



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“MONITOREO DE LA EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA DEL
SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO”**

TESIS

**Que para obtener el grado de:
INGENIERO CIVIL**

Presenta:

ORTIZ VILLASEÑOR IGNACIO

Director de Tesis:

DRA. DORA C. CARREÓN FREYRE

México D.F., Junio 2009



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.

Monitoreo de la evolución piezométrica del sistema acuífero del Valle de Querétaro

Índice General

Introducción	Pag.
Resumen	1
Objetivos	2
Condiciones Hidrogeológicas del Valle de Querétaro	3
Capítulo I Caracterización hidrogeológica	
1.1 Conceptos Básicos	9
1.2 Unidades Geológicas	9
1.3 Parámetros Hidrogeológicos	11
1.4 Técnicas de Monitoreo de Agua Subterránea	15
Capítulo II Metodología de Instrumentación	
2.1 Tipos de Pozos de Monitoreo	18
2.2 Características Técnicas de los Sensores	19
2.3 Programación de los sensores.	21
2.4 Instalación de Sensores	24
Capítulo III Evolución Piezométrica	
3.1 Evolución Piezométrica de 1970-2002	29
3.2 Evolución Piezométrica de 2003-2007	31
3.3 Monitoreo en tiempo real con sensores automatizados	42
Capítulo IV Pruebas de Bombeo	
4.1 Clasificación de acuíferos en función de comportamiento hidráulico...	54
4.2 Descripción y análisis de una Prueba de Bombeo.....	55
4.3 Prueba de Bombeo en el Pozo "Testigo" Mompani II (E)	60

Monitoreo de la evolución piezométrica del sistema acuífero del Valle de Querétaro

Capítulo V	Discusión de Resultados	Pag.
5.1	Variaciones en la dirección de flujo de agua subterránea en el Valle de Querétaro	64
5.2	Identificación de Sistemas de Flujo	69

Capítulo VI Conclusiones y Perspectivas

6.1	Conclusiones sobre el flujo de agua subterránea en el Valle de Querétaro	74
6.2	Perspectivas para la metodología utilizada.....	75

INTRODUCCIÓN

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolla dentro del marco de una investigación sobre las condiciones de flujo del sistema acuífero del Valle de Querétaro. De acuerdo a estudios previos el nivel piezométrico del agua subterránea en esta región ha descendido en un rango de [3 a 170] m de profundidad en las últimas tres décadas. Se ha comprobado que se trata de un acuífero multicapa en que el flujo es determinado por la estratigrafía y estructura del subsuelo, donde fallas y fracturas pueden actuar como barreras o canales de flujo (Carreón-Freyre, et al., 2005).

A medida que desciende el nivel piezométrico las variaciones estratigráficas y estructurales determinan complejos patrones de flujo, lo que se hace necesario sistemas de monitoreo confiables que permitan su identificación y caracterización. Para el desarrollo del trabajo se tomó el sistema de monitoreo presentado por Carreón-Freyre y colaboradores (2009) que corresponde a un monitoreo de nivel II o de semidetalle. Se ubicaron los pozos representativos del flujo de agua subterránea en la zona en estudio y se instrumentaron con sensores automáticos capaces de medir nivel(m), temperatura(°C) y conductividad eléctrica(mS/cm). Para este estudio se seleccionaron y monitorearon 7 pozos denominados "pozos testigo" para diferenciarlos de los "pozos piloto" utilizados como red de monitoreo por la Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (CEAQ) para medir anualmente los niveles piezométricos en el Valle de Querétaro. Se analizan los resultados obtenidos en los pozos testigo durante 8 meses de medición. Es de resaltar que un notable rango de variación de nivel piezométrico, que varía de 65 a 250 m, un rango de variación de temperatura de 25 a 32 °C y una conductividad eléctrica media de 0.57mS/cm.

Se identificaron 3 zonas de nivel piezométrico que van del rango de 1910 a 1620 msnm, la zona 2 tiene un alto gradiente hidráulico en el rango de 30 a 10 m/km, la altitud promedio del Valle es 1800 msnm.

La elaboración y análisis de secciones piezométrica permitió identificar una zona de intensa depresión en la Zona Industrial del Valle de Querétaro; y una posible salida de flujo subterráneo al este de Tejeda, donde no se tenía considerada anteriormente.

Objetivo Principal

Analizar las condiciones de flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro por medio del monitoreo de las variaciones de los niveles piezométricos resultantes del sistema multicapa para identificar los patrones asociados a diferentes unidades hidroestratigraficas.

Objetivos específicos

1. Llevar a cabo un análisis sobre las técnicas de monitoreo de acuíferos más utilizadas en la actualidad
2. Implementar la metodología para la instrumentación de pozos de extracción de agua subterránea
3. Establecer un sistema de monitoreo confiable para identificar y caracterizar las condiciones de flujo del acuífero del Valle de Querétaro
4. Monitorear en tiempo real la variación de nivel piezométrico de las distintas unidades hidroestratigraficas del sistema acuifero
5. Identificar los sistemas de flujo predominantes en el Valle de Querétaro

Condiciones hidrogeológicas del Valle de Querétaro

El agua es un recurso natural imprescindible para la existencia del ser humano, por lo que su explotación y aprovechamiento requiere de estudios serios y rigurosos, para su óptimo uso.

En México 76.8% del agua se usa para la agricultura, 5.4% en las termoeléctricas, 3.8% en la Industria autoabastecida y sólo 13.9% para el abastecimiento público, figura 1 (CNA, 2007); de la cual 63% proviene de aguas superficiales y 37% de Acuíferos.

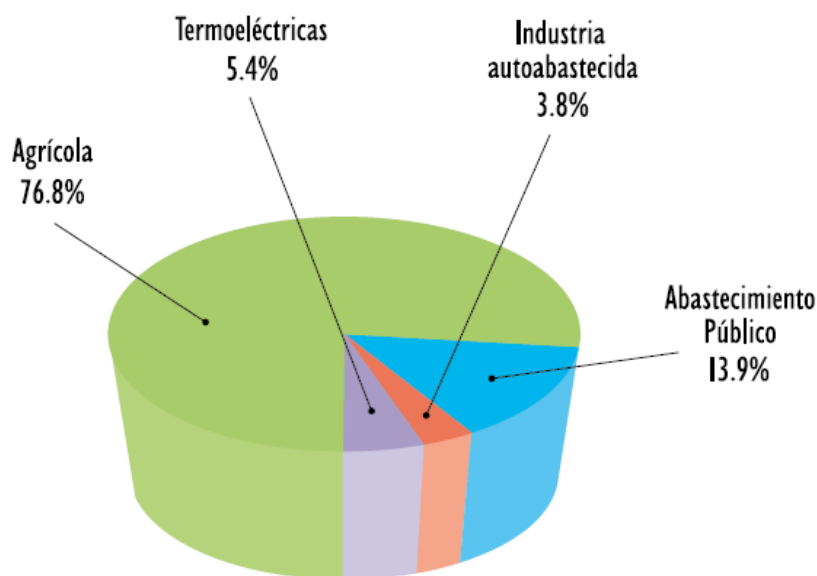


Figura 1. Porcentaje de Uso de Agua en México por sector (CNA, 2007).

Para el Estado de Querétaro el 96.12% del agua proviene del subsuelo, (CEAQ, 2008). El estado de Querétaro se ubica en la parte central de la República Mexicana, cuenta con una superficie 11,769km² y su territorio se ubica en dos cuencas hidrológicas; Río Panuco 9,316km² la cual vierte al golfo de México y la del Río Lerma-Chápala, con 2,453km² que desemboca al Océano Pacífico. Está dividido en 18 municipios, con una población de 1,598,139 habitantes, su población no se distribuye de manera uniforme en el territorio pues cerca del 46% habita en la zona urbana de Querétaro por lo cual se encuentra entre los estados con mayor densidad poblacional por km² (INEGI, 2005).

La ubicación geográfica de la región Querétaro de la cuenca Lerma Chapala limita en forma significativa la cantidad de agua disponible para su aprovechamiento pues tiene un clima semi-desértico (CQRN, 2003), con una precipitación media anual de menos de 600mm (INEGI, 2008).

El crecimiento exponencial de la mancha urbana desde los 70's ha provocado la eliminación o alteración de la cubierta vegetal original en mas del 60% (CQRN 2003), lo que ha disminuido la infiltración natural del agua. Esta agua podría recargar el acuífero explotado aunque a la fecha en el Valle de Querétaro no se han realizado estudios que permitan cuantificar el ciclo hidrológico (evapotranspiración-infiltración-escurrimiento y su variación en el tiempo). En la figura 2 se aprecia el crecimiento de la mancha urbana de 1970 a 2002 (CQRN-2003).

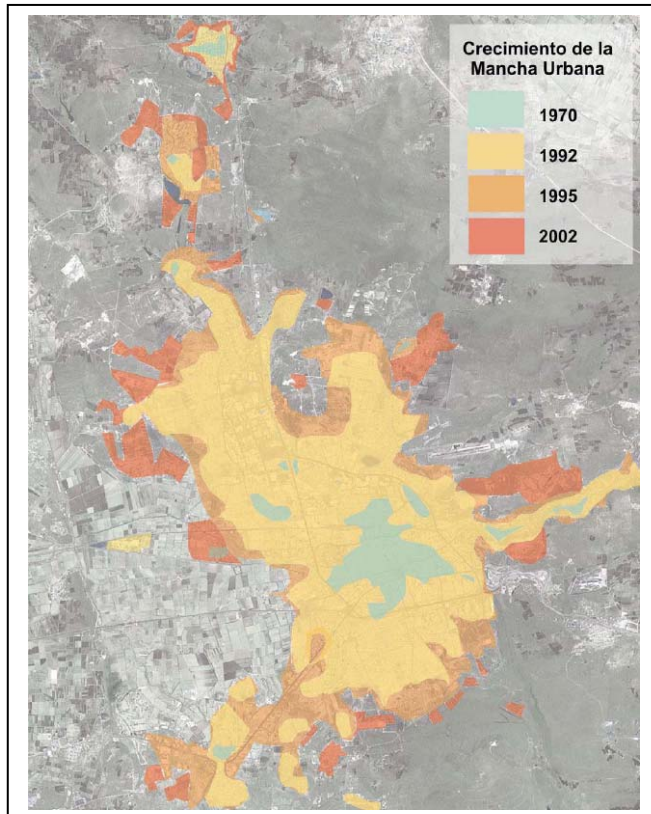


Figura 2. Crecimiento de la mancha urbana en los últimos 30 años en el Valle de Querétaro, (CQRN, 2003).

El acuífero del Valle de Querétaro tiene una superficie administrativa de 484 km² (CNA, 2003), con niveles estáticos de 70 a 140 metros, su variación anual del nivel estático esta en el rango [-4,-1] metros (CNA, 2000). De los 239 pozos activos en 1997, 122 eran para uso público urbano (servicios y recreativos), 67 para uso agrícola, 45 para la industria y 5 de abrevadero. Para 1999 se estimaba que en total se extraían 103 Mm³/año, y se estimaba una recarga por medios indirectos de 70 Mm³/año, lo que resultaba en un déficit de 33 Mm³/año. Por esta razón la CONAGUA, de acuerdo a la norma NOM-011-CNA-2000 lo considera un acuífero sobreexplotado. (CEA, 1999). En la figura 3 se presenta la situación de acuíferos en el estado hasta 2003 (CQRN, 2003).

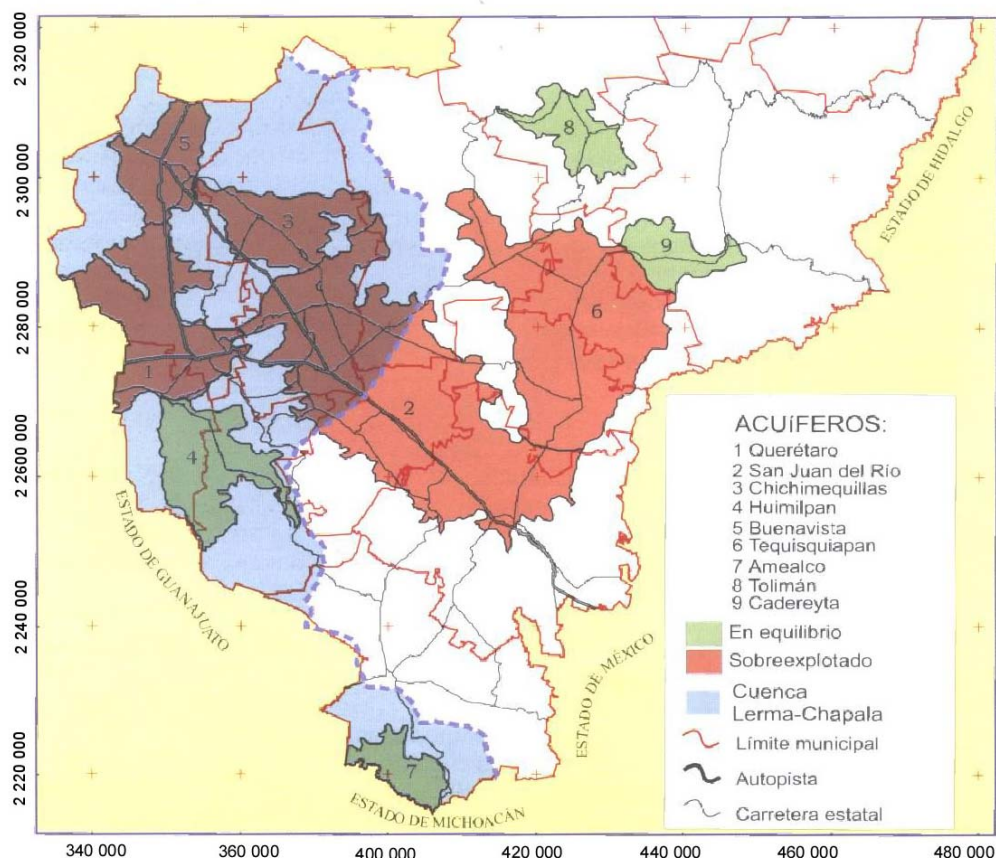


Figura 3. Acuíferos principales del Estado de Querétaro y su condición actual, (modificada de SARH, 1988)

El acuífero del Valle de Querétaro ha presentado durante los últimos 30 años un acelerado descenso de los niveles en el agua subterránea que puede llegar a los 160 m de profundidad (Carreón-Freyre et al, 2005). Esto se traduce en un abatimiento diferencial con un alto gradiente hidráulico, que puede favorecer a colapsos del ademe de los pozos ubicados en estas zonas de alto gradiente, además al perforar más profundo se elevan exponencialmente los costos de operación y mantenimiento. La explotación del acuífero Valle de Querétaro ha provocado la compactación y asentamiento diferencial del terreno, lo que se ha traducido en fracturamiento que puede favorecer la migración directa de agua contaminada al acuífero (Herrera-Zamarrón et al, 2007).

Zona de Estudio

El Valle de Querétaro está localizado en la parte centro-norte de la Faja Volcánica Transmexicana (Figura 4), a una altura de promedio de 1800 m sobre el nivel del mar. El valle se encuentra delimitado por dos sistemas de fallas normales con dirección norte-sur y este-oeste, que producen una estructura en forma de graben que contiene relleno volcánico-sedimentario. Las fracturas que afectan el valle son paralelas a las fallas regionales norte-sur (Carreón-Freyre et al, 2005).

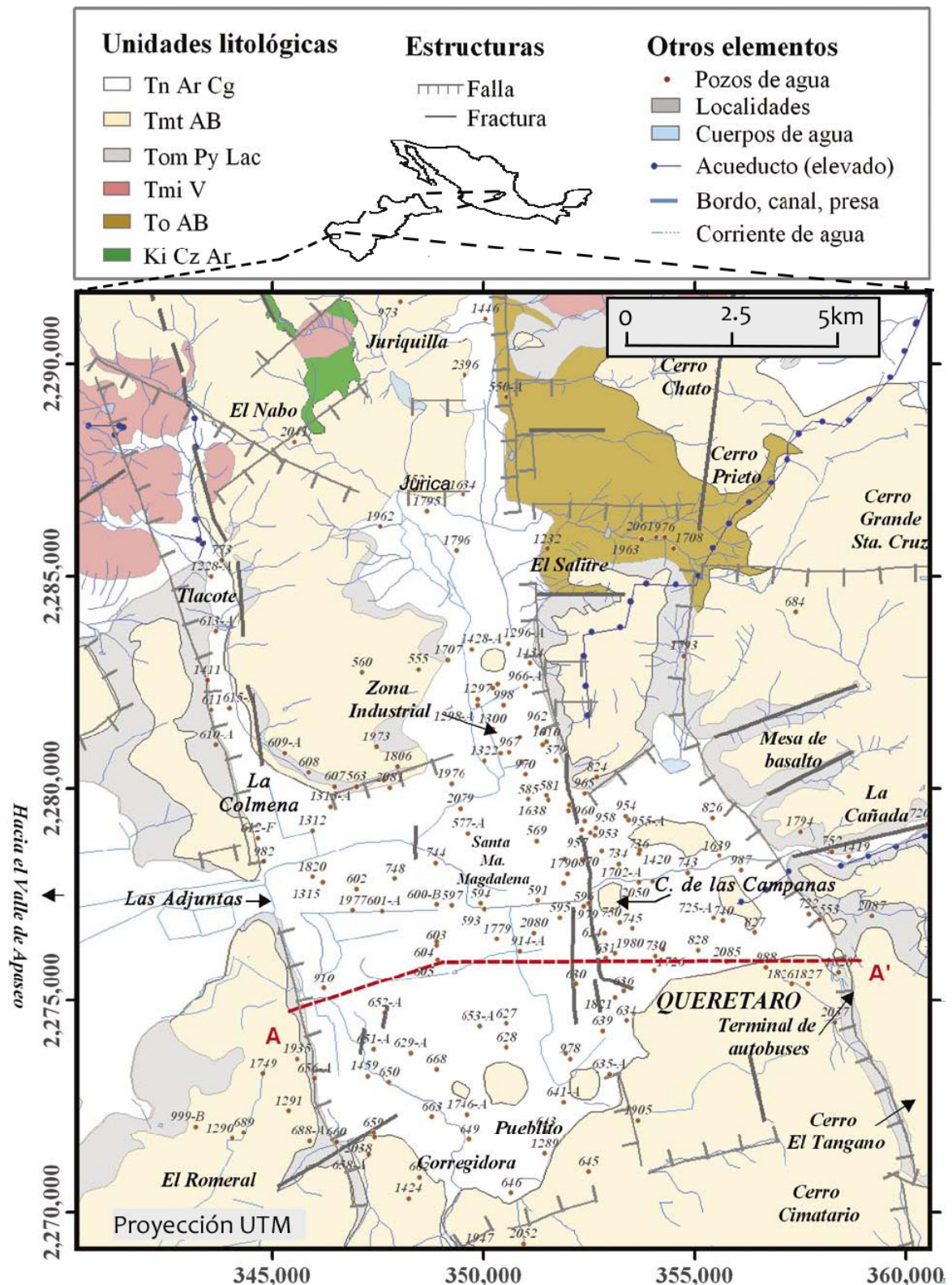


Figura 4. Mapa Geológico del Valle de Querétaro (modificado de Carreón-Freyre et al, 2005), se muestra la distribución de fracturas y pozos de extracción ubicados en la zona. La clave de la estratigrafía se detalla en el texto. La sección A-A' se presenta en la Figura 6.

Carreón-Freyre et al, en un estudio realizado en 2005, propone que el acuífero del Valle de Querétaro es del tipo "multicapa" con un sistema de flujo inferido entre local y regional, donde la influencia de las características litológicas y condiciones estructurales del medio (fallas y fracturas principalmente) pueden actuar como barreras o canales. En este trabajo se reportan 6 unidades hidroestratigráficas:

- 1) **TpArCg**. Un acuitardo superficial que corresponde a la parte superior de la secuencia.
- 2) Una unidad acuífera granular somera que corresponde a la base de la misma secuencia, con muy amplia distribución en la parte centro y poniente del valle.
- 3) **Tmt AB**. Unidad acuífera fracturada somera, formada por los derrames de lava, con presencia de fracturas e intercalaciones de material piroclástico; esta es una unidad acuífera libre en la periferia y semiconfinada en la parte baja del valle.
- 4) **Tom PyLac**. unidad acuífera granular intermedia, corresponde a la unidad
- 5) **Tmm AB, ToAB y/o Tmi V**. Unidad acuífera fracturada intermedia, compuesta por rocas volcánicas que se encuentran localmente fracturadas.
- 6) **Te CgAr**. Unidad acuífera granular inferior, corresponde a la secuencia sedimentaria profunda.

En la figura 5 se muestran las principales unidades litológicas interpretadas a partir de los registros litológicos de pozos Carreón-Freyre et al 2005.

En la figura 6 se muestra una sección geológica, esquematizada e idealizada, (Carreón-Freyre et al, 2005). Se observa la presencia de 4 unidades acuíferas y la influencia que tienen las fracturas o fallas en el comportamiento del acuífero que se propone como un sistema multicapa.

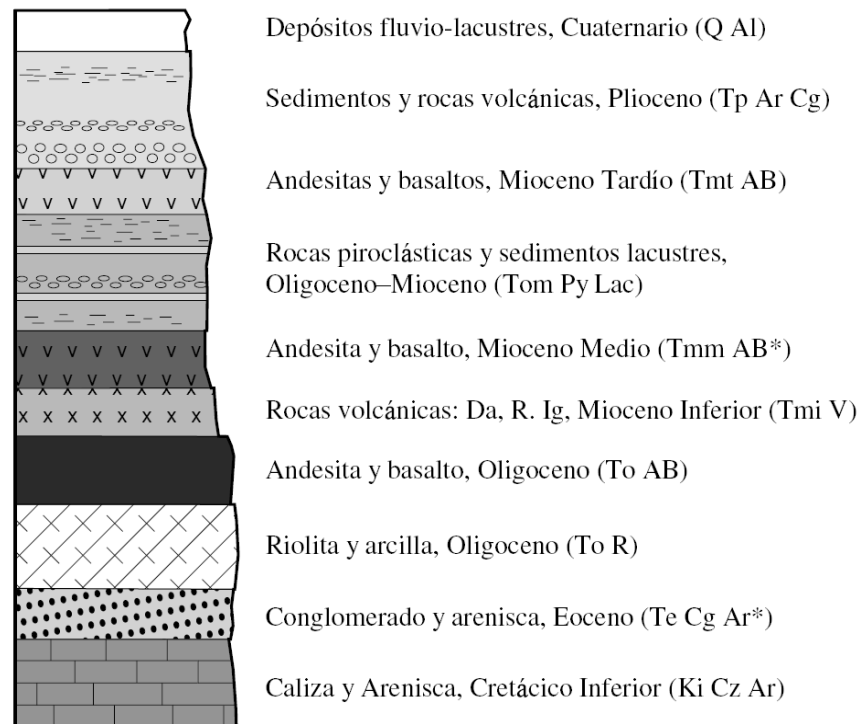


Figura 5. Columna estratigráfica esquemática del Valle de Querétaro que muestra las principales unidades litológicas interpretadas a partir de los registros de pozos, (Carreón-Freyre et al, 2005).

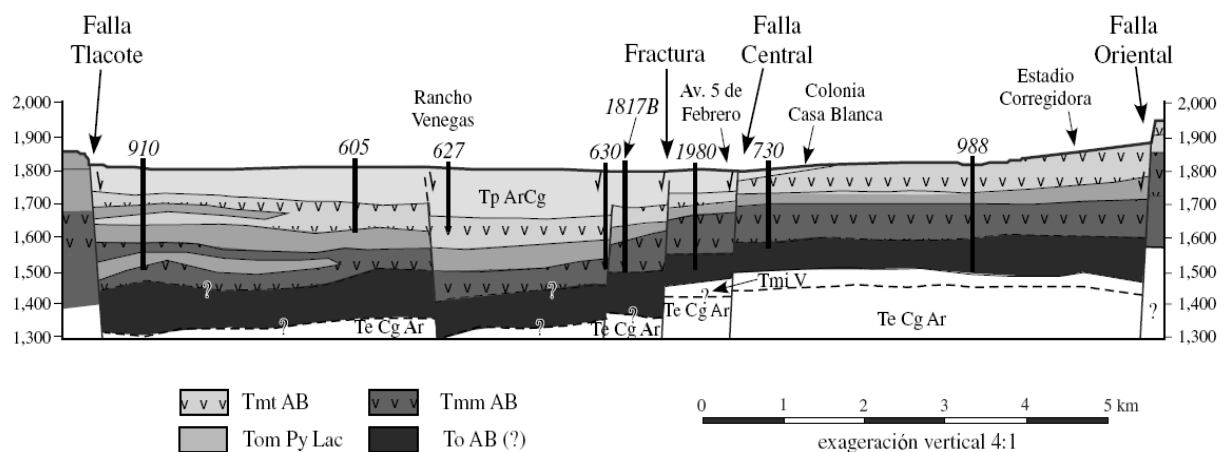


Figura 6. Sección geológica (Carreón-Freyre et al, 2005), esquemática e idealizada con dirección oeste-este interpretada a partir del registro litológico con profundidades menores a 500 m. La localización de la sección se muestra en la Figura 5.

Selección de Sitios de Monitoreo

La selección de los puntos de monitoreo se puede tornar compleja al considerar todas las variables que intervienen en el comportamiento del flujo de agua subterránea. Una de las principales variables es la disponibilidad de pozos de monitoreo, pues el alto costo de la perforación y su terminado final, no es prioridad en México.

Para establecer un monitoreo útil y eficiente es necesario contar con un previo conocimiento de la zona a instrumentar con el objetivo de establecer y caracterizar las diferentes zonas dentro de la red de monitoreo. Al perforar un pozo invariablemente se obtienen muestras de suelo y al correlacionarlas con el nivel de perforación se puede establecer la estratigrafía del subsuelo. Con estos es posible obtener una primera idea de la distribución en profundidad de las unidades hidroestratigráficas, esto es, las formaciones geológicas del subsuelo capaces de almacenar y transmitir cantidades importantes de agua. Usualmente estas perforaciones están reguladas y supervisadas por un organismo gubernamental, en este caso es la Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (CEAQ).

Teniendo como base el mapa de unidades geológicas (presentado en la figura 4) se establecieron las unidades hidroestratigráficas a instrumentar que son: ***Tp ArCg, Tmt AB, Tom PyLac, Tmi V y To AB.***

Para un adecuado análisis de flujo de agua subterránea, también es importante considerar el esquema de terminación final, o también llamado corte de terminación, del pozo es decir el arreglo de ademe con el cual fue construido. Se debe incluir longitud y espesor de tubería, longitud de ranurado y tipo. Esto es esencial ya que según el arreglo se mostrará el resultado de la evolución piezométrica de las unidades perforadas.

CAPÍTULO I

Caracterización Hidrogeológica

1.1 Conceptos Básicos

La Hidrogeología, también llamada Hidrología Subterránea, es la rama de la Hidrología que trata del agua subterránea y movimiento, sus recargas y descargas, de las propiedades de las rocas que influyen en su ocurrencia y almacenamiento, así como de los métodos empleados para la investigación, utilización y conservación de la misma (Fuentes- Reyes Edgar, 2000)

Al existir precipitación un porcentaje del agua se infiltra en el subsuelo, parte de la cual alcanza las capas profundas. Si analizamos un corte geológico cualquiera se observa que siempre a una profundidad más o menos importante, existen estratos impermeables que crean una "barrera" para el agua, de forma que por encima de ellos si existe suficiente agua, ésta se acumulará quedando saturados todos los poros y formando la zona saturada dentro de la cual se originan los acuíferos. La línea de separación de la zona saturada de la zona superior no saturada se denomina nivel freático.

La zona superior se denomina zona no saturada y en ella está, de arriba abajo, la zona reticular donde las raíces de las plantas toman el agua necesaria para su ciclo de vida (González de Vallejo, 2004), el movimiento en la zona no saturada es por gravedad en esta zona existe absorción, y debido a las presiones negativas el nivel piezométrico es menor al de posición, la zona capilar es una transición entre zonas y finalmente la zona saturada el agua se encuentra rellenando todos los poros y se tiene una relación entre la altura de posición y presión que al sumarlas coinciden, así pues se puede realizar un análisis por conservación de energía Figura 7.

1.2 Unidades Geológicas

Un acuífero es una formación geológica subterránea permeable, capaz de almacenar y transmitir agua (Freeze et al, 1979).

Existen 2 grupos principales de formaciones geológicas:

1.-**Acuífero:** Capaces de almacenar y transmitir agua con alta capacidad de drenaje (gravas, arenas, materiales calizos, etc.)

2.-Acuitardo: Capaz de almacenar agua en grandes cantidades pero la transmiten con dificultad con media a baja capacidad de drenaje, se suelen denominar con frecuencia formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.). Son esenciales en la naturaleza como elementos transmisores del agua en recargas verticales a través de grandes superficies.

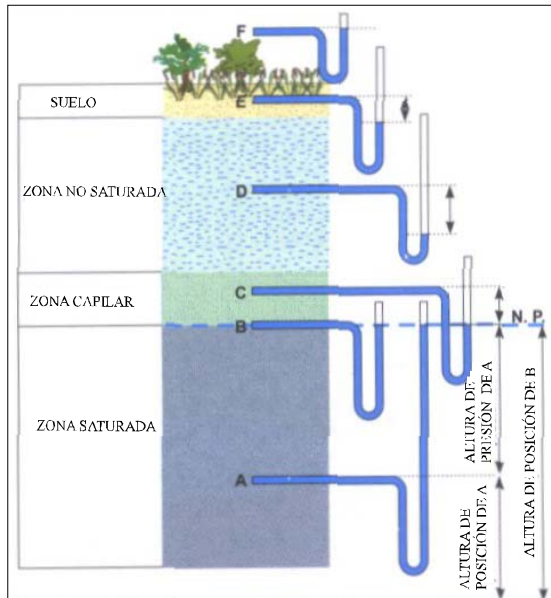


Figura 7. Niveles piezométricos en el suelo y subsuelo (tomado de González de Vallejo, 2004)

Los acuíferos según sus características litológicas se dividen en 3 grandes grupos (Figura 8) (Custodio et al1996):

- Granular o detrítico
- Fisurado y/o cárstico
- Mixtos

Acuíferos Porosos o Detríticos: Con permeabilidad debida a su porosidad inter granular; con tamaño de grano de arena como mínimo. La textura del medio está constituida por granos permitiendo que el agua se almacene y circule por los huecos inter granulares, dichos huecos pueden estar rellenos de material granular muy fino, disminuyendo las características del medio para el almacenamiento y transporte del agua, o incluso estar rellenos de materiales arcillosos, dejando prácticamente anuladas estas características. En ocasiones, los mismos granos están constituidos por material poroso que les aporta. Incluso, mejores propiedades como almacén de agua.

Acuíferos cársticos y/o fisurados: Con permeabilidad debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución y se encuentran entre ellos las calizas, dolomías, granitos, basaltos, etc. La carstificación es un proceso de disolución por acción del agua en formaciones carbonatadas previamente fisuradas.

Acuíferos mixtos: Su permeabilidad es debida a la combinación de las causas de los dos anteriores, un ejemplo son las arenas calcáreas o calcarenitas.

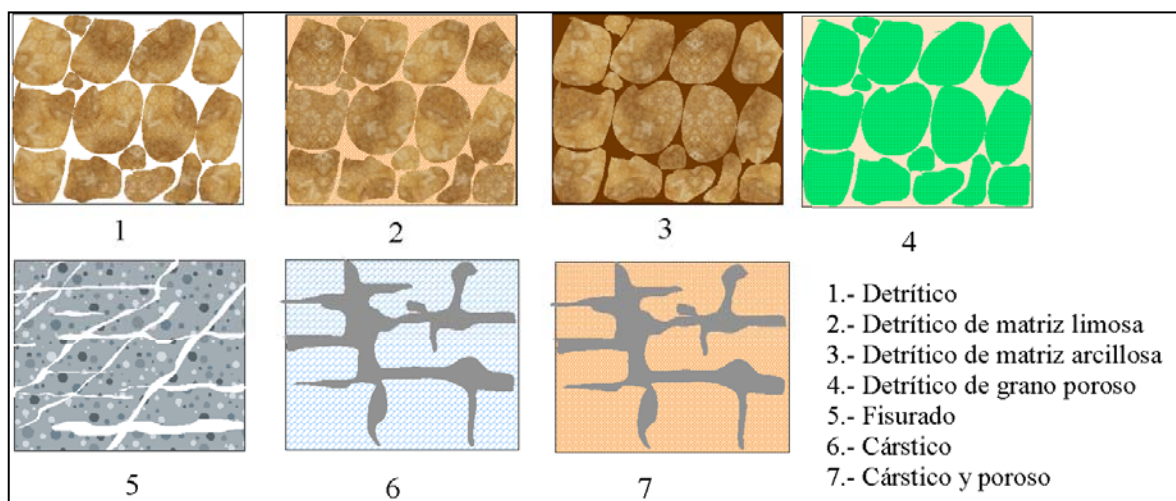


Figura 8. Tipos de acuífero según sus características litológicas (modificado de González de Vallejo et al., 2006).

1.3 Parámetros Hidrogeológicos

Los parámetros fundamentales a estudiar en un acuífero son: Conductividad Hidráulica, Transmisividad y el Coeficiente de Almacenamiento (Martínez-Rubio, 1998).

1.3.1 Definiciones

La **Conductividad Hidráulica**, también llamada Permeabilidad, es una propiedad física del material (litología) que describe la facilidad con la que el agua puede moverse en los poros y/o fracturas. Existe otro concepto que es la permeabilidad específica o intrínseca, está engloba las características del medio como lo son la distribución de el tamaño de grano del material (diámetro medio de la curva granulométrica) y la distribución del flujo en el medio.

La conductividad Hidráulica incluye a la permeabilidad específica y depende del gradiente hidráulico del medio, del peso específico y viscosidad dinámica del agua.

De manera cuantitativa Martínez-Rubio (1998) define la conductividad hidráulica en la ecuación 1 y la permeabilidad queda definida según ecuación 2:

$$K = K_o (\alpha/\mu) \dots\dots \text{Ecuación 1}$$

α = Peso específico del agua

μ = viscosidad dinámica del agua

K_o = Permeabilidad específica o intrínseca

$$K_o = CD^2 \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

C = constante adimensional

D = diámetro medio de la curva granulométrica

La **Transmisividad** es la cantidad de agua que puede ser transmitida horizontalmente por unidad de ancho de espesor saturado de un acuífero, con un gradiente hidráulico unitario (Espinoza-C, 2003).

La Transmisividad toma en cuenta las características del medio y fluido así como los rasgos estructurales y geométricos del acuífero.

Matemáticamente se define como el producto de la Conductividad Hidráulica y el espesor del acuífero (Gonzalez de Vallejo, 2004), ecuación 3.

$$T = K.b \dots\dots\text{Ecuación 3}$$

T= Transmisividad Hidráulica (m^2/s)

K= Conductividad Hidráulica (m/s)

b = espesor del acuífero saturado (m)

El **Coefficiente de Almacenamiento** se define como el volumen de agua que es capaz de liberar un cubo de base unitaria y de altura el espesor del acuífero, cuando desciende 1m el nivel piezométrico (Martínez-Rubio, 1998). En la figura 10 se observa el esquema para el cálculo del coeficiente de almacenamiento, para el caso de un acuífero confinado (se describirá en el capítulo 7, del presente trabajo).

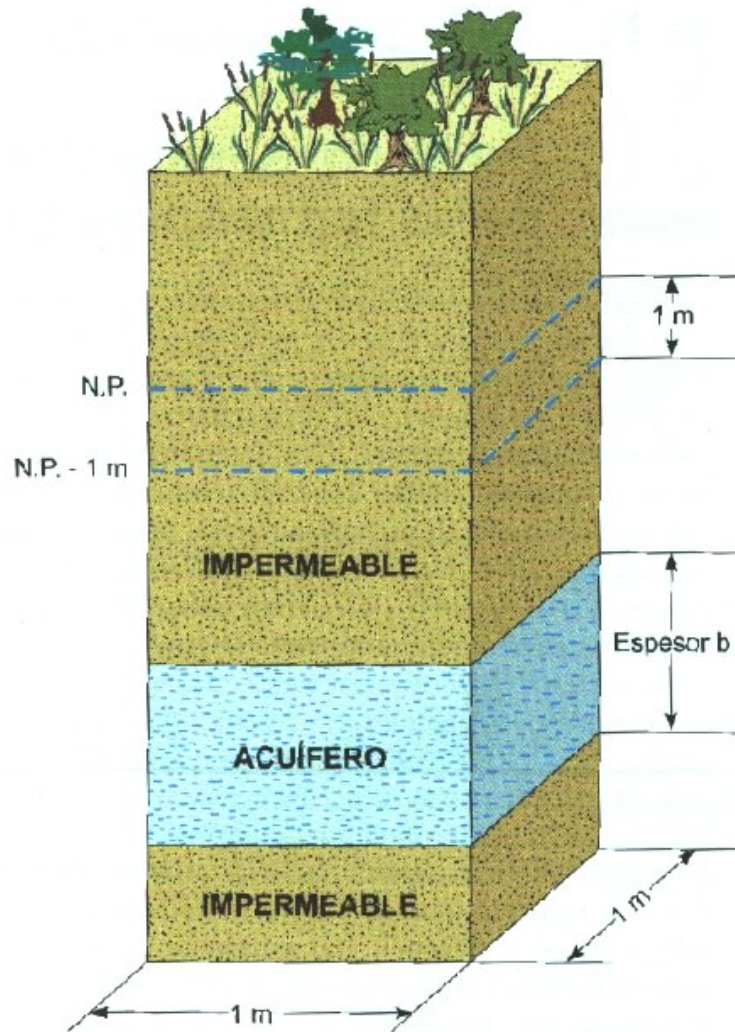


Figura 10. Esquema para el cálculo del coeficiente de Almacenamiento (González de Vallejo, 2003).

1.3.2 Experimento de Darcy

El experimento de Darcy es una aproximación satisfactoria al movimiento del agua en un medio poroso (Freeze et al, 1979), si este no es turbulento. Establece una proporcionalidad directa entre la velocidad de flujo (Figura 11) y el gradiente hidráulico Δh (diferencia de nivel piezométrico entre dos puntos).

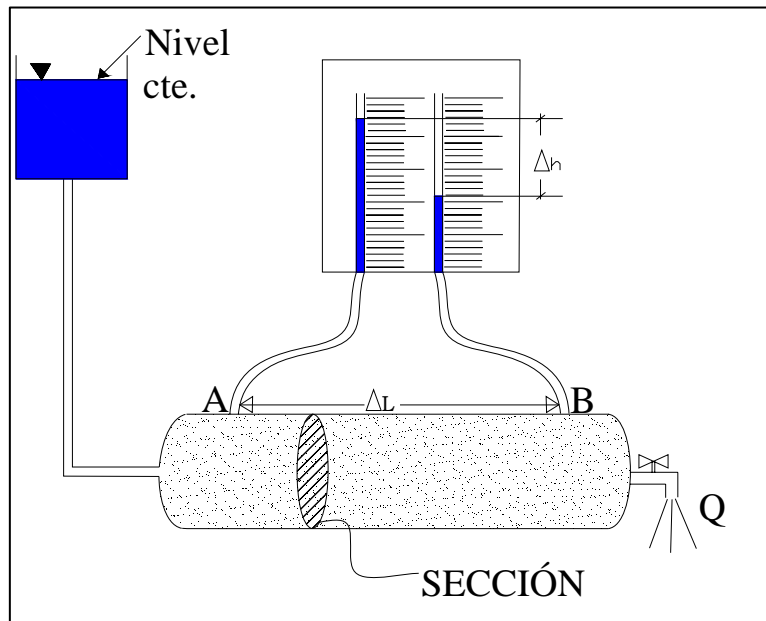


Figura 11. Diseño de un permeámetro de carga constante.

Q = Caudal o gasto (m^3/s)

Δh = Diferencia de Potencial o gradiente hidráulico entre A y B (m)

Δl = Distancia entre A y B (m)

Gradiente hidráulico = $\Delta h / \Delta l$ (1/m)

$v = -k\Delta h$ (m/s)

v = velocidad de flujo (m/s)

k = permeabilidad (m/s)

Si aplicamos la ley de continuidad a este caso donde todo lo que entra es igual a lo que sale menos la variación del almacenamiento llegamos a una ecuación diferencial general del flujo subterráneo:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \left(\frac{F}{k}\right) = \left(\frac{S}{T}\right) \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Ecuación 4}$$

F = Recargas exteriores

S = Coeficiente de almacenamiento

T = Transmisividad

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \Delta h^2$$

Representa la suma de entradas y salidas de agua de un volumen poroso elemental

$$\frac{F}{k}$$

Representa las recargas de agua exteriores al sistema.

$$\left(\frac{S}{T}\right) \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = 0$$

Representa la variación del almacenamiento en dicho volumen poroso elemental.

La ecuación 4, es diferencial lineal de grado 2 en derivadas parciales sin solución por métodos analíticos. Se resuelve estableciendo condiciones de frontera para cada caso en particular.

Es importante mencionar que una buena parte de los acuíferos, sobre todo de profundidades mayores a 100 m, reúnen tal complejidad, que su respuesta ante un bombeo no puede ser representada por ningún modelo. En estos casos, no es posible obtener valores de forma cuantitativa, aunque sí se pueden conseguir valiosas conclusiones sobre las causas que provocan este comportamiento.

1.4 Técnicas de monitoreo de agua subterránea

La vigilancia y control de las aguas subterráneas es uno de los primeros pasos que deben plantearse, para establecer medidas relacionadas con la utilización y protección de los recursos hidrogeológicos, para poder abordar los problemas de sobreexplotación y contaminación que afectan cada vez más a los acuíferos en todo el mundo (Domínguez Fernández, 2001).

Como consecuencia de estas necesidades, surgen las "Redes de Control de Aguas Subterráneas" como la herramienta más eficaz en la prevención y tratamiento de los problemas de escasez y contaminación del agua Subterránea, y a su vez genera un mejor conocimiento y gestión de los sistemas hidrogeológicos.

El movimiento del agua en las unidades geológicas está condicionado por la capacidad de realizar trabajo de sus partículas elementales, es decir por su energía. (González de Vallejo et al, 2004).

Esto tiene que ver con la energía potencial, cinética y de presión. El nivel piezométrico es la posición con respecto a una referencia que alcanza el agua cuando dicho punto se libera a la presión atmosférica. El nivel piezométrico corresponde a la suma de la posición de un punto respecto a una referencia y la carga de presión equivalente a la altura que alcanzaría el agua sobre el punto al dejar éste libre a la presión atmosférica.

El agua en la zona saturada se mueve de puntos de mayor nivel piezométrico a puntos de menor nivel piezométrico, de zonas de mayor energía a menor energía.

La medida del nivel piezométrico permite inferir la cantidad de agua, el sentido del flujo y controlar la explotación del acuífero (Domínguez Fernández, 2001).

La importancia de este parámetro y de su medida, ha producido un importante desarrollo tecnológico destinado a la obtención en continuo del nivel piezométrico siendo las soluciones adoptadas diferentes en función del sensor utilizado y del principio físico en el que se basan, (Domínguez-Fernández et al, 2001) los clasifica en 4 grupos:

1. Sensores mecánicos

Los sensores mecánicos consisten en un sistema de flotador y contrapeso que, unidos por un cable, pasan por una polea que gira en función de las oscilaciones del nivel del agua, estos giros pueden ser transformados en señales eléctricas mediante potenciómetros ó codificadores angulares.

2. Sensores de presión

La medida obtenida con estos sensores aprovecha la propiedad de algunos materiales en los que, cuando son sometidos a una corriente eléctrica, se produce una variación en esta debido a la deformación del material por la presión de la columna de agua. De esta forma, la variación de tensión eléctrica es proporcional a la altura de la columna de agua existente sobre el sensor.

Este dispositivo eléctrico es denominado transductor de presión, hablándose de sensores piezoresistivos cuando el material es sílice y de células capacitivas cuando se trata de materiales cerámicos.

3. Medición por burbujeo

Estos sistemas inyectan en el fluido aire comprimido en forma de burbujas a través de un tubo transmisor y utilizando un pequeño compresor interno.

La columna de agua situada sobre el orificio de salida ejerce una presión que es transmitida a un sensor piezoresistivo de presión, de forma que, en este caso, no se mide la presión hidrostática, sino la presión de aire equivalente a esta.

4. Medición por radar o ultrasonidos

Estos dispositivos determinan la profundidad del nivel del agua mediante el uso de ultrasonidos u ondas radar (microondas). Consiste en la medida del tiempo que tarda un pulso de estas ondas en su trayecto desde el emisor al agua, y de éste, de nuevo al emisor al ser reflejado por su superficie; esta medida permite determinar la distancia a la que se halla el agua con respecto del sensor.

Los ultrasonidos tienen el inconveniente de que su velocidad de transmisión varía con la temperatura y, aunque se han adoptado diversas soluciones al respecto, el radar, que carece de este problema, es más utilizado. Sin embargo no se usa en pozos debido a las importantes reflexiones que producirán las paredes del sondeo.

Los datos usados para construir mapas de nivel piezométrico son elevaciones del nivel de agua medidas en algunos pozos habilitados en la zona de estudio (Espinoza-C, 2003).

Estos mapas se pueden mostrar como curvas de nivel o contornos, así como en perspectiva representando un mapa de tres dimensiones.

CAPÍTULO II

Metodología de Instrumentación

2.1 Tipos de Pozos de Monitoreo.

En este estudio se distinguen dos tipos de pozos según el nivel de monitoreo: pozos "testigo" y pozos "piloto".

Los pozos instrumentados catalogados como pozos "testigo" (Carreón-Freyre et al, 2009) en este estudio, son pozos fuera de servicio que durante un determinado tiempo funcionaron como pozos de extracción de agua y debido a diferentes causas (poco gasto, colapso, presencia de algún agente contaminante, abatimiento notable lo que hace incosteable su aprovechamiento) son deshabilitados. Cabe resaltar que debido a las características técnicas de los sensores no es factible instrumentar pozos en operación pues el cable de acero que sostiene los sensores se enreda fácilmente con la columna de bombeo y cable submarino que alimenta a la bomba de electricidad y además la lectura correspondería a un nivel dinámico.

Dentro de los pozos fuera de operación se escogieron 7 que cumplieran con las siguientes características (Tabla 2):

- disponibilidad
- representativos de cada zona
- presencia de agua (puesto que existen pozos secos)
- sin equipo de bombeo
- accesibilidad

La Comisión Nacional del Agua en conjunto con la Comisión estatal de Agua de Querétaro establecen un periodo anual de medición de piezometría en (equipados o no) y estos serán catalogados como pozos "Piloto", la dinámica consiste en medir con una sonda eléctrica el nivel piezométrico de cada pozo para conocer su evolución en el tiempo, esta medición resulta difícil ya que al contar con equipo de bombeo tipo sumergible la tubería de columna y el cable submarino dificultan el acceso de la sonda eléctrica, por lo cual no es factible colocar sensores al igual que en los pozos "testigo" ya que se corre el riesgo de perderlos al quedar atorados con la tubería y el cable submarino y sería necesario extraer la tubería de descarga para su recuperación.

Tabla 2, Pozos testigo las coordenadas están dadas en UTM Zona 14 y datum Nad 27, la altitud es estimada con GPS.

Pozo	Coordenadas	Nivel estático a la fecha mayo 2007 (m)	Altitud estimada (msnm)	Unidad hidroestratigráficas de la cual se supone se extrajo el agua
San Pedro Martir IV	0347465E 2280995N	167	1850	Tmm AB
Tangano II	0359388E 2273156N	234.69	2022	Tmt AB
Colinas del Bosque	0351727E 2270729N	65.55	1838	
Loma Bonita	0349811E 2284852N	62.82	1822	Tmt AB
Mompani II	0345575E 2289043N	65.8	1949	TeCgR
Tecnológico	0352023E 2278358N	132.30	1841	Tmm AB
CEA Menchaca	0352500E 2277300N	130.1	1815	Tmt AB
Reforma Agraria	0353837E 2272294N	230	1910	Tmt AB

2.2 Características Técnicas de los sensores.

Los sensores utilizados en el proyecto son los llamados 'sensor', adquiridos con Schlumberger, Water Services.

Esta sensor esta diseñada para medir nivel temperatura en aguas subterráneas y superficiales. El sensor esta disponible en dos modelos: el LT y el CLT. El LT mide temperatura y nivel. El CLT mide temperatura, nivel y conductividad. El sensor se puede programar con una computadora de escritorio o portátil a través de un lector óptico el cual se conecta a la computadora. El lector óptico se comunica con el sensor por vía infrarroja y se conecta a la PC al puerto serial con un conector tipo RS232.

La medición del nivel se realiza a través de un transductor cerámico, el cual ofrece lecturas confiables y consistentes. El sensor mide presión total o absoluta. Cuando trabaja fuera del agua, el instrumento registra mediciones de presión atmosférica y cuando esta sumergido el instrumento registra la presión del agua más la atmosférica expresada en equivalente de columna de agua, por lo cual es necesario una compensación, esta se puede hacer de 3 formas:

1. Uso del baro (barómetro del mismo fabricante de sensor)
2. Recopilación de datos de presión atmosférica de alguna estación meteorológica cercana.
3. Uso de otro sensor por arriba del nivel estático del pozo.

Teniendo estos datos se realiza la resta de los valores y se obtiene el nivel efectivo del sensor hasta el espejo del agua como se muestra en la figura 11.

Lectura arrojada por el sensor:

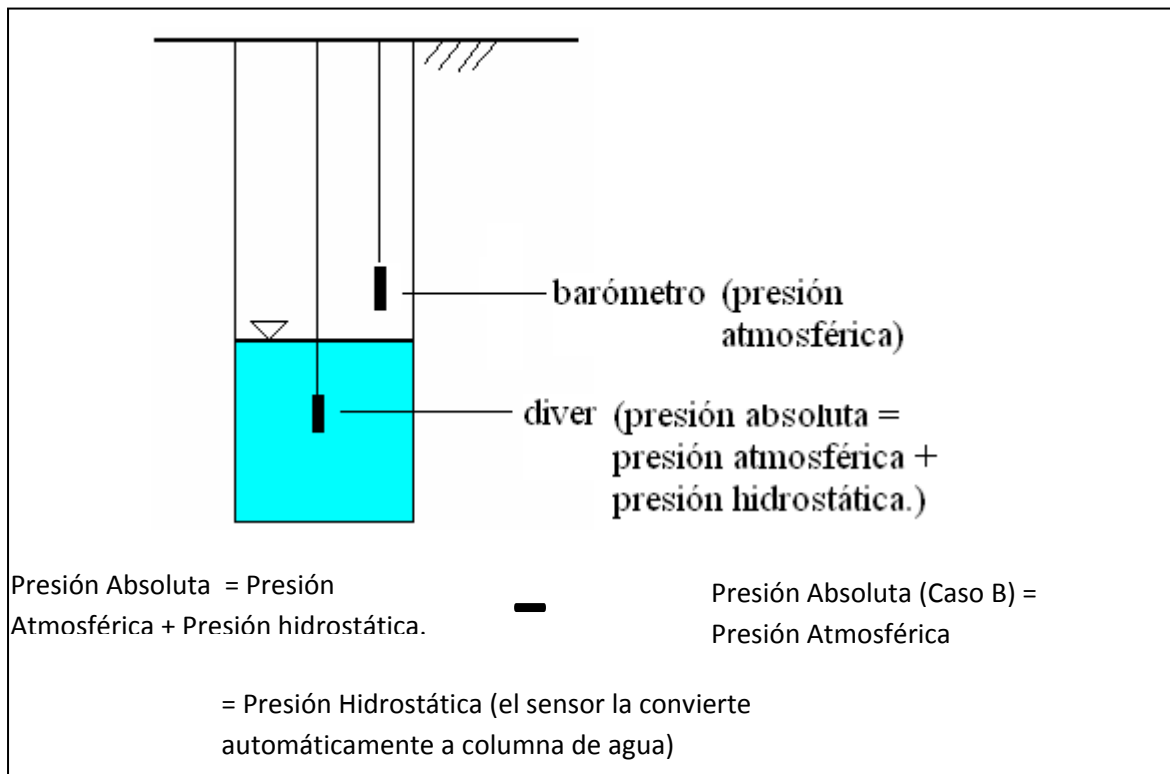


Figura 11. Se muestra el esquema de instalación de sensor y baro.

2.3 Programación de los sensores

El sensor se programa mediante el uso de un software proporcionado por el fabricante, es importante mencionar que el sensor se debe programar correctamente para la obtención de datos verdaderos, debido a que el sensor registra presión absoluta y efectúa una compensación automática de altitud, por ello es indispensable conocer la altitud aproximada del pozo a monitorear así como su nivel estático, por ejemplo se tiene una altitud de 1900msnm de brocal pero el nivel estático es de 250mts, el valor estimado de altitud con el cual se programará el sensor es de 1650msnm, pues el sensor será colocado sumergido. Otro dato importante de alimentar es el rango (valor de fluctuación del nivel piezométrico), cada instrumento según sus propias características tiene un rango según tabla 3 y 4.

Tipo LT (Nivel y Temperatura)

Modelo	RANGO (m)
M5	4
M10	9
M20	19
M30	29
M100	99

Tabla 3 Modelos y rangos para diver tipo LT.

Tipo CLT (Conductividad, Nivel y temperatura)

Modelo	RANGO (m)
M10	9
M30	29
M100	99

Tabla 4 Modelos y rangos para diver tipo CLT.

El rango debe ser considerado antes de adquirir los sensores, la variación de los niveles piezométricos y la exactitud que se requiera determinara el rango. En primera instancia se optaría por el mayor rango, para evitar saturar el máximo nivel a medir, al aumentar el rango aumenta el error en el instrumento que según el fabricante es de 1%.

Ejemplo:

El modelo M10 solo puede registrar variaciones máximas de 9m, si el nivel piezométrico sobrepasa el rango el sensor solo registrara el máximo rango 9m, o al contrario si el nivel baja el sensor queda fuera del agua este registrara variaciones de presión atmosférica y no variaciones de nivel piezométrico figura 12.

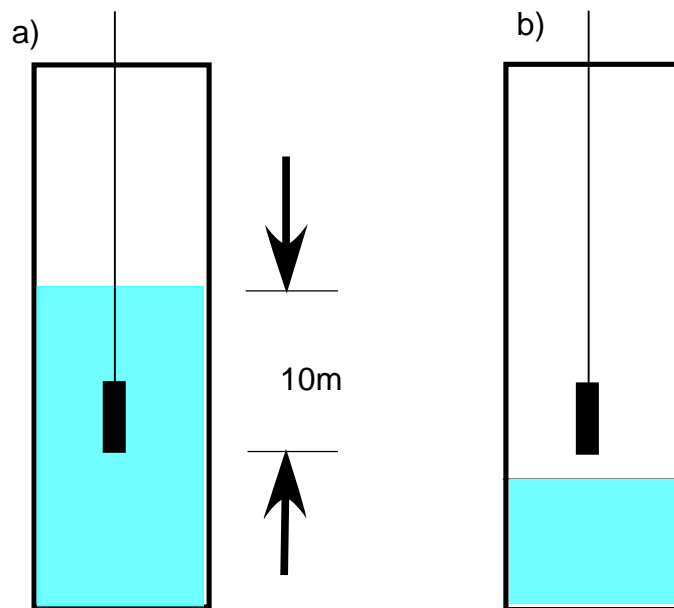


Figura 12. Se muestra el sensor modelo M10, operando fuera de rango en el caso a) el sensor registrara el máximo valor según su rango en este caso 9m, el caso b) registrara variaciones de presión atmosférica.

Otro punto importante es considerar el valor de presión atmosférica, este varía con la altitud y las condiciones climáticas pero típicamente se encuentra en un rango de 61cm a 107cm, al colocar el sensor en suspensión libre es decir colgado con un alambre se debe sumar este valor a la variación de columna de agua, ejemplo se coloca un sensor M10 con rango total de 9m sumergido 7m, en realidad el sensor registrará la suma de columna de agua mas el equivalente en presión atmosférica. Hay que garantizar que en todo momento el sensor se encuentre en su rango de medición para obtener mediciones reales.

El software cuenta con tres opciones para establecer el periodo de muestreo, y son:

1. Fijo: Como su nombre lo indica se asigna el intervalo de tiempo deseado, desde una medición cada medio segundo y hasta una medición cada 99hrs.
2. Evento: es la manera mas eficiente de muestreo, el sensor se activara en el intervalo de tiempo fijado para verificar si el nivel ha sufrido cambios dentro de los porcentajes seleccionados entre (0.1% a 25% de la escala total) desde la medición inmediatamente anterior a cuando ocurrió el último cambio. El sensor solo registrara una medición si el cambio especificado ha sucedido o cada 250 mediciones del intervalo del tiempo fijado.
3. Logarítmico: ofrece 3 rangos diferentes basados en recolección de mediciones en intervalos esparcidos en forma logarítmica.

Rango A: comprende un periodo total de 25.8hrs.

Rango B: comprende un periodo total de 157.7hrs.

Rango C: comprende un periodo total de 297 días.

Cada rango tiene varios niveles de intervalos (tabla 5) empezando con una rápida obtención de mediciones al comienzo del régimen (Rango A), luego pasando a un régimen mediano (Rango B) y finalmente a intervalos largos (Rango C), tal y como lo muestra la Tabla 5.

Tabla 5. Diferentes rangos de programación del sensor.

Tiempo (min)	Rango A		Rango B		Rango C	
	Intervalo	Lecturas	Intervalo	Lecturas	Intervalo	Lecturas
0-10	0,5 seg	1200	1 seg	600	5 seg	120
10-100	1 seg	5400	5 seg	1080	20 seg	270
100-1550	5 seg	17400				
100-1000			10 seg	5400	1min	900
1000-9460			30 seg	16920		
1000-10000					5min	1800
10000-428200					20min	20910
Lecturas Totales	~25,8 hrs	24000	~157,7hrs	24000	~297 días	24000

Al programar el rango de muestreo se debe considerar que el sensor tiene una capacidad total de 24000 mediciones, al terminarse la memoria el sensor deja de registrar datos, pero quedan almacenados los ya tomados.

Un intervalo fijo de 0.5 seg nos dará un muestreo total de 3hrs con 20min, mas sin en cambio un muestreo de fijo de 99hrs nos da un muestreo total de 271 años lo cual no es posible debido a que la batería del sensor dura aprox. 10 años.

Según las necesidades específicas de muestreo se programará el sensor; en nuestro proyecto se programaron con intervalo fijo cada hora, esto es para tener una uniformidad en los resultados, otra ventaja de el uso del intervalo fijo cada hora en todos los sensores es la fácil compensación por presión barométrica, pues el barómetro se programa a su vez una medición cada hora y al coincidir los intervalos de tiempo, se facilita el trabajar con los datos. Es recomendable manejar el mismo tiempo en todos los sensores, puesto que cada sensor tiene su reloj interno y lo ideal es programarlos con la misma PC, y hacer coincidir con el tiempo interno de la PC.

El software permite dos opciones de puestas en marcha:

1. En el momento (Start): se activa en el instante de presionar el icono, y empieza a medir conforme al intervalo de muestreo programado
2. Futura puesta en Marcha: se le indica la hora, día y año que empezará a medir. En el desarrollo del proyecto se uso esta opción para eliminar en lo posible las mediciones fuera del agua y manejar horas exactas sin la presencia de minutos y segundos, es decir 16/mayo/07, 04:00:00 pm en lugar de 16/mayo/07, 04:35:05 pm.

2.4 Instalación de Sensores

Una vez instalados los sensores se deben programar los sensor y a colocar (Figura 13), primero se observa físicamente el estado del pozo el acceso, los alrededores y las adecuaciones que se deben realizar para la instrumentación del mismo. Los pozos se encontraban tapados con placa de acero soldadas al ademe por lo cual fue necesario el apoyo de la CEAQ con su equipo de soldadores y se resolvió por practicidad y seguridad la instalación de cerraduras de alta seguridad para garantizar el bienestar del pozo y acuífero.

Se diseñó una puerta de acero con bisagras y tapa, lo cual nos permite un acceso seguro y rápido al pozo y sensor evitando depender de un soldador cada vez que sea necesario verificar los instrumentos y el vaciado de información.



Figura 13. a) Instalación de puerta y cerradura al ademe del pozo, b) Instalación del sensor sostenido con cable acerado de 1/8".

Se midió el nivel estático del pozo con una sonda eléctrica de nivel: su principio de funcionamiento es utilizar al agua como medio transmisor de electricidad, como sabemos el agua en función del contenido de sólidos disueltos tiene cierta conductividad eléctrica, esta propiedad se aprovecha para cerrar el circuito, se tiene una fuente de poder en este caso una pila AA de 1.5 volts de 1500mA y se tiene conectado un amperímetro para medir la intensidad de corriente, al tocar las dos puntas del cable el agua se cierra el circuito.

La sonda esta medida cada cierta unidad de longitud, en nuestro caso 5 m, y así se obtiene el nivel estático del agua subterránea, conforme se muestra en la figura 14.

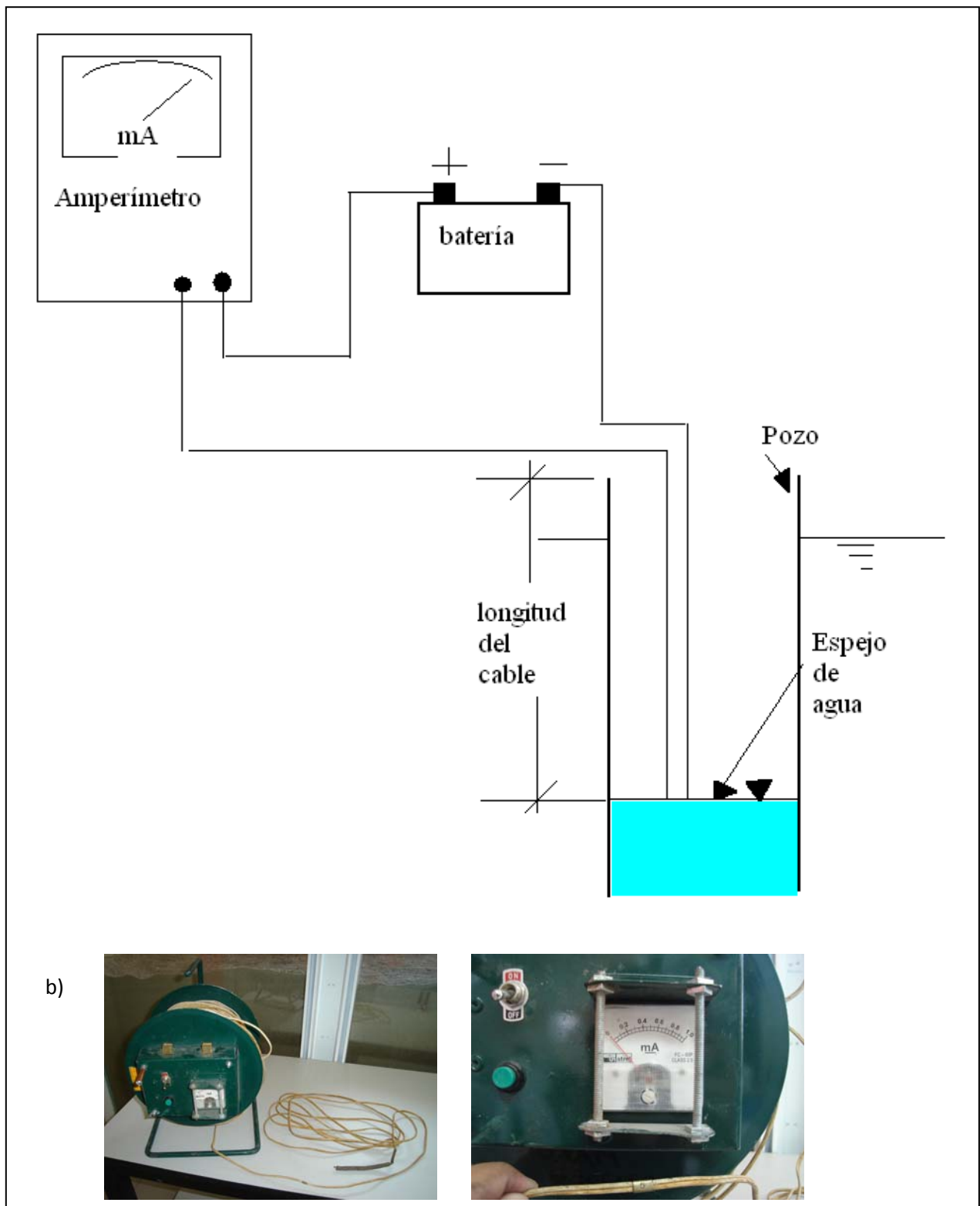


Figura 14. a) Esquema de funcionamiento de la sonda eléctrica b) Vista de la sonda eléctrica

Una vez medido el nivel piezométrico se sumergió el sensor 10 m y se programo en eventos fijo cada hora, lo cual nos da un tiempo de medición de 500 días. Se estableció bajar la información del sensor 3 veces por año para garantizar en todo momento la sumergencia.

Existe un dispositivo del fabricante llamado *direct reader cable* (Figura 15), el cual es un cable con fibra óptica para obtener la información sin necesidad de retirar la sonda del pozo y además poder obtener lecturas en tiempo real, muy útil para la medición de nivel estático y pruebas de bombeo, a continuación se muestra un esquema del funcionamiento.

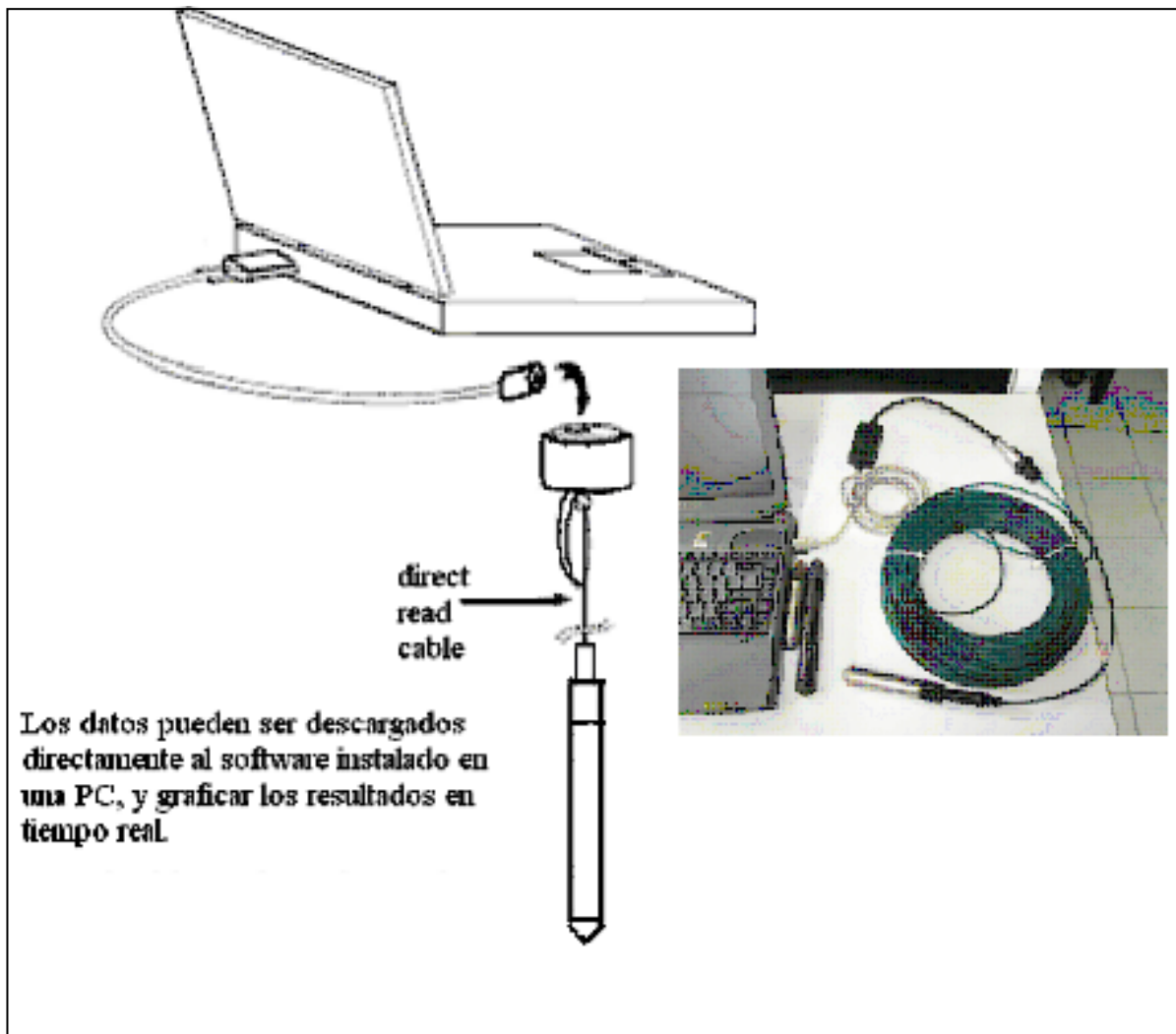


Figura 15. Cable de lectura directa, "direct read cable" (Schulumberger, 2006),

En la figura 16 se observan los dispositivos necesarios para operar el sensor (Schulumberger, 2006). El Lector óptico permite programar al sensor y obtener los datos tomados, se conecta a la PC por medio del puerto serial tipo RS232.



Figura 16. Dispositivos de operación del sensor (Schulumberger, 2006), a) Sensor sin tapa se observan los sensores ópticos al interior del sensor, b) Lector óptico y sensores, c) Equipo completo (PC Portátil, Lector óptico y sensores).

CAPÍTULO III

Evolución Piezométrica

3.1 Evolución Piezométrica 1970-2002.

Se ha comprobado que el acuífero del Valle de Querétaro actualmente explotado, es un sistema acuífero multicapa (Carreón-Freyre et al, 2005), donde interactúan los 3 tipos de Flujos (Regional, Intermedio y Local) predominando un flujo intermedio (Perez-Villareal, 2008) donde las condiciones estructurales del medio (Fallas y Fracturas) y las características litológicas definen el comportamiento hidrodinámico del acuífero.

En la figura 17 se observa el abatimiento acumulado de 1970 a 2002 del acuífero del Valle de Querétaro. Se observan zonas de alto gradiente hidráulico, así como zonas de comportamiento homogéneo, sin embargo el descenso de nivel piezométrico ha sido diferencial.

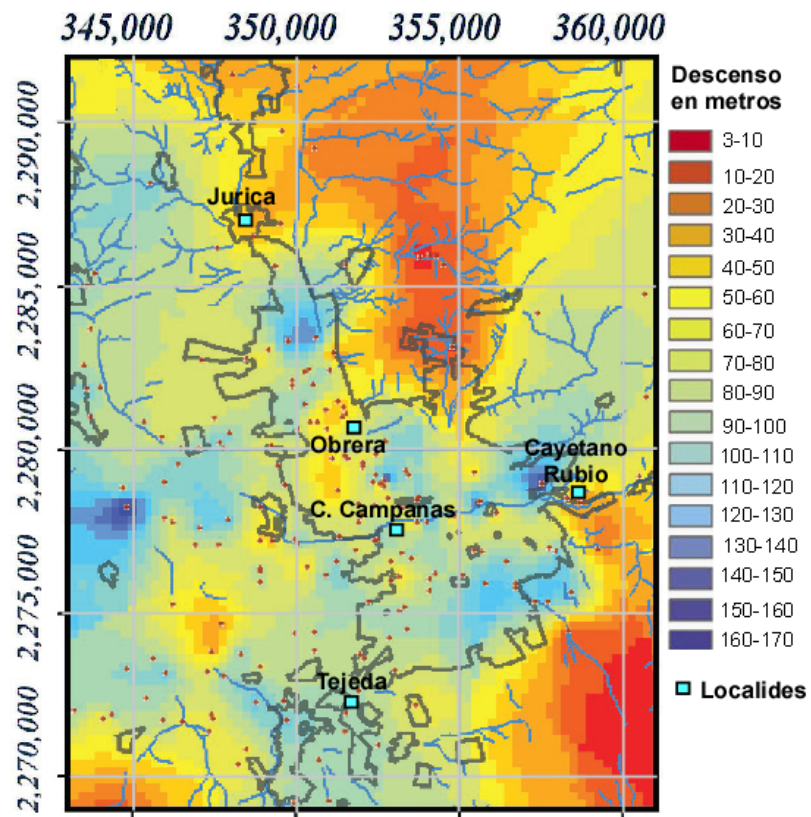


Figura 17. Abatimiento acumulado para el intervalo entre 1970 y 2002. Los polígonos sólidos muestran las zonas urbanas. (Modificado Carreón-Freyre et al., 2005).

La tendencia general de abatimiento de nivel piezométrico de 1970 a 2002 tiene un comportamiento lineal descendente, y presenta un abatimiento de 3.6m/año (Carreón-Freyre et al, 2005), aunque el rango de variación es de 2 a 6.6 m/año. El mapa de Isolíneas (figura 18) es resultado de la interpolación lineal de datos de piezometría para el período 1990 y 2002, (se considera un medio homogéneo).

Uno de los resultados al analizar el mapa de isolíneas (Figura 18) es la inferencia del sentido de flujo del agua subterránea, que es preferentemente del NE y NW hacia el centro del Valle.

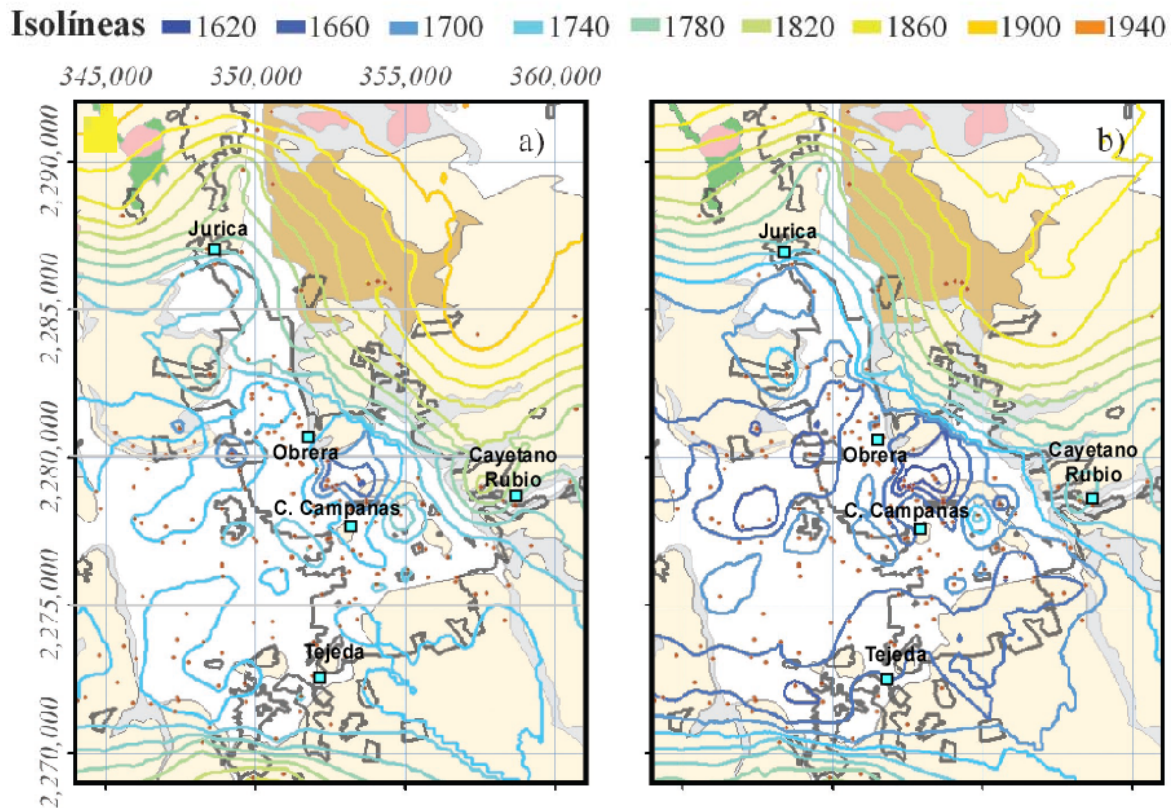


Figura 18. Evolución piezométrica considerando un modelo lineal para un medio homogéneo para los años de (a) 1990 y (b) 2002, Los polígonos sólidos muestran las zonas urbanas. Las coordenadas en se muestran sólo en la Figura 18a, UTM región 14Q (Modificado Carreón-Freyre et al, 2005)

3.2 Evolución Piezométrica de 2003 a 2007

La evolución piezométrica para los años 2003 a 2007, muestra un comportamiento lineal descendente, con un abatimiento promedio de 3.3 m/año, aunque el rango de variación es 0.5 a 7.5 (m/año), los datos de piezometría fueron proporcionados por la CEAQ para los años 2003 a 2007.

Para una mejor visualización de los datos los pozos se separaron en 5 grupos según el rango de variación en elevación en msnm (Tabla 6); el grupo 5 son pozos que muestran un comportamiento variable de ascenso y descenso. Este comportamiento puede deberse a 3 principales factores: el pozo fue retirado de operación como es el caso de los pozos 1973 y 1978, o nunca ha sido operado como el pozo 1707 ó una deficiente medición en la campaña de piezometría correspondiente.

La evolución piezométrica de los 5 grupos se observan en las figuras 19, 20, 21, 22 y 23.

Tabla 6. Grupos de pozos de la red piezométrica del Valle de Querétaro, separados por su intervalo de variación de brocal.

Grupo	Variación de Nivel Piezométrico (msnm)
1	1650-1710
2	1710-1770
3	1770-1830
4	1840-1910
5	1620-1780 Niveles ascendentes y descendentes.

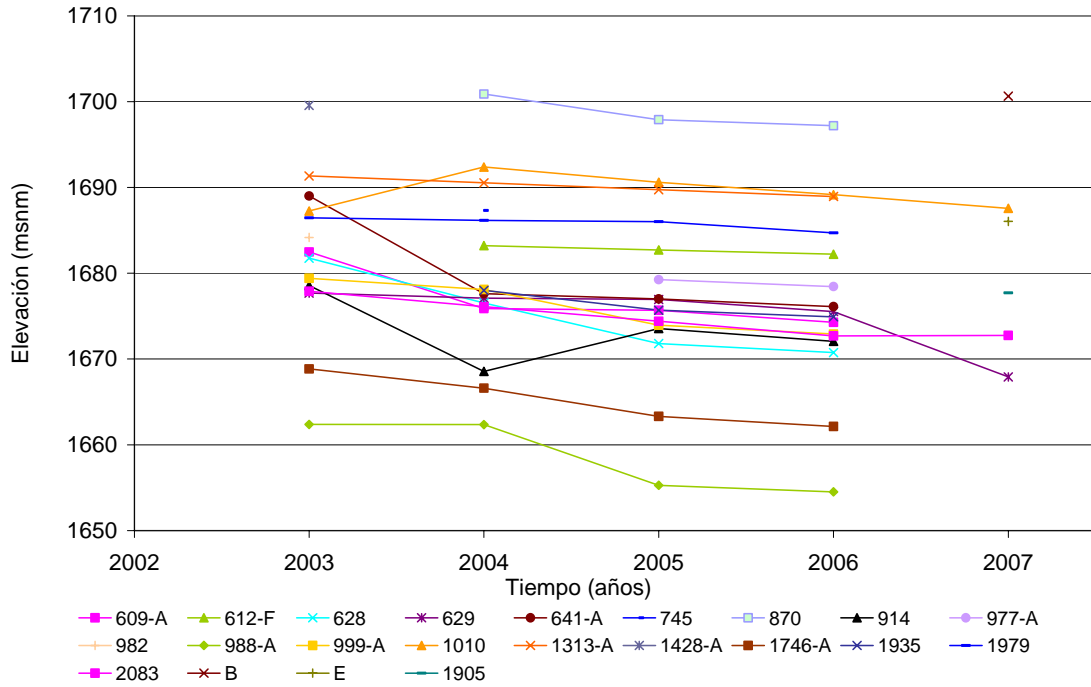


Figura 19. Grupo 1 de Pozos con variación de nivel de 1650 a 1710 msnm. Evolución Piezométrica del año 2003 a 2007

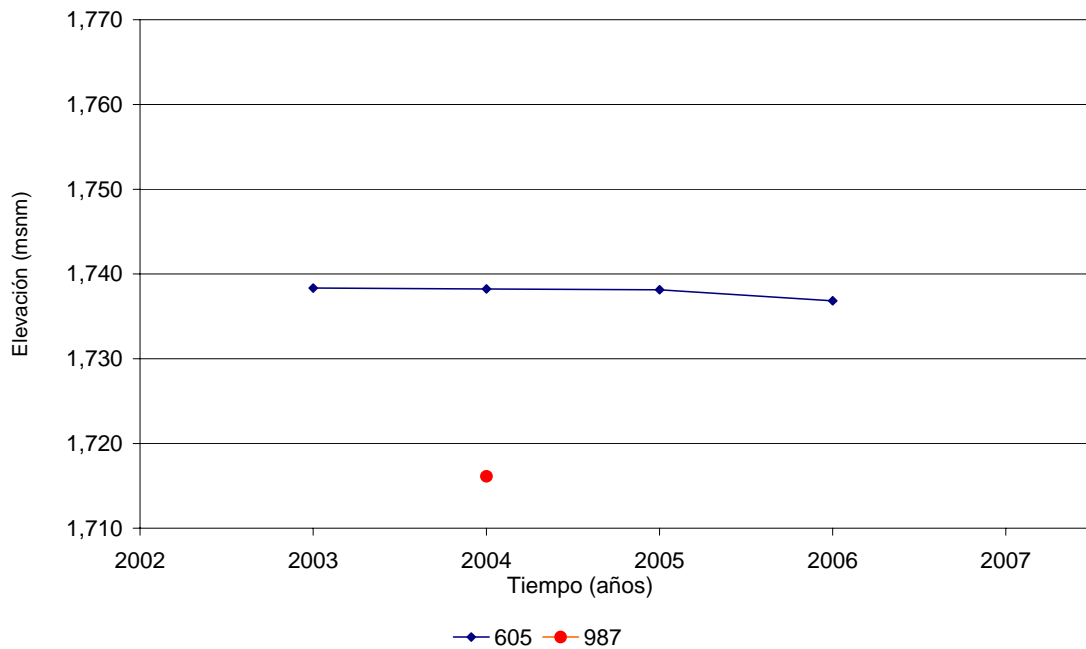


Figura 20. Grupo 2 de Pozos con variación de nivel de 1710 a 1770 msnm. Evolución Piezométrica del año 2003 a 2007

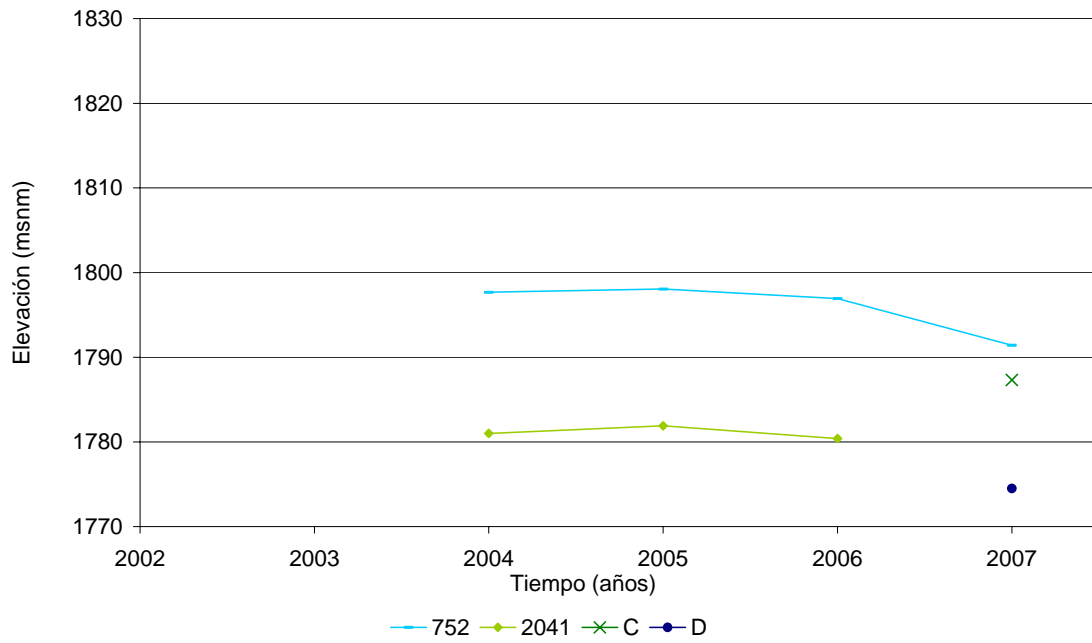


Figura 21. Grupo 3 de Pozos con variación de nivel de 1770 a 1830 msnm. Evolución Piezométrica del año 2003 a 2007

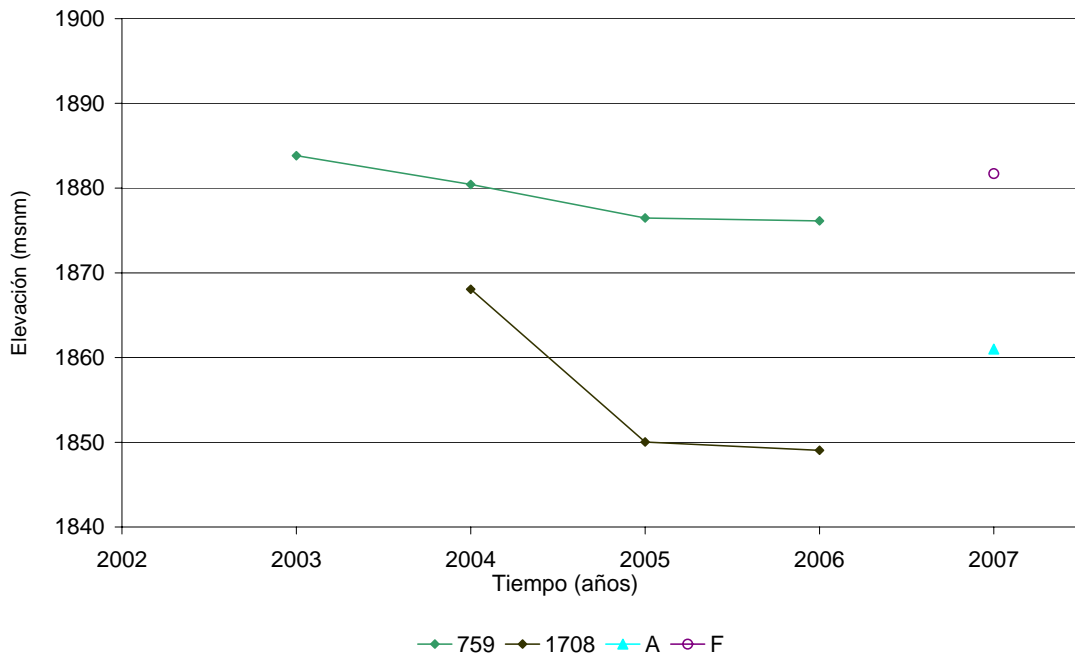


Figura 22. Grupo 4 de Pozos con variación de nivel de 1650 a 1710 msnm. Evolución Piezométrica del año 2003 a 2007

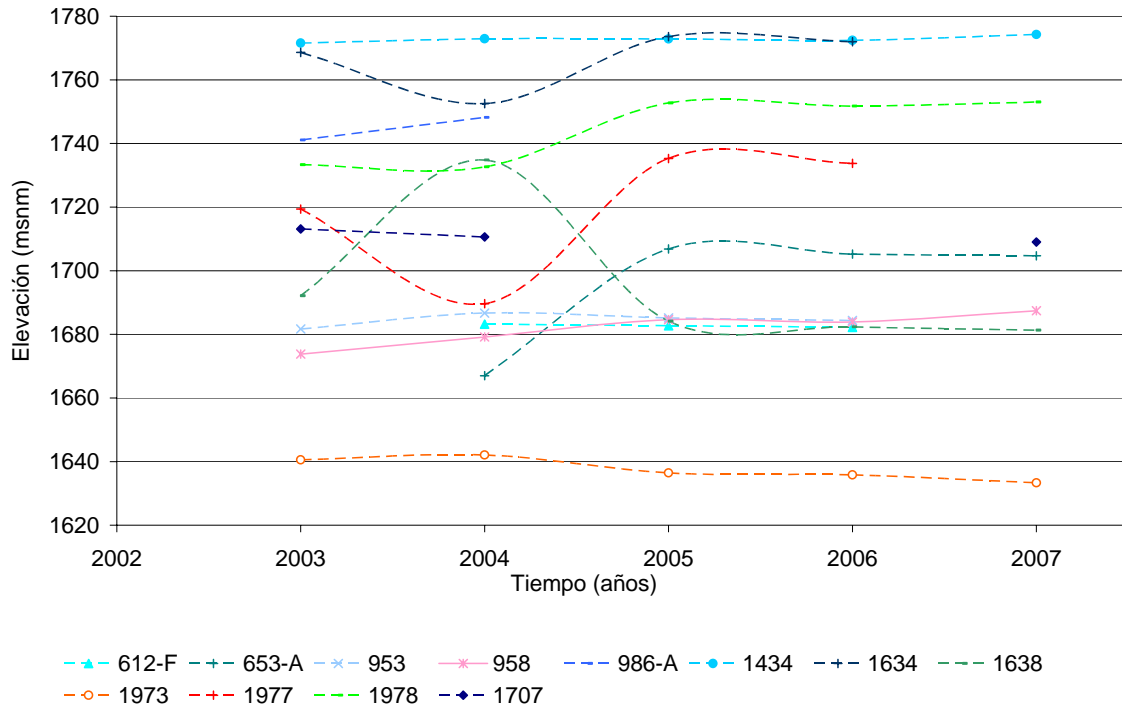


Figura 23. Grupo 5 de Pozos con variación de nivel de 1620 a 1780 msnm. Evolución Piezométrica del año 2003 a 2007, el comportamiento de estos 12 pozos es variable con ascensos y descensos.

Las tablas 7 y 8 muestran los valores de piezometría proporcionada por la CEAQ, los datos con sombreado fueron omitidos para la interpolación y elaboración de mapas de Isolíneas presentados en la figuras 20 y 21, ya que están fuera de un rango razonable de variación y modifican de manera notable la distribución de las Isolíneas dentro del área de Interpolación. La Tabla 8, muestra la piezometría de los pozos ahora "testigo", que para los pozos 977-A, 1707, 1905, 1973, 1978, 1979 y 2083 antes se utilizaron como pozos "piloto".

Tanto en la Tabla 7 y 8, hay datos faltantes señalados con (-), estos datos no se lograron tomar en su campaña de piezometría respectiva.

Existen dos razones principales por las cuales no se tomaron las lecturas:: el pozo fue deshabilitado y tapado por sus propietarios ó se tuvieron dificultades técnicas para bajar la sonda eléctrica al interferir con la tubería de la bomba y/o cable submarino.

Para los pozos testigo se eliminan estas dos dificultades; se tiene libre acceso y el equipamiento del pozo fue retirado ó nunca se instaló.

Capítulo III. "Monitoreo de la Evolución Piezométrica del Sistema Acuífero del Valle de Querétaro"

Tabla 7 Piezometría en Pozos Piloto para los años 2003 a 2007, los datos sombreados fueron omitidos para la elaboración del mapa de isolíneas de las Figuras 17 y 18.

No. C.N.A	NOMBRE DEL POZO	COORDENADAS		ELEVACION DE BROCAL M.S.N.M	NIVEL ESTATICO DIC. 2003	NIVEL ESTATICO DIC. 2004	NIVEL ESTATICO DIC. 2005	NIVEL ESTATICO DIC. 2006	NIVEL ESTATICO NOV. 2007
		LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE						
Pozos Piloto									
					2003	2004	2005	2006	2007
605	RANCHO. STA. MA. RETABLO	348899	2275968	1,801.13	1,738.33	1,738.23	1,738.13	1,736.83	-
609-A	RANCHO EL RINCON	345355	2280898	1,806.28	1,682.48	1,675.88	1,675.68	1,674.28	-
612-F	RANCHO LA COLMENA	344682	2278851	1,803.72	-	1,683.22	1,682.72	1,682.22	-
628	RANCHO VANEGAS	350387	2273837	1,805.25	1,681.75	1,676.55	1,671.80	1,670.75	-
629	EL CERRITO FRACC. 2	348670	2273801	1,807.54	1,677.69	1,677.09	1,676.94	1,675.54	1667.92
641-A	CEA TEJEDA	351897	2272630	1,809.01	1,689.01	1,677.61	1,677.01	1,676.11	-
653-A	EJIDO STA. VIRGINIA	349969	2274204	1,803.54	-	1,666.97	1,706.84	1,705.24	1704.70
745	COLEGIO FRAY LUIS	353630	2276694	1,813.83	-	1,687.33	-	-	-
752	ALBERCA LETICIA	358235	2278528	1,840.13	-	1,797.68	1,798	1,796.93	1,791.41
759	EJIDO EL NABO	347009	2292308	1,950.33	1,883.83	1,880.43	1,876.48	1,876.13	-
870	FABRICA STA. MA.	352799	2278543	1,809.90	-	1,700.90	1,697.90	1,697.20	-
914	CEA CAPILLA 1	350830	2276190	1,803.06	1,678.56	1,668.56	1,673.56	1,672.06	-
953	SINGER MEXICA No. 2	352645	2278900	1,807.69	1,681.69	1,686.69	1,685.19	1,684.39	-
958	CARNATION No. 2	352672	2279083	1,807.85	1,673.75	1,679.19	1,684.62	1,683.85	1687.40
982	RANCHO LAS ADJUNTAS	344823	2278284	1,798.97	1,684.17	-	-	-	-
986-A	CEA CANADA No. 1-B	361673	2279168	1,800.00	1,741.10	1,748.20	-	-	-
987	INSTITUTO SAN JAVIER	356080	2278087	1,824.62	-	1,716.12	-	-	-
988-A	CEA EXPOSITOR No. 2-B	356610	2275883	1,818.00	1,662.37	1,662.35	1,655.28	1,654.50	-
999-A	EJIDO EL ROMERAL	343223	2272053	1,829.11	1,679.41	1,678.11	1,673.94	1,672.91	-
1010	UNIROYAL No. 2	351497	2281098	1,805.07	1,687.27	1,692.39	1,690.62	1,689.17	1687.57
1313-A	RANCHO EL ROSARIO	346401	2279590	1,799.25	1,691.35	1,690.55	1,689.75	1,688.95	-
1428-A	BLACK-DECKER S.A.	349751	2283394	1,812.77	1,699.57	-	-	-	-
1434	BACHOCO	351110	2282950	1,813.73	1,771.53	1,772.88	1,772.83	1,772.43	1774.23
1634	EJIDO JURICA	349510	2286920	1,850.00	1,768.60	1,752.50	1,773.56	1,772.00	-
1638	VIDRIERA QRO. NORTE	351547	2279746	1,804.32	1,692.12	1,734.77	1,684.12	1,682.32	1681.32
1708	RANCHO SAN PEDRITO	353113	2286168	1,896.06	-	1,868.06	1,850.04	1,849.06	-
1746-A	CEA EL PUEBLITO 2-A	349621	2272344	1,805.00	1,668.85	1,666.60	1,663.32	1,662.14	-
1935	EJIDO LOS ANGELES	345429	2273386	1,837.70	1,737.65	1,678.01	1,675.70	1,674.91	-
1963	RANCHO SAN PEDRITO	353745	2285875	1,882.01	1,815.81	1,860.44	1,860.11	1,859.01	1852.97
1977	RANCHO JAN	347109	2277110	1,799.44	1,719.335	1,689.64	1,735.30	1,733.74	-
2041	A.P. EL NABO	345500	2288150	1,899.90	-	1,781.00	1,781.90	1,780.40	-

Tabla 8. Piezometría en Pozos Piloto para los años 2003 a 2007, los datos sombreados fueron omitidos para la elaboración del mapa de isolíneas de las Figuras 17 y 18.

No. C.N.A	NOMBRE DEL POZO	COORDENADAS		ELEVACION DE BROCAL M.S.N.M	NIVEL ESTATICO DIC. 2003	NIVEL ESTATICO DIC. 2004	NIVEL ESTATICO DIC. 2005	NIVEL ESTATICO DIC. 2006	NIVEL ESTATICO NOV. 2007
		LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE						
Pozos Testigo									
A	ZONA NORTE 2 POZO 3	355207	2285232	1,941.00	-	-	-	-	1861.00
B	INDUSTRIAL II	351772	2280580	1,816.00	-	-	-	-	1700.65
C	TANGANO	359388	2273156	2,022.00	-	-	-	-	1787.31
D	COLINAS DEL BOSQUE	355320	2270729	1,838.00	-	-	-	-	1774.50
E	MOMPANI II	345575	2289043	1,949.00	-	-	-	-	1881.70
F	JURICA MEZQUITES	348777	2286181	1,830.00	-	-	-	-	1715.90
977-A	TECNOLOGICO	351910	2278340	1,810.75	-	-	1,679.25	1,678.45	1674.00
1707	CEA GARAMBULLO No. 2	348852	2283153	1,850.00	1713.12	1,710.60	1,740.42	1,737.70	-
1905	A.P. REFORMA AGRARIA	353700	2272250	1,900.00	1655.80	1,654.00	1,671.09	1,670.00	1667.71
1973	CEA SAN PEDRO MARTIR IV	347750	2281000	1,800.35	1640.55	1,642.10	1,636.45	1,635.85	1633.35
1978	CEA LOMA BONITA	349800	2284810	1,816.52	1733.32	1,732.62	1,752.72	1,751.72	1753.02
1979	CEA MENCHACA	352500	2277300	1,808.62	1686.47	1,686.17	1,686.02	1,684.72	1686.05
2083	STA. MA. MAGDALENA III	346893	2279232	1,799.50	1677.90	1,676.10	1,674.40	1,672.70	1672.75

En la figura 23 se presenta el mapa de isolíneas obtenido de la interpolación de datos de piezometría en pozos piloto y testigo con los datos de piezometría de las tablas 7 y 8, mediante el método estadístico no lineal "Kriging" (Cressie, 1990) con el uso del software: "Surfer, Versión 8.0" (Golden Software, Inc. 2002). La simbología que corresponde a la figura 23 se muestra en la figura 24.

Capítulo III. "Monitoreo de la Evolución Piezométrica del Sistema Acuífero del Valle de Querétaro"

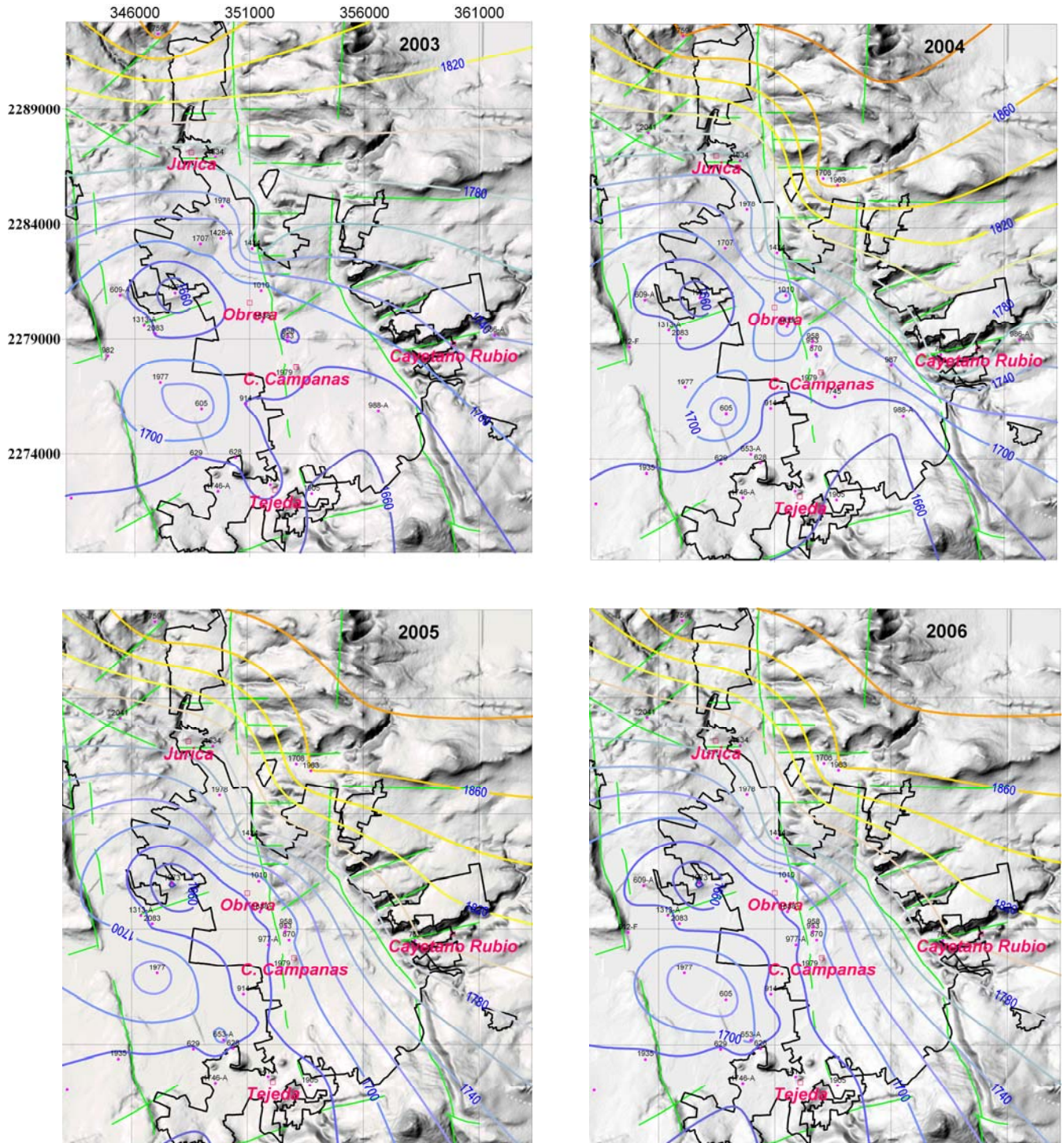


Figura 23. Evolución piezométrica considerando un modelo no lineal para un medio homogéneo para los años 2003, 2004, 2005, 2006. Las coordenadas están expresadas en UTM, Zona 14 y datum NAD 27, las coordenadas solo se muestran en el mapa de isólinas de 2003.

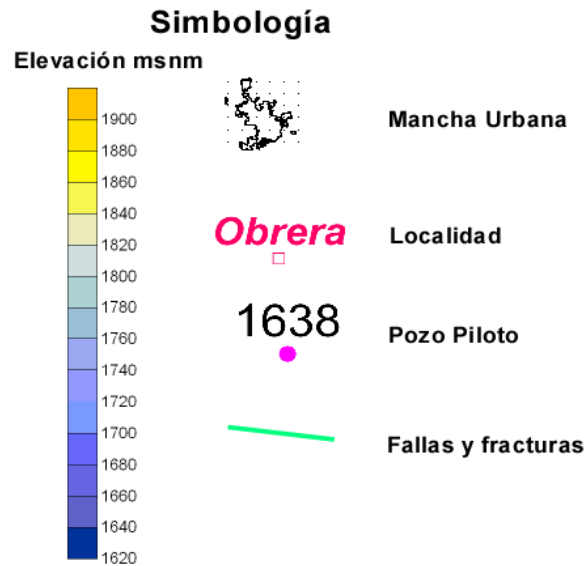


Figura 24. Simbología correspondiente a los mapas de la figura 20.

Teniendo como base la superficie generada a través de la interpolación de datos piezométricos se realizan secciones que permitan inferir los efectos de los rasgos estructurales y litología en el comportamiento del flujo subterráneo.

Se seleccionaron dos secciones que en su mayoría pasan por los pozos "testigo", con el objetivo de ubicarlos en la superficie de interpolación y observar la representatividad de un dato puntual en el universo de los datos obtenidos con la instrumentación de pozos en tiempo "real",

Para observar el efecto de la topografía en el comportamiento del flujo subterráneo se genero el mapa de elevaciones de terreno (figura 25) obtenido con Surfer ((Golden Software, 2005), con datos de Topografía del Centro de elevaciones Mexicano del INEGI.

Los datos del INEGI se encuentran en código binario hay que trabajar con ellos y cambiarlos a código ASCII y después exportalos a Surfer.

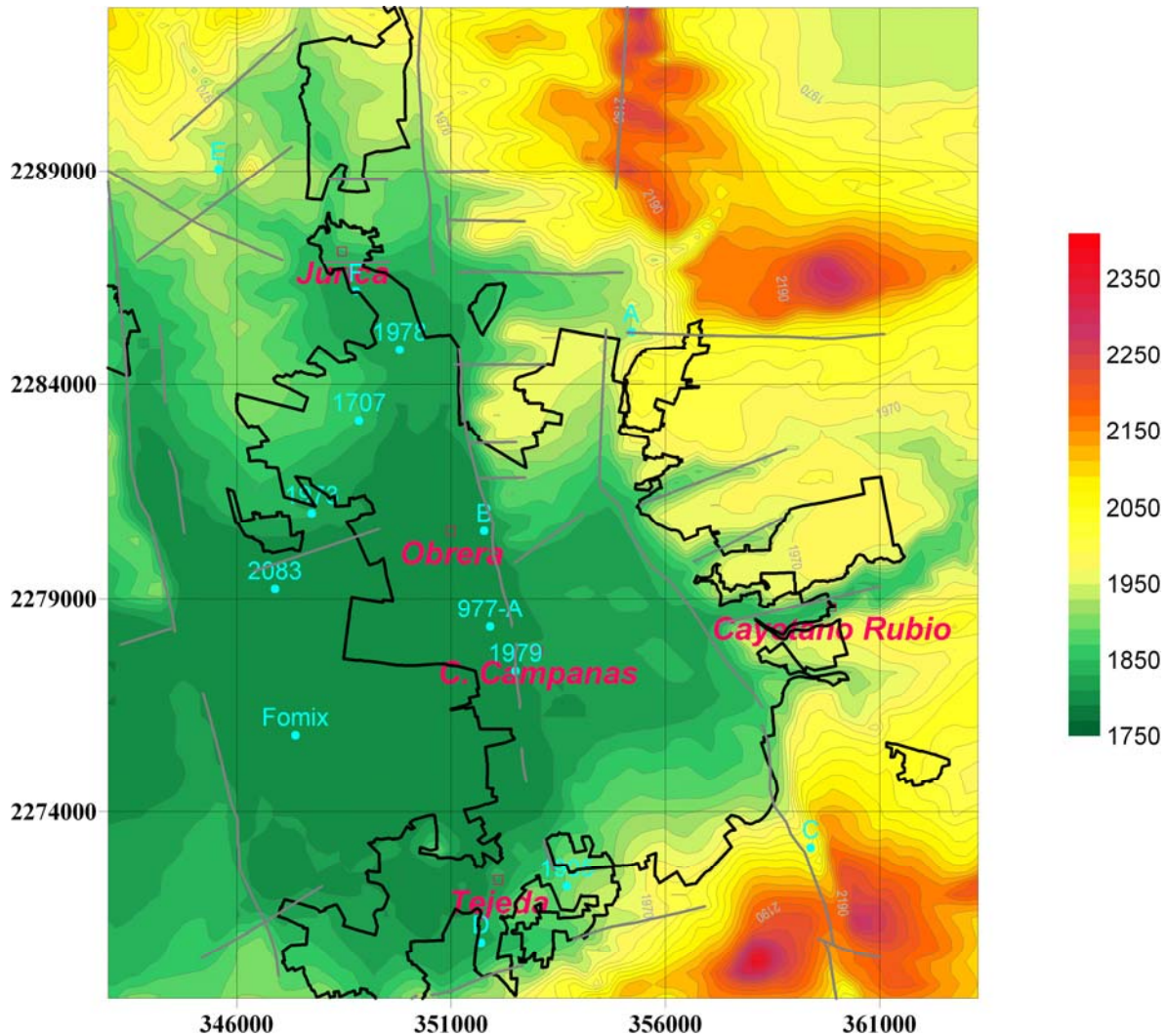


Figura 25. Mapa de Elevaciones de la región de Estudio generado con datos del (INEGI, 2008)

Debido a que los sensores fueron instalados en el periodo 2007-2008, se genera el mapa de Isolíneas de 2007 (figura 26), para los cuales tenemos datos en todos nuestros pozos piloto.

Se debe de ser cuidadoso al comparar la figura 23 con la 26, puesto que en esta última se usaron datos de los pozos "testigo", que no aparecen en todo el análisis anterior de evolución piezométrica, tal y como se observa en la tabla 8. Por esta razón se cambió el código de colores (para evitar una confusión). Los datos puntuales utilizados para generar la sección, fueron obtenidos mediante el uso de Surfer versión 8 con los comandos: digitize y slice (Golden Software, 2005).

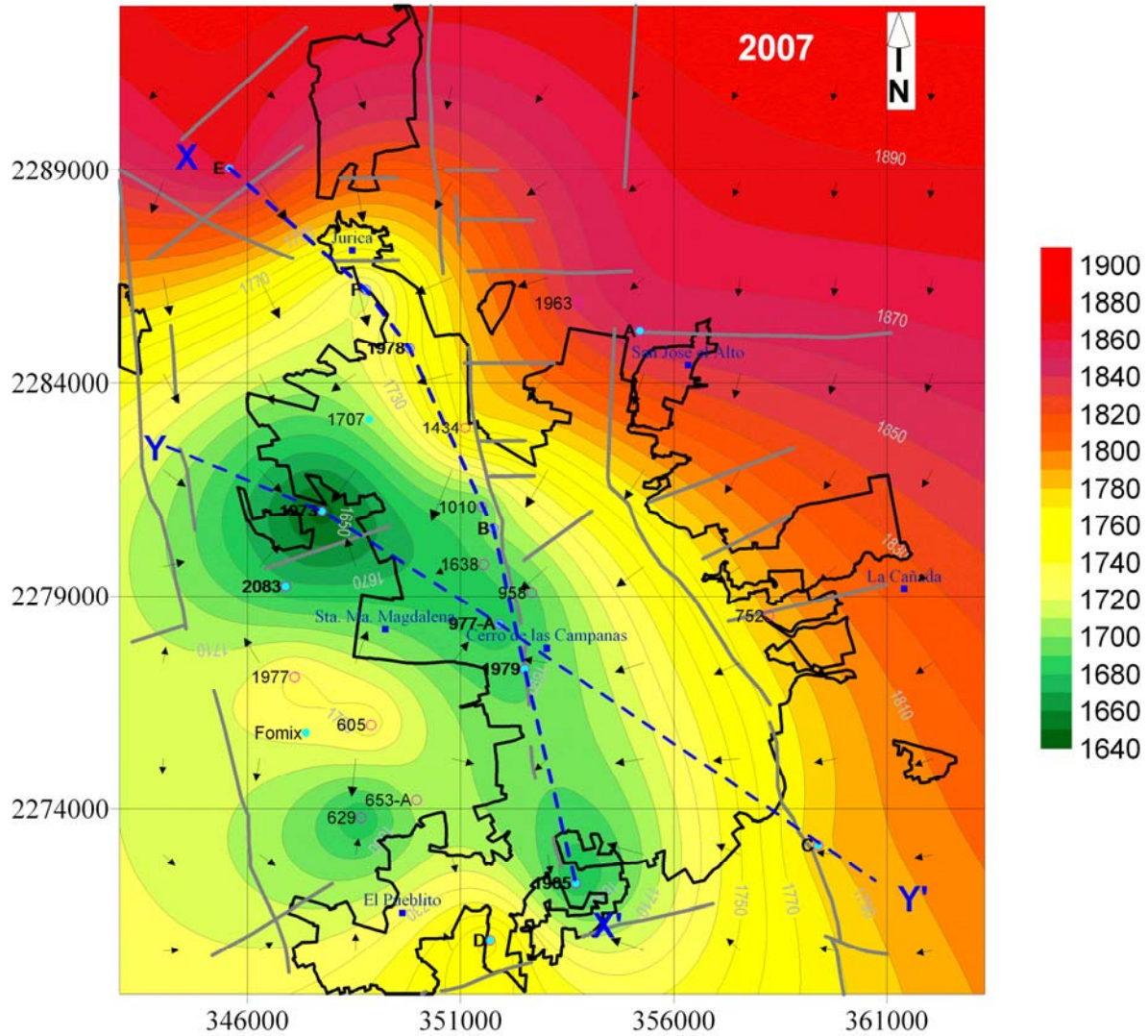


Figura 26. Mapa de Isolíneas para el Año 2007 de nivel piezométrico, las líneas en azul son secciones mostradas en las figuras 27 (X-X') y 28 (Y-Y').

Con la superficie generada mediante la interpolación de datos de nivel piezométrico y nivel topográfico, se trazaron dos secciones de interés X-X' (Figura 21) y Y-Y' (Figura 28).

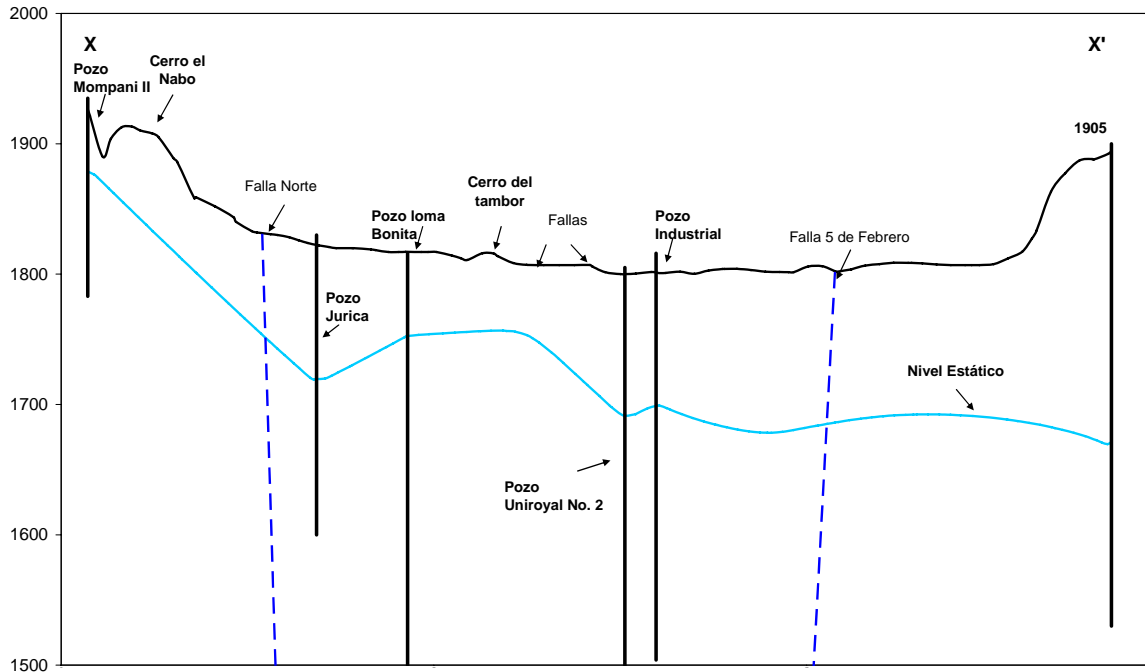


Figura 27. Sección X-X', las líneas verticales punteadas en azul corresponden a fallas y las líneas verticales en negro son pozos representados con su profundidad real. La línea continua azul claro corresponde a la superficie piezométrica para el año 2007.

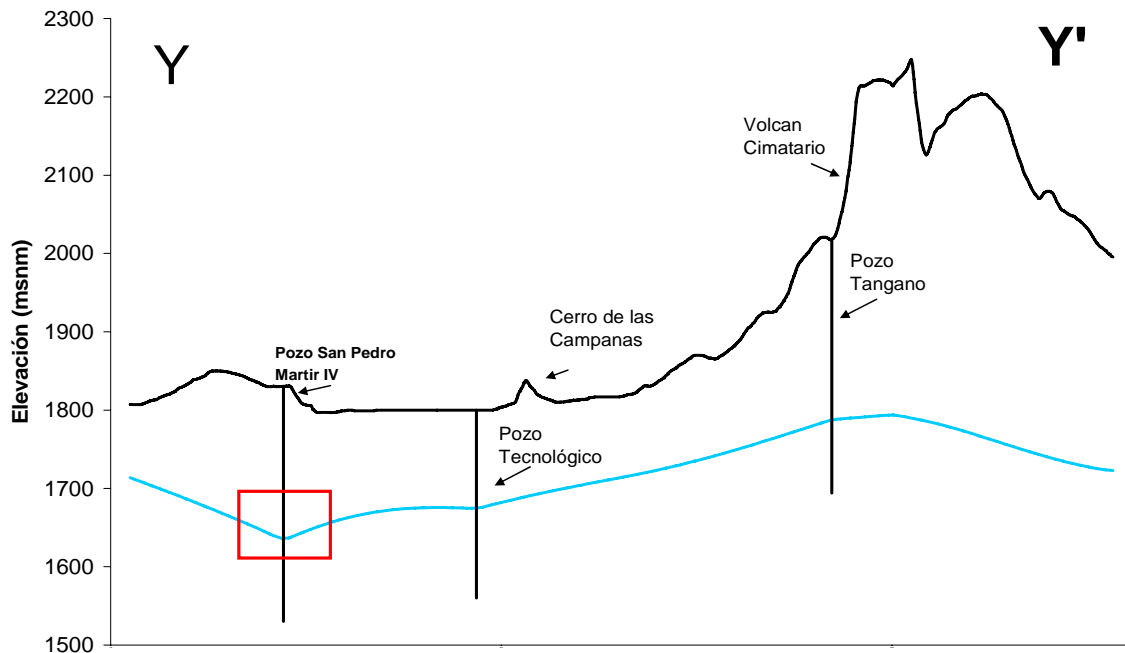


Figura 28. Sección Y-Y'', las líneas verticales en negro son pozos representados con su profundidad real. La línea continua azul claro corresponde a la superficie piezométrica para el año 2007. El cuadro en rojo se presenta en la figura 29.

Cómo se observa en la sección Y-Y' (figura 28), en el pozo San Pedro Martir IV (1973) se presenta una depresión importante continuada al sur con el Pozo Tecnológico (977-A) y en orden ascendente hacia el alto topográfico Volcán de Cimatario donde se encuentra el Pozo Tangano II (C).

El nivel piezométrico representado en la figura 28 fue medido en Noviembre de 2007, con un valor de 1633.35. Este es un dato puntual en el universo de datos durante la evolución piezométrica.

Con la implementación del uso de los sensores o "díviers", se observa que para el pozo San Pedro Martir IV (1973), se tiene una variación en un periodo de 8 meses de 1.75 m con un comportamiento variable (Figura 29). El valor puntual medido en Noviembre de 2007, se pudo haber tomado del 01 de Nov de 2007 al 03 de Nov. de 2007 ó el 15 o 16 de Noviembre, que esta dentro del rango razonable medido por el sensor.

El comportamiento variable del nivel piezométrico se puede deber a la interferencia con otros pozos, y a las estaciones de periodo de riego de las parcelas cercanas de riego en el mismo Poblado de San Pedro Martir y Santa María Magdalena.

Se puede observar que para el mes de Agosto este pozo muestra cierta recuperación, que pudiera estar asociada al periodo de lluvias que podría recargar el pozo por filtración el ademe, en el caso de presentar un flujo local, o a una recuperación del nivel debido los agricultores no hacen uso de los pozos de bombeo en periodos de lluvia.

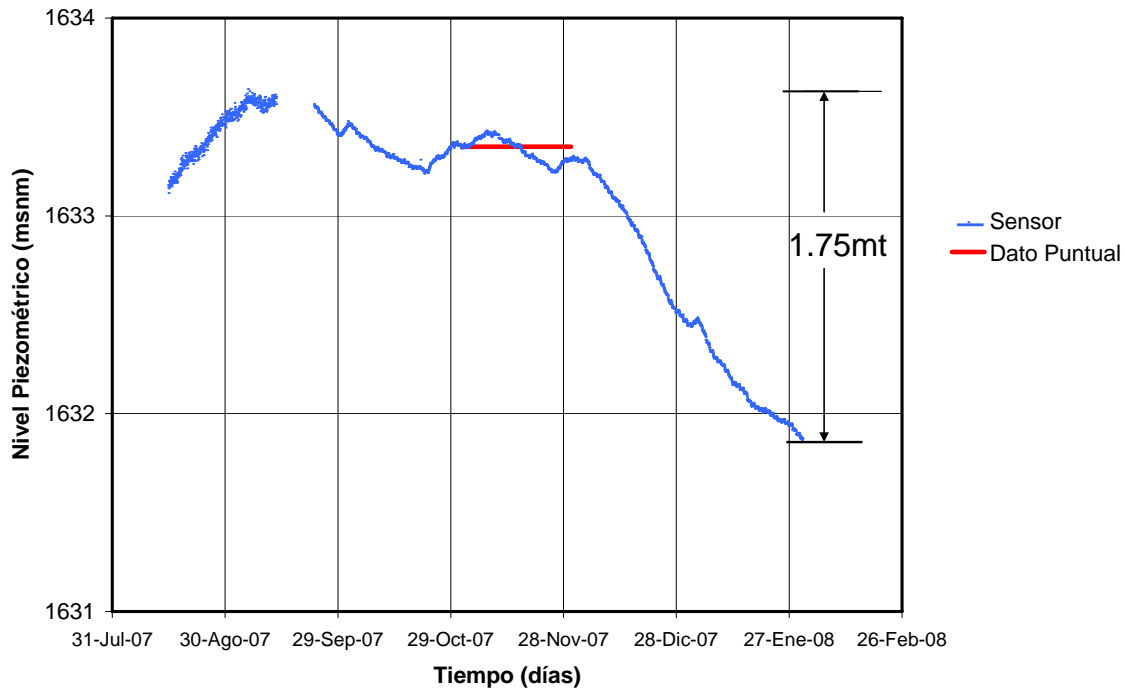


Figura 29. Comparación de una medición puntual, con el monitoreo en tiempo real con el empleo del sensor (*diver*)

3.3 Monitoreo en tiempo real con sensores automatizados.

Se presentan los hidrogramas y las gráficas de la evolución de la temperatura, obtenidos en el periodo de monitoreo empleando los '*divers*' en los pozos testigo, el formato de las graficas coinciden en tiempo de medición y escalonamiento de metros para el caso de nivel y grados centígrados para temperatura, así se puede realizar justificadamente una comparación cuantitativa entre gráficas, cada división de tiempo representa un periodo de 10 días y cada cuadro de nivel representa 0.5 m y 0.2 °C en temperatura respectivamente.

A manera de ejercicio se agruparon las evoluciones de 2 pozos (Tabla 9), para realizar una comparación cualitativa entre la evolución de pozos, Se observa que una evolución variable ascendente y descendente, el nivel en el pozo 1979 varia en un rango de 3.5 m y 1.7 m para el pozo E. Aunque el nivel de magnitud no es el mismo coinciden en los periodos de ascenso a mediados de Agosto hasta mediados de Septiembre de 2007, lo se puede asociar con el periodo anual de lluvias dentro del área de estudio.

Tabla 9. Clasificación de grupos de pozos testigo, según el rango de variación.

Clave CNA	Nombre del Pozo	Nivel de Variación Piezométrico (msnm)	
		1634.5	1638.5
E	San Pedro Martir IV	1680	1676
1979	Ceaq Vívero (1979)	1680	1676

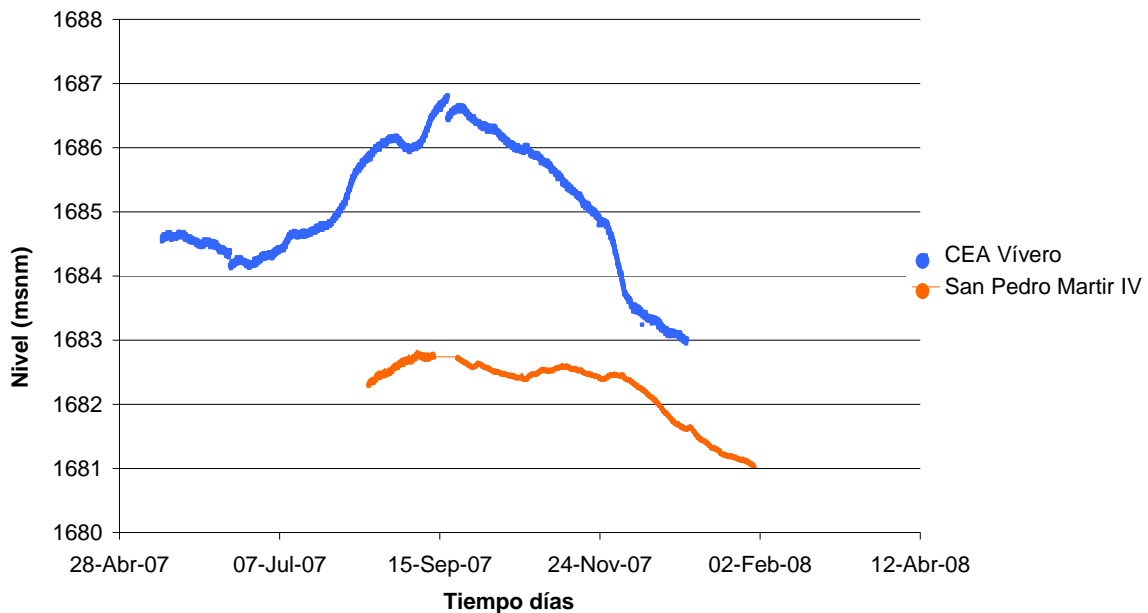


Figura 30. Evolución Piezométrica de los pozos CEA Vívero, San Pedro Martir IV y Reforma Agraria

3.3.1 Pozo CEAQ Vivero (1979)

Nivel

Se muestran datos tomados del periodo 16 de Mayo 07 al 31 de diciembre 07 (Figura 31a), la grafica de nivel se asemeja a una campana Gaussiana de Mayo a Junio, desciende progresivamente 20 cm y después asciende categóricamente aproximadamente 2.85 m del 14 de Junio al 25 de Septiembre es decir 79 días. Aunque en un periodo de 7 días del 27 de agosto al 03 de septiembre se observa un pequeño descenso de 20 cm y después asciende. A partir del 25 de Septiembre se observa un descenso progresivo de 3.66m

Temperatura:

Se mantiene en un intervalo de variación de 0.2 °C de 24.6 a 24.8°C, su comportamiento es semejante a un ciclo de aumento y descenso (figura 31b).

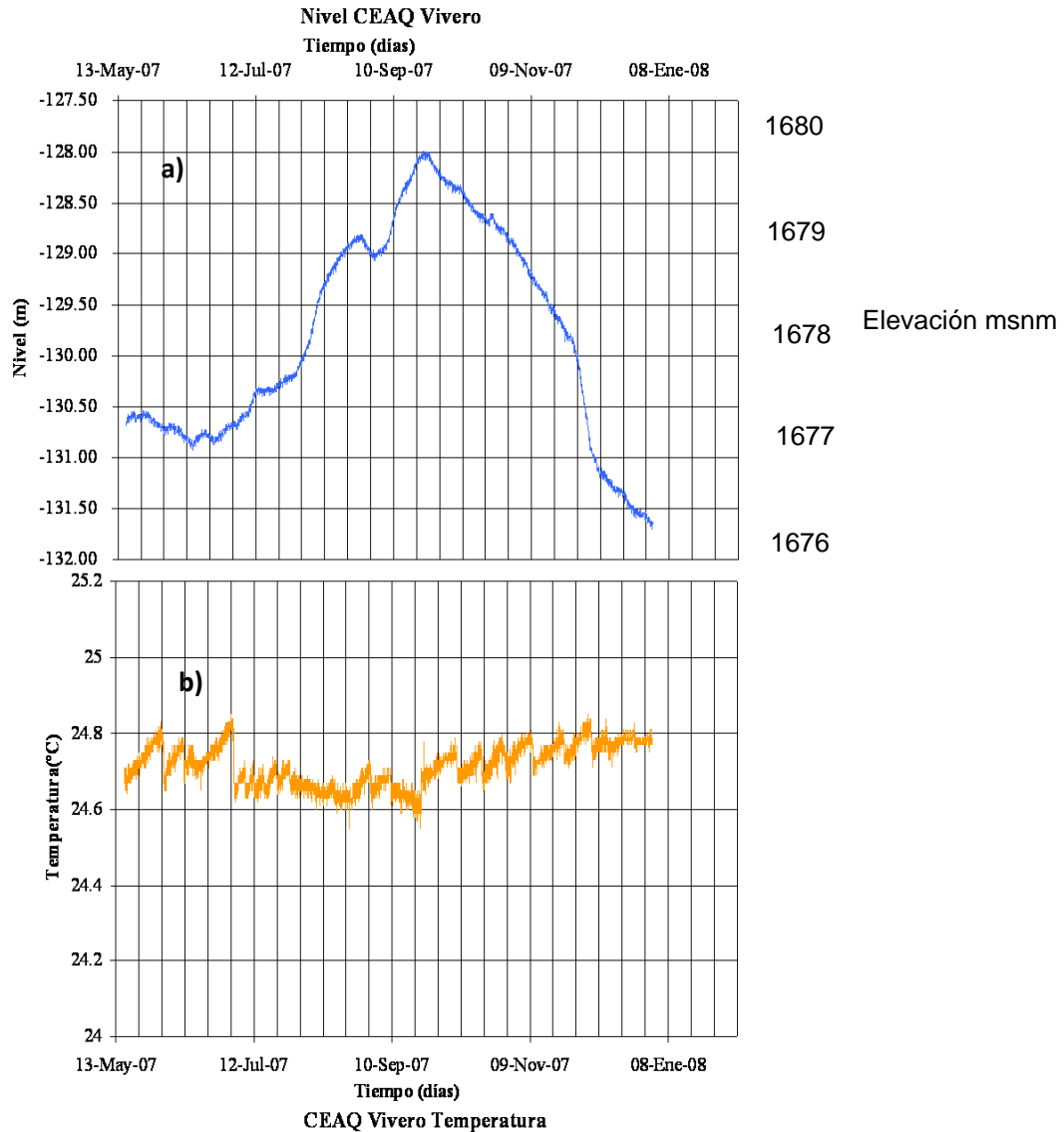


Figura 31. Evolución piezométrica a) y de Temperatura b) del pozo CEAQ-Vivero

El comportamiento en escalonamiento del pozo CEAQ-Vivero (Figura 31) se observa mejor en la siguiente grafica donde se muestra solamente la línea de tendencia de tipo Media Móvil con un periodo de 50 (Figura 32).

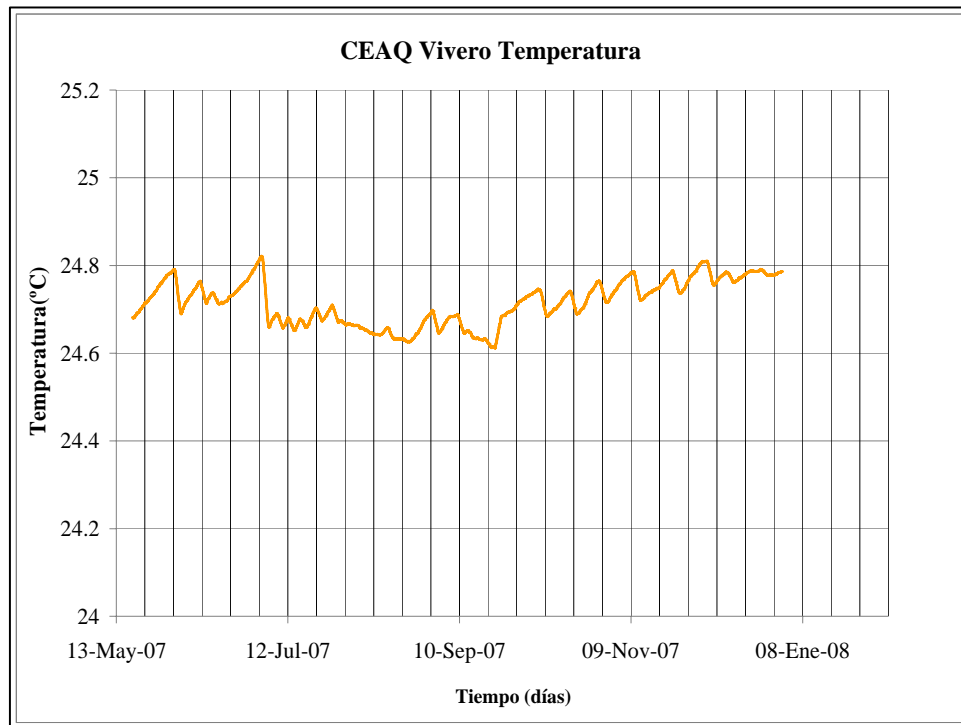


Figura 32. Evolución de temperatura del pozo CEAQ-Vivero, línea de tendencia del tipo Media Móvil con un periodo 50.

3.3.2 Pozo Colinas del Bosque

Se muestran los datos del período 15 Mayo 07 - 09 diciembre 07. Las graficas originales fueron limpiadas de datos erróneos arrojados del sensor, probablemente sufrió algún daño por un golpe o presencia de algún agente externo como corriente eléctrica, los datos suprimidos son niveles mayores a los del rango máximo en este caso 99mts y temperaturas muy encima del rango de medición por ejemplo alrededor de 140°C. Cabe recordar que el rango máximo de toma de lecturas es de 80°C para estos instrumentos y por otra parte los datos anómalos coinciden en ambos casos un dato anómalo de nivel junto con otro de temperatura.

Nivel:

Tiene una tendencia descendente en 209 días tuvo una baja de .64m en su nivel piezométrico, siguiendo una tendencia lineal (Figura 33a).

Temperatura:

Se mantiene constante en un rango de 38.32 a 38.57 (°C) (figura 33b), es una tendencia lineal aunque a partir del 19 de Septiembre tiene una tendencia descendente, otra particularidad se presenta el 05 de Julio 2007 a las 7:00 hrs donde se observa un escalón importante en magnitud relativa a la grafica de 38.51°C a 38.47, si bien es una diferencia pequeña de 3 centésimas de °C, pero se aprecia un escalón muy marcado en la gráfica de temperatura, al comparar el tiempo en la gráfica de nivel no se observan cambios significativos en su comportamiento, este escalón pudo ser provocado debido a fallas en el equipo, pero no representan efectos significativos en el desarrollo de los datos del pozo y en el desarrollo del proyecto.

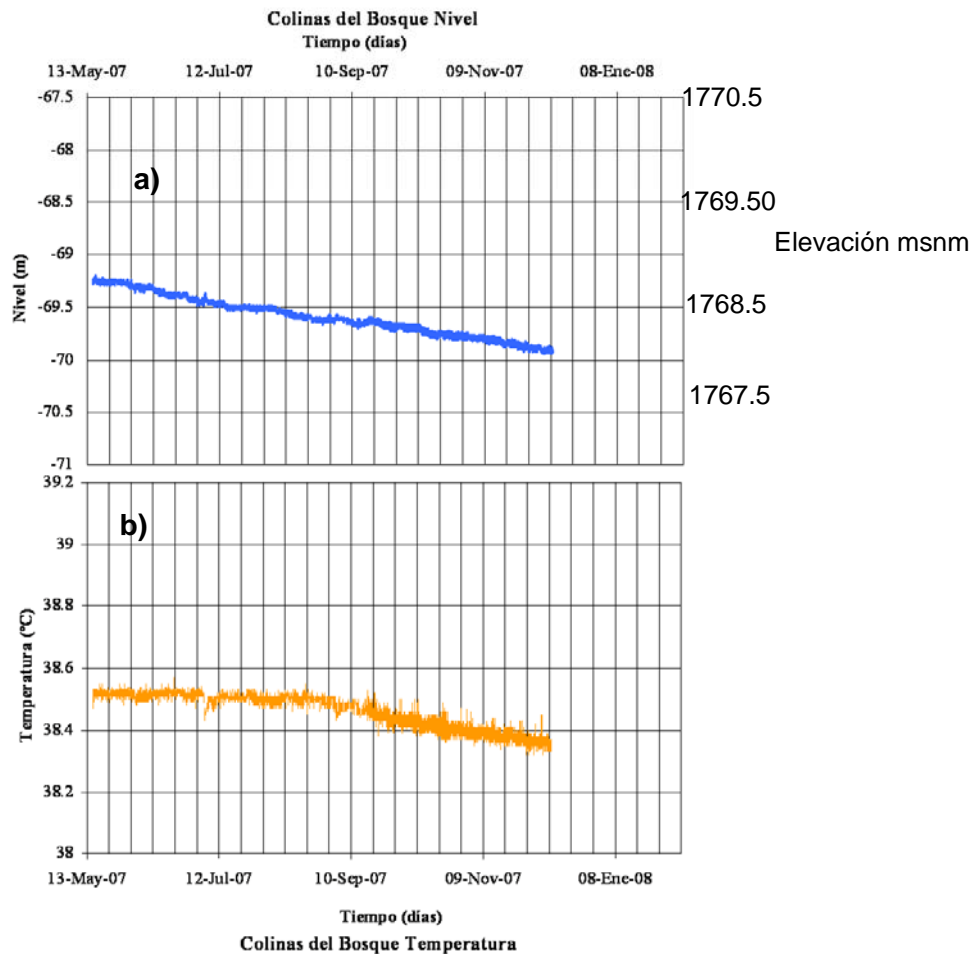


Figura 33. (a) Evolución Piezométrica y (b) de Temperatura del Pozo Colinas del Bosque

3.3.3 Pozo San Pedro Martir IV

Se presenta un periodo de muestreo de 162 días de monitoreo dividido en dos periodos de 14 Agosto del 2007 al 12 Septiembre 2007 y del 22 de Septiembre 2007 al 30 de Enero del 2008. Esto fue por el cambio del tipo de sensor, en primera instancia se colocó un sensor tipo CLT y después tipo LT.

Conductividad

El periodo de muestreo es corto 30 días, del 14 de Agosto 2007 al 12 de Septiembre del 2007 y tiene una tendencia ascendente en un rango de .57 a .58 mS/cm (Figura 34).

Nivel:

La tendencia que sigue es variable puesto que en el primer periodo es ascendente después se recupera y finalmente desciende, el hueco que se observa representa el periodo que no se monitoreó el pozo un periodo de 10 días (Figura 35a).

Temperatura:

En el primer periodo la temperatura varía en un rango de 0.2°C su tendencia es errática en comparación a la del segundo periodo donde se mantiene casi constante en 32°C (Figura 35b).

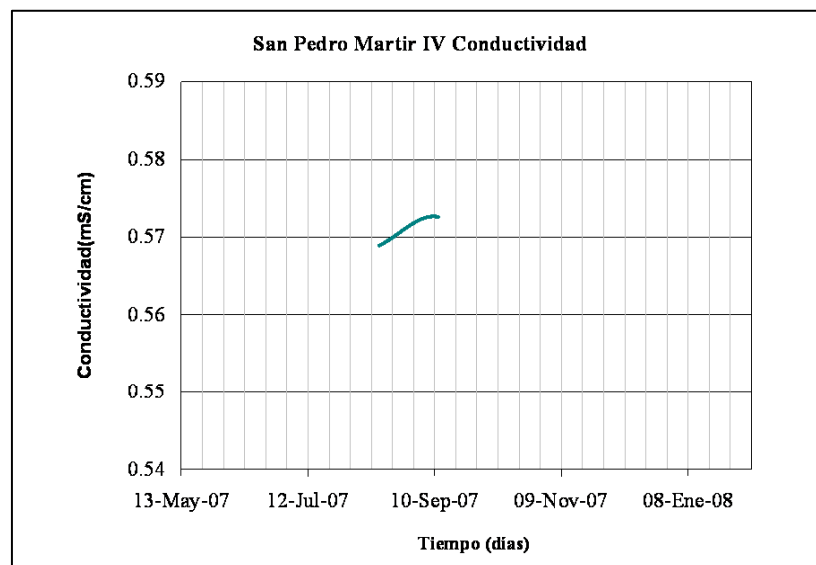


Figura 34. Evolución de Conductividad Eléctrica del Pozo San Pedro Mártir IV

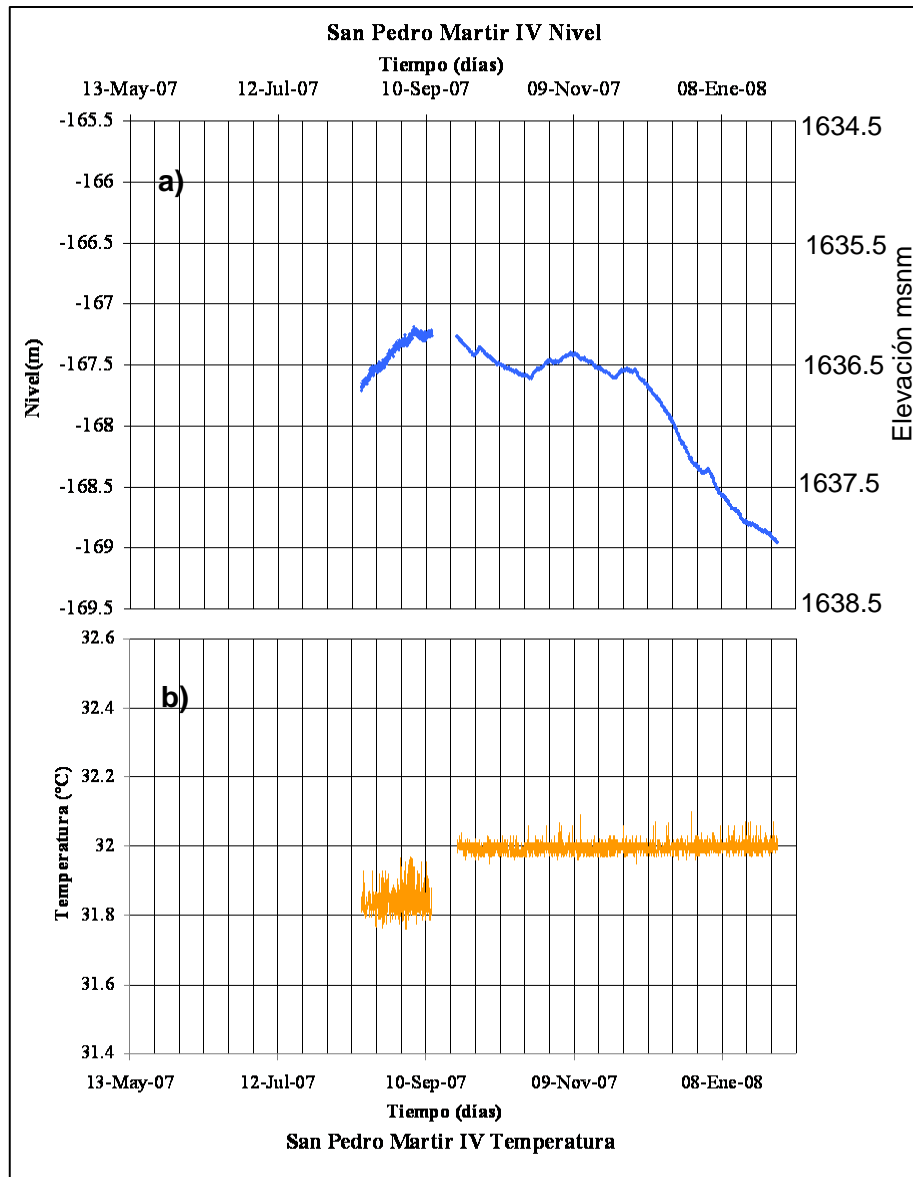


Figura 35. (a) Evolución Piezométrica y (b) de Temperatura del Pozo San Pedro Mártir IV.

3.3.4 Pozo Mompani II

Se tiene un periodo de muestreo de 136 días del 13 de Junio del 2006 al 25 de Noviembre del 2007.

Nivel:

Tiene una tendencia descendente pero se observa algo muy interesante en la evolución piezométrica tiene 3 eventos de recuperación de nivel.

El primer evento se presenta del 05 al 07 de junio del 2007 de aproximadamente 60am, el segundo evento es un conjunto de 3 elevaciones de nivel en 11 días, del 24 de Julio 2007 al 02 de Agosto del 2007 de aproximadamente 40, 20 y 10 (cm) aproximadamente, el 3er evento dura 4 días, del 02 al 04 de Septiembre del 2007 con una recuperación de 70cm (figura 36a).

Temperatura:

La temperatura esencialmente es constante pero desciende conforme al presentarse las recuperaciones de nivel antes descritas, lo que hace suponer que el flujo local de este pozo es afectado por otro a menor temperatura (36b).

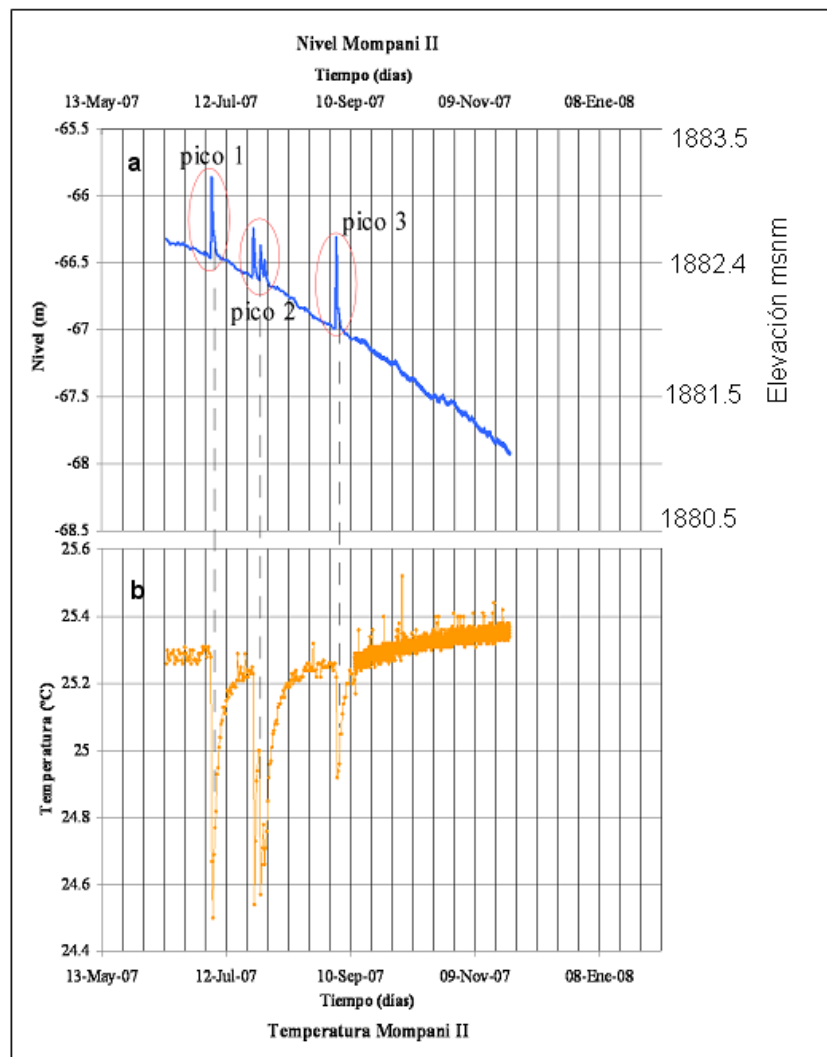


Figura 36. (a) Evolución Piezométrica y (b) de Temperatura del Pozo Mompani II.

3.3.5 Pozo Tangano II

Se presentan los datos de 100 días de monitoreo del 13 de Octubre 2007 al 26 de Enero del 2008, tanto nivel como temperatura se mantienen relativamente constantes sin importantes cambios en su evolución.

Nivel:

Se mantiene relativamente constante en -234.7 en un rango de variación de [-237.77, -234.62] [m] (Figura 37a).

Temperatura:

Tiene una evolución constante en 33.11°C en un rango de variación de [32.98, 33.15] [°C], aunque presenta un notorio escalonamiento de 33.03 a 33.08 (°C), 0.05°C en magnitud, al comparar este evento con la gráfica de nivel, no se observa alguna variación perceptible, no se tienen elementos de valor para explicar este escalonamiento (Figura 37b).

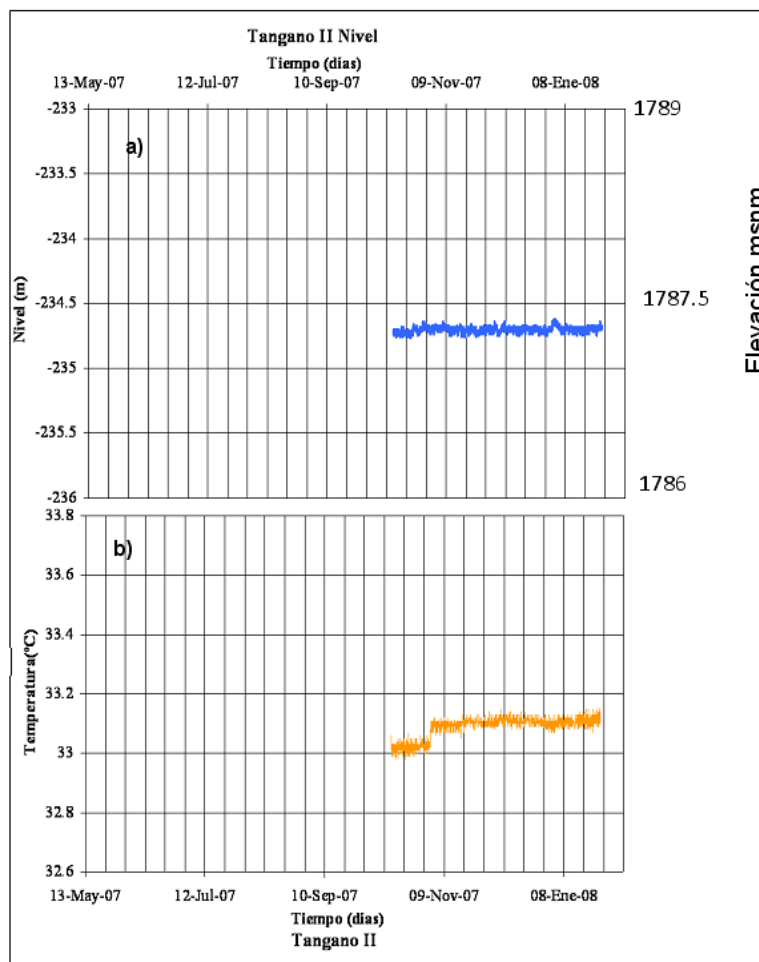


Figura 37. (a) Evolución Piezométrica y (b) de Temperatura del Pozo Tangano II

3.3.6 Pozo Reforma Agraria

El periodo de monitoreo es de 417 días del 07 de Diciembre de 2006 al 26 de Enero del 2008.

Nivel:

Se presentan los datos del 20 de Septiembre 2007 al 26 de Enero del 2008, aunque se tienen registros desde el 07 de Diciembre de 2006 el 'diver' estaba mal calibrado en el canal de nivel y los datos tomados son erróneos por lo tanto se omiten. La gráfica tiene una tendencia mayormente ascendente y se recupera 86cm en 130 días, se presentan dos eventos de destacar: recuperación de 26 y 22cm respectivamente los días 19 y 23 de Octubre de 2007 el evento solo se registra en un lapso de una hora y después sigue su tendencia original (Figura 38a).

Temperatura:

Se tiene el periodo completo de 417 días la tendencia es variable pero se presenta una mayor temperatura del mes de Mayo a Noviembre, varía en un rango de (34 a 34.95) °C, al igual que en la gráfica de nivel coinciden dos eventos de aumento de temperatura; al aumentar el nivel la temperatura aumenta a 35.36 y 35.24 (°C) respectivamente, por lo cual se concluye que el flujo con el cual esta alimentado esta a mayor temperatura (tabla 10) , en comparación a los otros pozos donde no se cuenta con el mismo periodo que este se realizó la comparación de eventos de temperatura en un mismo periodo estacional, del 07 de diciembre al 26 de enero para el periodo 2006-2007 versus 2007-2008, en el periodo 2006-2007 tiene una tendencia predominante constate y para el periodo 2007 y 2008 es una tendencia descendente, lo cual se contrapone a lo que se esperaría que en el mismo periodo estacional tendría la misma tendencia, el comportamiento del acuífero no necesariamente tiene una directa relación con los periodos estacionales anuales (Figura 38b).

Tabla 10. Comparación de temperaturas en un mismo ciclo anual del pozo Reforma Agraria

Tiempo	Nivel(m)	Diferencia con el inmediato anterior (m)	Temperatura (°C)	Diferencia con el inmediato anterior(°C)
19/10/2007 14:20	-245.12	0.26	34.73	0.63
19/10/2007 14:30	-244.86		35.36	
19/10/2007 14:40	-245.08		34.74	
23/10/2007 20:40	-245.09	0.22	34.61	0.63
23/10/2007 20:50	-244.87		35.24	
23/10/2007 21:00	-245.12		34.63	

Las figura 38 presenta la evolución piezometrica y de temperatura del pozo Reforma Agraria. En la figura 39 se presenta la comparación de temperatura en un mismo periodo estacional.

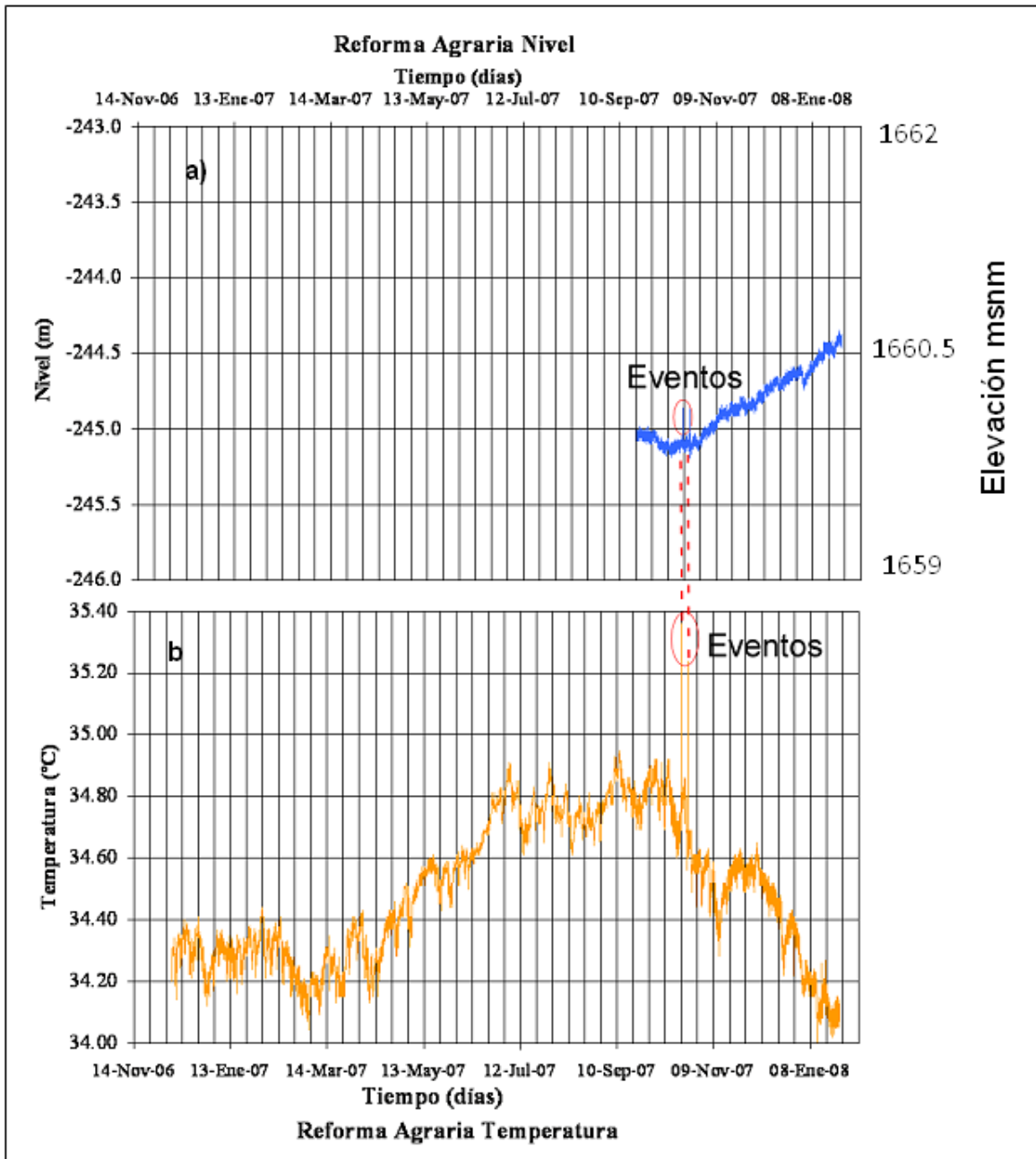


Figura 38. (a) Evolución Piezométrica y (b) de Temperatura del Pozo Reforma Agraria (1905)

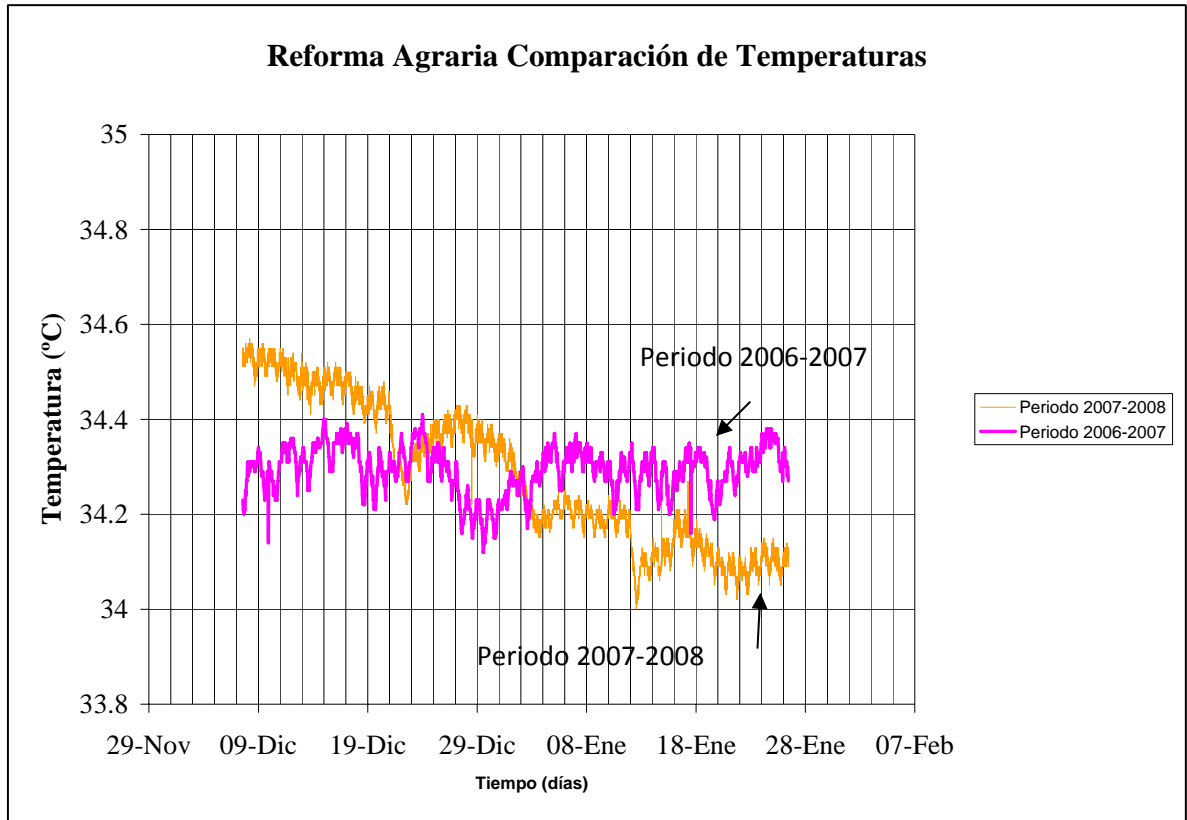


Figura 39. Comparación de Temperaturas del Pozo Reforma Agraria, del 07 de Diciembre al 26 de Enero.”

CAPÍTULO IV

Pruebas de bombeo

4.1 Clasificación de acuíferos en función de comportamiento hidráulico

Para Freeze et al. (1979) y Custodio et al. (2006) existe una clasificación de acuerdo a sus condiciones hidráulicas y estructurales que tiene una relación directa con la presión hidrostática del agua contenida en los acuíferos y se clasifican en:

Acuíferos libres: Aquellos en el que el nivel superior de saturación se encuentra a presión atmosférica. El agua del acuífero está sometida exclusivamente a la presión atmosférica más la presión hidrostática. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es el agua almacenada. El nivel de saturación de un acuífero libre se denomina nivel freático. Los conos de bombeo suelen ser esbeltos, esto es, con elevados descensos de nivel de pozo y corto radio de influencia.

Acuíferos semiconfinados: Acuífero comprendido entre dos capas de baja permeabilidad.

Acuíferos confinados o cautivos: aquellos que están aislados en el subsuelo, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados. El nivel de agua en los acuíferos confinados está a presión o en carga, debido al peso de los materiales superiores. El agua que ceden procede de la descompresión de estos niveles superiores, cuando se produce la depresión en el acuífero. El agua del acuífero está sometida a una presión de confinamiento que será la suma de la presión hidrostática más la presión litostática de la capa impermeable subyacente, más la presión atmosférica. Sus conos de bombeos suelen ser de menor altura que en los libres, pero con radios de influencia largos.

En la última década los avances en la comprensión del movimiento del agua subterránea han propuesto un cuarto tipo de acuífero (Hemker, 1999):

Acuíferos Multicapa: Sistema acuífero constituido por capas, estratos o niveles permeables, figura 9 a), con diferentes (contrastantes) propiedades hidráulicas o niveles a distintas presiones, separados por estratos impermeables o semipermeables.

En la figura 40 se ilustran de manera esquemática los modelos de los diferentes tipos de acuíferos y su relación (González et al, 2006).

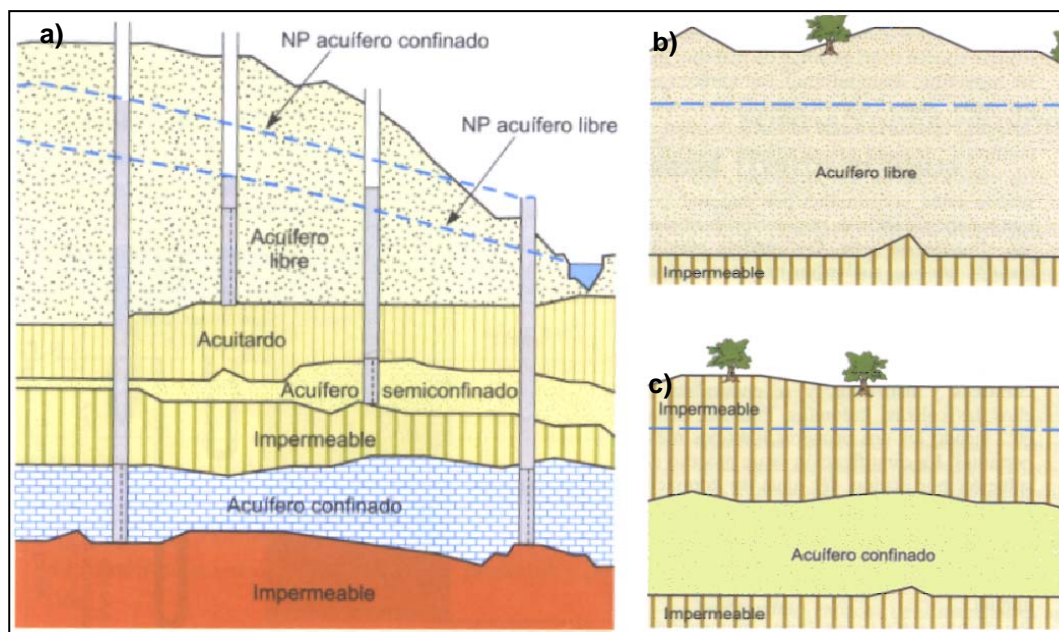


Figura 40. Tipos de acuífero según sus características hidráulicas y niveles piezométricos, a) un ejemplo de acuífero multicapas donde se extrae agua de distintos acuíferos, b) Acuífero libre, c) Acuífero confinado, (modificado de González de Vallejo et al, 2006).

4.2 Descripción y análisis de pruebas de bombeo

La realización de una prueba de bombeo tiene por objetivo la determinación de las características hidráulicas del acuífero (transmisividad y coeficiente de almacenamiento) y de sus fronteras, como son el grado de semiconfinamiento o la cercanía de barreras impermeables o de carga constante (Villanueva-Martínez and Iglesias-López, 1994)

Al realizar una prueba de bombeo se recomienda tener presente los siguientes factores (CNA, 1996):

- Selección del sitio.
- Conocimiento geológico del área afectada por el desarrollo de la prueba.
- Existencia de pozos de observación.
- Duración de la prueba.
- Ejecución de la prueba.

4.2.1. Selección del Sitio

El Sitio responde a la necesidad de dotar con agua potable a cierta población, superficie de riego o Industria, por lo cual su selección es inherente al sitio que se desea abastecer.

Para el desarrollo óptimo de una prueba de bombeo se deberá considerar lo siguiente:

- a) Las condiciones del pozo permitan un desarrollo a un caudal constante.
- b) El nivel dinámico sea fácilmente medible.
- c) La maquinaria: motor, bomba y grúa pueda accesar libremente al sitio.
- d) Se conozcan las características constructivas del Pozo y el corte litológico.
- e) No exista interferencia en el desarrollo del cono de bombeo, es decir que no estén operando pozos cercanos.
- f) El agua extraída no regrese al acuífero estudiado durante el desarrollo del bombeo.

En realidad es poco probable que se cumplan con todas las recomendaciones pero se deberá elegir medianamente la mejor opción, y en la interpretación de la prueba de bombeo se considerará las condiciones específicas de la prueba.

4.2.2. Conocimiento Geológico del área afectada por el desarrollo de la prueba

Al perforar el pozo y recuperar muestras del subsuelo nos brinda la posibilidad de conocer la hidroestratigrafía del mismo, si se establece un perfil geológico con ayuda de los pozos cercanos se podrá determinar con menor incertidumbre las características hidráulicas del acuífero estudiado.

4.2.3. Pozos de Observación

Estrictamente un pozo de observación deberá tener características iguales al pozo aforado, perfil geológico y características constructivas, ya que se quiere conocer la evolución del cono de bombeo.

Sin embargo por cuestiones económicas no es siempre posible contar con pozos de observación, lo que lleva a no poder determinar el coeficiente de

almacenamiento, puesto que a la fecha no se cuentan con métodos confiables para determinarlo.

Si existiese la posibilidad de contar con pozos de observación deberán localizarse a 30 y 150 m del pozo aforado.

Se recomienda localizar los pozos de observación a 1.5 veces el espesor del acuífero, a esta distancia el flujo es prácticamente horizontal, si se tienen distancias menores el flujo no es uniforme y la interpretación resultará complicada.

Si es necesario localizar nuevos pozos de observación se recomienda hacerlo dentro del radio de influencia del pozo con la relación:

$$R=1.5 \sqrt{T/S}$$

A la relación T/S se conoce como difusividad; T y S se determinan en estudios previos o de pruebas de bombeo cortas o anteriores.

Si el pozo de bombeo capta la mayor parte del acuífero, y éste es medianamente homogéneo, la profundidad del pozo de observación puede ser menor, de preferencia ubicado en la parte media del ranurado o del área libre del pozo.

Sin embargo si el acuífero tiene intercalaciones de materiales arcillosos es favorable que el ranurado sean de mayor extensión; o mejor aún que se construyan pozos de observación que capten cada estrato permeable, para definir la interconexión entre ellos.

Cuando se trate de acuíferos semiconfinados es conveniente construir pozos de observación que capten de los estratos semiconfinantes con el objetivo de conocer su permeabilidad vertical.

4.2.4. Duración de la prueba.

Se determina en cada caso según lo siguiente:

- Objetivos perseguidos.
- Análisis de la información recopilada.
- Distancia a la que se encuentran los pozos de observación.
- Datos obtenidos en el desarrollo de la misma.
- Tipo de acuífero
- Grado de exactitud deseada.

En general es recomendable que dure hasta alcanzar condiciones de flujo permanente. La tabla 11, (modificada de CNA, 1996), nos da una idea de la duración recomendada a priori, sin embargo es conveniente analizar los resultados en campo, de forma simultánea a la realización de la prueba, evitando así la prolongación innecesaria o el acotamiento de datos imprescindibles para su interpretación.

Tabla 11. Tiempo de duración de la prueba, modificada de CNA, 1996.

Duración (hrs)	Tipo de Acuífero	Observaciones
8-9	Confinados	Pozo profundo
12-24	Confinados	Pozos de observación adecuadamente ubicados
72-96	Libres y semiconfinados	Excepto cuando se desea analizar la relación entre acuífero y libre y el pozo está muy cercano al pozo (se alcanzará rápidamente la estabilización del pozo y es inútil prolongar el bombeo).

4.2.5. Ejecución de la prueba.

Previa al inicio de la prueba se revisa cuidadosamente todo el equipo a utilizar: Maquinaria, bomba, combustible necesario, cronómetros, sondas, se recomienda el uso de sonda de material inextensible, pero en general se usa cable convencional, por lo cual se deberá medir antes y después de la prueba, se recomienda graduar cada dos metros.

En caso de presentarse con anterioridad un bombeo se dejará descansar el pozo y los de observación por un tiempo mínimo de 48 horas (Juárez-Badillo et al, 2006).

El nivel dentro del pozo de bombeo desciende al igual que el gasto de extracción, es necesario hacer ajustes periódicamente para que la hipótesis de gasto constante pueda resultar aproximada. Debido a esto el equipo a utilizar durante la prueba deberá permitir ajustar el gasto de extracción previamente establecido, conforme se observen variaciones de este.

Las lecturas se tomaran desde los primeros segundos de manera que entre cada lectura se mantenga una progresión geométrica. Una forma conveniente de tomar las lecturas es de la forma siguiente: 15 y 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15, 30 y 60 minutos, llevando una progresión geométrica de dos, hasta llegar a las 96 horas. Estos periodos de tiempo son desde el inicio del bombeo. Al suspenderse el bombeo a las 96 horas, comienza la medición de recuperación, con la misma regularidad empleada durante el bombeo.

La información recabada durante la prueba de bombeo debe ordenarse adecuadamente. En el formato de la Figura 41 se incluyen las explicaciones de cada uno de los aspectos de la prueba. Así como las graficas de abatimientos y las recuperaciones contra el tiempo, utilizando escalas logarítmicas y semi logarítmicas, con el tiempo ubicado en la escala logarítmica.

FORMA DE REGISTRO PARA PRUEBA DE BOMBEO

Prueba de bombeo en _____	Iniciación de la prueba
Observaciones en el pozo _____	Fecha _____ Hora _____
Profundidad _____	Distancia al pozo de observación _____
Diámetro de perforación _____	Orientación al pozo de exploración _____
Diámetro de ademe _____	Terminación de la prueba
Longitud ranurada _____	Fecha _____ Hora _____
Observaciones _____	

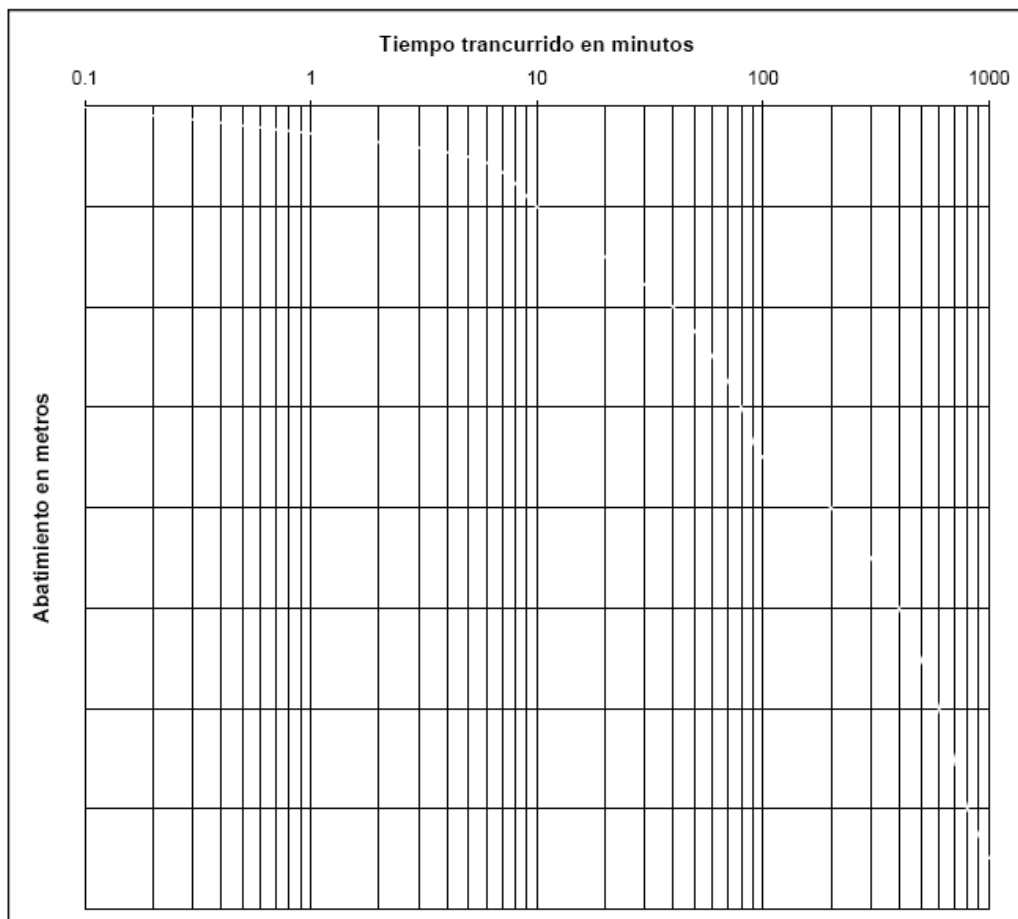


Figura 41 Formato de registro para datos durante una prueba de bombeo, donde se especifica la información básica que debe ser tomada en consideración al realizarse el ensayo (Juárez-Badillo et al, 2006)

4.3 Prueba de Bombeo en Pozo "Testigo" Mompani II (E)

Durante el desarrollo de la prueba se implemento el uso del 'diver' para medición automática de nivel y temperatura, programado cada 15 s, para el Pozo Mompani II.

Se instalo el sensor y el cable de lectura en tiempo real (direct read cable). En las fotografías de la Figura 42 se muestra la instalación del diver en la parte exterior del cuerpo de tazones de la bomba tipo vertical.



Figura 42, Instalación del sensor o 'diver' en cuerpo de tazones de bomba vertical, en el pozo Mompani II.

El pozo Mompani II atraviesa cuatro unidades litológicas (Figura 43):

1. Tom Py Lac: Unidad acuífera intermedia
2. ToR: Riolita y arcilla que puede funcionar como un acuitardo

3. TeCgAr: Unidad granular inferior, corresponde a la secuencia sedimentaria

4. KiCz: Es la base de las unidades litológicas, Calizas y Arenas del Cretácico Inferior.

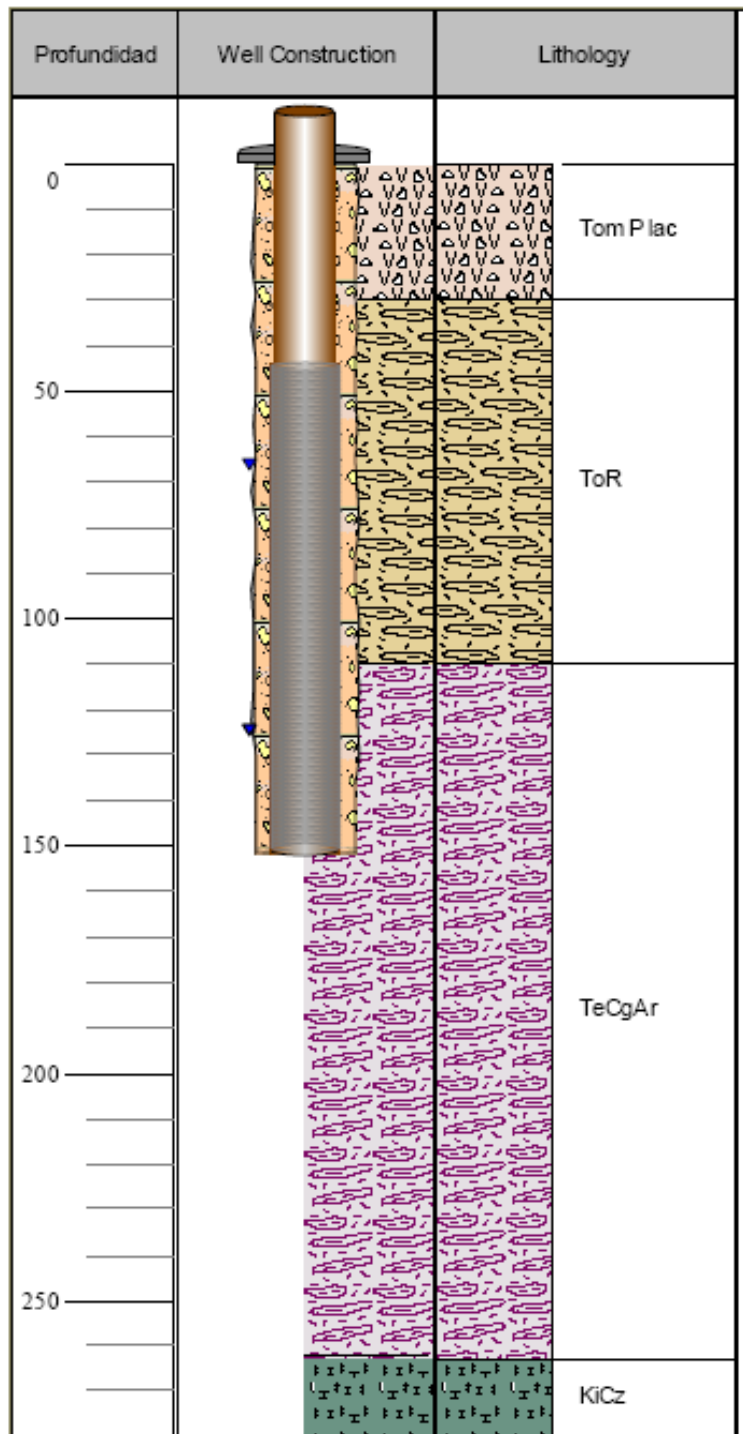


Figura 43 Litología y terminación final del Pozo "testigo" Mompani II (E)

Características Técnicas del Pozo:

Profundidad Total: <u>280mts</u>	Fecha Inicio: <u>28/Nov/07</u>
Diámetro de la Perforación: <u>20"</u>	Hora de Inicio: <u>8:00 am</u>
Diámetro del Ademe: <u>12 ¾"</u>	Fecha de Terminación: <u>29/Nov/07</u>
Longitud Ranurada: <u>108mts</u>	Hora de Terminación: <u>9:00 pm</u>
Gasto: <u>1.8 l/s</u>	Longitud de columna de bombeo: <u>150m</u>

Observaciones:

El pozo Mompani II fue retirado de servicio debido a un bajo rendimiento del caudal de diseño. Una prueba de bombeo realizada en Marzo de 1999, arrojó un nivel dinámico sostenido de bombeo 45.5m con un gasto de 70 l/s.

La evolución que presenta el pozo es variable (Figura 44), durante las primeras 4 horas presenta un descenso lineal, pero después es variable teniendo periodos de recuperación hasta aproximadamente las 19 horas, las últimas 18 horas presenta un descenso progresivo con un evento de recuperación a las 24 horas con una duración aproximada de 3 horas.

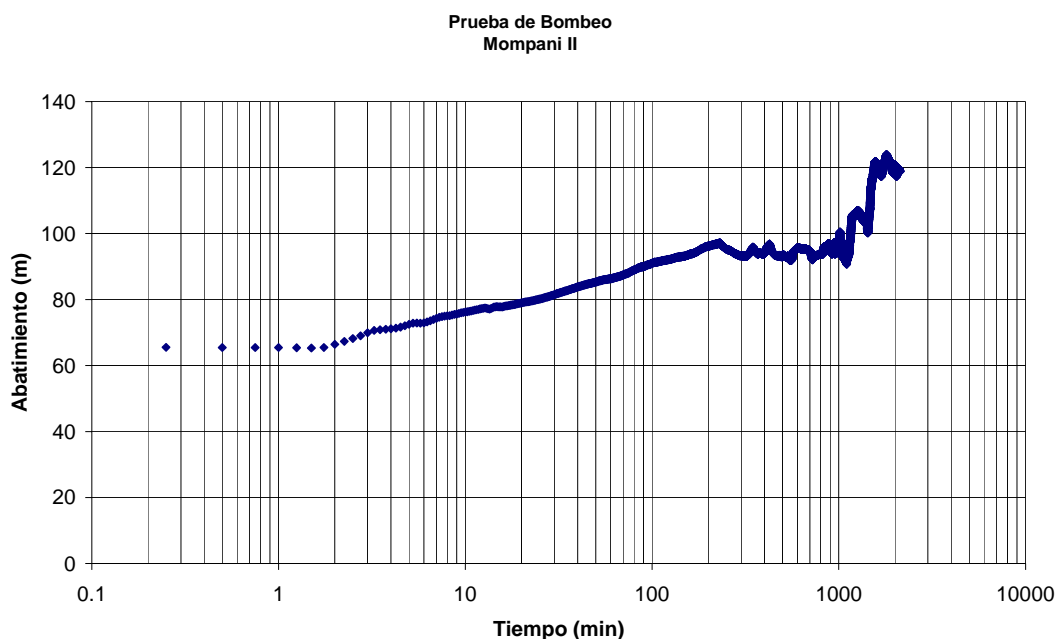


Figura 44 Evolución del nivel piezométrico durante la prueba de bombeo, del pozo Mompani II (E).

Análisis de Datos

Los datos del tiempo y descensos de nivel, obtenidos durante el bombeo de 37 horas, fueron filtrados e introducidos al programa Aquifer Test (Waterloo Hydrogeologic, 2005), se tomaron los primeros 100min de bombeo, pues a partir de ahí se tiene un comportamiento muy variable, y difícil de interpretar.

En la figura 45 se muestra el análisis arrojado por el programa *Aquifer Test*, para 20 datos por ciclo, utilizando en método de Theis y considerando que se trata de un acuífero semiconfinado.

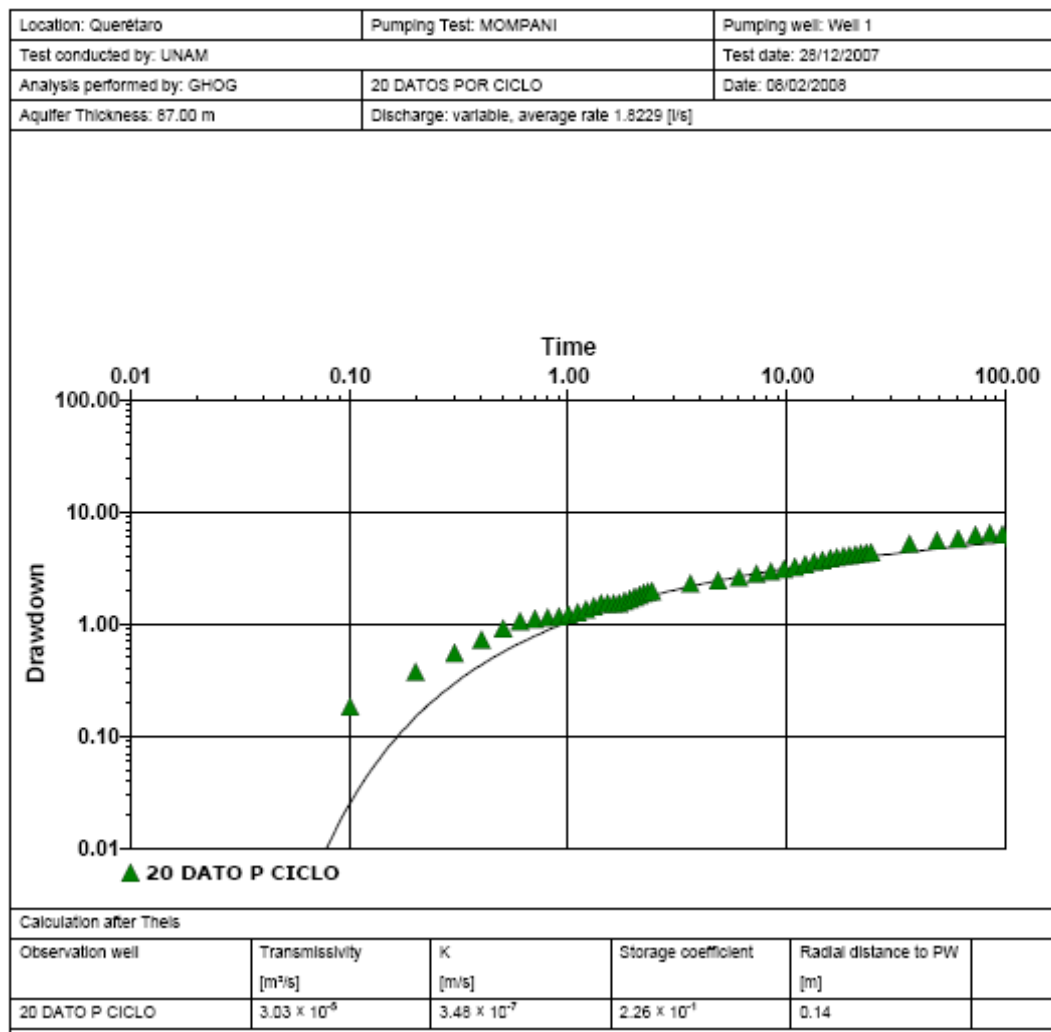


Figura 45. Análisis de los datos de la prueba de bombeo del pozo Mompani II para los primeros 100 minutos.

Los resultados arrojados dan una transmisividad de 3.03E-5 (m²/s) y una permeabilidad de 3.48E-7 (m/s) para un espesor de acuífero de 87 m.

El coeficiente de almacenamiento no se logó determinar debido a que no se contó con pozos de observación. El programa arroja un valor que varía considerablemente al cambiar la distancia del pozo de observación, que en este caso es el mismo pozo que ha sido bombeado.

CAPÍTULO V

Discusión de Resultados

5.1 Variaciones en la dirección de flujo de agua subterránea en el Valle de Querétaro

Apoiados en mapas de Isolíneas y considerando un medio homogéneo (Carreón-Freyre et al, 2005), propone una dirección NE y NW hacia el centro del valle de Querétaro y hacia el Valle de Apaseo en Guanajuato (Figura 46).

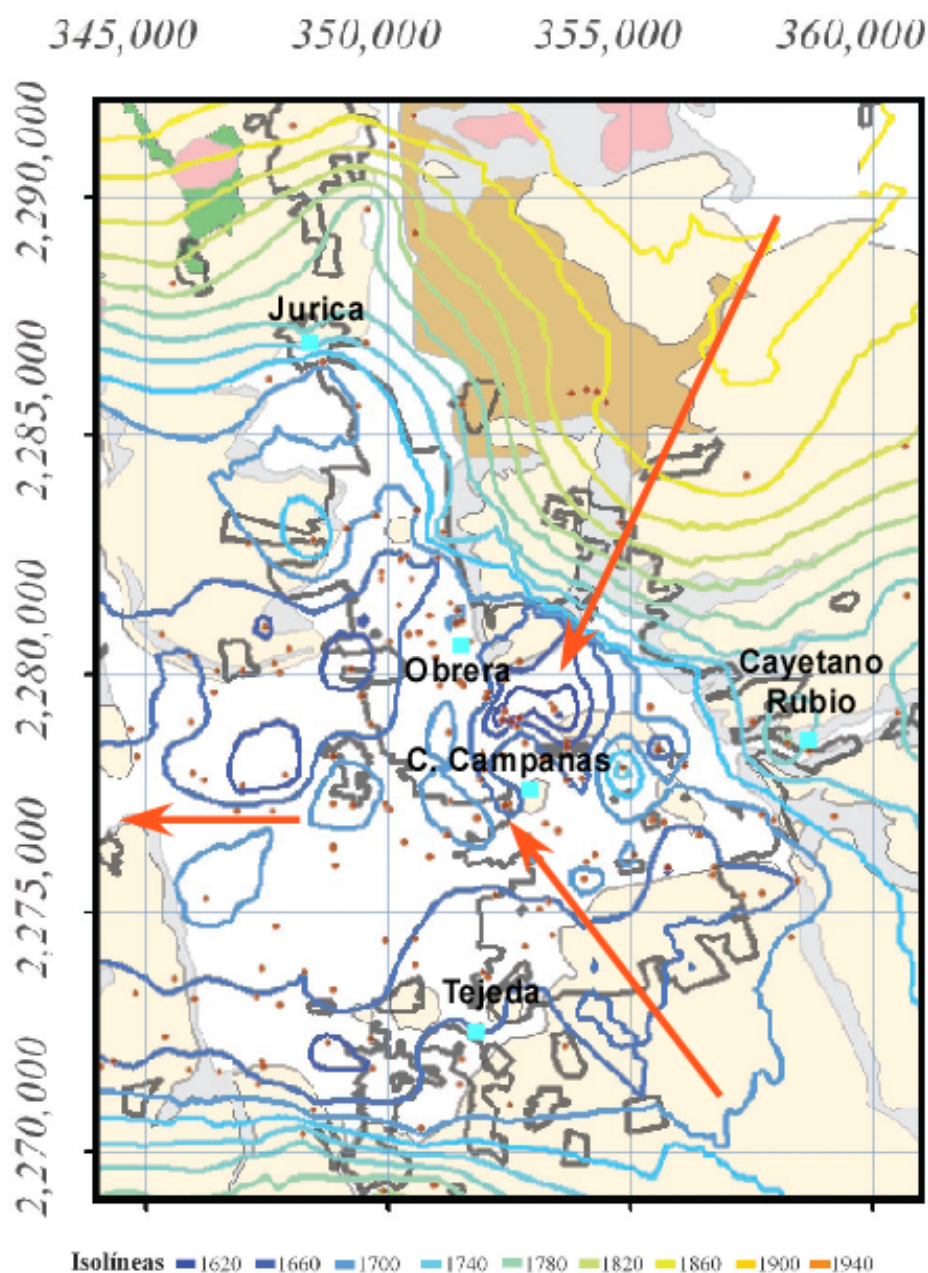


Figura 46. Mapa de Isolíneas considerando un medio homogéneo para el año 2002, (modificado Carreón-Freyre et al, 2005)

Para el desarrollo de este trabajo se elaboraron mapas de Isolíneas descritas en el Capítulo 3. Para el **año 2003** se conserva el patrón de dirección de flujo del NE y NW hacia el centro del Valle de Querétaro, la parte SW parece estar actuando como un compartimento delimitado por fallas y fracturas que descarga aparentemente al este de Tejada, al parecer hay una aportación hacia el Valle de los Apaseos puesto que se tiene un alto piezométrico en el SW del Valle de Querétaro.

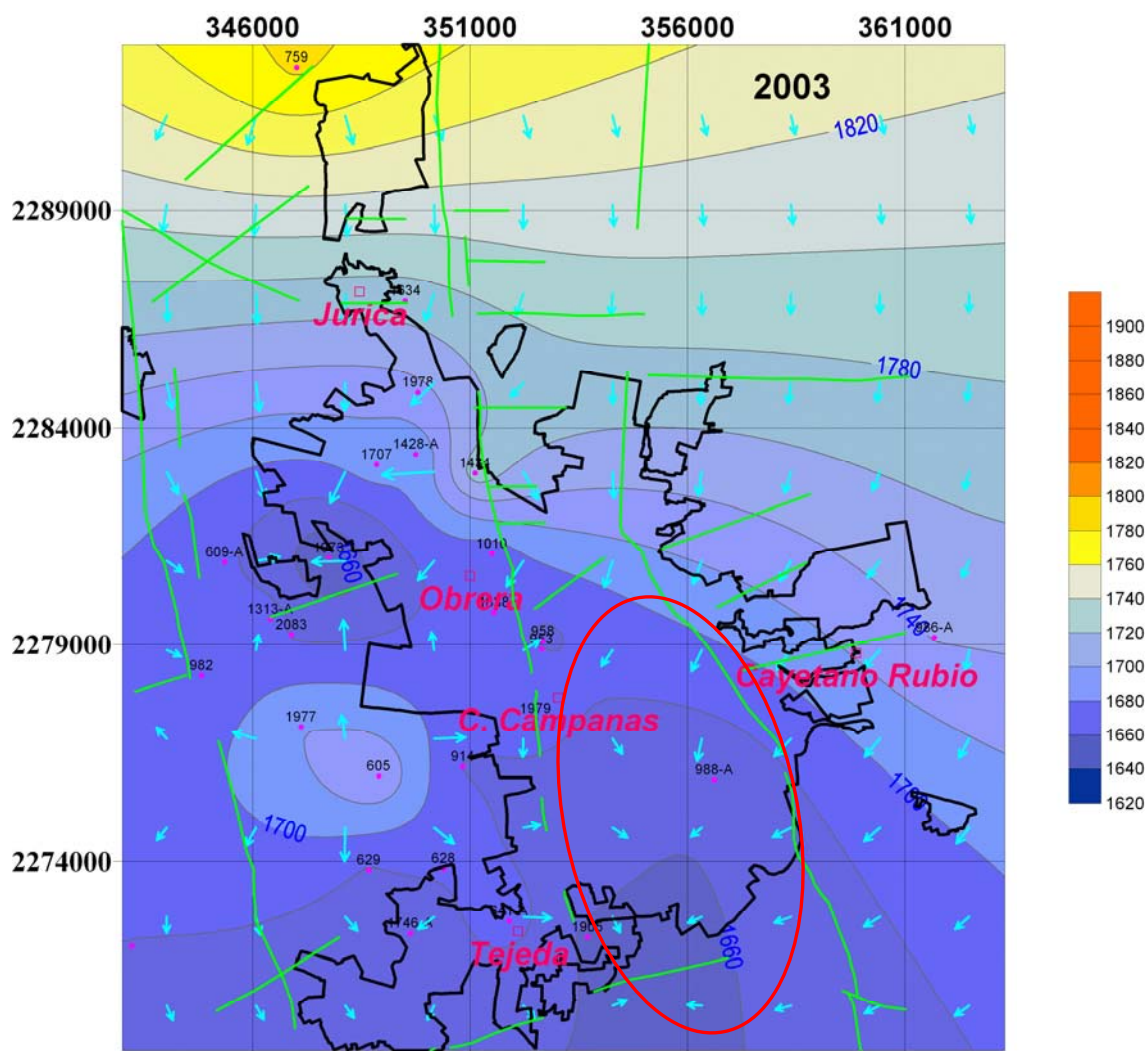


Figura 47. Mapa de Isolíneas para el año 2003. El área delimitada en rojo parece ser un compartimento delimitado por los patrones estructurales al SE del Valle de Querétaro.

Con el objeto de realizar un análisis comparativo entre campañas de piezometría con la implementación de los sensores, se elaboraron dos mapas de Isolíneas (Figuras 48 y 49), que corresponden a la interpolación de datos de Piezometría de 2004 y 2007. Se eliminaron los pozos que no tuvieron una medición consecuente así que se cuenta con 12 pozos homologados en 2004 y 2007 (Tabla 12).

Tabla 12. Pozos con datos consecuentes para las campañas de Piezometría 2003 y 2007, coordenadas UTM Zona 14, NAD 27.

Pozo	No de CNA	UTM (X)	UTM (Y)	2003	2004
EL CERRITO FRACC. 2	629	348670	2273801	1,677.09	1667.92
EJIDO STA. VIRGINIA	653-A	349969	2274204	1,666.97	1704.70
ALBERCA LETICIA	752	358235	2278528	1,797.68	1,791.41
CARNATION No. 2	958	352672	2279083	1,679.19	1687.40
UNIROYAL No. 2	1010	351497	2281098	1,692.39	1687.57
BACHOCO	1434	351110	2282950	1,772.88	1774.23
CEA GARAMBULLO No. 2	1707	348852	2283153	1,710.60	1709.00
A.P. REFORMA AGRARIA	1905	353700	2272250	1,654.00	1667.71
CEA SAN PEDRO MARTIR IV	1973	347750	2281000	1,642.10	1633.35
CEA LOMA BONITA	1978	349800	2284810	1,732.62	1753.02
CEA MENCHACA	1979	352500	2277300	1,686.17	1686.05
STA. MA. MAGDALENA III	2083	346892.57	2279232	1,676.10	1672.75

De los pozos 12 pozos homologados 4 son pozos "testigo", que son los pozos 1905, 1973, 1978 y 1979.

Se interpolo con el método estadístico kriging (Cressie, 1990), para un área definida dentro la zona de estudio de 470 km².

Para el **año 2004** (Figura 48), se conserva la dirección de flujo de 2003, aunque pareciera que cambia de NE hacia al NW y después y finalmente hacia el SW. Esta inferencia se debe considerar con precaución puesto que no se cuenta con pozos de medición al NW del Valle. La zona Industrial conserva un importante depresión de nivel piezométrico y ese conserva este bloque o compartimento delimitado por las fallas y fracturas.

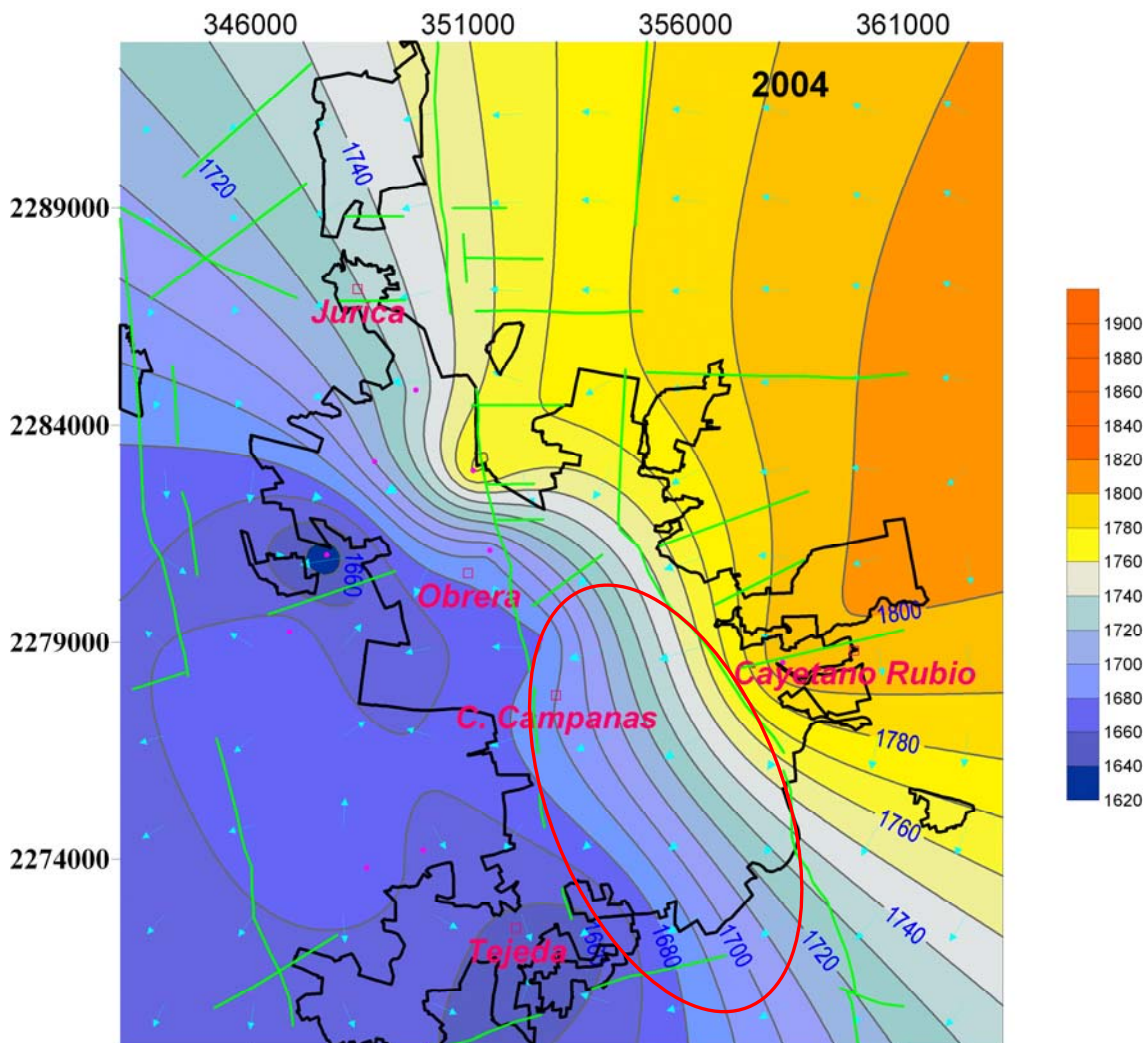


Figura 48. Mapa de Isolíneas para el año 2004, el área delimitada en rojo se infiere ser un compartimento delimitado por los patrones estructurales al SE del Valle de Querétaro.

Para el año **2007** (Figura 49), se conserva la dirección de flujo de 2004, aunque con una tendencia más marcada del NE hacia el centro del Valle.

Se sigue conservando la depresión de la zona Industrial, el pozo Sta. María Virginia (653-A), cambia la configuración de las Isolíneas provocando un alto piezométrico en el SW del Valle de Querétaro. Es de notar que la diferencia entre el nivel piezométrico entre 2004 y 2007 es de 37.73 mts de recuperación lo que pudiese traducir en un error en la medición en la campaña 2004. Puesto que el rango de variación para 2005 y 2006 es del orden de magnitud que en 2007.

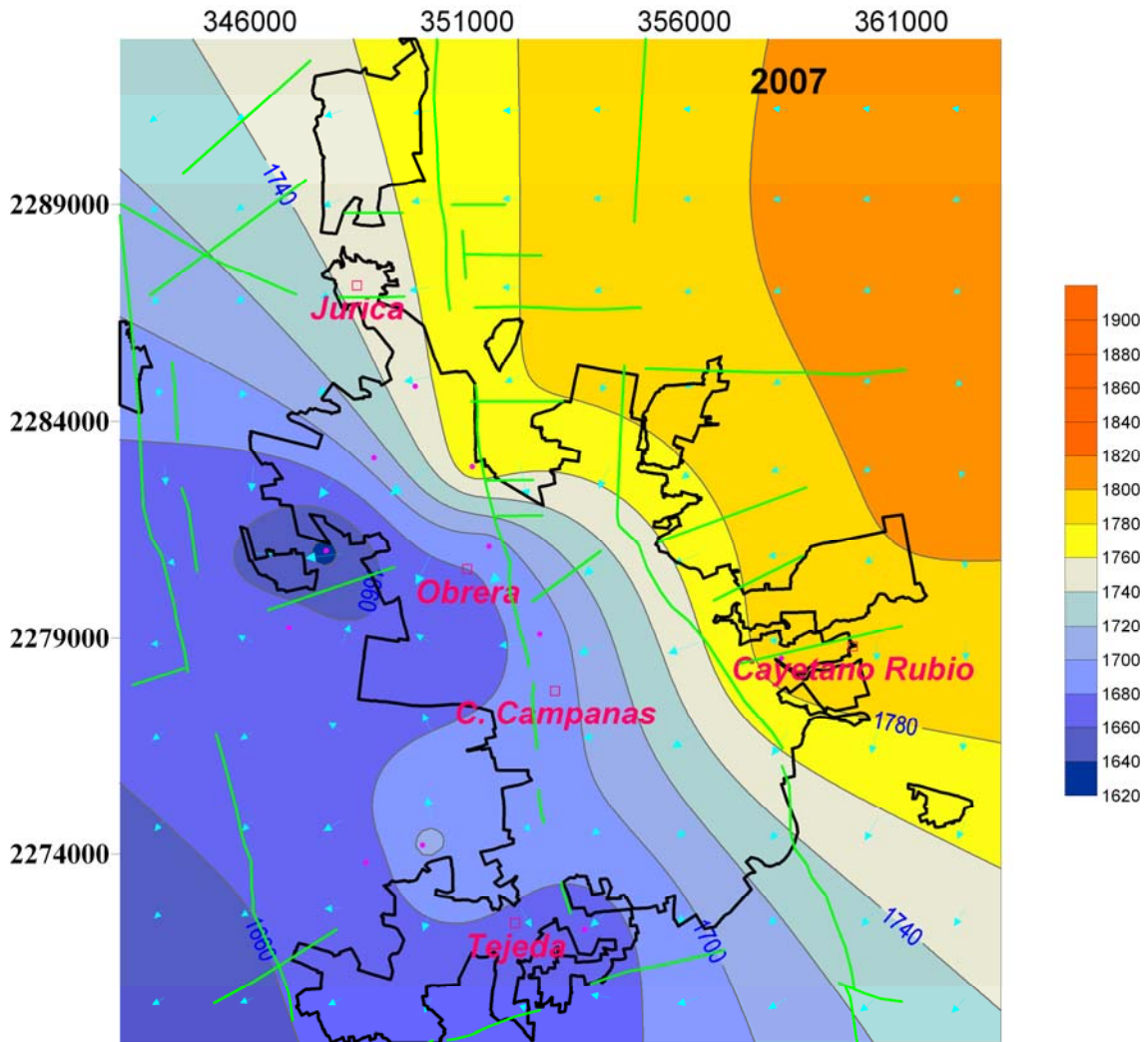


Figura 49. Mapa de Isolíneas para el año 2007.

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se propone una delimitación del área de estudio en 3 zonas (Figura 50), diferenciadas por su elevación piezométrica:

- (1) la zona NE y una porción del NW con niveles de 1910 a 1760,
- (2) la zona intermedia con un alto gradiente hidráulico de 1760 a 1700, y
- (3) la zona de bajo nivel piezométrico al SW del Valle de Querétaro y en la zona Industria de 1700 a 1620, todos los intervalos están dados en msnm de nivel piezométrico.

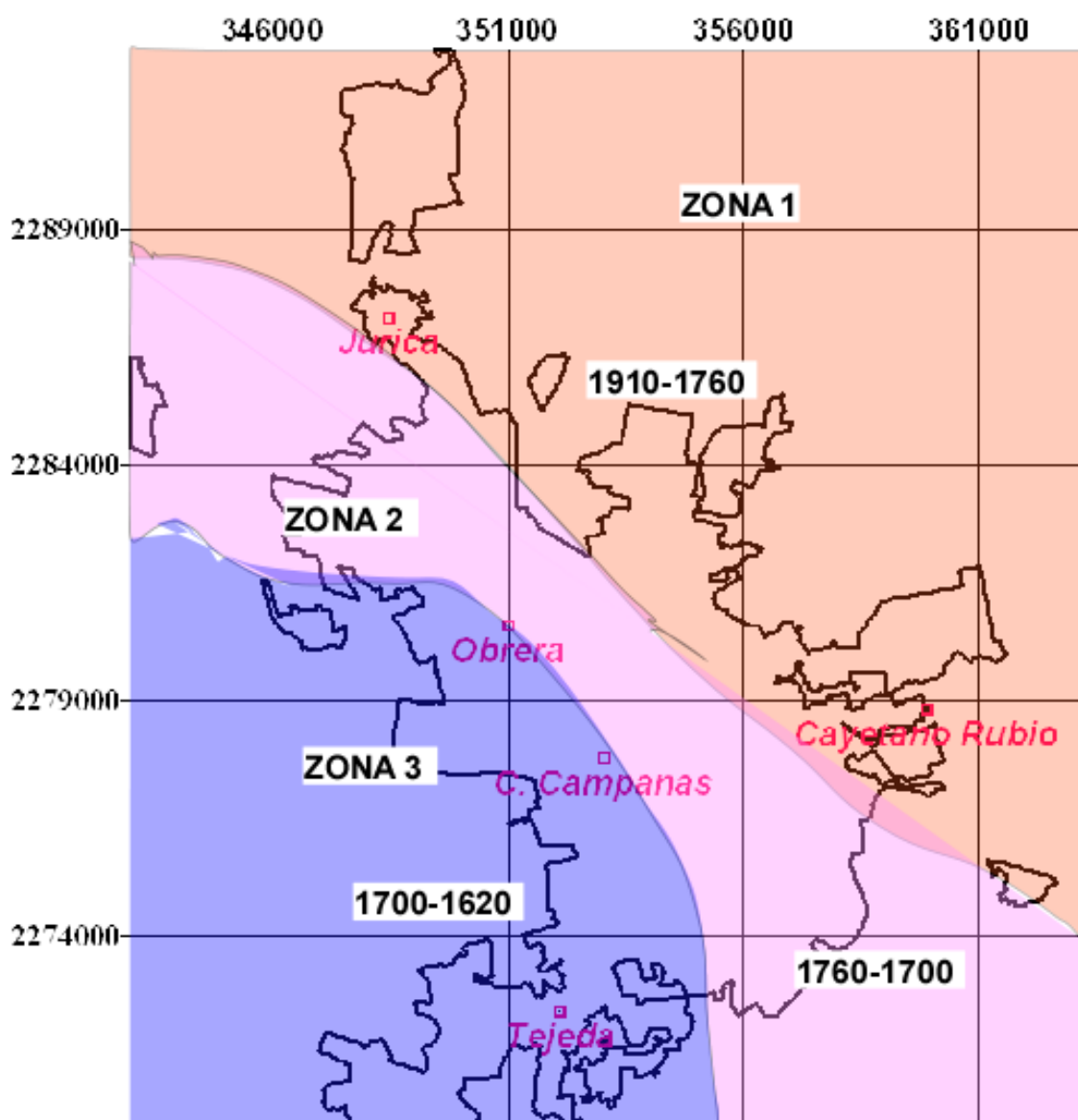


Figura 50. Zonificación propuesta por diferencia de nivel piezométrico, los valores están dados en msnm. Las coordenadas en UTM Zona 14 NAD 27.

5.2 Identificación de Sistemas de Flujo

Una evidente manifestación de un sistema de flujo del tipo local es el que se midió en el Pozo "Testigo Mompani II" (E). En el capítulo 4 de este trabajo se describió una prueba de bombeo (Figura 51) donde se presenta claramente una interferencia de otros pozos en el desarrollo de la evolución de abatimiento. El comportamiento sensible a l bombeo en pozos tan cercanos nos da elementos para inferir un flujo local, y confirma la razón por la cual fue sacado de operación.

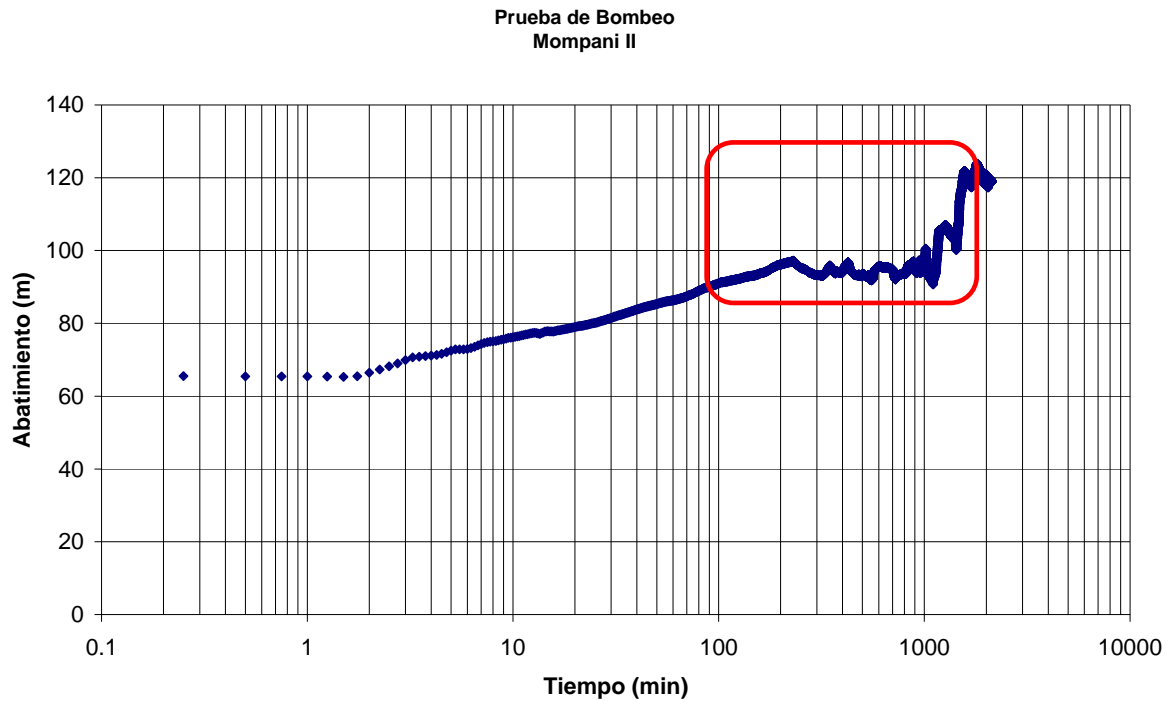


Figura 51. Prueba de Bombeo en el Pozo Mompani II. El área en rojo corresponde a la variación del nivel dinámico del pozo por una posible interferencia con pozos cercanos.

Cabe hacer notar además que en los hidrogramas en tiempo "real" obtenidos con el sensor colocado en Mompani II, se registran 3 eventos que interfieren en el ascenso de su nivel piezométrico, en un periodo de tiempo muy corto (días).

En el evento 1, existe un ascenso de nivel acompañado por una disminución en la temperatura, este evento dura alrededor de 4 días, pasado ese tiempo el nivel piezométrico y la temperatura siguen recuperan su tendencia (figura 52)

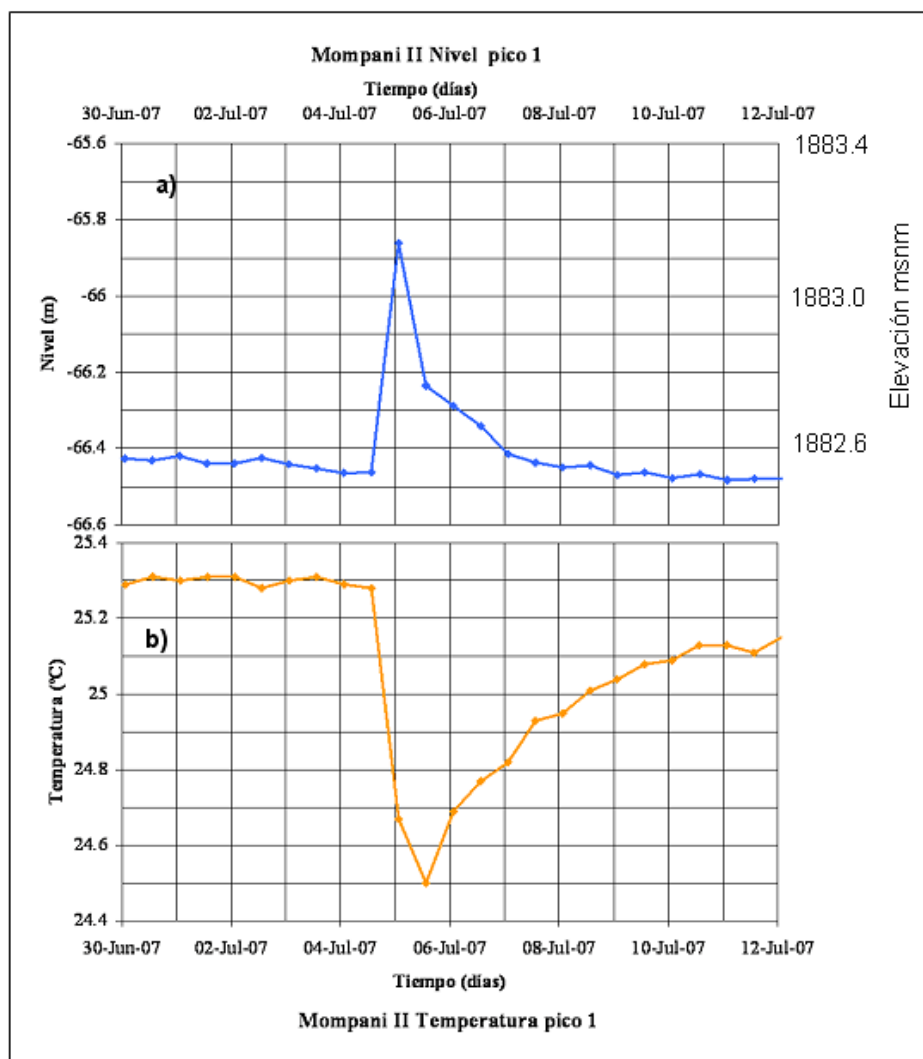


Figura 52. Evento 1 de pozo Mompani II a) Evolución de nivel piezométrico, a) Evolución de temperatura.

De la misma manera, en el evento 2 (Figura 53) y 3 (Figura 54), se tiene registra una recuperación después de un descenso en la temperatura, el evento 2 es una serie de 3 recuperaciones en un lapso de 7 días. El evento 2 dura aproximadamente 3 días hasta que recupera la tendencia general de evolución.

Estos eventos corresponden a una interferencia con otro flujo de menor temperatura que puede ser asociarse con lluvias locales que se infiltren por el ademe del pozo, o a un sistema de flujo superior que alimente ocasionalmente al flujo del pozo Mompani II.

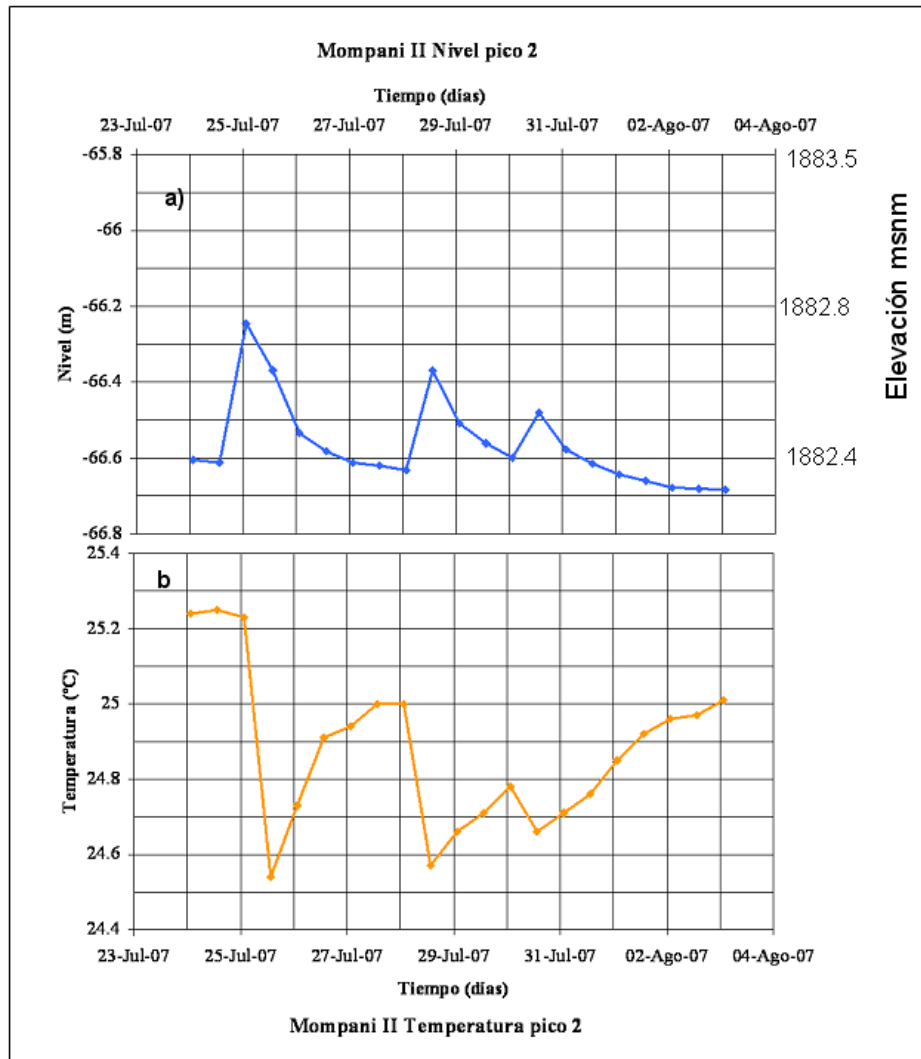


Figura 53. Evento 2 del Pozo Mompani II, a) Evolución Piezométrica, b) Evolución de Temperatura

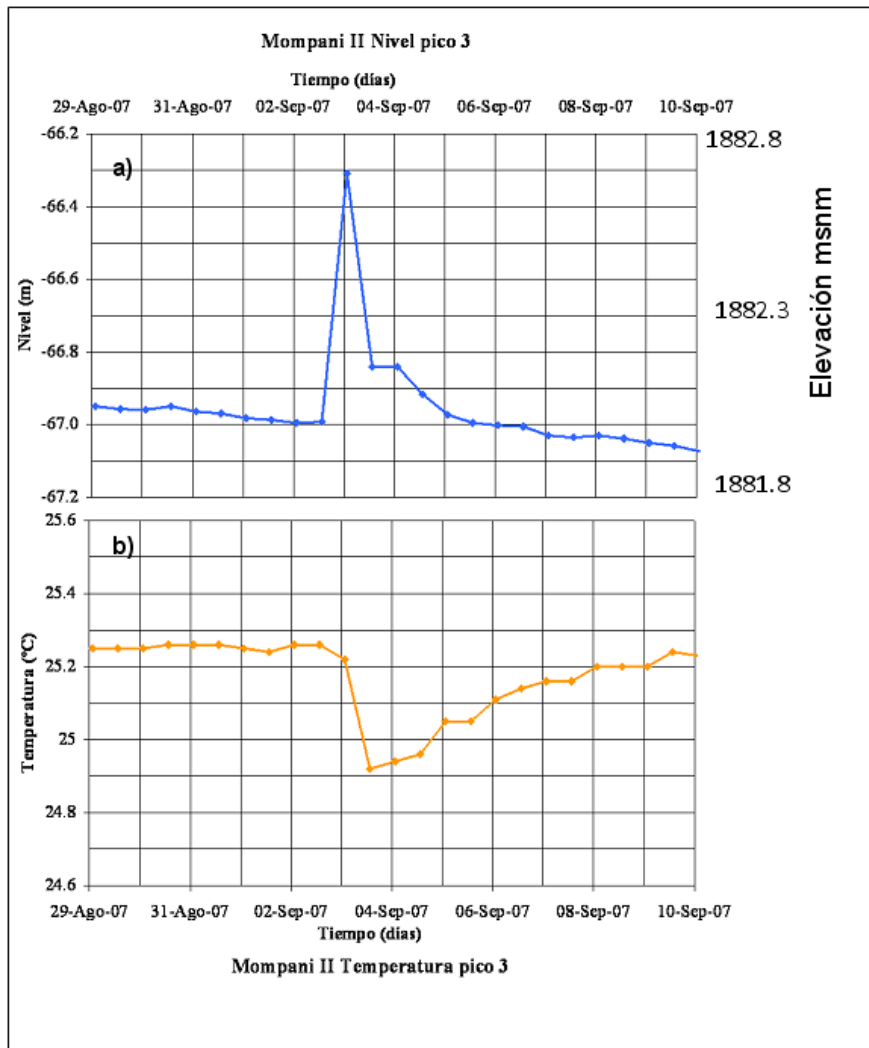


Figura 54. Evento 3 del Pozo Mompani II, a) Evolución Piezométrica, b) Evolución de Temperatura

Capítulo VI

Conclusiones y Perspectivas

6.1 Conclusiones sobre el flujo de agua subterránea en el Valle de Querétaro

El flujo de agua subterránea en el sistema acuífero de Querétaro presenta patrones complejos y todavía no han sido analizadas todas las variables que intervienen en su comportamiento.

A partir del trabajo desarrollado afirma el modelo propuesto como acuífero del tipo "Multicapa", en el cual la variación espacial de sus características litológicas y estructurales condiciona su comportamiento hidráulico.

La metodología implementada permitió identificar y discretizar zonas con diferente comportamiento piezométrico. Se demostró que se deben tomar como estimativos los datos puntuales medidos cada año ó 6 meses por lo la utilización de los sensores para medición en tiempo real son de gran apoyo para una valoración de su representatividad. El análisis de la evolución piezométrica histórica, acompañado de un monitoreo de detalle permite reducir la incertidumbre que se tiene de datos puntuales.

La elaboración de mapas de isolíneas acompañados con rasgos estructurales mayores como fallas y fracturas, permite una mejor interpretación de secciones piezométricas en zonas de alto gradiente hidráulico o variaciones anómalas en el comportamiento del flujo subterráneo.

El monitoreo en tiempo real del Sistema Acuífero del Valle de Querétaro ha sido fundamental para incrementar el conocimiento sobre las distintas zonas y/o compartimentos que lo constituyen y ha permitido distinguir los flujos que coexisten en el sistema.

Se identificaron 3 zonas de acuerdo a su nivel piezométrico, que son delimitadas por rasgos estructurales (Fallas y fracturas): la primera zona se localiza al NE y una porción del NW y SW en donde los niveles piezométricos descienden de 1910 a 1760 msnm, en la segunda zona descienden de 1760 a 1700 msnm, está zona tiene un mayor gradiente hidráulico en comparación con las otras, alrededor de 30 a 10m por kilometro. El descenso en la tercera zona es de 1700 a 1620 msnm.

El análisis de los mapas de variación de la superficie piezométrica de 2003 a 2007, confirma que el sentido del flujo de agua subterránea es hacia el centro del valle proveniente de la zona nororiental. Se identificó una posible salida de agua subterránea al Este de Tejada pues los vectores de flujo coinciden para los cuatro años de medición.

Cabe resaltar que las secciones piezométricas son esquemáticas pues la sección del flujo subterráneo es una aproximación. La interpolación de datos topográficos obtenidos del INEGI genera un total de 3.5×10^6 datos, mientras para sección piezométrica se utilizan solo algunas decenas de datos puntuales. Sin embargo, las secciones piezométricas fueron muy útiles para comprobar la influencia de una falla estructural o cambios en la continuidad de las unidades litológicas.

6.2.1 Perspectivas para la metodología utilizada

Con la metodología implementada se ha mostrado la importancia de considerar las variaciones litológicas del medio al diseñar una red de monitoreo piezométrico ya que permite saber que unidad acuífera se está caracterizando. Por ejemplo, si en un pozo se ha perforado más de un acuífero, el nivel del agua dentro de él corresponderá a un promedio del nivel de energía en cada acuífero perforado. De igual manera se deben evaluar con precaución las pruebas de bombeo que se llevan a cabo en este tipo de sistemas. En pozos multicapa y acuíferos confinados, no es recomendable bombear a un caudal tal que deje sin saturación colgados uno o varias unidades acuíferas puesto que no será posible hacer una interpretación adecuada de los resultados obtenidos.

Bibliografía

Aguirre D.G.J., Ramón Z.F., Pacheco A. F.J., Guzmán S.M., Nieto O.J., 1998, El graben Querétaro, México, observaciones de fallamiento activo. Geos, v. 2, núm. 1, p. 2-7.

Ávila Romero L. E., 2007, Reseña de: "Agua, municipio y sustentabilidad" de Carlos Rodríguez Wallenius", Ra Ximhai, Vol 3 No. 2, 579-582pp

Basañez Loyola Miguel A, 2007, Aporte de agua pluvial al acuífero de la zona metropolitana del Valle de México, captadas en azoteas de edificios, IPN, Centro interdisciplinario de investigaciones y estudios sobre medio Ambiente y desarrollo (CIEMAD), Tesis de Maestría en Ciencias en Medio Ambiente y Desarrollo Integrado, 106p.

Böhnel Harald, Carreón F. D., Correa M. F., Grajales N. J. M., Lounejeva E., Rosales D. Ma., Schaf P., 2003, Guía para escribir Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra. 48p.

Carreón F.D., Cerca M., Luna G.L., Gámez G.F.J., 2005, Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro: Revista Mexicana de Ciencias Geofísicas v. 22, núm. 1, p. 1-18.

Carreón, F. D., Ochoa, G. H., Ortiz, V. I., Barrón, M. I., Gámez, G. F. J., Pérez, V. J., León, R. A., Barajas, N. D. 2009. Monitoreo del Flujo de Agua Subterránea en el Valle de Querétaro. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 59:2.

Castany, G., 1975, Prospección y explotación de las aguas subterráneas, Ediciones Omega, Barcelona, 738 p.

Comisión Estatal de Aguas (CEA), 2002, Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), Estudio integral del recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro: Convenio de Colaboración CEA-UAQ.

CEA (1999). Plan Hidráulico del Estado de Querétaro, Querétaro, Qro., 228p.

CEAQ, 2008, página web, www.ceaqueretaro.gob.mx

Comisión Nacional del Agua, 1996 "Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Pruebas de Bombeo", 158p.

Comisión Nacional de Agua, 2007, "Estadísticas del agua en México, 2007", Secretaría de medio Ambiente y recursos naturales, 263p.

Comisión Nacional de Agua, 2000, "Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle de Querétaro, Edo. de Qro.", 21p.

Custodio E., Llamas M.R., 1996, Hidrología subterránea, Editorial Omega Segunda Edición, 1026p.

Domínguez Fernández J. M., Gómez López J. A., 2001, "Soluciones Tecnológicas para el Control Automático de las Aguas Subterráneas", 7 Simposio De Hidrogeología, Asociación Española de Hidrología Subterránea, Tomo 13, 11p.

Espinoza C. Carlos, 2003, "Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento", Apuntes del curso de Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento, Universidad de Chile, 206p.

INEGI, 2005, "II Censo de Población 2006.

Freeze R.A., Cherry, J.A., 1979, Groundwater, Editorial Prentice Hill.

Fuentes Reyes Edgar, 2000, 'Fundamentos de Geohidrología', UNAM, ENEP Acatlán, Tesis de Licenciatura, 188p.

Franklin W. Schwartz, Hubao Zhang, 2003, Fundamentals of Ground water, John Wiley and Sons, Inc., 583p.

Gallardo Almanza Pablo, 2005, Estimación de la conductividad hidráulica del Acuífero de Querétaro mediante técnicas inversas, UNAM, Tesis de Maestría en Ingeniería Hidráulica , 106p.

González de Vallejo Luis I, 2004, Ingeniería Geológica: Editorial Pearson educación, Madrid 2002

Herrera-Zamarrón, G., Simuta-Champo, R., Bravo-Jácome, A. 2007, Modelo de flujo del agua subterránea y diseño de red de monitoreo para el acuífero del Valle de Querétaro: Segundo Congreso Nacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, México.

Creese Noel, 1990, "The Origins of Kriging", Mathematical Geology, Vol. 22, No. 3, p 239-252.

León Rivera Andrés, 2009, "Metodología para el monitoreo de propiedades mecánicas e hidráulicas del sistema acuífero del Valle de Querétaro, Querétaro.", IPN, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, 95p.

Martínez-Rubio, J., Ruano-Magan, P., 1998, Aguas Subterráneas, Captación y Aprovechamiento. Ed. Promotora General de Servicios, S. A. España, 404 p.

Juárez-Badillo, E., Rico-Rodríguez, A., 2006, Mecánica de Suelos Tomo 3, Flujo de agua en suelos. Ed. Limusa, México, 414 p.

Pérez-Villareal J., 2008, "Caracterización Hidrogeoquímica del Agua Subterránea del Valle de Querétaro para el Estudio de Sistemas de Flujo", UAQ, Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, 93pp.

SARH, 1988, "Sinopsis Geohidrológica del estado de Querétaro", Dirección de Administración y control de sistemas Hidrológicos, México, D.F.

SEMARNAT, 2000, NOM-011CNA-2000. Conservación del recurso Agua que establece las especificaciones y método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Steven E. Ingerbritsen, Ward E. Sanford, Christopher E. Neuzil, 2006, Groundwater in Geologic Processes, Cambridge University Press 1998, 536p.

Todd-Keith D., Mays-W. L., 2005, "Groundwater Hydrology", Edit. John Wiley & Sons, Inc., Tercera Edición, 636p.

Villanueva Martínez, M, Iglesias López A., 1994, "Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo", 208p

Waterloo Hydrogeologic, 2005, Schlumberger Water Services, Software Aquifer Test. Ficha Técnica, USA, 5 p.