



METODOLOGIA PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DE LA EXTRACCION DE AGUA SUBTERRANEA EN LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE.

Alfonso Alvarez Manilla Aceves
Paul Garnica Anguas
Guadalupe E. Itandehui Martínez Peña

**Publicación Técnica No. 172
Sanfandila, Qro, 2001**

SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**METODOLOGIA PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA
DE LA EXTRACCION DE AGUA SUBTERRANEA
EN LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE.**

Alfonso Alvarez Manilla Aceves
Paul Garnica Anguas
Guadalupe E. Itandehui Martínez Peña

Publicación Técnica No. 172
Sanfandila, Qro, 2001

El presente trabajo ha sido elaborado en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores Alfonso Alvarez Manilla Aceves, Paul Garnica Anguas y Guadalupe E. Itandehui Martínez Peña.

Índice.

Lista de figuras.	IV
Lista de tablas	VI
Resumen	VII
Abstract.	IX
Resumen ejecutivo.	XI
Introducción.	1

CAPÍTULO 1 Estado actual del conocimiento del hundimiento y agrietamiento.

1.1	Antecedentes.	3
1.2	Hundimiento regional y local por fenómenos naturales.	4
1.3	Hundimiento por procesos químicos.	4
1.4	Hundimiento por dinámica terrestre.	4
1.5	Hundimiento por las actividades antropogénicas.	4
1.5.1	Hundimiento por la extracción de gas y petróleo.	5
1.5.2	Hundimiento por la extracción de calor.	5
1.5.3	Hundimiento por la extracción de minerales.	5
1.5.4	Hundimiento por la extracción de agua subterránea.	5

CAPÍTULO 2 Geohidrología y su relación a la mecánica de suelos, concepto de esfuerzo efectivo.

2.1	Análisis de la información geohidrológica disponible.	9
2.1.1	Elevación del nivel estático a un tiempo " t_0 " como condición inicial.	9
2.1.2	Elevación del nivel estático a un tiempo " $t_0 + \Delta t$ " como condición final.	10
2.1.3	Evolución del nivel estático " $-\Delta\delta h$ " para un período de esfuerzos " Δt ".	10
2.1.4	Incremento del esfuerzo efectivo ($\Delta\sigma$) para el período de esfuerzos " Δt ".	10
2.2	Generalidades del esfuerzo efectivo y su relación con la declinación del nivel estático.	11
2.3	Esfuerzos en un medio saturado con flujo descendente.	12

CAPÍTULO 3 Parámetros mecánicos e hidráulicos, el laboratorio de mecánica de suelos y rocas.

3.1	La compresibilidad, parámetro mecánico transitorio.	15
3.2	Parámetros de "compresibilidad" (a_v) para medios porosos y fracturados.	15
3.3	Combinación entre la gráficas de compresibilidad e hidrógrafos.	17

CAPÍTULO 4	Ecuación constitutiva para simular el hundimiento, su solución.	
4.1	Ecuación constitutiva para el cálculo del hundimiento regional por declinación del nivel estático.	19
4.2	Solución a la ecuación de flujo de deformación.	23
4.3	Modelo computacional para determinar la distribución del hundimiento en un estrato compresible debido al abatimiento de la superficie piezométrica.	25
4.4	Generalidades del programa de computo para simulación del hundimiento.	28
CAPÍTULO 5	Modelación. Casos de historia.	
5.1	Deformaciones en las pistas del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.	29
5.1.1	Abatimiento y Hundimiento, período entre los años 1990-1993.	31
5.1.2	Abatimiento y Hundimiento, período entre los años 1990-2000	33
5.2	Deformaciones en la pista del Aeropuerto Internacional del Bajío, León, Gto.	36
5.3	Crecimiento de fallas, Caso de historia Anillo Periférico 3, Aguascalientes, Ags.	42
Conclusiones		47
Bibliografía		49

Lista de figuras.

Figura 1.1	Proceso de deformación por flujo hidrodinámico, A Manilla A., 1998.	8
Figura 2.1	Variación en el tiempo de las cargas hidráulicas.	10
Figura 2.2	Estrato saturado y distribución de esfuerzos.	11
Figura 2.3	Nuevo estado de esfuerzos de un estrato saturado por abatimiento del nivel estático, flujo descendente.	12
Figura 3.1	Variación de la relación deformación/esfuerzo según la orientación de las fracturas.	16
Figura 3.2	Gráfica de la compresibilidad en un medio poroso.	17
Figura 3.3	Relación entre el abatimiento del nivel estático y el incremento del esfuerzo efectivo.	18
Figura 4.1	Esquema de las fases del fluido y sólida.	19
Figura 4.2	Diagrama de flujo, manera de suministrar los datos para el cálculo de flujo y deformación.	26
Figura 4.3	Mallado a base de renglones y columnas para calcular el asentamiento en función de la distribución de los pozos de bombeo y recarga.	27
Figura 5.1	Zonificación Geotécnica según el Subcomité de Normas, 1987.	29
Figura 5.2	Distribución de las Unidades Geológicas en la región del aeropuerto.	30
Figura 5.3	Subsistemas Acuíferos en la zona del aeropuerto.	30
Figura 5.4	Compresibilidad e hidrógrafo del Pozo 238 de la DGOCH.	31
Figura 5.5	Abatimiento del nivel del agua en el período de 1990 a 1993.	32

Figura 5.6	Hundimiento por abatimiento del nivel del agua, período de 1990 a 1993.	33
Figura 5.7	Abatimiento del nivel del agua para el período de 1990 a 2000.	34
Figura 5.8	Hundimiento por abatimiento del nivel del agua, período de 1990 a 2000.	35
Figura 5.9	Gruesa carpeta asfáltica producto de la renivelación.	36
Figura 5.10	Mapa Geológico del Valle de León-Silao, Gto.	37
Figura 5.11	Columna estratigráfica carácter geohidrológico de cada una de ellas.	37
Figura 5.12	Sección estructural NNW-SSE del Valle de León.	38
Figura 5.13	Curva de compresibilidad para la toba Tsta.	38
Figura 5.14	Localización de la pista en el cono de abatimiento nordeste.	39
Figura 5.15	Abatimiento del nivel del agua Aeropuerto del Bajío, período de 1990 a 2000.	40
Figura 5.16	Hundimiento para la pista del Aeropuerto del Bajío, período de 1990 a 2000.	40
Figura 5.17	Vistas hacia el SSE y NNW de la pista, su hundimiento.	41
Figura 5.18	Valle de Aguascalientes, fosa tectónica rellena con lavas y granulares.	42
Figura 5.19	Modelo conceptual del funcionamiento del acuífero.	42
Figura 5.20	Fase 3, "Crecimiento de Fallas", Anillo Periférico 3, Aguascalientes, Ags.	43
Figura 5.21	Corte litológico y lugares del esfuerzo efectivo y presión hidrostática.	44
Figura 5.22	Abatimiento en 4745 días de bombeo (1986-1999) Anillo Periférico 3, Aguascalientes, Ags.	45
Figura 5.23	Configuración del hundimiento (1986-1999), Anillo Periférico 3, Aguascalientes, Ags.	45
Figura 5.24	Caracterización de una falla de tensión con sísmica de refracción.	46

Lista de tablas.

Tabla 4.1	Datos de alimentación al programa de simulación de hundimiento.	27
Tabla 5.1	Parámetros mecánicos e hidráulicos para el cálculo del hundimiento regional.	39
Tabla 5.2	Variación del nivel estático y del esfuerzo efectivo hasta el 2005.	43

Resumen.

En la última década el fenómeno de subsidencia se ha convertido en una de las más frecuentes manifestaciones superficiales de la sobreexplotación de algún recurso natural como pueden ser: los hidrocarburos, el vapor, los minerales o el agua subterránea.

La deformación por flujo hidrodinámico se puede dar tanto en los medios fracturados en rocas, o bien en los poros de los materiales granulares, ambos contribuyen en alguna medida.

En esta primera publicación los efectos de hundimiento por sobreexplotación de los acuíferos y su impacto en la infraestructura del transporte son descritos en detalle. Se presentan los datos de las observaciones y mediciones realizadas en carreteras, vías de ferrocarril y pistas de aterrizaje; como ejemplos se pueden nombrar el Segundo Anillo Periférico de la Ciudad de Aguascalientes, Ags; el tramo Salamanca, Gto., de la vía de ferrocarril México-Guadalajara y los aeropuertos internacionales de El Bajío en Guanajuato y el Benito Juárez en la Ciudad de México respectivamente.

Palabras clave: nivel estático, nivel piezométrico, nivel freático, fenómenos transitorios, flujo hidrodinámico, deformación, compresibilidad, hundimiento, grietas y fallas de tensión, franjas de influencia.

Abstract.

Last years the inherent phenomena called “subsidence” owing to great volume extraction of any kind of fluids and some solids become spectacular.

Whatever fractures in host rock or porous in granular material, if there is a depletion at the reservoir (hydrocarbon, gas, steam and mainly groundwater) appears transient effects in three phases process: subsidence, tension fissure and growth faults.

This document explains elaborately the whole process and its impact in the infrastructure of the transport, some examples are shown as: the highway from Aguascalientes City to Loreto Village; the railroad at Salamanca City in Guanajuato state and the main cases: International Airports of “El Bajío” and “México City”.

Key words: water table, phreatic level, piezometric head, depletion, transient flow, compressibility, subsidence, collapse, tension fissure, growth faults.

Resumen Ejecutivo.

La infraestructura del transporte no ha sido ajena a los impactos generados por la sobreexplotación del agua subterránea, la extracción de algún otro tipo de fluido como el gas, hidrocarburos, vapor o bien, de algún sólido en los que se encuentran el carbón u otro mineral ya sea o no metálico.

En los suburbios de Houston y Dallas en el Estado de Texas, la extracción de gas y petróleo ha generado el hundimiento de tanto de la ciudad como de la pista de aterrizaje en el aeropuerto respectivamente así como la presencia de grietas y fallas que ocasionan fuertes erogaciones en mantenimiento y conservación a toda la infraestructura.

Un caso muy peculiar es el de un pequeño valle intermontano en Tejamaniles, Campo Geotérmico de Los Azufres, estado de Michoacán, en donde a través de 6 años de extracción de vapor para generar electricidad la subsidencia medida es de 16 centímetros.

Los casos más espectaculares se tienen en las zonas con una gran cantidad de habitantes y de gran producción agrícola donde año con año crece el déficit en el almacenamiento del acuífero debido a la sobreexplotación.

Mediante la evaluación geohidrológica y el seguimiento del desarrollo de un sistema acuífero se puede especificar la relación que guarda el abatimiento del nivel del agua (pérdida de la presión de poro) con el incremento del esfuerzo efectivo y como tal proceso conduce a los geomateriales a un estado más denso por la pérdida de la sustentación hidráulica.

Las fases de la deformación por flujo hidrodinámico fueron establecidas por Hunt E. R. en 1984 y completadas por Alvarez Manilla A. A. en 1996, siendo ellas: Fase 1, Hundimiento por abatimiento del nivel del agua; Fase 2, Generación de grietas de tensión y Fase 3, Crecimiento de fallas de tensión.

Con las pruebas mecánicas de laboratorio tanto para suelos como para rocas se determinan los parámetros de compresibilidad, módulos elásticos, ángulo de fricción interna, cohesión, pesos volumétricos, etc., los que son usados para el cálculo del hundimiento.

Juárez Badillo E., en 1985 definió las ecuaciones para su "Principio Natural de Proporcionalidad" con las que de una manera sencilla se puede calcular el tiempo en que se llevará cabo una determinada magnitud de hundimiento; Mientras que Alvarez Manilla A. A., en 1998 desarrolló la ecuación constitutiva que relaciona de manera directa al flujo hidrodinámico y la deformación y que junto con el algoritmo propuesto por King M. J., en 1984 se escribió el programa el cálculo de

hundimiento debido a la sobreexplotación del acuífero en tres dimensiones para un medio estratificado.

Con objeto de que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes prepare y programe el mantenimiento de su infraestructura debido a daños ocasionados por la sobreexplotación de los acuíferos se ha desarrollado esta *“Metodología para determinar la influencia de la extracción de agua subterránea en la infraestructura del transporte”*.

Cabe hacer notar que nunca habrá pérdida de vidas debido al fenómeno de subsidencia, pero, los gastos generados para la reparación, reconstrucción, mantenimiento y conservación serán altos.

En lo que respecta al impacto generado en las pistas de aterrizaje en aeropuertos como el “Benito Juárez” en la Ciudad de México o el de “El Bajío” en León Guanajuato, solamente se podrá llevar a cabo medidas de mitigación a través de la recarga artificial.

Actualmente en el Área de Geotécnia Ambiental de la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte se llevan cabo los modelos numéricos para conocer la respuesta de los acuíferos, según sus características de permeabilidad ante los procesos de infiltración.

La metodología puede resumirse en: conocer la distribución de las Unidades Geológicas, establecer la columna geológica, caracterizar cada estrato desde los puntos de vista hidráulico y mecánico, hacer el balance de agua subterránea, conocer el ritmo de abatimiento, implementar el modelo y desarrollar mapas de riesgo geotécnico potencial generado por la sobreexplotación de los acuíferos.

Se presentan algunos ejemplos prácticos como son el tercer anillo periférico de la Ciudad de Aguascalientes, Ags; el tramo Salamanca, Gto. de la vía de ferrocarril México-Guadalajara y las pistas de aterrizaje y despegue de los aeropuertos internacionales de “El Bajío” en Guanajuato y “Benito Juárez” en la Ciudad de México.

Introducción.

De manera casi imperceptible los efectos de la sobreexplotación de acuíferos han ocasionado severos daños a la infraestructura del transporte, tanto a carreteras, vías de ferrocarril como pistas de aterrizaje y despegue; generando gastos considerables en mantenimiento y conservación; por ello, se ha desarrollado esta ***“Metodología para determinar la influencia de la extracción de agua subterránea en la infraestructura del transporte”***.

En el Capítulo 1 se describen el estado actual del conocimiento y algunas experiencias acerca del fenómeno de agrietamiento. Los conceptos de geología, geohidrología, mecánica de suelos, esfuerzos efectivos presiones de poro y cleft se presentan en el Capítulo 2. En el Capítulo 3 se hace una descripción de la forma para obtener los parámetros mecánicos e hidráulicos en el laboratorio. El Capítulo 4 se desarrolla la ecuación constitutiva para simular el hundimiento y se da el diagrama de flujo para el modelo computacional. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan diversos casos de historia que ejemplifican los problemas de la sobreexplotación de acuíferos en carreteras, vías de ferrocarril y pistas de aterrizaje y despegue.

Capítulo 1.

Estado actual del conocimiento del hundimiento y agrietamiento.

1.1 *Antecedentes.*

La mayor parte de la infraestructura del transporte: vías de ferrocarril, carreteras y pistas aéreas experimentan los efectos del cambio de esfuerzo efectivo debidos al fenómeno acoplado de flujo hidrodinámico y deformación.

En las franjas de gradientes hidráulicos muy tendidos, ubicados en la periferia de los conos de abatimiento, aparecen las diferentes fases de la deformación: hundimiento, agrietamiento y fallamiento.

Quien ha viajado por las diferentes carreteras en los valles, habrá notado una serie de “brincos y desniveles” en diversos tramos, así como al observar el horizonte en cualquiera de las pistas de aterrizaje y despegue del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México se percata de que la pista no está horizontal y que a demás, manifiesta una serie de ondulaciones debidas al hundimiento que genera el sobrepeso de las carpetas de asfalto que se han acumulado durante los trabajos de rehabilitación.

Siempre que se hace la extracción de algún fluido del subsuelo, vapor, gas, petróleo, agua o de sólidos, se cambia el estado de esfuerzos, si se tiene parte de la infraestructura del transporte en la zona de influencia inevitablemente sufrirá el deterioro, por ello se desarrolló esta metodología para reconocer las zonas de riesgo potencial y se pueda mitigar los efectos.

1.2 Hundimiento regional y local por fenómenos naturales.

El hundimiento regional puede darse principalmente por el tectonismo, terremotos y la disolución de rocas o agente cementante.

La disolución del agente cementante produce el colapso por tubificación o dispersión; procesos que suceden al infiltrarse el agua de lluvia y disolver las sales minerales (Carbonato de Calcio) presente en las rocas calizas.

La vibración por el efecto de un terremoto y procesos tectónicos induce el acomodamiento de granos del suelo y el movimiento vertical de masas de roca a lo largo de los planos de falla.

1.3 Hundimiento por procesos químicos.

El hundimiento local en carreteras y vías de ferrocarril sucede cuando por situaciones inesperadas surge algún derrame de sosa cáustica, ácido sulfúrico, ácido clorídrico o ácido nítrico entre otros, disolviendo las sales minerales y que generan el colapso.

1.4 Hundimiento por dinámica terrestre.

La isostasia, fenómeno físico que ayuda a equilibrar las masas de la tierra a través del hundimiento y alzamiento por balance de fuerzas en las cuencas sedimentarias produce el fenómeno de hundimiento regional, la infraestructura del transporte localizada en los límites se ve afectada (Penínsulas de Yucatán y Baja California).

1.5 Hundimiento por las actividades antropogénicas.

Las actividades del hombre que tienen que ver con la explotación de algún recurso natural como lo son el gas, petróleo, vapor, minerales y el agua subterránea; generan los cambios en las condiciones del campo de esfuerzos, resultando las deformaciones en superficie tales como: hundimiento, agrietamiento y fallamiento.

1.5.1 Hundimiento por la extracción de gas y petróleo.

Por la profundidad a la cual se lleva a cabo la extracción del gas y petróleo, mucho más grande que la del agua, genera que las presiones y esfuerzos envueltos sean extremadamente grandes.

Las deformaciones obedecen tanto a la ruptura de granos como a la disminución de la presión neutral por drenado del fluido, desembocando en un reacomodo de los líticos y granos de suelo.

1.5.2 Hundimiento por la extracción de vapor.

La extracción del vapor resulta en la reducción de la presión de poro, transfiriendo la presión al esqueleto de los materiales granulares y líticos del estrato.

Como los condensados en los campos geotérmicos se vuelven a inyectar al subsuelo, los fenómenos de hundimiento son menos severos que en cualesquiera de los otros ámbitos.

En el Campo Geotérmico de Tejamaniles -Los Azufres, Michoacán, Estados Unidos Mexicanos- se ha medido un hundimiento de 16 cm por extracción de vapor desde el inicio de operaciones de este campo.

1.5.3 Hundimiento por la extracción de minerales.

La extracción de minerales metálicos y no metálicos usualmente se desarrolla en rocas, por lo que resulta en un efecto de colapso súbito durante la operación de las minas y algunas veces, muchos años después.

Existen tres formas de colapso en minas: falla de techo, falla de pilar y falla en la cimentación del pilar. En la infraestructura del transporte se ha presentado en caminos vecinales de Real del Monte y Pachuca y en la carretera de San Carlos a Piedras Negras, Coah., zona donde lleva a cabo sus trabajos la Empresa Minera Carbonífera de Río Escondido.

1.5.4 Hundimiento por la extracción de agua subterránea.

Los sitios donde se construyen las aeropistas son los valles, se orientan de acuerdo a las condiciones de viento sean favorables para las maniobras de aterrizaje y despegue.

Las vías de ferrocarril y carreteras generalmente cruzan los valles por el centro, en ocasiones construyendo terraplenes para evitar la inundación en época de lluvias.

Los asentamientos humanos generalmente se hacen en la cercanía de las fuentes de agua como son: ríos y lagos. En los valles se perforan los pozos que abastecen de agua a los diferentes ámbitos del hombre: potable, agrícola, ganadero, industrial y recreo.

Por un deficiente desarrollo del acuífero, la explosión demográfica, la falta de planeación urbana en el desarrollo de una región; siempre la extracción excede a la recarga, produciendo los conos de abatimiento donde suceden las tres fases de la deformación (Hunt E. R., 1990 y A Manilla A. A., 1998):

- Fase 1: Hundimiento por abatimiento del nivel del agua,
- Fase 2: Generación de grietas, y
- Fase 3: Crecimiento de grietas.

El drenado de un importante espesor de la formación acuífera ocasiona la reducción de la presión de poro y el incremento del esfuerzo efectivo, llevando tanto al suelo como a las rocas a un incremento de su propio peso.

Cabe recordar que por el “Principio de Arquímedes”, un cuerpo sumergido en el agua recibe un empuje igual al de su propio peso, por ejemplo, si el nivel del agua declina 10 metros, el incremento del esfuerzo efectivo será de 10 t/m^2 de acuerdo a la ley de esfuerzos efectivos de Terzaghi.

La magnitud de hundimiento es función directa del espesor drenado, tipo de materiales geológicos y de sus propiedades mecánicas. Para estratos de arenas limpias, la compresión es inmediata, mientras que para las arcillas y limos es muy lenta, dependiendo de su permeabilidad. El proceso de deformación por flujo hidrodinámico fue propuesto por A Manilla A., 1998 y se muestra de manera clara en la figura 1.1.

Para describir el proceso de la deformación hay que considerar una formación acuífera descansando sobre un basamento irregular de roca cristalina impermeable, el nivel estático (NE) en un tiempo inicial t_0 que coincide con la superficie del terreno natural.

A un tiempo t_1 aparecen los pobladores y se perfora un pozo de donde se extrae un gasto “Q” para satisfacer sus necesidades, el nivel estático cambia a la posición NE1, el cual es recuperable a NE simplemente por la recarga del agua de lluvia.

Al aumentar la demanda de agua en un tiempo t_2 , se rompe el equilibrio y la extracción “Ex” excede a la recarga “Rx”, por lo que se provoca un abatimiento “s” que da origen a un cambio de almacenamiento negativo “ $-\Delta S$ ” en la ecuación de balance de masa.

Cabe recordar que el agua se puede considerar incompresible y que el aire si lo es, por lo que el drenado del acuífero "s" ocasiona la compresión de los poros rellenos de aire que antes estaban ocupados por agua, dando paso a la primera Fase de la Deformación que es el Hundimiento " $\Delta\delta$ " en el tiempo " t_3 ".

El suelo y las rocas soportan muy bien las solicitaciones de compresión pero son muy frágiles para las tensiones, por lo cual a un tiempo " t_4 ", como "Fase 2" de la deformación, se "Generan Grietas de Tensión" que aparecen en los puntos de inflexión de las franjas de gradiente hidráulico muy tendido y periferia del conoide de abatimiento.

Para un tiempo " t_4 " la extracción sigue excediendo a la recarga, el nivel se abate aun más, alcanzando casi la roca basal, las grietas primigenias se azolvan dando origen a la "Fase 3" que es el "Crecimiento de Fallas", en este tiempo parecen nuevas grietas debido tanto a la topografía del basamento como a la condición actual de la superficie piezométrica, a la vez, se han perforado más pozos acentuándose las deformaciones.

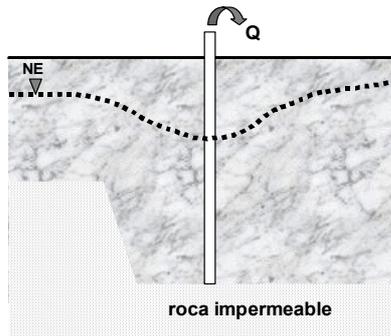
El hundimiento regional genera inundaciones durante el período de lluvias, cambia las pendientes y por lo general ya no sale el agua del valle, convirtiendo al valle en una cuenca endorreica.

Las deformaciones son de acuerdo con las características mecánicas e hidráulicas de los materiales geológicos involucrados.



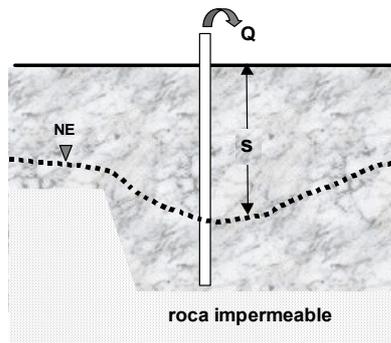
t_0

Formación Acuífera conformada por materiales granulares, el nivel piezométrico coincide con la superficie del terreno, el basamento geohidrológico no es completamente plano.



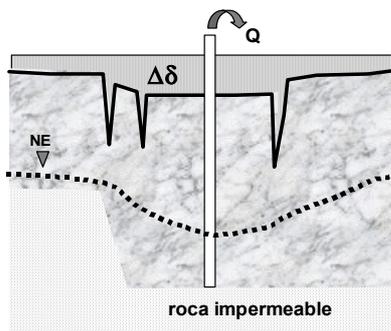
t_1

Perforación de pozos y extracción de un caudal "Q" que provoca la declinación del nivel piezométrico



t_2

El caudal de extracción "Q" de extracción "Ex" es mucho mayor al de recarga "Rx" ocasionando un almacenamiento negativo y drenado del acuífero (s); disminución de la presión de poro.



t_t

El abatimiento de la superficie piezométrica, la disminución de la presión de poro y la topografía del basamento contribuyen a la deformación "Δδ" que ocasiona:
Fase 1. Hundimiento.
Fase 2. Generación de grietas, y
Fase 3. Crecimiento de fallas.

Figura 1.1 Proceso de deformación por flujo hidrodinámico, A Manilla A., 1998.

Capítulo 2.

Geohidrología y su relación a la mecánica de suelos, concepto de esfuerzo efectivo.

2.1 *Análisis de la información geohidrológica disponible.*

La principal causa de la Generación de Grietas de Tensión (Fase 2) y Crecimiento de Fallas (Fase 3) es la pérdida de la presión de poro (u) debido al drenado de importantes espesores ($-\Delta\delta h$) de la formación acuífera al variar las condiciones de frontera, como son la recarga y extracción.

Con el conocimiento que se tiene de las propiedades hidráulicas de los estratos constitutivos del subsuelo y de su distribución, se agrupan en Unidades y Zonas Geohidrológicas.

Es de mucha ayuda cuando en un sitio de interés ya se tiene la Zonificación Geohidrológica, la cual permite visualizar de manera rápida las áreas de recarga, aquellas que conducen solamente agua superficial, etc. Las Unidades Geohidrológicas son indicativas de la compresibilidad de los estratos y su porcentaje de aportación a la deformación entre otros.

Entre los mapas que se pueden formar, analizar o desarrollar para determinar las zonas de riesgo potencial donde aparecerán las fases de la deformación se tiene a las configuraciones de: profundidad, elevación y evolución del nivel estático.

2.1.1 *Elevación del nivel estático a un tiempo “ t_0 ” como condición inicial.*

Es muy difícil tener el seguimiento del desarrollo de un acuífero, por ello la configuración más antigua que se tenga de la elevación al nivel estático servirá como “condición inicial” para el análisis y calibración del modelo, esta condición recibe el nombre de elevación del nivel estático a un tiempo “ t_0 ”, ver la figura 2.1.

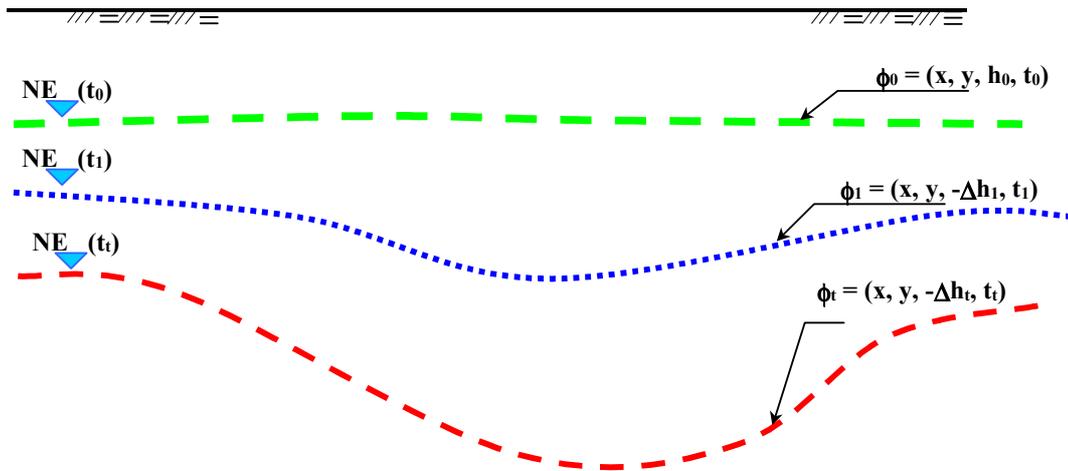


Figura 2.1 Variación en el tiempo de las cargas hidráulicas.

2.1.2 Elevación del nivel estático a un tiempo “ $t_0 + \Delta t$ ” como condición final.

Tanto en sección como en planta será posible visualizar la forma de la superficie del nivel del agua para un tiempo posterior, “ t_i ”, la última configuración que se tenga puede ser tomada como condición final denominándosele tiempo “ $t_0 + \Delta t$ ”, tal y como se muestra en la figura 2.1.

2.1.3 Evolución del nivel estático “ $-\Delta\delta h$ ” para un período de esfuerzos “ Δt ”.

Al comparar y sumar de manera algebraica las configuraciones de profundidad al nivel estático para los tiempos “ t_0 ” menos “ $t_0 + \Delta t$ ” se obtiene la configuración de la evolución del nivel estático, la cual muestra en planta la variación de la velocidad de abatimiento de las cargas hidráulicas “ $-\Delta\delta h$ ”, también se muestra él o los conos de abatimiento, que corresponden a áreas donde se presentarán las principales deformaciones.

2.1.4 Incremento del esfuerzo efectivo ($\Delta\sigma$) para el período de esfuerzos “ Δt ”.

Una vez establecida la columna geológica y determinada la posición del nivel estático para las condiciones inicial, intermedias o final, se puede hacer el perfil, sección o configuración del incremento del esfuerzo efectivo ($\Delta\sigma$) por abatimiento del nivel estático ($-\Delta\delta h$) en un período de tiempo “ Δt ”.

Ya se describió en el Capítulo 1 que con los incrementos de esfuerzo efectivo, todos los geomateriales se deforman.

2.2 Generalidades del esfuerzo efectivo y su relación con la inclinación del nivel estático.

Braja M. Das comenta que para analizar diferentes problemas relacionados con la mecánica de suelos como son: compresibilidad, capacidad de carga, presiones laterales y estabilidad de terraplenes y laderas es necesario conocer la naturaleza de la distribución de los esfuerzos a lo largo de un perfil, sección o planta.

Si se considera al suelo como un sistema multifásico, donde las partículas sólidas, ya sea granos de suelo o líticas de la roca, agua y aire se distribuyen de manera heterogénea y solamente obedecen a las fuerzas de cuerpo, el “esfuerzo efectivo” (σ) definido por Terzaghi en 1925 es la resta de la presión total (P) menos la presión neutral o de poro (u), esto es:

$$\sigma = P - u$$

Si se considera el perfil de la figura 2.2, los esfuerzos: total, neutral y efectivo resultan ser:

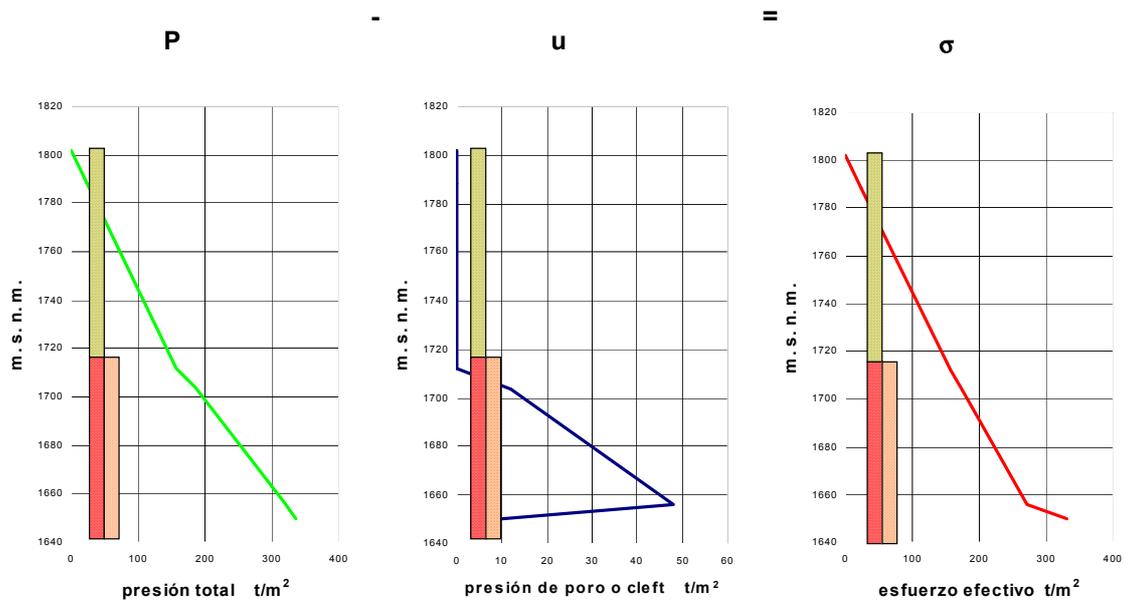


Figura 2.2 Estrato saturado y distribución de esfuerzos.

El esfuerzo efectivo se considera a la fuerza por unidad de área soportada por las partículas de la roca y granos del suelo. El esfuerzo efectivo controla tanto a la rigidez como a los cambios de volumen. El incremento del esfuerzo efectivo induce a los geomateriales a un estado más denso.

2.3 Esfuerzos en un medio saturado con flujo descendente.

El abatimiento del nivel estático ($-\Delta\delta h$) se considera un flujo descendente, al no recuperarse debido a la sobre explotación, se desarrolla un incremento del esfuerzo efectivo. Las nuevas magnitudes se visualizan y evalúan en la figura 2.3.

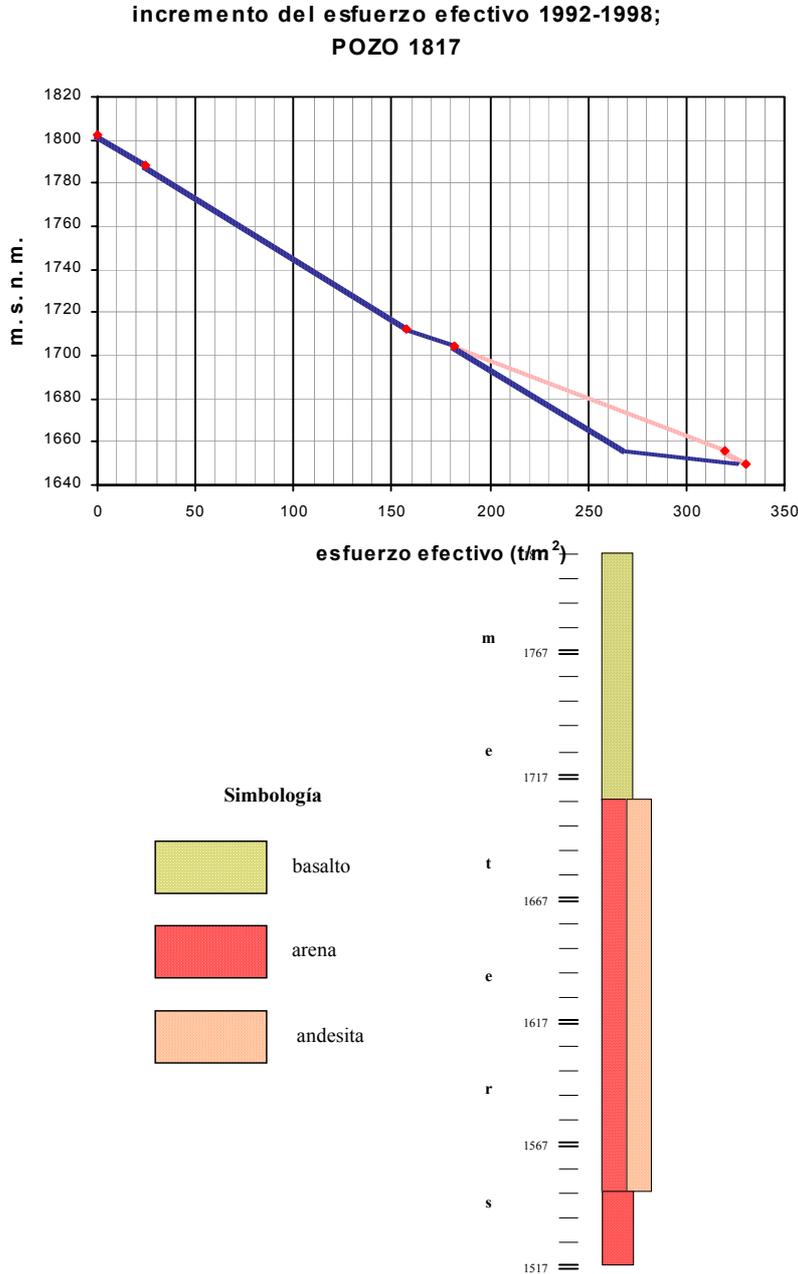


Figura 2.3 Nuevo estado de esfuerzos de un estrato saturado por abatimiento del nivel estático, flujo descendente.

El incremento del esfuerzo efectivo corresponde al resultado de multiplicar el peso específico del agua por el espesor drenado, esto es: si el nivel se abate 10 metros, el incremento del esfuerzo efectivo será de 10 t/m^2 .

Entonces, debe notarse la relación intrínseca que guardan el campo de estado de esfuerzos y las variaciones del nivel estático, lo que demuestra que las deformaciones en los valles, zonas donde está la principal infraestructura del transporte, el abatimiento del nivel estático aunado al desarrollo de conos de abatimiento generarán las tres Fases de la Deformación por Flujo Hidrodinámico:

- 1) Hundimiento,
- 2) Generación de grietas de tensión, y
- 3) Crecimiento de fallas de tensión por sobre explotación del acuífero.

Si la velocidad de flujo y el gradiente hidráulico se incrementan, la estabilidad de los materiales geológicos se pierde sobreviniendo los fenómenos denominados como: ebullición y sifonamiento o ruptura rápida de la cohesión y fricción.

Lo que se observará en campo es el hundimiento regional, aparición de grietas en las franjas de gradiente hidráulico muy tendido, cambios en la pendiente de aeropistas y brincos en las carreteras entre otros.

Capítulo 3.

Parámetros mecánicos e hidráulicos, el laboratorio de mecánica de suelos y rocas.

3.1 *La compresibilidad, parámetro mecánico transitorio.*

Como se apuntó anteriormente, conforme se va drenando la formación acuífera los materiales geológicos involucrados tienden a un estado más denso por la pérdida de la presión de poro (u) cambiando a través del tiempo la relación de vacíos (e), porosidad (n), permeabilidad (K), transmisibilidad (T), almacenamiento (S) y la compresibilidad (a_v).

El abatimiento del nivel estático y la deformación inherente en los materiales geológicos es un proceso transitorio, además se sabe que por cada metro de abatimiento del agua, el esfuerzo crece 1 t/m^2 .

La manera tradicional de valuar los parámetros de permeabilidad, transmisibilidad y el almacenamiento ha sido mediante las pruebas de bombeo siempre y cuando se tengan pozos de observación, lo que sucede rara vez.

La forma más efectiva de conocer los parámetros es realizando ensayos de mecánica de suelos donde se involucran las cargas y relación de vacíos, cuyos datos permiten evaluar el almacenamiento tanto en el tiempo, como bajo la sollicitación de diferentes cargas equivalentes según el movimiento de la superficie del agua, ya sea en abatimiento o recarga.

3.2 *Parámetros de “compresibilidad” (a_v) para medios porosos y fracturados.*

La compresibilidad varía con el tiempo y está en función de la pérdida de la presión ya sea la de “poro, en un medio poroso” o de “cleft”, para un medio fracturado”. La sobrecarga ($\Delta\sigma$) por incremento del peso propio del suelo al abatirse el nivel estático ($-\Delta\delta h$) ocasiona una deformación debido a:

- Compresión de la materia sólida,
- Compresión del agua y aire dentro de los vacíos, y
- Drenado del agua y aire de los vacíos.

La compresión del agua y de los materiales geológicos siempre se ha considerado nula, pero los datos arrojados en pruebas realizadas tanto para materiales granulares como rocas fracturadas utilizados para evaluar el “almacenamiento” en acuíferos confinados muestran variaciones importantes y con magnitudes hasta de varias décadas.

La variación de la compresibilidad de la fase sólida a través del tiempo se obtiene de las curvas de esfuerzo efectivo-deformación, asociando los incrementos de esfuerzo efectivo según los decrementos en la caída de presión en la formación acuífera o abatimiento.

Los valores de compresibilidad de las rocas se pueden obtener sometiendo muestras a compresión, tal y como lo muestra la figura 3.1, las que fueron ensayadas en una máquina servo hidráulica marca Instron.

Se observa y se mide el comportamiento de las fracturas tanto en posición horizontal como vertical, se puede obtener el tensor de la compresibilidad según la dirección de la carga.

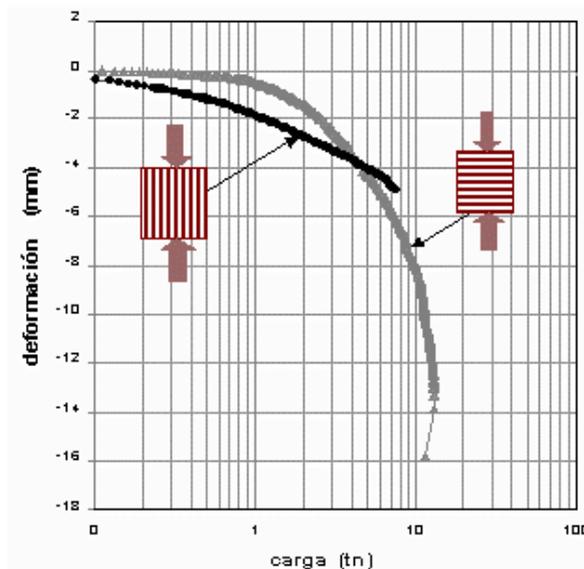


Figura 3.1 variación de la relación deformación/esfuerzo según la orientación de las fracturas.

La gráfica de compresibilidad para un medio poroso aparece en la figura 3.2, de ella se puede evaluar tanto el cambio de la relación de vacíos y porosidad según la carga.

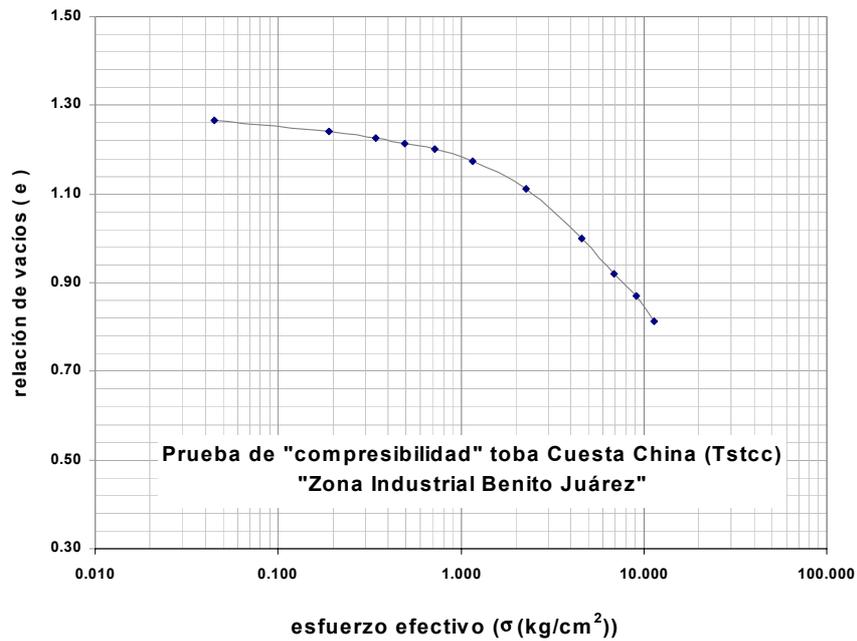


Figura 3.2 Gráfica de la compresibilidad en un medio poroso.

3.3 Combinación entre las gráficas de compresibilidad e hidrógrafos

Para establecer la relación que guardan los parámetros de compresibilidad, almacenamiento, abatimiento del nivel estático e incremento de esfuerzo efectivo, basta analizar las curvas de un hidrógrafo y de una prueba de compresibilidad.

Al observar la gráfica de la figura 3.3 de un hidrógrafo y compararla con el incremento del esfuerzo efectivo, se comprueba que por cada unidad de abatimiento, existe una unidad de incremento en el esfuerzo efectivo.

Δh	h	γ_m	σ	$\Sigma \sigma$	Δh	γ_w	u	$\Sigma \sigma$	$\sigma'(1989)$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
14	14	2.04	28.56	28.56	14	0	0	0	28.56
76	90	1.79	136.04	164.6	76	0	0	0	164.60
10	100	2.04	20.4	185	10	1	10	10	175.00
3	103	2.85	8.55	193.55	3	1	3	13	180.55
50	153	2.85	142.5	336.05	50	1	50	63	273.05
17	170	2.85	48.45	384.5	17	1	17	80	304.50

Δh	h	γ_m	σ	$\Sigma \sigma$	Δh	γ_w	u	$\Sigma \sigma$	$\sigma'(1998)$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
14	14	2.04	28.56	28.56	14	0	0	0	28.56
76	90	1.79	136.04	164.6	76	0	0	0	164.60
10	100	2.04	20.4	185	10	0	0	0	185.00
3	103	2.85	8.55	193.55	3	0	0	0	193.55
50	153	2.85	142.5	336.05	50	0	0	0	336.05
17	170	2.85	48.45	384.5	17	1	17	17	367.50

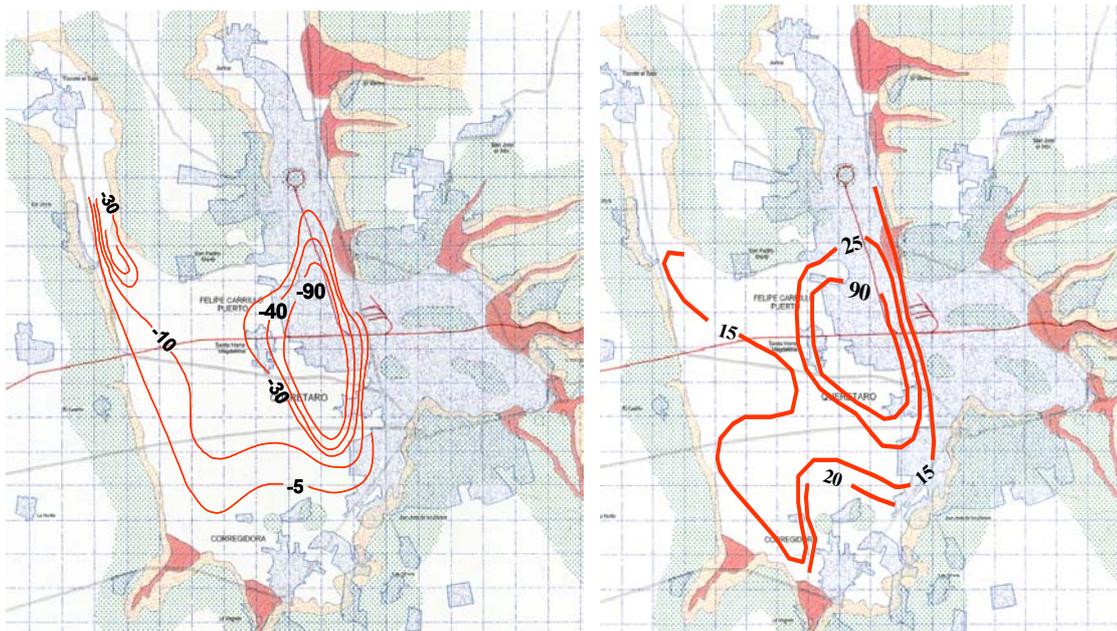


Figura 3.3 Relación entre el abatimiento del nivel estático y el incremento del esfuerzo efectivo

Capítulo 4.

Ecuación constitutiva para simular el hundimiento, su solución.

4.1 Ecuación constitutiva para el cálculo del hundimiento regional por declinación del nivel estático.

Un medio poroso o fracturado constitutivo de un almacén de agua subterránea, vapor, gas o petróleo sujeto a las variaciones de los esfuerzos internos (presión hidrostática) y externos (presión litostática) experimentará los fenómenos transitorios de deformación por los cambios en la presión hidrodinámica.

La magnitud del hundimiento en los geomateriales es función directa de la compresibilidad de los sólidos (α_v), agua (β), intervalo drenado ($-\Delta h$) y de la permeabilidad (k_z).

La figura 4.1 muestra un esquema con las fases del fluido y del sólido, cada una de ellas aporta los parámetros necesarios para su caracterización, como son: la porosidad “n”, densidad relativa de sólidos “ S_s ”, peso específico del agua “ γ_w ” así como las relaciones volumétricas y gravimétricas: “n” y “ $n\gamma_w$ ”, “(1-n)” y “(1-n) $S_s\gamma_w$ ” respectivamente.

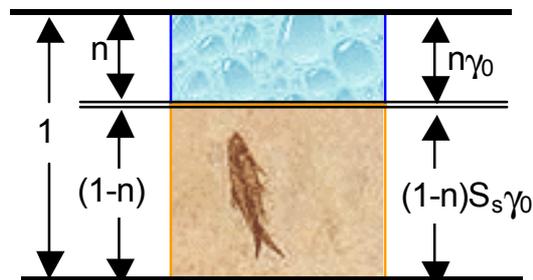


Figura 4.1 Esquema de las fases del fluido y sólida.

Antes de establecer la ecuación que gobierna el problema de flujo-deformación se hacen las consideraciones propuestas por Chen, Z., 1995 donde:

- El fluido es de una sola fase o una mezcla homogénea,
- Si el fluido es compresible, la densidad depende solamente de la presión,
- No existe relación entre la densidad y la concentración del soluto,
- Es necesario hacer un balance de masa,
- Las deformaciones volumétricas están normadas por el esfuerzo efectivo,
- Conforme aumenta el esfuerzo efectivo, el suelo se comporta elástico,
- La conductividad hidráulica disminuye conforme se comprime la masa del suelo,
- La deformación es isocórica, y
- El desarrollo se hace mediante la forma “euleriana”, donde la identidad y cantidad de materia puede cambiar con el tiempo, pero la forma del volumen de control prevalece.

Para llegar a la ecuación de flujo y deformación, se considera la densidad “ ρ ”, la relación de vacíos “ e ” y la presión de poro “ u ”; la compresibilidad del agua está dada por:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{du} \quad (1)$$

El decremento de “ u ” ocasiona el incremento del esfuerzo efectivo “ σ ”, haciendo variable a la porosidad “ n ” al modificarse la relación de vacíos (e).

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (2)$$

La compresibilidad (a_v) de un medio poroso está definida como:

$$a_v = \frac{de}{d\sigma} \quad (3)$$

Si de un volumen elemental de control ($dx dy dz$) se considera exclusivamente el flujo y deformación vertical, el volumen de agua que entra debe ser el mismo que sale; el cambio de almacenamiento (ΔV) está dado por:

$$\Delta V = \frac{\partial J_z}{\partial z} dx dy dz \quad (4)$$

Siendo J_z el flujo de masa, al variar con el tiempo el almacenamiento, el medio adquiere propiedades de almacenamiento, por tanto, para mantener el principio de la conservación de la masa, se considera la siguiente expresión:

$$\frac{\partial J_z}{\partial z} + \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

como $J_z = \rho n w$, siendo “ w ” la velocidad de flujo en la dirección vertical, representada por:

$$w = k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (6)$$

Sustituyendo el valor de “ J_z ” y al desarrollar el segundo término de la expresión 5, queda la ecuación de la conservación de la masa para un medio compresible como:

$$\text{div}_z(\rho n w) + n \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial n}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

Sustituyendo 2, y la expresión diferencial de la compresibilidad “ a_v ”, desarrollando para el tercer término de la parcial en 7 se tiene:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -a_v (1 - n)^2 \left\{ \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t} \right\} \quad (8)$$

Se recuerda que la presión litostática “ P ” permanece constante en problemas de flujo. Se descompone la ecuación 1 y derivando respecto al tiempo, obteniendo:

$$\beta \rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (9)$$

La velocidad en función de la carga hidráulica “ h ” y de la permeabilidad en la dirección vertical “ K_z ” está dada en 6, al hacer las sustituciones respectivas en 7 queda la ecuación que gobierna el flujo y deformación vertical para un medio compresible como:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{(n\beta + a_v(1 - n))}{K_z} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (10)$$

Esta ecuación describe los cambios en la cantidad de agua almacenada según las elevaciones piezométricas.

La compresibilidad varía con el tiempo y está en función de la pérdida de la presión de “poro” o “cleft” según se trate de materiales granulares o de un medio fracturado en rocas, y de la carga hidráulica “h”.

Se puede establecer la evolución de la compresibilidad a través del tiempo según el ritmo de abatimiento del nivel estático, tal y como se acotó en el Capítulo 3. El cambio de carga hidráulica ($-\Delta h$) se asocia con el incremento de los esfuerzos a través de las pruebas de compresibilidad.

Para una temperatura de 20°C la compresibilidad del agua es de 0.0000442 cm²/kg; mientras que la compresibilidad para un suelo tipo MH encontrado en el Valle de Querétaro, la compresibilidad es $a_v = 0.0495$ cm²/kg; valor que concuerda con los encontrados por Juárez B. E., 1995 en su desarrollo de las “Ecuaciones Naturales de Deformación” mediante el parámetro “ γ ”.

De manera general, la ecuación que gobierna el comportamiento del fenómeno de flujo-deformación entre los geomateriales y los fluidos del yacimiento se puede extender al espacio y tiempo como:

$$\nabla^2 h = \frac{(n(t)\beta + a_v(t)(1 - n(t)))}{\bar{K}} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (11)$$

Donde “ K ” es el tensor de permeabilidades, “ a_v ” es función del tiempo, “ n ” depende de los cambios en el esfuerzo efectivo conforme el nivel estático declina.

La ecuación 11 tiene aplicación en geotermia, petróleo, geohidrología y, por supuesto en geotécnia. La compresibilidad del fluido (β) puede ser sustituida por la del agua, aceite u otro.

Dado que los abatimientos en algunos acuíferos en los valles más poblados de la Subprovincia Fisiográfica Depresión del Bajío se han abatido hasta 150 metros en menos de diez años, las pruebas de compresibilidad en materiales granulares se deberán obtener sometiendo la muestra a cargas equivalentes a 15 kg/cm² o más.

La relación que tiene con la ecuación de consolidación de Terzaghi y aplicando el principio de Onsanger, es que ambas se resuelven usando la transferencia de calor descrita por la Ley de Biot-Fourier y su solución es numérica.

4.2 Solución a la ecuación de flujo deformación.

El nivel estático cambia drásticamente tanto por el desarrollo de un acuífero como por sus propiedades hidráulicas; la superficie plana con presión atmosférica cero cambia a una superficie alabeada, generalmente en la zona de mayor concentración de los pozos se genera un “conoide” de abatimiento.

Como la extracción excede a la recarga, el agua se toma directamente del almacenamiento generando el abatimiento cuya magnitud depende no solamente de las propiedades hidráulicas sino también de las mecánicas.

Theis, en el año de 1935 presentó la solución a la ecuación 10, usando la analogía de transferencia de calor descrita por la Ley de Biot-Fourier, haciendo dos consideraciones básicas:

- La carga “P” y espesor “H” del acuífero son constantes, y
- Los cambios de almacenamiento del acuífero a través de la expansión del agua y compresión de la formación acuífera son pequeños.

Las fases de la deformación se dan en el intervalo de los materiales drenados - figura 2.3- al quedar los espacios porosos llenos de aire. Por esa razón y sirviéndose del principio de Onsanger en Chen, Z., H., 1995; se establece que el abatimiento “s” corresponde al intervalo drenado, espesor del material que sufrirá la compresión “ ΔH ” por profundización de la superficie piezométrica ($-\Delta h$). La solución de la ecuación 11 fue desarrollada por Theis y Jacob entre 1938 y 1940, entonces, el abatimiento del nivel evaluado en un pozo de observación situado a una distancia “r” del centro del cono de abatimiento es:

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \int_{\varphi}^{\infty} \frac{e^{-\varphi}}{\varphi} d \varphi \quad (12)$$

Siendo: (Q) el bombeo, (T) la transmisibilidad y (φ) una variable sin dimensiones definida por:

$$\varphi = r^2 \frac{S}{4 \Gamma T} \quad (13)$$

Siendo (r) la distancia del pozo de bombeo al pozo de observación, (S) es el coeficiente de almacenamiento y (Γ) el tiempo de bombeo. A las expresiones 12 y 13 se les conoce como la función de pozo de “ φ ”.

$$\int_{\varphi}^{\infty} \frac{e^{-\varphi}}{\varphi} = W(\varphi) = -0.577162 - \ln(\varphi) + \varphi + \frac{\varphi^2}{2 * 2!} + \frac{\varphi^3}{3 * 3!} + \dots$$

$$\therefore s = \frac{Q}{4\pi T} W(\varphi) \quad (14)$$

La expresión 14 corresponde a la solución de la ecuación de flujo; donde están involucradas tanto la compresibilidad del fluido como la de los granos del suelo y de la nueva distribución de cargas hidráulicas (h).

El abatimiento (s) corresponde al intervalo drenado por la declinación del nivel del agua, al multiplicarlo por el área, se obtiene el volumen del suelo en el que se llevarán a cabo los cambios significantes en el campo de esfuerzo efectivo.

Dependiendo del volumen de agua extraído (ΔV) y de la pérdida de presión de poro ($-u$) en un intervalo de tiempo ($-\partial u / \partial t$); se asentará “ $\Delta \delta H$ ” .

En valle, donde existen “ l ” pozos, dispuestos en los nodos que hacen “ l ” renglones y “ j ” columnas separados una distancia “ x ” e “ y ” en un área donde la extracción es mayor a la recarga, el abatimiento “ s ” del nivel del agua equivalente al espesor drenado y compresible es:

$$s = \sum_{m=1}^l Q_m W(\varphi)_{i,j,m} \quad (15)$$

La deformación parcial está dada por:

$$\Delta \delta H = \frac{a_v}{1 + e_0} \Delta \sigma \cdot s \quad (16)$$

El asentamiento parcial “ $\Delta \delta H$ ” en un intervalo de tiempo dado, creado por el abatimiento “ s ” de la superficie piezométrica debido a un flujo Q_m a través de “ l ” pozos distribuidos en “ l ” renglones y “ j ” columnas por la extracción es:

$$\Delta \delta H_{i,j,m} = \frac{a_v}{1 + e_0} \cdot \Delta \sigma \cdot \sum_{m=1}^l Q_m W(\varphi)_{i,j,m} \quad (17)$$

4.3 Modelo computacional para determinar la distribución del hundimiento en un estrato compresible debido al abatimiento de la superficie piezométrica.

El algoritmo para el cálculo de “s” fue desarrollado por King, J., 1983, la subrutina para la aproximación de $W(\varphi)$ fue probada y comparada con otras soluciones dadas con anterioridad por Theis C. V., 1935 y otros.

Los valores calculados resultaron confiables dentro del rango de seguridad requerida tanto en flujo hidrodinámico como en mecánica de suelos. El diagrama de flujo del programa aparece en la figura 4.2.

El método propuesto para el cálculo del asentamiento requiere que en el área de interés se forme una malla de dimensiones variables (figura 4.3) y se ubiquen los pozos de bombeo, cada uno de los nodos corresponde a un pozo de observación.

Después de alimentar los datos, el programa calcula el argumento de “ φ ”, por medio del “Teorema de Pitágoras” se establece la distancia entre los pozos extracción y observación; la solución a la integral de la función de pozo se determinó por medio de la aproximación polinomial dada por Gautschi y Cahill, 1964 mediante la serie dada en la expresión superior 14.

Considerando que la recarga es mínima, el valor calculado de $W(\varphi)$ se emplea en la ecuación 15 para obtener el espesor drenado “s”, al multiplicarlo por “S” - relación algebraica entre el incremento del esfuerzo efectivo “ $\partial\sigma$ ”, porosidad “n”, permeabilidad “ K_z ” y coeficiente de compresibilidad “ a_v ” se obtiene el asentamiento “ $\Delta\delta H$ ” producido por la extracción de (Q) en (l) pozos durante un tiempo (t).

La tabla 4.1 muestra los parámetros mecánicos, hidráulicos y las dimensiones respectivas que sirven para alimentar el programa que proveerá los datos numéricos para visualizar a través del tiempo el desarrollo del asentamiento. La correlación óptima se obtuvo con una malla formada por ocho renglones y ocho columnas, equivalente a 64 nodos, de los cuales solamente fueron empleados 29 para ubicar en ellos a los pozos de observación.

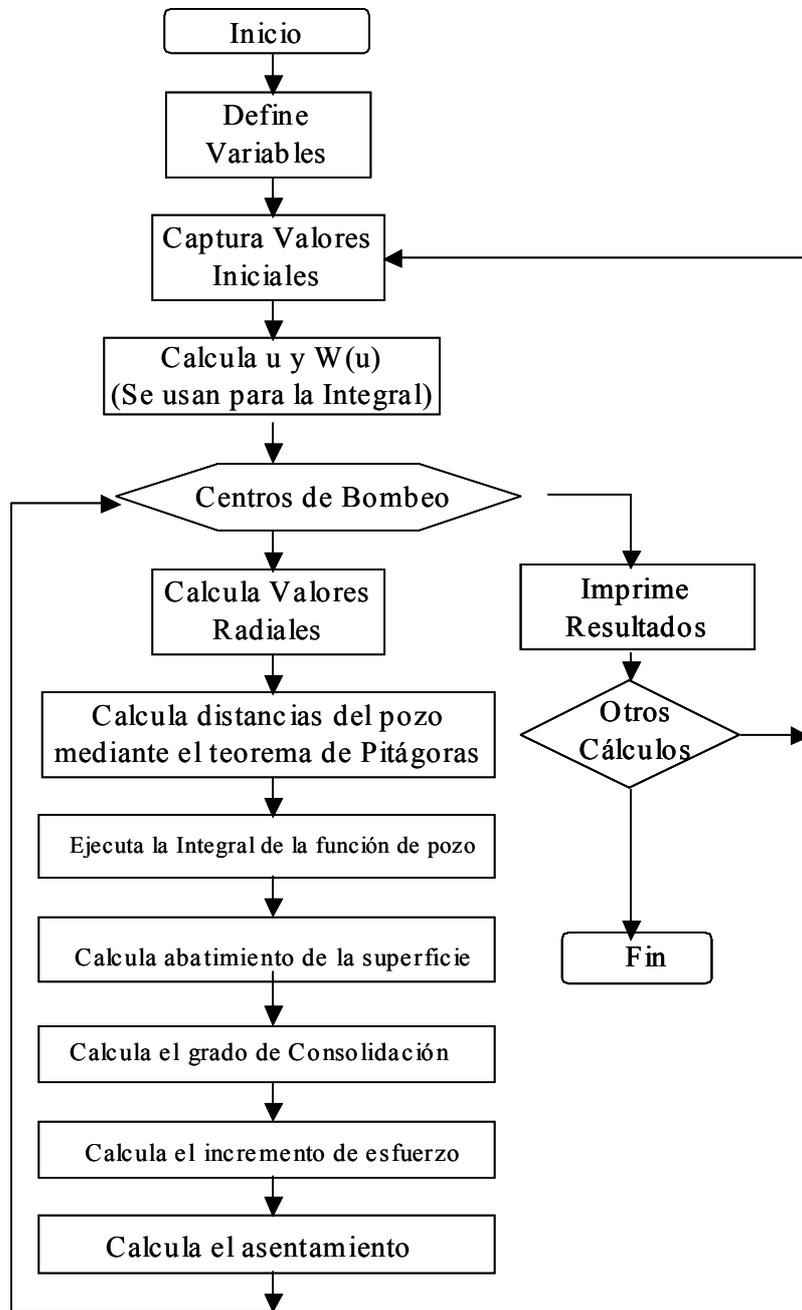


Figura 4.2 Diagrama de flujo, manera de suministrar los datos para el cálculo de flujo y deformación.

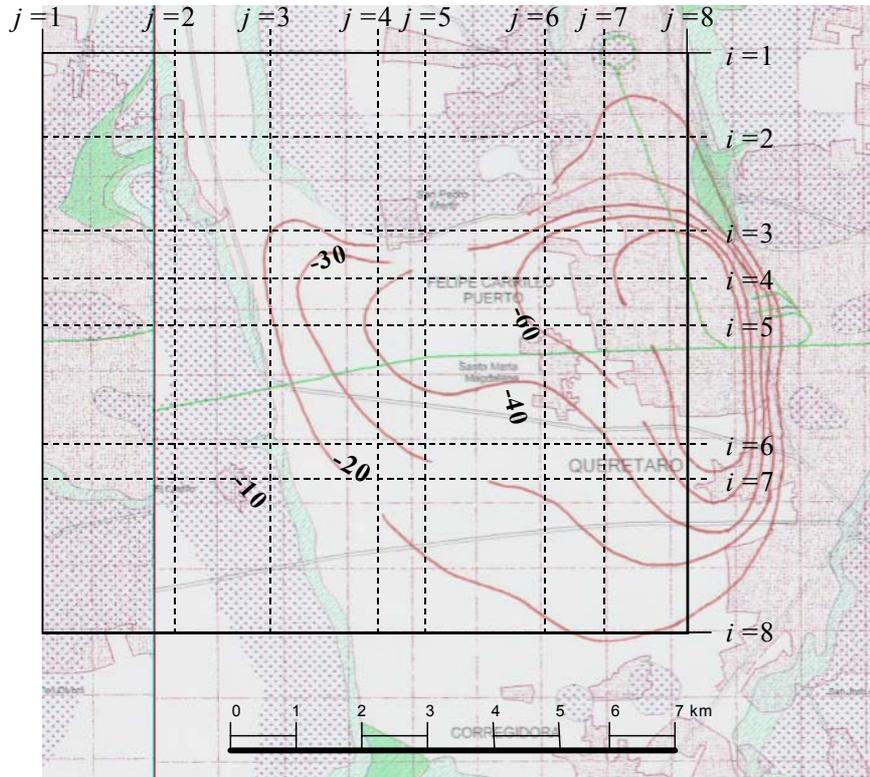


Figura 4.3 Mallado a base de renglones y columnas para calcular el asentamiento en función de la distribución de los pozos de bombeo y recarga.

Tabla 4.1 Datos de alimentación al programa de simulación de hundimiento		
DATOS	DIMENSIONES	UNIDADES
Espacios entre renglones y columnas (i, j)	L	metros
Coefficiente de almacenamiento (S)	sin dimensiones	
Transmisibilidad (T)	L^2/T	$m^2/día$
Longitud del período de bombeo (t)	T	días
Permeabilidad (K_z)	L/T	metros/día
Coefficiente de compresibilidad del agua local (β)	L^2 /M	m^2 /t
Coefficiente de compresibilidad (a_v)	L^2 /M	m^2 /t
Relación de vacíos (e_0)	sin dimensiones	
Período de bombeo en días (t)	T	días
Número de pozos (l)		Pozos
Caudal de extracción "Q"	M/T	$m^3/día$
Radio del pozo de observación y extracción (r)	L	metros

4.4 Generalidades del programa de computo para simulación del hundimiento.

El programa determina el abatimiento (s), se tienen que cambiar los valores del bombeo Q_m y los radios de los pozos de extracción hasta que la configuración del abatimiento calculada sea similar a la observada en el intervalo de tiempo prescrito.

Dado que se conoce la configuración de referencia formada por los puntos materiales p en el cuerpo B , esto es, al abatimiento en un intervalo de tiempo ($t_0 - t_1$), la función de deformación f de la ecuación 17 se aplicó para obtener las configuraciones espaciales $x = f(p) \in f(B)$ del asentamiento para intervalos de tiempo intermedios o futuros.

Capítulo 5.

Modelación. Casos de Historia.

5.1 *Deformaciones en las pistas del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.*

Para establecer las condiciones actuales y futuras del Aeropuerto Internacional Benito Juárez en la Ciudad de México, se presenta en la figura 5.1 la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México según el Subcomité de Normas de 1987, basada en la realizada por Marsal y Masari en 1969. Las rayas diagonales dispersas indican la Zona Geotécnica del Ex Lago, las líneas diagonales densas la Zona Geotécnica de Transición y los puntos la Zona Geotécnica Rocosa.

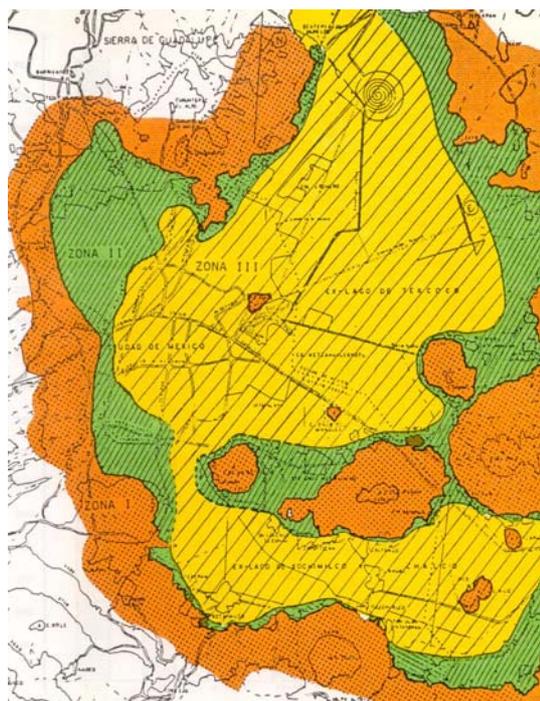


Figura 5.1 Zonificación Geotécnica según el Subcomité de Normas, 1987.

El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México está inmerso en la Zona Geotécnica del Valle o Ex Lago, lugar donde se encuentran espesos depósitos de materiales del tipo fluvial y lacustre, estos últimos muy compresibles.

La figura 5.2 muestra la distribución de las Unidades y formaciones Geológicas en la vecindad del aeropuerto, resultando notoria la presencia al norte del Cerro El Peñón de Los Baños.

La simbología corresponde con: *Qbc*, conos cineríticos; *QP*, lavas fenobasálticas, andesitas y ocasionalmente latitas; *QL*, conosdepósitos del tipo lacustre; *Tpel*, materiales tobáceos y pumíticos; *Tmv*, vulcanitas no diferenciadas del Mioceno.

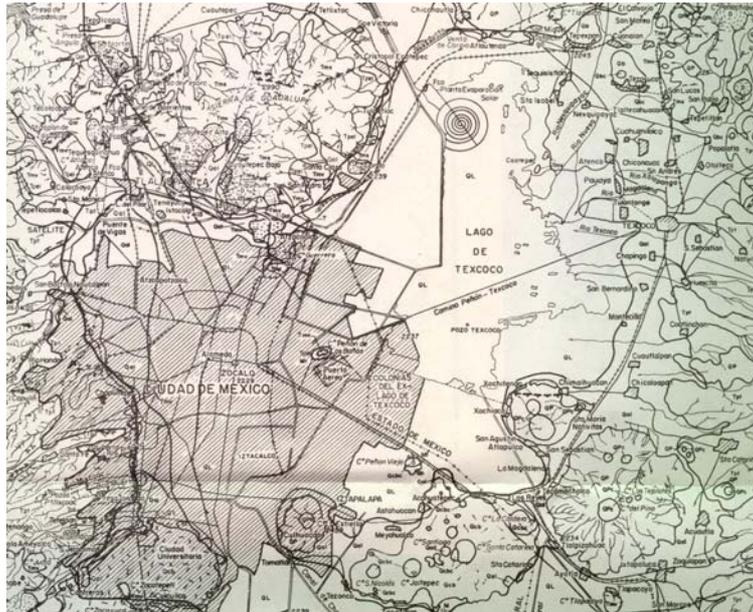


Figura 5.2 Distribución de las Unidades Geológicas en la región del aeropuerto.

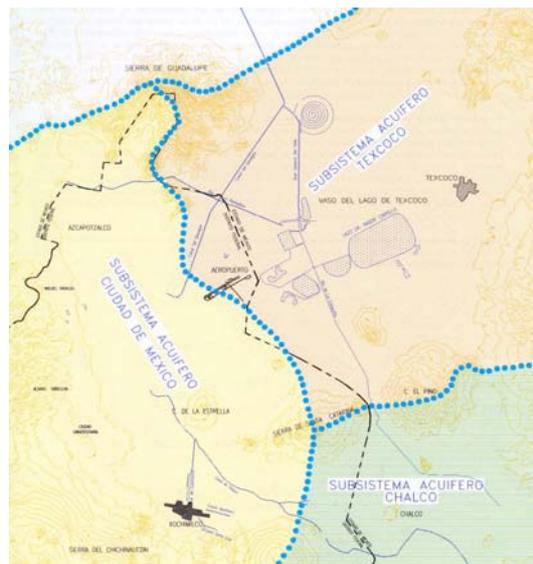


Figura 5.3 Subsistemas Acuíferos en la zona del aeropuerto.

Al prolongar una línea tanto hacia el sur como el norte, alineando al Cerro Guerrero y al Volcán de Chimalhuacán respectivamente, se puede construir el parteaguas hidrogeológico que divide a los Subsistemas Acuíferos de Texcoco y Ciudad de México, ver la figura 5.3.

En porcentaje, el Subsistema Acuífero de Texcoco está sobreexplotado en un 58%, mientras que el de la Ciudad de México en un 26%.

La figura 5.4a muestra la variación de la compresibilidad, la cual se puede asociar al abatimiento del nivel piezométrico según lo muestra el hidrógrafo del Pozo 238, ver la figura 5.4b, de la Dirección General de Operación y Construcción Hidráulica del departamento del Distrito Federal.

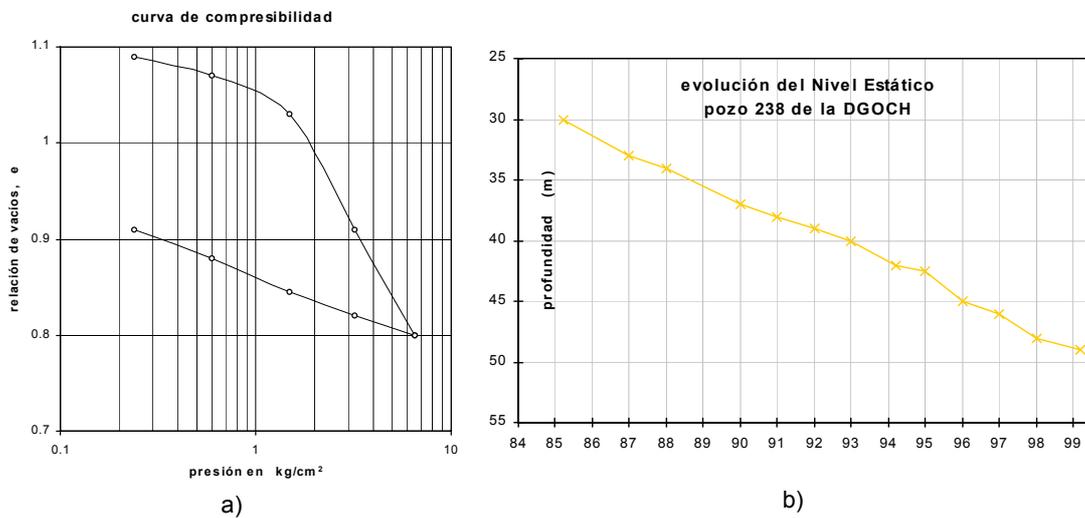


Figura 5.4 a y b, Compresibilidad e hidrógrafo del Pozo 238 de la DGOCH.

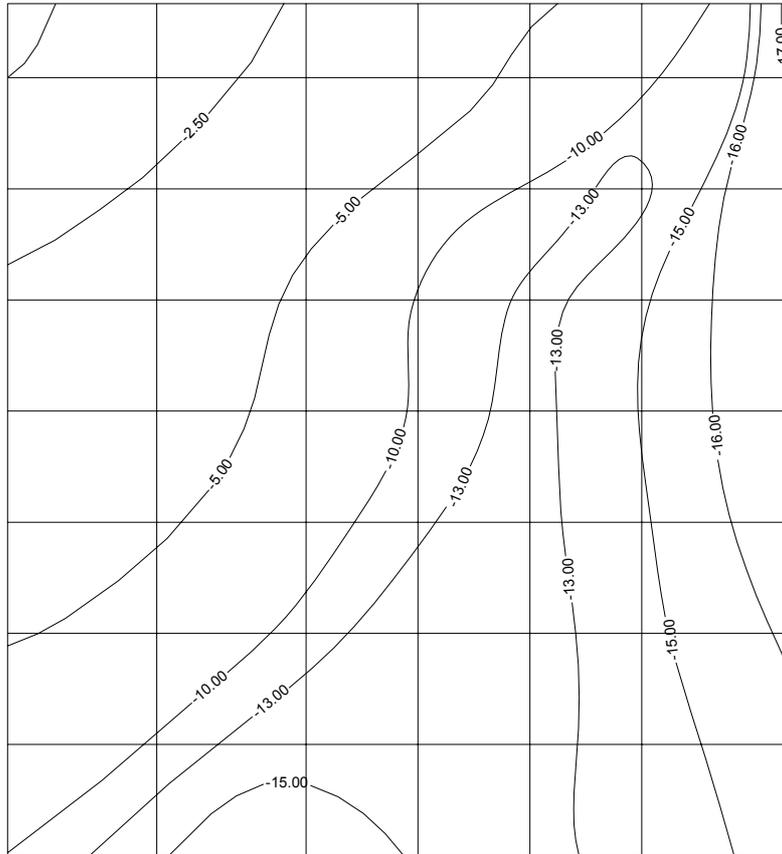
5.1.1 Abatimiento y Hundimiento, período entre los años 1990-1993.

Las figuras 5.5 y 5.6 muestran las configuraciones para el abatimiento y hundimiento en el período comprendido entre los años 1990 y 1993.

El abatimiento para este período se calibró con la información de diversos pozos e información proporcionados en informes realizados para la DGCOH. La malla aparece en la figura 5.5 y las equipotenciales corresponden a la evolución del nivel de la superficie del agua en 1095 días, o de 1990 a 1993.

Considerando renglones y columnas, el parteaguas hidrogeológico va del par (9,3) al (1,7), apreciando una mayor profundización del nivel del agua hacia el oriente – Subsistema Acuífero Texcoco- hasta de –17 metros y menor en el de la Ciudad de México, con un promedio de –7 metros.

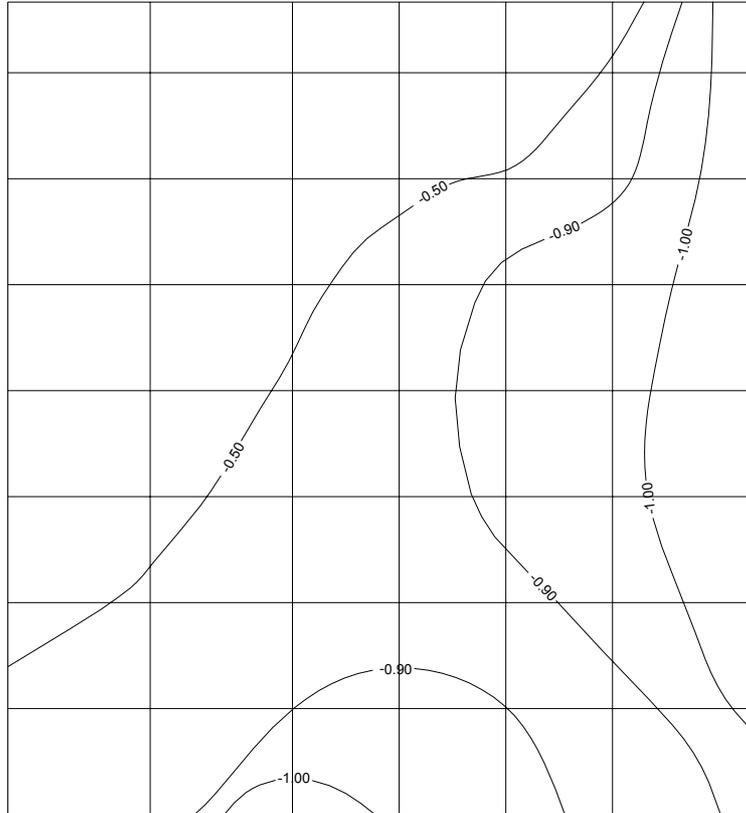
Esos abatimientos han dado origen al hundimiento configurado en la figura 5.6. Se observa en ese lapso de tiempo su magnitud alcanza poco más de un metro.



Abatimiento "S" en metros, período 1990-1993; 1095 días.

Aeropuerto Internacional de la Cd. de México.

Figura 5.5 Abatimiento del nivel del agua en el período de 1990 a 1993.

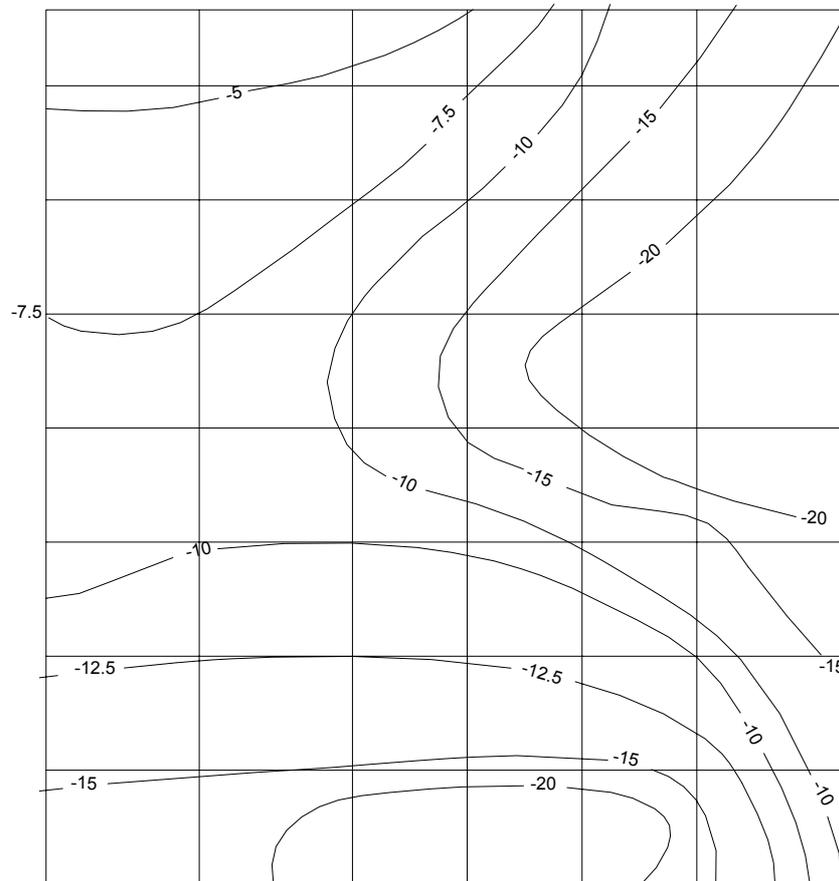


Hundimiento $\Delta\delta h$ en metros, período 1990-1993; 1095 días.
Aeropuerto Internacional de la Cd. de México.

Figura 5.6 Hundimiento por abatimiento del nivel del agua, período de 1990 a 1993.

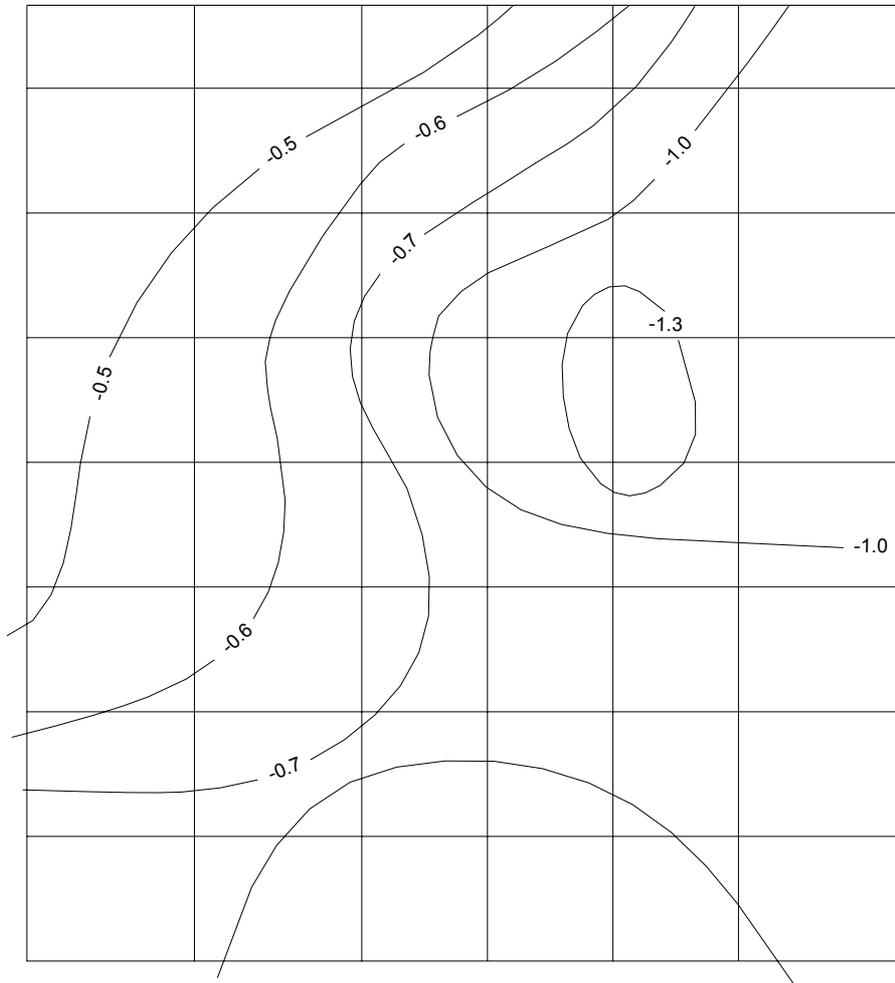
5.1.2 Abatimiento y Hundimiento, período entre los años 1990-2000.

El balance de la evolución del abatimiento en 4045 días de bombeo resulta de una profundización de -20 metros para las regiones sur y oriente del aeropuerto, mientras que hacia el noroeste es de -5 metros, figura 5.7; en tanto que el hundimiento hacia el oriente es de 1.3 metros en diez años y de apenas 0.5 metros hacia el noroeste, tal y como se muestra en la figura 5.8.



Abatimiento "S" en metros, período 1990-2000; 4045 días.
Aeropuerto Internacional de la Cd. de México.

Figura 5.7 Abatimiento del nivel del agua para el período de 1990 al 2000.



Hundimiento $\Delta\delta h$ en metros, 1990-2000, 4095 días
Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

**Figura 5.8 Hundimiento por abatimiento del nivel del agua,
período de 1990 a 2000.**

En la figura 5.9 se aprecia una zanja excavada perpendicular a la pista del Aeropuerto internacional de la Ciudad de México, en la parte central se aprecia un grueso paquete de carpeta asfáltica producto de los trabajos de nivelación al hundirse por la sobreexplotación del acuífero y sobrecarga.



Figura 5.9 Gruesa carpeta asfáltica producto de la nivelación.

5.2 Deformaciones en la pista del Aeropuerto Internacional del Bajío, León, Gto.

El Caso de Historia del Aeropuerto Internacional del Bajío ubicado entre las Ciudades de León y Silao en el estado de Guanajuato es un ejemplo muy peculiar, en el se demuestra que las grandes deformaciones o la subsidencia no es privativa en zonas de suelos blandos o arcillosos, sino que también en aquellas zonas donde el subsuelo presenta una alternancia de tobas y lavas fracturadas. La reducción, ya sea de la presión de poro o de cleft, (Hunt E. R., 19983) conduce a los materiales geológicos a un estado más denso y a una redistribución de los esfuerzos efectivos, dando origen al hundimiento.

La distribución de los pozos agrícolas en el Valle de León es irregular, no existe una política de extracción eficiente del agua dando origen una sobre explotación del acuífero.

La figura 5.10 muestra la distribución de las Unidades Geológicas en el Valle de León, encontrando: Qfl, depósitos fluviolacustres; Tsta, tobas híbridas depositadas en un medio acuoso; Tmtc, riolitas e ignimbritas no diferenciadas; Tibda, basalto

de origen de fisura (basamento geohidrológico), Kscvg, Complejo vulcanosedimentario de la Sierra de Guanajuato (basamento geológico).

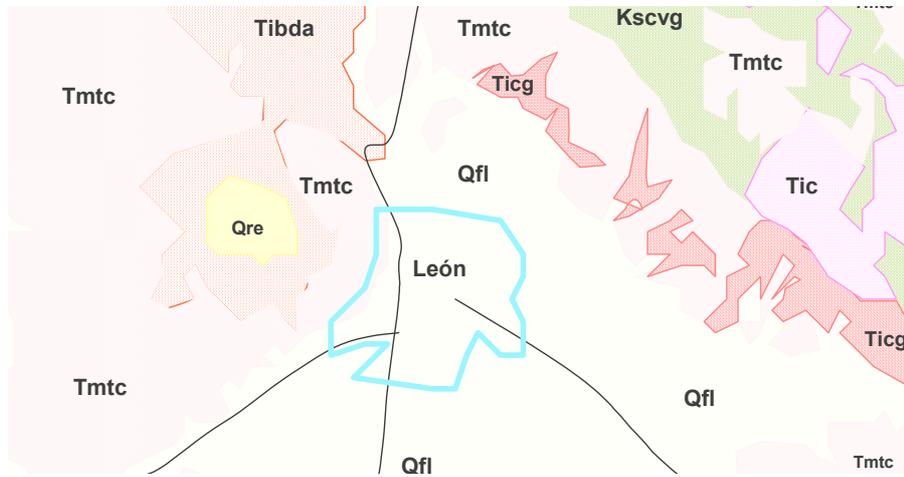


Figura 5.10 Mapa Geológico del Valle de León-Silao, Gto.

La figura 5.11 muestra la columna estratigráfica y sus características hidrogeológicas. En ella se aprecia que todos los materiales que están por arriba del basamento geológico (Kscvg) independientes a su tipo, son compresibles, contribuyendo en cierta magnitud (figura 3.1) al fenómeno de hundimiento.

UNIDAD GEOLÓGICA	LITOLOGÍA	CARACTER HIDROGEOLÓGICO
Qal	Aluviones, lacustres	permeables
Qfl	Fluviales,	permeables
T s l a	tobas híbridas depositadas en medio acuoso, gravas, limos, arcillas con diferente compactación y cementación, Unidad Aeropuerto	permeabilidad media a baja
Tmtc	riolitas e ignimbritas indiferenciadas Unidad Cuatralba	permeabilidad media a baja
Tibj	basalto de origen fisural Unidad La Joya	basamento geohidrológico formado por basalto y andesita
Kscvg	Complejo volcanosedimentario Sierra de Guanajuato.	las rocas metamórficas por naturaleza son impermeables
Tiic		

Figura 5.11 Columna estratigráfica y carácter geohidrológico de cada una de ellas.

La figura 5.12 muestra una sección geológica orientada NNW-SSE, fue construida con los cortes litológicos de los pozos que aparecen marcados, el Aeropuerto Internacional de El Bajío se ubica entre la zona metropolitana de León y el Poblado de San Juan Otates, el hundimiento de la pista de aterrizaje y despegue se debe a la extracción excesiva del agua subterránea y contribuyen tanto las tobas (Tsta) como las coladas de lava (Tmtc).

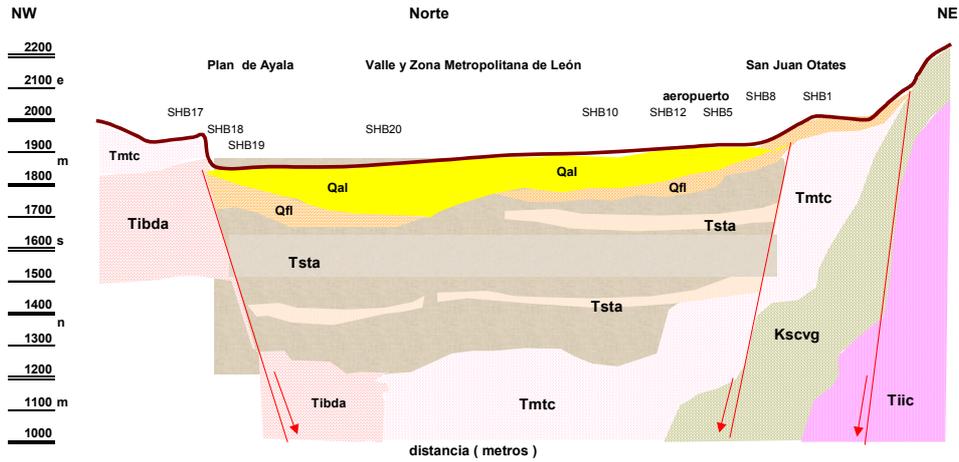


Figura 5.12 Sección estructural NNW-SSE del Valle de León.

La gráfica de la figura 5.13 enseña la curva de compresibilidad de la toba denominada (Tsta), mientras que la tabla 5.1 muestra la variación de la relación de vacíos (e), compresibilidad (a_v), porosidad (n) y el almacenamiento (S) al aumentar el esfuerzo efectivo por la disminución de la presión de poro.

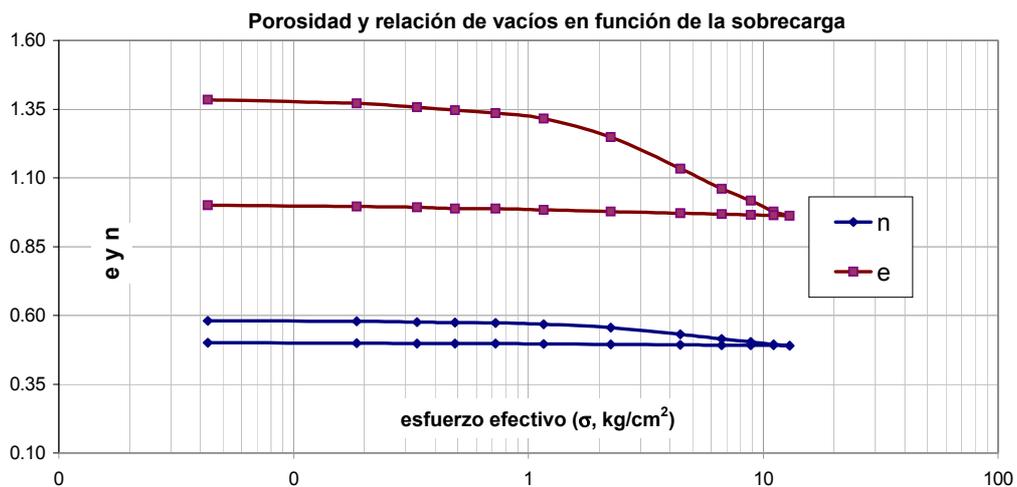


Figura 5.13 Curva de compresibilidad para la toba Tsta.

Al considerar los abatimientos de 44 metros y 89 metros, los incrementos de esfuerzo efectivo se deducen de la tabla en $\Sigma q = 4.4$ y 8.85 kg/cm^2 respectivamente; resultando en coeficientes de compresibilidad (a_v) de -0.0328 y $-0.0178 \text{ cm}^2/\text{kg}$.

$$S = n\beta + a_v(1-n)$$

Σq	e	a_v	n	S
1.0000	1.3250	-0.0629	0.5719	0.0269
1.1590	1.3150	-0.0608	0.5680	0.0263
2.2450	1.2490	-0.0524	0.5554	0.0233
4.4380	1.1340	-0.0328	0.5314	0.0154
6.6630	1.0610	-0.0201	0.5148	0.0098
8.8500	1.0170	-0.0178	0.5042	0.0088
11.0460	0.9780	-0.0079	0.4944	0.0040
12.9360	0.9630	-0.0055	0.4906	0.0028

Tabla 5.1 Parámetros mecánicos e hidráulicos para el cálculo del hundimiento regional.

Se deduce que conforme aumenta el esfuerzo efectivo la porosidad y almacenamiento se reducen de manera drástica, lo que ocasiona fuertes abatimientos durante el bombeo y consumos de energía elevados, además, el colapso de los ademes de los pozos por el fenómeno de la fricción negativa.

La figura 5.14 muestra la configuración de la evolución del nivel estático en el lapso comprendido entre los años 1990 y 1999, se puede observar como la pista se sitúa en el cono de abatimiento nordeste.

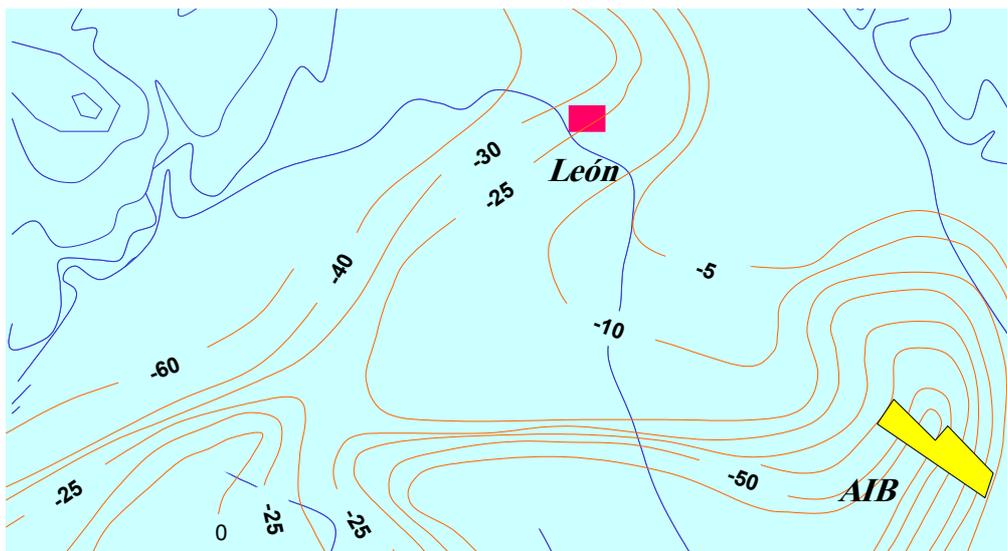
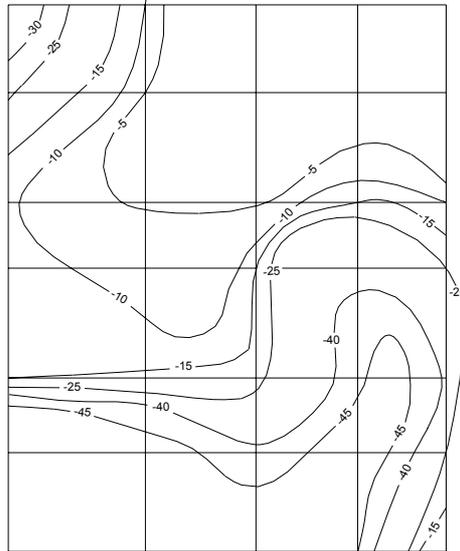


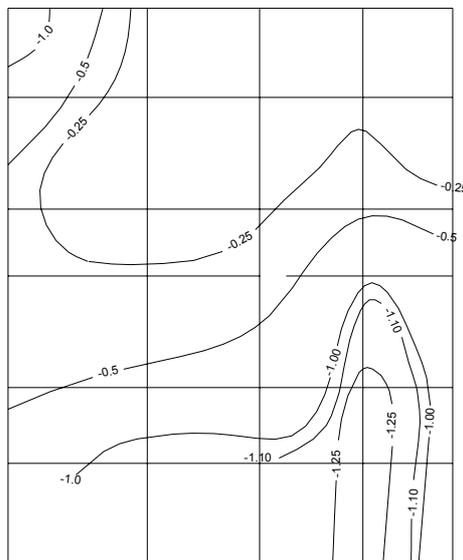
Figura 5.14 Localización de la pista en el cono de abatimiento nordeste.

Como resultados de la modelación en las figuras 5.15 y 5.16 aparecen el abatimiento y hundimiento para 7300 días de bombeo, equivalentes al período de 1990-2000.



Abatimiento "S" en metros, período 1990-2000, 7300 días.
Pista del Aeropuerto Internacional del Bajío, Gto.

Figura 5.15, Abatimiento del nivel del agua, Aeropuerto del Bajío, período de 1990 a 2000.



Hundimiento $\Delta\delta h$ en metros, período 1990-2000, 7300 días.
Pista del Aeropuerto Internacional del Bajío, Gto.

Figura 5.16, Hundimiento para la pista del Aeropuerto del Bajío, período de 1990 al 2000.

El abatimiento generado, conoide nordeste, por la sobreexplotación del acuífero alojado tanto en un medio poroso como fracturado es de -45 metros, hacia el nor-nordeste el abatimiento de -5 metros en los 7300 días de bombeo manifiesta que esa zona es de recarga, por ello permanece el nivel somero.

El hundimiento valuado es de 1.25 metros en diez años, lo que ha causado que la pista del aeropuerto se aprecie con el hundimiento mostrado en la figura 5.17.



Figura 5.17 Vistas hacia el SSE y NNW de la pista, su hundimiento.

5.3 Crecimiento de fallas, Caso de Historia Anillo Periférico 3, Aguascalientes, Ags.

El Valle de Aguascalientes corresponde a una fosa tectónica alargada y orientada sensiblemente norte – sur (figura 5.18) que fue rellenada por lavas y materiales granulares depositados en un medio acuoso.

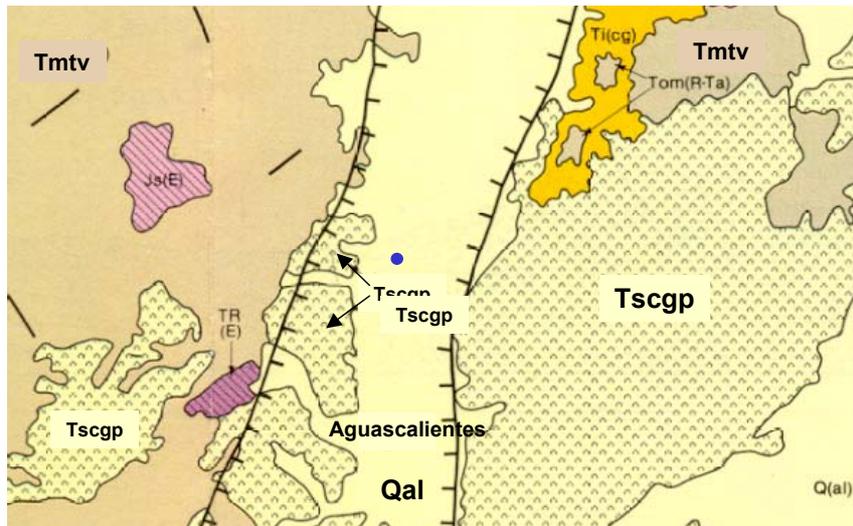


Figura 5.18 Valle de Aguascalientes, fosa tectónica rellena con lavas y granulares.

Por varias décadas el agua subterránea cubrió las necesidades de los ámbitos agrícola e industrial, en la actualidad, existen zonas como es la porción oriente dentro de la zona metropolitana donde se ha medido un abatimiento superior a 110 metros de profundidad. El modelo conceptual del funcionamiento del acuífero aparece en la figura 5.19.

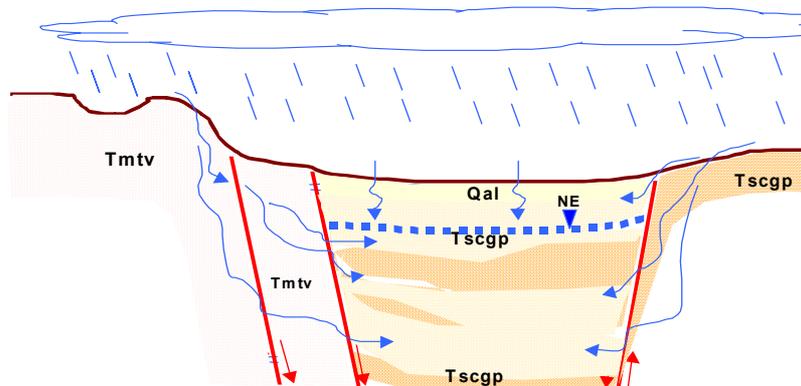


Figura 5.19 Modelo conceptual del funcionamiento del acuífero.

El agua de lluvia se infiltra en las partes altas siendo las fracturas de las rocas ácidas y los planos de falla los canales por donde llega el agua de lluvia hasta el acuífero. Desdichadamente el volumen de extracción por bombeo en los pozos profundos excede a la recarga, resultando en un balance negativo en las siguientes cantidades:

$\Sigma E = 8.885 \text{ Mm}^3/\text{año}$ todas las formas de entradas de agua (lluvia)
 $\Sigma D = 7.718 \text{ Mm}^3/\text{año}$ todas las formas de descarga de agua (bombeo)

$\Delta V = - 1.167 \text{ Mm}^3/\text{año}$ cambio de almacenamiento negativo para la porción del acuífero en estudio.

Para este caso, la Fase 3 de la deformación por flujo hidrodinámico se presenta acoplado a la presencia de un escalón debido a una falla tectónica, según se observa en la sección de la figura 5.19 en su porción oriente. El Anillo Periférico 3 muestra los estragos del Crecimiento de Fallas, ver la figura 5.20.



Figura 5.20 Fase 3, "Crecimiento de Fallas", Anillo Periférico 3, Aguascalientes, Ags.

En esta zona ha habido un abatimiento de 112 metros, en la tabla 5.2 se aprecia la evolución del abatimiento del nivel estático, el incremento del esfuerzo efectivo, la disminución tanto de la porosidad como de la relación de vacíos y la evolución del parámetro de la compresibilidad.

Año	NE	σ	e	n	α_v
1971	35	68	1.375	0.515	0.0020
1986	65	120	1.347	0.491	0.0016
1998	112	210	1.336	0.483	0.0011
2005	170	290	0.964	0.476	0.0001

Tabla 5.2 Variación del nivel estático y del esfuerzo efectivo hasta el 2005.

En la figura 5.21 se muestra el corte litológico del pozo y la variación del esfuerzo efectivo según se profundiza el nivel estático.

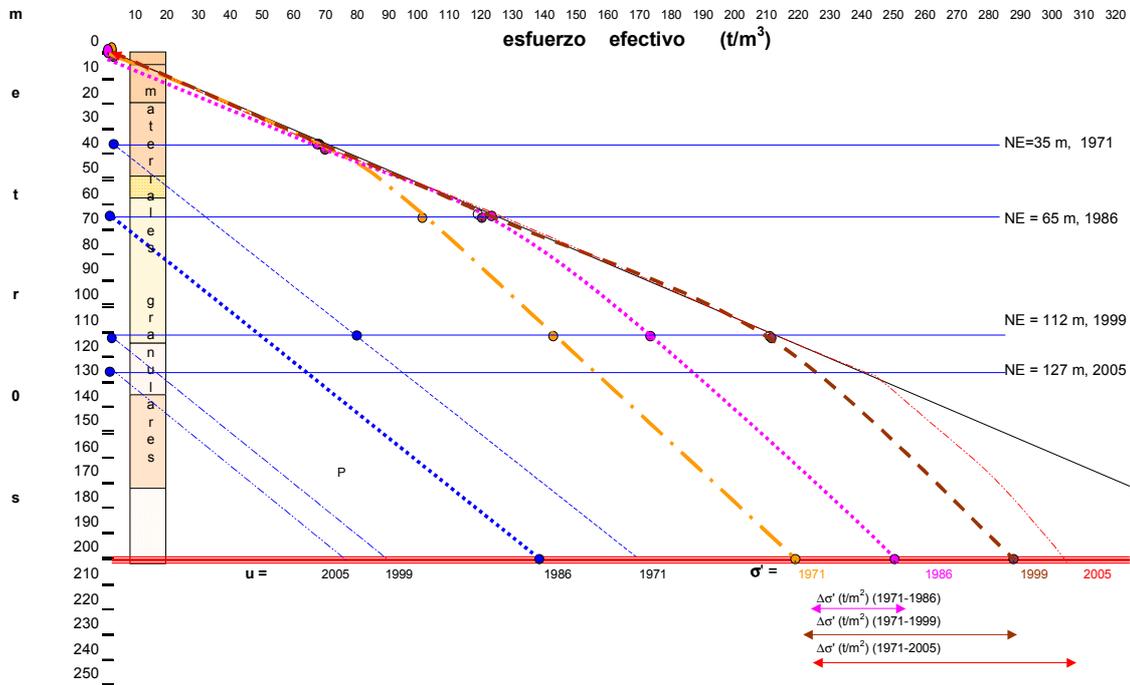


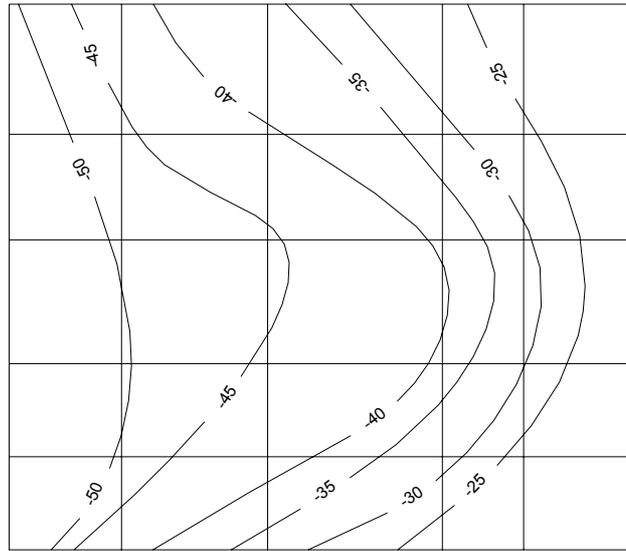
Figura 5.21 Corte litológico y lugares del esfuerzo efectivo y presión hidrostática.

En la configuración que aparece en la figura 5.22 se presenta la evolución del nivel estático en la porción oriental del valle, donde se aprecia un abatimiento hasta de -50 metros hacia el oeste y de -25 metros en el oriente.

El gradiente hidráulico es muy tendido, acentuado por el escalón de la lava que se forma en el subsuelo, una porción presenta un espesor menor de materiales compresibles hacia el centro mucho mayor.

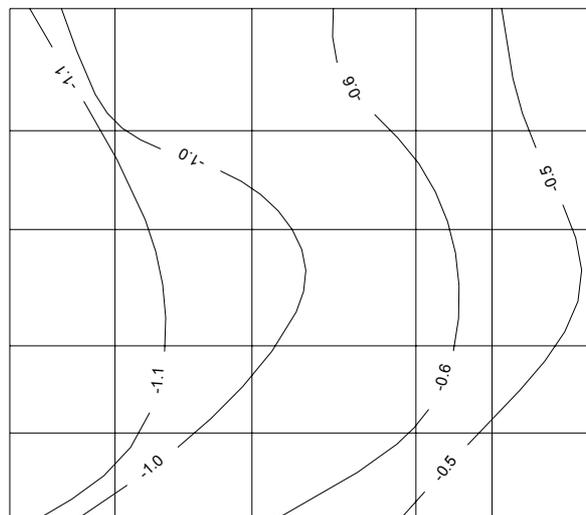
La configuración del hundimiento, figura 5.23, manifiesta magnitudes grandes de asentamiento, en el oriente es de -0.5 metros y al poniente de -1.1 metros.

Las zonas de tensión se generan en dirección norte-sur, desarrollándose las fallas hacia el poniente, con un salto hasta de 1.1 metro tal y como se muestra en la figura 5.20. Las fracturas drenadas de la roca contribuyen a la pérdida de la presión de "cleft".



Abatimiento "S" en metros, período 1986-1999, 4745 días.
Carretera Aguascalientes-Loreto, Ags.

Figura 5.22 Abatimiento en 4745 días de bombeo (1986-1999), Anillo Periférico 3, Aguascalientes, Ags.



Hundimiento $\Delta\delta h$ en metros, período 1986-1999, 4745 días
Carretera Aguascalientes-Loreto, Ags.

Figura 5.23 Configuración del hundimiento (1986-1999), Anillo Periférico 3, Aguascalientes, Ags.

Las fallas de tensión por sobreexplotación del acuífero pueden ser caracterizadas por medio de los sondeos sísmicos de refracción, perfilaje con el arreglo de electrodos dipolo-dipolo en la técnica del sondeo eléctrico vertical o con imágenes ya sea de radar de penetración terrestre o sondeos electromagnéticos de alta frecuencia.

Con la caracterización de ellas es posible definir las franjas de influencia, zonas donde no se podrá erigir estructura alguna por ningún motivo. En el bloque hundido se generan esfuerzos de compresión por confinamiento y en el bloque alto esfuerzos de tensión por disgregación del material encajonante.

En la figura 5.24 se presenta una de las fallas ya rehabilitada y el resultado de los sondeos sísmicos de refracción, en ella se puede ver los retrasos en los tiempos de arribo de las ondas elásticas debido a la grieta propiamente o al material fofo así como una línea con doble punta señalando las franjas de influencia medida en 25 metros.

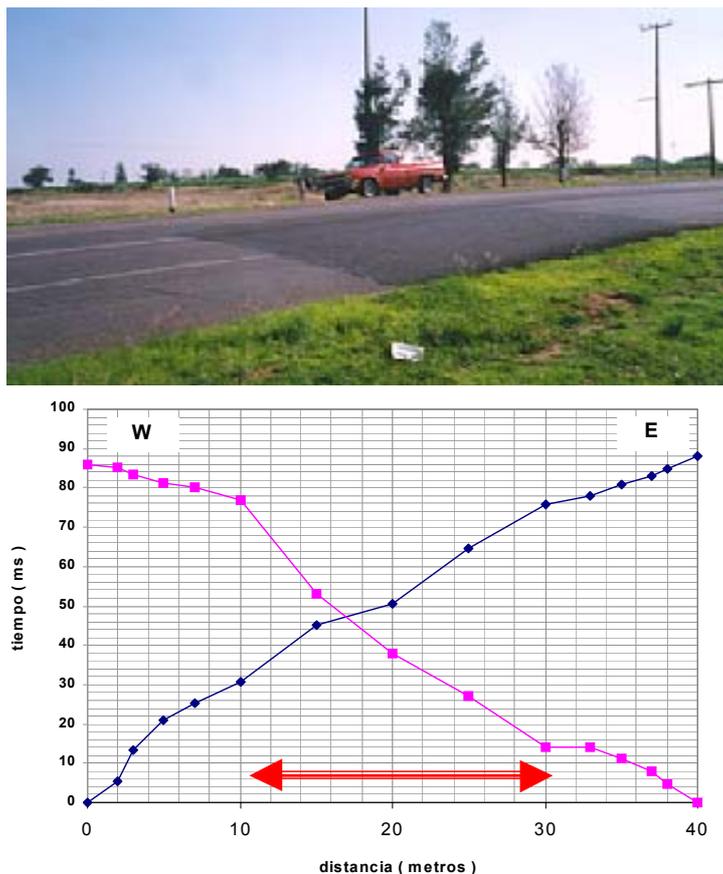


Figura 5.24 Caracterización de una falla de tensión con sísmica de refracción.

Conclusiones

Como resultado del análisis, interpretación e integración de la información, se presentan las conclusiones siguientes:

1. El fenómeno de subsidencia es “no natural” y se debe básicamente a la explotación irracional de algún recurso como puede ser: hidrocarburos en los campos petroleros; el vapor en campos geotérmicos y el agua subterránea en las zonas donde existen concentraciones importantes de humanos así como en las zonas donde hay una gran actividad agrícola.
2. Las deformaciones por flujo hidrodinámico se dan en tres fases:
Fase 1: Hundimiento por un intervalo drenado del acuífero,
Fase 2: Generación de grietas de tensión en los bordes del conoide de abatimiento,
Fase 3: Crecimiento de fallas.
3. Tanto los medios fracturados en rocas y los porosos en materiales granulares contribuyen a la deformación (subsidencia) por sobreexplotación de acuíferos.
4. Las Unidades Geológicas deben estar demarcadas en superficie y ubicarlas dentro de la columna geológica, habiendo especificado previamente las características hidráulicas y mecánicas.
5. Las características mecánicas más importantes son la compresibilidad, mientras que las hidráulicas es la permeabilidad.
6. Los cambios del nivel del agua durante los períodos de bombeo cambian las condiciones de esfuerzos en los diferentes estratos son afectados, por lo que se recomienda realizar pruebas de bombeo en cada Estación para un mismo pozo, con ellos se determina la variación espacial y temporal de la permeabilidad y su asociación al cambio en la relación de vacíos.
7. La ecuación de “flujo-deformación” relaciona tanto la compresibilidad del agua como del acuífero, la relación de vacíos, la densidad y tamaño de fractura, juntas, diaclasas y el incremento del esfuerzo efectivo por declinación de la presión de poro.

8. Conforme sobreviene el incremento del esfuerzo efectivo, la relación de vacíos disminuye al igual que la porosidad y permeabilidad.
9. El programa desarrollado predice con bastante seguridad y dentro de las posibilidades del modelo, el abatimiento de la superficie piezométrica, el hundimiento respectivo y las zonas probables de generación de grietas.

Bibliografía.

- Abramowitz M., and Stegun I. A. (1964). "*Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*". Dover.
- Alberro J. y Hernández R. (1991). "*Temblores inducidos por fuerzas de filtración*". Series del instituto de Ingeniería, No 530.
- Al-Khafaji A. W. and Andersland B. O. (1992). "*Geotechnical engineering and soil testing*". Saunders HBJ.
- Alonso M. J. J. (1999). "*Contribución al estudio del comportamiento de algunos factores que influyen en la deformación permanente de materiales granulares*". Aplicación a las vías terrestres". Tesis de Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres. FI de la Universidad Autónoma de Campeche.
- Alvarez M. E. (1992). "*Optimización del aprovechamiento del Acuífero del Valle de Querétaro, con base en un modelo de simulación del flujo*". Tesis de Maestría en Ingeniería (Hidráulica). DEPMI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Alvarez Manilla A. A. (1996). "*Similitud entre las ecuaciones de Consolidación y Flujo Hidrodinámico, Una forma para explicar el agrietamiento en los suelos del Valle de Querétaro*". V Congreso de ingeniería Civil en el estado de Querétaro. CICEQ y FI de la UAQ.
- Alvarez Manilla A. A. (1998). "*La Geotécnia Ambiental, base de la planeación y crecimiento de Santiago de Querétaro, Qro.*". Conferencia organizada por la Cámara Nacional de las Empresas de la Consultoría y la Facultad de Ingeniería de la Universidad autónoma de Querétaro.
- Alvarez Manilla A. A. (1999). "*Growth faults: from groundwater extraction, Querétaro, Salamanca and Aguascalientes cases histories*". 2do Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Aguascalientes, Ags. Asociación Geohidrológica Mexicana y Comisión Nacional del Agua.
- Alvarez Manilla A. A. y Pérez R. M de la L. (1996) "*Subsidencia y fallamiento en el Valle de Querétaro*". XVIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Morelia, Mich.
- Alvarez Manilla A. A. y Rojas G. E. (1997). "*Flujo de contaminantes en las cimentaciones, Caso de Historia Planta PSC, SA de CV*". V Congreso de ingeniería Civil en el estado de Querétaro. CICEQ y FI de la UAQ.

- Alvarez Manilla A. A., Fernández H. F. y Salas C. J. L. (1997). "*Relaciones entre las Zonificaciones Geohidrológica, Geotécnica y su impacto en el Valle de Querétaro*". Primer Congreso Nacional de Aguas Subterráneas. Mérida, Yuc. Asociación Geohidrológica Mexicana, AC.
- Alvarez Manilla A. A., Poot L. R. M., Nisino S. O., Martín del C. A. R. y Ramírez C. M. S. (1998). "*Zonificación Geotécnica del Valle de Tesislán-Atemajac-Colimilla; Zona Metropolitana de Guadalajara, Jal.*" XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Puebla, Pue..
- Alvarez Manilla A. A., Romero M. R. y García B. J. (1998). "*Construcción del primer pozo de absorción para la recarga artificial del Acuífero de Santiago de Querétaro, Qro.*". Primer Congreso Nacional de Aguas Subterráneas. Mérida, Yuc. Asociación Geohidrológica Mexicana, AC.
- Alvarez Manilla A. A., Salas C. J. L., Fernández H. F. y García B. J. (1994). "*Geohidrología del Valle de Querétaro*". III Congreso de Ingeniería Civil en el Estado de Querétaro. FI de la Universidad Autónoma de Querétaro y Colegio de Ingenieros Civiles en el Estado de Querétaro.
- Alvarez Manilla A. y Pérez R. M de la L. (1996) "*Caracterización Geotécnica del valle de Querétaro*". Trabajo de Investigación para la DEPMI de la UAQ.
- Alvarez Manilla A. (1991) "*Abatimiento del acuífero del Valle de Querétaro y su importancia ambiental*". Seminario Internacional de Aguas Subterráneas, FI de la UASLP.
- Bear J. (1972). "*Dynamics of fluids in a porous media*". Dover.
- Boris S. (1978). "*Lechería, Tultitlán, Cuautitlán, Tepozotlán, Santa Lucía y Tizayuca; en El Subsuelo y la ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México*". Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1978
- Bowles E. J. (1982). "*Propiedades geofísicas de los suelos*". McGraw Hill.
- Canal de la., J. (1988). "*Diccionario de sinónimos e ideas afines*". SECSA.
- Castany G. (1971). "*Tratado práctico de las aguas subterráneas*". Omega.
- Celanese Mexicana, SA de CV (1990). "*Estudio Geohidrológico y Balance Preliminar de Agua Subterránea en la vecindad del Complejo Industrial Benito Juárez, Querétaro*" Contrato RC45489-1. Geo Ingeniería Alfvén, SA de CV.
- Collie M. J. (1978). "*Geothermal Energy, Recent Developments*". Noyes Data Corporation.
- Comisión Federal de Electricidad (1987). Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Subgerencia de Estudios Geotérmicos. "*Mediciones de Subsistencia en Los Azufres, Mich., Los Humeros, Pue y La Primavera, Jal.*". Informes Internos.

- Comisión Federal de Electricidad (1998). *"Estudios geofísicos del Valle de México"* Subdirección de Construcción. Unidad de Estudios de Ingeniería Civil, Subjefatura de Estudios Geológicos
- Cortés B. J. de J., Olivares S. E., Monroy N. A. y Vázquez S. E. (1997). *"Interpretación de pruebas de bombeo para medios fracturados de calizas"*. Tesis Doctoral. Facultad de Agricultura. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Chen H. Z. (1995). *"Stress theory and axiomatics as well as consolidation theory of unsaturated soils"*. Unsaturated Soils, Alonso & Delage (eds). París, 1995, Francia.
- Chinesta F., Olmos F., Poitou A. y Torre R. (1996). *"Mecánica de los medios continuos"*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Das M., B. (1990). *"Principles of geotechnical engineering"*. PWS-Kent.
- Domenico P. A. and Schwartz F. W. (1990). *"Physical and Chemical Hydrology"*. Jhon Willey and Sons.
- Fyfe W. S., Price N. J. and Thompson A. B. (1978). *"Fluids in the earth's crust"*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Gautschi W. and Cahill W. F. (1964). *"Exponential integral and related functions"*. *"Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables"*. US Department of Commerce, national Bureau of Standards Applied Math. Dover.
- Gobierno del Estado de Querétaro. CEA. (1997). *"Plan de apoyo integral del agua subterránea para los principales valles del Estado de Querétaro"*. Geofísica de Exploraciones GUYSA, SA.
- Gómez L. J. A. (1996). *"Efecto de rotura de granos en material de balasto bajo carga repetida"*. Tesis de Maestría en Ingeniería (Construcción). DEPMI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Herbert W. and Anderson M. (1982). *"Introduction to ground water modeling"*. Freeman Pu.
- Horta R. J. (1994). *"Seguimiento analítico para el control de abatimientos en un acuífero, Caso Querétaro"*. III Congreso de ingeniería Civil en el estado de Querétaro. CICEQ y FI de la UAQ.
- Horta R. J. (1995). *"Notas del curso de Mecánica del Medio Continuo"*. DEPMI de la UAQ.
- Horta R. J. y San Román G. G. (1992). *"Estudio de proyección en los abatimientos de los niveles estadísticos en el acuífero de la Ciudad de Querétaro"*. Revista Avances, UAQ. Octubre de 1992.

- Hunt E. R. (1984). "*Geotechnical engineering investigation manual*". McGraw Hill Book Co.
- Huntoon P. W. (1980). "*Computationally efficient polynomial approximations used to program the Theis equation*". *Ground Water*. V. 18, pp. 134-136.
- Ivo Kazda (1990). "*Finite element techniques in ground water flow studies*". Elsevier.
- Jacob C. E. (1940). "*On the flow of water in an elastic artesian aquifer*". *Trans. Amer. Geophys. Union*.
- Juárez B. E. (1961). "*Mecanismo de las grietas de tensión en el Valle de México*". Tesis Doctoral de Ingeniería. DEPMI de la UNAM.
- Juárez B. E. (1989). "*General compressibility equation for soils*". Curso Internacional de mecánica de Suelos arcillosos. Universidad Autónoma de Querétaro (México) y Universidad de Laval (Canadá).
- Juárez B. E. y Rico R. A. (1995). "*Mecánica de suelos (Flujo de agua en suelos, Tomo III)*". Limusa.
- Juárez B. E. y Rico R. A. (1995). "*Mecánica de suelos (Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Tomo I)*". Limusa.
- Kim J. D., Feyen J., Angulo J. R. and Vauclin M. (1995). "*Comparision of eulerian and Lagrangian approaches in soil deformation and water flow*". *Unsaturated Soils*, Alonso & Delage (eds). París, 1995, Francia.
- King J. M. (1984). "*Computing Drawdown distributions using microcomputers*". *Ground Water*-November-December 1984. V. 22. No 6.
- Krumbein W. C. y Sloss L. L. (1969). "*Estratigrafía y sedimentación*". Uteha.
- Lapedes D. N. (1977). "*Geological Sciens*". McGraw Hill.
- Lesser y Asociados, SA de CV. (2000). "*Resumen del Estudio: Piezometría y Balance de Agua Subterránea en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*". Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del DDF.
- Lesser I. J M., Sánchez D. F. y González P. D. (1990). "*Aspectos geohidrológicos de la Ciudad de México*". *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*/enero-abril de 1990.
- López L. T. (1995). "*Resistencia al esfuerzo cortante en arcillas expansivas de Juríca, Querétaro*". Tesis de Maestría en Ingeniería. DEPMI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Marsal R. J. y Masari M. (1959). "*El subsuelo de la Ciudad de México*". Instituto de Ingeniería de la UNAM.

- Marsal R. J., (1978). "*La estratigrafía y sus implicaciones*" en *El Subsuelo y la ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México*.. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1978
- Martín del C. A. R., Ramírez C. M. S. y Alvarez Manilla A. A. (1998) "*Mapa de Isoperíodos y Zonificación Zonificación Sísmica de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jal.*" XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Puebla, Pue..
- Meinzer E. O. (1942). "*Hydrology*". Mc Graw Hill.
- Middleton G. V. and Wilcock R. P. (1994). "*Mechanics in the earth and environmental sciences*". Cambridge.
- Mooser F., Taméz E., Santoyo E., Holguín E. y Gutiérrez C. E. (1990). "*Características Geológicas y Geotécnicas del valle de México*". Construcción del Metro, Ciudad de México; Secretaría General de Obras, Comisión de Vialidad y Transporte Urbano. DDF.
- Ortega A. G. (1996). "*Variability of the coefficient of consolidation of the Mexico City clayey sediments on spatial and time scales*". Bulletin of International Association of Engineering Geology. París-No 54-October 1996.
- Picking, L. W. (1979). "*Programming a pocket calculator for solving multiple well, variable pumping rate problems*". Ground Water. V. 17, pp. 205-208.
- Poot L. M. R., (1999). "*Modelo constitutivo para suelos no saturados expansivos*". Tesis de Maestría en Ciencias de Ingeniería. DEPFI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Preciado C. H. F. (1998). "*Estudio de la influencia de las variables de compactación en las características expansivas de un suelo de Juríca, Querétaro*". Tesis de Maestría en Ingeniería. DEPFI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Secretaria de Desarrollo Urbano, obras Públicas y Ecología Municipal de Santiago de Querétaro. (1998). "*Mapa de Fallas y Zonas de Riesgos Geotécnico y Geológico del Valle y Zona Metropolitana de Querétaro*". Geo Ingeniería Alfven, SA de CV.
- Servicios Hidráulicos del Bajío, SA de CV. (1999). "Balance de agua subterránea y determinación de su disponibilidad en los años 1999, 2005 y 2010 aplicando un modelo matemático; Coca Cola, Planta León PANAMCO BAJÍO, SA de CV.
- SHCP y Nacional Financiera, SA (1969). "*El hundimiento de la Ciudad de México, Proyecto Texcoco, Nabor Carrillo*".
- Strack D. L. O. (1989). "*Ground Water Mechanics*". Prentice Hall.

- Theis C. V. (1935). "*The relationship between lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage*". American Geophysicist Union Trans. V. 6. Pp. 519-524.
- Timoshenko S. P. and Goodier J. N. (1970). "*Theory of Elasticity*". McGraw Hill.
- Touloukian Y. S. and Ho C. Y. (1981). "*Physical properties of rocks and minerals*". McGraw Hill.
- Trejo M. A. (1989). "*Estratigrafía y propiedades mecánicas del subsuelo del Valle de la Zona Urbana de Querétaro*". Universidad Autónoma de Querétaro.
- Universidad Autónoma de Querétaro. Laboratorio de Mecánica de Suelos. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería. (1994-1999). "*Diversos trabajos y estudios de mecánica de suelos aplicada en el Valle y Zona Metropolitana de Querétaro*". DEPFI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Universidad Autónoma de Querétaro. Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la Licenciatura en Ingeniería Civil. (1994-1999). "*Diversos trabajos y estudios de mecánica de suelos aplicada en el Valle y Zona Metropolitana de Querétaro*". FI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Viessman W. Jr., and Lewis G. (1996). "*Introduction to Hydrology*". Harper Collins, Co.
- Whitlow R. (1994). "*Fundamentos de mecánica de suelos*". SECSA.
- Whittaker B. N. and Reddis D. J. (1989). "*Subsidence: occurrence, prediction and control*". Elsevier.
- Zeevaert W. L. (1995). "*Esfuerzo-deformación-tiempo en suelos finos no saturados*". Revista de la SMMS, Número 9, Enero-Junio 1995.
- Zepeda G. J. A. (1989) "*Expansión y compresibilidad de arcillas parcialmente saturadas*". Curso Internacional de mecánica de Suelos arcillosos. Universidad Autónoma de Querétaro (México) y Universidad de Laval (Canadá).
- Zepeda G. J. A. (1989) "*Permeabilidad y flujo de agua en suelos parcialmente saturados*". Curso Internacional de mecánica de Suelos arcillosos. Universidad Autónoma de Querétaro (México) y Universidad de Laval (Canadá).
- Zepeda G. J. A. (1995) "*Notas del curso de Comportamiento de Suelos I*" DEPFI de la UAQ.

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel. (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel. (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx