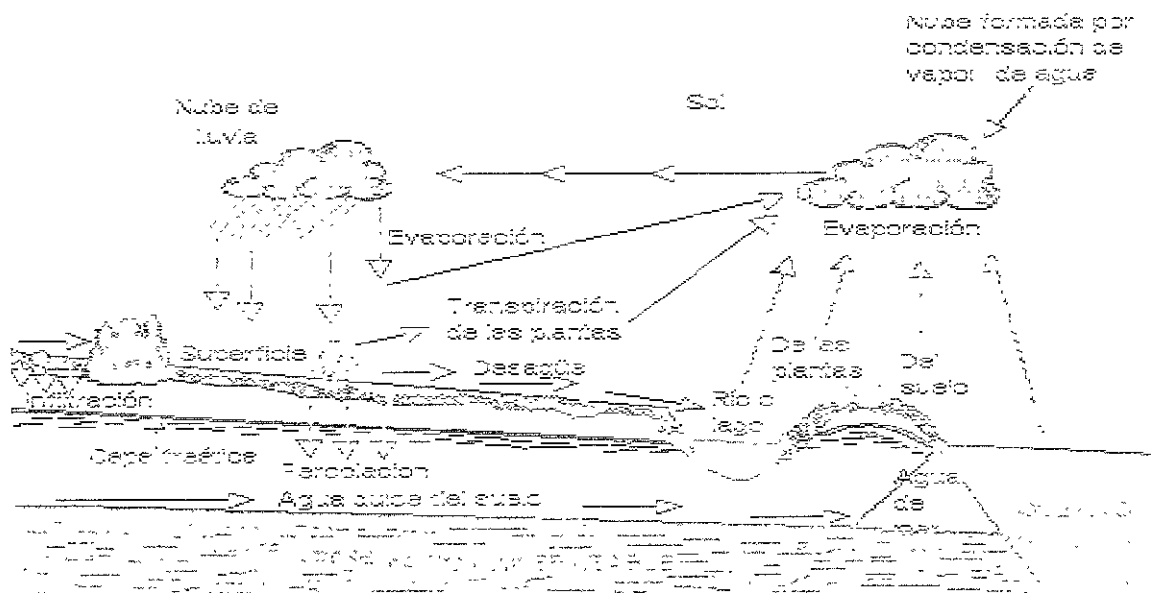
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GEOLÓGICOS GENERALES

Se considera que el agua subterránea forma lagos o ríos localizados a lo largo de conductos de gran tamaño, que es el caso de acuíferos formados por rocas carbonatadas o volcánicas; generalmente, circula y se almacena en oquedades, fisuras y poros. ⁽¹⁸⁾

1.1. CICLO HIDROLÓGICO

Recibe el nombre de ciclo hidrológico el proceso de circulación del agua en sus diferentes estados; líquido, gaseoso (en forma de vapor) y sólido, pasando por las etapas de evaporación, condensación y precipitación. El ciclo hidrológico está regido por la energía del Sol y por la gravedad de la Tierra; ante la acción calorífica de los rayos del sol, las aguas continentales y las aguas de los océanos se calientan dando origen al fenómeno de la evaporación, es decir, da como resultado la transferencia de vapor de agua a la atmósfera desplazándose en diferentes direcciones. ⁽⁹⁾ Cuando las masas de vapor de agua se enfrían, éstas se condensan en agua líquida para formar nubes, subsecuentemente, liberan humedad, es decir, si existe condensación continua, las gotas de agua ya no pueden ser retenidas por las nubes y comienzan a precipitarse dando lugar a la lluvia. ⁽⁴¹⁾ El agua que se precipita a la Tierra toma diversos caminos, pues parte de ella se reevapora. Inmediatamente, por el efecto de la energía solar, otra parte cae directamente en el mar y el resto se impacta en las masas terrestres; cuando el agua ha llegado a la Tierra, el suelo y las plantas la absorben, mientras otra fracción comienza a correr por ríos, lagunas, riachuelos y lagos hasta detenerse en los océanos y recomenzar el ciclo nuevamente ⁽³²⁾ (figura 1.1.a)

Figura 1.1.a. CICLO HIDROLÓGICO



FUENTE: REXFORD D. S. y ULRICH G. (1989). *Manual de los pozos pequeños*. Washington D.C. Edita. Limusa. 5ª. Reimpresión. E.U.A., 1989. 182 pp

ORIGEN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Las aguas subterráneas proceden en su mayor parte de las lluvias y de la nieve que se derrite sobre la Tierra, de la cual alguna cantidad se filtra o penetra al suelo donde puede ser retenida por rocas y/o diversos materiales que en un momento dado pudieran frenar su descenso y alimentar los receptáculos internos. ⁽⁴¹⁾

DISTRIBUCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El agua se encuentra en los poros o intersticios de las rocas ⁽⁶⁾, para su estudio se divide en dos zonas (figura 1.1.b):

1. Zona de Aereación:

Comprende de la superficie del terreno hasta el punto donde los poros o espacios que conforman el subsuelo, están completamente saturados de agua, o bien, hasta la superficie freática ⁽²⁹⁾. Para su estudio se divide en:

a) Capa de agua del suelo. Abarca la parte inmediata debajo del terreno. El ancho de la capa está en función del tipo de suelo y vegetación. El contenido de humedad varía continuamente dado que la lluvia, el riego, el drenaje y la evapotranspiración provocan un intercambio continuo de humedad entre la atmósfera y el subsuelo. ⁽⁶⁾

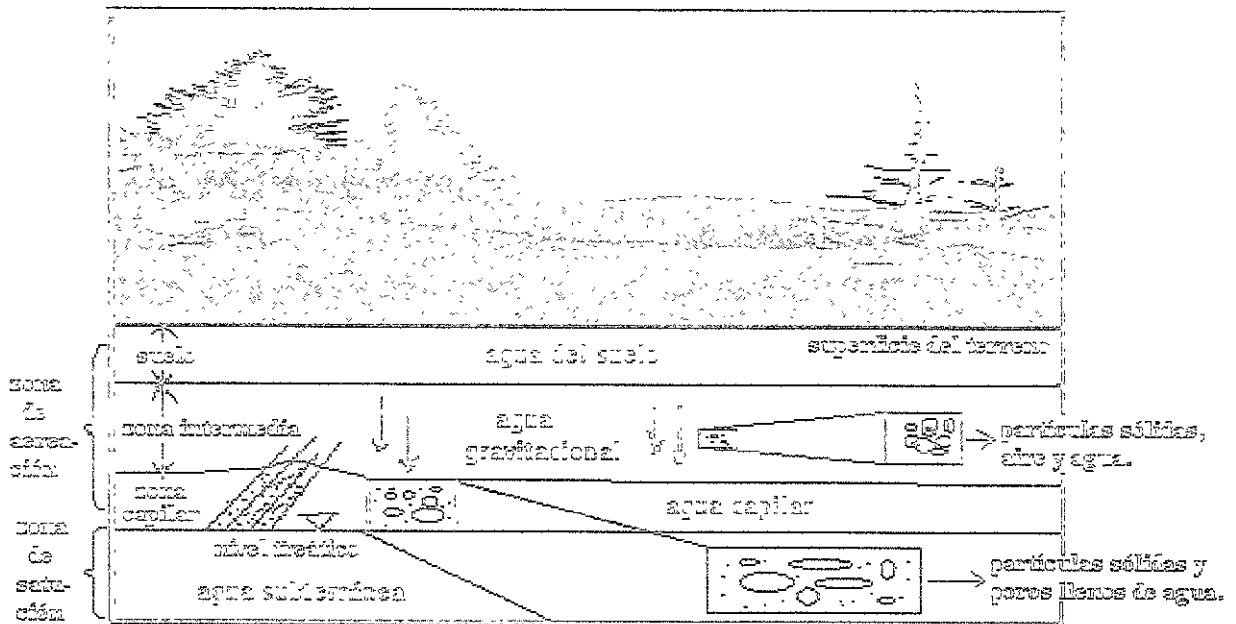
b) Zona capilar. Se localiza por arriba de la superficie freática (agua que se encuentra a la presión atmosférica), su altura está en función de la granulometría del material y de las fluctuaciones de dicha superficie, por ejemplo: en materiales finos la altura capilar puede ser hasta tres metros, pero el agua asciende lentamente, mientras que en materiales gruesos sucede lo contrario, por lo tanto el espesor depende de la textura de la roca o del suelo y puede ser cero cuando los poros son grandes. ⁽⁶⁾

c) Zona intermedia. Se ubica entre la capa de agua del suelo y la zona capilar. En esta parte existe agua adherida a los granos y temporalmente agua gravitacional que fluye verticalmente hacia la zona saturada en los periodos de infiltración. ⁽³⁹⁾

2. Zona de Saturación:

Está limitada por la superficie freática. Los estratos situados por debajo de esta superficie están totalmente saturados. Esta agua puede fluir fácilmente hacia un pozo. ⁽³⁹⁾

Figura 1.1.b. Distribución del agua en el subsuelo



FUENTE: CHÁVEZ GUILLÉN, R. et al. (1987). Hidráulica y diseño de pozos. Facultad de Ingeniería. División de Educación Continua. México, modificado por el Ing. Jorge Esteban Athala Molano.

En la ilustración se aprecia que por debajo del nivel freático se encuentra el agua subterránea, que se puede mover libremente hacia abajo desde la superficie hasta alcanzar una capa de roca impermeable, o hasta que llega al nivel freático; entonces empieza a moverse lentamente, pero tarde o temprano fluye nuevamente hacia la superficie del terreno por un conducto llamado manantial. ⁽⁴¹⁾

1.2. EXPLORACIÓN GEOLÓGICA

El agua subterránea debe encontrarse en cantidades considerables, además de fluir sin interrupción hacia los pozos por períodos largos de tiempo a velocidades adecuadas; generalmente se busca que sea de buena calidad para satisfacer las necesidades humanas del campo, la industria, entre otros. ⁽⁸⁾

La exploración implica una investigación detallada directa e indirecta del marco geológico subterráneo y superficial. ⁽⁷⁾

1.2.1. EXPLORACIÓN INDIRECTA

Se realiza investigando en diversas oficinas públicas y privadas información disponible de la zona de estudio, así como llevando a cabo pruebas de reconocimiento e interpretación de la geología de campo apoyadas en principios geofísicos.¹

A) FUENTES DE INFORMACIÓN (7)

Empresas paraestatales, públicas y privadas han realizado estudios con objetivos distintos; información que puede ser consultada con el objeto de resolver el problema específico de interés. Algunas fuentes de información pueden ser:

1. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), donde se puede recopilar información como: cartas topográficas, geológicas, hidrológicas, fotografías aéreas, imágenes de satélite, entre otros.
2. Comisión Federal de Electricidad (CFE), en donde se pueden consultar estudios geológicos, geofísicos, geohidrológicos, estructurales, además de otros.
3. Comisión Nacional del Agua (CNA), información de datos climatológicos, piezométricos, hidrométricos, calidad del agua, mapas geológicos, geohidrológicos, entre otros.
4. Otros: Petróleos Mexicanos (PEMEX), Institutos de Geofísica y de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde se puede capturar información similar a la anterior.

B) INFORMACIÓN BÁSICA (29)

1. *Mapas.* Su finalidad es localizar y caracterizar las formaciones geológicas que constituyen acuíferos. Los mapas geológicos muestran las diferentes formaciones rocosas consolidadas o no, que salen o afloran en la superficie, la localización de fallas (sitios probables para la aparición de arroyos), el contorno del lecho de una roca (indica la profundidad máxima a la que debe perforarse un pozo en la búsqueda de agua), la combinación de la veta y la inclinación de la misma establecen en que dirección se debe localizar un pozo para obtener el espesor máximo de la capa acuífera.
2. *Planos Topográficos.* Aportan información general de las vías de comunicación, así como de ríos, lagos, mares y lagunas, además en ellos está representada la morfología del terreno que tiene influencia en la distribución del agua subterránea. Éstos se emplean para representar la localización de captaciones de agua subterránea en Geohidrología.

- 3) *Planos Hidrogeológicos.* Aportan información sobre características litológicas que controlen el almacenamiento y la circulación del agua en el subsuelo, además de proporcionar información piezométrica, elevación de los diferentes niveles de agua subterránea, localización de manantiales, datos sobre el caudal y rendimiento de las captaciones, permeabilidad, comportamiento hidrogeológico (acuíferos, acuíclados o acuitarós) así como información de la calidad del agua.

C) FOTOGRAFÍAS AÉREAS ⁽³⁶⁾

A falta de mapas, una opción complementaria son las fotografías aéreas, las cuales aportan información de exploración que no se aprecia sobre la superficie del terreno, empleándose fotografías a diversas escalas, que muestran el relieve topográfico a través de un estereoscopio; de su interpretación se obtiene información valiosa como: grado de alteración o fracturamiento de las rocas, características de la vegetación, extensión y distribución de rocas que forman acuíferos, características del drenaje superficial en terrenos cársticos o volcánicos, la distribución e interconexión de fracturas o conductos de disolución.

D) EXPLORACIÓN GEOTÍSICA ⁽³⁷⁾

Cuando el grado de dificultad aumenta para encontrar el agua subterránea y los costos de perforación se incrementan, es importante contar con métodos de exploración indirecta que permitan detectar su presencia.

Método de Resistividad Eléctrica.

El método más empleado dentro de la familia de resistividad eléctrica para la exploración de aguas subterráneas es el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), que permite diferenciar netamente una roca seca de una impregnada de agua a través de su conductividad eléctrica.

Este método se basa en medir la conductividad longitudinal, resistividad y resistencia transversal que caracterizan a las rocas y capas geológicas.

La conductividad eléctrica es la propiedad de conducir la corriente eléctrica y varía de una roca a otra. Los parámetros que indican esta propiedad son la conductividad o su inversa, la resistividad.

En rocas estratificadas, la resistividad varía en la dirección de la corriente.

La conductividad eléctrica longitudinal (KL) de una capa es igual al cociente de su espesor y de su resistividad, mientras la resistencia transversal (RT) de una capa es igual al producto de su espesor por su resistividad, es decir, matemáticamente:

$$K_L = e/P \quad \dots \quad (1) \quad K_L \text{ en } \text{ohms}^{-1}$$

$$R_T = e \cdot P \quad \dots \quad (2) \quad R_T \text{ en } \text{ohm-m}^2$$

Donde

e es igual al espesor en metros (m).

P es la resistividad en ohm-m.

La tabla 1.2.1 muestra los posibles intervalos de magnitud de la resistividad para algunos tipos de agua y rocas comunes.

Tabla 1.2.1. Resistividades eléctricas de tipos de agua y rocas.

AGUA Y ROCAS	RESISTIVIDAD (ohm-m)
Agua de manantiales	50-100
Agua de acuífero aluvial	10-30
Agua de mar	0.2
Arena y gravas con agua salada	0.5-5
Arena y gravas con agua dulce	50-500
Arena y gravas secas	1 000-10 000
Esquistos grafitosos	0.5-5
Esquistos arcillosos o alterados	100-300
Esquistos sanos	300-3 000
Arcillas	2-20
Margas	20-100
Calizas	300-10 000
Tobas volcánicas	20-100
Lavas	300-10 000
Gneis, granito alterado	100-1 000
Gneis, granito sano	1 000-10 000
Cuarcitas	300-10 000
Arenisca arcillosa	50-300

FUENTE: CHÁVEZ GULLÉN, Rubén, Et al. (1994) *Perforación de Pozos*. CNA/MTA/Libro 5/3ª. Sección/Geohidrología. México. 256 pp.

1.2.2. EXPLORACIÓN DIRECTA

Se efectúa realizando reconocimientos en campo. Consiste en verificar la información de la zona investigada en los mapas topográficos, geológicos, fotografías aéreas y otras fuentes de información, para programar la exploración geofísica y si se requiere, las perforaciones exploratorias. Durante los reconocimientos se rectifica y/o se detalla la información obteniendo datos complementarios del sitio de interés, se aporta información de la calidad del agua, litología, niveles y características hidráulicas de los acuíferos. ⁽¹⁷⁾ Los censos de aprovechamiento hidráulico que complementan el reconocimiento en campo, son descritos posteriormente.

PERFORACIÓN EXPLORATORIA

Cuando existe incertidumbre en cuanto a la información obtenida, conviene efectuar la perforación exploratoria que aporta datos sobre las características de los estratos cortados, durante esta etapa se estima si es factible captar el ozudal requerido. ⁽¹⁷⁾

La perforación exploratoria consiste en programar barrenos necesarios, en puntos estratégicos según la información geológica y geofísica.

El perforista hará recuperaciones de las muestras del material perforado o cortado, que serán colectadas en intervalos de uno a dos metros de profundidad y en cada cambio de formación geológica; cada muestra se guardará en bolsas de plástico o en cajas; en las cuales se indicarán los siguientes datos: fecha (día, mes y año), nombre del barreno y tramo comprendido y/o profundidad a la que corresponde.

Las muestras de material obtenido en campo, durante la etapa de perforación, serán analizadas y descritas para hacer su clasificación y así poder reconstruir la secuencia estratigráfica representada por el corte litológico.

La perforación exploratoria se puede efectuar por el método de perforación conocido como rotación hidráulica.

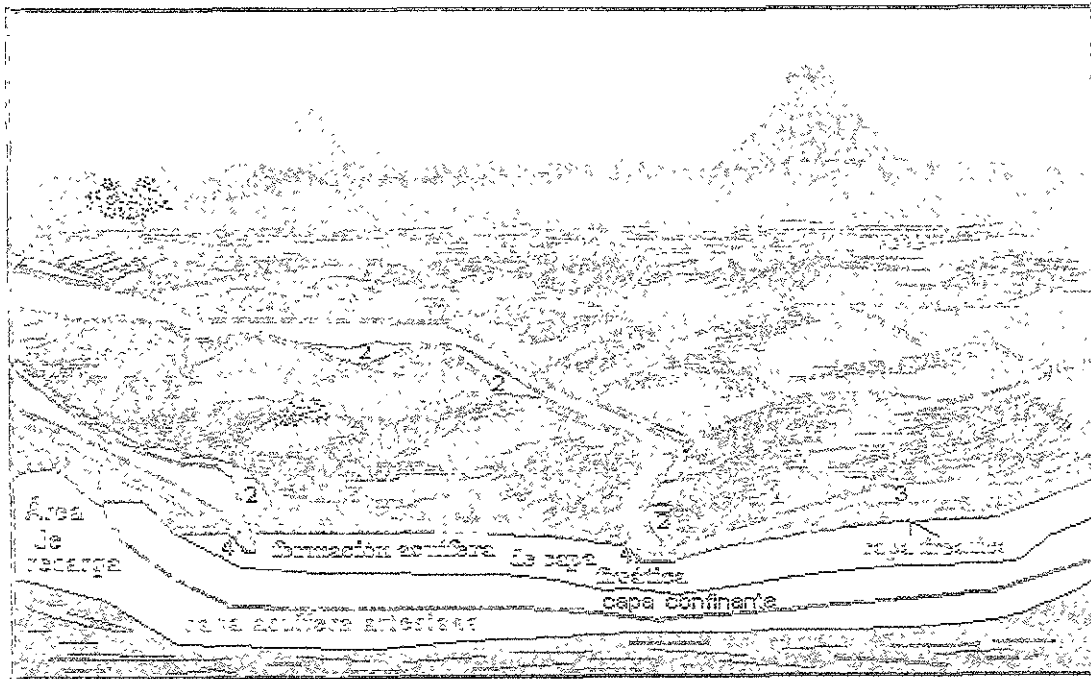
INDICIOS SUPERFICIALES DE LA EXISTENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA

Con base en el diagnóstico de la información recopilada y la experiencia del ingeniero se infiere la presencia de agua. Es posible que aparezca en cantidad mayor bajo los valles que bajo las colinas; regularmente se tienen capas acuíferas muy productivas cuando los rellenos del valle contienen residuos de rocas deslavadas de las montañas; también indican la presencia de capas acuíferas las terrazas de la costa, las llanuras costeras y los ríos. ⁽⁵⁹⁾ (Figura 1.2.2)

Un buen indicio de existencia de agua subterránea en zonas áridas, se logra identificando plantas que requieren mucha humedad, esto es, a poca profundidad. ⁽¹⁷⁾

Quando la vegetación es exuberante casi se asegura la existencia de corrientes y aguas superficiales y cuyos alrededores son sitios apropiados para la búsqueda de agua subterránea. Sin embargo, el criterio del ingeniero prevalece en la selección del sitio más adecuado para ubicar el pozo. ⁽²⁸⁾

Figura 1.2.2. Posibles Sitios para Pozos



FUENTE: Indicios superficiales de la existencia de agua subterránea. (Adaptado de la fig. 4, Water Supply for Rural Areas and Small Communities, serie de monografías WHO número 42, 1959, REXFORD D. S. y ULRIC P. G. op. cit.).

1. La vegetación exuberante indica una posible capa freática poco profunda y la proximidad de una corriente superficial.
2. Los sitios probables para ubicar pozos en formaciones acuíferas del tipo de capa freática son las llanuras fluviales.
3. Al pie de las colinas y en las orillas de los ríos se pueden hallar manantiales, donde aflora el agua subterránea.
4. Los lechos de ríos atraviesan formaciones arenosas portadoras de agua.

1.3. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Se entiende por unidades hidrogeológicas a las características hidráulicas de las rocas, que determinan las cantidades de agua que pueden almacenar, ceder y transmitir; dependen de factores litológicos tales como: granulometría, grado de compactación, fracturamiento, entre otros. ⁽¹⁸⁾

1.3.1. POROSIDAD

La porosidad indica cuanta agua puede ser almacenada en un material, es definida como la relación entre la cantidad de poros o vacíos que una roca o acuífero pueda tener y su volumen total. ⁽¹⁶⁾ En forma matemática se expresa como sigue:

$$n = \frac{V_v}{V_T} \times 100 \quad 0 \leq n \leq 100$$

Donde:

- n = Porosidad en %.
- V_v = Volumen de vacíos en m³.
- V_T = Volumen total en m³.

La porosidad representa la cantidad de agua que un acuífero o formación geológica puede almacenar, pero no indica cuanta agua es aprovechable por gravedad mediante pozos o manantiales. ⁽¹⁾

La porosidad está ligada y queda en función de la forma, distribución o acomodamiento, tamaño y grado de compactación de las partículas o granos de material que constituyen el acuífero. ⁽¹⁷⁾

Desde el punto de vista de la capacidad de ceder agua por gravedad y la capacidad de retener agua contra la gravedad, la porosidad se integra por dos conceptos (*): ⁽¹⁾

$$n = S_y + S_r$$

Donde:

- n = Porosidad en %.
- * S_y = Rendimiento específico en %
- * S_r = Retención específica en %

Existen dos tipos de porosidad; la *primaria* es el resultado de la forma y de las condiciones en que la roca se formó, y la *secundaria*, es producto de rasgos estructurales ocasionadas en ella por procesos tectónicos y/o geológicos (tabla 1.3.1.) ⁽²⁵⁾

*Los conceptos de rendimiento y retención específica serán descritos posteriormente.

En la tabla 1.3.1 se muestra la porosidad de algunos suelos y rocas más comunes. En materiales finos como arcilla y limos, se almacena más agua que en materiales gruesos, sin embargo esto no significa que pueda disponerse de ella, pues está en función de la interconexión entre poros ⁽¹⁷⁾

Tabla 1.3.1. Rangos de porosidad de materiales más comunes.

MATERIALES	POROSIDAD n (%)
A) Rocas	
Rocas Cristalinas Densas	0-5
Rocas Cristalinas Fracturadas	0-10
Lutita	5-10
Arenisca	5-20
Dolomía o Caliza	0-20
Basalto Fracturado	5-50
Caliza Cárstica	5-50
B) Depósitos no consolidados	
Grava	25-40
Limo	35-50
Arena	25-50
Arcilla	40-70

FUENTE: CHÁVEZ GULLÉN, Rubén, et al. (1994). Perforación de Pozos. CNA/IMTA/Libro 5/3ª. Sección/Geohidrología México. 256 pp.

1.3.2. PERMEABILIDAD

La permeabilidad es la propiedad de un material poroso para transmitir agua, de tal manera que permite el paso o infiltración de ésta, a través de espacios vacíos (poros) interconectados entre sí y depende del tamaño de los poros e interconexión de los mismos, abertura de fisuras, tamaño de conductos y de los granos del material. Se mide en unidades de velocidad (longitud/tiempo) o en darcys (un darcy = 10^{-8} cm/s). ⁽¹⁶⁾

La permeabilidad es un parámetro muy importante, porque es indispensable para cuantificar el caudal del agua que circula a través del elemento permeable, de esto depende el rendimiento de las captaciones y la velocidad de circulación del agua subterránea. ⁽²⁵⁾

PERMEABILIDAD HORIZONTAL O EFECTIVA

Se le denomina permeabilidad efectiva al caso donde se pueda presentar más de un fluido, de modo que no se mezclen, circulando simultáneamente a través de un medio poroso de modo que cada uno establezca su propia trayectoria de flujo. En esta situación existe una permeabilidad para cada flujo, excepto cuando alguno de ellos entra en contacto con otro o los demás. ⁽²⁵⁾

PERMEABILIDAD VERTICAL A TRAVÉS DE LOS ESTRATOS

Se presenta en rocas sedimentarias estratificadas, regularmente la permeabilidad vertical entre cada uno de los estratos es diferente de acuerdo a las características de cada capa, asimismo la horizontal es distinta a la vertical, es decir, la permeabilidad en un punto dado varía según la dirección considerada (anisotropía), en esta situación se obtiene un coeficiente de permeabilidad que equivale a todas las capas de interés. ⁽²⁵⁾

PRUEBAS DE PERMEABILIDAD TIPO LEFRANC

Este tipo de pruebas se realiza en campo en materiales granulares, rocas muy alteradas, sedimentos mal consolidados y boleos ⁽¹⁰⁾, se efectúan en barrenos hechos durante la exploración y para su ejecución se necesita llevar un registro de campo que contenga los siguientes datos: nombre del proyecto, profundidad a la que se realiza la prueba en metros, nombre del barreno, número de prueba, nombre de la persona que la realiza, diámetro del barreno, tiempo de cada observación, entre otros. Un formato para la realización de esta prueba se mostrará posteriormente.

Existen diversos tipos de pruebas: de flujo constante con bombeo, flujo constante con inyección, para terreno somero, flujo vertical, de flujo variable de ascenso y descenso ⁽¹⁰⁾. Para los fines del Estudio Integral del Río Papagayo mostrado en el capítulo séptimo, sólo son de interés las de flujo variable - descenso por las condiciones antes mencionadas.

PRUEBAS LEFRANC DE FLUJO VARIABLE

Para llevar a cabo esta prueba es necesario:

- a) Contar con el equipo adecuado, es decir se requiere: calculadora científica, escuadras graduadas, una sonda, cinta adhesiva, cronómetro, tubería, conexiones, bomba para agua y tanque o recipiente para su almacenamiento.
- b) Se estén efectuando los trabajos de perforación y se había perforado el tramo a probar, para ello se requiere conocer la profundidad del barreno, ya sea preguntándole al perforista o midiéndolo directamente con la sonda, es decir, introduciendo el cable de ésta hasta llegar a la roca o suelo del tramo a probar.
- c) Los tramos a probar pueden variar según las necesidades del proyecto. Para los fines del Estudio Integral del Río Papagayo, fueron a cada 3.00 metros de profundidad o en su caso en cada cambio de formación en el subsuelo, por acuerdo establecido por la Comisión Nacional del Agua.
- d) El tiempo de observación debe ser el mismo para cada medición, por ejemplo: si el período Ψ que tarda en fluir el agua a través del medio (material que conforma el subsuelo en el tramo de prueba) es de 60 segundos, los intervalos de tiempo para tomar las lecturas se obtienen con la siguiente ecuación:

Ψ / número de lecturas, para cada caso en particular

Para la situación anterior se tiene: considerando 3 y 5 lecturas, el tiempo de cada observación son respectivamente, $60/3=20$ s y $60/5=12$ s.

FORMATO PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS TIPO LEFRANC EN CAMPO EN LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE UNA FORMACIÓN ACUÍFERA

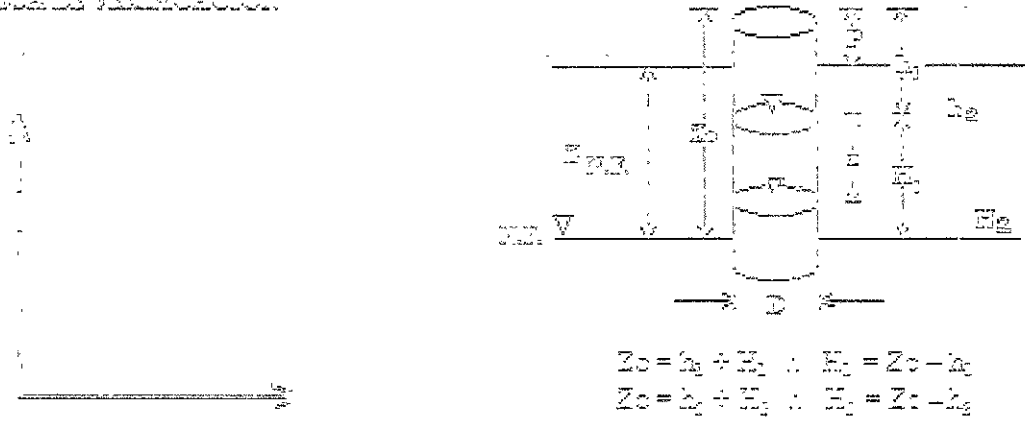
Nombre de la Empresa _____	Prueba Tipo Lefranc Flujo Variable Ascenso _____ Descenso _____	Realización de Pruebas Lefranc Hoja ____ de ____
OBSERVACIONES		
Nombre del proyecto: _____		Z N.R. = Profundidad del Nivel Práctico m
Nombre del Barrero: _____		D = Diámetro del Ademe m
No. de Prueba: _____	Fecha: _____	t = Tiempo de cada observación s
Efectuada por: _____		P = Distancia del terreno natural a boca del ademe m
Coordenadas: X Y Z	Z ₀ = Z N.R. + P = m	

DATOS DE LA PRUEBA

Lecturas y cálculos

Número de observación	1	2	3	4	5
h ₁ = Profundidad inicial en metros					
h ₂ = Profundidad final en metros					
Z = h ₂ - h ₁					
Carga hidráulica en metros					
Z/t = Velocidad en m/s					

GRÁFICA DE VERIFICACIÓN

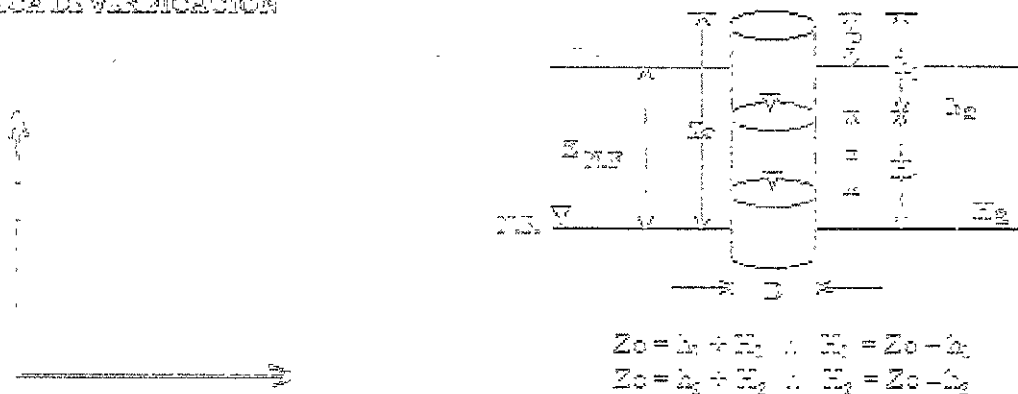


Nota: La profundidad final (h₂) se toma en la siguiente lectura como la profundidad inicial (h₁) y así sucesivamente.

FORMATO PARA EL CÁLCULO DE PRUEBAS DE PERMEABILIDAD TIPO LEFRANC

Nombre de la Empresa _____	Prueba Tipo Lefranc Flujo Variable Ascenso _____ Descenso _____	Realización de Pruebas Lefranc Hoja _____ de _____				
HOJA DE CALCULO						
Nombre del proyecto: _____	Profundidad del N.F.: _____ m					
Nombre del Barreno: _____	Tiempo: _____ s	Area: _____ m ²				
Tramo de _____ a _____ m	Distancia del terreno Natural (T.N.) a boca del ademe: _____ m					
Diámetro del Ademe _____ m	C = _____ 1/m	Z ₀ = _____ m				
Ejecutada por _____	Fecha: _____					
h_1 (m)	h_2 (m)	H_1 (m)	H_2 (m)	H_1/H_2	$\text{Log}(H_1/H_2)$	K (cm/s)
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA K = _____ cm/s						
Litología _____			Observaciones _____			
-----			-----			
-----			-----			

GRÁFICA DE VERIFICACIÓN



Notas: La poroconductividad final (K_2) se toma en la saturación crítica como la poroconductividad inicial (K_1) y así sucesivamente.

La prueba consiste en inyectar agua al barreno de interés, enseguida se mide el descenso del nivel dentro del mismo, para ello se toma el tiempo total de descenso y en base a este se determinan intervalos de tiempos iguales. La prueba se realiza en coordinación con una o dos personas, de las cuales una se hará cargo de llevar el tiempo por medio de un cronómetro, mientras que la otra hará las anotaciones correspondientes en su registro de campo, haciendo alguna indicación o seña a la persona adecuada, para que ésta siga el nivel de descenso del agua en el interior del tubo y marque las lecturas. Después de tomar las lecturas correspondientes, se llena el formato para la realización de pruebas tipo Lefranc, se verifica si la prueba estuvo bien ejecutada construyendo una recta que consiste en graficar x (carga hidráulica) en el eje de las ordenadas y z/t (velocidad) en el eje de las abscisas; en caso de obtener cualquier otra función que no sea una línea recta, significa que la prueba estuvo mal realizada.

1.3.3. FRACTURAMIENTO

Las fracturas son rupturas que se forman por el escape de esfuerzo que se ha acumulado en las rocas, ya sea independientemente de los pliegues o asociados con ellos, incluyen fallas y/o juntas. ⁽⁴⁾

a) Falla: es la superficie de ruptura de una roca en la cual ha habido movimiento diferencial. ⁽⁴⁾

b) Junta: es la ruptura en una masa de roca que no muestra ningún movimiento relativo de la roca fracturada a lo largo de la rotura. ⁽³⁰⁾

Los movimientos tectónicos producen fracturas y fisuras en las rocas ocasionando la formación de acuíferos, aunque también pueden mejorar, cañar o destruir los ya existentes. ⁽⁴²⁾

El efecto anterior puede ocasionar diversas situaciones (figura 1.3.3); a manera de ejemplo se muestra el siguiente resumen.



Figura 1.3.3. El flujo subterráneo dentro de las fracturas de una caliza, las agranda debido al efecto químico en que el CO_2 disuelto en el agua ataca al HCO_3 de la caliza, hasta convertirlas en canales de disolución. El agua sigue la ruta por los canales, los cuales la conducen a veces por debajo del nivel del mar (COSTEAU, J. (1982) Los Secretos del Mar. Enciclopedia del Mar Editorial Fabri, Italia - Milán, 1982).

Resumen: Diversas consecuencias producidas en algunas rocas debido a su fracturamiento.

Roca	Efecto del fracturamiento	Buen acuífero	Mal acuífero	Otras características
Calizas y dolomías	Crea porosidad además agranda algunas de sus aberturas hasta formar canales por disolución.	Siempre y cuando los canales de disolución se desarrollen, entonces proporcionarán grandes cantidades de agua a los pozos.	Depende de las condiciones locales.	La mayoría de estas rocas contienen muy poco o nada de aberturas conectadas cuando se acaban de formar como sedimentos marinos. El agua subterránea circula siguiendo trayectorias irregulares, determinadas por la distribución de fracturas y conductos.
Lutitas y materiales similares, denominados limolitas	Pueden suministrar, en ciertas áreas, pequeñas cantidades de agua para una obra de captación.		No constituyen buenos acuíferos.	
Basalto	Ruptura del derrame basáltico.	Los derrames basálticos constituyen acuíferos favorables.		Pueden contener agua en las fisuras, grietas, vesículas interconectadas (aberturas debidas a burbujas de aire) y zonas brechosas de las capas sucesivas.
Riolita	Representan capacidad transmisora significativa.		Sus características hidráulicas son desfavorables.	
Metamórficas	Se puede obtener agua de las grietas y roturas que se forman en la parte superior de la formación geológica donde el material se ha meteorizado.		Generalmente estas rocas son malos acuíferos.	

FUENTE: REXFORD D. S. y ULRIC P. G. (1989). Manual de los pozos pequeños. Washington D.C. Edita. Limusa. 6ª Reimpresión. E.U.A. 182 pp

1.3.4. MEDIO GRANULAR

Las rocas granulares (arenisca, conglomerado) varían de tamaño de partículas, grado de acomodación, se hallan ampliamente distribuidas y poseen buenas características de almacenamiento y transmisión de agua, consideradas globalmente como los mejores acuíferos. ⁽¹⁷⁾

Los materiales finos son poco permeables. Las formaciones arcillosas suelen constituir acuíferos. ⁽¹⁷⁾

Acuíferos aluviales. La granulometría, grado de compactación y cementación rigen las características hidráulicas de los materiales aluviales. Los de grano grueso, gravas y arenas, forman acuíferos más favorables en cuanto a su permeabilidad y rendimiento específico. ⁽¹⁷⁾

Los materiales aluviales constituyen acuíferos menos favorables cuando están confinados o semiconfinados, debido a su bajo coeficiente de almacenamiento. La mezcla de materiales gruesos y finos funciona como acuíferos de gran porosidad y baja permeabilidad que ceden cantidades importantes de agua a los acuíferos adyacentes. ⁽¹⁷⁾

Los acuíferos sedimentarios no consolidados pueden constituir depósitos marinos aluviales o fluviales (figura 1.3.4), abanicos aluviales, acarreo glaciares y arenas de duna. ⁽¹⁵⁾



Figura 1.3.4. En zonas aluviales o fluviales, el agua se filtra, se encuentra una capa impermeable y vuelve a salir, canalizada, a veces en mar abierto. Resultan ser buenos acuíferos. (COSTEAU, J. (1982). Los Secretos del Mar. Enciclopedia del Mar. Editorial Fabri. Italia-Milán).

1.3.5. KARSTICIDAD

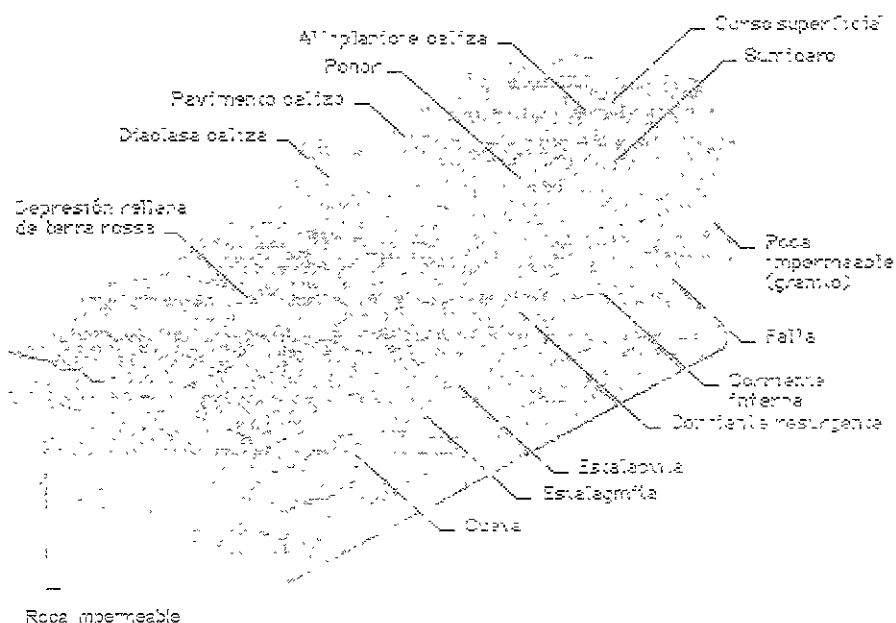
La caliza es una roca sedimentaria que varía enormemente en porosidad, permeabilidad y densidad de acuerdo a las condiciones existentes que la formaron ⁽¹⁹⁾, está compuesta de carbonato de calcio y por efecto de la disolución por aguas que contienen carbonato se da origen a relieves que se caracterizan por la formación de agujeros, huecos, aberturas pequeñas hasta enormes sistemas subterráneos, sumideros, cavernas, entre otros que se dan en rocas carbonatadas y calcáreas, pues el agua se filtra a través de éstas, conociéndose este fenómeno con el nombre de karst, los cuales se caracterizan por tener ⁽²⁰⁾:

- a) Cavidades cortadas en la roca calcárea,
- b) Depresiones pequeñas cerradas (dólinas),
- c) Vastas depresiones cerradas de fondo plano
- d) Unión de varias dólinas,
- e) Puede estar formado por una red de grutas, galerías recorridas por ríos subterráneos.

Por otra parte, si las rocas carbonatadas y calcáreas no están calcificadas suelen ser poco permeables.

A manera de ejemplo, véase las figuras 1.3.5 a y b. que muestran las características antes citadas, asimismo se aprecia que las estalagmitas se elevan sobre el terreno, mientras que las estalactitas descienden del techo.

Figura 1.3.5.a. Karst o Carst

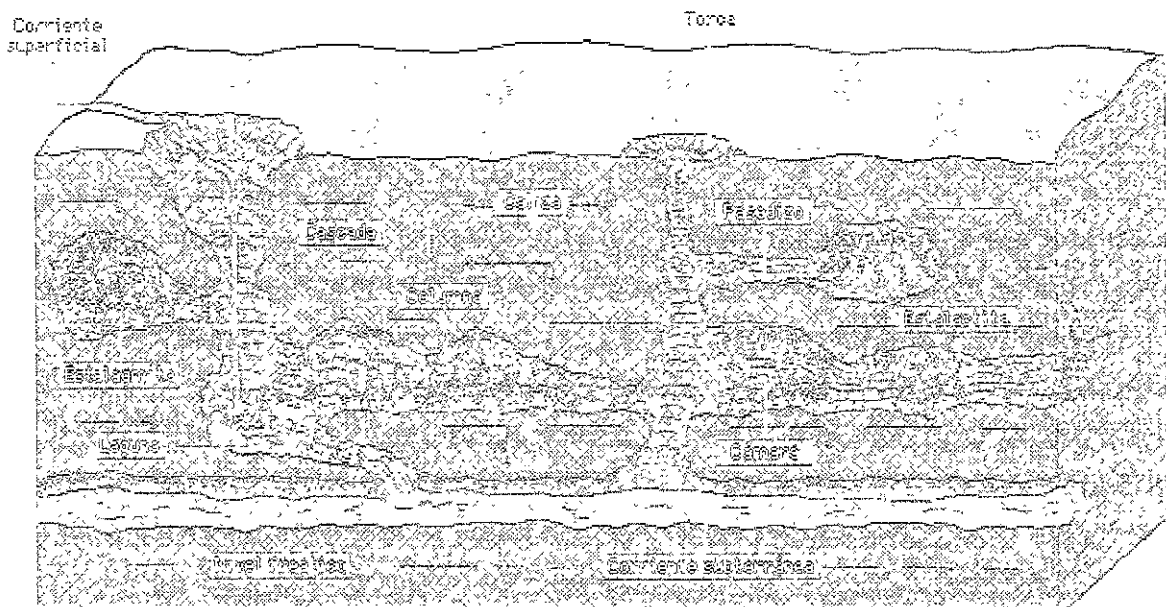


FUENTE: ENCARTA. (1999). Enciclopedia Interactiva. Microsoft.

MORFOLOGÍA CÁRSTICA

Cuando el agua se filtra y las corrientes superficiales desgastan a la roca pueden dar origen a laberintos subterráneos. El agua en su recorrido desde su forma como lluvia puede absorber dióxido de carbono de la atmósfera, las rocas o suelos que reaccionan con el agua y forman ácido carbónico o carbonato de calcio, cuyo efecto sobre la roca caliza, es el de disolverla y transportarla en disolución, depositándola en formaciones que reciben el nombre de estalactitas y estalagmitas, caracterizaciones de una cueva. Asimismo el viento ocasiona la formación de cuevas pequeñas, fenómeno que se presenta la mayoría de las veces en zonas desérticas o semi-desérticas. ⁽²⁰⁾

Figura 1.3.5.b. Morfología Cárstica



FUENTE: Encarta, op cit.

1.4. CENSO DE APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS

Consisten en cuantificar y caracterizar los diversos aprovechamientos con el propósito de establecer cualquier indicio superficial de agua subterránea, así como la calidad de la misma.

Con el apoyo de la información disponible, topográfica, geológica, fotografías aéreas, entre otros, se establece el área de estudio localizando la zona de interés y sus accesos. Posteriormente, con la ayuda de un guía se identifica la ubicación de pozos, norias y manantiales, capturando la siguiente información:

- a) Para pozos y norias: localización, profundidad del pozo, diámetro, nivel dinámico, tipo de construcción, descripción de las formaciones de roca, datos relacionados con la operación del pozo o noria, así como algunos parámetros someros que determinan la calidad del agua como sólidos totales disueltos (STD), conductividad eléctrica y temperatura (°C). En lo posible se debe contar con un número suficiente de pozos y/o norias para garantizar que la información de la zona de estudio sea lo más representativa.
- b) Para manantiales, lagos y acuíferos, se consideran los datos antes mencionados excepto el nivel estático, dinámico y el diámetro; asimismo se debe indicar si existe vegetación y de ser posible, acotar el ancho, largo y profundidad de los aprovechamientos.

La información anterior deberá completarse con el tipo de uso que se pretende dar al agua, ya sea para abrevaderos, industrial, riego, doméstico, además de otros. De igual forma, es necesario consultar a los propietarios y/o autoridades para solicitar los permisos correspondientes, con el objeto de disponer de datos confiables.

1.5. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

1.5.1. TIPOS DE ACUÍFEROS

ACUÍFERO: Unidad o formación geológica comprendida dentro de la zona de saturación, semejante a un recipiente o depósito subterráneo natural, puede estar formado por capas, estratos o cualquier otro material, que se caracterice por almacenar, filtrar, liberar y transmitir agua de buena calidad y en cantidades significativas a ser aprovechable mediante pozos y manantiales ⁽¹⁾ Dependiendo del tipo de rocas en cada lugar, las capas o estratos pueden contener bastantes poros y conectarse entre sí, para formar una red, permitiendo el movimiento de agua a través de ellos ⁽²⁰⁾ Algunos ejemplos de rocas que forman buenos acuíferos son: depósitos no consolidados de materiales sueltos, arenas entre 0.1 y mayores a 2.0 mm, gravas, combinación de gravas y arenas, areniscas porosas, calizas agrietadas y cársticas, rocas volcánicas vesiculares, aluviones, entre otros. ⁽¹⁶⁾

ACUÍCLUDO: Formación geológica capaz de almacenar agua en su interior, está constituida por horizontes impermeables y por lo tanto no es factible su explotación, porque el agua que almacena no la transmite en cantidades aceptables, por ejemplo: arcillas, limos, pizarra, lutita cementada, además de otros. ⁽¹⁾

ACUÍTARDO: Depósito de agua subterránea que almacena y transmite lentamente cantidades significativas de agua, por lo que no es recomendable para emplazamiento de captaciones de agua subterránea, ejemplos de acuítaridos son las arcillas limosas y/o arenosas ⁽²⁵⁾. Estos son significativos en un balance regional, ya que contribuyen a la recarga de los acuíferos en forma vertical. ⁽¹⁾

ACUÍFUGO: Unidad geológica que no contiene agua y por lo tanto no puede transmitirla, por ejemplo: rocas metamórficas y volcánicas no intemperizadas y compactas (esquistos, granito, basalto, otros). ⁽¹⁾

Los acuíferos se dividen en tres tipos:

1. ACUÍFERO CONFINADO O ARTESIANO

Es aquel que se encuentra entre dos acuícludos, es decir, entre dos capas de materiales impermeables (figura 1.5.1.a). El nivel de agua subterránea se ubica por encima del límite superior de la capa acuífera recibiendo el nombre de nivel o superficie piezométrica. ⁽¹⁾

2. ACUÍFERO SEMECONFINADO

Aquel que está limitado en su parte superior e inferior por acuítaridos que le proporcionan agua de su propio almacenamiento y se la transmiten desde acuíferos adyacentes, o bien se localiza entre un acuítarido (techo) y un acuícludo (piso) ⁽²⁵⁾. (Figura 1.5.1.b.) El nivel de agua subterránea se ubica por encima del límite superior de la capa acuífera recibiendo el nombre de nivel o superficie piezométrica. ⁽¹⁾

3. ACUÍFERO LIBRE O FREÁTICO (NO CONFINADO)

Esta formación en su parte inferior se apoya en un acuífudo y en su parte superior está compuesto por formaciones permeables hasta la superficie del terreno. Se caracteriza porque la superficie del agua se encuentra a la presión atmosférica (Figura 1.5.1.c). Esta superficie recibe el nombre de nivel de aguas freáticas (NAF) y de acuerdo a su posición en un instante dado define el espesor y carga hidráulica del acuífero. (2)

Figura 1.5.1.a.

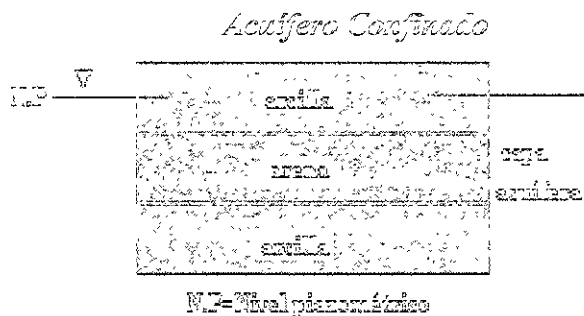


Figura 1.5.1.b.

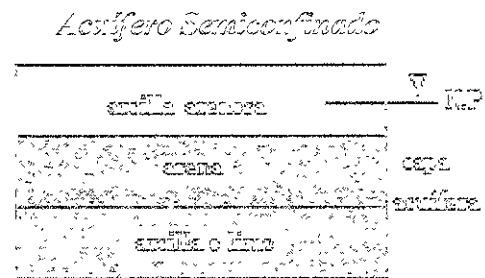
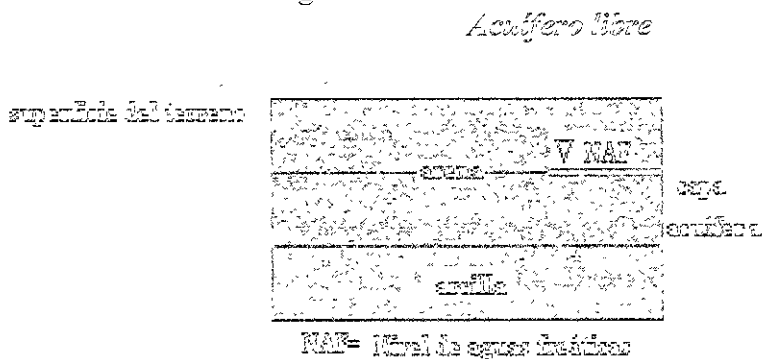


Figura 1.5.1.c.



FUENTE: Creado por el autor y modificado por el Ing. Jorge Esteban Athala Molano

1.5.2. CONTENIDO DE AGUA Y GRADO DE SATURACIÓN

La cantidad de agua que llena los poros o intersticios de un suelo o roca recibe el nombre de contenido de agua y se define como la relación entre la masa de agua y la sólida (25), es decir:

$$W = \frac{W_w \times 100}{W_s}$$

$$0\% \leq W \leq 100\%$$

Donde:

- W = Contenido de agua en %.
 W_w = Masa del agua presente en los vacíos del suelo o roca en gr., Kg, otros.
 W_s = Masa de los sólidos en gr, Kg, entre otros

Cuando los poros de un material se encuentran parcialmente llenos de agua, se dice que tiene un grado de saturación y se expresa como la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos. Se calcula con la siguiente expresión ⁽²⁵⁾:

$$G_s = \frac{V_w \times 100}{V_v} \quad 0\% \leq G_s \leq 100\%$$

Donde:

- V_w = Volumen de agua en cm^3 , m^3 , además de otros.
 V_v = Volumen de vacíos en cm^3 , m^3 , entre otros.
 G_s = Grado de saturación en %, si $G_s = 0\%$ no hay agua, si $G_s = 100\%$ están saturados de agua los poros de la roca (la porosidad (n) calculada representara el total de agua que llena los poros, o sea, $V_v = V_w$). ⁽¹⁾

1.5.3. RENDIMIENTO ESPECÍFICO (S_y)

Es definido como la cantidad de agua cedida de un material o formación saturada que puede obtenerse por volumen unitario, cuando se libera y escapa por efecto de la gravedad. Se obtiene con la siguiente expresión ⁽²⁸⁾:

$$S_y = \frac{V_{wL}}{V_T}$$

Donde:

- V_{wL} = Volumen de agua liberada en m^3 .
 V_T = Volumen total en m^3 .
 S_y = Rendimiento específico adimensional.

El rendimiento específico es representativo del volumen de agua que se puede extraer mediante la captación. Es aplicable para acuíferos libres. ⁽³⁹⁾

1.5.4. RETENCIÓN ESPECÍFICA

Recibe el nombre de retención específica, la capacidad que tienen las rocas o materiales para retener el agua en contra de la acción de la fuerza de gravedad por volumen unitario ⁽³⁸⁾ El parámetro anterior se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_r = \frac{V_R}{V_T}$$

Donde

V_R = Volumen de agua retenida en m^3

V_T = Volumen total en m^3 .

S_r = Retención específica adimensional.

1.3.5. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S)

Coefficiente de Almacenamiento Específico (S_s): cantidad de agua que cede y/o toma un volumen unitario de material confinado cuando desciende una unidad el nivel del agua, regularmente se da en unidades de $1/m$.⁽¹⁷⁾

Coefficiente de almacenamiento (S). es definido como la cantidad de agua que libera y/o toma un acuífero, en todo su espesor, por unidad de área cuando se da un cambio unitario de carga hidráulica.⁽²⁸⁾

El coeficiente de almacenamiento varía entre 0.00001 – 0.001 para acuíferos confinados y de 0.01 a 0.35 para acuíferos libres. Aporta información sobre la cantidad de agua que puede ser obtenida por medio de bombeo o drenaje.⁽²⁸⁾

Las ecuaciones para obtener el coeficiente de almacenamiento son⁽¹⁷⁾:

1. Para acuíferos libres

$$S = S_y$$

2. Para acuíferos confinados

$$S = S_s \times b$$

Donde:

S= Coeficiente de almacenamiento (adimensional)

S_y = Rendimiento específico(adimensional)

S_s = Coeficiente de almacenamiento específico en $1/m$.

b= Espesor del acuífero confinado en m.

Cabe señalar que entre más compresible sea un material, mayor será la cantidad de agua que libere al consolidarse.⁽¹⁷⁾

**1.5.6. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA
(COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD "K")**

La conductividad hidráulica es la cantidad de agua que circula a través de una sección de área unitaria normal al sentido del flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario. Tiene unidades de velocidad (m/s, m/día) y depende de las características del medio y de las propiedades del fluido. ⁽¹⁸⁾ Por ejemplo:

El agua fría circula más lentamente que la caliente, por ser menos viscosa esta última. ⁽¹⁸⁾

CÁLCULO DE PRUEBAS TIPO LEFRANC

La clasificación del coeficiente de permeabilidad (conductividad hidráulica (K)) se presenta en la siguiente tabla 1.5.6.a.

TABLA 1.5.6.a. CLASIFICACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Permeabilidad (K) en cm/s	Clasificación
$\leq 10^{-6}$	Material impermeable (No conductivo)
de 1.00 a 9.99×10^{-5}	Material poco permeable (Poco conductivo)
de 1.00 a 9.99×10^{-4}	Material permeable (Conductivo)
de 1.00 a 9.99×10^{-3}	Material muy permeable (Muy conductivo)
$\geq 10^{-2}$	Material altamente permeable (Altamente conductivo)

FUENTE: CFE. (1996). Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Realización de Pruebas Lefranc. Manual de Circulación Interna de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Guía CFE 10000-73. México. 61 pp.

Con los datos obtenidos en campo se procede a llenar el formato de cálculo presentado en paginas anteriores.

Para obtener las variables A, C, y K se emplean las siguientes fórmulas ⁽¹⁰⁾:

$$A = \frac{3.1416 (D^2)}{4} \dots \dots \dots 1.5.6.a.$$

$$C = 0.366 \log. \left(\frac{L + (L^2 + D^2)^{1/2}}{D} \right) / L \dots \dots \dots 1.5.6.b.$$

$$K=2.3 (CA/t)(\log (H_1/H_2)) \dots \dots \dots 1.5.6.c$$

Donde:

- A= área de sección circular del tramo en m².
- D= diámetro de la perforación en m.
- C= constante en l/m.
- L= longitud del tramo de prueba en m.
- K= conductividad hidráulica en cm/s.
- H₁= carga hidráulica en el tiempo t₁ en m.
- H₂= carga hidráulica en el tiempo t₂ en m.
- t = tiempo en segundos.

1.5.7. TRANSMISIVIDAD (T)

Por definición, es la cantidad de agua que se filtra a través de una sección vertical del acuífero de un metro de ancho y altura igual al espesor saturado o manto permeable bajo un gradiente hidráulico unitario. Parámetro que indica cuanta agua se mueve a través de la formación ⁽¹⁷⁾. Se estima a partir de la conductividad hidráulica de los materiales que conforman el acuífero y/o las pruebas de bombeo. ⁽¹⁶⁾

La Transmisividad se obtiene con la siguiente fórmula ⁽²⁸⁾:

$$T = K \times b$$

Donde:

- T = Transmisividad en cm² / s, m² / día o m³ / hrs. / m de ancho del acuífero.
- K = Conductividad Hidráulica en cm/s, m/s o m/día.
- b = Espesor del acuífero en cm o m.

Sí T < 0.50 m³ / hora / m el acuífero puede suministrar agua para usos domésticos o similares o en caso de T ≥ 5.00 m³ / hora / m para propósitos industriales, municipales de riego u otros. ⁽²⁸⁾

Por medio de la Transmisividad se determina el rendimiento de las captaciones de agua. ⁽¹⁷⁾

1.6. MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

1.6.1. LEY DE DARCY

GRADIENTE HIDRÁULICO - Se define como la pérdida de carga hidráulica que se presenta por longitud de trayectoria del flujo subterráneo, se obtiene con la siguiente ecuación ⁽²⁵⁾:

$$i = (H_1 - H_2) / L$$

Donde:

i = Gradiente hidráulico, adimensional.

H_1 = Carga hidráulica inicial en m.

H_2 = Carga hidráulica final en m.

L = Longitud o distancia entre los puntos inicial y final en m.

LEY DE DARCY

La velocidad aparente con la que circula un fluido a través de un medio poroso se conoce como velocidad de Darcy, se obtiene con la fórmula ⁽¹⁸⁾:

$$V = K \times i$$

Donde:

V = Velocidad aparente (Darcy) de flujo en m/s.

K = Coeficiente de permeabilidad en m/s.

La ley de Darcy también puede expresarse en función del caudal (Q) que circula a través de un cilindro circular de sección constante A y longitud L mediante la expresión ⁽²⁵⁾:

$$Q = V \times A, \text{ pero } V = K \times i$$

$$Q = A \times K \times i, \text{ es decir,}$$

$$Q = A \times K \times (H_1 - H_2) / L$$

Donde:

Q = Caudal o gasto en m^3 / s .

A = Área de la sección en m^2 .

VALIDEZ DE LA LEY DE DARCY

Es aplicable al régimen de flujo laminar; representa un número de poros sin tomar en cuenta el comportamiento del agua en cada poro. La velocidad de flujo para un régimen turbulento es en base al número de Reynolds y se obtiene con la ecuación ⁽¹⁷⁾:

$$Nr = V \times d_m / \nu$$

Donde:

Nr = Número de Reynolds, adimensional.

V = Velocidad de flujo (ley de Darcy) en m/s.

d_m = Diámetro medio de los granos en m.

ν = Viscosidad cinemática del fluido en m²/s

Si Nr es < 1 el régimen es laminar, Nr > 10 el régimen es turbulento, 5 < Nr < 10 transición entre el régimen laminar y turbulento.

Regularmente el flujo a través de los materiales es laminar y por lo tanto la Ley de Darcy se puede aplicar ⁽²⁵⁾.

1.6.2. VELOCIDAD DE FLUJO

El agua se mueve en el acuífero de las zonas de recarga a las de descarga, siguiendo trayectorias de menor resistencia y a una velocidad que depende de la permeabilidad de las rocas y del gradiente hidráulico. La velocidad puede variar desde unos cuantos centímetros por año, como sucede en las arcillas, o kilómetros, como en las rocas volcánicas y calizas. ⁽¹⁷⁾

El agua circula a través de espacios vacíos como son: poros, fisuras, fracturas, entre otros. ⁽³²⁾

1.6.3. DIRECCIÓN DE FLUJO

Se establece durante la piezometría, para ello se requieren los siguientes datos:

1. Nombre del piezómetro,
2. Profundidad del nivel freático,
3. Altura del brocal,
4. Coordenadas,
5. Topografía del terreno y
6. Tipo de material que conforma el subsuelo.

Para determinar la dirección de flujo se coloca un conjunto de piezómetros en diversos puntos estratégicos alrededor del pozo principal (piezometría).

1.6.4. ECUACIÓN DE BALANCE DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Ecuación de Balance de Agua Subterránea (Principio de Conservación de la Masa) ⁽¹²⁾:

Variación de almacenamiento = Recarga - descarga, es decir,

$$G_y + R_v + G_x - D - B - E_v = (\pm) \Delta v$$

Donde:

G_y = Entrada horizontal del flujo subterráneo.

R_v = Entrada vertical de flujo subterráneo.

G_x = Descarga de flujo horizontal.

D = Descarga hacia un cuerpo superficial como ríos, lagos, entre otros.

B = Extracción de agua subterránea por bombeo.

E_v = Evapotranspiración.

Δv = Cambio en el volumen de agua almacenada.

Las variables están referidas a una escala de tiempo analizada según la información disponible y las necesidades del estudio, que pueden ser: periodo de estiaje y lluvia en un año y/o a varios años. ⁽¹⁾

1.6.5. PIEZOMETRÍA

Los piezómetros o pozos de observación se colocan donde se hizo el barrenado; generalmente se instalan en grupos de cuatro filas según los ejes de una cruz con centro en el pozo de bombeo (de dos a cuatro piezómetros por línea), con el propósito de conocer la dirección de flujo y las condiciones del acuífero, midiendo los diferentes niveles de variación del agua subterránea ⁽¹⁶⁾. Se sueña la parte inferior o la base del piezómetro, con el propósito de evitar la introducción de material.

El proceso de medición (piezometría) consiste en introducir el cable de una sonda al interior del piezómetro y verificar que la punta haga contacto con el agua, este paso es detectado por la aguja de un multímetro colocado en la sonda. Se cierra el circuito cuando se estabiliza el desplazamiento de izquierda a derecha de la aguja. Posteriormente se toma la lectura, para ello se retira el cable de la sonda del interior del piezómetro y se mide su longitud, con lo que se obtiene la profundidad del nivel freático, estático, dinámico u otro, dependiendo de los objetivos del proyecto.

Es importante señalar que el cable de la sonda debe estar marcado a cada metro en toda su longitud y que ésta debe ser mayor que la profundidad de los pozos de observación o de bombeo, para facilitar la medición durante la piezometría, pruebas de permeabilidad, desarrollo, aforo y bombeo.

Durante la piezometría, se debe medir con sencillez con un margen de error menor que un centímetro por lo que se debe de realizar con precisión y rapidez. Los descensos en los puntos de observación cercanos al pozo principal son grandes, pero en los alejados puede ser mínima. ⁽¹⁶⁾

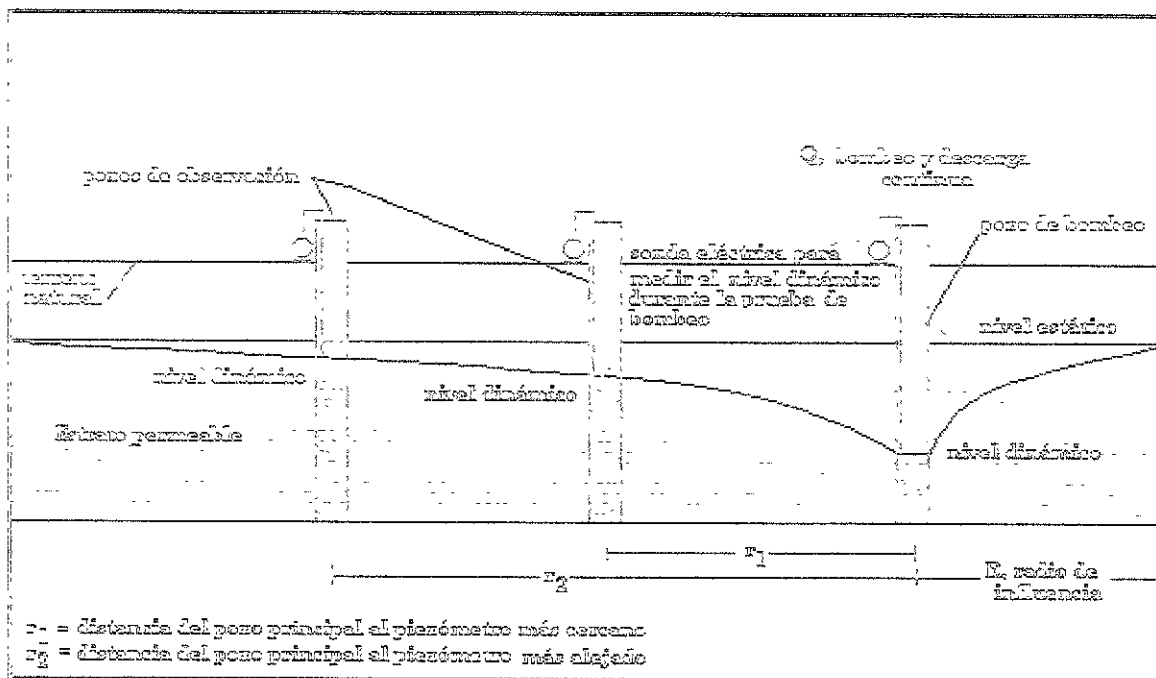
Los piezómetros pueden tener ranuras verticales traslapadas con el propósito de que el agua de la formación acuífera se filtre y se establezca el nivel freático en el interior del piezómetro, dependiendo del tamaño de las ranuras será el tiempo de respuesta (área de infiltración), con ello se busca que el agua pueda fluir fácilmente hacia el piezómetro (comunicación personal del Ing. Hector Moreno Alfaro).

El diámetro del piezómetro esta en función de factores económicos, uso provisional o definitivo y de la profundidad, pues entre mayor diámetro es más estable, pero tarda más en indicar sobre el nivel de aguas freáticas, es decir su tiempo de respuesta es mayor. ⁽¹⁶⁾

1.6.6. PRUEBAS DE BOMBEO

La prueba de bombeo (véase capítulo 5) consiste en bombear un caudal constante (Q) en forma continua en el pozo principal o de prueba, simultáneamente se requiere efectuar la piezometría en cada pozo de observación a ciertos intervalos de tiempo para registrar los niveles de abatimiento (figura 1.6.6), con el propósito de conocer el comportamiento del acuífero y la eficiencia del pozo. ⁽²⁵⁾

Figura 1.6.6. Método del Pozo de bombeo



FUENTE: ITURBE ARGÜELLES, R. y SILVA MARTÍNEZ, A. E. (1992). Agua Subterránea y contaminación. Series del Instituto de Ingeniería No. 539. UNAM. 54 pp., modificado por el autor.

1.6.6.1. MÉTODO DE THEIS

Es un método gráfico de superposición de curvas logarítmicas, con el cual se puede predecir el abatimiento en cualquier tiempo después de haber iniciado la prueba de bombeo ⁽²⁸⁾. No se necesita esperar a que los niveles del pozo se hallan estabilizado para determinar la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. Parte de considerar las siguientes hipótesis: ⁽¹⁾

- a) El acuífero no recibe recarga.
- b) El acuífero tiene permeabilidad uniforme tanto horizontal como vertical.
- c) La formación acuífera es de espesor constante.
- d) Al abatirse la superficie piezométrica el agua retirada del almacenamiento es liberada instantáneamente.
- e) El pozo de bombeo recibe agua del espesor saturado del acuífero y es totalmente penetrante.

Ecuación de Theis ⁽¹⁾

$$s = (Q / 4\pi T) W(u)$$

Donde:

s = Abatimiento en m.

Q = Caudal de bombeo constante en m^3/h .

r = Distancia del centro del pozo de bombeo al punto en que se mide el abatimiento en m.

$W(u)$ = Función de pozo.

u = argumento = $(r^2 S) / (4 T t)$

S = Coeficiente de almacenamiento, adimensional.

T = Coeficiente de transmisividad en $m^3/hr/m$ o m^2/hr .

t = tiempo transcurrido desde que se inicia el bombeo en hrs.

Si T y S se conocen, se puede obtener cualquier otra variable de la ecuación de Theis ⁽²⁸⁾. $W(u)$ se obtiene de la tabla 1.6.6.1 (mostrada en la página siguiente), correspondiente al valor de (u) .

1.6.6.2. MÉTODO DE JACOB

Método gráfico de Theis simplificado a una curva semilogarítmica. C. E. Jacob consideró que dicha fórmula podía simplificarse por ⁽²⁸⁾:

$$s = (0.183Q/T) (\log (2.25Tt / r^2 S))$$

siempre y cuando (u) fuese muy pequeña ($u \leq 0.01$).

El coeficiente de transmisividad se obtiene con la fórmula:

$$T = 0.183Q / \Delta s$$

De modo que:

Δs = Pendiente de la recta (diferencia de abatimientos entre dos valores de tiempo cuya relación sea 10 en la escala logarítmica – ciclo logarítmico).

El coeficiente de almacenamiento se calcula con la ecuación:

$$S = 2.25 T t_0 / r^2$$

t_0 = Tiempo que corresponde a la intersección de la prolongación de la recta del gráfico, con el eje del abatimiento nulo, en minutos, horas, entre otros.

Si el caudal de bombeo es constante: T y S se mantienen fijos. ⁽²⁸⁾

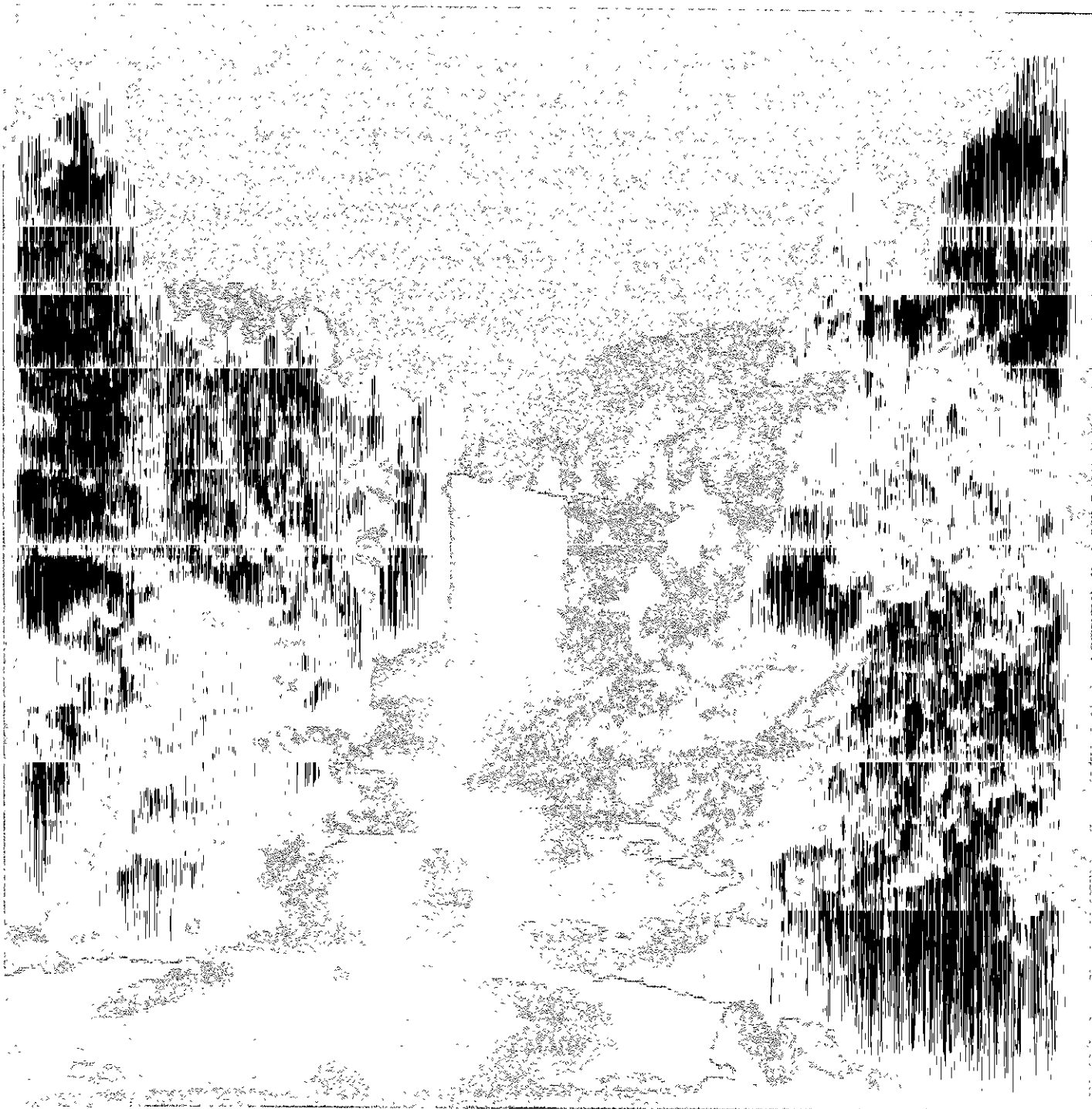
TABLA 1.6.6.1. Valores de la función de pozo $W(u)$ correspondientes a diferentes valores de u .

u	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
$\times 1$	0.219	0.049	0.013	0.0038	0.0011	0.00036	0.00012	0.000038	0.000012
$\times 10^{-1}$	1.824	1.22	0.91	0.70	0.56	0.45	0.37	0.31	0.26
$\times 10^{-2}$	4.04	3.35	2.96	2.68	2.47	2.30	2.15	2.03	1.92
$\times 10^{-3}$	6.33	5.64	5.23	4.95	4.73	4.54	4.39	4.26	4.14
$\times 10^{-4}$	8.63	7.94	7.53	7.25	7.02	6.84	6.69	6.55	6.44
$\times 10^{-5}$	10.94	10.24	9.84	9.55	9.33	9.14	8.99	8.86	8.74
$\times 10^{-6}$	13.24	12.55	12.14	11.85	11.63	11.45	11.29	11.16	11.04
$\times 10^{-7}$	15.54	14.85	14.44	14.15	13.93	13.75	13.60	13.46	13.34
$\times 10^{-8}$	17.84	17.15	16.74	16.46	16.23	16.05	15.90	15.76	15.65
$\times 10^{-9}$	20.15	19.45	19.05	18.76	18.54	18.35	18.20	18.07	17.95
$\times 10^{-10}$	22.45	21.76	21.35	21.06	20.84	20.66	20.50	20.37	20.25
$\times 10^{-11}$	24.75	24.06	23.65	23.36	23.14	22.96	22.81	22.67	22.55
$\times 10^{-12}$	27.05	26.36	25.96	25.67	25.44	25.26	25.11	24.97	24.86
$\times 10^{-13}$	29.36	28.66	28.26	27.97	27.75	27.56	27.41	27.28	27.16
$\times 10^{-14}$	31.66	30.97	30.56	30.27	30.05	29.87	29.71	29.58	29.46
$\times 10^{-15}$	33.96	33.27	32.86	32.58	32.35	32.17	32.02	31.88	31.76

FUENTE: BRIGGS, G.F. (1980). Developing Ground Water Resources. UOP JOHNSON. U.S.A.

Capítulo 2

Calidad del agua subterránea



CAPÍTULO 2. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

2.1. TOMA DE MUESTRAS

Los objetivos de los muestreos de agua ⁽⁴²⁾ subterránea son:

- a) Aportar datos característicos de la composición del agua.
- b) Informar cómo esos datos característicos varían en función del tiempo.

Los puntos anteriores deben implicar un costo mínimo, pues en caso contrario ésta podría ser una limitante.

El muestreo se efectúa en campo durante la prueba de bombeo. La muestra de agua será llevada a las cercanías del proyecto, donde el químico realizará algunas determinaciones de carácter preliminar, para posteriormente trasladar la muestra a laboratorio, donde será sometida a análisis apropiados con el propósito de conocer su composición y poder comparar los resultados obtenidos con la normatividad vigente a fin de saber si cumple con los límites establecidos para uso y consumo humano. Cabe mencionar que entre más contaminada se encuentre el agua, el tiempo para la toma de muestras debe de ser más corto, además los análisis se deben efectuar en forma inmediata después de la recolección de las muestras, pues entre más rápido se ejecuten, la información acerca de la calidad del agua será más aceptable. ⁽⁴²⁾

Un conjunto de muestras de agua de una zona de estudio es más representativo que una sola para su análisis, pues con ello se obtiene información suficiente y de buena calidad. ⁽¹³⁾

2.2. ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICOS Y BACTERIOLÓGICOS

En este subtema no se describen procedimientos de laboratorio, sólo se hace referencia a la importancia de éstos, así como la información que puedan proporcionar.

El análisis de agua en laboratorio aporta información básica de su calidad porque permite determinar sus componentes. Los análisis que se realizan a las muestras de agua son parciales, es decir, se efectúan unas cuantas determinaciones que son las que interesan, para el uso particular en que se proyecta utilizarla, en donde sólo es importante conocer cierto tipo de sustancias contenidas en la misma. Los análisis pueden resultar caros, debido a las siguientes razones: frecuencia, número de muestras, tipo de determinaciones por realizar e instrumentos disponibles. ⁽¹³⁾

Los análisis del agua arrojan una serie de resultados que podrán compararse con los establecidos en la normatividad vigente, algunos de ellos son: sólidos totales disueltos (STD), potencial hidrógeno (pH), temperatura, color, sabor, olor, alcalinidad, acidez, dureza, oxígeno disuelto (OD), cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio), aniones (sulfato, cloruro, carbonato, bicarbonato y nitrato), conductividad eléctrica, bacterias (coliformes totales y coliformes fecales), entre otros.

2.3. CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD

2.3.1. CALIDAD FÍSICA

Turbiedad, sólidos, cantidad de sales disueltas y soluciones diluidas, se determinan a través de métodos analíticos en laboratorio, mientras que el color, sabor y olor, por medio de los sentidos. ⁽⁴²⁾

Generalmente el agua subterránea es incolora, clara, con poca o ninguna sustancia en suspensión y tiene una temperatura relativamente constante. Desde un enfoque físico, el agua subterránea rara vez requiere de un tratamiento para utilizarse, a excepción de que esté interconectada hidráulicamente con aguas superficiales a través de aberturas como fisuras y canales de disolución, o intersticios de algunas gravas. En tales situaciones son detectables los sabores y olores en descomposición. ⁽¹⁸⁾

2.3.2. CALIDAD BACTERIOLÓGICA

Las aguas subterráneas generalmente están exentas de microbios, virus o bacterias; en caso de existir, sólo son de interés aquéllas que pudieran causar enfermedades al ser humano. El agua subterránea no es el medio propicio para el desarrollo de estos organismos, sino un medio transmisor. ⁽⁴²⁾

La construcción inadecuada de un pozo puede contaminar las aguas subterráneas. ⁽⁴⁷⁾

En el análisis de laboratorio se cuantifica el número de bacterias (coliformes totales y coliformes fecales) presentes en una muestra de agua con el propósito de comparar la cantidad de ellas con la normatividad vigente. ⁽¹³⁾

2.3.3. CALIDAD QUÍMICA

El resultado de la investigación científica ha demostrado que la presencia de compuestos y elementos químicos puede ser nociva para la salud. ⁽¹⁵⁾

Los diversos usos que se le puedan dar a agua subterránea dependerán del contenido de minerales que tenga. ⁽¹⁰⁾

El contenido de minerales en el agua se expresa comúnmente en partes por millón (ppm), es decir, el número de partes por el peso del mineral encontrado en un millón de partes de la solución; o bien de otra forma, mg/l, será el número de miligramos del mineral encontrado en un litro de agua ⁽⁴²⁾

NOTA: Las definiciones correspondientes al subtema 2.3, así como los límites permisibles, se localizan en el Anexo 1 de este Capítulo.

2.4. CLASIFICACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Las aguas subterráneas son clasificadas por diversos usos, según el contenido mineralógico que poseen. Se proporciona información general estableciéndose en vista de su posible uso doméstico, agrícola o industrial, estando en función del lugar y disponibilidad del líquido. ⁽⁴²⁾

Las normas que determinan que el agua sea de calidad aceptable, dependerán de los criterios que rigen para cada tipo de actividad o uso particular. Se muestran algunas especificaciones más importantes respecto a la calidad del agua para usos potables, industriales, agrícolas y ganaderos.

2.4.1. LEGISLACIÓN DEL AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO - POTABILIDAD

Normatividad Vigente:

Según la Secretaría de Salud a través del Diario Oficial de la Federación publicado el día 15 de agosto de 1994, es necesario garantizar agua de calidad aceptable para uso y consumo humano, para evitar enfermedades causadas por este líquido, fijando los parámetros bacteriológicos, físicos, químicos, organolépticos y elementos radioactivos.

Los límites permisibles y definiciones decretadas por la Secretaría de Salud se muestran en el ANEXO 1; éstos podrán ser comparados con los resultados obtenidos de los análisis de la muestra de agua en laboratorio a fin de establecer si se cumple con los requerimientos de potabilidad para uso y consumo humano.

2.4.2. USOS AGRÍCOLAS

Para propósitos de riego se toma en cuenta la concentración de sólidos totales disueltos, concentraciones individuales, algunas relaciones de los componentes, naturaleza y composición del suelo, topografía del terreno, tipo de cosecha y clima de la región, y finalmente la posición del nivel freático. ⁽¹³⁾

El boro es importante para la nutrición de las plantas, pero un pequeño exceso resulta nocivo para ciertos vegetales. ⁽¹³⁾

En la tabla 2.4.2.a y 2.4.2 b se muestra la clasificación del agua según la tolerancia de los cultivos a ciertas concentraciones de boro en p.p.m (Wilcox 1955):

TABLA 2.4.2.a. CLASIFICACIÓN DEL AGUA SEGÚN TOLERANCIA DE LOS CULTIVOS A LAS CONCENTRACIONES DE BORO (en ppm).

CALIDAD	CULTIVOS SENSIBLES	CULTIVOS SEMI-TOLERANTES	CULTIVOS TOLERANTES
Excelente	0.33	0.67	1.00
Buena	0.33 - 0.67	0.67 - 1.33	1.00 - 2.00
Permisible	0.67 - 1.00	1.33 - 2.00	2.00 - 3.00
Dudable	1.00 - 1.25	2.00 - 2.50	3.00 - 3.75
No Usable	1.25	2.50	3.75

FUENTE: CORDOVA GONZÁLEZ, A. y SAENZ TOVAR, G. (1980). Hidrogeoquímica y su aplicación en el estudio geohidrológico del Valle de Chihuahua. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Chihuahua. UACH. México. 84 pp.

TABLA 2.4.2.5. GRADO DE SENSIBILIDAD DE LOS CULTIVOS AL BORO

TOLERANTES	SEMITOLERANTES	SENSIBLES
Espárragos	Cirasoí	Nuez
Palma datilera	Papa	Nogal Negro
Azucarera	Algodón	Nogal persa
A alfalfa	Jitomate	Ciruelo
Gladiola	Rábano	Peral
Habas	Chicharo	Manzano
Cebolla	Rosa	Uva
Coi	Olivo	Nispero
Lechuga	Cebada	Cereza
Zanahoria	Trigo	Chabacano
	Maiz	Durazno
	Avena	Aguacate
	Calabacita	Toronja
	Frijol	Limonero
	Camote	Naranja

FUENTE: CÓRDOVA GONZÁLEZ, A. y SAENZ TOVAR, G. op. cit.

Cultivos Sensibles: hasta 0.67 p.p.m.

Cultivos Semi - tolerantes: entre 0.67 y 1.00 p.p.m.

Cultivos Tolerantes: entre 1.00 y 3.75 p.p.m.

2.4.3. USOS PARA ABREVADEROS

Los valores máximos permisibles de agua para ser utilizada por animales están en función de los sólidos totales disueltos ⁽⁴²⁾ mostrados en la Tabla 2.4.3:

TABLA 2.4.3. TOLERANCIA DE ANIMALES DE GRANJA A LOS SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (STD) EN EL AGUA.

VALORES LÍMITES DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (STD) PARA USO DE ABREVADEROS	
ANIMALES	CONCENTRACIÓN TOLERABLE DE STD
Aves	2,860 p.p.m.
Cerdos	4,290 p.p.m.
Caballos	6,430 p.p.m.
Ganado Lechero	7,150 p.p.m.
Ganado de Carne	10,100 p.p.m.
Borregos	12,900 p.p.m.

FUENTE: CÓRDOVA GONZÁLEZ, A. y SAENZ TOVAR, G. op. cit.

2.4.4. USOS INDUSTRIALES

Los procesos industriales requieren agua de menor calidad y las normas para este uso son variables, debido a la diversificación de los usos para el agua. ⁽⁴³⁾

La Tabla 2.4.4 resume las especificaciones de algunas industrias en donde el agua es un factor importante.

TABLA 2.4.4. LÍMITE DE CONSTITUYENTES EN EL AGUA PARA ALGUNAS INDUSTRIAS (en mg/l).

CONSTITUYENTE	INDUSTRIA TEXTIL	INDUSTRIA PAPELERA	DERIVADOS DEL PETRÓLEO
Si O ₂		50	
Fe	0.1	1.0	1.0
Mn	0.1	0.5	
Ca		20	75
Mg		12	30
CN	0.01		
pH	2.5-10.5	6-10	6-9
STD	100		100
Dureza	25	100	350
Cl		200	300

FUENTE: CÓRDOVA GONZÁLEZ, A. y SAENZ TOVAR, G. op. cit.

Dependiendo del uso que se requiera del agua, el químico considerará los parámetros convenientes a determinar, a fin de establecer su uso en base a las cantidades permisibles de elementos químicos, bacteriológicos, además de otros.

ANEXO

LEGISLACIÓN DEL AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO, DECRETADA POR LA SECRETARÍA DE SALUD EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO - LÍMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACIÓN"

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas.

Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega del consumidor, se debe someter a tratamientos de potabilización.

1. Objetivo y campo de aplicación.

Esta norma oficial mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cubrir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya en todo el territorio nacional.

2. Definiciones.

2.1. Ablandamiento: Proceso de remoción de los iones de calcio y magnesio, principales causantes de la dureza del agua.

2.2. Adsorción: Remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado, de forma tal que son separadas de la solución.

2.3. Agua para uso y consumo humano: Aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos al ser humano.

2.4. Características Radiactivas: Son aquellas resultantes de la presencia de elementos radiactivos.

2.5. Coagulación química: Adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración.

2.6. Contingencia: Situación de cambio imprevisto en las características del agua por contaminación externa, que ponga en riesgo la salud humana.

- 2.7.Desinfección: Destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos
- 2.8.Filtración: Remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada
- 2.9.Floculación: Aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de procesos mecánicos e hidráulicos.
- 2.10.Intercambio iónico: Proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético, con el que se pone en contacto.
- 2.11.Límite permisible: Concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.
- 2.12.Neutralización: Ajuste del pH, mediante la adición de agentes químicos básicos o ácidos al agua en su caso, con la finalidad de evitar incrustación o corrosión de materiales que puedan afectar su calidad.
- 2.13.Osmosis inversa: Proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltos en el agua, en el cual por medio de altas presiones se fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniéndose en dicha membrana los iones y moléculas de mayor tamaño.
- 2.14.Oxidación: Introducción de oxígeno en la molécula de ciertos compuestos para formar óxidos.
- 2.15.Potabilización: Conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua a fin de mejorar su calidad y hacerla apta para uso y consumo humano.
- 2.16.Precipitación: Proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas sedimentables del agua, por efecto gravitacional.
- 2.17.Sistema de abastecimiento: Conjunto intercomunicado o interconectado de fuentes, obras de captación, plantas cloradoras, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación, cárcamos de bombeo, líneas de conducción y red de distribución.

3. Límites permisibles de calidad del agua.

3.1. Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla A.

TABLA "A"

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Color Olor y Sabor	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto. Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

3.2. Límites permisibles de características bacteriológicas.

El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a lo establecido en la Tabla B.

TABLA "B"

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100ml 2 UFC/100ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100ml Cero UFC/100ml

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

3.3. Límites permisibles de características químicas

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla C. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

TABLA "C"

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (CN)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (CL)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (CaCO ₃)	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Hierro	0.30
Fluoruro	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos	10.00
Nitritos	0.05
Nitrógeno amoniacal	0.50
Potencial Hidrógeno (pH) en unidades de pH	6.5-8.5
Piaguicidas en microgramos/ I: Aldrin y dieldrin (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (Lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00

3.4. Límites permisibles de características radiactivas.

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla D. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro)

TABLA "D"

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Radiactividad alfa global	0.1
Radiactividad beta global	10

4. Tratamientos para la potabilización del agua.

La potabilización del agua proviene de una fuente particular, debe fundamentarse en estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad. Se deben aplicar los tratamientos específicos siguientes o los que resulten de las pruebas de tratabilidad, cuando los contaminantes biológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua enlistados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 3.

4.1. Contaminación biológica.

4.1.1. Bacterias, helmintos, protozoarios y virus.- Desinfección con cloro, compuestos de cloro, ozono o luz ultravioleta.

4.2. Características físicas y organolépticas.

4.2.1. Color, olor, sabor y turbiedad.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, adsorción en carbón activado u oxidación.

4.3. Constituyentes químicos.

4.3.1. Arsénico.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, intercambio iónico u ósmosis inversa.

4.3.2. Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo.- Intercambio iónico u ósmosis inversa.

4.3.3. Cloruros.- Intercambio iónico, ósmosis inversa o destilación.

4.3.4. Dureza.- Ablandamiento químico o intercambio iónico

4.3.5 Fenoles o compuestos fenólicos.- Adsorción en carbón activado u oxidación con ozono.

4.3.6 Hierro y/o manganeso.- Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.

4.3.7. Fluoruros.- Ósmosis inversa o coagulación química.

4.3.8. Materia orgánica.- Oxidación-filtración o adsorción en carbón activado.

4.3.9. Mercurio.- Proceso convencional: Coagulación-floculación-precipitación-filtración, cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 microgramos/l. Procesos especiales: en carbón activado granular y ósmosis inversa cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 microgramos/l; con carbón activado en polvo cuando la fuente de abastecimiento contenga más de 10 microgramos/l.

4.3.10. Nitratos y nitritos.- Intercambio iónico o coagulación-floculación-sedimentación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos

4.3.11. Nitrógeno amoniacal.-Coagulación-floculación-sedimentación-filtración, desgasificación o desorción en columna.

4.3.12. pH (potencial de hidrógeno).- Neutralización.

4.3.13. Plaguicidas.- Adsorción en carbón activado granular.

4.3.14. Sodio.- Intercambio iónico.

4.3.15. Sólidos disueltos totales.- Coagulación-floculación-sedimentación-filtración y/o intercambio iónico.

4.3.16. Sulfatos.- Intercambio iónico u ósmosis inversa.

4.3.17. Sustancias activas al azul de metileno.- Adsorción en carbón activado.

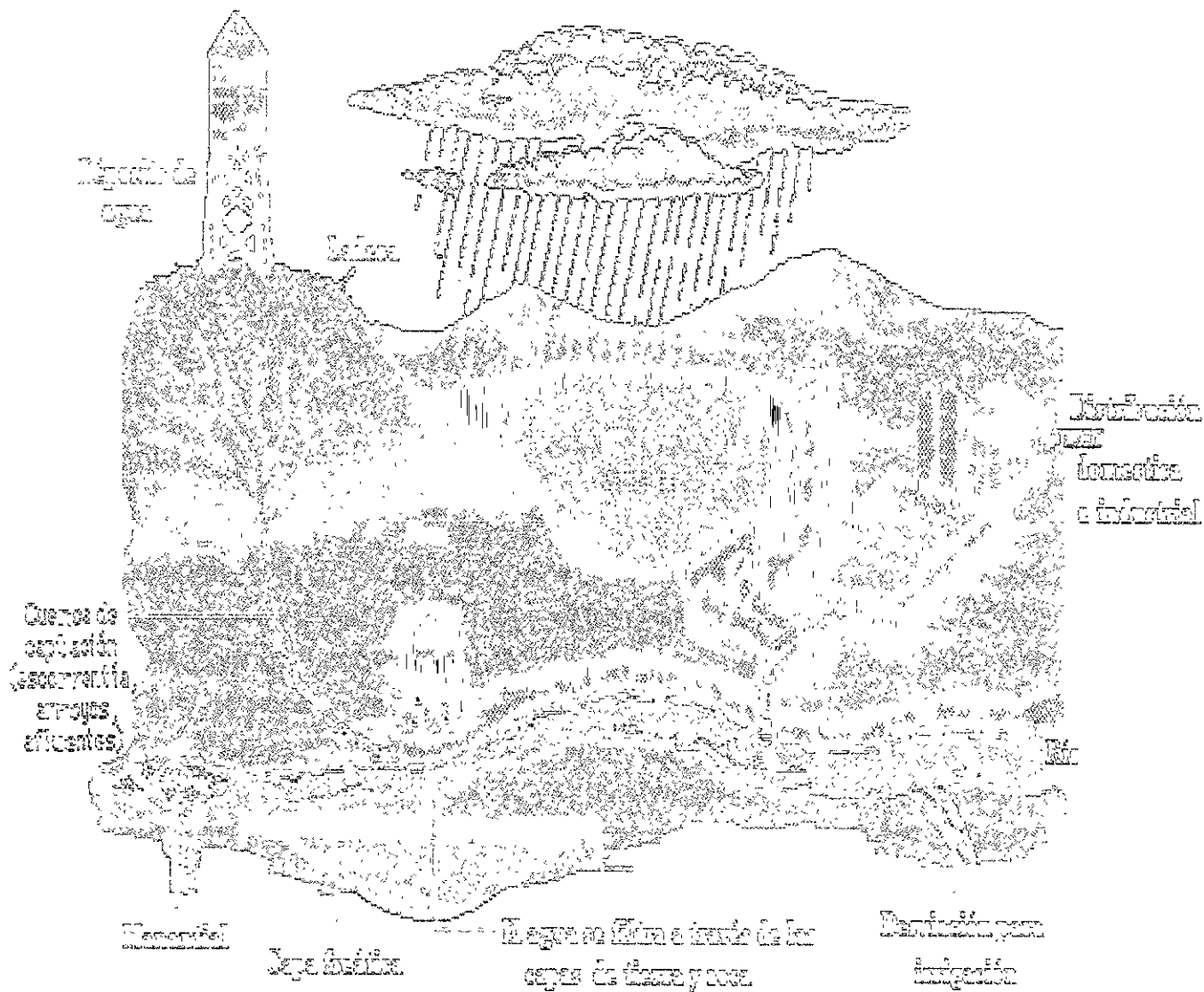
4.3.18. Trihalometanos.- Aireación u oxidación con ozono y adsorción en carbón activado granular.

4.3.19. Zinc.- Destilación o intercambio iónico.

4.3.20. En el caso de contingencia, resultado de la presencia de sustancias especificadas o no, se deben coordinar con la autoridad sanitaria competente, las autoridades locales, la Comisión Nacional del Agua, los responsables del abastecimiento y los particulares, instituciones públicas o empresas privadas involucrados en la contingencia, para determinar las acciones que se deben realizar con relación al abastecimiento de agua a la población.

Capítulo 3

Conceptos básicos para el diseño de la captación



CAPÍTULO 3. CONCEPTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE LA CAPTACIÓN

3.1. CONSIDERACIONES GENERALES DE POZOS

Para diseñar un pozo captación de aguas subterráneas se deben elegir las dimensiones adecuadas de éste, así como los materiales a emplear durante su construcción y terminado. Los objetivos que se buscan en el diseño de la captación son ⁽²¹⁾

- a) Larga vida de servicio
- b) Seguridad
- c) Costo razonable
- d) Agua de buena calidad.

Los aspectos antes citados deben manejarse en conjunto; con ello se busca el mayor rendimiento posible en el acuífero y la mayor eficiencia del pozo, por lo que es necesario conocer las características geohidrológicas según la ubicación del aprovechamiento, así como información estratigráfica y los valores tanto del coeficiente de almacenamiento (S), como del de transmisividad (T). ⁽¹⁸⁾

Los pozos se dividen en someros y profundos; los primeros permiten la explotación del agua freática, mientras que los segundos, son perforaciones para obtener agua subterránea, en este caso son de interés estos últimos. ⁽⁹⁾

Los principios básicos para el diseño de pozos en formaciones no consolidadas son los mismos que en roca (formaciones consolidadas). ⁽²⁷⁾

3.2. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA

La cantidad de agua empleada o demandada en diversas actividades (1990) son:

- a) *Actividades agrícolas.*

Los cultivos que requieren mayor cantidad de agua en México son:

Alefiñza	21,000 m ³ / año
Arroz	30,000 m ³ / año
Caña de azúcar	17,000 m ³ / año
Tomate	13,000 m ³ / año

FUENTE: MORALES ESCALANTE, R. (1990). Apuntes de Geohidrología. Facultad de Ingeniería. UNAM.

Otros datos similares se muestran en la siguiente tabla para diversos distritos de riego

Distrito de riego	Producto		
	Maíz m ³ / hectárea	Soya m ³ / hectárea	Sorgo m ³ / hectárea
Año Río Lerma, Gto.	5,500		5,500
Culiacán, Sin.	7,700	8,600	10,400
Cuatitzio - Teoacat, Mich.	5,000		3,900
Delicias, Chih.	8,400	13,300	6,700
Edo. de Morelos	7,800		
Morelia - Querendaro, Mich.	4,400		5,500
Río Blanco, Ver.	7,200		
Río Colorado, B.C.	4,300		8,900
Río Mayo, Son.	7,800	10,300	11,900
Río Yaqui, Son.	7,800	11,600	11,900
Región Lagunera, Durango.	9,900		7,600
Santo Domingo, B.C. Sur	5,200	7,700	4,500
Tehuantepec, Oax.	9,100		7,600
Valle del Fuerte, Sin.	7,000	7,400	2,500
Valsequillo, Pue.	1,220		

FUENTE: MORALES ESCALANTE, R. op cit.

b) *Uso pecuario.* Depende del tipo de ganado con que se cuente, por ejemplo:

Tipo de ganado	Dotación (lts/día)	Consumo anual (m ³)
Borregos	5	1.825
Caballos de campo	40	14.60
Caballos de establo	60	21.90
Cerdos de campo	15	5.475
Conejos	0.5	0.183
Gallinas	0.25	0.091
Palomas	0.13	0.047
Patos	0.70	0.256
Vacas de engorda	50	18.25

FUENTE: MORALES ESCALANTE, R. op cit.

- c) Uso Doméstico. Está en función del tamaño de la población o ciudad y del tipo de clima. Un índice aproximado se muestra en la siguiente tabla:

Número de Habitantes	Tipo de Clima		
	Cálido	Templado	Frío
	(dotaciones en lts/hab./día)		
2,500 ó menos	125	100	75
2,500 a 15,000	175	150	125
15,000 a 30,000	200	175	150
30,000 a 70,000	225	200	175
70,000 a 150,000	275	250	225
150,000 a 500,000	350	300	250
Más de 500,000	400	350	300

FUENTE: MORALES ESCALANTE, R. op.cit.

d) Uso Industrial.

La cantidad de agua demandada para algunas industrias se muestra a continuación:

Tipo de Industria	Demanda en m ³ /ton. de producto elaborado.
Productos aromáticos y jabones	10 - 40
Productos farmacéuticos	50 - 125
Aceites y grasas	20 - 100
Fabricación de papel	100 - 400
Cervezas y alcoholes	5 - 10
Fibras	500 - 100
Productos alimenticios	5 - 30
Pinturas y colorantes	20 - 40
Alcoholes	1 - 5

FUENTE: MORALES ESCALANTE, R. op.cit.

Mientras la cantidad de agua demandada por obrero es aproximadamente la siguiente, para algunas industrias:

Tipo de Industria	Demanda en m ³ /obrero/día
Fabricación de papel y cartón	22
Fabricación de artículos de piel y confección	0.05
Pinturas y colorantes	1.2
Fibras sintéticas y artificiales	10 - 19
Textil (algodón, fibras artificiales y sintéticas)	0.80
Textil (lanero)	1.10
Siderometalúrgica (Metales básicos)	4
Alimentación	1.5
Minería de potasa y sal	12.3

FUENTE: MORALES ESCALANTE, R. op.cit.

3.4.2. PROFUNDIDAD Y DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN

Profundidad del pozo.

Por lo regular se perfora hasta el fondo del acuífero porque la sección de captación del pozo será mayor debido a que ocupa todo el espesor del acuífero, lo que mejora su capacidad específica, además puede obtenerse mayor abatimiento disponible, permitiendo a la obra de captación rendir un caudal mayor; pero en ocasiones en la parte inferior del acuífero puede encontrarse agua de mala calidad, en tal situación se requiere que el pozo tenga una profundidad hasta el punto donde excluye esa agua. ⁽²⁶⁾

La profundidad también se puede obtener de los registros de otros pozos cercanos a la obra de captación (censos de aprovechamientos), perforación exploratoria, registros geofísicos, factores económicos y en función de las necesidades que requieran las industrias, la población, empresas, además de otras (comunicación personal del Ing. Mario Patricio Rodríguez Martínez).

Diámetro del pozo.

Está determinado por el ademe de la obra de captación.

3.4.3. ADEME

El diámetro (ademe) adecuado del pozo debe elegirse de tal forma que sea lo suficientemente amplio para alojar la bomba y contar con el espacio libre necesario para su instalación y mantenimiento. ⁽²⁷⁾

El diámetro del ademe ranurado requiere un espacio libre que asegure la eficiencia hidráulica del pozo y que permita la extracción e introducción de la bomba libremente (comunicación personal del Ing. Mario Patricio Rodríguez Martínez).

El ademe soporta las paredes del agujero de perforación, es decir, quedará sujeto a las presiones naturales del terreno, así como a la acción dinámica producida por el bombeo del pozo, es por ello que debe garantizar una resistencia adecuada. ⁽⁴⁵⁾

En función del gasto que se espera obtener, la tabla 3.4.3. muestra los diferentes diámetros que se pueden determinar para el ademe. ⁽²⁸⁾

TABLA 3.4.3.a. Diámetros recomendados para el pozo

Gasto esperado (l/s)	Diámetro nominal de razones de la bomba (cm)	Dimensión adecuada para el diámetro del ademe		Dimensión mínima para el diámetro del ademe	
		cm	pulgadas	cm	pulgadas
Menor que 6	10.2	15.24 di	6	12.70 di	5
5 - 11	12.7	20.32 di	8	15.24 di	6
10 - 22	15.2	25.40 di	10	20.32 di	8
20 - 44	20.3	30.50 di	12	25.40 di	10
30 - 60	25.4	35.60 de	14	30.50 di	12
50 - 115	30.5	40.64 de	16	35.60 di	14
75 - 190	35.6	50.80 de	20	40.64 de	16
125 - 240	40.6	61.00 de	24	50.80 de	20
190 - 380	50.8	76.20 de	30	61.00 de	24

*di = diámetro interior.

*de = diámetro exterior.

FUENTE: CHÁVEZ GULLÉN, R. et al. (1994). Perforación de Pozos. CNA/IMTA/Libro 5/3^a Sección/Geohidrología. México. 256 pp.

De acuerdo a los diámetros del tubo del ademe las máximas descargas son:

TABLA 3.4.3.b. Máximas descargas en función de la tubería de ademe.

Dimensión del ademe		Descarga máxima (l/s)
cm	pulgadas	
10.2	4	13
12.7	5	20
15.2	6	28
20.3	8	49
25.4	10	78
30.5	12	111
33.7	14	136
38.7	16	180
43.9	18	230
48.9	20	286
59.1	24	418

FUENTE: CHÁVEZ GULLÉN, R. et al. (1994). Perforación de Pozos. CNA/IMTA/Libro 5/3^a Sección/Geohidrología. México. 256 pp.

Dependiendo de las condiciones del terreno es posible tener derrumbes o colapsos que afecten a la obra de captación, para ello el espesor del ademe tiene la función de evitar tales situaciones; esto se logra incrementando el espesor del tubo ⁽²⁸⁾

Los materiales del ademe deben ser rígidos, tubulares, de fácil manejo, durables y resistentes. Para su elección se toman en cuenta: la profundidad del pozo, marco geológico, disponibilidad, tipo de perforación, entre otros. ⁽¹⁸⁾

En pozos aejados en materiales granulares y en formaciones consolidadas, la tubería de ademe suele estar formada por una parte de tubo ciego o liso y por el cedazo (rejilla o tubo filtro), que constituye la tubería de producción. ⁽⁴⁵⁾

El espesor de las tuberías de ademe se obtiene en función de la tabla 3.4.3.c.

TABLA 3.4.3.c. Espesores del ademe

Profundidad (m)	Espesor recomendado (cm)	
0 - 50	0.635	(1/4")
Menor que 100	0.794	(5/16")
Entre 100 y 200	0.952	(3/8")

FUENTE: VARGAS ALCÁNTARA, V. (1976). Técnicas y análisis de costos de pozos profundos. 1ª. Edición. Edit. Limusa, S.A de C.V. Noriega Editores. México. 514 pp.

Para obtener el espesor del ademe también suele emplearse la siguiente fórmula ⁽²¹⁾:

$$H = (28.64 \times 10^6) / ((D/t)((D/t) - 1)^2)$$

De modo que:

H= Longitud total de la tubería en m.

(D/t)= (diámetro exterior de la tubería/espesor de la tubería), adimensional.

En la práctica tanto los diámetros como los espesores de los ademes y cedazos deben de ajustarse a los existentes en el mercado.

Los materiales más empleados en la fabricación de ademes se muestran en la tabla 3.4.3.d.

TABLA 3.4.3.d. Materiales para la tubería de ademe.

Materiales	Características
Metálicos	<p>Si se encuentran expuestos largos periodos de tiempo debajo de la superficie y el agua subterránea está en contacto con el ademe, suele presentarse el fenómeno corrosivo, que en un largo tiempo afecta el funcionamiento y la eficiencia del pozo.</p> <p>Se caracterizan por ser rígidos. A la temperatura resultan ser más resistentes que los fluoropolímeros, son de alta resistencia a los esfuerzos ejercidos sobre éstos. Se fabrican de acero, acero de alta calidad, acero inoxidable y acero galvanizado.</p>
Termoplásticos	<p>No necesita protección contra aguas de composición química variable, costo reducido en su traslado e instalación, alta durabilidad en condiciones ambientales del agua subterránea, alta resistencia a la abrasión, poco mantenimiento, fácil acoplamiento durante su instalación, alta flexibilidad.</p> <p>Desventajas: Si están expuestos a los rayos del sol se hacen más frágiles, lo que ocasiona una disminución en su resistencia a los esfuerzos ejercidos sobre él. Suelen ser menos rígidos, más débiles y sensibles.</p> <p>Se fabrican de cloruro de polivinilo (PVC)</p>
Fluoropolímeros	<p>Presentan condiciones de alta resistencia al ataque químico y biológico, al intemperismo, a la oxidación, a las radiaciones ultravioletas, un coeficiente de fricción reducido y se pueden emplear en lugares donde la temperatura exceda a los 290° centígrados. Un ejemplo es el teflón. Son muy costosos.</p>

FUENTE: CHÁVEZ GULLÉN, R. et al. (1994). *Perforación de Pozos*. CNA/IMTA/Libro 5/3ª. Sección/Geohidrología. México. 256 pp.

Algunas empresas suministran tuberías de ademe en tramos de 3.05m, 6.10m y 12.20m, esto puede variar dependiendo del fabricante y de lo disponible en el mercado. Comúnmente los más empleados son los de 3.05m y 6.10m. ⁽⁴⁵⁾

TUBERÍAS DE CONTRA ADEME

Son lisas y se emplean en los trabajos de perforación para impedir derrumbes del brocal por las formaciones que constituyen las paredes del agujero (se presentan en casos en que las formaciones superficiales son tan poco cohesivas, que resulta muy difícil o imposible de controlar los derrumbes de las paredes de la perforación, por medio de los lodos de perforación, especialmente cuando las formaciones son de grano muy fino y el nivel freático se encuentra cerca de la superficie del terreno), ante tal situación se recurre a la instalación de tuberías de ademe especiales, perforando la parte insegura con un diámetro mayor del necesario, para instalar en ella una tubería que tendrá la finalidad de estabilizar el brocal del pozo, asegurando la integridad del equipo de perforación y facilitando las maniobras del personal, para así continuar perforando por su interior. A la tubería de contra ademe también se le conoce como conductor o contra pozo. ⁽⁴⁵⁾

Los diámetros, espesores y longitudes por emplearse, dependen del diseño del pozo y de la columna litológica descrita durante la perforación exploratoria. El contra ademe sirve como sello sanitario del pozo (comunicación personal del Ing. Mario Patricio Rodríguez Martínez).

3.4.4. SECCIÓN DE ADMISIÓN

Con la ayuda del filtro la rejilla tiene la finalidad de permitir el acceso del agua para que fluya lo más libre posible hacia el pozo, desde la formación saturada, sin materiales finos en suspensión, además de ayudar a estabilizar el agujero dentro del material no consolidado. ⁽²⁸⁾

Las rejillas pueden tener aberturas en forma rectangular con poca separación entre sí y con el mayor número posible alrededor de su circunferencia, pueden ser en sentido horizontal, vertical, alternas, discontinuas o alineadas. ⁽⁴⁵⁾

Para el diseño de la zona de captación (rejilla) se toma en cuenta: la longitud, dimensión de la abertura de la rejilla, los tipos de rejillas y su resistencia a la degradación química y a la corrosión. ⁽²⁷⁾

El largo óptimo de la rejilla está en función del espesor del acuífero y de los estratos que lo conforman, en algunos acuíferos se presentan zonas productoras con transmisividades altas, entonces la longitud de la zona de admisión se ubica en tales sitios, para ello debe apoyarse en la perforación exploratoria, la conductividad hidráulica y la geofísica. ⁽²⁸⁾

Una alternativa de obtener la longitud del cedazo es basándose en las recomendaciones de la empresa Johnson División ⁽²¹⁾ UOP como sigue:

Tipo de acuífero	Longitud de la rejilla
Confinado homogéneo	70% del espesor del acuífero (espesor < 10m) 75% del espesor del acuífero (10m ≤ espesor ≤ 20m) 80% del espesor del acuífero (espesor > 20m) En algunos casos convendrá distribuir la rejilla en tramos iguales, intercalando tramos de tubo liso.
Confinado heterogéneo	El cedazo se colocara en los estratos más permeables y su longitud será igual al 90% o 100% de los estratos aprovechables.
Libre homogéneo	La rejilla se localiza en la parte inferior del acuífero, con una longitud entre 1/3 y 1/2 de su espesor. Cuando se requiera mayor eficiencia para proporcionar un alto gasto específico, el cedazo tendrá una longitud igual a la mitad del espesor del acuífero. Cuando se desee un abatimiento máximo para obtener mayor producción, la rejilla tendrá una longitud igual a un tercio del espesor del acuífero y corresponderá a un diseño óptimo.
Libre heterogéneo	Cuando los estratos se encuentren a gran profundidad aplíquese el criterio de los acuíferos confinados heterogéneos y cuando sean superficiales, el de los acuíferos libres homogéneos.

Otra manera de obtener la longitud del cedazo es mediante la ecuación: ⁽¹⁶⁾

$$L=1000Q \div Ae Ve$$

Donde:

L= longitud del cedazo en m.

Q = caudal de explotación en l/s.

Ve = velocidad de entrada del agua a la rejilla en cm/s.

Ae = área abierta efectiva del cedazo en cm^2/m de longitud de rejilla. En algunos casos el área efectiva de la rejilla, queda definida como el 50% del área total lateral en un metro de longitud de rejilla

Dependiendo del caudal de explotación del pozo y del espesor del acuífero, los diámetros se eligen de acuerdo a la tabla 3.4.4.a.

TABLA 3.4.4.a. Diámetro mínimo recomendado para el cedazo.

Caudal de explotación del pozo (l/s)	3	3-8	8-22	22-50	50-88	88-158	158-220	220-315	315-442	442-568
Diámetro mínimo recomendado para el cedazo (mm)	50	100	150	200	250	300	355	405	455	510

FUENTE: CÉSAR VALDEZ, E. y VAZQUEZ GONZALEZ, A. B. (1993). Abastecimiento de Agua Potable. Vol. II. Recomendaciones de Construcción. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 1ª. Edición, México. 112 pp.

El cedazo o rejilla debe ajustarse a lo existente en el mercado o bien puede mandarse a fabricar sobre pedido con abertura especial. El fabricante será quien recomiende en función de las características granulométricas del material que conforma la formación acuífera; el tipo de ranura, tipo de acero o material del ademe, ventajas, desventajas y todas aquellas características y recomendaciones necesarias. ⁽⁴⁵⁾

El fabricante proporciona el área de infiltración de sus productos (comunicación personal del Ing. Mario Patricio Rodríguez Martínez).

TIPOS DE REJILLAS

Del tamaño de la apertura de las ranuras y del diámetro del ademe dependerá la cantidad de área de infiltración y de ello la eficiencia hidráulica del pozo. ⁽⁴¹⁾

Existen diversos tipos de ademes en el mercado, entre los más comunes se encuentran los de tipo persiana, tipo puente, canastilla, de ranura continua y ademe ranurado (figura 3.4.4). ⁽¹⁸⁾

Figura 3.4.4. Tipos de ademes ranurados

a) tubo de acero
ranura tipo puente

b) tubo de acero
ranura tipo
canastilla

c) tubo de P.V.C.
ranura transversal

d) tubo de acero
ranura longitudinal

FUENTE: ING. RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, M. P., COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE), Departamento de Geotécnología (comunicación personal)

SELECCIÓN DEL MATERIAL DEL ADIME

Para elegir el material adecuado se toma en cuenta: el contenido mineral del agua, que se obtiene mediante un análisis químico, que revele que el agua es corrosiva o incrustante.

Los siguientes parámetros indican cuándo un agua es corrosiva ⁽²⁷⁾:

- ◊ pH menor a 7.00 (el agua es ácida).
- ◊ Oxígeno disuelto mayor a 2 ppm.
- ◊ Sulfuro de hidrógeno en concentraciones menores que 1 ppm (pueden ocasionar corrosión severa).
- ◊ Sólidos totales disueltos (STD), mayores de 1000 en ppm.
- ◊ Dióxido de carbono, debe ser mayor de 50 ppm.
- ◊ La cantidad de cloruros debe exceder las 500 ppm.

Un agua se considera incrustante cuando se tienen los siguientes índices ⁽²⁷⁾:

- ◊ pH mayor a 7.5
- ◊ Dureza de carbonatos mayor a 300 ppm.
- ◊ Contenido de hierro mayor a 2 ppm.
- ◊ Contenido de manganeso excede a 1 ppm (debe presentarse simultáneamente un valor de pH alto, para que exista la incrustación).

Además deben tomarse en cuenta los desechos bacterianos, ya que la bacteria ferrosa se puede encontrar en las aguas subterráneas que generan un material pegajoso de consistencia similar a la de una jalea, que causa oxidación y precipitación del hierro disuelto y del manganeso. En un corto periodo de tiempo ocasiona la obstrucción casi completa del pozo. Para atacar este problema se recomienda agregar una solución de cloro (ácido clorhídrico), la cual destruye los organismos antes mencionados. ⁽²⁷⁾

La velocidad máxima de entrada del agua a la rejilla no debe ser mayor de 3cm/s. Para calcularla se divide el caudal entre el área total abierta de la rejilla. Si la velocidad es mayor de la norma anterior, se debe aumentar el diámetro o bien la zona de captación. ⁽¹⁷⁾

TAPÓN DE FONDO

Para evitar la introducción de materiales como la arena, situación que se puede originar por la turbulencia del bombeo en el pozo, por el extremo inferior del ademe, se coloca un tapón de fondo, ya sea metálico, PVC (de fábrica) o de cemento. ⁽⁴¹⁾

3.4.5. FILTROS

El filtro se coloca entre la rejilla y la pared de la perforación, su función es la de impedir el paso y retener los materiales finos o partículas en suspensión e impurezas del agua que contiene la formación acuífera hacia el interior del pozo, además de estabilizar la pared de perforación, evitando derrumbes. ⁽¹⁸⁾

Si los acuíferos explotados proceden de formaciones aluviales, en los que son frecuentes las intercalaciones de arcillas, arenas y gravas de diferentes tamaños, al realizarse el diseño de la obra de captación, deberá programarse un espacio anular (véase tabla 3.4.5 a), entre la tubería de ademe y las paredes del agujero, capaz de permitir la formación de un filtro de grava, que impida que los materiales finos de la formación sean arrastrados hacia el interior del pozo durante el bombeo. ⁽⁴¹⁾

El espacio anular antes mencionado, debe ser llenado por gravas redondeadas bien clasificadas de cuarzo, las que por su constitución no son fácilmente cementables; en su defecto se utilizarán gravas de ríos o arroyos, pero nunca productos de trituración, ni de formas angulosas, porque disminuyen la porosidad, además los materiales a emplear para el filtro deben ser de origen natural, lo más redondeado posible ⁽⁴¹⁾. Algunos especialistas recomiendan utilizar grava sílica (el sílice se encuentra en rocas tales como riolitas y dacitas, comunicación personal del Ing. José Efrén Aguirre Barragán).

TABLA 3.4.5.a. Espesores del filtro de grava

Profundidad (m)	Espesores (cm)
0 - 75	7.62 (3")
0 - 150	10.16 (4")
Mayor de 150	12.70 (5")

FUENTE: VARGAS ALCÁNTARA, V. (1976). Técnicas y análisis de costos de pozos profundos. 1ª. Edición. Edt. Limusa, S.A de C.V. Noriega Editores. México. 514 pp.

La longitud del filtro está en función de la longitud del ademe ranurado y depende de las condiciones hidrogeológicas del sitio, con ello se aprovecha la permeabilidad horizontal, buscando estratos del subsuelo más productivos o permeables. ⁽⁴⁵⁾

Quando se tienen materiales finos (arena fina), excepto limos y arcillas (para la clasificación del material de acuerdo a su tamaño véase la tabla 3.4.5.b), se pueden controlar por un filtro constituido de grava graduada con partículas limitadas entre 0.635 cm (1/4 ") y 1.27 cm (1/2 ") de diámetro, con los que se han obtenido resultados favorables. Obviamente, la granulometría del filtro debe ser proporcional a las aberturas en los cedazos o rejillas. ⁽⁴⁵⁾

Para diseñar un filtro artificial es necesario contar con un análisis granulométrico de la formación acuífera, de donde se va a captar el agua. Se realiza mediante mallas o cribas estándar. Para construir la curva granulométrica se grafican en el eje de las ordenadas el porcentaje retenido en un intervalo del 0 al 100 % mientras que en el eje de las abscisas se tendrán los valores del tamaño del grano que pasan por cada malla. De la curva se obtiene el coeficiente de uniformidad (Cu), que es la relación entre el tamaño de los granos correspondientes al 40% de material retenido acumulado (D_{40}) y al 90% del mismo (D_{90}), es decir, $Cu = D_{40}/D_{90}$, que es un indicador para seleccionar el tipo de filtro que se va a emplear ⁽¹⁷⁾

TABLA 3.4.5.b. Clasificación de materiales según su tamaño

Materia	Clasificación	Rango de los tamaños (mm)
Bolos o bolos	Muy grandes	4096 – 2048
	Grandes	2048 – 1024
	Medianos	1024 – 512
	Pequeños	512 – 256
Cantos	Grandes	256 – 128
	Pequeños	128 – 64
Grava	Muy gruesa	64 – 32
	Gruesa	32 – 16
	Mediana	16 – 8
	Fina	8 – 4
	Muy fina	4 – 2
Arena	Muy gruesa	2 – 1
	Gruesa	1 – 0.50
	Mediana	0.50 – 0.25
	Fina	0.25 – 0.125
	Muy fina	0.125 – 0.062
Limo	Grueso	0.062 – 0.031
	Mediano	0.031 – 0.016
	Fino	0.016 – 0.008
	Muy fino	0.008 – 0.004
Arcilla	Gruesa	0.0040 – 0.0020
	Mediana	0.0020 – 0.0010
	Fina	0.0010 – 0.0005
	Muy fina	0.0005 – 0.00024

FUENTE: Información facilitada por el Ing. José Efraim Aguirre Barragán, Comisión Federal de Electricidad (CFE), Departamento de Geohidrología.

3.4.6. ESTABILIZADORES

Recibe el nombre de estabilizador de la formación el material que se utiliza con este propósito, es decir, es el proceso mediante el cual se rellena el espacio anular alrededor del tubo de ademe y la pared del agujero, con ello se evitan posibles derrumbes o caídas de los materiales localizados alrededor del pozo. ⁽¹⁷⁾

Los estabilizadores pueden ser materiales como: arena gruesa limpia o grava. ⁽¹⁷⁾

3.4.7. PROTECCIÓN SANITARIA

Su función es sellar las aberturas que se encuentran por fuera del entubado, con el propósito de garantizar la obtención de agua de buena calidad, libre de bacterias patógenas y en general, libre de contaminantes y apta para el consumo humano, evitando la introducción o comunicación al pozo de aguas de mala calidad o contaminadas. ⁽²⁹⁾

Para el sellado se necesita cementar el espacio entre el ademe y el contra ademe (comunicación personal del Ing. Mario Patricio Rodríguez Martínez). El cementante es una mezcla de agua-cemento en proporción aproximada de 25 litros de agua por 50 kilos de cemento, se puede agregar arcilla (bentonita), generalmente en cantidades pequeñas. ⁽¹⁷⁾

Las zonas del aprovechamiento más expuestas a la contaminación son: la parte superior de la obra de captación, el espacio anular entre las paredes del acuífero y el tubo de ademe, por ello se recomienda hacer un buen terminado de la obra. Para lograrlo se sugiere ⁽¹⁸⁾:

- ◊ A partir del terreno natural, el entubamiento del pozo debe sobrepasar 60 cm. como mínimo.
- ◊ Hacer una placa de concreto, cuyas dimensiones mínimas sean de 60 × 60 cm, con un espesor de 10 cm y con una ligera pendiente hacia sus bordes, para drenar las posibles fugas de la obra de captación.
- ◊ Sellar la parte superior de la obra con el propósito de evitar la entrada de contaminantes al pozo.
- ◊ Si es posible, colocar un canal de drenaje alrededor de la placa de concreto, que desoargue a cierta distancia del pozo.

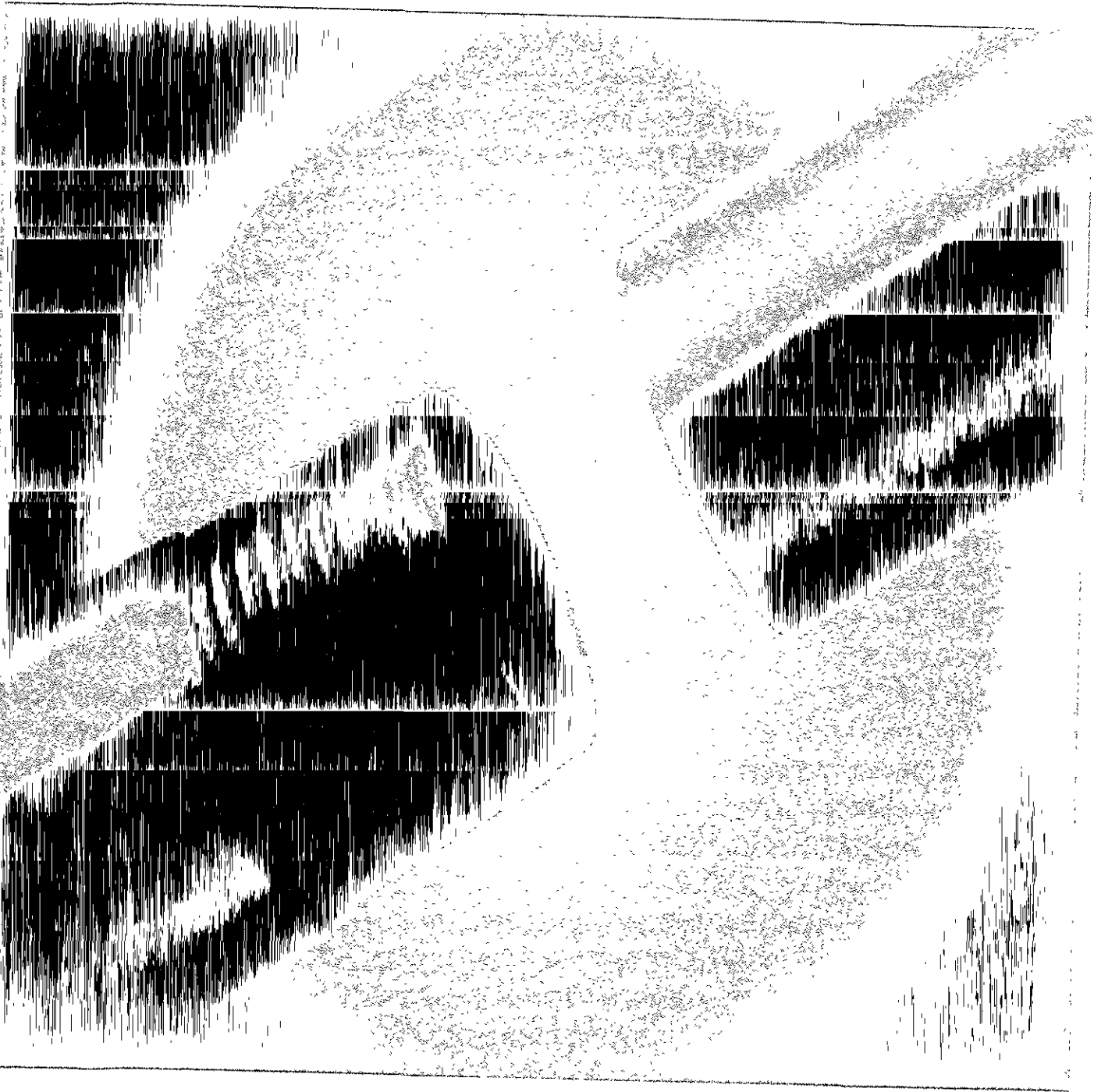
3.4.8. CÁMARA DE BOMBEO

Es el sitio del pozo donde se coloca el equipo de bombeo que extraerá el agua. Se sugiere que el diámetro adecuado del ademe ranurado sea de cuando menos 5.08 cm (2") por lado, mayor al diámetro de la bomba (comunicación personal del Ing. Mario Patricio Rodríguez Martínez).

La longitud de la cámara de bombeo depende de la profundidad del nivel estático, del abatimiento que está en función del caudal de extracción y de la sumergencia necesaria para el buen funcionamiento de la bomba (se obtiene del fabricante) ⁽¹⁷⁾

Capítulo 4

Perforación



CAPÍTULO 4. PERFORACIÓN

4.1. CONSIDERACIONES PARA SELECCIONAR EL MÉTODO DE PERFORACIÓN

Conforme a la premisa de que siempre se busca que el método a utilizar sea el más adecuado, algunos puntos a considerar son los siguientes: ⁽¹⁷⁾

- ◊ Dos formaciones rocosas nunca se perforan igual.
- ◊ Profundidad y diámetro por perforar.
- ◊ Precio de herramienta y equipo.
- ◊ Perforabilidad de la roca. Está en función de varios factores como son: dureza, uniformidad, abrasividad, estructura granular, estratificación, material de relleno como gravas (material de acarreo), entre otros.
- ◊ Disponibilidad de equipo y herramientas.
- ◊ Vías de acceso y comunicación, entre otros.

Para el caso particular del Estudio Integral del Río Papagayo, se tienen materiales de relleno o acarreo, es decir, gravas, arenas y boleos.

La perforación exploratoria se realiza con equipos pequeños Longyear modelos 34, 38 o 44, lo cual requiere emplear diámetros NQ y NW, reduciendo así los costos y facilitando las maniobras de operación.

La perforación por el método de percusión no se emplea, porque no es factible, debido a que las condiciones del terreno son adversas, ya que los golpes ocasionados por el martinete mediante este método, provocan caídos y derrumbes, además de ser muy lento. Para fines exploratorios no se recomienda mientras que para realizar el pozo principal se sugiere la perforación rotatoria con circulación directa (para justificación véase ventajas y desventajas de este método)

4.2. PERFORACIÓN POR PERCUSIÓN

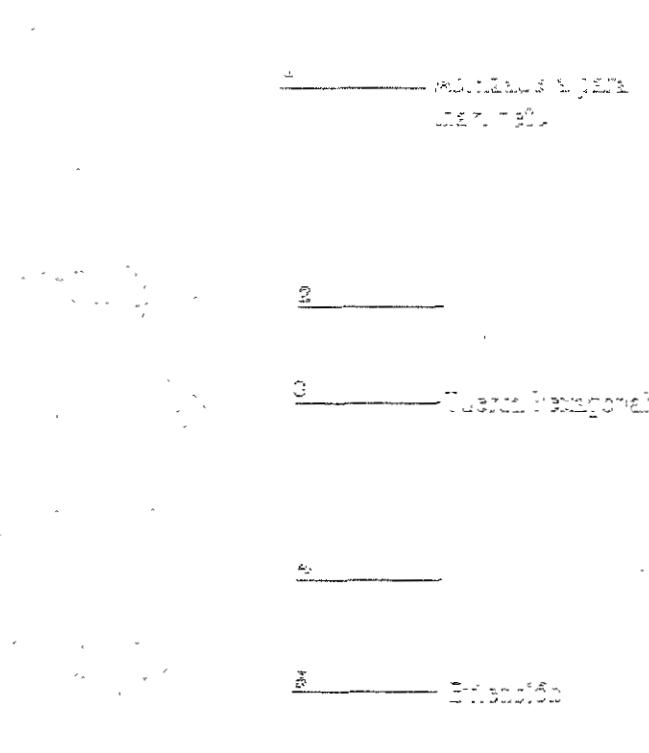
El método de perforación por percusión se efectúa en materiales no consolidados, rocas frágiles, en arcillas, si se requiere hacer recuperación de muestra no se recomienda excepto si el material es muy cohesivo o está mezclado con arcillas. ⁽¹⁷⁾

4.2.1. EQUIPO Y HERRAMIENTA DE PERFORACIÓN

Las herramientas de perforación más comunes son: rima, cuchara, sarta de perforación (constituida por: barretón, tijeras, portacable giratorio y tregano), gato mecánico, cremallera (engrane), patesca (polea), incador de tubería, llaves para desacoplar, protector de cables, llaves de acero para las uniones, elevador de herramientas, martinete (Figura 4.2.1), entre otros.

El equipo está constituido por estructura principal, torre (mástil), calancín, etc., líneas de elevación, unidad de potencia. ⁽¹⁷⁾

Figura 4.2.1 Martinete



FUENTE: COREWIN, S.A DE C.V. (1990). Fabricación de brocas, equipos y accesorios para perforación con diamante. Planta Industrial La Valenciana Num. 2, Barrio el Carrizo 76819, San Juan del Río, Querétaro, México.

4.2.2. PROCEDIMIENTO DE PERFORACIÓN

Se inicia con una serie de golpes con un martinete a modo de obtener verticalidad desde los primeros metros, cuando se ha logrado alcanzar profundidades considerables, se sigue con la perforación a fin de evitar derrumbes ⁽¹⁷⁾

Por lo general, las formaciones duras se perforan por medio de una serie de golpes por un tiempo más prolongado que las formaciones suaves, operación que es detectada por el perforista. Cuando se detectan cambios en la formación, se disminuye la serie de golpes con el martinete, pues en caso contrario puede darse el desvío del agujero que se está perforando, situación que puede presentarse en estratos cuyos echados estén muy pronunciados. ⁽¹⁷⁾

Cuando se ha perforado cierta profundidad y debido al golpeo continuo del martinete para penetrar en el terreno, se acumulan residuos y cortes de material de la formación que se está perforando, en el interior del agujero y/o en el caso de detectar cambios en la formación, la perforación se suspenderá y se llevará a cabo la extracción de los residuos o cortes por medio de la cuchara. Se debe tener precaución con el propósito de evitar que quede una cantidad considerable de material de corte en el interior y/o en el fondo del pozo, lo que impide su avance cuando la perforación se efectúa. ⁽¹⁷⁾

Cuando se perfora en materiales no consolidados, conviene prevenir los caídos o derrumbes mediante un ademado a medida que avanza la perforación; mientras que en roca dura, sólo se ademan los primeros metros con la finalidad de evitar desmoronamiento de los materiales que integran la zona alterada. ⁽¹⁷⁾

4.2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS EQUIPOS DE PERCUSIÓN

A) VENTAJAS ⁽¹⁸⁾

- ◊ Consumen poca cantidad de agua.
- ◊ Son relativamente fáciles de transportar
- ◊ Son económicos (el costo de operación se reduce, pues se requieren cuadrillas pequeñas de personal, con ello se tiene un ahorro significativo).
- ◊ Las propiedades hidráulicas del acuífero se conservan mejor (porosidad y permeabilidad).

B) DESVENTAJAS ⁽¹⁸⁾

- ◊ Tiene limitaciones en cuanto a la profundidad y diámetro por perforar.
- ◊ Es un método relativamente lento.
- ◊ Si los estratos están inclinados o existe material fracturado, puede presentarse que la sarta de perforación no tenga la rigidez suficiente, lo que provoca una desviación al no poder controlar la verticalidad del pozo.

Los avances se dificultan y en ocasiones no se pueden realizar, porque se rompió con el equilibrio de los materiales o rocas perforadas ya que el ángulo de reposo en las paredes del pozo ha sido alterado. ⁽¹⁷⁾

4.3. PERFORACIÓN POR ROTACIÓN

4.3.1. EQUIPO Y HERRAMIENTAS DE PERFORACIÓN

Para la perforación exploratoria se emplean máquinas perforadoras de diamante montadas sobre trineo, modelos Longyear Ly-34, Ly-38 y Ly-44 u otro similar, que están integradas por: cabeza hidráulico giratorio, mandril (chuck) automático, cabrestante o cabeza de gato, entre otros; para la perforación del pozo del Río Papagayo se utilizó la máquina perforadora rotaria de circulación directa T-4W.

Algunas herramientas empleadas para los modelos Ly-38 y Ly-44 son: tripie completo, poleas, swivel universal (figura 4.3.1.a), manguera de succión, tubería de perforación NQ, tubería de perforación ademe NW, brocas de diamante impregnado, zapatas de diamante impregnado, rima NQ, pescador completo para interior NQ, mordazas, machuelo para tubería NQ y para tubería ademe NW, depósitos para agua, brocas tricónicas, cajas de plástico completas para muestras, coreliifter para barril NQ, llaves steelson, entre otros.

La máquina perforadora T4-W requiere equipo y herramientas como: tubería de perforación, barril muestreador, dril, barrenas tricónicas de carburo de tungsteno o de dientes de acero (figura 4.3.1.b), depósito de agua, tubería de ademe, ampliador o ensanchador, bomba para lodos y/o agua, entre otros.

Figura 4.3.1. Herramientas para la perforación rotaria

A) SWIVEL UNIVERSAL

B) BROCA DE INSERTO DE
CARBURO DE TUNGSTENO

FUENTE: COREMIN, S.A. DE C.V. op. Cit.

4.3.2. PROCEDIMIENTO DE PERFORACIÓN

a) Perforación exploratoria.

Se efectúa por el método de rotación hidráulica, empleando perforadoras para modelos Longyear Ly-38 y Ly-44. El proceso consiste en anclar y nivelar el equipo para el triple, arreglar bombas, poner mangueras de alta presión conectadas al swivel universal y de succión que va al depósito de agua (comunicación personal de los perforistas Justiniano G. Arzola y Wenceslao Hernández Sánchez).

Se coloca la tubería de perforación de diámetro NQ al broquero de la máquina perforadora Longyear y se ajusta la broca a la tubería, con ello se inicia la perforación. La broca irá girando o rotando para cortar la formación; cada tramo de tubería mide 3.05 m. de longitud, por lo que los tramos subsiguientes a perforar serán acoplados hasta completar la profundidad requerida (comunicación personal de los perforistas Justiniano G. Arzola y Wenceslao Hernández Sánchez).

Debido a las condiciones del terreno en el Río Papagayo, se colocó tubería de ademe de diámetro NW en tramos de 3.05m de longitud, con el propósito de evitar caídos y estabilizar las paredes del agujero.

El agua es empleada como fluido de perforación, cuya función es⁽³⁹⁾.

- ◊ Evitar el calentamiento de las brocas debido a la fricción entre éstas y el material que se está perforando.
- ◊ Limpiar, lubricar y enfriar la tubería y brocas al avanzar la perforación.
- ◊ El agua circula continuamente cuando se está perforando el agujero, lo que ocasiona la expulsión de partículas y cortes de material, debido a la presión que ejerce la máquina perforadora a través de la tubería de perforación y la broca con la formación no consolidada de interés.

La recuperación de muestras se realiza introduciendo el barril muestreador y/o nucleador en el interior del agujero dentro de la tubería NQ (figura. 4.3 2.a.). La muestra quedará dentro del barril que cuenta con un dispositivo que cierra automáticamente al hacer contacto con la roca e impedirá que el material escape por la parte inferior del tubo. Posteriormente se procede a extraer el barril muestreador para rescatar el ejemplar según sea el tramo comprendido. Cuando existe fuga de agua durante la perforación se entiende que no hubo recuperación de muestra.

b) Perforación por rotación con circulación directa.

El procedimiento es similar al descrito anteriormente, a diferencia que varían de tamaño algunas herramientas, el diámetro por perforar es mayor y la profundidad diferente. Se necesitan máquinas perforadoras Ingerson -Ram modelo T4-W o T5- W o portadrill, que alcanzan profundidades de entre 900 y 1000 metros (comunicación personal del Ing. Luis Campillo Saldaña).

Para tener avances durante la perforación en formaciones no consolidadas se necesita ademar el agujero, con ademe provisional, que sirve de estabilizador para evitar derrumbes y caídos.⁽⁴¹⁾

El método se resume en ejecutar o realizar un agujero con una barrena mediante rotación. Los fragmentos producidos se eliminan con el fluido de perforación que se hace circular conforme la tricónica (barrena) penetra en los materiales de la formación. El fluido de perforación es bombeado a través de la tubería y expulsado por las boquillas de ésta, provocando que el lodo fluya por el espacio anular que se halla alrededor hasta la superficie⁽¹⁸⁾ (véase figura 4.3.2.b).



Figura 4.3.2.a. Perforación exploratoria y recuperación de muestra

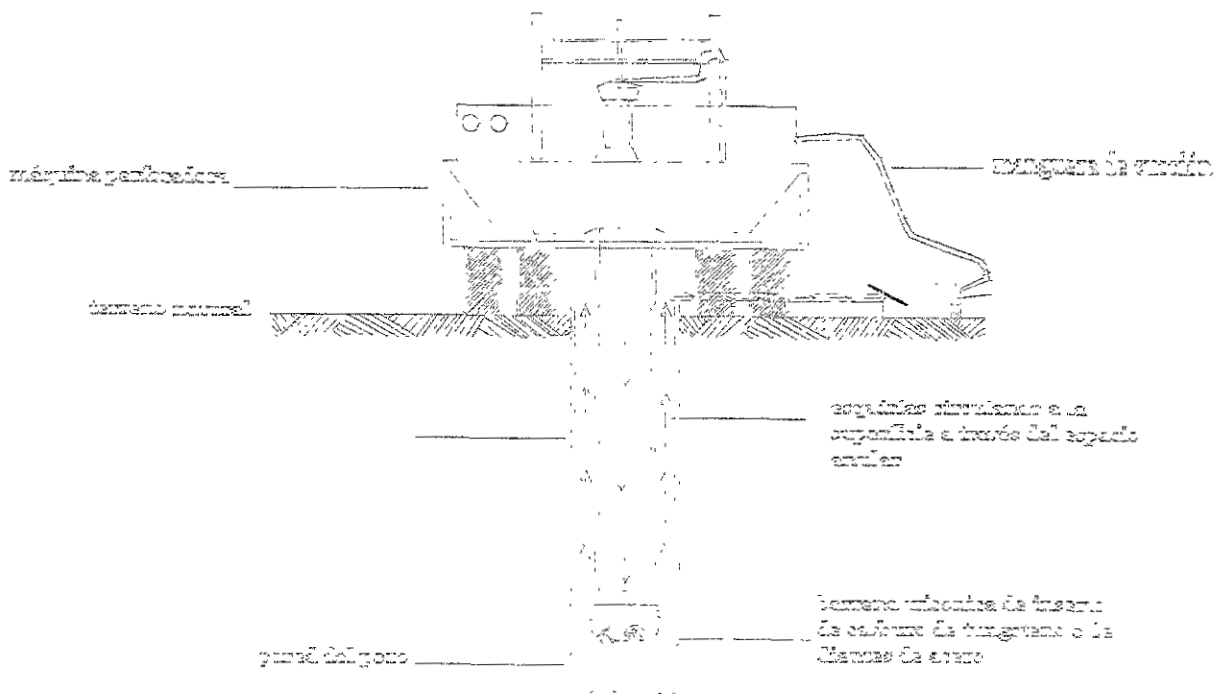


Figura 4.3.2.b. Perforación por rotación con circulación directa (CHÁVEZ GULLÉN, R. et al. (1994). Perforación de Pozos. CNA/IMTA/Libro 5/3°. Sección/Geohidrología. México. 256 pp.

4.3.3. ADYUTAMENTOS

A) Bentonita.

Es una arcilla plástica que se caracteriza por la propiedad de incrementar varias veces su tamaño al contacto con el agua⁽²⁶⁾, su función es mantener estables las paredes del pozo y evitar su derrumbamiento, también se logra reducir la fricción entre la herramienta de perforación y las paredes del agujero.⁽¹⁸⁾

El perforista debe ser capaz de lograr una consistencia adecuada del fluido de perforación (agua con bentonita), por ejemplo si es demasiado ligero ocasiona derrumbes en el pozo.⁽³⁹⁾

B) Dispensor de arcillas.

Al emplear bentonita para estabilizar las paredes del interior del pozo, ésta forma una capa o especie de recubrimiento que sostiene las partículas sueltas de la formación, sellando las paredes del agujero.⁽³⁹⁾

El dispensor de arcillas tiene la finalidad de remover y eliminar las capas o recubrimientos formados por la bentonita en las paredes del pozo, poniéndolas en suspensión evitando así su sedimentación, tanto en la rejilla como en el agujero. Se sugiere emplear agentes químicos dispersantes añadidos al agua utilizada en el desarrollo.⁽¹⁸⁾

C) Operación de pesca.

La operación de pesca consiste en rescatar un "pez", que es el nombre que reciben los utensilios, brocas y otros equipos de perforación que caen o quedan atrapados por algún descuido o accidente en el interior del pozo y que es necesario recuperar; las razones pueden ser variadas, tales como: el alto costo de la pieza atrapada, la falta de herramienta para continuar laborando, su existencia en el mercado o su difícil reemplazamiento.⁽³⁹⁾

Las operaciones de pesca son efectuadas normalmente por el perforista quién, además de contar con amplia experiencia en este campo, debe realizar el rescate por tanteos, ya que la pieza o pez generalmente no se encuentra a la vista a cierta profundidad del agujero o en el interior del pozo (comunicación personal con el perforista Wenceslao Hernández Sánchez). En ocasiones el proceso resulta ser muy tardado y costoso sin obtener resultados, razón por la cual debe darse importancia al factor económico que implica tiempo y dinero, esto podría ser un motivo para dejar inconclusa la obra, trayendo como consecuencia el abandono del agujero o pozo, debido a que no se pudo rescatar la pieza.⁽³⁹⁾

Se debe prever este tipo de accidentes teniendo cuidado de hacer la selección y el uso apropiado del equipo y herramientas de perforación para todas las etapas.⁽³⁹⁾

En algunas ocasiones pueden ocurrir accidentes aún bajo la supervisión de los perforistas más aptos en este campo, por lo que el técnico debe llevar un registro de todo el equipo y herramienta de perforación usada en el pozo y la información que especifique las dimensiones de cada elemento; además es importante considerar que ese registro tome en cuenta la profundidad del pozo y la longitud total de la línea de perforación de pesca ⁽²⁹⁾

Las herramientas extraviadas en el interior del pozo regularmente no permanecen en posición vertical, sino que se acuñan en posiciones inclinadas a través de él, por lo que se deben considerar los posibles derrumbes que puedan ocurrir. ⁽²⁸⁾

4.3.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS EQUIPOS DE ROTACIÓN

VENTAJAS ⁽¹⁸⁾

- ◊ Generalmente, el método de rotación hidráulica penetra más fácilmente en las formaciones no consolidadas que cualquier otro tipo de perforación.
- ◊ El equipo se puede conseguir en el mercado nacional.
- ◊ Si las condiciones del terreno a perforar lo permiten, se puede tener recuperación de núcleo de roca consolidada.
- ◊ En arenas, gravas, arcillas y limos, la perforación suele ser efectiva.
- ◊ Se puede perforar a diferentes diámetros y profundidades.

DESVENTAJAS ⁽¹⁸⁾

- ◊ La calidad del agua subterránea puede ser afectada por los fluidos de perforación.
- ◊ Los costos se incrementan cuando se aumenta el diámetro y la profundidad a perforar.
- ◊ Algunas veces la transportación al sitio de estudio se dificulta por varios factores, algunos de ellos son: problemas sociales, afectación de predios, vías de acceso, requerir de equipo y grúas especiales para trasladar equipo, entre otros.
- ◊ En ocasiones es difícil hacer una buena interpretación del material que se ha cortado, porque la muestra se recupera en cortes de dimensiones pequeñas.

Capítulo 5

Aforo del pozo



CAPÍTULO 5. AFORO DEL POZO

5.1. DESARROLLO

El desarrollo del pozo y la limpieza del mismo, tienen la función de elevar la eficiencia hidráulica, a fin de obtener agua libre de partículas sólidas en suspensión y de organismos productores de enfermedades, corrigiendo cualquier obstrucción que haya ocurrido durante la perforación en la formación acuífera.⁽⁵⁾

El desarrollo del pozo es una prueba que consiste en remover sedimentos y materiales granulares de las formaciones acuíferas, que pudieran haberse desprendido en el interior del agujero, evitando su buen funcionamiento. Esta prueba requiere el tiempo necesario para que el agua inyectada regrese limpia a la superficie; su objetivo es aflojar los materiales disueltos, para tener un pozo y acuífero libre de materiales finos y de sedimentos.⁽³⁹⁾

Algunos conceptos a considerar son:⁽¹¹⁾

- ◊ Abatimiento: cuando se bombea agua del interior del pozo, se experimenta un descenso del nivel inicial del agua subterránea, operación que recibe el nombre de abatimiento, es decir, es la diferencia entre el nivel estático y el nivel dinámico. Se obtiene con la expresión:

$$A = N.E. - N.D.$$

Donde:

A = abatimiento en m.
 N.E. = nivel estático en m.
 N.D. = nivel dinámico en m.

- ◊ Nivel estático: es el nivel del agua subterránea en equilibrio natural que permanece en el interior del pozo cuando no hay extracción.
- ◊ Nivel dinámico: es el nivel al que se encuentra el agua dentro de un pozo, cuando se efectúa el bombeo.

EJECUCIÓN DEL DESARROLLO

Para realizar el desarrollo es necesario:

1. Haber concluido los trabajos de perforación.

2. Antes de iniciar el desarrollo se debe medir el nivel estático tanto en el pozo principal como en los piezómetros.

- 3 Contar con el equipo necesario de bombeo; bomba de pozo profundo de gran capacidad (bomba de aforo - tipo turbina de eje vertical), para generar fuertes abatimientos en el pozo

El proceso consiste en bombear agua del pozo en forma discontinua por medio de una bomba tipo turbina de eje vertical (sobrebombeo) con el fin de lograr flujo y reflujo de agua en la formación acuífera, logrando remover partículas finas, sedimentos o materiales. Esta operación debe realizarse en un intervalo de tiempo, suspendiendo alternadamente entre la extracción y el bombeo, con el propósito de que el agua que se encuentre en el interior de la columna de succión regrese hacia el pozo. La operación debe repetirse manteniendo un gasto constante hasta observar que el agua saiga cada vez con menos sedimentos, posteriormente se varía el gasto a manera de provocar condiciones hidrodinámicas diferentes en el entorno del pozo y repetir de nuevo el bombeo intermitente las veces que sean necesarias, hasta que las condiciones indiquen que sale agua limpia. ⁽¹⁸⁾

La etapa de recuperación se logra cuando se alcanza el 95% del restablecimiento del nivel estático o bien, 12 horas como tiempo máximo de recuperación. ⁽¹¹⁾

En el desarrollo se lleva un registro que contiene los siguientes datos: número de pozo, localización, profundidad, nivel estático, nivel dinámico, entre otros.

DESINFECCIÓN

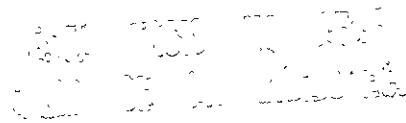
Desinfectar un pozo consiste en eliminar los posibles organismos transmisores de enfermedades, los cuales pudieran haberse introducido durante las etapas de perforación y desarrollo. ⁽³⁹⁾

El pozo debe limpiarse antes de iniciarse la desinfección del mismo. ⁽⁵⁾

La operación de desinfección consiste en agregar una solución fuerte de cloro, (aproximadamente 24cm³ por cada 100 litros de agua), dejándola actuar por un periodo de 24 horas como mínimo, para posteriormente bombear el pozo para desalojar el agua; dicha operación se considerará terminada cuando el muestreo de agua revele que no existe ninguna bacteria coliforme. ⁽¹⁸⁾

5.2. AFORO

La prueba de aforo, también conocida como prueba de pozo, consiste en establecer el caudal óptimo de explotación (cantidad de agua que se puede explotar de un pozo) y los niveles de operación de la obra de captación. Se realiza con una bomba vertical bombeando a caudal variable ⁽⁵⁾

Información previa

Antes de efectuar la prueba de aforo, se requiere tomar en cuenta la siguiente información ⁽¹⁸⁾

a) Económica:

- 1) Que sea sencilla y barata la extracción del agua bombeada, sin causar daños a terceros
- 2) En caso de existir problemas sociales, como afectación de predios, instalaciones, cultivos, entre otros, se debe indemnizar de tal manera que resulte ser el menor costo posible u otra forma de arreglo, bajo común acuerdo.
- 3) Que el equipo a utilizar sea el adecuado para la ejecución de esta prueba.

b) Operación del equipo:

- 1) El pozo debe estar desarrollado y limpio.
- 2) Sencillez para medir el caudal extraído y el nivel de agua en el pozo.
- 3) Que sea fácil de instalar y que el desagüe de agua sea lo más retirado posible.

c) Aspectos hidrológicos

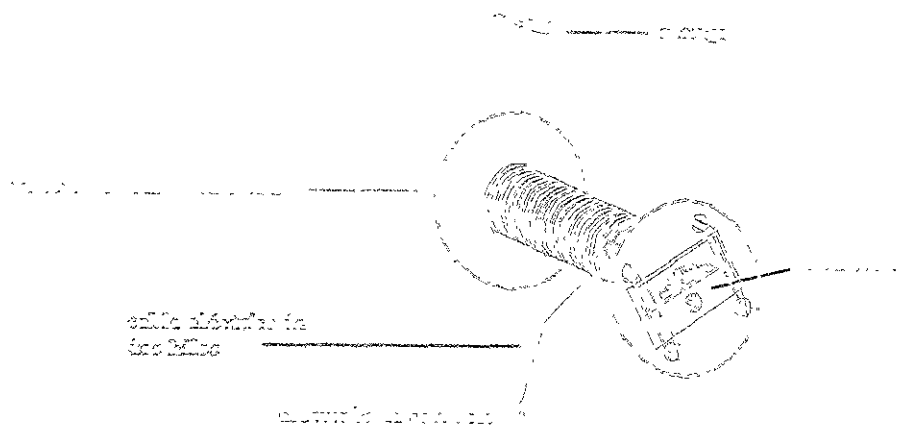
- 1) Que el agua que fue bombeada no regrese al acuífero
- 2) Que no existan actividades próximas (bombeos) que puedan provocar variaciones en el nivel del agua subterránea.

Equipo de aforo

Para realizar la prueba de aforo se emplean principalmente:

- ◊ Bomba tipo turbina de eje vertical.
- ◊ Sonda eléctrica (figura 5.2.1)
- ◊ Tacómetro de contacto para verificar que la bomba opere a la velocidad correcta.

Figura 5.2.1. Sonda eléctrica



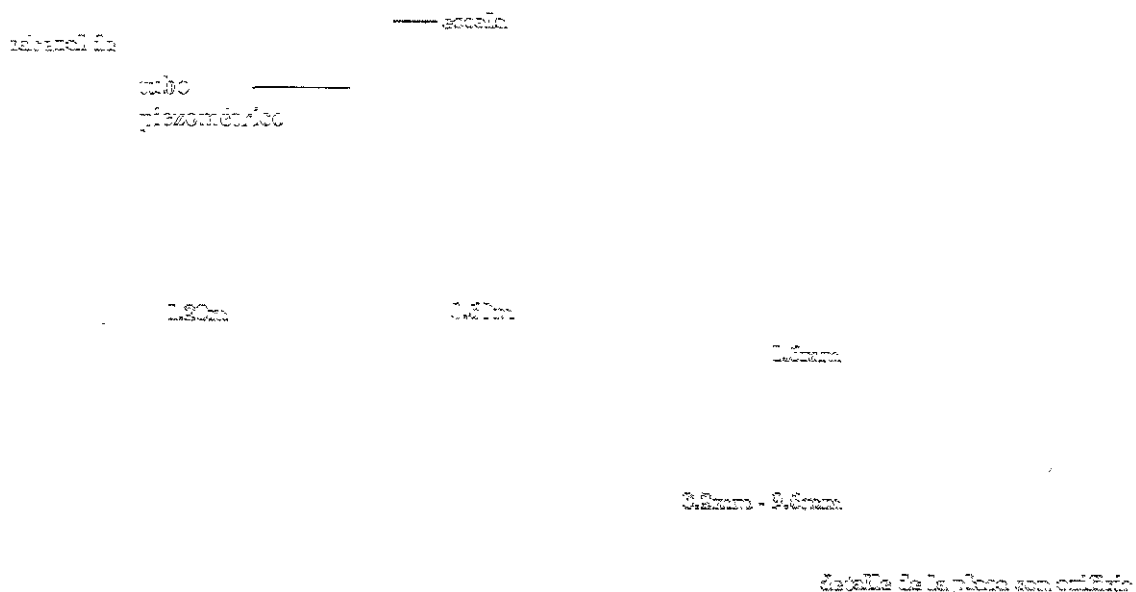
FUENTE: JOHNSON, E. B. (1975). El agua subterránea y los pozos. 1ª. Edición. Johnson Division, JOP Inc., Minnesota, U.S.A. 513 pp. Modificado por el autor.

MEDICIÓN DEL CAUDAL DE EXTRACCIÓN

Para determinar el caudal de producción de un pozo, se utilizan varios métodos, algunos de ellos son:

Método del orificio calibrado (vertedero de orificio circular) es el más utilizado cuando se trata de determinar el caudal óptimo de explotación y consiste en un dispositivo para el aforo de pozos (figura 5.2.2) que consta principalmente del tubo de descarga que debe ser recto y con una longitud mínima de 1.80m, bomba vertical, flexómetro, placa del orificio de diferentes diámetros interiores y portatorificios. (1)

Figura 5.2.2. Método del orificio calibrado



FUENTE: CFE. (1996). Subdirección Técnica, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Desarrollo y prueba de aforo en pozos para abastecimiento de agua subterránea. Manual de circulación interna de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Guía CFE-10000-86. México. 23 pp. Modificado por el autor.

Para calcular el caudal que pasa a través del orificio se emplea la expresión: ⁽¹⁾

$$Q = K' (h)^{1/2}$$

Donde:

- Q = Caudal que circula a través del orificio en m³/s.
- h = Altura del agua medida en tubo piezométrico en m.
- K' = Factor de descarga, adimensional.

El valor del factor de descarga (K') se obtiene de la siguiente tabla 5.2.

TABLA 5.2. Valores de K'

Diámetro del Orificio (m)	Diámetro de Descarga (m)					
	0 1016	0 1524	0 2032	0 2540	0 3048	0 4064
0.0508	0.588					
0.0635	0.475					
0.0762	1.585	1.326				
0 1016		2.568	2.352			
0.1270		4.888	3.900			
0.1524			6.343	5.535		
0.1778				8 139		
0 2032				12.070	10.272	
0.2540					19.641	
0.3048						25 374

FUENTE: CFE. (1996). Subdirección Técnica, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Desarrollo y prueba de aforo en pozos para abastecimiento de agua subterránea. Manual de circulación interna de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Guía CFE-10000-86. México. 23 pp

Método volumétrico

Consiste en medir el tiempo de llenado de un recipiente de capacidad conocida, el cual debe tener una capacidad a manera que el tiempo de llenado sea cuando menos de 20 segundos, con el propósito de que el error que se cometa sea mínimo. Es un método sencillo y práctico. ⁽²⁴⁾

El caudal o gasto de extracción se obtiene con la ecuación:

$$Q = V/t$$

Donde:

Q= caudal de extracción del pozo en m³/s.

V= volumen del recipiente en m³.

t = tiempo de llenado del recipiente de volumen conocido en s.

Método de la escuadra

Permite calcular el caudal de bombeo, el procedimiento consiste en medir la distancia horizontal D que existe entre el extremo del tubo de descarga y el punto donde cae el chorro de agua al suelo y la altura L a la que se encuentra la tubería de descarga. Se requiere emplear la expresión siguiente: ⁽²⁴⁾

$$Q = (0.02215 DS) + (L^{1/2})$$

Donde.

Q = Caudal en l/s.

D = Distancia horizontal a la que cae el chorro de agua (a partir de donde termina la tubería de descarga y el punto más lejano donde cae el chorro de agua), en cm.

S = Sección de la tubería de descarga en cm^2 .

L = Altura del centro de la tubería de descarga hasta la superficie del terreno, en cm.

EJECUCIÓN DE LA PRUEBA DE AFORO

Terminado el desarrollo y una vez que se recupera el nivel, se mide. Posteriormente se realiza la prueba de aforo que consiste en medir los diferentes niveles dinámicos (piezometría) a tiempos establecidos, cuando se bombea de manera ininterrumpida la obra de captación a caudal variable, con el propósito de obtener la información necesaria para determinar la productividad del pozo, es la operación que culmina la construcción del mismo. ⁽¹¹⁾

La prueba de aforo está en función del caudal mínimo y máximo logrados en el desarrollo, pues es la pauta para empezar el aforo. Se inicia con un gasto cercano o igual al mínimo obtenido en el desarrollo, se mantiene constante hasta lograr que el nivel dinámico casi se estabilice. Con esta operación se logra el primer escalón, actividad que es desempeñada por un aforador, quien posteriormente aumentará las revoluciones de la bomba para variar el gasto y mantenerlo constante con el propósito de formar el segundo escalón, este paso se logra cuando el nivel dinámico alcanza la pseudoestabilización. Estas actividades se continúan incrementando en forma progresiva hasta alcanzar el gasto máximo esperado, punto en el que se termina la prueba de aforo. ⁽¹¹⁾

Se debe llevar un registro con los datos tomados en campo como el que se muestra posteriormente en el ejemplo de aplicación.

Se considera que un aforo debe durar 72 horas, aunque en zonas o pozos bien conocidos puede reducirse a unas 48 horas. ⁽⁵⁾

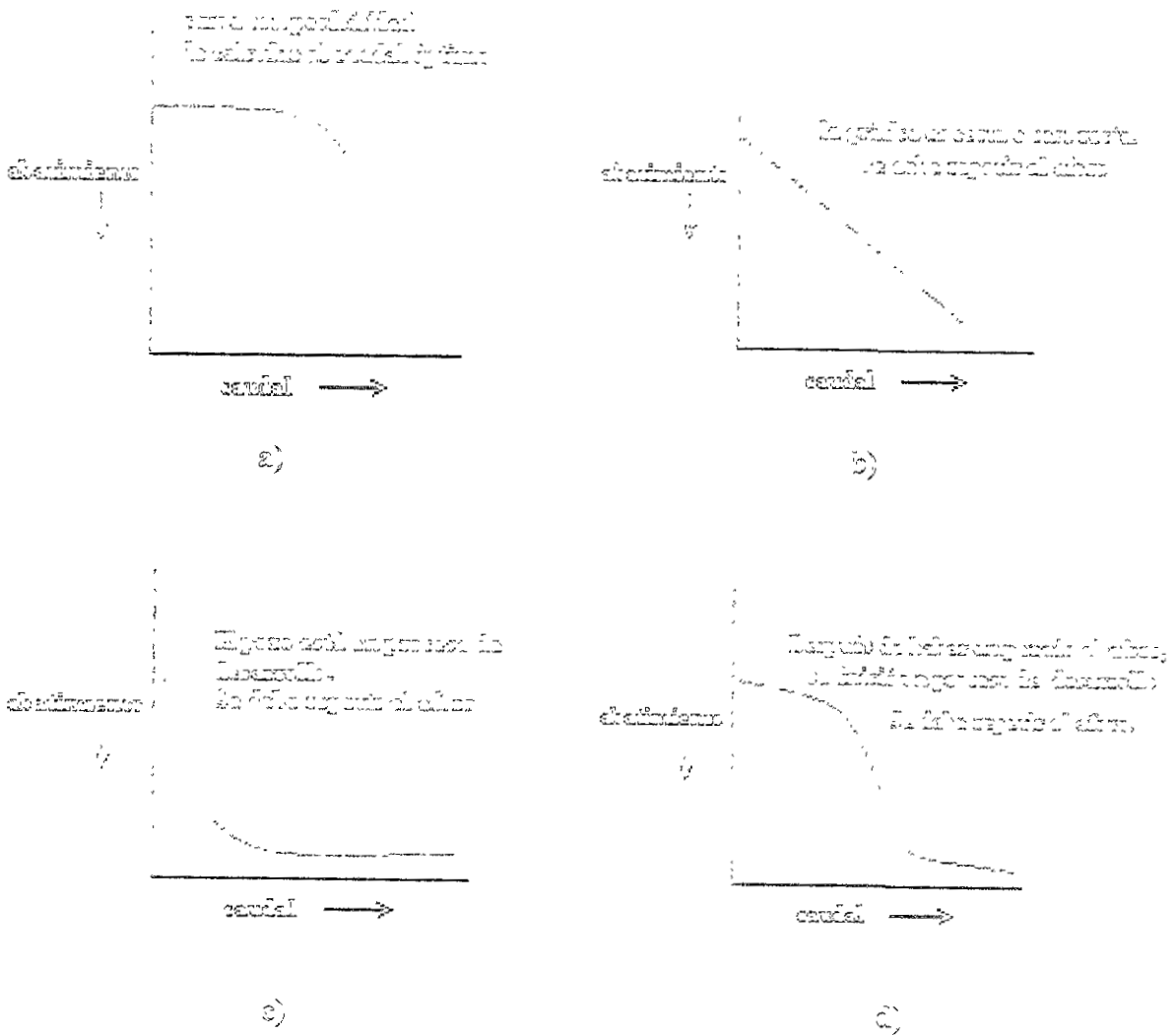
Interpretación del aforo

Con base a la información obtenida en campo, se elabora la gráfica del aforo, que consiste en representar en el eje de las abscisas el caudal, mientras que en el eje de las ordenadas los descensos, preferentemente con escala creciente hacia abajo a partir del nivel estático ⁽⁵⁾

La gráfica de aforo obtenida (figura 5.2.3), según su forma nos conduce a diversos resultados, éstos pueden ser: ⁽⁵⁾

- a) Si se obtiene una curva como la que se muestra en la figura 5.2.3.a., quiere decir que la bomba a emplear es la adecuada, de acuerdo a las características del pozo, excepto que se haya alcanzado el caudal óptimo de explotación (es el más conveniente para explotar un pozo, está en función de las necesidades y demandas de la población, agricultura, abrevaderos, entre otros).
- b) Cuando se tiene una línea recta o casi recta (figura 5.2.3.b), significa que de acuerdo a las características del pozo, la bomba resulta ser de poco caudal e ineficaz para realizar la prueba de aforo.
- c) Si resulta una curva según la figura 5.2.3.c, implica que la bomba empleada no es la adecuada y por lo tanto el aforo se debe repetir.
- d) Cuando se obtiene una curva como la que se aprecia en la figura 5.2.3.d, por cierto tiempo, para posteriormente flexionarse, haciéndose cóncava hacia arriba, significa que el aforo se había realizado correctamente hasta el punto de inflexión, esto es, donde existe el cambio de concavidades de abajo hacia arriba. En este caso se debe repetir el aforo.

Figura 3.2.3. Formas básicas de la curva de aforo



FUENTE: BOLIVAR DEL VALLE, J. M. (1993). Rehabilitación de pozos. Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica, Urbana e Industrial. Gerencia de Normas Técnicas, CNA/Cámara Nacional de la Industria de la Construcción, ONIC. 122 pp.

5.3. PRUEBAS DE BOMBEO

La prueba de bombeo también es conocida como prueba del acuífero, que consiste en medir en campo con una sonda eléctrica las variaciones del nivel dinámico y en cada pozo de observación realizando la piezometría durante cierto tiempo, cuando se bombea en forma ininterrumpida a caudal constante el pozo principal. ⁽²⁴⁾

Antes de realizar la prueba de bombeo se requiere.

1. Comprobar que las sondas eléctricas funcionen correctamente y asegurarse que las pilas estén en buen estado.
2. Contar con algunas sondas de repuesto que puedan sustituir a aquéllas que fallen, se descompongan o estén en reparación.
3. Capacitar al personal, para tomar las mediciones correctamente durante la prueba.
4. Coordinar actividades.
5. Durante la noche contar con la luz apropiada, o en su defecto, lámpara de mano para poder apreciar y tomar las lecturas adecuadamente.
6. El cable de la sonda debe estar marcado a cada metro y debe ser mayor a la profundidad del pozo, para facilitar la toma de mediciones en campo.
7. Contar con un registro (concentrado), para reportar las mediciones tomadas en campo en cada uno de los piezómetros por el personal.
8. Control de tiempo.
9. Libreta de campo y accesorios necesarios.
10. Multímetros en caso de requerirse.
11. El equipo de bombeo funcione correctamente.
12. Varios (descompostura del equipo de bombeo, diesel, cortos circuitos, entre otros).

Previamente a la ejecución de la prueba de bombeo se debe medir el nivel estático en el pozo principal y en cada uno de los piezómetros

La prueba de bombeo permite obtener información, como la transmisividad del acuífero, coeficiente de almacenamiento, características del acuífero, entre otros. ⁽²⁴⁾

El objetivo de realizar la prueba es conocer el funcionamiento adecuado de los pozos y del acuífero con el propósito de explotar adecuadamente éste último. ⁽²⁴⁾

Las pruebas de bombeo se emplean cuando nos interesa saber dónde, cuánto y de qué calidad es el agua que es posible extraer de un acuífero, así como las posibles consecuencias debido a su explotación, desde un punto de vista económico, ambiental y regional. ⁽¹⁸⁾

Durante la prueba se debe:

1. Mantener un gasto constante de bombeo
2. Precisión en las mediciones del abatimiento.
3. El registro de tiempo a que tienen lugar las mediciones que se tomen conforme avanza el bombeo.
4. Se sugiere dejar fuera del agua el electrodo de la sonda después de tomada la lectura entre los intervalos de medición.
5. En épocas de estiaje es necesario proteger las sondas de los rayos del sol porque provocan que la aguja del multímetro se atore debido al vapor que se produce en su interior, mientras que el cable puede sufrir modificaciones debido a los cambios de temperatura.
6. En el caso de suspenderse la prueba involuntariamente por alguna razón y si se considera que los datos obtenidos son útiles, hasta antes de la interrupción, se procede a medir la recuperación, en caso contrario se espera a que el nivel se recupere para iniciar nuevamente el bombeo. ⁽²⁴⁾
7. Por el efecto de capilaridad, se adhieren al electrodo algunas gotas de agua, lo que ocasiona que el circuito de la sonda se cierre, aún antes de llegar al nivel dinámico cuando se realiza la piezometría, esto provoca que la medición de los niveles del agua subterránea sea errónea, tal situación se puede evitar sacudiendo el electrodo de la sonda para que caiga el agua atrapada. ⁽²⁴⁾

Cabe señalar que las consideraciones antes citadas previa y durante la prueba de bombeo, son las mismas para realizar las pruebas de desarrollo y aforo, excepto que se bombea a caudal variable. Cada prueba tiene diferentes objetivos.

La frecuencia de la medición del nivel dinámico en los piezómetros del presente estudio fue la siguiente secuencia:

Número de Lectura	Tiempo a partir del inicio de bombeo (minutos)
1	0.25
2	0.50
3	0.75
4	1
5	2
6	3
7	5
8	8
9	10
10	15
11	30
12	45
13	60
	Después a cada 30 minutos hasta finalizar la prueba (71.5 horas).
n	

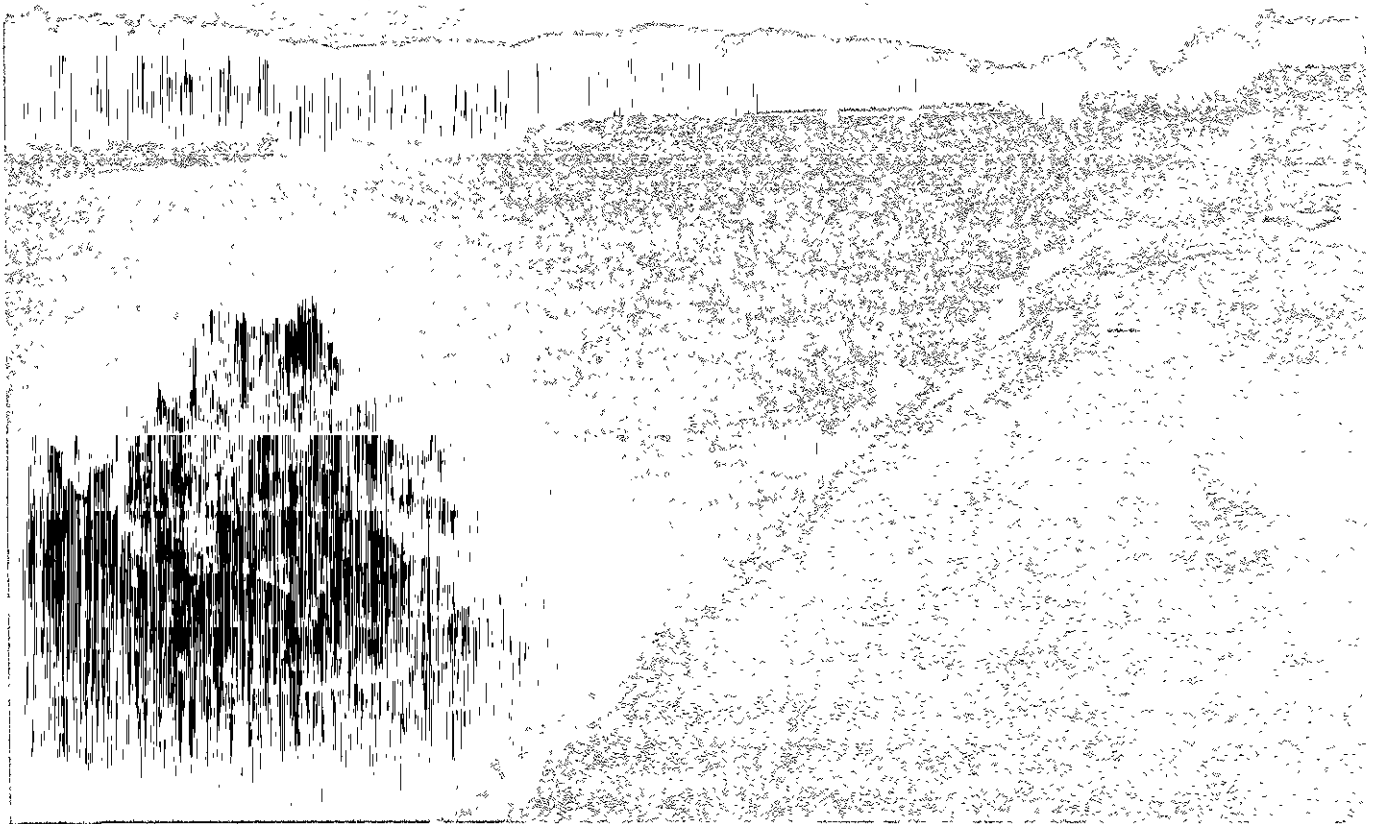
La prueba se realiza con el mismo equipo utilizado en el aforo del pozo.

Al concluir la prueba de bombeo se toman las medidas de recuperación con la misma secuencia de tiempos utilizados durante la etapa de abatimiento.

La información presentada complementa la parte descrita en el capítulo 1 referente a las pruebas de bombeo.

Capítulo 6

Selección del equipo de bombeo



CAPÍTULO 6. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO

6.1. EQUIPO DE BOMBEO PARA POZOS

La función del equipo de bombeo es transferir la fuerza necesaria de una fuente de energía para lograr que un fluido se desplace desde su punto de captación hasta el lugar en que va a utilizarse, impartiendo una velocidad al fluido con el propósito de desplazarlo contra la resistencia que se opone a su movimiento.⁽²⁵⁾

Las bombas para pozos profundos son aquellas que se colocan en el interior de los pozos y cuya función es elevar el agua desde profundidades mayores a 7.6 metros bajo la superficie del suelo, es decir, imparte energía hidráulica a un volumen de agua para su extracción.⁽³⁹⁾

Cabe señalar que el agua se requiere para usarse a alturas mayores que la del pozo y a una distancia significativa de la fuente de abastecimiento, por lo que se necesita algún medio para elevarla desde la fuente y forzarla a través de un tubo, a velocidades adecuadas, hasta los puntos y alturas de empleo (excepto en los pozos de flujo artesiano).⁽²⁸⁾

Para lograr los aspectos antes mencionados se requiere elegir la bomba apropiada, misma que estará en función de la capacidad de producción del pozo y del gasto de demanda.⁽⁴⁰⁾

Algunos aspectos a considerar son los siguientes.

Succión: también se le conoce con el nombre de aspiración o presión negativa y se refiere a la acción de atraer un fluido hasta una tubería o a una cámara de bombeo, mediante la producción de un vacío parcial, esto es, reduciendo la presión por debajo de la atmosférica. La presión atmosférica, sobre la superficie libre del agua contenida en un pozo, obliga al agua a subir y a desplazarse hasta aquella parte de la bomba en que se ha desarrollado una presión menor "succión".⁽³⁹⁾

Altura de succión: es el nivel al que se eleva el agua dentro del tubo por encima de la superficie. Una bomba debe ser capaz de bombear el agua, es decir, crear suficiente succión para elevarla en el tubo hasta el nivel del extremo de succión de la bomba (figura 6.1.).⁽²⁸⁾

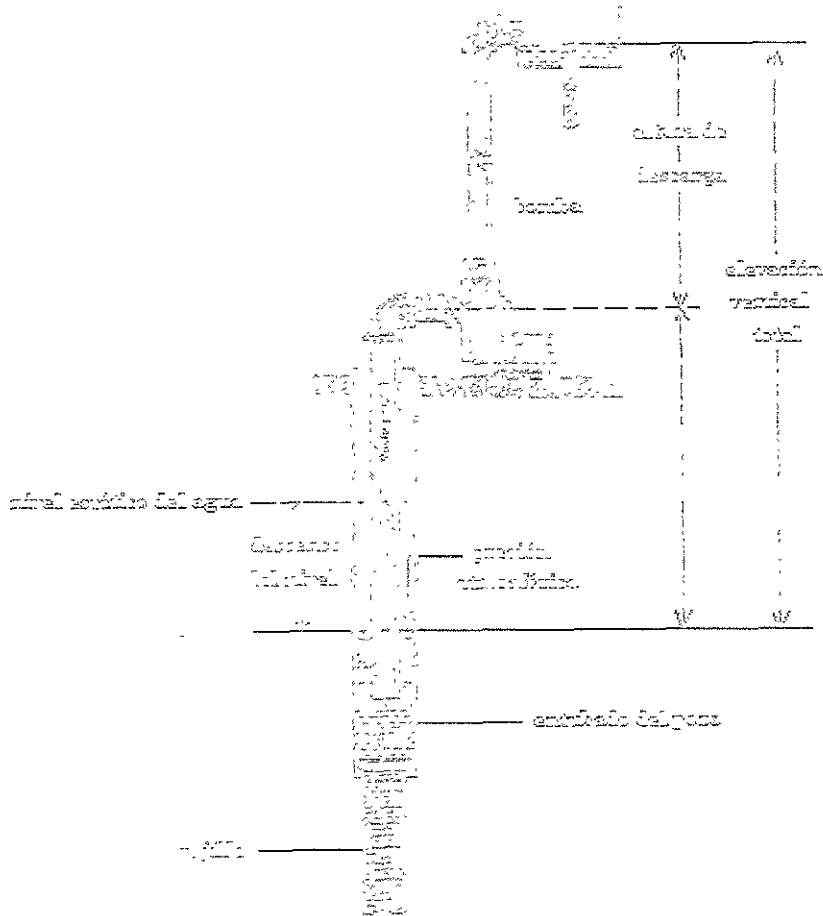
La altura de succión se ve afectada por factores como la temperatura del agua y la fricción o resistencia al flujo en la tubería, provocándole una reducción.⁽³⁵⁾

Cebado de una bomba: es el proceso de introducir agua en una bomba con el propósito de desalojar el aire atrapado en ella y en su tubo de succión durante los periodos de reposo.⁽³⁹⁾

Bomba centrífuga: es un mecanismo de bombeo con la capacidad de descargar agua en cantidades importantes contra cargas altas y bajas con una eficiencia adecuada.⁽⁴⁶⁾

Cavitación: fenómeno que se presenta cuando se bombea agua bajo la condición de que siempre la presión en cualquier punto de la tubería de succión o en la bomba, llega a reducirse a un valor igual al de la presión de su vapor, lo que ocasiona la formación de burbujas de aire en el seno del líquido. Cuando se desplazan estas burbujas de mayor presión en su recorrido por la bomba, estas burbujas estallan violentamente por la acción llamada implosión. La formación y el estallido de estas burbujas, recibe el nombre de Cavitación. Para evitar la situación y lograr el buen funcionamiento de la bomba se necesita la carga neta requerida a la entrada NREH (Carga neta estática que se necesita en el punto de entrada de la bomba), que está en función del diseño de la bomba, tipo de bomba, modelo y del fabricante (59).

Figura 6.1. Principios de bombas de un pozo



FUENTE: REXFORD D. S. y CLICO E. G. (1989). Manejo de los pozos pequeños. Washington D.C. Edic. Lincoln. 6ª. Reimpresión E.U.A. 1982 pp.

6.1.1. BOMBAS EYECTORAS

Consisten en la combinación de un eyector y una bomba centrífuga, descargando a un tanque hidroneumático y con descarga dividida hacia el tanque y hacia el pozo. Las partes giratorias se localizan en la superficie (motor e impulsor); en el pozo entran dos tuberías: ramal de descarga y tubo de succión.⁽⁴⁰⁾

La bomba se ceba totalmente y se hace trabajar. Se alcanza el sistema de presión requerido para abrir la válvula de alivio instalada en la descarga, sale y se almacena en el tanque hidroneumático.⁽⁴⁰⁾

Esta bomba satisface demandas de flujo de 0.25 hasta 4 l/s; su alcance es hasta 35 m de nivel de bombeo y presiones de descarga de 20 a 40 psig. Su empleo es común en granjas pequeñas, uso doméstico, riego de jardines, abrevaderos para ganado, entre otros.⁽⁴⁰⁾

Algunas ventajas de este tipo de bombas:⁽¹⁸⁾

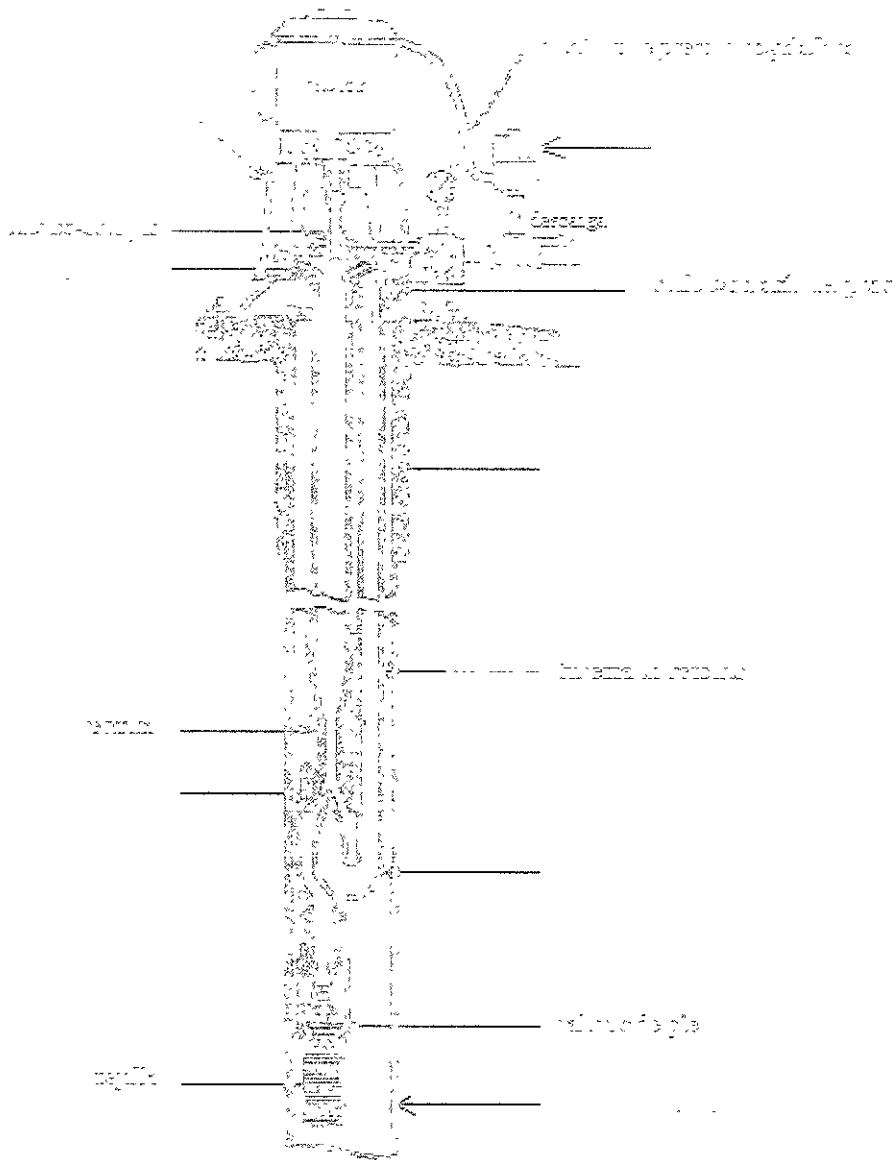
1. No cuentan con partes o piezas móviles dentro del pozo.
2. El costo y mantenimiento son económicos
3. Pueden adaptarse a pozos pequeños.
4. Son de fácil acceso a cualquier tipo de terreno.

Desventajas:⁽¹⁸⁾

1. Reduce su capacidad cuando se incrementa la altura de la columna de bombeo.
2. La boquilla del eyector debe estar sumergida como mínimo 1.5 m.
3. Se interrumpe el bombeo cuando existe entrada de aire en la línea de aspiración.

La bomba eyectora y las partes que la componen se muestran en la figura 6.1.1.

Figura 6.1.1. Bomba eyectora



FUENTE: REXFORD, D. S. y ULRIC, P. G. op cit

6.1.2. BOMBAS SUMERGIBLES

Están formadas por una bomba centrífuga ajustada a un motor que opera sumergido en el agua. Por la descarga la bomba se conecta a la tubería de columna que conducirá el agua hasta la superficie. La operación del equipo resulta silenciosa, cómoda para emplearse en granjas, poblados y otros lugares cercanos al pozo, también es indispensable para aquellas condiciones donde la verticalidad y el alineamiento del pozo se pierden (pozos chuecos), además se colocan hasta profundidades de 150 m. ⁽⁴⁰⁾

Otras ventajas que ofrecen este tipo de bombas: ⁽¹⁸⁾

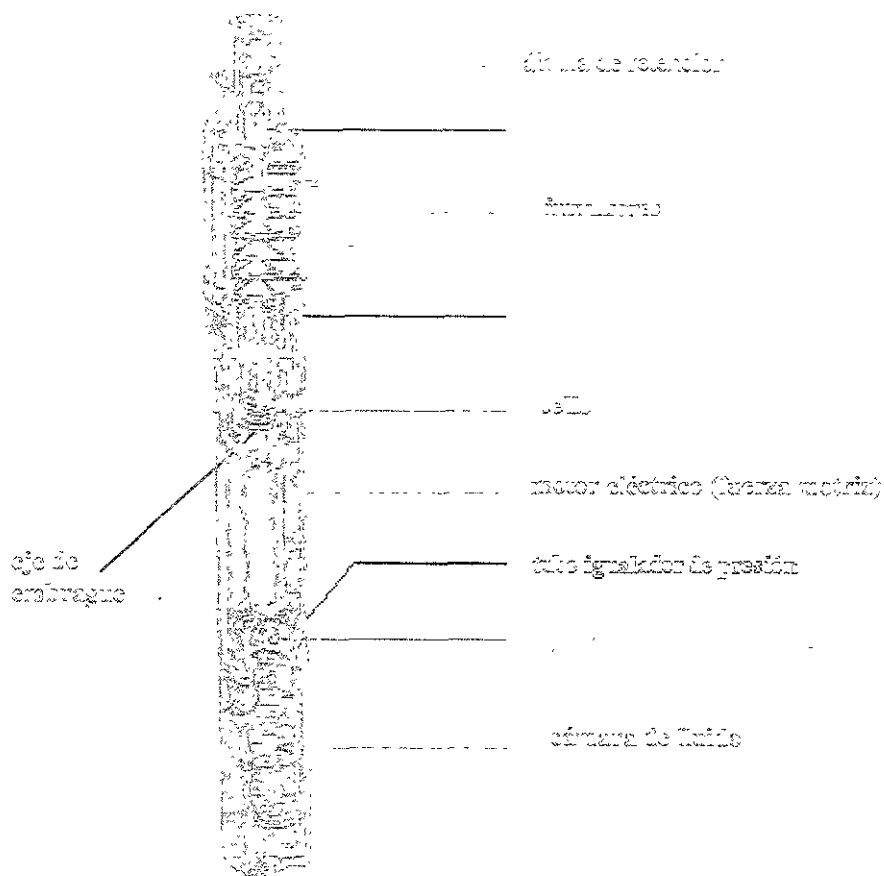
1. Los gastos de instalación son bajos.
2. Presentan pocos problemas de mantenimiento.
3. Se puede operar bajo períodos largos de tiempo.
4. El eje de embragues es corto de la bomba al motor.

Sus limitantes principales son: ⁽¹⁸⁾

1. La temperatura del líquido
2. Contenido de sólidos abrasivos (pueden dañar el motor).
3. La corrosión, líquido y diámetro del pozo, el cual limita la potencia del motor, sin embargo en la actualidad se fabrican en potencias que varían de 0.50 hasta 200 hp.
4. Para reparar el motor o la bomba es necesario extraerla del pozo.
5. Los cables sumergidos del motor pueden ocasionar problemas eléctricos.

La bomba sumergible y las partes que la constituyen se muestran en la figura 6.1 2.

Figura 6.1.2. Bomba Sumergible



FUENTE: CHÁVEZ GULLÉN, R. et al. (1994). Perforación de Pozos. CNA/IMTA/Libro 5/3ª Sección/Geohidrología. México 256 pp

6.1.3. BOMBAS TIPO TURBINA DE EJE VERTICAL

Son bombas centrífugas que pueden estar lubricadas con agua o aceite. En caso de bombear agua potable se emplea la lubricación con agua (figura 6.1.3.), excepto cuando se tenga arena en un pozo debido a que afecta algunos componentes que integran la bomba (tazones, estabilizadores y flechas de transmisión) en este caso se recomienda usar la lubricación con aceite.⁽⁴⁰⁾

Los motores que se fabrican y se emplean oscilan entre 15 y 350 hps. ⁽¹⁰⁾

Algunas características y ventajas de este tipo de bombas son. ⁽¹⁸⁾

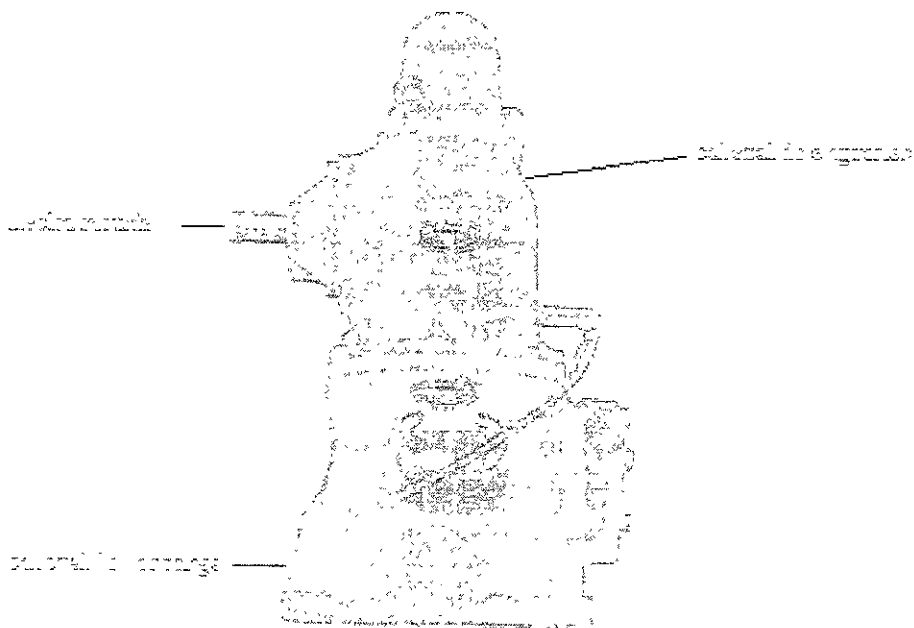
1. La profundidad de bombeo es mayor a 76 m.
2. Su motor opera entre 1740 r.p.m. y 1785 r p m.
3. La carga de presión está entre 30,5 m y 244 m. de agua.
4. Proporciona un buen servicio garantizando su confiabilidad.
5. Dificilmente pueden presentarse fallas eléctricas.
6. Presenta un flujo uniforme y suave.
7. Bombea agua que contiene arena y limo.
8. La presión en este tipo de bombas es uniforme y está exenta de choques.

Algunas desventajas son: ⁽¹⁸⁾

1. Está propensa a la abrasión por la arena.
2. Cuando se bombea agua corrosiva el sistema presenta problemas de mantenimiento.
3. Es necesario para su funcionamiento contar con una buena verticalidad y alineamiento del pozo para su instalación, siempre y cuando trabaje bajo carga y velocidad de diseño.

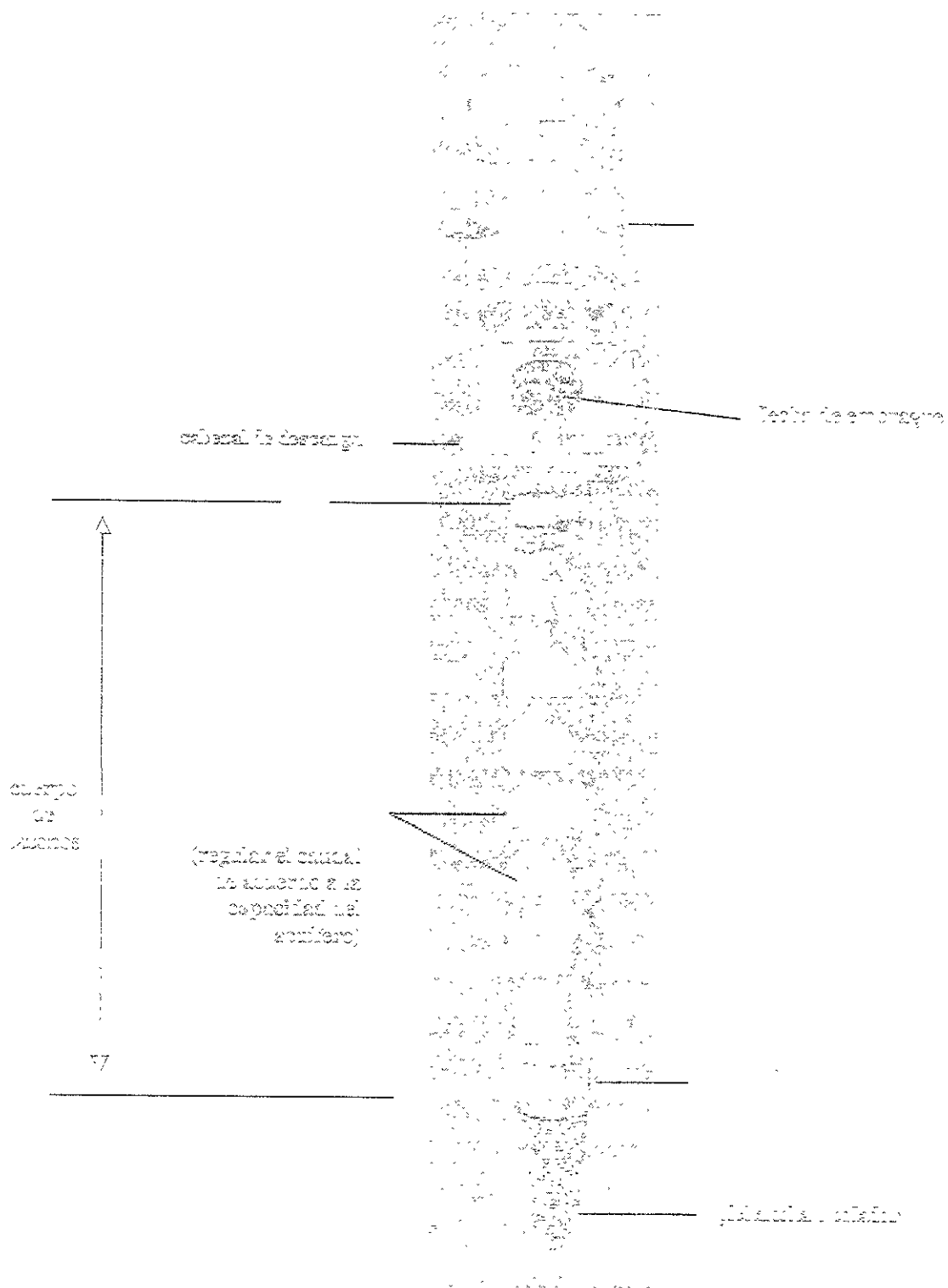
Figura 6.1.3. Bomba vertical lubricada con agua

A) Cabezal de descarga



FUENTE: PEERLESS TISA, S.A. (1988). Bombas verticales tipo turbina. Boletín No 178-XI-1. México. 16 pp.

B) Partes visibles que integran la bomba vertical lubricada con agua



FUENTE: PEBBLESS TUSA, S.A., op.cit., modificado por el Ing. Mario Patricio Rodríguez Martínez.

6.2. CRITERIO DE SELECCIÓN

El elegir la bomba adecuada implica la consideración de varios factores, la siguiente exposición presenta algunos de los más importantes.

6.2.1. INFORMACIÓN REQUERIDA

1. Rendimiento del pozo: No es posible extraer más agua de un pozo que la cantidad determinada por su rendimiento máximo. Por esto es importante elegir una bomba cuya capacidad de descarga sea más grande que lo que rendirá el pozo, estando íntimamente ligado con las demandas estimadas. ⁽³⁹⁾

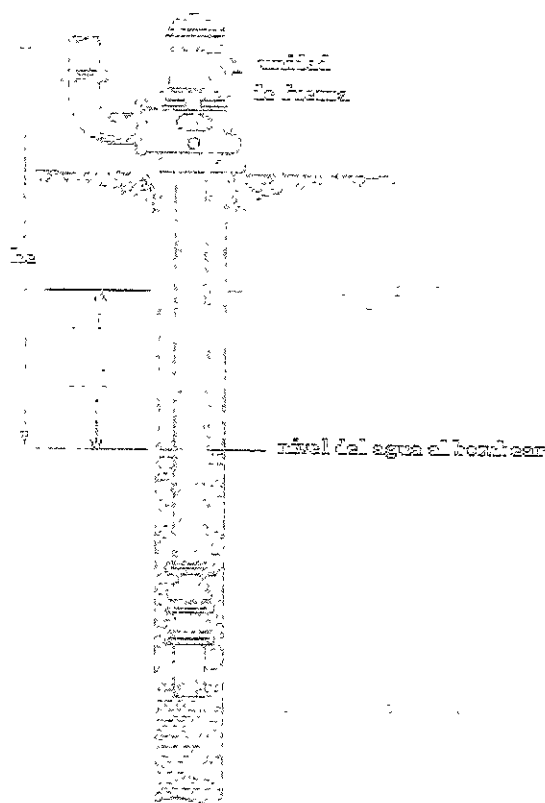
2. Tipo de energía disponible: No todos los equipos de bombeo se pueden adaptar a cualquier tipo de energía. La disponibilidad de energía eléctrica por periodos limitados afecta las labores del equipo de bombeo. ⁽²⁸⁾

3. Profundidad al nivel de bombeo y carga total: Dependiendo de la carga algunas bombas resultan ser más eficientes que otras. Se determina la capacidad de la bomba para posteriormente estimar la carga total de bombeo, agregando la altura total vertical del nivel de bombeo del agua al punto de entrega del líquido, además de considerar las pérdidas totales por fricción que suceden en las tuberías de succión y descarga (figura 6.2.1). ⁽³⁹⁾

4. Precio de compra y costo de operación: Son factores económicos importantes a considerar y están en función de las necesidades del cliente.

5. Disponibilidad de piezas de repuesto y servicio de mantenimiento: La falta de refacciones puede ocasionar retrasos en la operación trayendo como consecuencia el paro total o temporal del equipo de bombeo, asimismo la falta de mantenimiento puede provocar deficiencias y costos adicionales en el funcionamiento y operación del equipo. ⁽³⁹⁾

Figura 6.2.1. La carga total de bombeo de la bomba de un pozo de agua contempla la altura vertical (h_e), la carga de velocidad (puede despreciarse) y las pérdidas por fricción en la tubería.



FUENTE: REXFORD, D. S. y ULRIC, P. G. op.cit.

6.2.2. PROCEDIMIENTO PARA ELEGIR EL EQUIPO DE BOMBEO ADECUADO

En la tabla 6.1. se proporciona una guía para seleccionar la bomba más adecuada según las condiciones particulares de empleo.

La tabla 6.2. es una guía para hacer una buena elección de la potencia de la bomba requerida en función de la carga y el gasto del diseño.

Tabla 6.1. Guía general para elegir la bomba.

TIPO DE BOMBA	ALTURA PRÁCTICA DE ASPIRACIÓN (m).	PROFUNDIDAD USUAL DE BOMBEO (m).	CARGA DE PRESIÓN (m DE AGUA)	VENTAJAS	DESVENTAJAS	OBSERVACIONES
Turbina de eje vertical	Impulsores sumergibles	7.5	35-270	<ol style="list-style-type: none"> 1 Funcionamiento adecuado. 2. Descarga constante bajo presión variable. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se necesita la verticalidad del pozo. 2 Su funcionamiento es el adecuado siempre y cuando se trabaje sobre diseño 3 Se debe lubricar el eje vertical 4 Propensa a la abrasión por la arena. 	Su costo es elevado para su mantenimiento cuando se están bombeando aguas corrosivas
Sumergible	Bomba y motor sumergibles	7.5	15-135	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mismas que turbina de eje vertical. 2 Su colocación es económica 3 Bajos niveles de ruido 4 Requiere de menos mantenimiento que la bomba anterior. 5 De la bomba al motor el eje es corto 6 La verticalidad del pozo no es tan necesaria. 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Para reparar el motor o la bomba es necesario sacarlas del pozo 2 Sujeta a la abrasión por arena. 3 La falta de alguna pieza o la reparación del equipo puede requerir su envío al fabricante 	<ol style="list-style-type: none"> 1. No requiere mantenimiento constante debido a su buen diseño 2 Contra fallas de energía el motor debe protegerse por medio de un dispositivo especial
Eyectora	20-100	7.5	25-45	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fácil de operar 2 Su costo y mantenimiento son económicos. 3. No tiene partes móviles en el interior del pozo. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Al aumentar la altura su capacidad resulta reducida 2. Es ineficiente. 3 Aue en la línea de aspiración o de retorno, interrumpe el bombeo 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Tiene una descarga limitada a 1.5 l/s 2 El incremento de su altura es provocado cuando el agua regresa al eyector

FUENTE: REXFORD, D. S. y ULRIC, P. G. (1989). Manual de los pozos pequeños. Washington D.C. Edit. Limusa 6ª Reimpresión F.U.A. 182 pp.

Tabla 6.2. Guía para elegir la potencia adecuada, en función del gasto requerido y a diferentes alturas.

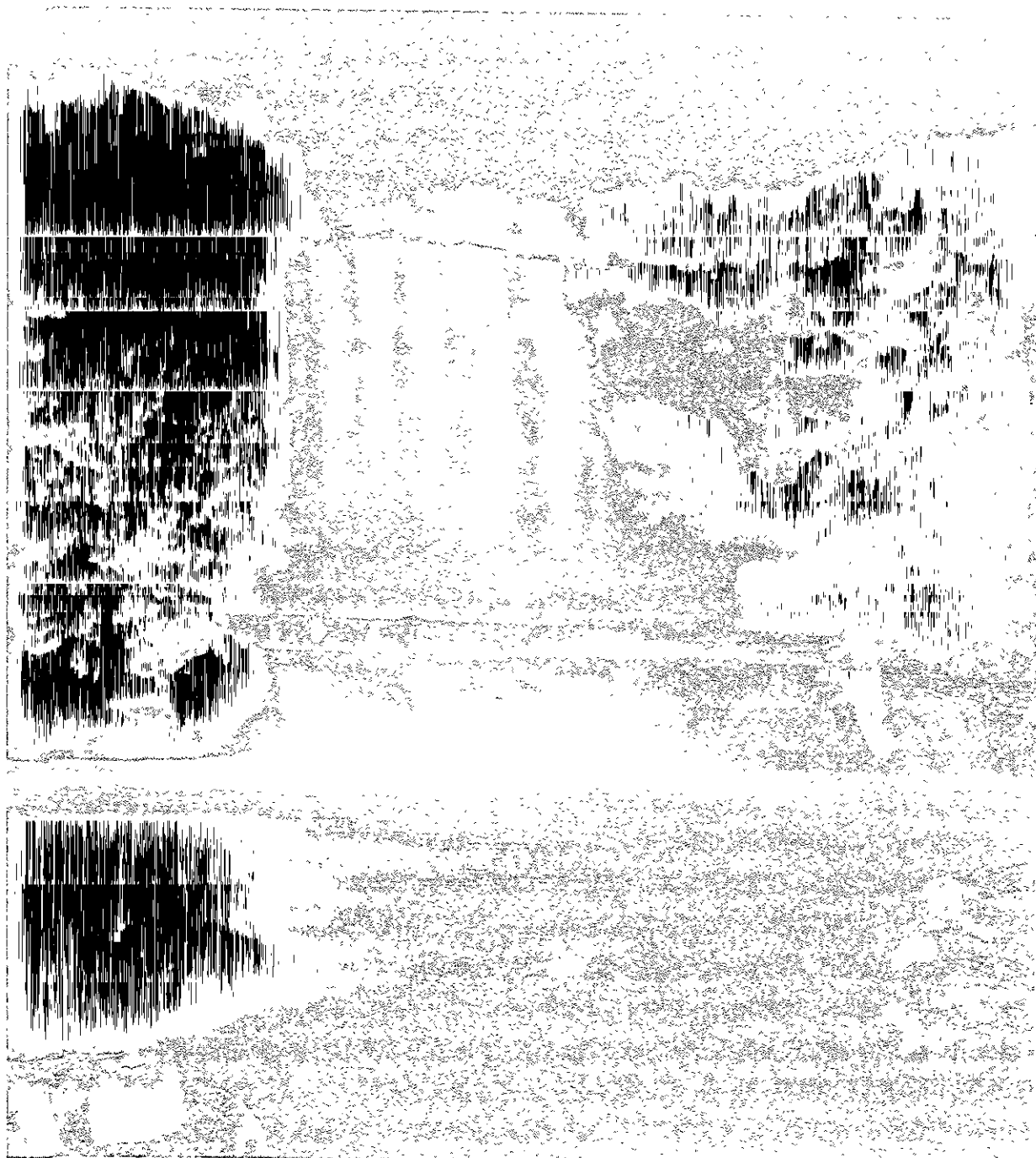
Potencia teórica (en H.P.) requerida para elevar agua a diferentes alturas.

Altura en metros.																					
l/s	1.5	3.05	4.57	6.10	7.62	9.14	10.67	12.19	13.72	15.24	16.77	18.29	19.81	21.34	22.86	24.38	25.90	27.43	28.95	30.48	32.00
0.23	0.006	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038	0.044	0.051	0.057	0.063	0.070	0.076	0.083	0.089	0.096	0.102	0.108	0.114	0.120	0.126	0.132
0.63	0.013	0.025	0.038	0.051	0.063	0.076	0.088	0.101	0.114	0.126	0.138	0.150	0.162	0.174	0.186	0.198	0.210	0.222	0.234	0.246	0.258
0.95	0.019	0.038	0.057	0.076	0.095	0.114	0.133	0.152	0.171	0.190	0.209	0.228	0.247	0.266	0.285	0.303	0.321	0.339	0.357	0.375	0.393
1.26	0.025	0.051	0.076	0.101	0.126	0.152	0.177	0.202	0.227	0.243	0.303	0.354	0.404	0.455	0.505	0.632	0.758	0.884	1.011	1.263	1.516
1.58	0.032	0.063	0.095	0.126	0.158	0.190	0.221	0.253	0.284	0.316	0.379	0.442	0.505	0.568	0.632	0.790	0.947	1.105	1.263	1.579	1.895
1.89	0.038	0.076	0.114	0.152	0.190	0.227	0.265	0.303	0.341	0.379	0.455	0.531	0.606	0.682	0.758	0.947	1.137	1.326	1.516	1.895	2.274
2.21	0.044	0.088	0.133	0.177	0.221	0.265	0.310	0.354	0.398	0.442	0.531	0.619	0.707	0.796	0.884	1.105	1.326	1.547	1.768	2.211	2.653
2.52	0.051	0.101	0.152	0.202	0.253	0.303	0.354	0.404	0.455	0.505	0.606	0.707	0.808	0.910	1.011	1.263	1.516	1.768	2.021	2.526	3.032
2.84	0.057	0.114	0.171	0.227	0.284	0.341	0.398	0.455	0.512	0.568	0.682	0.796	0.910	1.023	1.137	1.421	1.700	1.990	2.274	2.842	3.411
3.15	0.063	0.126	0.190	0.253	0.315	0.379	0.442	0.505	0.568	0.632	0.758	0.884	1.011	1.137	1.263	1.579	1.895	2.211	2.526	3.158	3.790
3.79	0.076	0.152	0.227	0.303	0.379	0.455	0.531	0.606	0.682	0.758	0.910	1.061	1.213	1.364	1.516	1.895	2.274	2.653	3.032	3.790	4.548
4.42	0.088	0.177	0.265	0.354	0.442	0.531	0.619	0.707	0.796	0.884	1.061	1.238	1.415	1.592	1.768	2.211	2.653	3.095	3.537	4.421	5.305
5.15	0.101	0.202	0.303	0.404	0.505	0.606	0.707	0.808	0.910	1.011	1.213	1.415	1.617	1.819	2.021	2.526	3.032	3.537	4.042	5.053	6.063
5.68	0.114	0.227	0.341	0.455	0.568	0.682	0.796	0.910	1.023	1.137	1.364	1.592	1.819	2.046	2.274	2.842	3.411	3.979	4.548	5.684	6.821
6.31	0.126	0.253	0.379	0.505	0.632	0.758	0.884	1.011	1.137	1.263	1.516	1.768	2.021	2.274	2.526	3.158	3.790	4.421	5.053	6.316	7.579
7.89	0.158	0.316	0.474	0.632	0.790	0.947	1.105	1.263	1.421	1.579	1.895	2.211	2.526	2.842	3.148	3.948	4.737	5.527	6.316	7.895	9.474
9.46	0.190	0.379	0.568	0.758	0.947	1.137	1.326	1.516	1.705	1.895	2.274	2.653	3.032	3.411	3.790	4.737	5.684	6.632	7.579	9.474	11.37
11.04	0.221	0.442	0.663	0.884	1.105	1.326	1.547	1.768	1.990	2.211	2.653	3.095	3.537	3.979	4.421	5.527	6.632	7.737	8.842	11.05	13.26
12.62	0.253	0.505	0.758	1.011	1.263	1.516	1.768	2.021	2.274	2.526	3.032	3.537	4.042	4.548	5.053	6.316	7.579	8.842	10.11	12.63	15.16
15.77	0.316	0.632	0.947	1.263	1.579	1.895	2.211	2.526	2.842	3.158	3.079	4.421	5.053	5.684	6.316	7.895	9.474	11.05	12.63	15.79	18.95
18.93	0.379	0.758	1.137	1.516	1.895	2.274	2.653	3.032	3.411	3.794	4.548	5.305	6.063	6.821	7.579	9.474	11.37	13.26	15.16	18.95	22.74
22.08	0.442	0.884	1.326	1.768	2.211	2.653	3.095	3.537	3.979	4.421	5.305	6.190	7.074	7.958	8.842	11.05	13.26	15.47	17.68	22.11	26.53
25.24	0.505	1.011	1.516	2.021	2.526	3.032	3.537	4.042	4.548	5.053	6.063	7.074	8.084	9.095	10.11	12.63	15.16	17.68	20.21	25.26	30.32
31.55	0.632	1.263	1.895	2.526	3.158	3.790	4.421	5.053	5.684	6.316	7.579	8.842	10.11	11.37	12.63	15.79	18.95	22.11	25.26	31.58	37.90

FUENTE: CHÁVEZ Guillen, R. (1994). Perforación de pozos, CNA/IMTA/Libro 5/3ª sección, Geohidrología, México

Capítulo 7

Ejemplo de aplicación



CAPÍTULO 7. EJEMPLO DE APLICACIÓN

7.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como resultado del desarrollo que han tenido municipios, ciudades y países en sus diversos sectores agrícola, económico e industrial, entre otros, en algunos existen problemas de escasez de agua debido a la falta de cultura sobre dicho recurso, dificultándose su obtención conforme transcurre el tiempo, es por ello que actualmente se buscan distintas fuentes de abastecimiento, unas de ellas son las obras de captación de aguas subterráneas.

Con el propósito de satisfacer las demandas de agua para la ciudad de Acapulco de Juárez, en el estado de Guerrero, particularmente en lo que se refiere a la Zona Diamante, que presenta déficits que requieren ser atendidos oportunamente, la Comisión Nacional del Agua (CNA) solicitó a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que se realizaran los estudios convenientes, los cuales consisten en caracterizar geohidrológicamente los materiales que conforman el subalveo del Río Papagayo del sitio denominado Obra de Toma, con ello se busca analizar la factibilidad de ubicar obras hidráulicas (pozos tipo Ranney) para la captación de agua del subalveo, con las cuales la CNA pretende explotar $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ante los problemas sociales y la negativa para permitir el acceso al sitio de estudio (Obra de Toma), por parte de los ciudadanos que integran la población de Aguas Calientes, se buscó la manera de llegar a un convenio, con el propósito de encontrar una solución adecuada. Como resultado de estas negociaciones, se dio empleo a la población.

El hecho de hallar agua no garantiza que sea de buena calidad, ni la suficiente para los requerimientos de una ciudad o población, se debe encontrar en cantidades significativas.

Con el apoyo de la información exploratoria, geohidrológica, geológica, geofísica y perforación, se buscó el sitio más adecuado para ubicar un pozo, que capte las aguas subterráneas (se buscan los estratos o materiales del subsuelo más permeables), el cual estará sometido a distintas pruebas para establecer su rendimiento y/o caudal de producción, para una mejor explotación del acuífero, asegurándose que el agua por extraer sea de calidad apropiada, sometiendo a análisis físico-químicos convenientes según lo considere el ingeniero químico y que cumpla con la Norma Oficial Mexicana NOM - 127 - SSA1 - 1994, "Legislación del agua para uso y consumo humano, decretada por la Secretaría de Salud en el Diario Oficial de la Federación", además debe tomarse en cuenta que la obra de captación realizada por la CFE fue un pozo de prueba de uso provisional. La construcción del pozo tipo Ranney, no corresponde a la CFE, estará a cargo según las bases de concurso que emita la CNA.

Para trasladar el equipo de perforación de la ciudad de Acapulco a la Zona de estudio, se buscaron diferentes rutas, presentándose los siguientes problemas:

- o No fue posible el acceso por la margen izquierda del río, porque sólo existe un camino de terracería que conduce del poblado de las Cruces al área de estudio. La ventaja de este camino es que se encuentra en buenas condiciones y el acceso es directo al sitio de interés, sin necesidad de cruzar el río.

En dicha ruta existe afectación de predios (limoneros) y cuyo propietario solicitaba indemnización, ya que el equipo transportado sobre la grúa hiap rozaba con algunas ramas de sus árboles. Al no llegar a un acuerdo con el dueño, se buscó otra alternativa.

- o Por la margen derecha se presentó el inconveniente de cruzar el río, por lo que se buscó la manera de transportar el equipo sin dañarlo, para llevarlo hacia la margen izquierda. Con el apoyo de un tractor se construyó un camino provisional (fotografía 7.1.a y b) con material del río, el cual se realizó perpendicular a la dirección de flujo, con una serie de varas alineadas que indicaban el camino. El equipo fue montado sobre la grúa hiap, el cual era jalado por un tractor komatsu D45-A (fotografía 7.1.c), operación que facilitó las maniobras para pasar al otro lado del río.



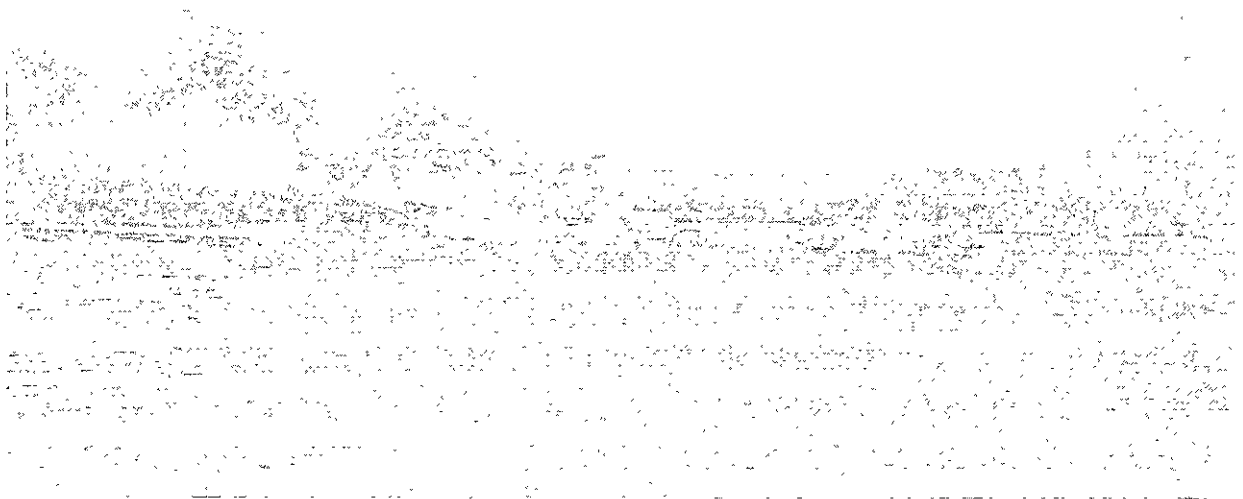
Fotografía.1.7.a. Aspecto y acondicionamiento del camino en la margen derecha del Río Papagayo.

La nomenclatura utilizada para identificar los pozos de observación (piezómetros) es "OT - 1" que significa Obra de Toma – el número corresponde al piezómetro y su asignación deberá ser en orden creciente, mientras que el pozo principal (pp) se reconoce con la notación "OT-PP".

El ejemplo de aplicación es el "Avance del Estudio Integral de Sistemas de Abastecimiento de Agua Subterránea a la Cd. de Acapulco, Guerrero (Ríos Papagayo y Coyuca)", los datos tomados pertenecen al sitio Obra de Toma.



Fotografía 7.1.b. Construcción de un camino provisional para transportar el equipo y herramienta de perforación hacia la margen izquierda del Río Papagayo.



Fotografía 7.1.c. Traslado del equipo de perforación a la zona de estudio con ayuda de un tractor.

7.2. UBICACIÓN

Para llegar al sitio de estudio desde la Cd. de Acapulco, Guerrero, se toma la Autopista de Sol con dirección a la Cd. Mexico, en el km. 5 existe una caseta de cobro que conduce a la carretera federal No. 200, la cual comunica a la Cd. de Pinotepa Nacional. Aproximadamente en el km. 22 se toma una desviación, pasando por las siguientes poblaciones: Amatillo, Cazacuilla y Aguas Calientes; se continúa hasta llegar al embarcadero y a 500m se dobla hacia la derecha, acercándose a la ribera del Río Papagayo por la margen derecha. Siguiendo la terracería con un recorrido de 700m se llega al área de estudio (figuras 7.2.a y 7.2.b).

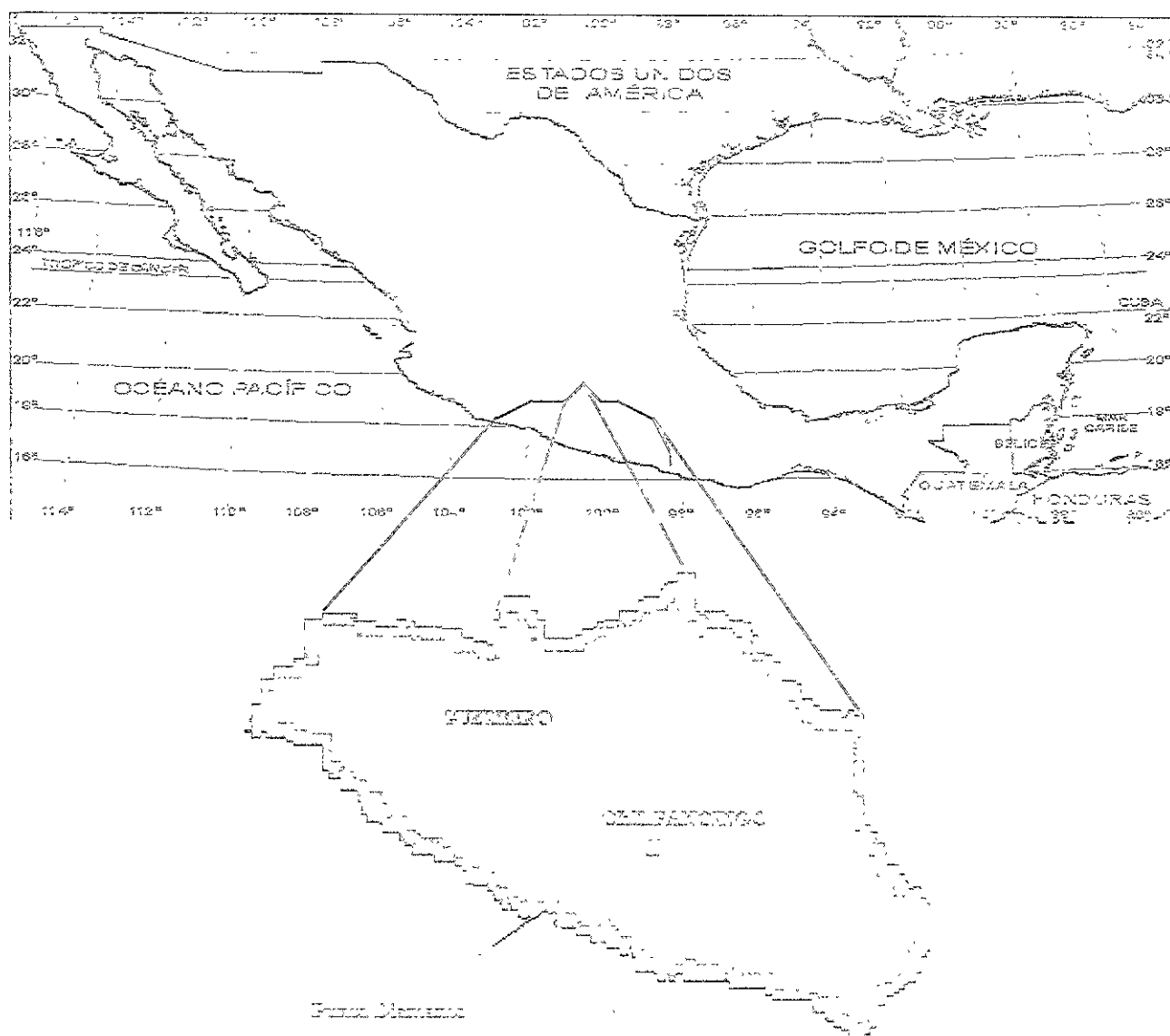


Figura 7.2.a. Ubicación del área de estudio dentro de la República Mexicana.



FIGURA 7.2.b. Localización del área de estudio

ESCALA 1:250 000

7.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

Para apreciarlas se hizo un reconocimiento en campo, con el apoyo de un especialista se estudiaron las diversas formaciones geológicas que conforman la zona de estudio, los resultados fueron los siguientes:

- I. Depósitos aluviales: constan de boleos de distinta composición (graníticos, esquistos o gneis), cuyos tamaños varían desde los 15 cm de diámetro hasta arenas de grano fino, presentándose algunos lentes arcillosos y limo-arcillosos intercalados con ese material. Por medio de barrenos (perforación exploratoria), efectuados sobre la margen izquierda del Río Papagayo, se estableció que el espesor de los acarrees varía desde los 4 hasta los 15 m. Por su poco contenido de materiales finos se estima que su permeabilidad es alta.
- II. Terrazas aluviales: se les agrupa dentro de los primeros, la diferencia radica en que los materiales que integran las terrazas tienen diferentes características granulométricas, constituidas por boleos mezclados con arenas finas y limos en mayor proporción en comparación con los depósitos aluviales descritos anteriormente.

Se localizan en ambos márgenes del río. Se estima que tienen una permeabilidad de alta a media, debido a su alto contenido de materiales finos y su espesor varía entre 1 y 8 m.

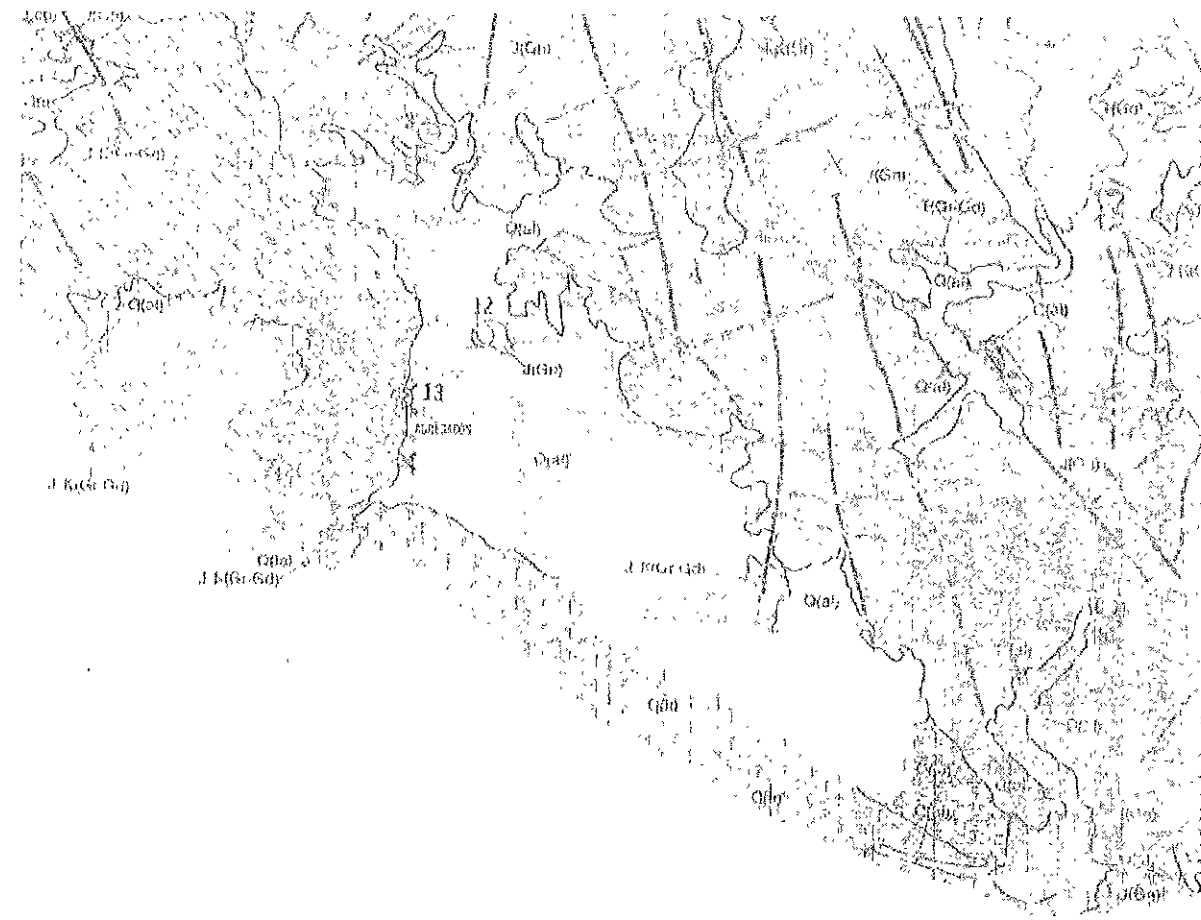
- III. Complejo Xolapa: esta unidad está situada en la Sierra Madre del Sur, su longitud aproximada es de 600 Km, su amplitud tiene cerca de 75 Km, y su espesor es de poco más de 10 Km. Está dispuesto en forma paralela a la margen continental del Pacífico.

El complejo está formado por rocas metamórficas, esquisto y gneis aflorando considerablemente. Se estima una permeabilidad nula.

En las rocas del Complejo Xolapa se alojan cuerpos ígneos graníticos y granodioríticos; las rocas metamórficas están cubiertas discordantemente por conglomerado y suelo aluvial del Cuaternario.

El gneis es de clase cuarzofélsica; que se caracteriza por ser compacto o delznable dependiendo del grado de intemperismo.

La morfología es de lomas y cerros que no rebasan los 500 m de altitud.



NOMENCLATURA

- Sedos de cuencas sedimentarias y volcanos-andinoandesitas del Cuaternario
- Masas ígneas volcánicas del Terciario
- Masas ígneas intrusivas del Mesozoico
- Masas metamórficas del Jurásico

Masas ígneas intrusivas

- Cg Cuyotlán
- Cd Comandlácua

Masas sedimentarias

- Cg Cuyotlán
- Cg Comandlácua

Masas metamórficas

- Esquistos
- Gs Gneiss

Suelos

- Al Aluvial
- Lc Luvial
- P Páramo

- ⊗ zona de estudio
- contorno
- contorno hidrográfico
- falla de rumbo
- falla normal
- falla inversa
- fractura
- elevación

- localidad o punto de referencia
- + elevación de 0-10 metros
- + elevación de 10-30 metros
- elevación de 30-50 metros
- + Elevación

FIGURA 7.3. Carta geológica regional del área de estudio (INEGI), (1994).

ESCALA: 1:250 000

7.4. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

La Comisión Nacional de Agua estableció el arreglo y las distancias entre cada piezómetro, según lo muestra la siguiente figura:

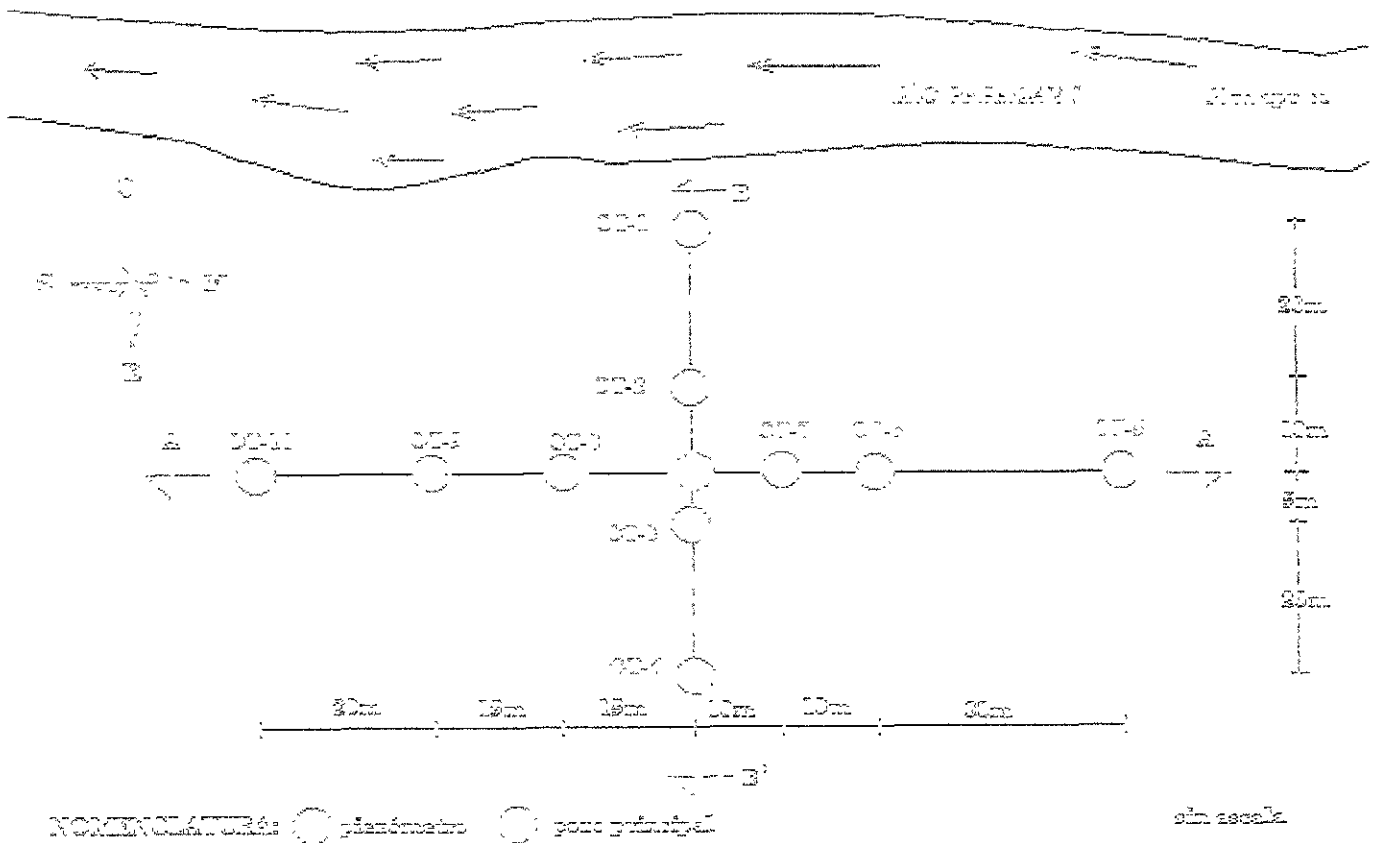


Figura 7.4. a. Arreglo piezométrico

Con este arreglo de pozos de observación se estudió el comportamiento del acuífero en la zona.

Durante la perforación exploratoria se tomaron muestras de canal a cada metro cuando hubo recuperación. El muestreo de canal procede de la molienda y trituración de los materiales de tamaños variables, relacionándolos con rotación y presión que ejerce el equipo rotatorio durante los trabajos de perforación.

La clasificación de las muestras durante la etapa de la perforación exploratoria así como los resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad se muestran respectivamente en las Figuras 7.4.b (sección transversal hidrogeológica) y 7.4.c (sección longitudinal hidrogeológica), mostradas en páginas subsecuentes

A manera de ejemplo se muestra el procedimiento para el cálculo de la conductividad hidráulica de acuerdo al tramo que se indica para el barrenó OT-1, según la información obtenida en campo.

datos de la prueba:

- o tramo a probar de 0.70m a 2.80m =L
- o diámetro del ademe. NQ = 0.0699 m y NW = 0.0809m
- o profundidad del nivel freático (Z N.F. = 0.29m)
- o tiempo de cada observación (t = 10s)
- o distancia del terreno natural a boca del ademe (brocal) (P =2.23m)
- o Zo = distancia del nivel freático (N.F.) a boca del ademe (brocal) = Z N.F. + P



$$=0.29 + 2.23 =2.52m$$

Solución: las lecturas tomadas en campo de 6 observaciones y el cálculo de las cargas hidráulicas y la velocidad para la realización de pruebas tipo Leifranc en la determinación de la permeabilidad se presentan en la tabla siguiente:

Lecturas y cálculos

Número de observación.	1	2	3	4	5	6
h ₁ = Profundidad inicial en metros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
h ₂ = Profundidad final en metros	1.24	1.05	1.31	1.13	1.11	1.29
Z= h ₂ -h ₁	1.24	1.05	1.31	1.13	1.11	1.29
Carga hidráulica en metros						
Z/t= Velocidad en m/s	0.124	0.105	0.131	0.113	0.111	0.129

Para verificar que la prueba se realizó bien en campo, es necesario graficar en el eje de las abscisas la velocidad (z/t) en m/s, mientras que en el eje de las ordenadas, la carga hidráulica (z) en m, cuya unión de puntos da como resultado una línea recta. Otra manera de verificar que la prueba se hizo correctamente, es calculando la pendiente de la recta (δ), mediante la ecuación:

$$\delta = (Z_2 - Z_1) / [(Z_2/t) - (Z_1/t)] \quad \text{Con} \quad (Z_2/t) \neq (Z_1/t)$$

Comprobación: sustituyendo valores se tiene.

$$\delta = (1.29 - 1.24) / (0.129 - 0.124) = 10$$

dicho valor que multiplicado por la velocidad obtenida en cada lectura, da como resultado la carga hidráulica, esto es:

$$0.124 * 10 = 1.24$$

$$0.105 * 10 = 1.05$$

$$0.131 * 10 = 1.31$$

$$0.113 * 10 = 1.13$$

$$0.111 * 10 = 1.11$$

$$0.129 * 10 = 1.29$$

Lo que quiere decir que la prueba estuvo bien ejecutada en campo. En caso de que la pendiente de la recta resulte negativa, se toma su valor absoluto.

A continuación, se calcula en gabinete el valor de la conductividad hidráulica. Se procede a llenar la hoja de cálculo, pero antes se determinan las variables (A, C y K), aplicando las fórmulas descritas en el tema 1.3.2 del capítulo primero, la secuencia de pasos a seguir es la siguiente:

1. Obtención del área:

$$A = \pi (0.0809)^2 / 4 = 0.00514 \text{ m}^2$$

2. Se establece el valor de la variable C:

$$C = (0.366 / L) \log. ((L + (L^2 + D^2)^{0.5}) / D)$$

Siendo L el tramo a probar $L = 2.80 \text{ m} - 0.70 \text{ m} = 2.10$, entonces:

$$C = (0.366 / 2.10) \log. ((2.10 + (2.10^2 + 0.0809^2)^{0.5}) / 0.0809)$$

$$C = (0.366 / 2.10) \log. (51.9352) = 0.2989 \approx 0.299 \text{ m}^{-1}$$

3. Se evalúa la carga H_1 en el tiempo t_1 , en m y la carga H_2 en el tiempo t_2 en m, apoyándose en la parte correspondiente de la hoja de cálculo:

h_1 (m)	h_2 (m)	H_1 (m) $H_1 = Z_0 - h_1$	H_2 (m) $H_2 = Z_0 - h_2$	H_1/H_2	$\text{Log}(H_1/H_2)$	K (cm/s)
0	1.24	2.52	1.28	1.96875	0.294191	$1.04 \cdot 10^{-2}$
0	1.05	2.52	1.47	1.7143	0.234086	$8.27 \cdot 10^{-3}$
0	1.31	2.52	1.21	2.0826	0.318605	$1.13 \cdot 10^{-2}$
0	1.13	2.52	1.39	1.8129	0.258373	$9.13 \cdot 10^{-3}$
0	1.11	2.52	1.41	1.7872	0.252173	$8.91 \cdot 10^{-3}$
0	1.29	2.52	1.23	2.0488	0.311499	$1.10 \cdot 10^{-2}$
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K promedio = ΣK en cada lectura/numero de lecturas) =						$9.83 \cdot 10^{-3}$ cm/s

K se obtuvo aplicando:

$K = (2.3 CA/t) \log. (H_1/H_2)$, así tenemos:

$$K_1 = ((2.3 \cdot 0.299 \cdot 0.00514)/10) (0.294191) = 1.04 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} = 1.04 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$$

$$K_2 = 0.000353477 \cdot 0.234086 = 8.27 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} = 8.27 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

$$K_3 = 0.000353477 \cdot 0.318605 = 1.13 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} = 1.13 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$$

$$K_4 = 0.000353477 \cdot 0.258373 = 9.13 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} = 9.13 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

$$K_5 = 0.000353477 \cdot 0.252173 = 8.91 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} = 8.91 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

$$K_6 = 0.000353477 \cdot 0.311499 = 1.10 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} = 1.10 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$$

$$K \text{ promedio} = (\Sigma K \text{ en cada lectura} / \text{número de lecturas}) = (K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6) / 6 = 9.83 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} = 9.83 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s.}$$

Por lo que el material se clasifica como muy permeable (muy conductivo) de acuerdo a la tabla 1.5.6.a. mostrada en el capítulo 1.

Los resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad se muestran a continuación:

Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad

TRAMO(m)	ADEME	Z _{NF} (m)	t (s)	P(m)	Z ₀ - Z _{NF} + P	LECTURAS y/o OBSERVACIONES						K (cm/s)	CLASIFICACIÓN	LITOLOGÍA		
Barreno	OT-1															
3 20-6 10	NW	0.29	10	2.23	2.52	h ₁	0	0	0	0	0	0	9 83E-03	MP	arena con boleos	
						h ₂	1.24	1 05	1 31	1 13	1 11	1 29				
6 10-9 15	NQ	0.34	45	2.33	2.67	h ₁	0	0 92	1 34	1 65	1 91		8 16E-04	P	arena con boleos y arcilla (escasa)	
						h ₂	2 05	2 23	2 17	2 34	2 19	2 24				
9.15 12 20	NQ	0.37	10	2.35	2 72	h ₁	0	0 29	0	2 36	0	2.44	1 25E-02	AP	arena con pocos boleos	
						h ₂	2 29	2 57	2 36	2 53	2 44	2 56				
Barreno	OT-2															
1-3 00	NW	1 00	15	2.00	3.00	h ₁	0	0 81	1 23	1 53	1 78		2 25E-03	MP	arenas de grano medio con boleos	
						h ₂	0 81	1 23	1 53	1 78	1 96					
2 85-6 10	NW	0 99	45	1 86	2 85	h ₁	0	0 31	0 43	0 56	0 69	0 78	1 51E-04	P	arena con gravas y arcilla (escasa)	
						h ₂	0 31	0 43	0 56	0 69	0 78	0 88				
6 03-9 00	NW	1 09	15	3 05	4 14	h ₁	0	1 42	2 225	3 70	0 00	1 41	6 10E-03	MP	arena con gravas y boleos	
						h ₂	1 42	2 225	3 70	4 04	1 41	2 50				
9 00-11 40	NQ	1 36	120	0 65	2 01	h ₁	0	0 16	0 31	0 41	0 51	0 605	6 27E-05	PP	boleos con arena y arcilla (escasa)	
						h ₂	0 16	0 30	0 41	0 51	0 605	0 69				
11 40-12 20	NQ	1 05	20	0 62	1 67	h ₁	0	0 52	0 91	1 20	1 40	1 54	6 04E-03	MP	arena de grano fino	
						h ₂	0 52	0 91	1 20	1 40	1 540	1 59				
Barreno	OT-3															
3 00-6 05	NW	1 48	30	0 16	1 64	h ₁	0	0 73	1 14	1 39	1 53		2 86E-03	MP	arenas con gravas y limo (escaso)	
						h ₂	0 73	1 14	1 39	1 53	1 60					
6 10-9 10	NW	1 49	15	0 21	1 70	h ₁	0 00	0 63	0 00	0 47	0 00	0 49	2 63E-03	MP	arena con gravas y limo (escaso)	
						h ₂	0 63	0 97	0 47	0 74	0 49	0 77				
9 00-12 50	NQ	1 08	120	0 60	1 68	h ₁	0	0 49	0 54	0 59	0 645	0 70	6 53E-05	PP	limo arcilloso con arena	
						h ₂	0 49	0 54	0 59	0 645	0 70	0 745				
Barreno	OT-4															
2 74-6 10	NW	2 04	20	0 29	2 33	h ₁	0	1 47	0	1 58			6 46E-03	MP	arena con gravas y boleos	
						h ₂	1 47	2 12	1 58	2 12						
5 77-9 15	NW	2 06	240	0 33	2 39	h ₁	0	0 23	0 41	0 60	0 73	0 87	3 81E-05	PP	limo arcilloso con arena	
						h ₂	0 23	0 41	0 60	0 73	0 87	0 96				
8 95-12 00	NQ	2 05	25	0 65	2 70	h ₁	0	1 35	2 00	2 38	2 61		4 00E-03	MP	arena con gravas y boleos	
						h ₂	1 35	2 00	2 38	2 61	2 69					

Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad

TRAMO(m)	ADEME	Z_{NF} (m)	t (s)	P(m)	$Z_0 - Z_{NF} + P$	LECTURAS y/o OBSERVACIONES						K (cm/s)	CLASIFICACIÓN	LITOTOGIA	
Barreno	OT-S						1	2	3	4	5	6			
2.00-6.00	NW	1.14	30	1.35	2.49	h_1	0	1.37	1.98	2.26	2.37		2.58E-03	MP	arena con gravas y boleos
						h_2	1.37	1.98	2.26	2.37	2.45				
6.00-9.05	NW	1.17	20	1.36	2.53	h_1	0	1.01	1.73	2.00	2.26		3.35E-03	MP	sin recuperación
						h_2	1.01	1.73	2.00	2.26	2.39				
8.95-12.00	NW	1.17	15	0.20	1.37	h_1	0	1.17	0	1.10	0	1.08	1.19E-02	AP	arena de grano fino y gravas
						h_2	1.17	1.31	1.10	1.31	1.08	1.30			
12.00-15.50	NQ	1.26	180	0.21	1.47	h_1	0	0.03	0.04	0.055	0.06	0.065	3.62E-06	I	arena intercalada con arcilla y limo
						h_2	0.03	0.04	0.055	0.06	0.065	0.070			
Barreno	OT-6														
1.50-3.00	NQ	1.44	30	2.08	3.52	h_1	0	3.28	0	2.78			1.30E-02	AP	arena con boleos
						h_2	3.28	3.50	2.78	3.30					
3.00-6.00	NW	1.30	20	1.35	2.65	h_1	0	0.38	0.58	0.72	0.86	1.05	5.56E-04	P	sin recuperación
						h_2	0.38	0.58	0.72	0.86	1.05	1.15			
5.95-9.00	NW	1.37	60	1.23	2.60	h_1	0	0.47	0.86	1.17	1.43	1.64	3.87E-04	P	arena con limo y arcilla
						h_2	0.47	0.86	1.17	1.43	1.64	1.82			
8.95-12.20	NW	1.33	180	0.39	1.72	h_1	0	0.07	0.12	0.17	0.20	0.23	1.75E-05	PP	arcilla con arena de grano medio a fino
						h_2	0.07	0.12	0.17	0.20	0.23	0.27			
Barreno	OT-7														
2.80-6.10	NW	1.37	10	0.25	1.62	h_1	0	0.67	1.00	1.14	0	0.60	4.42E-03	MP	sin recuperación
						h_2	0.67	1.00	1.14	1.25	0.60	1.00			
5.77-9.15	NW	1.37	10	0.33	1.70	h_1	0	0.56	0.72	0.88	0.99	1.08	2.14E-03	MP	sin recuperación
						h_2	0.56	0.72	0.88	0.99	1.08	1.19			
9.00-12.20	NQ	1.37	8	1.07	2.44	h_1	0	1.84	0	1.84	0	1.95	2.48E-02	AP	sin recuperacion
						h_2	1.84	2.42	1.84	2.37	1.95	2.43			
Barreno	OT-8														
3.00-6.00	NW	1.63	15.00	0.24	1.87	h_1	0	0	0	0	0		1.25E-02	AP	sin recuperación
						h_2	1.45	1.49	1.53	1.49	1.50				
6.10-9.10	NW	1.68	180	0.46	2.14	h_1	0	0.020	0.033	0.045	0.055	0.063	3.66E-06	I	limo, arcilla y arena
						h_2	0.020	0.033	0.045	0.055	0.063	0.071			
8.90-11.90	NQ	1.49	15	1.06	2.55	h_1	0	0	0	0	0	0	1.27E-02	AP	arena de grano fino a medio
						h_2	1.90	2.00	2.48	2.02	2.02	2.01			

Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad

TRAMO(m)	ADEME	Z_{NF} (m)	t (s)	P(m)	$Z_o - Z_{NF} + P$	LECTURAS Y/O OBSERVACIONES						K (cm/s)	CLASIFICACIÓN	LITOLOGÍA	
Barreno	ØT-9					1	2	3	4	5	6				
3 05-6 10	NW	1.48	25	0.25	1.73	h_1	0	0.85	1.33	1.53	1.63		4.13E-03	MP	boleos de grava y arena
5 70-9 00	NW	1.50	15	0.28	1.78	h_1	0	0.88	0	0.79	1.31		5.76E-03	MP	boleos de grava y arena
8 75-12.00	NQ	1.47	30	0.23	1.70	h_1	0	0.20	0.37	0.53	0.65	0.74	3.32E-04	P	arena de grano fino con limos y arcillas
Barreno	ØT-10					h_2	0.20	0.37	0.53	0.65	0.74	0.83			
2 75-6.10	NW	1.55	30	0.30	1.85	h_1	0	0.64	1.02	1.31	1.49	1.62	1.74E-03	MP	arena con grava y boleos escasos
5 60-9 15	NW	1.57	15	0.30	1.87	h_1	0	1.31	0	1.31	0	1.29	1.03E-02	AP	arena y grava
8 95-12 20	NW	1.88	10	0.20	2.08	h_1	0	1.12	0	1.36	0	1.16	7.46E-03	MP	arena de grano fino con boleos
						h_2	1.12	1.46	1.36	1.65	1.16	1.50			

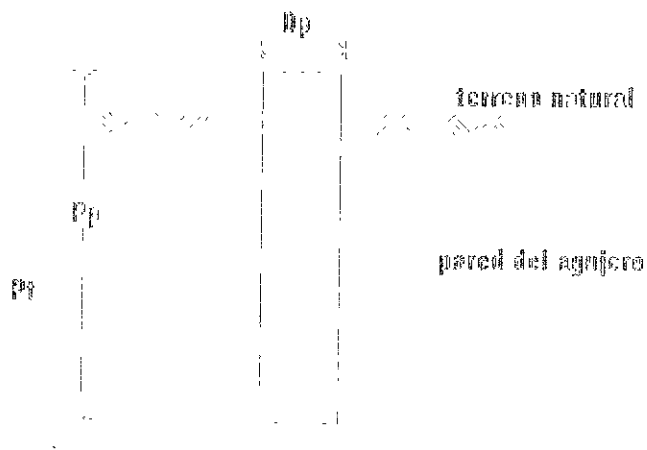
Nomenclatura

- AP = Material altamente conductivo (altamente permeable)
- MP = Material muy conductivo (muy permeable)
- P = Material conductivo (permeable)
- PP = Material poco conductivo (poco permeable)
- I = Material no conductivo (impermeable)
- NW = Diámetro del ademe = 0.0809 m
- NQ = Diámetro del ademe = 0.0699 m
- Z_{NF} = Distancia del terreno natural al nivel freático (m)
- t = Tiempo (s)
- P = Distancia del terreno natural a la boca del ademe (m)
- Z_o = Distancia del nivel freático a la boca del ademe (m)
- K = Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad (cm/s)

Para elaborar las secciones hidrogeológicas se necesita la siguiente información.

PERFORACIÓN OBRA DE TOMA

No. de piezómetro	Profundidad total (m) (Pt)	Profundidad del piezómetro (m) (Pp)	Profundidad del contacto (m) (Pc)	Descripción litológica (m)	Diámetro del piezómetro (cm) (Dp)	Ranurado a mano (m)	(Observaciones)
OT - 1	14.20	14.00	12.65	14.20	5.08	14.00	N.P. = 0.29m
OT - 2	13.85	12.00	12.20	13.85	5.08	12.00	N.P. = 1.00m
OT - 3	19.10	12.45	12.70	14.10	5.08	12.45	N.P. = 1.48m
OT - 4	13.20	11.40	12.90	13.20	5.08	11.40	N.P. = 2.04m
OT - 5	16.10	14.80	15.50	16.10	5.08	14.80	N.P. = 1.14m
OT - 6	14.00	12.00	12.70	14.00	5.08	12.00	N.P. = 1.44m
OT - 7	13.40	12.00	12.60	13.40	5.08	12.00	N.P. = 1.37m
OT - 8	12.10	12.00	11.90	12.10	5.08	12.00	N.P. = 1.63m
OT - 9	12.30	11.67	12.00	12.30	5.08	11.67	N.P. = 1.48m
OT - 10	13.20	13.20	12.40	13.20	5.08	13.20	N.P. = 1.65m
TOTAL	141.45	125.52		141.45		125.52	



- 100-100000-1
- 100-100000-2
- 100-100000-3
- 100-100000-4
- 100-100000-5
- 100-100000-6
- 100-100000-7
- 100-100000-8
- 100-100000-9
- 100-100000-10
- 100-100000-11
- 100-100000-12
- 100-100000-13
- 100-100000-14
- 100-100000-15
- 100-100000-16
- 100-100000-17
- 100-100000-18
- 100-100000-19
- 100-100000-20
- 100-100000-21
- 100-100000-22
- 100-100000-23
- 100-100000-24
- 100-100000-25
- 100-100000-26
- 100-100000-27
- 100-100000-28
- 100-100000-29
- 100-100000-30
- 100-100000-31
- 100-100000-32
- 100-100000-33
- 100-100000-34
- 100-100000-35
- 100-100000-36
- 100-100000-37
- 100-100000-38
- 100-100000-39
- 100-100000-40
- 100-100000-41
- 100-100000-42
- 100-100000-43
- 100-100000-44
- 100-100000-45
- 100-100000-46
- 100-100000-47
- 100-100000-48
- 100-100000-49
- 100-100000-50

100-100000-1	
100-100000-1	100-100000-1
100-100000-2	100-100000-2
100-100000-3	100-100000-3
100-100000-4	100-100000-4
100-100000-5	100-100000-5
100-100000-6	100-100000-6
100-100000-7	100-100000-7
100-100000-8	100-100000-8
100-100000-9	100-100000-9
100-100000-10	100-100000-10
100-100000-11	100-100000-11
100-100000-12	100-100000-12
100-100000-13	100-100000-13
100-100000-14	100-100000-14
100-100000-15	100-100000-15
100-100000-16	100-100000-16
100-100000-17	100-100000-17
100-100000-18	100-100000-18
100-100000-19	100-100000-19
100-100000-20	100-100000-20
100-100000-21	100-100000-21
100-100000-22	100-100000-22
100-100000-23	100-100000-23
100-100000-24	100-100000-24
100-100000-25	100-100000-25
100-100000-26	100-100000-26
100-100000-27	100-100000-27
100-100000-28	100-100000-28
100-100000-29	100-100000-29
100-100000-30	100-100000-30
100-100000-31	100-100000-31
100-100000-32	100-100000-32
100-100000-33	100-100000-33
100-100000-34	100-100000-34
100-100000-35	100-100000-35
100-100000-36	100-100000-36
100-100000-37	100-100000-37
100-100000-38	100-100000-38
100-100000-39	100-100000-39
100-100000-40	100-100000-40
100-100000-41	100-100000-41
100-100000-42	100-100000-42
100-100000-43	100-100000-43
100-100000-44	100-100000-44
100-100000-45	100-100000-45
100-100000-46	100-100000-46
100-100000-47	100-100000-47
100-100000-48	100-100000-48
100-100000-49	100-100000-49
100-100000-50	100-100000-50

TABLE 2

Category	Sub-category	Value
A	1.00	1.00
	1.01	1.01
	1.02	1.02
	1.03	1.03
	1.04	1.04
	1.05	1.05
	1.06	1.06
	1.07	1.07
	1.08	1.08
	1.09	1.09
B	2.00	2.00
	2.01	2.01
	2.02	2.02
	2.03	2.03
	2.04	2.04
	2.05	2.05
	2.06	2.06
	2.07	2.07
	2.08	2.08
	2.09	2.09
C	3.00	3.00
	3.01	3.01
	3.02	3.02
	3.03	3.03
	3.04	3.04
	3.05	3.05
	3.06	3.06
	3.07	3.07
	3.08	3.08
	3.09	3.09
D	4.00	4.00
	4.01	4.01
	4.02	4.02
	4.03	4.03
	4.04	4.04
	4.05	4.05
	4.06	4.06
	4.07	4.07
	4.08	4.08
	4.09	4.09

1947, year 10

1. [unclear]

2. [unclear]

3. [unclear]

4. [unclear]

5. [unclear]

6. [unclear]

7. [unclear]

8. [unclear]

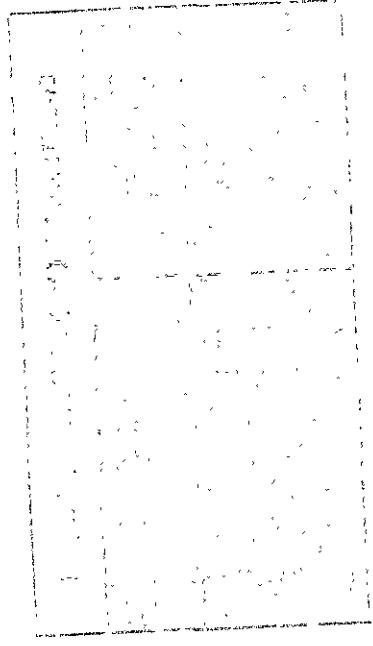
9. [unclear]

10. [unclear]

11. [unclear]

12. [unclear]

13. [unclear]



14. [unclear]

15. [unclear]

16. [unclear]

17. [unclear]

18. [unclear]

19. [unclear]

20. [unclear]

21. [unclear]

22. [unclear]

23. [unclear]

24. [unclear]

25. [unclear]

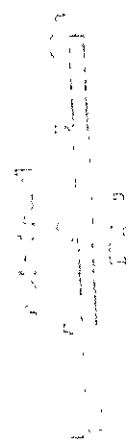
26. [unclear]

27. [unclear]

28. [unclear]

29. [unclear]

30. [unclear]



7.5. LOCALIZACIÓN DEL POZO

Con el apoyo de geofísica, topografía, geología y la información obtenida durante la exploración, se determinó el lugar más adecuado para ubicar la obra de captación de agua subterránea, de lo cual se extrajo lo siguiente

- Censo de aprovechamientos hidráulicos - En la indagación de datos, se concluyó que el agua obtenida mediante pozos o norias, es destinada principalmente para uso doméstico, ganadería, agricultura y consumo humano, resultando ser dulce y de buena calidad, según los análisis realizados a las muestras de agua.
- Geología.- Se realizaron reconocimientos en campo en la zona de estudio, donde se encontraron diversos materiales (véase características geológicas) el más conveniente para alojar la obra de captación, fue el lugar donde se localizan los depósitos aluviales, pues como se sabe forman buenos acuíferos.
- Geofísica.- Con su ayuda se determinó la geometría de los materiales del sitio, efectuando sondeos eléctricos verticales (SEV) Investigación que facilitó la localización del espesor máximo de agua, para su explotación adecuada por medio de un pozo de uso provisional, dicho espesor se encuentra en las distintas capas que conforman el subsuelo, ello se logra encontrando el nivel freático y el contacto hidrogeológico (roca - acarreo) de la formación acuífera, según lo revele la información facilitada por los geofísicos.
- Topografía.- Proporciona las diferentes coordenadas referidas con respecto al nivel medio del mar correspondiente al área de estudio (Obra de Toma) y para cada piezómetro, estas son:

Obra de Toma: $16^{\circ} 49' 00''$ y $16^{\circ} 52' 00''$ latitud norte y
 $99^{\circ} 40' 00''$ y $99^{\circ} 36' 30''$ longitud oeste.

Piezómetros:

Pozo de observación	COORDENADAS		
	X	Y	Z
OT - 1	432247.249	1862345.329	14.482
OT - 2	432266.237	1862351.904	15.190
OT - 3	432280.279	1862356.791	15.589
OT - 4	432292.184	1862363.292	16.092
OT - 5	432258.077	1862401.738	15.330
OT - 6	432268.814	1862373.699	15.469
OT - 7	432272.051	1862364.526	15.474
OT - 8	432280.845	1862340.977	15.549
OT - 9	432286.103	1862326.944	15.574
OT - 10	432293.040	1862308.164	15.669

- Perforación exploratoria.- Se obtuvieron los distintos materiales que conforman el subsuelo, actividad que se realizó para cada piezómetro y en el pozo principal (no hubo recuperación de muestra), los resultados se muestran en el apartado denominado características hidrogeológicas.

7.6. DISEÑO DEL POZO

PERFORACIÓN Y CONSTRUCCIÓN

Piezómetros.- Para su construcción se realizaron excavaciones de aproximadamente $1.20\text{m} \times 1.20\text{m}$ por 0.80m de profundidad, en el sitio donde quedarían ubicados, con la finalidad de anclar el equipo de perforación, y así evitar romper con el equilibrio cuando se produce un alto grado de vibración entre la máquina perforadora y el terreno natural, debido a su inestabilidad, cuando se efectúan los trabajos de perforación. Se relleno la excavación con concreto hasta la superficie del terreno, la cual se niveló; pero antes de ello se colocaron dos varas de lado, paralelas una con otra y espaciadas según sea al ancho y largo del equipo de perforación, es decir, según el modelo Longyear ya sea Ly-38 o Ly-44. Posteriormente se colocaron varillas de $3/8''$ de diámetro (0.9525cm) de acero en forma de herradura de longitud aproximada de 60cm (25cm por lado por 10cm de arco), según lo muestra la figura 7.6.a.

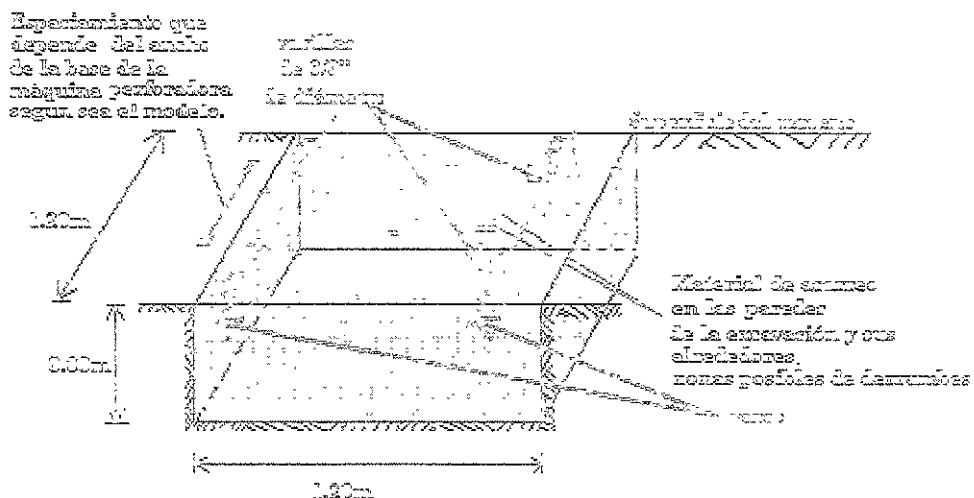


Figura 7.6.a. Excavación realizada previa al anclaje de la máquina perforadora Ly-38 o 44.

Después de terminada la excavación y rellena de concreto, se dejaron aproximadamente 5cm afuera de la superficie del terreno las varillas de acero de $3/8''$ de diámetro. Posteriormente se colocó un durmiente, de longitud de 1.20m entre las varillas en forma de herradura, en ambos lados (figura 7.6.b), para montar sobre los durmientes la máquina perforadora y finalmente con un cable de acero anclar el equipo.

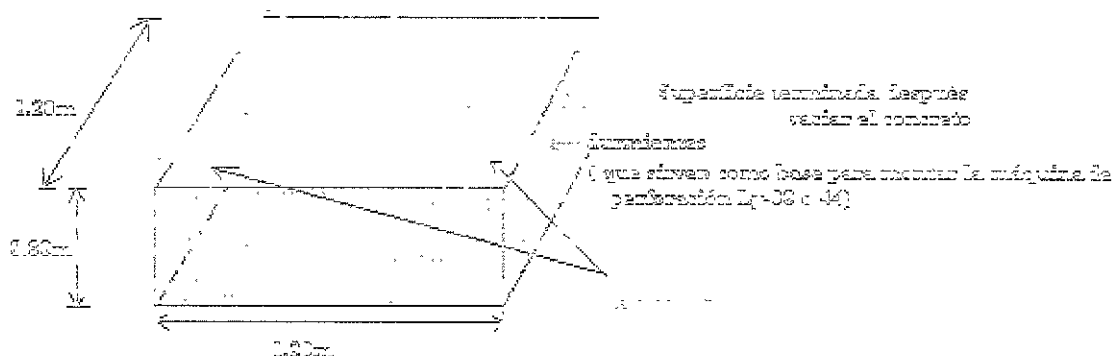


Figura 7.5.b Superficie terminada y lista para anclar el equipo de perforación.

Los durmientes no son necesarios, su función es la de absorber las vibraciones que se producen entre el terreno y la máquina perforadora, al momento de perforar la formación geológica, evitando así posibles derrumbes. Se puede anclar directamente sobre el terreno, siempre y cuando se nivele.

Para la construcción de los piezómetros se emplearon brocas tricónicas de dientes fresados de acero de diámetro de $2\frac{15}{16}$ " (7.46 cm), usando agua como fluido de perforación; la ampliación se realiza además con tubería NW y zapata de carburo de tungsteno, para evitar caídos debido a la inestabilidad del medio, lo que permitió colocar al concluir cada perforación PVC hidráulico de diámetro 2" (5.08 cm), el necesario para que el cable de la sonda se pueda introducir y se facilite la medición de los distintos niveles de variación del agua subterránea durante la piezometría, desarrollo, aforo y prueba de bombeo. Además, la tubería de cloruro de polivinilo fue ranurada a mano en toda su longitud.

Cuando se coloque el tubo de PVC en el interior del agujero perforado y se tengan materiales altamente abrasivos alrededor del piezómetro, se recomienda no apoyarlos en el contacto hidrogeológico roca - acarreo, porque pueden flexionarse, achatarse e incluso romperse.

Los pozos de observación se construyeron de PVC hidráulico por ser un material flexible, de fácil manejo, económico y de uso provisional.

Conforme avanza la perforación en tramos de 3.05 m de profundidad (longitud de la tubería de perforación), simultáneamente se realizan las pruebas de permeabilidad tipo Lefranc (cuya finalidad fue determinar la permeabilidad del corte litológico). En tramos subsecuentes la tubería se acopla y se van agregando los tucos necesarios hasta completar la profundidad requerida por perforar. La longitud de prueba fue 3.00 m, de acuerdo a la Guía CFE 10000-73. Realización de Pruebas Lefranc.

Durante la perforación se tomaron muestras del material que conforma el subsuelo (perforación exploratoria), cuando fue posible.

Pozo de prueba (principal). - Para su construcción se utilizó una barrenadora triconica de dientes de acero maquinado de diámetro 12 1/4" (31.115 cm), posteriormente se amplió con rima de 18" (45.72 cm) y se metió el contra - ademe de acero con tubería lisa hasta una profundidad de 12.50 m en donde se localizó el contacto hidrogeológico roca - acarreo, después se instaló el ademe de PVC hidráulico de 12" (30.48 cm) de diámetro roscado de fábrica y ranura de 1.5 mm de abertura, extrayendo posteriormente el contra ademe de acero. Se intentó perforar con tubería de 20" (50.80 cm), pero por las condiciones del terreno (propenso a caídos y derrumbes), no se pudo bajar el ademe. Inicialmente se empleo como fluido de perforación agua, pues se pretendían realizar pruebas de permeabilidad, lo que no fue posible debido a la inestabilidad del terreno, pues los derrumbes de material de la formación se acuñaban y se colocaban en el interior del agujero donde ya se había perforado, tapándolo y cubriéndolo nuevamente, lo que dificultaba el avance durante la perforación. Al no ver resultados positivos se optó por emplear como fluido de perforación "bentonita" marca perfobem (fácil de conseguir en el mercado nacional), debido a su alta viscosidad facilitó la operación de perforación, ya que estabilizó las paredes del agujero perforado. Con ello las propiedades del medio se vieron alteradas, por lo cual una prueba de permeabilidad tipo Lefranc en el sitio no sería representativa.

Durante la perforación no hubo recuperación de muestra, el tipo de material se correlacionó con el obtenido en los pozos de observación más cercanos, los cuales son el 2 y el 3, información que dió una idea sobre el material que conforma el subsuelo en el sitio, además de apoyarse en la geofísica.

El material empleado para la tubería de ademe (estabiliza las paredes del pozo) fue PVC (ranurado en toda su longitud), por que el pozo es de uso provisional que será destruido posteriormente y posiblemente reemplazado por un pozo tipo Ranney (pozo radial con un sistema de drenes para captar las aguas subterráneas, el cual efectuará una empresa particular, sometida a concurso según las bases que establezca la CNA), por lo que el ejemplo mostrado representa sólo un módulo de prueba de cuatro que están planeados, con el propósito de elegir uno, en donde se ubicará dicha obra de captación, para ello se realizan pruebas hidráulicas en otros módulos, por lo que se busca escoger la zona de mayor permeabilidad, situación que está a cargo de la empresa contratista que construirá el pozo antes mencionado.

Como se mencionó en el capítulo 3, el PVC ofrece protección contra aguas de composición química variable, resiste más la corrosión e incrustación, costo reducido en su traslado e instalación, ofrece mayor área de infiltración que la del acero (comunicación personal con el Ing. Mario Patrio Rodríguez Martínez), pues entre mayor área de infiltración menor turbulencia y por lo tanto menor arrastre de finos, alta resistencia a la abrasión, alta durabilidad en condiciones del agua subterránea, poco mantenimiento, fácil acoplamiento durante su instalación, alta flexibilidad y es más económico. Presenta los inconvenientes de que si están expuestos a los rayos del sol se hacen más frágiles, lo que provoca una disminución en su resistencia a los esfuerzos, además de ser más débiles y sensibles.

El espesor del ademe fue de 1/4" (0.635 cm), según el fabricante. De acuerdo a la tabla 3.4.3 se elige la dimensión adecuada para el diámetro del ademe, conociendo el caudal (Q) de extracción del pozo se tiene para $Q=31.715 \text{ l/s}$, se necesita un diámetro de 30.48 cm (12").

Colocación del filtro de grava

1 - Se requirió perforar la formación geológica con broca tricónica de dientes de acero maquinado de diámetro $\Phi=30.48 \text{ cm}$ (12") y bajar la tubería de perforación hasta 12.50m, que es la profundidad total del pozo.

2 - Posteriormente ampliar con rima de acero (amplificador o escareador) de 45.72 cm (18") hasta 12.50m y finalmente ademar con tubería de PVC de diámetro $\Phi=30.48 \text{ cm}$ (12").

3 - Engrazado: Por medio de una pala agregar el material seleccionado (grava de tamaño 6 – 12 mm) entre el espacio formado por el ademe y la pared del pozo (figura 7.6.c).

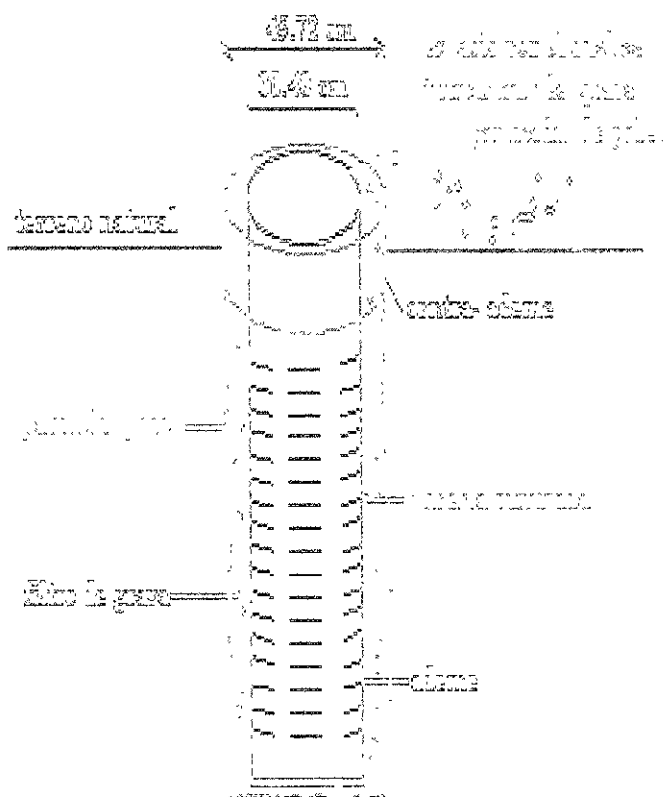


Figura 7.6.c. Colocación del filtro de grava

Figura 7.6.c. Colocación del filtro de grava

De acuerdo a la tabla 3 4.5 a el espesor del filtro es 7 62 cm (3") cuando se tiene una profundidad de 12.50m. Debido a obras de captación y estudio efectuados anteriormente aguas arriba y en lugares cercanos al área de estudio y en base a la experiencia obtenida por personal de la CNA, estableció que se usara filtro de grava de tamaño homogéneo de 6mm (0.6 cm) y 12mm (1.2 cm).

El equipo de bombeo empleado se escogió basándose en la experiencia de los ingenieros encargados de proyecto, pues el equipo se requería sólo para realizar las pruebas de desarrollo, aforo y bombeo, su uso no sería definitivo, sino provisional; sus características son las siguientes: un cuerpo de 10 tazones de 27.94 cm de diámetro y 7 00m de longitud total, un tubo de succión de 2.00m de longitud y 20.32 cm de diámetro y motor marca Cumings de 350 HP.

Para retirar el lodo de perforación (bentonita), se empleó dispersor de arcillas, aproximadamente 20 litros, se bombeó a caudal variable en el interior del pozo por un tiempo de 2:15 horas durante la prueba de desarrollo, momento en el que el agua salía aparentemente limpia.

Diseño del pozo de prueba

Con la información mencionada anteriormente y en el capítulo tres, el diseño queda como se muestra en la figura 7.6.d. Es importante señalar que cuando el nivel del río suba, el pozo se verá afectado, porque su cauce lo va a destruir o azoivar. El río Papagayo es considerado el más caudaloso de la región.

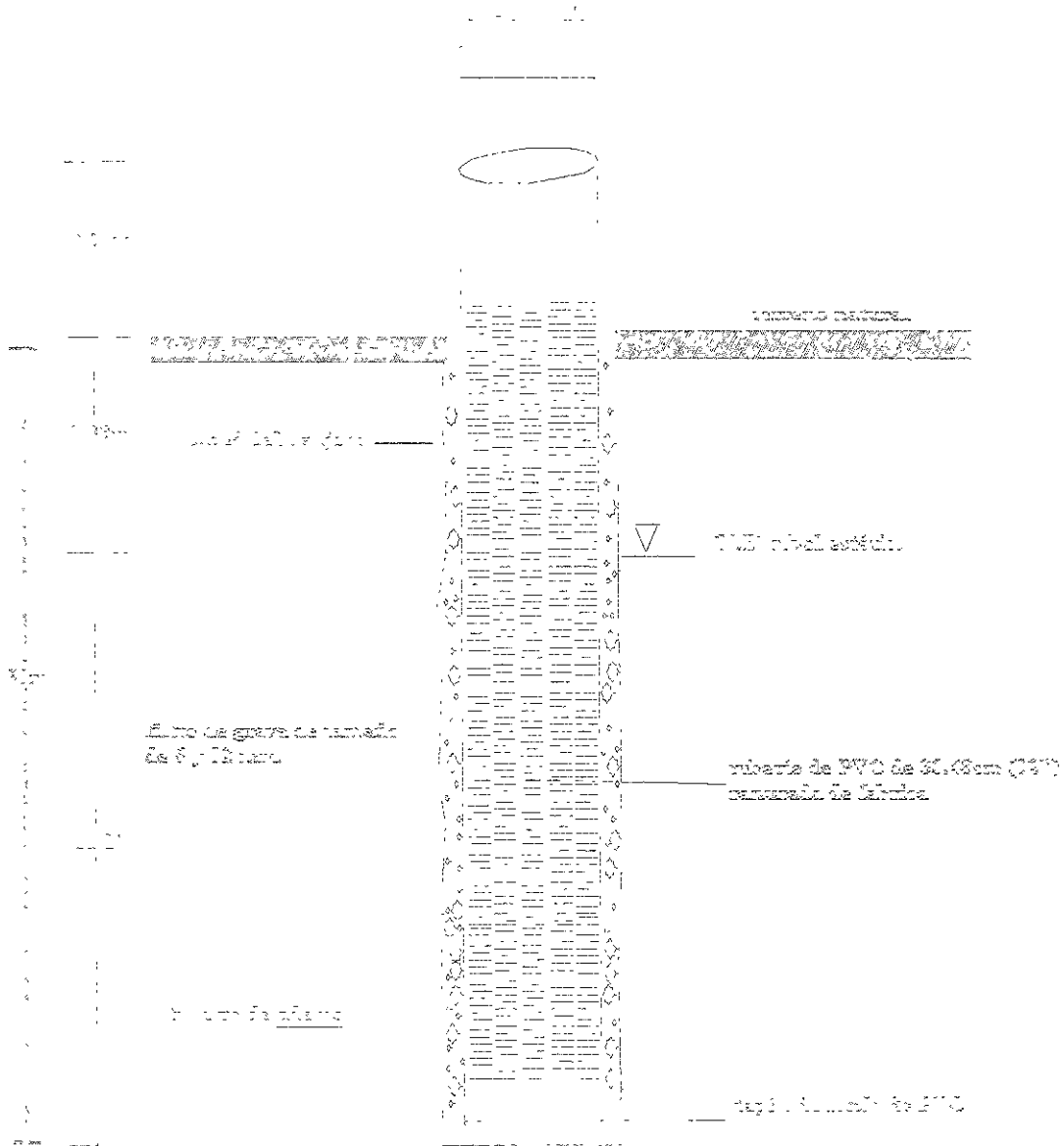


Figura 7.6.d. Diseño del pozo de prueba de uso provisional

En caso de pensarse en que el pozo no fuese de uso provisional, un diseño propuesto quedaría como el que se muestra en la figura 7.6.e. Cabe señalar que el nivel dinámico no se pudo medir en el pozo durante el bombeo.

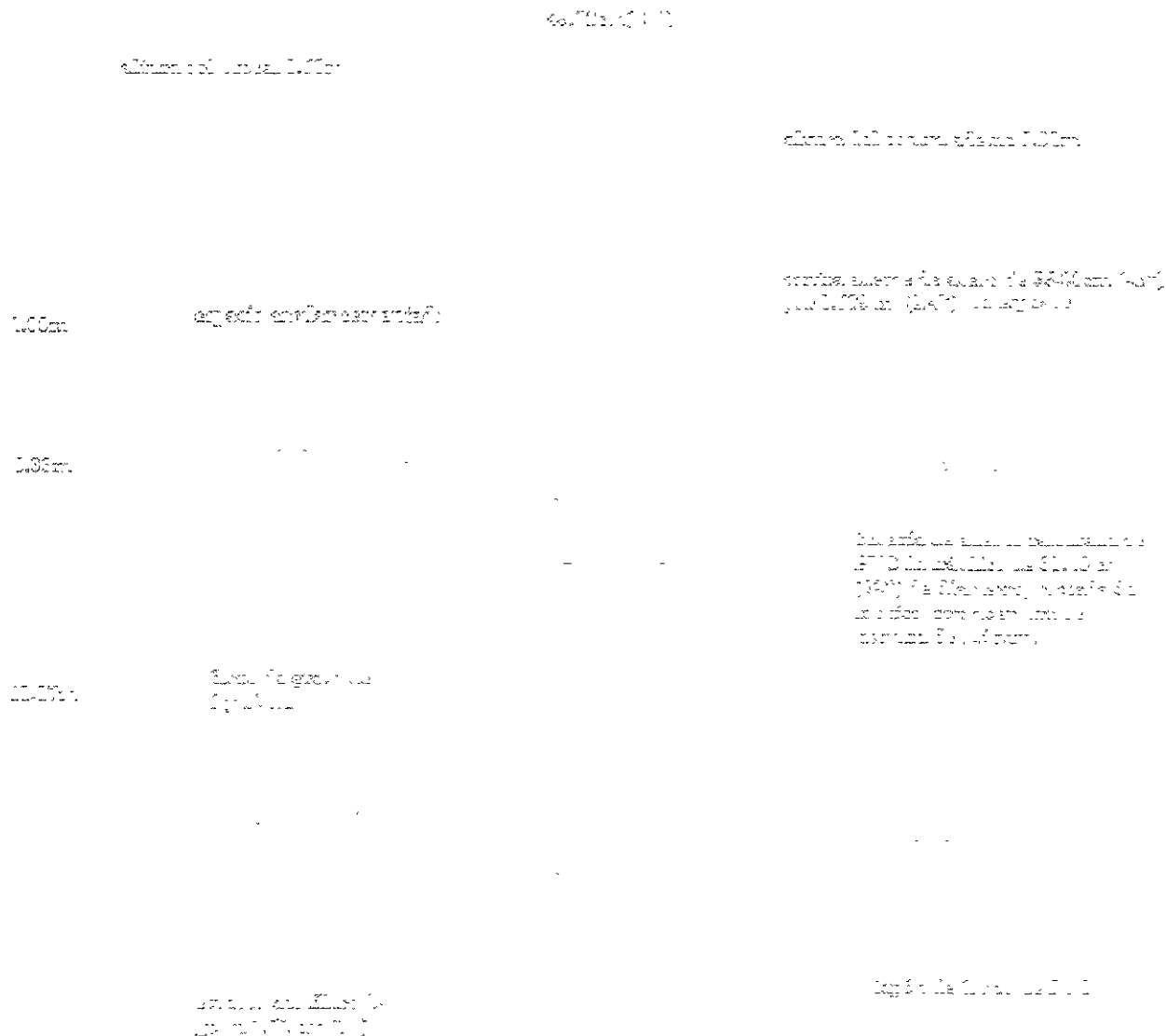


Figura 7.6.e. Modelo propuesto para el bombeo de agua

7.7. DESARROLLO Y EVALUACIÓN DEL POZO

El desarrollo tiene la finalidad de eliminar los materiales finos o partículas en suspensión de la formación acuífera, la cual pudo haberse contaminado durante la perforación. El propósito de dicha prueba es incrementar la permeabilidad del medio. En el momento en el que el agua comenzó a salir aparentemente limpia del pozo, se concluyó dicha actividad, la cual tuvo una duración de 10 horas de bombeo continuo, lo que se logró variando la velocidad de la bomba.

Determinación del caudal de extracción

El aforo se efectuó con el propósito de establecer el caudal óptimo (máximo abatimiento). Debido a que no se pudo medir la posición del nivel dinámico en el pozo de prueba, se optó por probar distintas revoluciones (800, 1000 y 1200 r.p.m.) durante un tiempo de tres horas en cada escalón o hasta que el pozo boqueara (nivel dinámico cerca de la succión), situación que se presentó al cambio de escalón de 1200 r.p.m., por lo que se ejecutó la prueba de bombeo con 1000 r.p.m.

Para estimar el caudal de extracción de la obra de captación, se empleó el método del orificio calibrado, los resultados fueron los siguientes:

$$\text{Utilizando la ecuación: } Q = K' (h)^{0.5}$$

Los datos de campo son: diámetro del tubo de descarga = 0.2032m (8") y un orificio con diámetro = 0.1524m, altura piezométrica $h = 25$ cm. De acuerdo a la tabla 5.2 mostrada en el capítulo 5, se obtiene el valor del factor de descarga K' , el cual equivale a 6.343, finalmente se sustituye en la ecuación anterior, para obtener:

$$Q = 6.343 (25)^{0.5} = 31.715 \text{ litros/segundo.}$$

El dispositivo empleado para realizar la prueba de aforo, se muestra en la fotografía 7.6 a

Para evitar la recirculación del agua extraída se construyó un canal (a cual se impermeabilizó por medio de una cama de nylon, fotografía 7.6.a) desde el pozo de bombeo hasta el río, aguas abajo de la ubicación del módulo.



Fotografía 7.6.a. Dispositivo empleado para realizar las pruebas de desarrollo, aforo y bombeo.

Interpretación de las pruebas de bombeo

La prueba de bombeo tuvo una duración de 71.5 horas de bombeo continuo de manera ininterrumpida a caudal constante de 31 715 l/s con una velocidad de 1900 r.p.m. La frecuencia de medición de la posición del nivel dinámico en cada uno de los piezómetros (fotografía 7.6.b) se realizó el 21 de junio de 1998 iniciando a las 21:30 horas y concluyéndose el 24 del mismo mes a las 21:00 horas; de acuerdo a los siguientes tiempos: 0.25s, 0.50s, 0.75s, 1,2,3,5, 8, 10, 15, 30, 45 y 60 minutos, posteriormente a cada media hora.

Al analizar la información obtenida durante la prueba de bombeo se obtuvo que al graficar en el eje de las abscisas el tiempo (minutos) y en el eje de las ordenadas el abatimiento (metros), los valores medidos en algunos piezómetros, por ejemplo: en los pozos de observación OT-1 y OT-4, que son respectivamente el más cercano y el más lejano al río, se obtuvieron abatimientos negativos, lo que se atribuye a que se presentó una variación muy importante en el caudal de escurrimiento del Río Papagayo, durante la realización de la prueba, debido a que la central hidroeléctrica de La Vena ubicada aguas arriba de este sitio, abre o cierra sus compuertas para generar energía eléctrica, provocando con ello una variación en la cantidad de agua que escurre por el cauce del río, lo cual aunado a la estrecha relación entre el acuífero y el río, alteró las mediciones realizadas. ⁽³⁴⁾

Los datos obtenidos durante la prueba de bombeo no son representativos para ser usados en el cálculo de los valores del coeficiente de almacenamiento y de transmisividad.⁽³⁴⁾

Esta experiencia sienta el precedente de que una prueba de bombeo de larga duración en el sitio, sólo se podrá realizar adecuadamente cuando exista un convenio entre los operadores de la central hidroeléctrica de La Ventz y la Comisión Nacional de Agua (CNA).⁽³⁴⁾



Fotografía 7.6.5. Medición del nivel dinámico en los piezómetros.

Calidad del agua subterránea

Con el fin de establecer sus características de calidad, durante la prueba de bombeo, un especialista tomó una muestra de agua (fotografía 7.6.c), la cual sometió a análisis de laboratorio apropiados.



Fotografía 7.6.c. Toma de muestra de agua para su análisis, durante la prueba bombeo.

En el sitio se determinaron los siguientes parámetros; temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, CO_2 y H_2S , que prevalecen en el acuífero, obteniéndose los siguientes valores:

Nombre del pozo	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	pH	OD (mg/l)	CO_2 (mg/l)	H_2S (mg/l)
OT-PP	29.7	691	6.02	4.00	9.20	0.00

Los valores obtenidos fueron comparados con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, que indica cuáles son los límites permisibles de calidad del agua para uso y consumo humano. Los resultados de los análisis que se hicieron a las muestras de agua son:

CARACTERÍSTICAS BACTERIOLÓGICAS DEL AGUA DEL POZO DE PRUEBA

Característica	Límite permisible que establece la norma.	Resultados de los análisis a los que fueron sometidas las muestras de agua en laboratorio.
Organismos coliformes totales	2 NMP/100ml 2 UFC/100 ml	177 UFC/100 ml (situación que se atribuye a que la recarga principal del acuífero es de agua superficial que fluye por el río Papagayo).
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml	0.00 UFC/100 ml

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA DEL POZO DE PRUEBA

Característica	Límite permisible que establece la norma.	Resultados de los análisis a los que fueron sometidas las muestras de agua en laboratorio.
Sólidos totales disueltos (STD)	1000.00 mg/l	429.00 mg/l
Dureza total (CaCO ₃)	500.00 mg/l	297.00 mg/l
Fluoruro	1.50 mg/l	0.00 mg/l
Sulfatos	400.00 mg/l	263.00 mg/l
Cloruros (CL)	250.00 mg/l	4.90 mg/l
Nitratos	10.00 mg/l	6.70 mg/l
Fenoles e compuestos	0.001 mg/l	0.007 mg/l
<i>Metales pesados</i>	Observaciones	Su presencia proporciona cierto grado de toxicidad en el agua.
Manganeso	0.15 mg/l	0.77 mg/l
Piomo	0.025 mg/l	0.103 mg/l

STD < 1000 mg/l. el agua es dulce y la dureza total (CaCO₃) > 500 mg/l es agua muy dura.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLÉPTICAS DEL AGUA DEL POZO DE PRUEBA

Característica	Límite permisible que establece la norma.	Resultados de los análisis a los que fueron sometidas las muestras de agua en laboratorio.
Color	20 unidades de color verdadero en la escala platino - cobalto.	6 unidades de color verdadero en la escala platino - cobalto.
Olor y Sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).	Agradable
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométrica (UTN) o su equivalente en otro método.	2.5 unidades de turbiedad nefelométrica (UTN).

Cabe señalar que no se detectó la presencia de partículas de arena.

Las características antes citadas permiten establecer que la calidad del agua del pozo "OT - PP" cumple en términos generales con la norma NOM- 127- SSA- 1994, sin embargo para mejorar su calidad se requiere someterla a procesos de potabilización como la Clorinización (para eliminar las bacterias coliformes totales); Oxidación Ozónica (para remover compuestos o fenoles) y por último el proceso de Oxidación - Filtración por ósmosis inversa (para reducir elementos químicos como el manganeso (Mn) y el plomo (Pb)).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones que a continuación se exponen se desprenden del trabajo que a lo largo de esta tesis se ha venido desarrollando y representan el resultado de la investigación teórica y la experiencia vivida en torno a la Extracción de Agua Subterránea en el Proyecto denominado "Estudio Integral del Río Papagayo", cuya zona de interés fue el Sitio Obra de Toma.

- o Para obtener buenos resultados al diseñar una obra de captación es muy importante apoyarse en la perforación exploratoria y en las pruebas de permeabilidad, entre otros, pues para ubicar la zona de captación o de admisión (rejilla o tubería ranurada) se buscan las partes más permeables que conforman el subsuelo con el fin de que el agua fluya con facilidad al sitio de interés (zona de captación). La tubería ranurada se coloca preferentemente en tales lugares, es a partir del nivel estático y hasta la profundidad total del pozo, que dicha tubería aprovechará las zonas más productivas, siempre y cuando éstas lo sean. Además para el diseño de un pozo influyen otros factores como el clima, el tipo de material del ademe, la calidad del agua subterránea, tal como se mencionó en el capítulo tercero.
- o Es difícil generalizar el criterio para diseñar un pozo pues cada situación o caso en particular es diferente, pues depende de las necesidades del cliente, circunstancias, condiciones económicas u otros factores que influyen para su buen funcionamiento.
- o Es importante apoyarse en la información obtenida de los censos de aprovechamientos hidráulicos, debido a que a través de ellos podemos conocer la posible calidad del agua subterránea y la profundidad total de algunos pozos inscritos en el área de estudio o cercana a ésta, lo que nos da una idea sobre las características que pudiera tener la obra de captación, además los censos proporcionan un dato importante que es el conocer el uso al que se destina el agua, en la población donde se analice la factibilidad de ubicar tales obras; con ello se permite evitar inconvenientes que alteren los valores tomados y programar adecuadamente la prueba de bombeo, en caso de que la obra se lleve a cabo.
- o Cuando se realizan las pruebas de bombeo, la época del año es un factor importante porque las mediciones pueden variar si los ciudadanos requieren agua para riego o agricultura, es decir, que puede darse el caso de que se esté extrayendo agua en distintos pozos cercanos al de interés que afecten los niveles de abatimiento en la zona que se estudia, provocando que los resultados obtenidos no sean representativos o confiables.

- Es de sumo interés capacitar al personal para realizar las pruebas de permeabilidad y la piezometría, pues en ocasiones no se le da la importancia correspondiente; el primero debe proporcionar datos de los valores de la permeabilidad que sean congruentes con el tipo de material que se obtiene en la perforación exploratoria, en el segundo se puede dar la situación que al momento de efectuar las mediciones del nivel del agua subterránea, se tengan errores significativos en lo que se refiere a la piezometría.
- Se puede presentar en los trabajos de perforación que una herramienta o utensilio (pez) caiga en el interior del agujero. Rescatar el pez, en ocasiones resulta lento o no se obtienen resultados, porque la pieza no está visible o se acuña en el pozo, situación que puede generar pérdidas económicas, de tiempo, retraso en los avances de la perforación e inclusive el abandono del pozo. El perforista es quien debe intentar rescatar el pez y ser cuidadoso al manejar sus herramientas, la experiencia que tenga le puede ayudar a evitar tales situaciones.
- Cuando se tratan de satisfacer las demandas de agua para un municipio, población o ciudad, regularmente se busca que la obra de captación sea eficiente, rentable y económica, sin embargo no siempre es así, resulta que si no hay agua en el sitio o el nivel estático es muy profundo, puede ser muy costosa, pero si existen problemas de escasez de agua y no queda otra alternativa, se tienen que buscar los medios para llevarla a la zona de interés o extraerla. La experiencia del ingeniero juega un papel importante y decisivo para resolver dichos problemas.
- Es común que en algunas comunidades del país, después de haber sido concluidos los pozos de observación, se presenten situaciones de carácter inconsciente por parte de los ciudadanos que llenan de rocas pequeñas los piezómetros y a veces tapan totalmente todo su interior, otros los destruyen, provocando que dichos pozos de observación no funcionen correctamente y sean inservibles. Estas circunstancias generan pérdidas económicas y un retroceso en los avances de un proyecto.
- Ante condiciones climáticas inesperadas como la lluvia, se debe proteger cada uno de los piezómetros cubriéndolos con un tubo de acero enterrado en el suelo, además se le deben poner tapones en la boca, éstos pueden ser de madera o algún otro material, esto con el propósito de evitar la introducción de material o basura por parte de la gente del lugar o bien para impedir la entrada de agua contaminada o sucia por la crecida del cauce del río (época de lluvias, en función de alguna central hidroeléctrica, lluvias inesperadas u otros), lo que ocasiona que el piezómetro pueda ser parcial o totalmente destruido, con ello se busca que el pozo de observación no sea dañado por dichas circunstancias.

- Existen lugares donde los habitantes de ciertas poblaciones suelen ser bastante conflictivos e impiden el acceso al área de estudio, otros pretenden obtener beneficios propios. Ante tal situación siempre se busca solucionar de la mejor manera los problemas sociales y la afectación de predios, de no ser así, se buscan en otras alternativas convincentes del beneficio que obtendrá la población.
- En el sitio denominado Obra de Toma se explota agua subterránea para abastecimiento a la Cd. de Acapulco de Juárez, Estado de Guerrero, mediante una batería de pozos ubicados en la margen derecha del Río Papagayo y de dos pozos tipo Ranney ubicados en la margen izquierda del río, además de una toma directa del río, que en conjunto extraen de la zona $3\text{m}^3/\text{s}$.
- Del pozo de prueba teóricamente se pueden extraer 31.725 l/s .
- El ejemplo de aplicación mostrado corresponde al primero de cuatro módulos de prueba.
- Para el diseño del pozo principal se empleó PVC hidráulico por razones económicas y por sus características citadas en el capítulo tres, ya que su uso fue provisional y posteriormente sería destruido o reemplazado por un pozo tipo Ranney, esto se haría de acuerdo a la información obtenida en los otros módulos, dependiendo de las zonas más productivas o permeables.
- De la prueba de bombeo que se realizó en el módulo, se concluye que por la alta permeabilidad estimada del acuífero, su extensión y heterogeneidad lateral para definir los parámetros de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, es necesario realizar pruebas de larga duración, debido a lo anterior y a las fuertes fluctuaciones en 24 horas del régimen del río, el cual está controlado por la operación de la central hidroeléctrica La Venta. Si se requiere programar una prueba de bombeo de larga duración, se necesita llegar a un acuerdo con la hidroeléctrica para que ésta mantenga una descarga constante antes y durante la realización de la prueba.

- Durante la prueba de bombeo se tomó una muestra de agua que fue llevada a laboratorio y analizada. Los resultados obtenidos fueron: el agua cumple con la norma oficial mexicana NOM - 127- SSAI- 1994, a excepción de la concentración de plomo (Pb) y manganeso (Mn) que resultaron ligeramente por encima de lo que indica dicha norma. El tratamiento que requerirá el agua para uso y consumo humano, deberá someterse a potabilización según lo establezca el ingeniero químico y las indicaciones mencionadas en el ejemplo de aplicación.

- Las obras de captación de uso industrial que cumplen su vida útil, en algunas ocasiones son donadas a instituciones o poblaciones pequeñas para uso restringido (calidad del agua para uso domiciliario) y éstas mismas al aceptarlas realizan el comparativo de una obra nueva o rehabilitan la propuesta.

BIBLIOGRAFÍA

1. ATHALA MOLANO, J. E. (1998). Apuntes de clase de Geohidrología. ENEP ACATLAN UNAM. México.
2. B. MCWHORTER, D. y K. SUNADA, D. (1977). Ground-Water: Hydrology and Hydraulics. Water Resources Publications. P.O.Box 303. Fort Collins, Colorado 80522. U.S.A., 290 pp.
3. BEAR, J. (1979). Hydraulics of Groundwater. Editorial Mc Graw Hill. U.S.A.
4. BLYTH, R.G.H. y FREITAS, M.H. (1997). Geología para ingenieros. 3ª. Reimpresión. Editorial Continental S A de C.V. Mexico, 440 pp.
5. BOLIVAR DEL VALLE, J. M. (1993) Rehabilitación de pozos. Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica, Urbana e Industrial. Gerencia de Normas Técnicas, CNA/Cámara Nacional de la Industria de la Construcción, CNIC. México. 182 pp.
6. BRIGGS, G.F. (1980). Developing Ground Water Resources. JOP JOHNSON. U.S.A.
7. C. WALTON, W. (1970). Groundwater Resource Evaluation. Editorial Mc Graw Hill. Kogakusha, LTD. Tokio, Japón. 664 pp.
8. CASTANY, G. (1975). Prospección y explotación de las aguas subterráneas. Ediciones Omega. Barcelona, España. 738 pp.
9. CÉSAR VALDÉS, E. y VÁZQUEZ GONZÁLEZ, A. B. (1993). Abastecimiento de Agua Potable. Vol. II. Recomendaciones de Construcción. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 1ª. Edición. México. 112 pp.
10. CFE. (1996). Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Realización de Pruebas Lefranc. Manual de Circulación Interna de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Guía CFE 10000-73. México. 61 pp.
11. CFE. (1996). Subdirección Técnica, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Desarrollo y prueba de aforo en pozos para abastecimiento de agua subterránea. Manual de circulación interna de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Guía CFE-10000-86. México 23 pp.
12. CICM. (1998). "Aguas Subterráneas. Consultoría en el Transporte", en Revista: Ingeniería Civil. Organo Oficial del Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C. CICM, No. 347. México. 48 pp.

13. CORDOVA GONZÁLEZ, A y SAENZ TOVAR, G. (1980). Hidrogeoquímica y su aplicación en el estudio geohidrológico del Valle de Chihuahua. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Chihuahua. UACH. México. 84 pp.
14. COREMIN, S.A. DE C.V. (1990) Fabricante de brocas, equipos y accesorios para perforación con diamante. Planta Industrial La Valenciana Num. 2, Barrio el Carrizo 76819, San Juan del Río, Querétaro. México. Tel (427)-24190.
15. COSTEAU, J. (1982) Los Secretos del Mar. Enciclopedia del Mar. Editorial Fabri. Italia-Milán.
16. CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. R. (1976). Hidrología Subterránea. Tomos I y II. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España. 2359 pp.
17. CHÁVEZ GULLÉN, R. et al. (1987). Hidráulica y diseño de pozos. Facultad de Ingeniería. División de Educación Continua. México.
18. CHÁVEZ GULLÉN, R. et al. (1994). Perforación de Pozos. CNA/IMTA/Libro 5/3ª. Sección/Geohidrología. México. 256 pp.
19. Didáctica Multimedia S.A. (1994). Geología. Cambios en el Medio Natural. Enciclopedia Interactiva. Microsoft Windows.
20. ENCARTA. (1999). Enciclopedia Interactiva. Microsoft.
21. GARCÍA CHABLE, M. A. et al. (1972). Diseño de pozos. Primera Reunión Nacional del Grupo de Perforación de Pozos. Estudios y proyectos. Cámara Nacional de la Industria de la Construcción. México.
22. HARR, M.E. (1962). Groundwater and seepage. Editorial Mc Graw Hill. U.S.A. 315 pp.
23. HERNÁNDEZ, M. J. (1984). Manual de operación de los equipos T-4 y DM-4-A Drill Master. Departamento de Ingeniería y Minería. Superintendencia de Geohidrología y control de equipo. Residencia de Perforación. Boletín de divulgación técnica. Comisión Federal de Electricidad (CFE). Monterrey Nuevo León, México
24. INGENIERÍA TÉCNICA Y ESTUDIOS, S.A. DE C.V. (ITESA). (1994). Pruebas de Bombeo. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica, Urbana e Industrial. Comisión Nacional del Agua (CNA). Libro 5. México. 132 pp.
25. ITURBE ARGÜELLES, R. y SILVA MARTÍNEZ, A. E. (1992) Agua Subterránea y contaminación. Series del Instituto de Ingeniería No 539 UNAM. México 54 pp.
26. J. LYNCH, E. (1973). Formation Evaluation. A Harper International Student Reprint. U.S.A.

27. JOHNSON DIVISION, UOP INC. (1966) Diseño de pozos de agua. St. Paul, Minnesota 55165, U.S.A. 27 pp.
28. JOHNSON, E. E. (1975). El agua subterránea y los pozos. 1ª Edición. Johnson Division, UOP Inc., Minnesota, U.S.A. 513 pp.
29. KEITH TODD, D. et al. (1959). Ground Water Hidrology. Toppan Company, Ltd., Tokio, Japan. New York, John Wiley & Sons, Inc., Edit. Wiley Toppan.
30. LEEB, L. D. y JUDSON, S. (1986) Fundamentos de geología física. 8ª. Reimpresión. Editorial Limusa. México. 450 pp.
31. LONGYEAR. (1997). Perforadoras de Diamante Longyear 34. U.S.A. 8 pp.
32. LÓPEZ RAMOS, E. (1983). Geología general y de México. 6ª. Edición. Editorial Trillas. México. 288 pp.
33. MASKEW FAIR, G. et al. (1980). Abastecimiento de Agua y Remoción de Aguas Residuales. Tomo I: Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales. Edit. Limusa, 4ª. Reimpresión. México. 547 pp.
34. MICHEL VALENZUELA, C. y RODRÍGUEZ URBINA, V. (1998). Avance del Estudio Integral de Sistemas de Abastecimiento de Agua Subterránea a la Cd. de Acapulco, Guerrero (Ríos Papagayo y Coyuca), Departamento de Geohidrología. Subgerencia de Estudios Hidrográficos. Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Comisión Federal de Electricidad (CFE). México.
35. MILLAN WONG, M. G. (1995). Análisis y diseño por bombeo para el abastecimiento de agua potable de un pozo profundo hasta la población de Llano Laguna Seca, Estado de México. Tesis profesional. ENEP ACATLAN, UNAM. México.
36. MORALES ESCALANTE, R. (1990). Apuntes de Geohidrología. Facultad de Ingeniería. UNAM. México.
37. PEERLESS TISA, S.A. (1988). Bombas verticales tipo turbina. Boletín No. 178-XI-I México. 16 pp.
38. RAF. Ediciones. (1996). El Ciclo del Agua. Serie de Monografías No. 768. México.
39. REXFORD D. S. y ULRIC P. G. (1989). Manual de los pozos pequeños. Washington D.C. Edit. Limusa. 6ª. Reimpresión. E.U.A. 182 pp.
40. RÍOS TERCERO, J. (1986). Bombas para pozos profundos. Manual de circulación interna. Departamento de Geohidrología de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) México. 56 pp.

41. SARH. (1980) Perforación de pozos profundos. 3ª Edición, Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos México 220 pp
42. TEBBUTT, T.H.V (1995). Fundamentos de control de la calidad del agua. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Birmingham. Edit. Limusa, S A de C.V. Noriega Editores México. 240 pp.
43. TROMBE, F. (1978). Las Aguas Subterráneas. 1ª. Edición. Kost-tau, S.A. Ediciones. Barcelona, España. 131 pp.
44. UNIVERSAL SOFT S.A. (1997). Atlas de México. CD. Buenos Aires, Argentina. E-Mail: 73000.702@compuserve.com.
45. VARGAS ALCÁNTARA, V (1975). Técnicas y análisis de costos de pozos profundos. 1ª Edición. Edit. Limusa, S.A de C.V. Noriega Editores. México. 514 pp.
45. VIEJO ZUBICARAY, M. (1981). Bombas. Teoría, diseño y aplicaciones. 3ª. Reimpresión. Editorial Limusa. México.

La portada principal representa la distribución del agua sobre la tierra; el 97% de la hidrosfera está representada por los océanos, que cubren el 71% de la superficie de nuestro planeta. El 3% de agua restante se encuentra en lagos, ríos, capas subterráneas, las nubes, en los hielos de los polos y de las montañas, según COSTEAU, Jacques. Los Secretos del Mar. Enciclopedia del Mar. Editorial Fabri. Italia-Milán, 1982.

Las carátulas presentadas en los capítulos 1 y 2, son ilustraciones de Microsoft Office 97; La portada del capítulo 3, corresponde a la Enciclopedia Interactiva "ENCARTA", Microsoft, 1999. La carátula del capítulo 4, pertenece a la empresa "Longyear" (Longyear heat-treated casing, Canadá, 1990, pp.2). Las portadas de los capítulos 5, 6 y 7; la primera es una fotografía que corresponde a las "Cascadas de Tamu", en la Huasteca Potosina, la segunda, es la margen izquierda del Río Papagayo enfrente del poblado de Salsipuedes, en el Estado de Guerrero y por último la cascada "El Salto", en el Poblado del Naranjo, en el Estado de San Luis Potosí.