

01162

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MEXICO**



**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA**

**SIMULACIÓN DE POLÍTICAS DE OPERACIÓN
EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE
AGUASCALIENTES**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA HIDRÁULICA**

PRESENTA:

GERARDO ANTONIO ORTIZ FLORES

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. CARLOS GUTIÉRREZ OJEDA



CAMPUS MORELOS, MÉXICO

2005

m343302



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.

Índice

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Justificación	7
1.3 Objetivos	8
1.4 Metodología	8
II. MARCO FÍSICO	10
2.1 Descripción de la zona de estudio	11
2.1.1 Localización	11
2.1.2 Fisiografía	12
2.1.3 Climatología	14
A. Precipitación	14
B. Evaporación	15
C. Temperatura	16
2.1.4 Hidrografía	17
2.2 Geología	20
2.2.1 Geología regional	20
2.2.2 Estratigrafía	22
A. Precretácico	22
B. Cretácico	22
C. Terciario	23
D. Cuaternario	23

2.3 Hidrogeología	27
2.3.1 Características geológicas	27
2.3.2 Red de pozos de observación	28
2.3.3 Movimiento del agua subterránea	29
2.3.4 Censo de aprovechamientos y volumen de extracción	33
2.4 Modelo conceptual	34
2.5 Balance hidrológico	36
2.5.1 Evaluación de las entradas	37
A. Entradas por flujo subterráneo horizontal	37
B. Infiltración por precipitación	45
C. Infiltración de ríos	45
D. Infiltración por fugas en la red de agua potable	49
2.5.2 Evaluación de las salidas	50
A. Salidas por flujo subterráneo horizontal	50
B. Salidas por bombeo	52
III. DISEÑO DEL MODELO Y CALIBRACIÓN	54
3.1 Descripción del programa	55
3.2 Relaciones entre el modelo conceptual y numérico	56
3.2.1 Selección del área modelada	56
3.2.2 Tipo de modelo	56
3.2.3 Discretización espacial y temporal	57
A. Tipo de malla	57
B. Definición de los estratos del modelo	58
C. Orientación de la malla	58
D. Discretización en tiempo	59

3.2.4	Definición de las fronteras del modelo	59
A.	Fronteras de carga hidráulica asignada	59
B.	Fronteras de flujo asignado	60
3.2.5	Asignación de los parámetros a las celdas	61
A.	Topografía	62
B.	Basamento del acuífero	62
C.	Conductividad hidráulica	63
D.	Rendimiento específico	63
E.	Porosidad	64
F.	Recarga vertical por lluvia	65
G.	Recarga por fugas en la red de agua potable	65
H.	Pozos de extracción	66
3.3	Calibración del modelo	67
3.3.1	Calibración en condiciones iniciales	68
3.3.2	Calibración en estado transitorio	68
3.3.2.1	Cargas hidráulicas	70
3.3.2.2	Balance de agua	73
3.3.3	Análisis de sensibilidad	75
A.	Recarga	76
B.	Conductividad hidráulica	77
C.	Refinamiento de la malla	78
IV.	SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS	79
4.1	Simulaciones al año 2010	80
4.1.1	Escenario 1	80
4.1.2	Escenario 2	81
4.1.3	Escenario 3	82
4.2	Simulaciones al año 2020	83
4.2.1	Escenario 4	83
4.2.2	Escenario 5	84

4.2.3 Escenario 6	85
4.3 Evaluación de alternativas	86
4.4 Ventajas y limitaciones del modelo	90
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
VI. BIBLIOGRAFÍA	95

INDICE DE FIGURAS

	Página
1.1 Discontinuidad piezometrica en el acuífero de Aguascalientes	4
1.2 Sección transversal piezometrica A-A'	5
1.3 Sección transversal piezometrica B-B'	5
1.4 Aspecto del flujo subterráneo en falla con barrera	6
2.1 Localización área de estudio	11
2.2 Fisiografía	13
2.3 Variación de la precipitación media mensual en la estación Aguascalientes	15
2.4 Variación de la evaporación media mensual en la estación Aguascalientes	16
2.5 Variación de la temperatura media mensual en la estación Aguascalientes	17
2.6 Hidrografía y Isoyetas medias anuales	19
2.7 Mapa hidrogeológico	25
2.8 Sección Hidrogeológica A-A'	26
2.9 Sección hidrogeológica B-B'	26
2.10 Acuíferos del estado de Aguascalientes	27
2.11 Configuración piezométrica para 1969 en msnm	30
2.12 Configuración piezométrica para 1980 en msnm	31
2.13 Configuración piezométrica para 1995 en msnm	31
2.14 Configuración piezométrica para 2001 en msnm	32
2.15 Evolución del nivel estático (1969-2001)	32
2.16 Modelo conceptual	35
2.17 Sitios con valores de conductividad hidráulica	38
2.18 Equipotenciales y líneas de flujo para el año 1969	40
2.19 Equipotenciales y líneas de flujo para 1969	41
2.20 Equipotenciales y líneas de flujo para 1969	43
2.21 Proceso de recarga en acuíferos libres	46
3.1 Celda con discretización espacial	57
3.2 Discretización del acuífero del valle de Aguascalientes	58
3.3 Tipos de frontera del modelo	60
3.4 Espesor probable del material permeable	62

3.5 Distribución de la conductividad hidráulica	63
3.6 Distribución de la recarga	65
3.7 Ubicación de los pozos de extracción	67
3.8 Comparación de cargas calculadas y observadas (1980)	69
3.9 Comparación de cargas calculadas y observadas (1995)	69
3.10 Comparación de las cargas calculadas y observadas (2001)	70
3.11 Cargas observadas contra las calculadas (1995)	72
3.12 Cargas observadas contra las calculadas (2001)	73
3.13 Error medio absoluto para el análisis de sensibilidad	76
3.14 Desviación estándar para el análisis de sensibilidad	77
3.15 Refinamiento de malla y configuración piezométrica calculada	78
4.1 Configuración piezométrica (2010). Escenario 1	81
4.2 Configuración piezométrica (2010). Escenario 2	82
4.3 Configuración piezométrica (2010), Escenario 3	83
4.4 Configuración piezométrica (2020). Escenario 4	84
4.5 Configuración piezométrica (2020), Escenario 5	85
4.6 Configuración piezométrica (2020), Escenario 6	86
4.7 Comparación de alternativas propuestas (2010) Fila 5	88
4.8 Comparación de alternativas propuestas (2010) Fila 8	88
4.9 Comparación de alternativas propuestas (2020) Fila 5	89
4.8 Comparación de alternativas propuestas (2020) Fila 8	89

INDICE DE CUADROS

	Página
2.1 Provincias y subprovincias fisiográficas	12
2.2 Características de los acuíferos	28
2.3 Volúmenes autorizados en la zona de estudio para 1996	34
2.4 Valores de conductividad hidráulica en m/día	38
2.5 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1969 (Norte-Sur)	39
2.6 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1969 (Oeste-Este)	39
2.7 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1980 (Norte-Sur)	40
2.8 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1980 (Oeste-Este)	41
2.9 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1995 (Norte-Sur)	42
2.10 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1995 (Oeste-Este)	42
2.11 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 2001 (Norte-Sur)	43
2.12 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 2001 (oeste-este)	44
2.13 Resumen de las entradas por flujo horizontal subterráneo	44
2.14 Valores de la constante C_1	48
2.15 Salidas por flujo subterráneo horizontal para 1980	50
2.16 Salidas por flujo subterráneo horizontal para 1995	51
2.17 Salidas por flujo subterráneo horizontal para 2001	51
2.18 Resumen de salidas por flujo subterráneo horizontal	52
2.19 Volúmenes de extracción	52
2.20 Variables del balance hidrológico subterráneo	53
3.1 Información requerida para alimentar el modelo de flujo	61
3.2 Rango de valores de porosidad	64
3.3 Volúmenes de extracción primer periodo (1969-1980)	66
3.4 Error medio, error medio absoluto y desviación estándar	71
3.5 Comparación del balance hidrológico calculado y simulado para 1980	74
3.6 Comparación del balance hidrológico calculado y simulado para 1995	74
3.7 Comparación del balance hidrológico calculado y simulado para 2001	75
4.1 Evolución del nivel estático simulado para el 2010	87
4.2 Evolución del nivel estático simulado para el 2020	87

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El estado de Aguascalientes cuenta con escasos recursos hidráulicos superficiales, por ello el agua subterránea es de gran importancia para satisfacer las demandas de agua potable, agrícola e industrial de la región. En 2001, la extracción del agua subterránea en el acuífero del valle de Aguascalientes se realizaba a través de 1892 pozos. De estos, el 74% se destinaba a la agricultura, el 23% para uso público urbano, el 2% para la industria y el 1% para uso pecuario y rural (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1986).

La capital del estado, Ciudad de Aguascalientes, tenía aproximadamente 643,419 habitantes (INEGI – XII Censo General de Población y Vivienda 2000) los cuales dependían exclusivamente del agua subterránea para su abastecimiento. En 2001, un caudal del orden de 2,600 litros por segundo se extraía a través de 137 pozos distribuidos en la zona urbana, en un área de alrededor de 80 km². El principal volumen de extracción provenía del acuífero principal del valle de Aguascalientes, el cual está alojado en depósitos aluviales constituidos por gravas, arenas y arcillas y que se clasifica como libre. Otra fuente de agua subterránea que también es explotada para el abastecimiento de la ciudad proviene de los pozos perforados hacia el oriente de la ciudad en la zona conocida como “Ojo Caliente”. Estos aprovechamientos se perforaron entre 1990 y 1997, y explotan un acuífero emplazado en un medio fracturado clasificado como semi - confinado, cuyo espesor y límites no están definidos.

La explotación intensiva del acuífero granular a través de la red de pozos para abastecimiento municipal han provocado una serie de efectos negativos dentro de la zona urbana como: 1) el abatimiento paulatino de los niveles y como consecuencia la reducción en el rendimiento de los pozos; 2) el deterioro en la calidad del agua; y 3) la presencia de asentamientos y agrietamientos del terreno (IMTA, 1996).

Los abatimientos han provocado la presencia de asentamientos del terreno en la zona urbana y en los municipios aledaños como Jesús María y Pabellón. Este fenómeno ha sido estudiado en diferentes épocas por Aranda – Gómez (1991), La Comisión Estatal de Agua Potable y Alcantarillado (CEAPA, 1991) y Murillo (1993), los cuales coinciden en señalar que el abatimiento en el acuífero es la causa más probable de la generación de los asentamientos del terreno. La CEAPA en el año de 1995 elaboró una zonificación de las principales fallas y agrietamientos dentro de la zona urbana de acuerdo con el grado de riesgo para las obras civiles. De esta clasificación destacan los agrietamientos a lo largo de la traza de la falla oriente del valle, en donde los efectos sobre las obras civiles son más evidentes (IMTA, 1996).

De acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua (CNA) en el periodo comprendido entre 1986 y 2001 el ritmo de abatimiento promedio en el acuífero granular que subyace a la zona urbana varió entre 2 y 4 m/año, encontrándose los mayores descensos en el centro de la zona urbana, donde se concentran los pozos que extraen agua para uso potable. Los menores descensos se observan alrededor de la zona urbana y los límites del acuífero. Entre 1994 y 1996 se han registrado abatimientos promedio del acuífero alojado en rocas fracturadas de 5 m/año (IMTA, 1996).

La piezometría de la zona indica además una discontinuidad en los valores de las cargas hidráulicas hacia el oriente, producto de la probable presencia de una falla geológica, lo cual hace que los abatimientos en la zona se incrementen más que hacia otras zonas del valle (figura 1.1). A partir de la configuración piezométrica mostrada en la figura 1.1, se construyeron dos secciones transversales A-A' y B-B (figura 1.2 y 1.3), en donde se observa que las cargas hidráulicas de los pozos emplazados en la porción Oeste del acuífero, fluctúan entre 1740 y 1780 msnm, mientras que las cargas las observadas en la porción Este, entre 1820 y 1860 msnm. Esta brusca diferencia muestra la existencia de una discontinuidad hidráulica, la cual probablemente sea originada por una falla geológica.

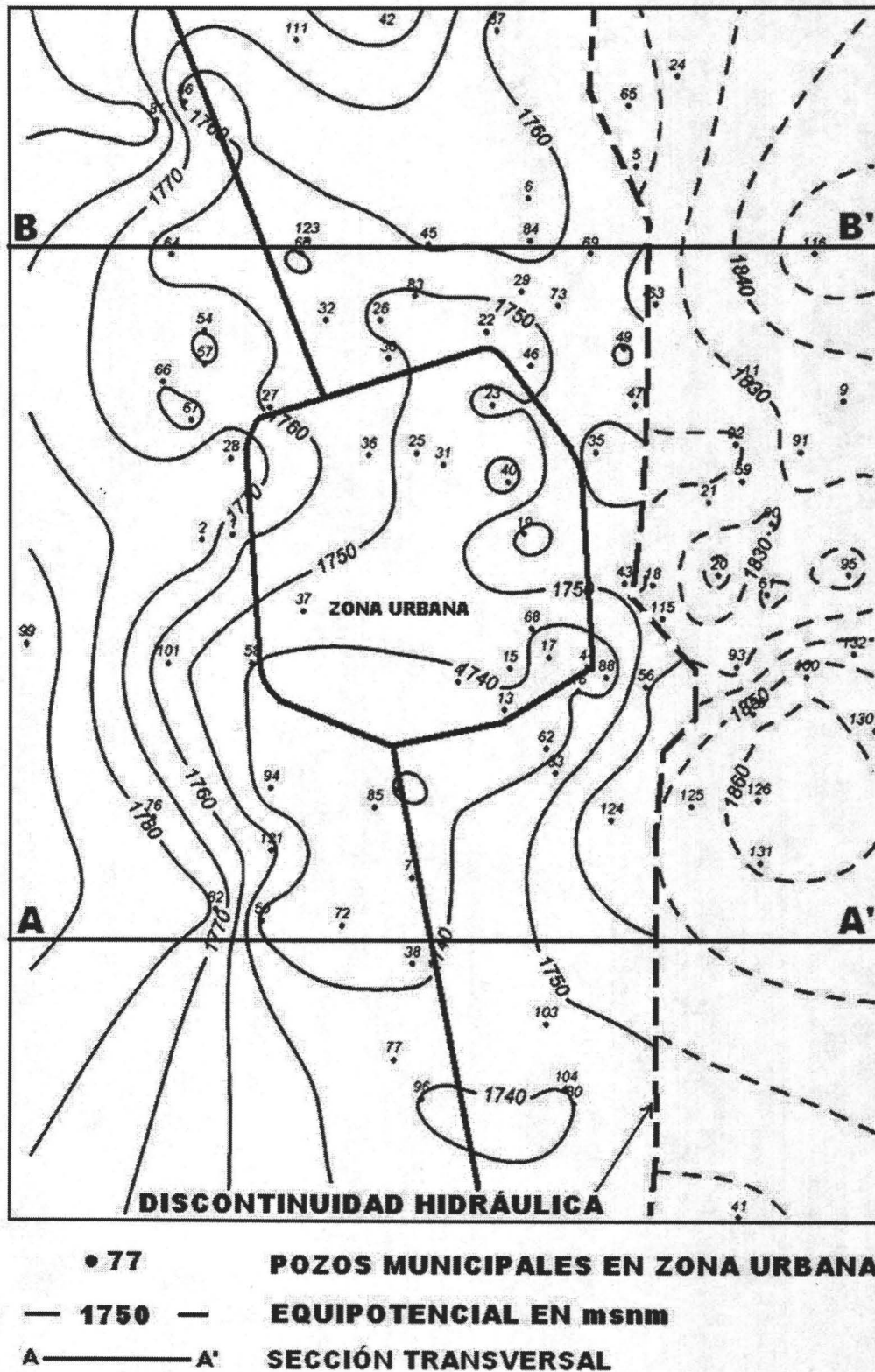


Figura 1.1 Discontinuidad piezométrica en el acuífero de Aguascalientes.

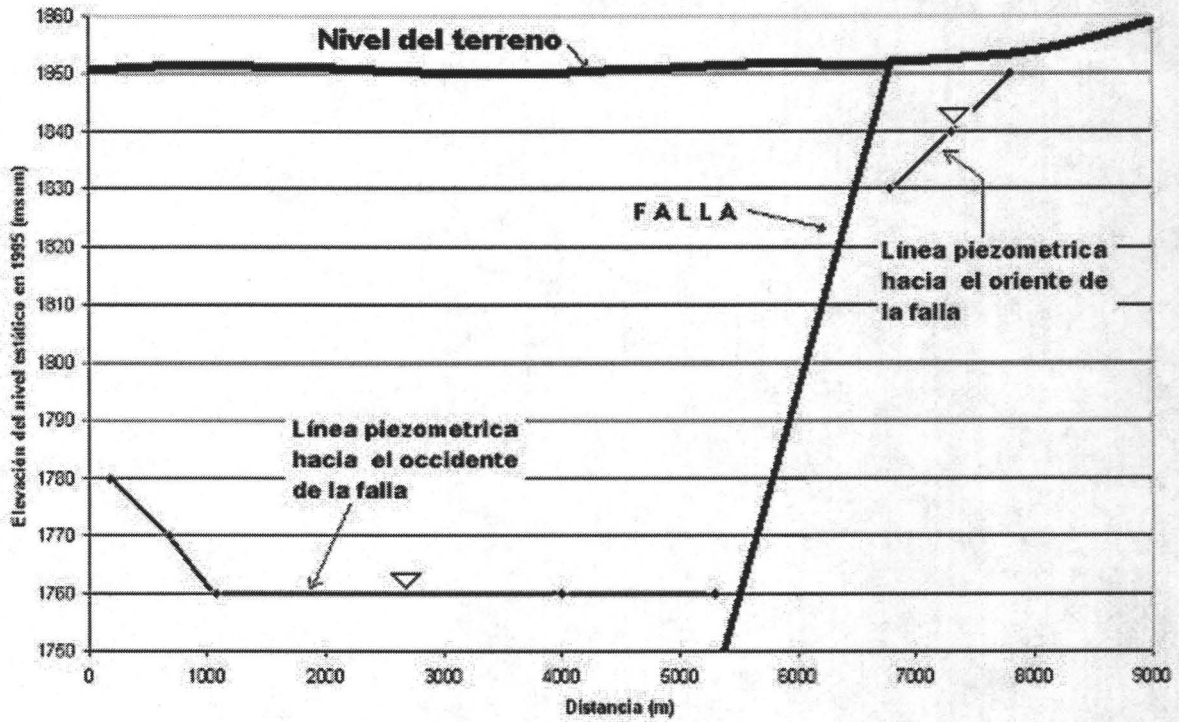


Figura 1.2 Sección transversal piezométrica A-A'.



Figura 1.3 Sección trasversal piezométrica B-B'.

La falla geológica constituye una característica estructural que desde el punto de vista hidrológico, juega un papel importante dentro del flujo subterráneo. Al respecto, según Freeze y Cherry (1979), cuando una falla se constituye por materiales de grano grueso y en menor proporción por finos, proporciona que el material resultante sea altamente permeable. Mientras que aquella falla que se constituye en mayor proporción por materiales de grano fino puede formar una barrera impermeable. La figura 1.4 muestra el efecto de dos posibles configuraciones de fallas sobre la posición del nivel freático en una roca con pendiente.

La calidad del agua subterránea en el acuífero se considera apta para todo uso, no obstante, existen pozos cercanos a la margen del río San Pedro que están siendo afectados por la infiltración de las aguas residuales (IMTA, 1996).

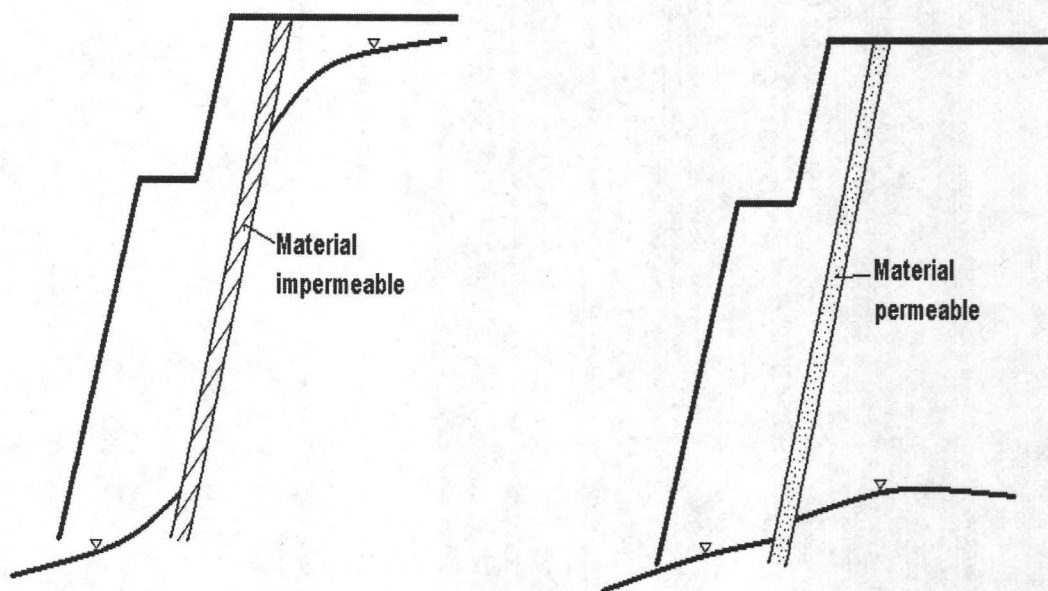


Figura 1.4 Aspecto de flujo subterráneo en falla como barrera impermeable y permeable (Freeze & Cherry, 1979).

1.2 Justificación

Las propuestas de solución viables para aminorar los efectos de la presencia de la falla y la explotación intensiva del agua subterránea son: 1) la reducción de los caudales de extracción; 2) la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento y 3) la reubicación de los pozos.

Ante la explotación intensiva del acuífero, principalmente en la zona urbana, en este trabajo se propone la reubicación de los pozos hacia otras zonas del acuífero. Los nuevos pozos deberán ser perforados de manera perpendicular y lo más alejado posible de la falla geológica. Los escenarios de explotación simulados proporcionarán información sobre los abatimientos producidos en el nuevo campo de pozos y se podrá apreciar la disminución del ritmo de abatimiento de los niveles piezométricos en la zona urbana, los cuales a mediano plazo disminuirán los efectos adversos producidos por la explotación.

Para ello se calibró un modelo de flujo en el periodo comprendido entre 1969 y 1995, realizando una recalibración en el periodo de 1995 y 2001, y se proyecta una predicción en el periodo de 2001 al 2010 y 2020. Los escenarios simulados proponen tres diferentes políticas de explotación considerando en los tres el volumen de extracción registrado hasta el 2001: 1) Simulación sin reubicación de pozos; 2) Simulación con reubicación de pozos hacia la zona sur en un arreglo perpendicular a la falla geológica; 3) Simulación con reubicación de pozos hacia la zona sur en un arreglo diagonal a la falla.

Hasta el año 2001, se consideró el mismo volumen de extracción, ya que el acuífero se encuentra en veda rígida.

Los resultados de este trabajo podrían ayudar a las autoridades de la CNA (locales, estatales y municipales) a tomar decisiones sobre el manejo de las políticas de explotación para un uso sustentable del recurso

Ante esta situación y con el propósito de atenuar los efectos antes mencionados, se plantea como una propuesta que 30 de los 137 pozos municipales emplazados en la zona urbana y cerca de la falla deben quedar fuera de operación, el volumen de agua que extraen estos pozos será aportado por nuevos pozos que deben ser perforados de manera perpendicular y lo más lejos posible de la frontera (Heath, 1982).

El principal planteamiento que se hace en el presente trabajo es el analizar los efectos (abatimientos) que producirá la operación de nuevas baterías de pozos, teniendo presente que no se desea generar abatimientos del mismo orden que en la zona urbana, buscando un número apropiado de pozos.

1.3 Objetivos

El objetivo del presente trabajo es el evaluar la factibilidad técnica de reubicar un número de pozos destinados al uso de agua potable hacia la zona sur de la Ciudad de Aguascalientes en áreas cercanas a la zona urbana, así como seleccionar los sitios más favorables para la perforación de una nueva batería de pozos.

1.4 Metodología

De acuerdo con los objetivos planteados, las actividades para el desarrollo del presente estudio se apoyó en investigaciones bibliográficas y datos de campo obtenidos de estudios realizados para la Comisión Nacional del Agua por empresas como Ariel Consultores (1971), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (1996) y la Comisión Estatal de Agua Potable y Alcantarillado de Aguascalientes (1990).

La información piezométrica de la red de pozos de observación fue procesada y depurada para generar una base de datos histórica confiable. Se definió un

modelo conceptual y después se realizó un balance hidrológico subterráneo en donde se cuantificaron las variables involucradas como los volúmenes de lluvia que ocurren en la zona de estudio, evaporación, entradas por flujo subterráneo, etc.

Para definir la geometría del acuífero se utilizó la prospección geofísica realizada por el IMTA (1996), en donde se realizaron interpretaciones de datos gravimétricos y sondeos eléctricos verticales. En base a toda esta información se planteó un modelo conceptual del sistema acuífero y posteriormente se realizó un balance hidrológico subterráneo, en donde se identificaron y cuantificaron las variables involucradas

Se calibró un modelo de simulación de flujo de agua subterránea para un periodo de 32 años, comprendido entre los años de 1969 y 2001.

Se plantearon tres distintos arreglos de los pozos con el objeto de definir los abatimientos y elevaciones del nivel piezométrico producidos por el nuevo campo de pozos a largo plazo para los años 2010 y 2020.

Cabe señalar que el estudio del IMTA en 1996 fue realizado por el autor de esta tesis y consistió en la construcción de un modelo para la simulación del flujo del agua subterránea a través del paquete Graphic Groundwater, calibrando en el periodo comprendido entre 1969 y 1996, realizando una predicción hasta el año 2005. En el presente trabajo se realizó la modelación mediante el paquete Visual Modflow, realizando la calibración en el periodo comprendido entre 1969 y 2001, proponiendo distintos arreglos de los pozos reubicados, así como la simulación de nuevos escenarios de explotación.

Finalmente se analizaron los resultados y se emitieron las conclusiones y recomendaciones del estudio.

II. MARCO FÍSICO

2.1 Descripción de la zona de estudio

2.1.1 Localización

La zona de estudio comprende la superficie de los municipios de Aguascalientes y de Jesús María, en su porción sur del estado. Geográficamente se localiza entre las coordenadas $102^{\circ}10'$ a $102^{\circ}32'$ de longitud oeste y $21^{\circ}39'$ a $22^{\circ}02'$ de latitud norte (figura 2.1). La zona abarca desde el poblado de Jesús María hasta el sur del aeropuerto.

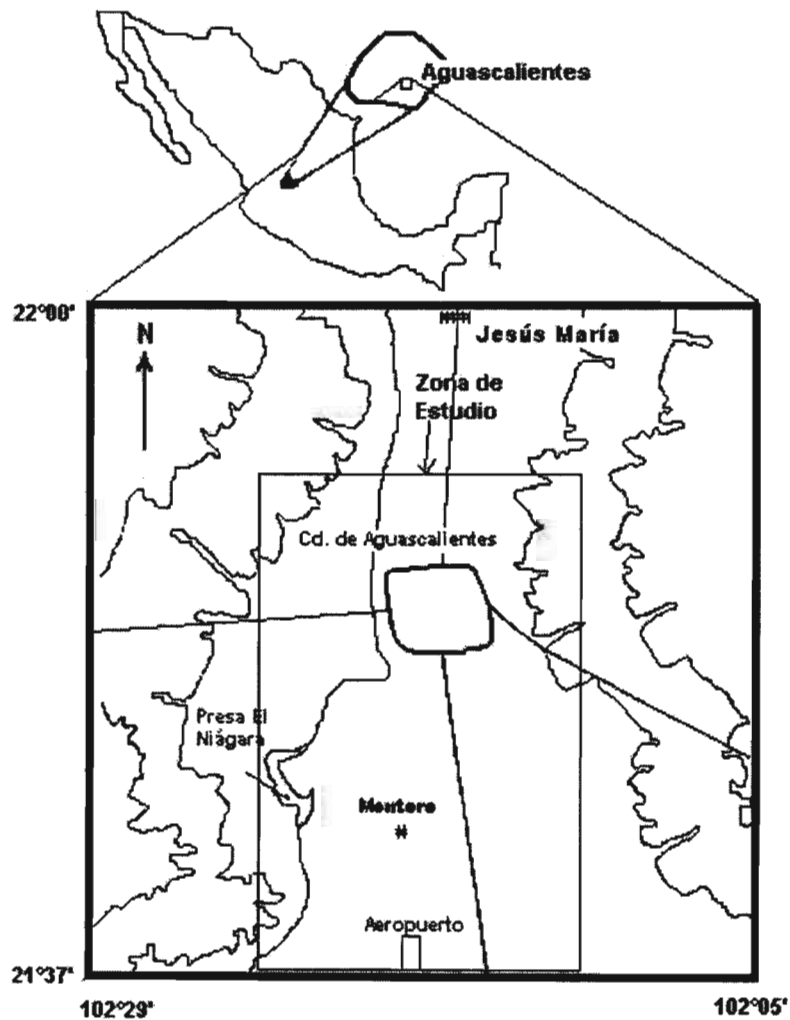


Figura 2.1 Localización del área de estudio.

2.1.2 Fisiografía

El estado de Aguascalientes comprende tres Provincias Fisiográficas que a su vez están representadas por tres subprovincias. En el cuadro 2.1 y figura 2.2 se observan las tres provincias y sus respectivos porcentajes de área.

Cuadro 2.1 Provincias y subprovincias fisiográficas del estado de Aguascalientes.

Provincia	Subprovincia	% de la superficie estatal
Sierra Madre Occidental	Sierras y Valles Zacatecanos	47
Mesa del Centro	Llanuras de Ojuelos - Aguascalientes	50
Eje Neovolcánico	Altos de Jalisco	3

La Provincia de la Sierra Madre Occidental está representada por la Subprovincia de Sierras y Valles Zacatecanos extendiéndose en el extremo oeste del área de estudio dentro del estado. Esta zona comprende parte de los municipios de Cosío, Jesús María, Pabellón de Arteaga y Rincón de Romos. Limita al Este y al Sur respectivamente con las Provincias de la Mesa Central y el Eje Neovolcánico y continúa hacia el Norte en el territorio del estado de Zacatecas. La Subprovincia de Sierras y Valles Zacatecanos se le distingue por la gran cantidad de terrazas y lomeríos que se observan en la zona (Briseño, 2000).

La Provincia Mesa del Centro está representada por la subprovincia de Llanuras de Ojuelos – Aguascalientes, extendiendo sus límites al Oeste y al Sur con las Provincias Sierra Madre Occidental y Eje Neovolcánico. Se caracteriza por sus lomeríos redondeados con pendientes suaves y altitudes que oscilan entre los 2000 y 2500 m.s.n.m.

La Provincia Eje Neovolcánico, solo cubre una pequeña extensión en el extremo sur de la zona de estudio. Limita al Norte con las provincias de la Sierra Madre

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

Occidental y la Mesa del centro. La provincia está representada por la Subprovincia de los Altos de Jalisco que engloba la parte sur del municipio de Aguascalientes. La zona de estudio se ubica parcialmente dentro de la subprovincia Llanura de Ojuelos – Aguascalientes.



Figura 2.2 Fisiografía del estado de Aguascalientes (Briseño, 2000).

2.1.3 Climatología

Según la clasificación de climas propuesta por Köppen y modificada por E. García para la República Mexicana, el clima predominante en el estado de Aguascalientes es del tipo semiseco a semidesértico con medias anuales de temperatura de 17.4 °C, precipitación de 544 mm y evaporación potencial de 2460 mm (INEGI, 2003).

A continuación se describe la precipitación, evaporación y temperatura media basada en los datos de la estación Aguascalientes, la cual se considera como representativa de la zona de estudio. El periodo de lluvias se presenta entre los meses de junio a octubre y la época de estiaje entre los meses de enero a mayo, noviembre y diciembre.

A. Precipitación

Durante el periodo comprendido entre 1949 a 1999 (INEGI, 2003), la precipitación media mensual varió entre 6 y 136 mm, muestra máximos de 136 mm en el mes de junio y mínimos de 6 mm en marzo. La precipitación media anual resultante al periodo observado es de 544 mm. En la figura 2.3 se presenta la variación mensual de la precipitación en la estación antes descrita. En la figura 2.6 se muestran las isoyetas medias anuales en la zona de estudio.

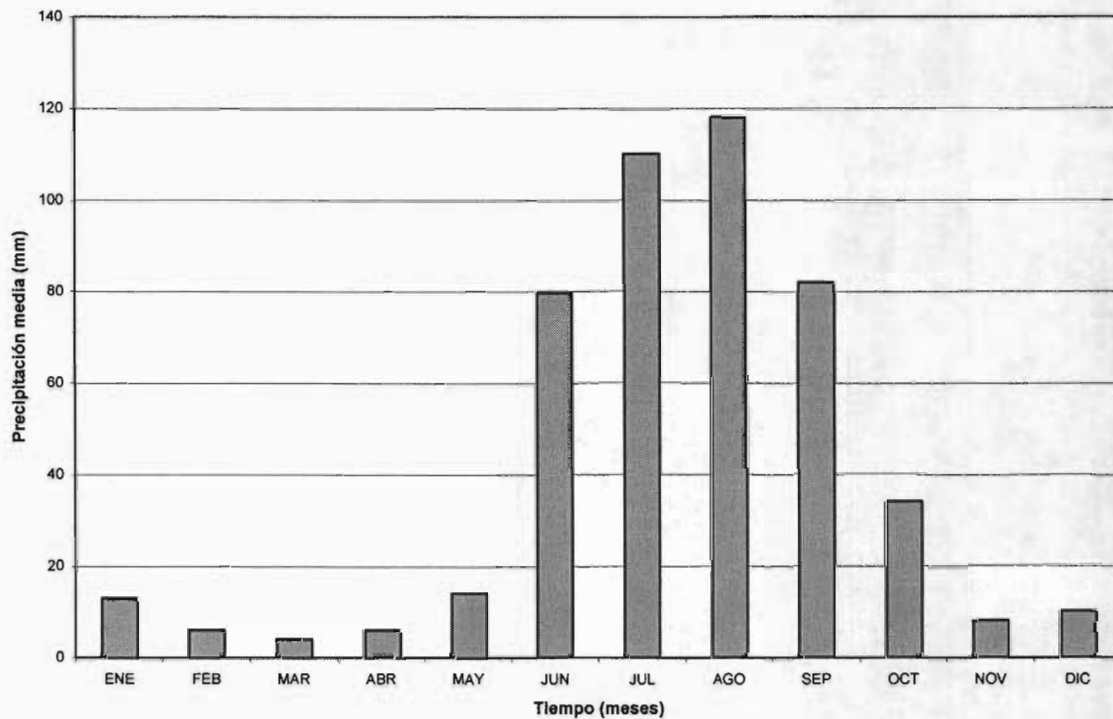


Figura 2.3 Variación de la precipitación media mensual en la estación Aguascalientes (INEGI, 2003).

B. Evaporación

La evaporación media mensual varía entre 135 y 300 mm, correspondientes a los meses de diciembre y mayo, respectivamente. La evaporación media anual resultante en el periodo observado (1970-1985) es de 2460 mm (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1986). En la figura 2.4 se presenta la variación mensual de la evaporación en la estación Aguascalientes.

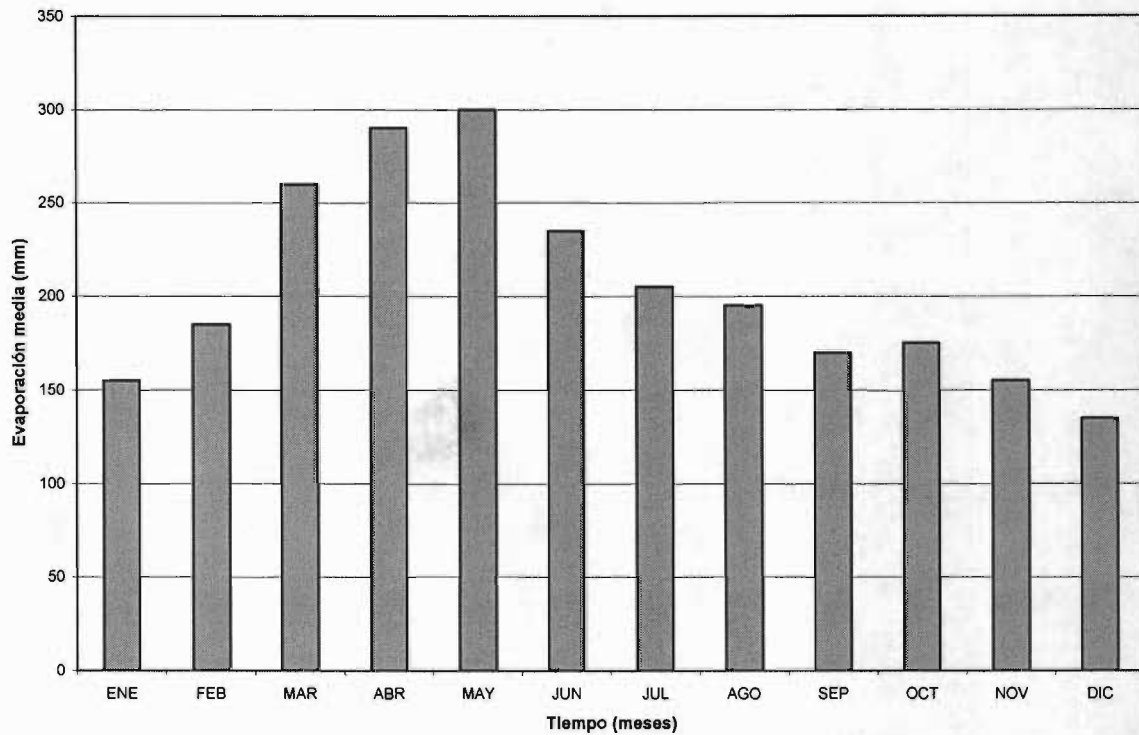


Figura 2.4 Variación de la evaporación media mensual en la estación Aguascalientes (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1986).

C. Temperatura

La temperatura media mensual durante el periodo comprendido entre 1949 a 1999 (INEGI, 2003), varió entre 13 y 24.5 °C, las mayores temperaturas se observan en mayo y las menores en los meses de diciembre y enero. La temperatura media anual es de 17 °C. En la figura 2.5 se presenta la variación mensual de la temperatura en la estación Aguascalientes.

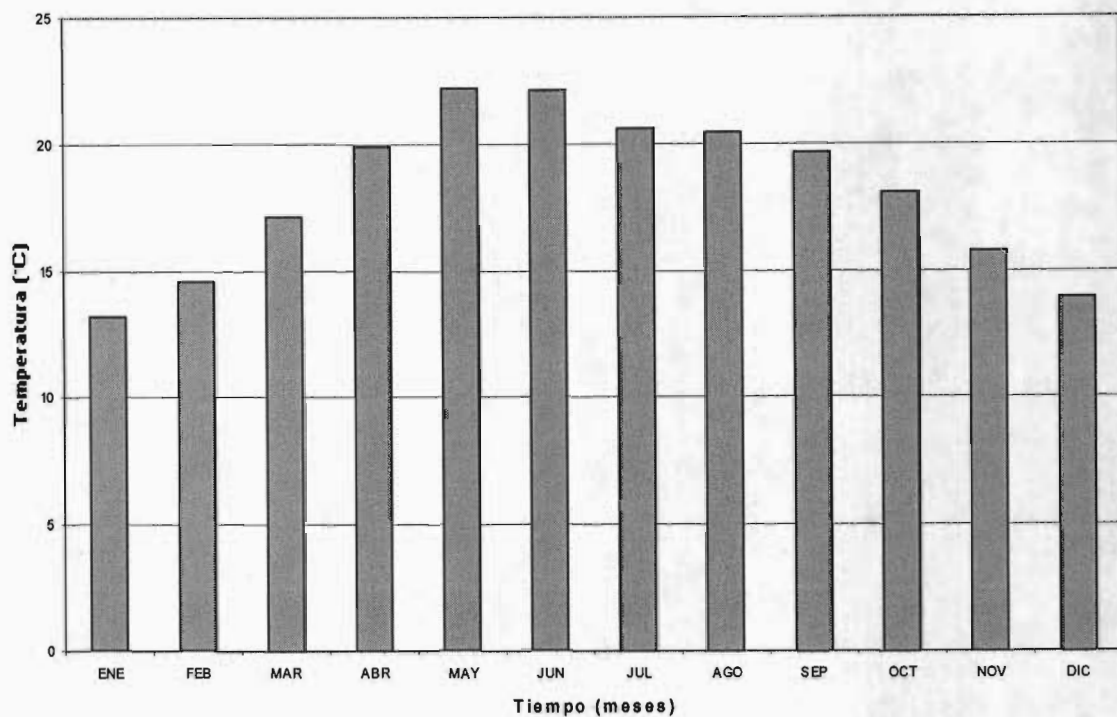


Figura 2.5 Variación de la temperatura media mensual en la estación Aguascalientes (INEGI, 2003).

2.1.4 Hidrografía

La zona de estudio pertenece a la Región Hidrológica No. 12, que corresponde al sistema denominado “Lerma Chapala – Santiago”. Esta Región cuenta con dos cuencas que son afluentes principales del Río Santiago: cuenca del río Verde y cuenca del río Juchipila. La cuenca del Río Verde incluye a toda la zona de estudio (figura 2.6), tiene una superficie total en el estado de 4,384 km² (INEGI, 1981) y recibe las aportaciones de las siguientes subcuencas:

A. Río San Pedro

Constituye la corriente principal y nace en las partes altas de la Sierra Fría que se ubica fuera de los límites del estado. En esta subcuenca se construyó la

presa Presidente Calles en el año de 1929, cuya capacidad de almacenamiento es de 350 Mm³. Dentro de la cuenca se encuentra el Distrito de Riego No. 1 "Pabellón de Arteaga".

B. Río Chicalote

Esta corriente drena la porción oriental del estado y también nace fuera de los límites del estado. Presenta tributarios en las partes altas de Asientos y Tepezalá y descarga sus aguas en la subcuenca del río Aguascalientes.

C. Río Morcinique

El río Morcinique drena una superficie de 258 km² y es tributario del río Aguascalientes (INEGI, 1981).

D. Río Aguascalientes

Esta subcuenca tiene una superficie de 990 km² y recibe las aportaciones de las subcuencas mencionadas anteriormente y finalmente descarga sus aguas en el río Verde. Sobre la corriente principal se localiza la presa "El Niágara", con una capacidad de almacenamiento de 16 Mm³.

E. Río Encarnación

Esta subcuenca drena la porción suroriental del estado.



Figura 2.6 Hidrografía y Isoyetas media anuales (Secretaria de Recursos Hidráulicos, 1986).

2.2 Geología

2.2.1 Geología Regional

Los párrafos correspondientes a este apartado fueron tomados de la siguiente referencia (Balderas y González, 1992).

En el estado de Aguascalientes afloran rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas tanto intrusivas como extrusivas, distribuidas en el tiempo desde el Mesozoico hasta el Cuaternario. Gran parte del estado y sus alrededores están cubiertos por rocas volcánicas depositadas principalmente en el Oligoceno-Mioceno. Al norte del estado y en Zacatecas abundan conos cineríticos en el lado oriental del extremo norte del graben de Aguascalientes.

Las rocas más antiguas que afloran en el Valle de Aguascalientes se localizan en el área de Tepezalá ubicada al norte del estado y consisten de esquistos de edad del Triásico-Jurásico, producto del metamorfismo regional de una secuencia pelítica. Es probable que estas rocas formen parte del basamento hidrogeológico del valle.

Durante el Cretácico, la parte centro septentrional de México estaba cubierta por las aguas de la provincia paleográfica del mar mexicano. En ella se depositaron sedimentos marinos del Jurásico Superior y del Cretácico que dominaba toda la parte central de México. A esta secuencia, pertenecen las rocas sedimentarias que afloran en el área de Tepezalá; le sobreyace una caliza arcillosa ínter estratificada con lutita calcárea de edad Turoniano y sobre ésta se presenta una alternancia de lutitas y areniscas de grano fino.

Durante el Cretácico Tardío y Terciario Temprano estas rocas fueron plegadas y fracturadas por los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide. Posteriormente, fueron intrusionadas por cuerpos de composición granítica que

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

produjeron mineralizaciones importantes de Pb - Zn. Dichos cuerpos se encuentran aflorando en las cercanías de los poblados de Tepezalá y Asientos. También existen una serie de diques de composición ácida clasificados como pórfido riolítico, con textura porfídica, a los cuales se les asigna una edad del Terciario Temprano.

A partir del Oligoceno y durante el Mioceno la actividad volcánica de la Sierra Madre Occidental produjo grandes volúmenes de rocas volcánicas de tipo ignimbrítico que cubrieron discordantemente a la secuencia cretácica y se distribuyeron en la margen occidental de México.

La unidad predominante en el estado consiste de ignimbritas riolíticas de color rojo a rosado, la cual se encuentra cubriendo discordantemente a las rocas cretácicas. Los afloramientos de mayor extensión son los siguientes: al occidente del estado y hacia Zacatecas, en lo que se conoce como las estribaciones orientales de la Sierra Madre Occidental; al norte, en la zona de Tepezalá (Asientos) donde también se tienen pórfidos riolíticos; al oriente, en el límite estatal con Jalisco y al sur con el cerro de los Gallos. A estas rocas se les ha asignado una edad del Terciario Medio por considerar que pertenecen a una secuencia ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental. Su espesor varía de los 80 a los 200 m y se encuentran formando cantiles, escarpes y extensas mesetas que presentan un alto grado de fracturamiento.

Sobreyaciendo a las ignimbritas se encuentra una brecha volcánica de composición ácida. El afloramiento de mayor extensión se encuentra en la presa "El Muerto" en donde se tiene un espesor aproximado de 40 m, aunque también se han reportado en los cortes litológicos de algunos pozos.

Sobre la anterior unidad se encuentran tobas, las cuales forman lomeríos redondeados de pendiente suave, que se localizan al oriente, sur y suroeste de la ciudad de Aguascalientes. Estas rocas varían en su composición distinguiéndose

como tobas vítreas y tobas clásticas semicompactas con aspecto masivo y en capas.

Los sedimentos continentales están constituidos principalmente por capas gruesas semiconsolidadas de arena con grava y limo-arenosas de aproximadamente 300 m de espesor, los cuales se encuentran rellenando las fosas tectónicas. La edad que se les ha asignado tentativamente es del Plioceno.

Las unidades más jóvenes están representadas por depósitos de pie de monte y rellenos aluviales. Los primeros se encuentran en las laderas de las sierras y cerros; los materiales aluviales se presentan en los cauces de los arroyos.

2.2.2 Estratigrafía

La estratigrafía de la zona en estudio se muestra en la Figura 2.6. En orden cronológico ascendente es la siguiente (Ariel Consultores, 1971):

A. Precretácico

Esquistos del paleozoico, compacto y de muy baja permeabilidad y rocas pre-cretácicas no diferenciadas, incluye rocas del Triásico-Jurásico. Se encuentran en la porción nor-oriental del estado de Aguascalientes.

B. Cretácico

K. Calizas arcillosas, lutitas, areniscas y calizas de edad no diferenciada del Cretácico

C. Terciario

Tleo (Cg). Depósitos continentales predominantemente lacustres.

Tleo (ar). Parte inferior conglomerática bien petrificada con matriz arcillo-arenosa calcárea, porciones media y superior, areniscas y tobas arenosas sueltas a bien litificadas. Poco permeable.

Tmi vr (ign). Ignimbritas y vidrios riolíticos compactos, permeables en zonas fracturadas.

Tmmi (r). Pórfidos de constitución riolítica y diabasas, compactas y prácticamente impermeables.

Tlpl (Cg). Depósitos lacustres arcillo-arenosos y calcáreos con intercalaciones de basalto en algunas áreas. Son poco permeables.

Tplb. Rocas efusivas basálticas compactas y de muy baja permeabilidad en su porción inferior.

D. Cuaternario

Qal-re. Depósitos aluviales, de pie de monte y residuales, sueltos a medianamente compactos. Los depósitos aluviales (Qal) comprenden los suelos areno - limosos que ocupan parcialmente las planicies y los cauces de ríos y arroyos; desde el punto de vista hidrogeológico presentan buenas características para la infiltración.

Qp. Depósitos de pie de monte, se presentan en las estribaciones de los cerros y sierras, consisten de arenas, gravas y cantos, de forma angular y

mal graduados; su composición depende de las rocas de las que fueron erosionadas. Por su posición topográfica y por estar sobre el nivel freático no se consideran acuíferos; sin embargo, por sus características de permeabilidad permiten la infiltración del agua hacia los acuíferos subyacentes.

Qf. Depósitos fluviales. Se presentan sobre los cauces de los ríos y arroyos, consisten de arenas, limos y gravas, que varían de composición de acuerdo con la fuente de origen que son las rocas volcánicas. Estos depósitos son los principales transmisores del agua de recarga en el valle de Aguascalientes.

Qar. Arenas tobáceas. Estos sedimentos continentales ocupan principalmente algunas áreas de las porciones central y sur oriental del estado de Aguascalientes, formando precisamente las partes bajas. Las mejores exposiciones se aprecian en general sobre los cauces de los ríos y arroyos, donde han quedado expuestos. Consisten de arenas tobáceas de grano fino, con colores que varían desde café amarillento al café rojizo en capas gruesas de estructura masiva con caliche. En ocasiones alternan con lentes de arena y gravas de color gris claro. Esta unidad se considera como la mayor y mejor productora de agua, debido a la construcción y operación de numerosos pozos existentes en el valle de Aguascalientes. Sus espesores son muy variables, desde unos cuantos metros en los contactos con las estribaciones de la sierra hasta más de 400 metros hacia el centro del valle.

Ab-Lp. Suelos areno-limosos. Estos suelos corresponden geológicamente a los depósitos aluviales antes mencionados. Comprenden básicamente los horizontes superiores del valle de Aguascalientes, y su origen se asocia a la acción del intemperismo sobre los sedimentos de los depósitos aluviales a

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

los que cubren. Debido a su granulometría, son susceptibles de transmitir el agua hacia las rocas que cubren.

La distribución de los afloramientos en la zona de estudio se presenta en la figura 2.7 y las secciones hidrogeológicas transversales en las figuras 2.8 y 2.9.

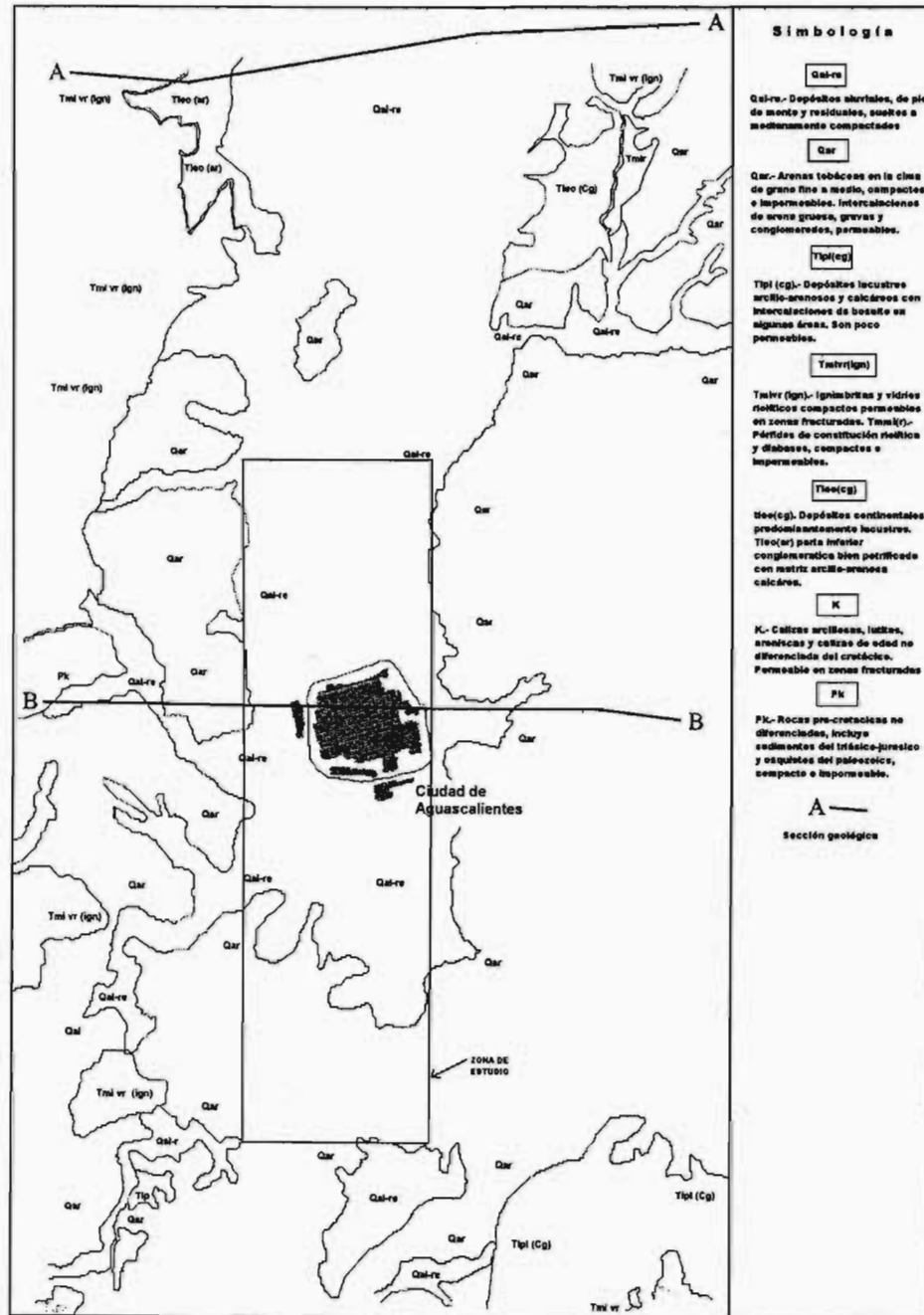


Figura 2.7 Mapa hidrogeológico (García Rojas, 1995).

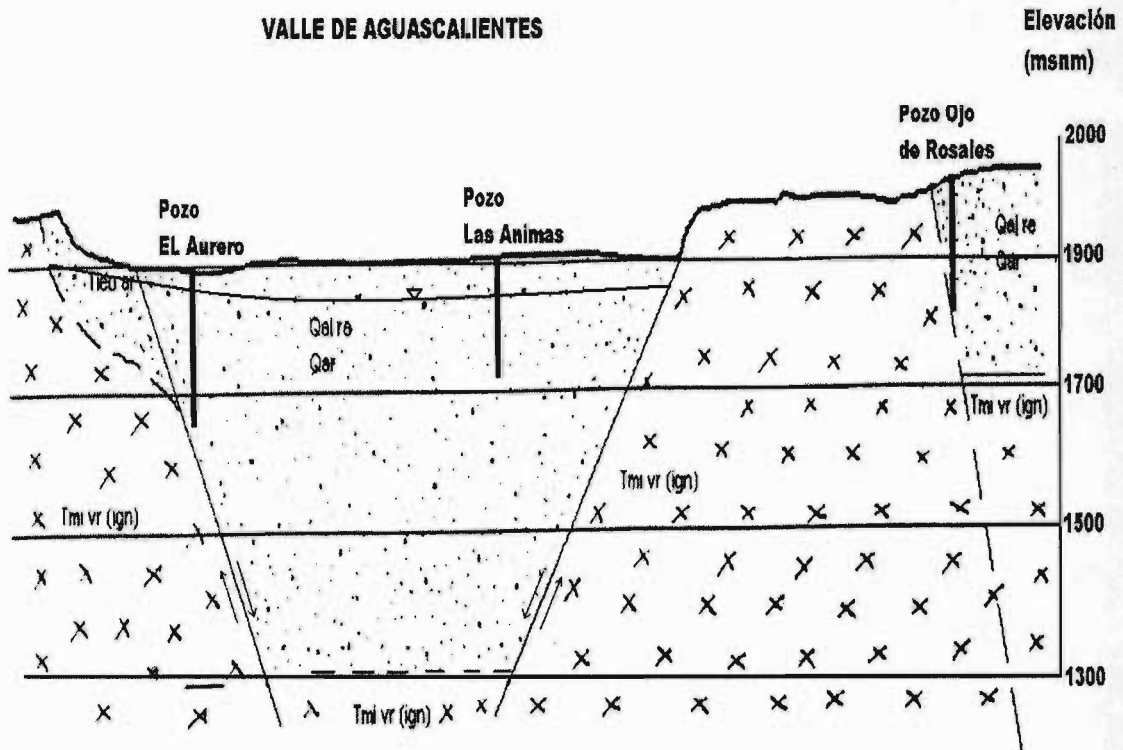


Figura 2.8. Sección Hidrogeológica A-A' (García Rojas, 1995).

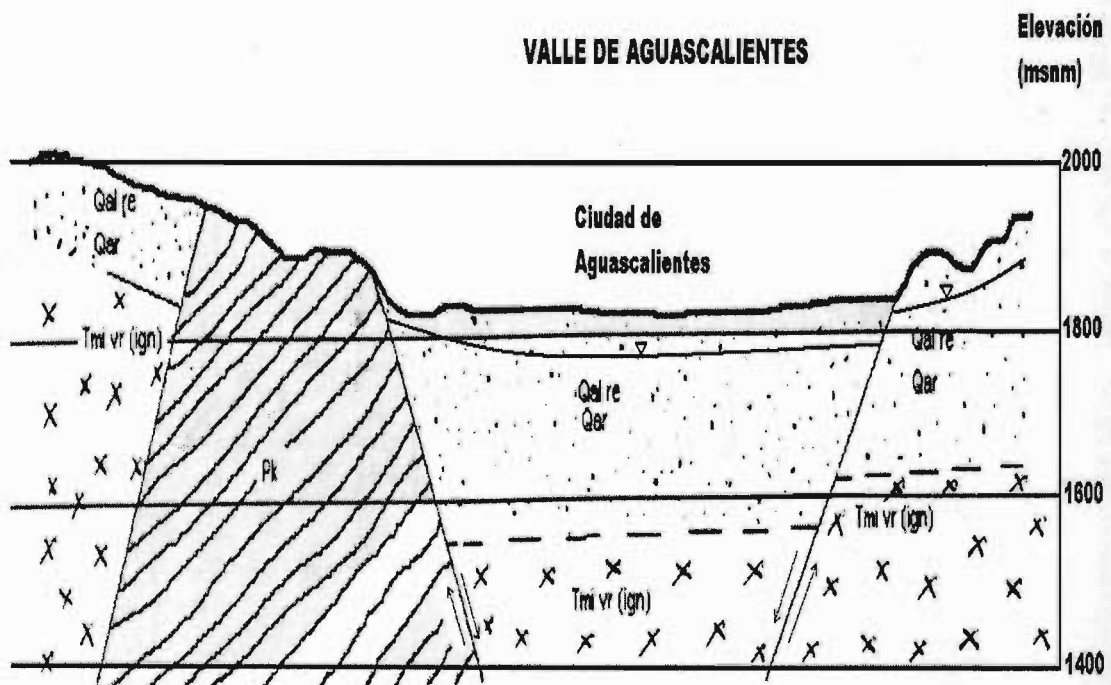


Figura 2.9. Sección Hidrogeológica B-B' (García Rojas, 1995).

2.3 Hidrogeología

2.3.1 Características geológicas

En el estado de Aguascalientes se han identificado los acuíferos denominados Aguascalientes, Chicalote, El Llano y Venadero, pertenecientes a la Provincia Fisiográfica del Altiplano Mexicano, y el denominado Calvillo, perteneciente a los macizos montañosos de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental. Cubren en conjunto un área de 1740 km². El acuífero del valle de Aguascalientes se localiza en la parte central del estado (figura 2.10).

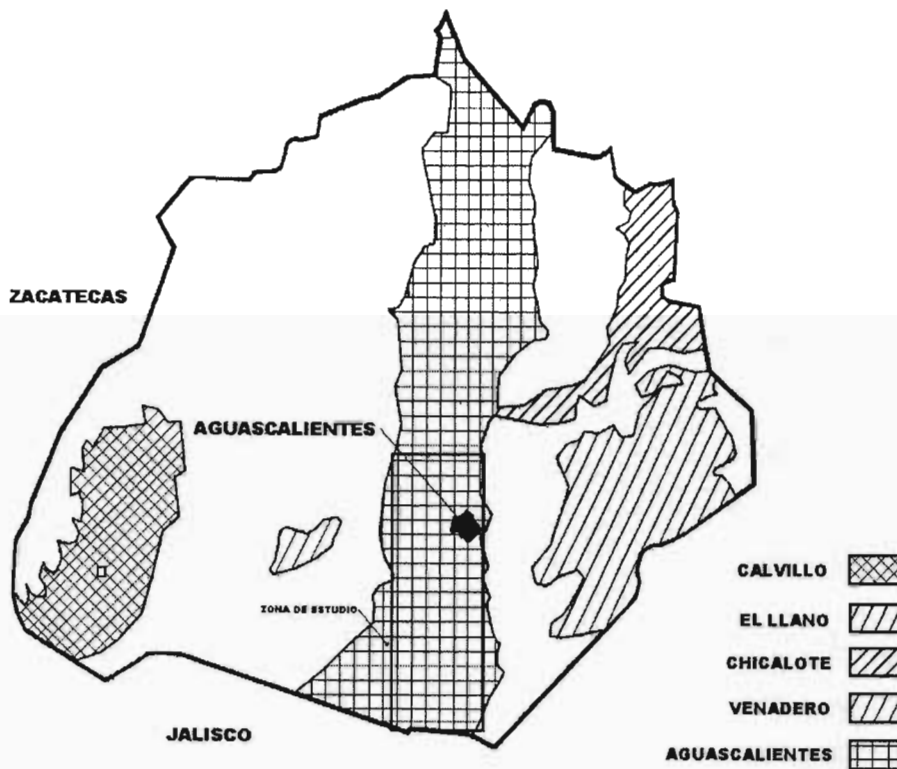


Figura 2.10 Acuíferos del Estado de Aguascalientes (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1986).

Con base en perforaciones exploratorias realizadas por la CNA se ha deducido que el acuífero del valle de Aguascalientes está constituido en su parte superior por materiales aluviales no consolidados como gravas, arenas, limos y arcillas que

forman estratos interdigitados de geometría irregular y cuyo espesor varía desde unos cuantos metros, en la periferia del valle, hasta más de 450 metros hacia el centro del mismo. Los materiales más gruesos y permeables tienen predominio en las proximidades de los cauces principales o en piedemontes. Subyaciendo al relleno de aluvión, se presentan los conglomerados y las rocas ígneas fracturadas. Tienen espesores de 200 a 300 metros y conforman la parte inferior del acuífero (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1986).

Las rocas de las montañas que circundan los valles de la entidad, son en general poco permeables, pero donde están fracturadas y alteradas funcionan como unidades receptoras y transmisoras del agua que recargan los almacenamientos subterráneos alojados en las partes bajas de la cuenca.

En el cuadro 2.2 se muestran las características más sobresalientes de los acuíferos considerados. Las diferencias en los valores explican de manera muy generalizada su diferente naturaleza y comportamiento hidráulico.

Cuadro 2.2. Características de los acuíferos.

Características	Acuífero	
	Medio granular	Medio fracturado
Tipo de acuífero	Libre	Semi - confinado
Porosidad	Primaria	Secundaria
Coefficiente de almacenamiento	0.1	0.0001
Unidad productora	Material aluvial	Rocas ígneas fracturadas
Temperatura	< 30°C	> 30°C

2.3.2 Red de pozos de observación

La primera red de pozos de observación documentada fue registrada en 1968 (Ariel Consultores, 1971). Los aprovechamientos se encontraban distribuidos desde el norte del acuífero en el límite estatal hasta el poblado de Montoro. Los

niveles piezométricos registrados en la parte norte eran de 1960 msnm y 1790 msnm en la parte sur (entre la presa “El Niágara” y el poblado Montoro). En esta configuración no se cuenta con información piezométrica en la parte sur del acuífero del valle de Aguascalientes, ya que no existían pozos.

En 1996 se identificaron 50 pozos de la red de monitoreo establecidos por la CNA en Aguascalientes, que se encontraban emplazados entre la ciudad de Jesús María hasta el límite sur del estado colindante con Jalisco. En estos aprovechamientos se realizó la nivelación de su brocal (IMTA, 1996).

En el 2001, en la zona de estudio se continuó utilizando la información piezométrica de la red de pozos establecida en 1996. La profundidad del nivel estático oscilaba entre los 60 y 140 m (figura 2.15).

2.3.3 Movimiento del agua subterránea

En condiciones naturales, el comportamiento del flujo del agua subterránea presentaba líneas equipotenciales paralelas obedeciendo a las zonas de recarga y perpendiculares a los límites del acuífero aluvial, con gradientes pequeños. Esto se debe a que el movimiento del agua en cuencas aluviales es de las áreas de recarga ubicadas aguas arriba (zona de Zacatecas, sierra fría, etc.) hacia las zonas de descarga (Edo. De Jalisco). No se dispone de una configuración piezométrica de este escenario, debido a que no se contaba con una red de observación (Ariel Consultores, 1971).

Las aguas subterráneas fluían de las zonas de recarga provenientes del norte y oeste hacia las zonas de descarga ubicadas hacia el sur del acuífero en los límites con el estado de Jalisco, presentando un flujo horizontal subterráneo y salidas por evapotranspiración.

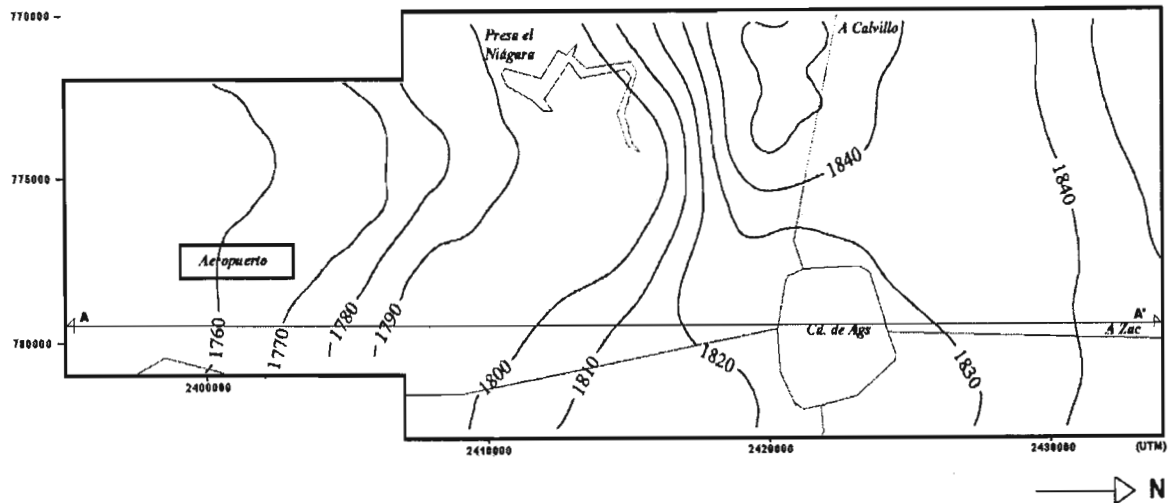


Figura 2.11 Configuración piezométrica para 1969 en msnm.

Con el transcurso del tiempo, el crecimiento de la población, de las áreas de producción y de la industria, originó la explotación intensiva del agua subterránea y se fue modificando la superficie piezométrica del acuífero. La extracción se concentró hacia la porción urbana. En las figuras 2.11 a 2.14 se muestran las configuraciones piezométricas para los años de 1969, 1980, 1995 y 2001, respectivamente.

En la figura 2.15 se muestra una sección esquemática de la evolución de niveles en el periodo comprendido entre 1969 y 2001, a partir de las secciones A-A', B-B' y C-C' de las figuras 2.11, 2.13 y 2.14. En esta podemos apreciar un abatimiento promedio de 1.20 m/año en la zona norte y de 1.5 m/año en la parte central. La elevación del nivel estático para el 2001 varía desde 1800 y 1720 m.s.n.m. en la zona urbana y 1730 m.s.n.m. en el límite sur del estado.

En términos generales podemos decir que la dirección del flujo subterráneo para el año 2001 es principalmente de norte a sur, procedente del estado de Zacatecas, con una salida hacia el sur del valle. La mayor parte del flujo subterráneo del

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

acuífero es captado en el Distrito de Riego 01 y, en la zona urbana de la Ciudad de Aguascalientes.

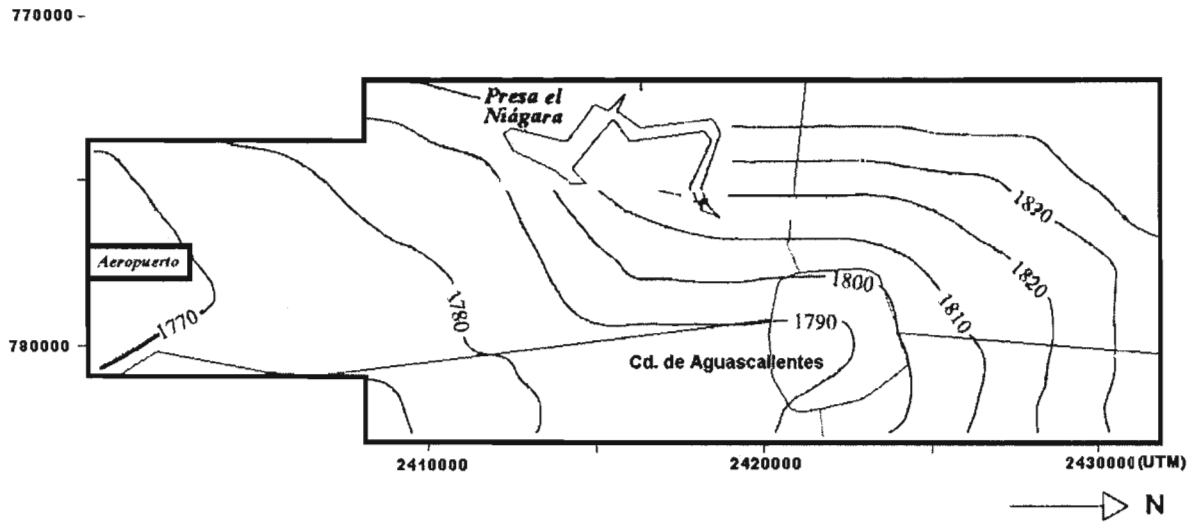


Figura 2.12 Configuración piezométrica para 1980 en msnm.

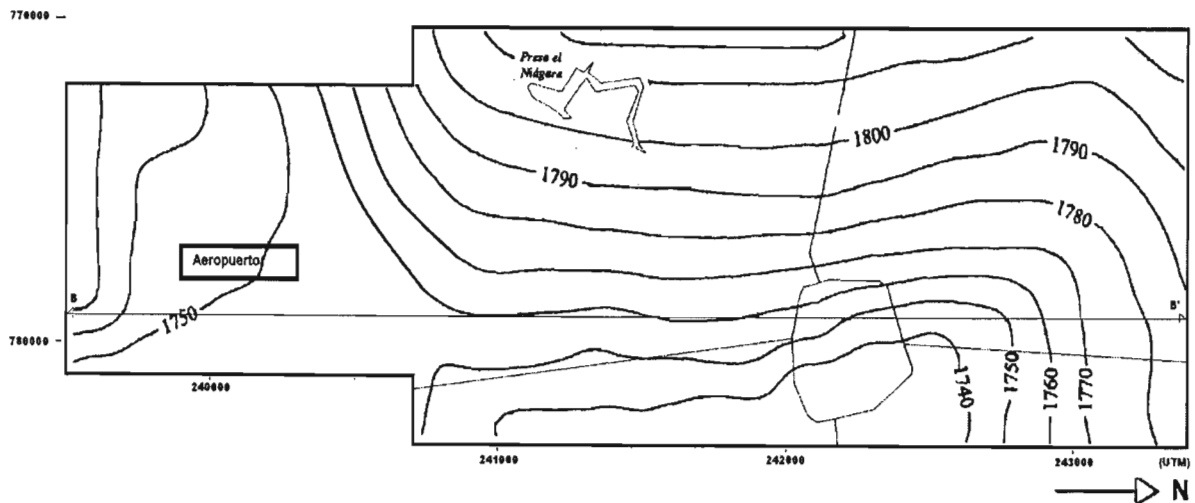


Figura 2.13 Configuración piezométrica observada para 1995 en msnm.

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

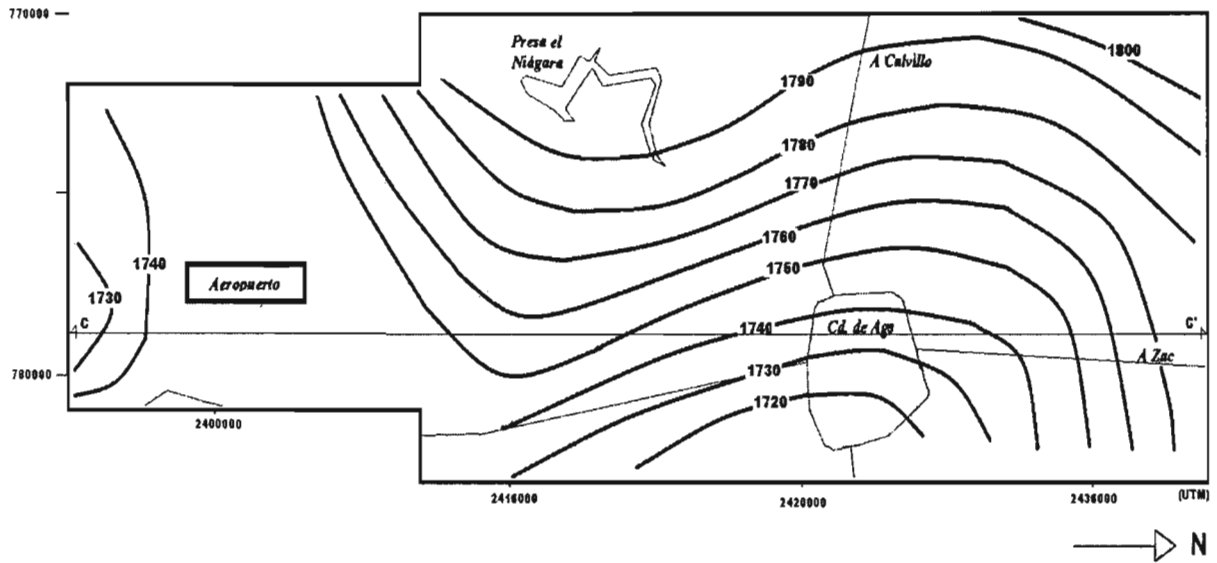


Figura 2.14 Configuración piezométrica observada (2001)

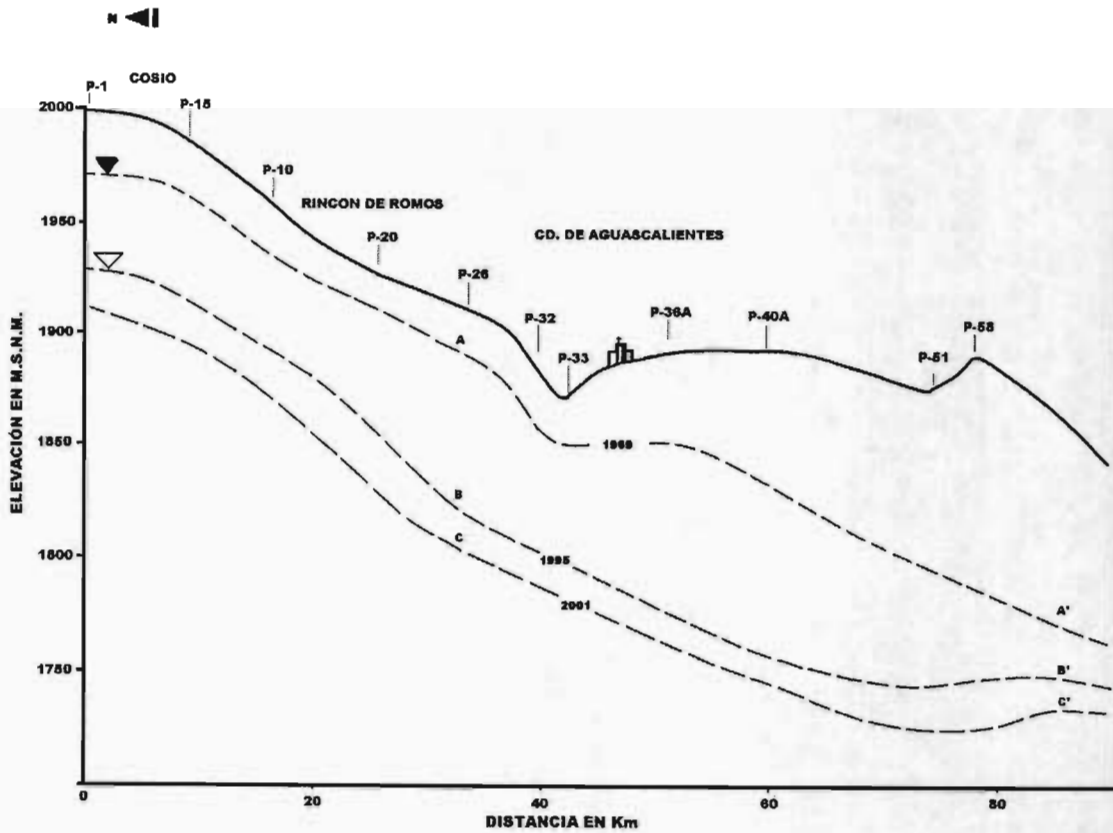


Figura 2.15 Evolución del nivel estático (1969-2001).

2.3.4 Censo de aprovechamientos y volumen de extracción

El primer censo de pozos del acuífero se realizó en 1969 (Ariel Consultores, 1971). En el censo se reportan 560 pozos para todo el acuífero, de los cuales 310 se ubican dentro de la zona de estudio. No existe información de los volúmenes extraídos pero suponiendo un caudal medio diario por pozo de 7 l/s basado en información sobre volúmenes autorizados por la CNA (IMTA, 1996), se calculó un volumen de extracción anual de 84 Mm³/año.

Se supone que este volumen de extracción se mantuvo constante hasta 1980. Cabe señalar que la Ciudad de Aguascalientes experimentó un crecimiento importante en su población a partir de 1985, fecha del terremoto de la Ciudad de México.

Para 1996 existían alrededor de 1900 pozos distribuidos en el valle, con profundidades entre los 150 y 200 m, y con gastos de extracción entre 10 y 30 lps.

Para 1996, de acuerdo con la información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua en Aguascalientes (Cuadro 2.3), y en relación con el Registro Público de los Derechos de Agua se tenían un total de 585 pozos emplazados en la zona de estudio, de los cuales 137 se destinaban al uso municipal de la Zona Metropolitana y 448 a los usos industrial, agrícola, abrevadero, etc. El volumen de extracción anual de los 585 pozos ascendía a 181 Mm³, de los cuales aproximadamente 82 Mm³ corresponden al volumen suministrado a la población y 98.5 Mm³ corresponden a los demás usos. Los caudales fueron aforados directamente o estimados mediante métodos indirectos.

Hasta el año 2001, se consideró el mismo régimen de explotación con el volumen de extracción anual de 181 Mm³/año, ya que el acuífero se encuentra en veda rígida. Las nuevas perforaciones realizadas por el CEAPA explotan al acuífero profundo ubicado en la zona oriente, con perforaciones de hasta 540 m.

Cuadro 2.3 Volúmenes autorizados en la zona de estudio para 1996.

Uso	Numero de pozos	Volumen (Mm ³ /año)
Municipal	137	82.20
Agrícola	448	98.56
Total	585	180.76

De acuerdo con información verbal del personal de la Comisión Estatal de Agua Potable y Alcantarillado de Aguascalientes y de la CNA, el volumen de agua que se fuga de la red de conducción en la zona urbana alcanza el 50% del total suministrado a la población, debido a la cantidad de agrietamientos y asentamientos observados.

2.4 Modelo conceptual

El valle de Aguascalientes es de origen tectónico. La fosa estructural contiene un relleno, que en la parte superior está constituido por materiales aluviales principalmente. Subyaciendo a este material se considera que existen rocas ígneas compactas, permeables en zonas fracturadas (Secretaria de recursos Hidráulicos, 1986).

El modelo conceptual se compone de dos sistemas de flujo subterráneo clasificados como intermedios que circulan en medios hidrogeológicos distintos (figura 2.16). El primero ocurre en materiales granulares no consolidados como gravas, arenas, limos y arcillas que forman estratos interdigitados cuyo espesor alcanza hasta 450 m de profundidad en algunas porciones del acuífero en estudio y el segundo en un medio fracturado que ocurre en rocas ígneas (IMTA, 1996).

El acuífero superior del valle es del tipo libre. La litología de los pozos no muestra la separación de los acuíferos libre y confinado, ya que las profundidades de los pozos para los que se cuenta con esta información fluctúan entre los 150 y 200 m.

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

En base al análisis piezométrico se supone la existencia de una frontera en la parte oriente constituida por una falla geológica. Lo anterior se infiere al observar la diferencia en cargas hidráulicas existentes entre el acuífero del valle y el de la zona oriente. El límite hacia el oeste lo constituyen las sierras de origen volcánico.

Las entradas al acuífero superior en rellenos aluviales provienen del flujo subterráneo horizontal del norte de la zona modelada, de los aportes laterales de la Sierra Fría, la recarga natural por precipitación sobre el valle, fugas en la red de agua potable, infiltración de cuerpos de agua superficial. Las salidas están constituidas por el bombeo y flujo subterráneo horizontal hacia Jalisco.

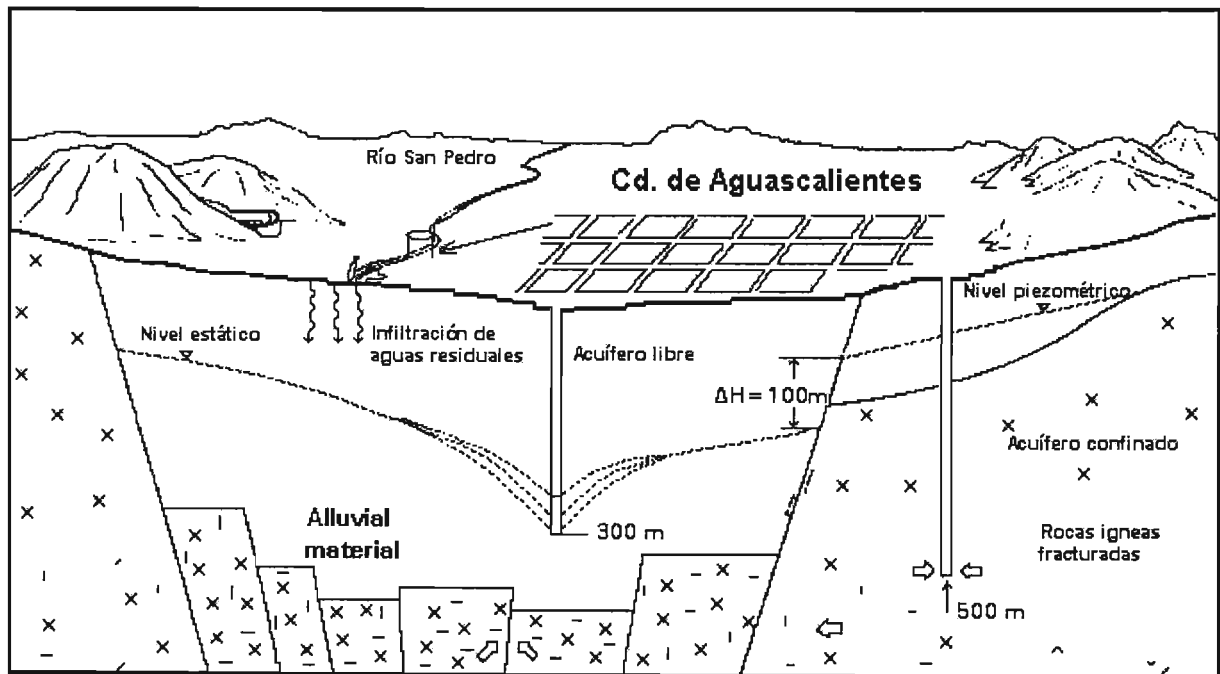


Figura 2.16 Modelo conceptual

2.5 Balance hidrológico

Con el fin de cuantificar las variables involucradas en el balance y tener información para la calibración del modelo se llevó a cabo un balance hidrológico en la zona de estudio para los años 1969, 1980, 1995 y 2001.

El régimen recarga - descarga tiene una relación con los componentes del ciclo hidrológico. La cuantificación de estas componentes requiere la introducción de una ecuación diferencial de balance, que describe el régimen de la zona de estudio.

La ecuación diferencial del balance puede ser representada como:

$$I - O = \frac{dS}{dt}$$

Donde:

I	entradas por unidad de tiempo
O	salidas por unidad de tiempo
dS/dt	cambio en el almacenamiento dentro del sistema por unidad de tiempo.

Las entradas que se identificaron en el modelo conceptual son:

EFSH	entradas por flujo subterráneo horizontal
RV	recarga vertical por lluvia
IC	infiltración en los ríos
If	infiltración por fugas en la red de agua potable

Las Salidas, por su parte son:

B	volumen de agua subterránea extraído por bombeo
---	---

SFSH flujo horizontal subterráneo

Con las entradas y salidas identificadas, la ecuación de balance para la zona de estudio puede ser rescrita de la siguiente forma:

$$EFSH + RV + IC + If - B - SFSH = \frac{dS}{dt}$$

2.5.1 Evaluación de las entradas de agua

A. Entradas por flujo subterráneo horizontal

Las entradas por flujo horizontal subterráneo corresponden a los volúmenes de agua que provienen del norte del acuífero y de la parte Oeste de la Sierra fría. Para realizar esta cuantificación, se utilizaron las configuraciones piezométricas observadas en los años de 1969, 1980, 1995 y 2001.

El caudal (Q) en cada tubo de flujo, definidos a partir de las equipotenciales y líneas de flujo, se obtiene a partir de la ecuación de Darcy:

$$Q = (Kb) * B * \left(\frac{\Delta H}{\Delta L} \right)$$

donde

K	Conductividad hidráulica (m/día)
b	Espesor del acuífero (m)
B	Ancho del tubo de flujo (m)
$\Delta H/\Delta L$	Gradiente hidráulico (adimensional)

Los valores de la conductividad hidráulica son escasos, debido a las pocas pruebas de bombeo disponibles en la zona. En 1996 se realizaron dos pruebas de bombeo (IMTA, 1996) y en 1997 cuatro pruebas de infiltración rápida (IMTA,

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

1997). Los sitios de las pruebas pueden observarse en la figura 2.17 y en el cuadro 2.4 se muestran los valores de conductividad hidráulica calculados. Los valores fluctúan entre 0.5 a 5.26 m/día, lo cual corresponde a materiales clasificados como limos, arena y gravas.

Cuadro 2.4 Valores de conductividad hidráulica (K) en m/día.

No. De prueba	Tipo de prueba	Sitio	K
PB-1	Bombeo	San Ignacio	2.45
PB-2	Bombeo	El Niágara	2.10
PI-1	Infiltración	El Sabinal	1.89
PI-2	Infiltración	El Sabinal	1.48
PI-3	Infiltración	El Sabinal	5.26
PI-4	Infiltración	El Jilotito	0.49

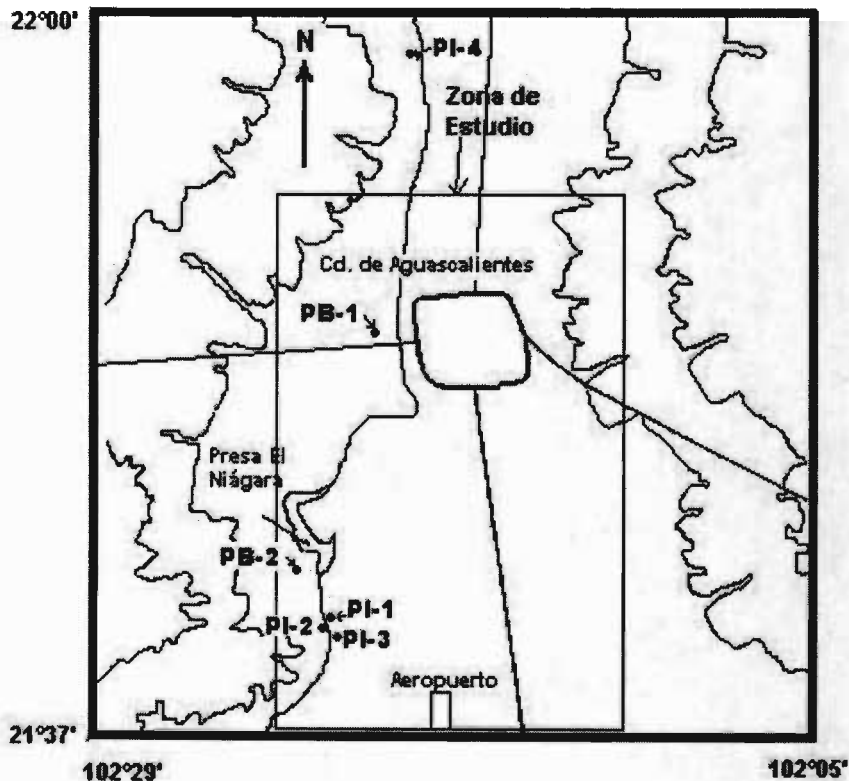


Figura 2.17 Sitios con valores de conductividad hidráulica.

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

El gradiente hidráulico fue medido en las franjas seleccionadas para cada una de las configuraciones piezométricas. Para cuantificar las entradas en el año 1969, se seleccionó el área delimitada por las equipotenciales 1850 y 1840 m.s.n.m. En la figura 2.18 se muestran los tubos de flujo correspondientes.

En los cuadros 2.5 y 2.6 se muestra un resumen de los datos y cálculos realizados para las entradas del norte y oeste del acuífero, respectivamente.

Cuadro 2.5 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1969.

Tubo de flujo	K (m/día)	B (m)	b (m)	ΔH (m)	ΔL (m)	Gradiente	Caudal (Mm ³ /año)
1	1	1000	400	10	3000	0.0033	0.487
2	1	1000	400	10	3000	0.0033	0.487
3	1	1000	400	10	2700	0.0037	0.541
4	1	1000	400	10	2700	0.0037	0.541
5	1	1000	400	10	2800	0.0036	0.521
6	1.5	1000	400	10	3000	0.0033	0.730
7	1.5	1000	400	10	2500	0.004	0.876
8	1.5	1000	400	10	2400	0.0042	0.912
9	1.5	1000	400	10	3000	0.0033	0.730
10	2	1000	400	10	2200	0.0045	1.327
11	2	1000	400	10	2400	0.0042	1.217
12	2	1000	400	10	2000	0.005	1.460
13	2	1000	400	10	2000	0.005	1.460
Total							11.289

Cuadro 2.6 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1969.

Tubo de flujo	K (m/día)	B (m)	b (m)	ΔH (m)	ΔL (m)	Gradiente	Caudal (Mm ³ /año)
1	2	1000	300	10	3000	0.0033	0.730
2	2	1000	300	10	3000	0.0033	0.730
3	2	1000	300	10	2500	0.004	0.876
4	2	1000	300	10	2500	0.004	0.876
5	1.5	1167	400	10	2000	0.005	1.277
6	1.5	1167	400	10	2000	0.005	1.278
7	1.5	1333	400	10	2000	0.005	1.459
8	1.5	1000	300	10	1500	0.0067	1.095
9	2	1000	300	10	1400	0.0071	1.564
10	2	1333	300	10	1400	0.0071	2.085
11	2	1000	300	10	1400	0.0071	1.564
Total							13.536

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

Se observa que las entradas provenientes de la Sierra Fría son mayores que las provenientes del norte del acuífero, probablemente debido al bombeo realizado al norte de la zona de estudio (Distrito de Riego 01).

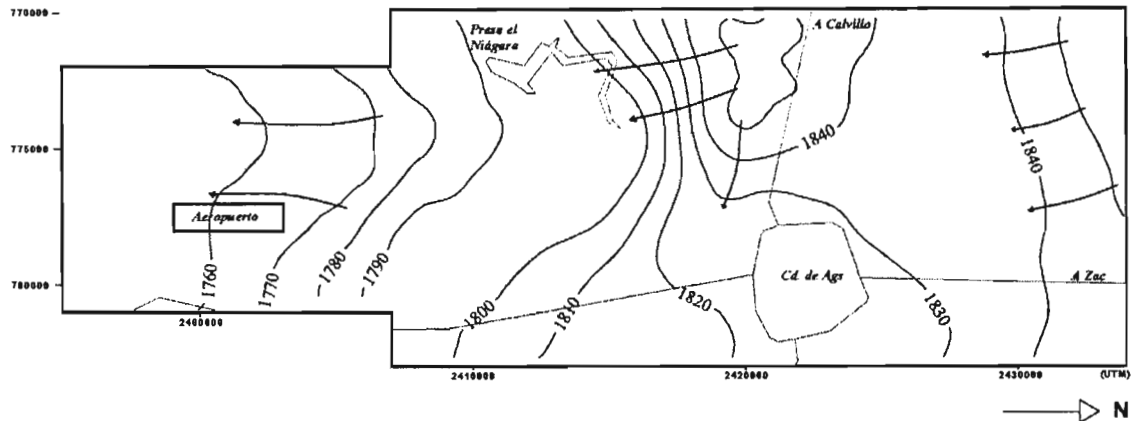


Figura 2.18. Equipotenciales y líneas de flujo para el año 1969.

Para el año 1980, se seleccionó el área delimitada por las equipotenciales con carga hidráulica igual a 1830 y 1840 m.s.n.m.

En los cuadros 2.7 y 2.8 se muestra un resumen de los datos y cálculos realizados para las entradas del norte y oeste del acuífero, respectivamente. En la figura 2.19 se muestran los tubos de flujo para el año 1980.

Cuadro 2.7 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1980.

Tubo de flujo	K (m/día)	B (m)	b (m)	ΔH (m)	ΔL (m)	Gradiente	Caudal ($Mm^3/año$)
1	1	1000	300	10	1800	0.0055	0.608
2	1	1000	300	10	1800	0.0055	0.608
3	1	1000	300	10	1400	0.0071	0.782
4	1	1000	300	10	1400	0.0071	0.782
5	1	1000	300	10	1400	0.0071	0.782
6	1.5	1000	300	10	1500	0.0067	1.095
7	1.5	1000	300	10	1600	0.0062	1.026
8	1.5	1000	300	10	1400	0.0071	1.173
9	1.5	1000	300	10	1400	0.0071	1.173
10	2	1000	300	10	1600	0.0062	1.368
11	2	1000	300	10	1600	0.0062	1.368
12	2	1000	300	10	1800	0.0055	1.217
13	2	1000	300	10	1800	0.0055	1.216
Total							13.202

Cuadro 2.8 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1980.

Tubo de flujo	K (m/día)	B (m)	b (m)	ΔH (m)	ΔL (m)	Gradiente	Caudal(Mm ³ /año)
1	2	1167	350	10	1333	0.007	2.237
2	2	1167	350	10	1170	0.008	2.548
3	2	1000	350	10	1170	0.008	2.184
4	2	1000	350	10	1000	0.01	2.555
5	1.5	1000	350	10	1000	0.01	2.555
6	1.5	1000	350	10	1000	0.01	2.555
7	1.5	1000	350	10	1000	0.01	2.555
8	1.5	1500	350	10	1000	0.01	3.832
9	2	1500	350	10	1170	0.008	3.275
10	2	1500	350	10	1000	0.01	3.832
11	2	1500	350	10	1000	0.01	3.832
12	2	2000	350	10	1000	0.01	5.110
Total							37.072

Igual que en 1969, se observa que las entradas provenientes de la Sierra Fría son mayores que las provenientes del norte del acuífero, probablemente debido a la concentración del bombeo hacia el norte de la zona de estudio.

770000 -

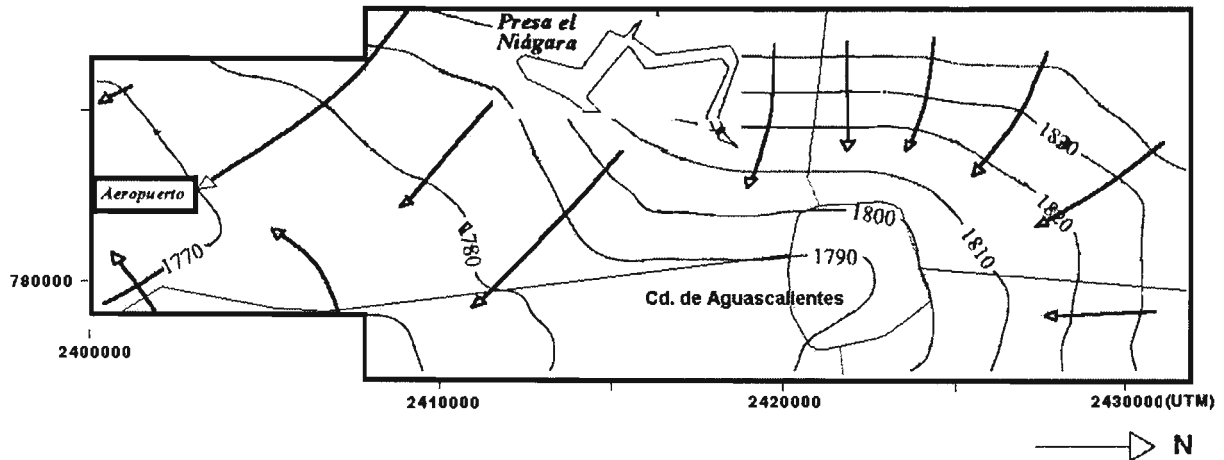


Figura 2.19. Equipotenciales y líneas de flujo para 1980.

Para el año 1995, se seleccionó el área delimitada por las equipotenciales con carga hidráulica igual a 1780 y 1790 m.s.n.m. En la figura 2.20 se muestran los tubos de flujo para el año 1995.

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

En los cuadros 2.9 y 2.10 se muestra un resumen de los datos y cálculos realizados para las entradas del norte y oeste del acuífero, respectivamente.

Cuadro 2.9 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1995.

Tubo de flujo	K(m/día)	B (m)	b (m)	ΔH (m)	ΔL (m)	Gradiente	Caudal (Mm ³ /año)
1	1	1000	300	10	1666	0.0060	0.657
2	1	1000	300	10	1833	0.0054	0.597
3	1	1000	300	10	1666	0.0060	0.657
4	1	1000	300	10	1500	0.0067	0.730
5	1	1000	300	10	1666	0.0060	0.657
6	1.5	1000	300	10	1833	0.0054	0.896
7	1.5	1000	300	10	1666	0.0060	0.985
8	1.5	1000	300	10	1500	0.0067	1.095
9	1.5	1000	300	10	1500	0.0067	1.095
10	2	1000	300	10	1666	0.0060	1.314
11	2	1000	300	10	1500	0.0067	1.460
12	2	1000	300	10	1500	0.0067	1.460
13	2	1000	300	10	1500	0.0067	1.460
Total							13.066

Cuadro 2.10 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 1995.

tubo de flujo	K (m/día)	B (m)	b (m)	ΔH (m)	ΔL (m)	Gradiente	Caudal (Mm ³ /año)
1	2	2000	350	10	1333	0.0075	3.833
2	2	2000	350	10	1500	0.0067	3.406
3	2	2000	350	10	1833	0.0054	2.787
4	2	2000	350	10	2000	0.005	2.555
5	1.5	2000	350	10	1833	0.0054	2.787
6	1.5	2000	350	10	1800	0.0056	2.838
7	1.5	2000	350	10	1800	0.0056	2.838
8	1.5	2000	350	10	1800	0.0056	2.838
9	2	2000	350	10	1800	0.0056	2.838
10	2	2000	350	10	1800	0.0056	2.838
11	2	2000	350	10	1800	0.0056	2.838
12	2	1000	350	10	1800	0.0056	1.419
Total							33.823

De la misma manera que en 1969 y 1995, se observa que las entradas provenientes de la Sierra Fría siguen siendo mayores que las provenientes del norte del acuífero.

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

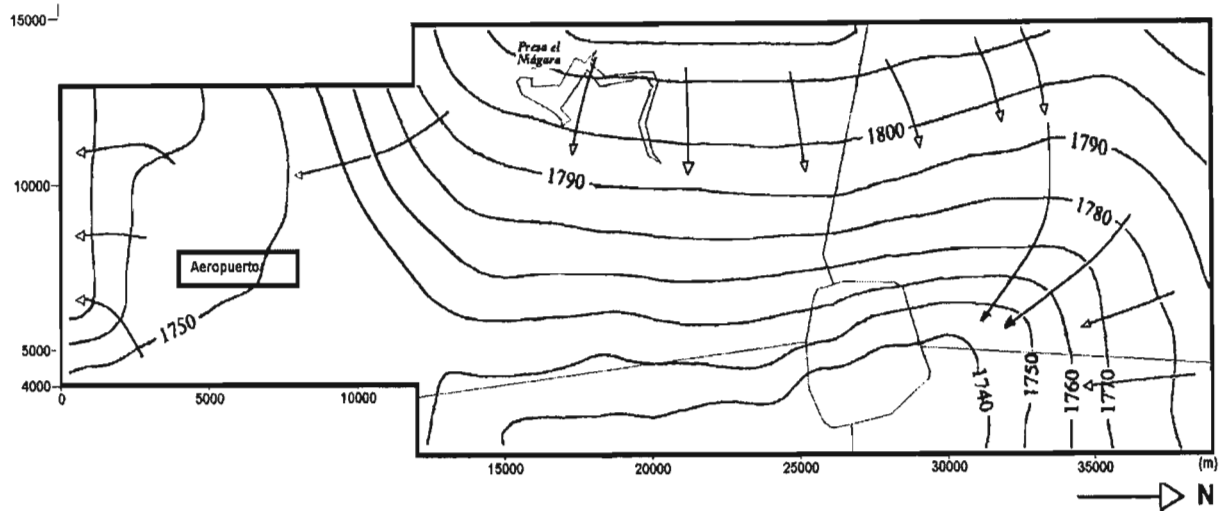


Figura 2.20. Equipotenciales y líneas de flujo para 1995.

Para el año 2001, se seleccionó el área delimitada por las equipotenciales con carga hidráulica igual a 1770 y 1780 m.s.n.m. En los cuadros 2.11 y 2.12 se muestra un resumen de los datos y cálculos realizados para las entradas del norte y oeste del acuífero, respectivamente.

Cuadro 2.11 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 2001.

Tubo de flujo	K (m/día)	B (m)	b (m)	ΔH (m)	ΔL (m)	Gradiente	Caudal (Mm ³ /año)
1	1	1000	300	10	1666	0.0060	0.657
2	1	1000	300	10	1666	0.0060	0.657
3	1	1000	300	10	1666	0.0060	0.657
4	1	1000	300	10	1666	0.0060	0.657
5	1	1000	300	10	1666	0.0060	0.657
6	1.5	1000	300	10	1500	0.0067	1.095
7	1.5	1000	300	10	1666	0.0060	0.985
8	1.5	1000	300	10	1666	0.0060	0.985
9	1.5	1000	300	10	1666	0.0060	0.985
10	2	1000	300	10	1666	0.0060	1.314
11	2	1000	300	10	1000	0.01	2.190
12	2	1000	300	10	1000	0.01	2.190
13	2	1000	300	10	1000	0.01	2.190
Total							15.223

Cuadro 2.12 Entradas por flujo subterráneo horizontal para 2001 (O-E)

Tubo de flujo	K (m/día)	B (m)	b (m)	ΔH (m)	ΔL (m)	Gradiente	Caudal (Mm ³ /año)
1	2	2000	300	10	2200	0.0045	1.990
2	2	2000	300	10	2100	0.0048	2.085
3	2	2000	300	10	2100	0.0048	2.085
4	2	2000	300	10	2000	0.005	2.190
5	1.5	2000	300	10	2000	0.005	2.190
6	1.5	2000	300	10	2000	0.005	2.190
7	1.5	2000	300	10	2000	0.005	2.190
8	1.5	2000	300	10	2000	0.005	2.190
9	2	2000	300	10	2000	0.005	2.190
10	2	2000	300	10	2000	0.005	2.190
11	2	2000	300	10	2000	0.005	2.190
12	2	1000	300	10	2000	0.005	1.095
Total							24.777

Se continua observando que las entradas provenientes de la sierra fría son mayores que las provenientes del norte del acuífero.

En el cuadro 2.13 se muestra un resumen de las entradas por flujo horizontal subterráneo calculadas para los distintos años.

Cuadro 2.13 Entradas por flujo horizontal subterráneo en Mm³/año.

Variable	1969	1980	1995	2001
Entradas (Norte del acuífero)	11.289	13.202	13.066	15.223
Entradas (Sierra Fría)	13.536	37.072	33.823	24.777
TOTAL	24.825	50.274	46.889	40.00

Las entradas provenientes del norte del acuífero se han incrementado en menor proporción, mientras que las provenientes de la Sierra Fría muestran un incremento sustancial para 1980, una reducción y probablemente una estabilización en los últimos años. La causa puede ser debida al aumento paulatino de los gradientes hidráulicos observados, originados por el cono de abatimiento producto del intenso bombeo en la zona urbana de Aguascalientes.

B. Infiltración por precipitación (R_v)

Para determinar la cantidad de agua que se infiltra en el subsuelo proveniente de la precipitación, se aplicaron las siguientes relaciones (CNA, 1998):

$$R_v = C_p V_p$$

$$V_p = 0.001 (h_p A)$$

Donde:

- C_p coeficiente de infiltración, adimensional
- V_p volumen precipitado en la zona de estudio, en Mm^3 .
- h_p altura de precipitación media anual, en mm.
- A área de la zona considerada, en km^2 .

Considerando los valores determinados a partir de la información climatológica, la precipitación promedio en la zona de estudio de 544 mm con lo cual la infiltración por precipitación resulta en $30 Mm^3/año$. El área de la zona de estudio abarca $585 km^2$.

En las metodologías para estimar la recarga de acuíferos, para cuencas aluviales se considera un coeficiente de infiltración entre un 6 y 10 % del valor total de la precipitación como el valor más representativo que ingresa como recarga a los acuíferos (Gutiérrez, 1998). En el presente trabajo se consideró un valor del 9 %.

C. Infiltración de ríos

Para el cálculo de la infiltración en ríos se utilizó la metodología propuesta por Vedernikof (Rodarte, 1980). A continuación se describe esta metodología.

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

En la recarga de acuíferos libres homogéneos e isótropos desde canales o ríos, se pueden identificar dos etapas: saturación y dispersión. En la primera, la zona de aireación es completamente saturada con agua. El frente de infiltración del agua, sufre una pequeña dispersión en su trayecto descendente a través de la zona saturada del medio poroso.

Las velocidades verticales del agua en esta etapa, son mayores que las horizontales, por lo que la forma y desarrollo de la zona de saturación depende básicamente del ancho del canal (B_0) y del tirante hidráulico (h_0) dentro del mismo.

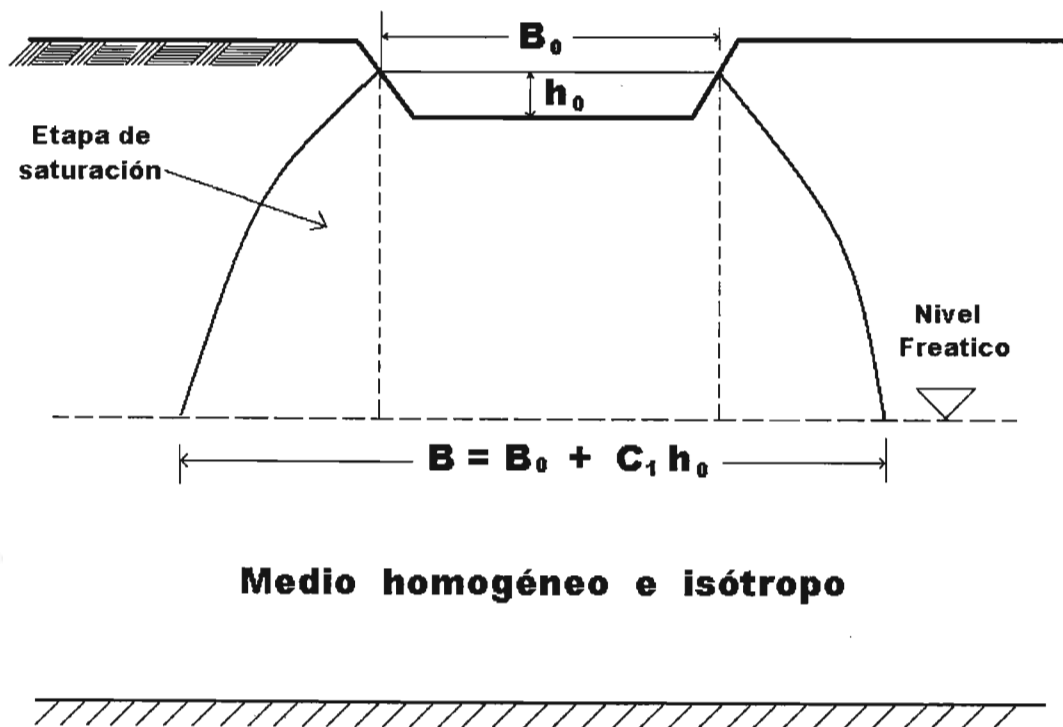


Figura 2.21 Proceso de recarga por ríos o canales en acuíferos libres.

Donde:

- B_0 Ancho del canal.
- h_0 Tirante hidráulico.
- B Ancho de la zona de saturación.
- C_1 Constante que depende de la relación de B/h_0 .

El ancho de la zona de saturación (B) a su llegada al nivel freático, se puede evaluar mediante la siguiente relación:

$$B = B_0 + C_1 h_0 \quad (1)$$

El valor de la constante C_1 se obtiene de los valores del cuadro 2.14 para la solución del caso estacionario, a partir del valor de la relación B/h_0 y del talud de las paredes m' .

La ecuación diferencial unidimensional que rige el movimiento del agua en la etapa de saturación es:

$$\mu \frac{dy}{dt} = k \frac{h_0 + y + H_k}{y} \quad (2)$$

La cual se obtiene al considerar que:

$$\mu V_{REAL} = V_{DARCY}$$

Donde:

- μ porosidad efectiva
- H_k factor que considera los efectos de capilaridad
- t tiempo de avance del frente de saturación

Cabe señalar que la velocidad de Darcy, es una velocidad aparente ya que en su cálculo se considera una sección total del medio (sólidos y vacíos). En realidad, el agua circula únicamente a través de los espacios vacíos, por lo que el área de flujo es mucho menor que el área total de la sección y la velocidad de circulación es mucho mayor que la velocidad aparente.

Cuadro 2.14 Valores de la constante C_1 .

m'	Relación B/h ₀				
	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0
1.00	3.0	3.4	3.6	3.9	4.0
1.50	2.5	2.9	3.2	3.4	3.6
1.75	2.3	2.7	3.0	3.3	3.5
2.00	2.1	2.6	2.9	3.1	3.3
2.50	1.8	2.3	2.6	2.9	3.1

La solución de la ecuación es:

$$t = \frac{\mu}{k} (h_0 + H_k) [\alpha - \ln(1 + \alpha)] \quad (3)$$

Una vez que se ha establecido continuidad hidráulica entre el río y el nivel freático del acuífero en cuestión, el gasto y volumen infiltrado por kilómetro de longitud, se pueden evaluar mediante las siguientes expresiones:

$$Q = K b \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) * 1000$$

y

$$V = Q t$$

Donde:

$$\alpha = \frac{y}{h_0 + H_k}$$

H_k factor que considera los efectos de capilaridad

t tiempo de avance del frente de saturación

y distancia de la base del río al nivel freático del acuífero.

Para la cuantificación de la infiltración de agua a través del río San Pedro, solo se consideró a las aguas residuales que escurre en el mismo, dichas aguas son recolectadas en la zona urbana de Aguascalientes y descargadas en el río San Pedro el cual las conduce a la planta de tratamiento. Una vez tratadas las aguas

son conducidas nuevamente en un pequeño tramo del río San Pedro hasta la Presa El Niagara, El agua es finalmente utilizada para regar algunos cultivos ubicados hacia la margen derecha del río.

En la zona de estudio el río San Pedro tiene con un ancho promedio (B_0) de 30 metros y carga hidráulica (h_0) de 0.20 m, por lo que el ancho de la zona de saturación (B) a su llegada al nivel piezométrico resulta ser de 34 m. El nivel freático se encuentra a 60 m de profundidad.

Para el material arenoso de grano fino a grueso existente en el cauce del río San Pedro se consideró un valor de 0.30 m para la variable H_k .

Los valores de conductividad hidráulica medidos mediante pruebas de infiltración (IMTA, 1997) fluctuaron entre 0.5 y 1.89 m/día. Cabe destacar que los pozos tenían cinco metros de profundidad y en el cálculo se despreció el efecto de la colmatación causado por la infiltración de agua residual.

Con lo anterior se determinó un gasto de infiltración de 600 m³/día/km equivalente a 0.219 Mm³/año, en el tramo de río San Pedro considerado.

D. Infiltración por fugas en la red de agua potable

Para el presente trabajo se consideró lo siguiente: Dado el crecimiento demográfico de la ciudad de Aguascalientes hasta 1981 fue muy bajo, con respecto al periodo entre 1985 y 1990. Se consideró que las fugas en la red de agua potable debieron ser nulas debido a que se estima que la red de distribución no era tan extensa como actualmente. Después de 1985 se observó un crecimiento demográfico y urbano por lo que se consideraron fugas en la red de distribución del 50 %.

2.5.2 Evaluación de las salidas de agua.

A. Salidas por flujo subterráneo horizontal

Corresponden a los volúmenes de agua que por flujo horizontal subterráneo descargan hacia el sur de la zona de estudio. Para realizar esta cuantificación, se utilizó la configuración piezométrica observada en los años de 1980, 1995 y 2001.

La metodología utilizada es igual a la descrita en el apartado correspondiente a las entradas por flujo subterráneo.

Para 1980, se seleccionó el área delimitada por las equipotenciales 1770 y 1780 m.s.n.m. En la figura 2.18 se muestra los tubos de flujo para 1980.

En el cuadro 2.15 se muestra un resumen de los datos y calculo para las salidas:

Cuadro 2.15 Salidas por flujo subterráneo horizontal para 1980.

Tubo de flujo	K (m/día)	B (m)	b (m)	ΔH (m)	ΔL (m)	Gradiente	Caudal (Mm ³ /año)
1	0.3	2500	450	10	2833	0.003	0.435
2	0.3	2500	450	10	2333	0.004	0.528
3	0.6	2500	450	10	3333	0.003	0.776
4	0.8	2500	450	10	5500	0.001	0.597
5	0.8	2500	450	10	4833	0.002	0.679
6	0.6	2500	450	10	4167	0.002	0.591
7	0.5	2500	450	10	2833	0.003	0.724
8	0.5	2500	450	10	2333	0.004	0.880
9	0.5	2500	450	10	2333	0.004	0.880
10	0.5	2500	450	10	2500	0.004	0.821
Total							6.913

Para 1995, se seleccionó el área delimitada por las equipotenciales 1730 y 1740 m.s.n.m. En la figura 2.19 se muestra los tubos de flujo para 1995. En el cuadro 2.16 se muestran los valores calculados:

Cuadro 2.16 Salidas por flujo subterráneo horizontal para 1995.

Tubo de flujo	K (m/día)	B (m)	b (m)	ΔH (m)	ΔL (m)	Gradiente	Caudal (Mm ³ /año)
1	0.3	1000	350	10	833	0.012	0.460
2	0.3	1000	350	10	833	0.012	0.460
3	0.63	1000	350	10	1167	0.009	0.689
4	0.8	1000	350	10	1167	0.009	0.876
5	0.8	1000	350	10	1333	0.007	0.767
6	0.6	1000	350	10	1333	0.007	0.575
7	0.5	1000	350	10	1667	0.006	0.383
8	0.5	1000	350	10	3000	0.003	0.213
9	0.5	1000	350	10	3667	0.003	0.174
10	0.5	1000	350	10	3660	0.003	0.174
Total							4.772

Para 2001, se seleccionó el área delimitada por las equipotenciales 1730 y 1740 m.s.n.m. En el cuadro 2.17 se muestran los valores calculados:

Cuadro 2.17 Salidas por flujo subterráneo horizontal para el año 2001.

Tubo de flujo	K (m/día)	B (m)	B (m)	ΔH (m)	ΔL (m)	Gradiente	Caudal (Mm ³ /año)
1	0.3	1000	400	10	1000	0.010	0.438
2	0.3	1000	400	10	1000	0.010	0.438
3	0.63	1000	400	10	1333	0.007	0.690
4	0.8	1000	400	10	1333	0.007	0.876
5	0.8	1000	400	10	1667	0.006	0.701
6	0.6	1000	400	10	2167	0.004	0.404
7	0.5	1000	400	10	2333	0.004	0.313
8	0.5	1000	400	10	2333	0.004	0.313
9	0.5	1000	400	10	2333	0.004	0.313
10	0.5	1000	400	10	2167	0.004	0.337
Total							4.822

En el siguiente cuadro se muestra un resumen de las salidas calculadas:

Cuadro 2.18 Salidas por flujo subterráneo horizontal en Mm³/año.

Variable	1980	1995	2001
Salidas	6.913	4.772	4.822

Se observa que el volumen que sale del área de estudio hacia el sur con los límites de Jalisco, se reduce de 1980 a 1995, probablemente debido al incremento del bombeo en la zona urbana y zonas aledañas. De 1995 al 2001 se mantiene casi estable.

B. Salidas por bombeo

Como se mencionó en el apartado correspondiente a los volúmenes de extracción, se realizó una estimación de las extracciones para los pozos en el periodo 1969-1980 de aproximadamente 84 Mm³/año y en los periodos correspondientes a 1980-1995 y 1995-2001 se utilizaron los volúmenes reportados por la Comisión Nacional del Agua en Aguascalientes, que son aquellos volúmenes concesionados que se encuentran reportados en la base de datos del Registro Público de la Propiedad de Derechos de Agua (REPDA). Este volumen asciende a 180.760 Mm³/año. En el cuadro 2.19 se muestra un resumen de los volúmenes de extracción reportados en el apartado 2.3.3.

Cuadro 2.19 Volúmenes de extracción

Periodo	Caudal (Mm ³ /año)
1969-1980	84
1980-1995	181
1995-2001	181

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

A continuación se presenta en el cuadro 2.20 un resumen del balance para los años considerados:

Cuadro 2.20 Variables del balance hidrológico subterráneo en Mm³/año.

Variable/año	1980	1995	2001
Entradas			
EFSH	50.27	46.89	40.00
Rv	30.00	30.00	30.00
If	0.00	0.22	0.22
TOTAL	80.27	77.11	70.22
Salidas			
B	84.00	181.00	181.00
SFSH	4.00	5.45	4.82
TOTAL	88.00	186.45	185.82
Déficit	-8.41	-109.82	-106.90

III. DISEÑO DEL MODELO Y CALIBRACIÓN

3.1 Descripción del programa

De acuerdo con los objetivos planteados en el inciso 1.3, para predecir la respuesta del sistema acuífero a las alternativas propuestas se utilizó el programa Visual Modflow para proponer políticas de operación del acuífero. Este programa resuelve la ecuación diferencial que describe el movimiento del agua subterránea, a través de una aproximación en diferencias finitas.

La ecuación que describe el flujo subterráneo en tres dimensiones a través de un medio poroso saturado es:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}	Conductividad hidráulica para los ejes coordenados X, Y, y Z (LT^{-1})
S_s	Coefficiente de almacenamiento específico (L^{-1})
W	Fuentes y sumideros (T^{-1})
h	Cargas hidráulicas [L]
t	Tiempo de simulación (T)

3.2 Relaciones entre el modelo conceptual y el numérico

3.2.1 Selección del área modelada

El área de estudio se ubica hacia la zona sur del valle de Aguascalientes. Cuenta con una extensión aproximada de 585 km², abarca desde el poblado de Jesús María hasta el límite sur del estado e incluye parcialmente la zona urbana de la ciudad de Aguascalientes. La zona urbana modelada es de 80 km², en ella se tenían emplazados 137 pozos municipales en el acuífero granular para el año de 1996. En el área restante modelada cubre 505 km² y contiene 448 pozos que penetran el mismo acuífero granular. El uso principal de estos últimos es el agrícola.

Dentro del área de modelación se encuentran los ríos Morcinique, Chicalote y San Pedro, así como la presa "El Niágara".

Finalmente, el área de modelación se encuentra delimitada al Oeste por sierras y lomeríos (cerro del muerto). Hacia el Este se delimita por una barrera impermeable (falla), lo anterior se sustenta con el análisis piezométrico realizado en el inciso 1.2.

3.2.2 Tipo de modelo

Los modelos que simulan el movimiento del agua subterránea se clasifican de diferentes formas, a saber, los modelos en régimen transitorio y permanente, en acuíferos confinados, libres y aquellos que consideran una, dos o tres dimensiones espaciales. Tomando en cuenta la clasificación en términos de dimensiones espaciales, se tienen modelos de área y perfil bi - dimensionales, cuasi - tridimensionales y tri - dimensionales (Anderson y Woessner, 1992).

El modelo seleccionado para realizar la simulación del flujo subterráneo en el valle de Aguascalientes fue un modelo bi - dimensional en un acuífero del tipo libre limitado por una falla impermeable.

3.2.3 Discretización espacial y temporal

A. Tipo de malla

Dada la superficie seleccionada para la modelación, se construyó y sobrepuso una malla de bloques o celdas. Su localización se describe en términos de renglones, columnas y estratos, utilizando un sistema de índices i, j, k , donde i es el índice del renglón, j es el índice de la columna y k es el índice del estrato (figura 3.1).

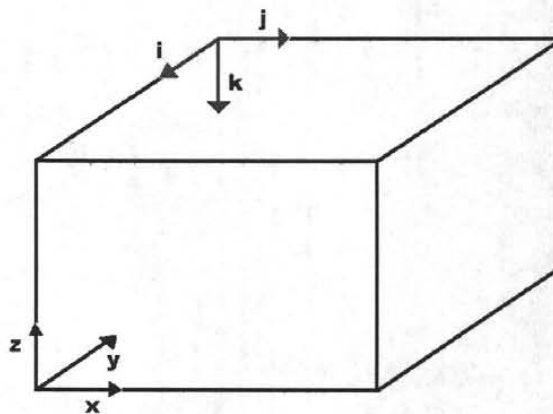


Figura 3.1. Celda con discretización espacial.

El sistema descrito en la dirección horizontal considera un bloque de forma rectangular, que cubre un área de 585 km^2 , cuyas dimensiones son de 39 columnas y 15 renglones. Así, se tiene un total de 585 celdas, cada una con 1,000 metros en ambas direcciones (figura 3.2).

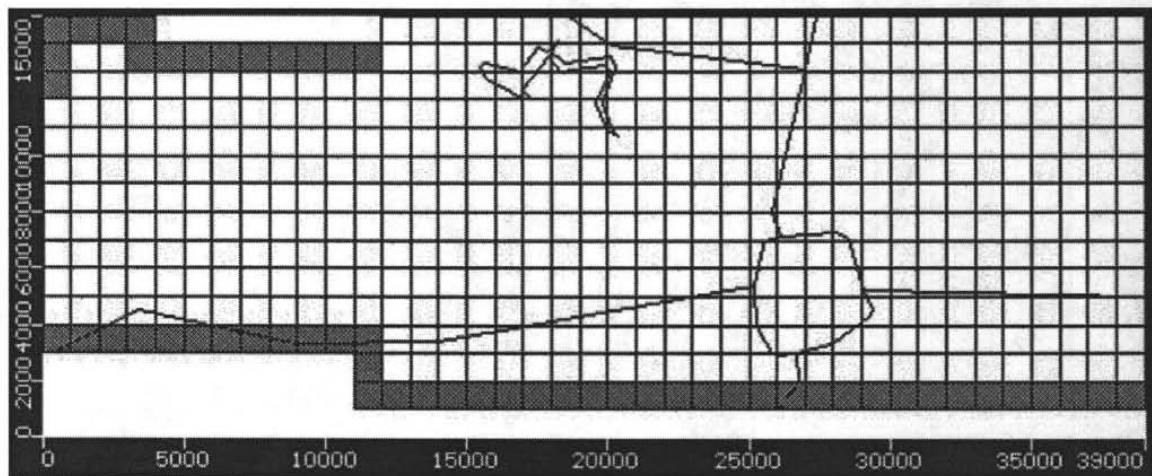


Figura 3.2 Discretización del acuífero del valle de Aguascalientes.

B. Definición de los estratos del modelo

La discretización del acuífero en la dirección vertical se basó en la geología, geofísica, cortes litológicos de los pozos y distribución de los estratos del material aluvial.

Los espesores del material aluvial (permeable) son de 500 metros y disminuyen hacia el este, oeste y sur, franqueado por las sierras y lomeríos.

En el modelo se consideró una capa que representa al acuífero granular que está siendo explotado.

C. Orientación de la malla

La malla se orientó de acuerdo a la dirección principal del flujo del agua subterránea, esto es, en la dirección norte – sur.

De acuerdo con Anderson (1992), en un modelo en diferencias finitas, es importante orientar la malla para que las coordenadas (x,y) sean colineales a las direcciones principales de Anisotropía K_x y K_y ; el eje vertical del modelo, cuando este se presente, debe ser alineado con la dirección de K_z .

D. Discretización en tiempo

La calibración del modelo fue realizada con simulaciones en estado transitorio, dado que la escasa historia piezométrica no fue posible definir una condición en estado estacionario (antes de 1930). Las simulaciones en estado transitorio reflejan las condiciones que están ocurriendo ahora en el acuífero considerado.

Las bases para la calibración del modelo fueron las configuraciones de los niveles estáticos observados y los volúmenes de agua extraído en los años de 1980, 1995 y 2001. La configuración del nivel estático inicial fue la de enero de 1969.

3.2.4 Definición de las fronteras del modelo

Las condiciones de frontera son argumentos matemáticos donde se especifica el valor de la variable dependiente (carga hidráulica) o la derivada de esta (flujo) dentro del área de simulación.

Las fronteras físicas del sistema acuífero están representadas por los macisos cuerpos de roca de origen ígneo, cuerpos de aguas superficiales, fallas geológicas y fronteras hidráulicas determinadas por las líneas de flujo.

Las fronteras que se seleccionaron y que fueron utilizadas para el desarrollo del modelo, se analizan a continuación:

A. Fronteras de carga hidráulica asignada

En las fronteras norte, oeste y sur existen entradas y salidas de agua por flujo subterráneo, por lo que en el modelo se consideraron como dependiente de la carga hidráulica, la cual es denominada "carga remota". El caudal que cruza esta frontera se calcula con la piezometría y después como el producto de la conductancia de la celda correspondiente por la diferencia entre el valor de la

carga exterior y el valor de la carga en la frontera del acuífero, mediante prueba y error, hasta que los valores simulados son aproximadamente iguales a los determinados en el balance hidrológico.

B. Fronteras de flujo asignado

Las condiciones de flujo asignado son utilizadas para describir flujos hacia ó de cuerpos de agua superficial, manantiales y filtraciones hacia o de un basamento que subyace al sistema modelado. Las condiciones de no – flujo ocurren cuando el flujo a través de la frontera es cero. Una frontera de no – flujo puede representar un basamento impermeable, una falla geológica, un parteaguas subterráneo ó una línea de corriente (Anderson, 1992).

En una malla en diferencias finitas, las fronteras sin flujo son simuladas asignando ceros a los valores de transmisividad (o conductividad hidráulica). Esta condición de frontera se utilizó para representar la falla impermeable del modelo.

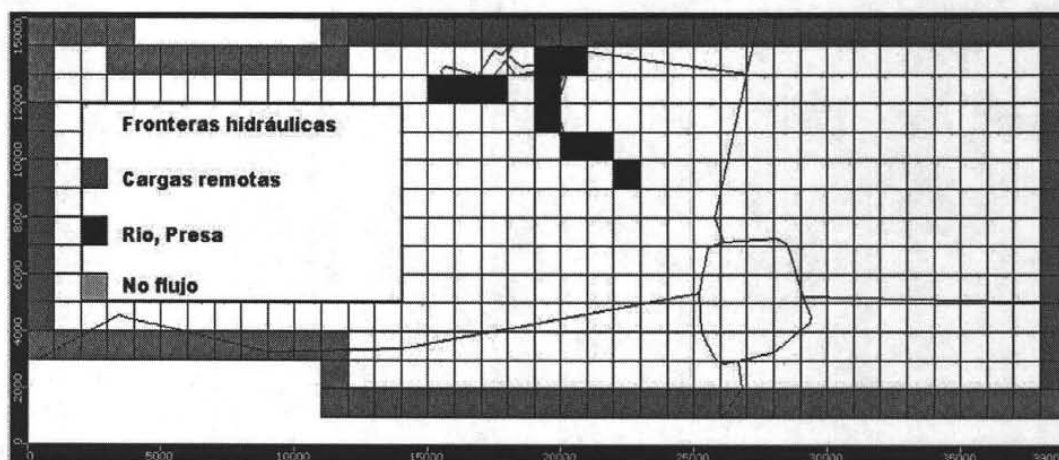


Figura 3.3 Tipos de frontera del modelo.

3.2.5 Asignación de los parámetros de las celdas

Los datos necesarios para un modelo de flujo subterráneo se muestran de manera resumida en el cuadro 3.1. Esta información puede ser agrupada dentro de dos categorías (A y B). En la categoría A, se definen las características físicas como la geometría del sistema incluyendo el espesor y extensión de cada unidad estratigráfica. Dentro de la categoría B, se incluyen los datos hidrogeológicos como información de cargas hidráulicas y flujos, que son necesarios para la formulación del modelo conceptual y revisión de la calibración del modelo (Anderson, 1992).

Cuadro 3.1 Información requerida para alimentar el modelo de flujo.

<p>A) Marco físico</p> <ul style="list-style-type: none">- Mapa geológico, secciones transversales con extensión vertical y área, tipo de fronteras, accidentes geológicos, etc.- Mapa topográfico (toponimia, hidrografía, parteaguas, vías, etc.).- Configuración del basamento del acuífero y capas confinantes.- Geofísica (profundidad del basamento, distribución de los espesores, etc.) <p>B) Marco hidrogeológico</p> <ul style="list-style-type: none">- Censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría y nivelación de brocales.- Hidráulica de pozos.- Mapas y secciones transversales de la distribución de la conductividad hidráulica y transmisividad.- Mapas y secciones transversales de las propiedades del almacenamiento del acuífero y capas confinantes.- Valores de la conductividad hidráulica y su distribución para lechos de ríos y sedimentos de cuerpos de agua.- Distribución espacial y temporal de evapotranspiración, recarga del agua subterránea; interacción agua superficial – subterránea, bombeo y descarga natural.

A. Topografía

La elevación de cada celda se tomó de las cartas topográficas editadas por INEGI (F-13-D-18, F-13-D-19, F-13-D-28 y F-13-D-29), escala 1: 50,000, con ella se elaboró la configuración de la elevación del terreno natural en la zona modelada, creando un archivo que es utilizado por el modelo como mapa base.

B. Basamento del acuífero

El basamento del acuífero se determinó a partir de la geofísica mediante 50 sondeos eléctricos verticales (IMTA, 1996). El mayor espesor de los materiales aluviales se localiza hacia el poblado de Montoro cercano al aeropuerto (figura 3.4). Así el basamento ígneo esta localizado aproximadamente a 500 metros de profundidad, observándose que este no es homogéneo.

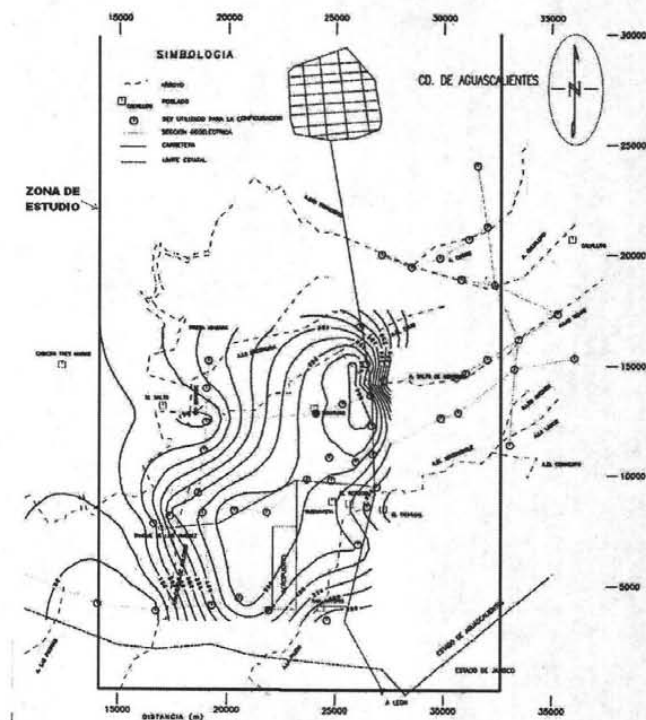


Figura 3.4 Espesor probable del material permeable (IMTA, 1996).

C. Conductividad Hidráulica

Las propiedades hidráulicas del acuífero han sido definidas en algunos puntos del mismo (subcapítulo 2.5.1). Las pruebas de bombeo efectuadas en estudios anteriores indican transmisividades que fluctúan entre 89 y 242 m²/día, equivalentes a una conductividad hidráulica del orden de 0.3 a 0.8 m/día. Las pruebas de bombeo realizadas por el IMTA en 1996 muestran valores de transmisividad de 630 m²/día y la conductividad hidráulica de 2.1 m/día.

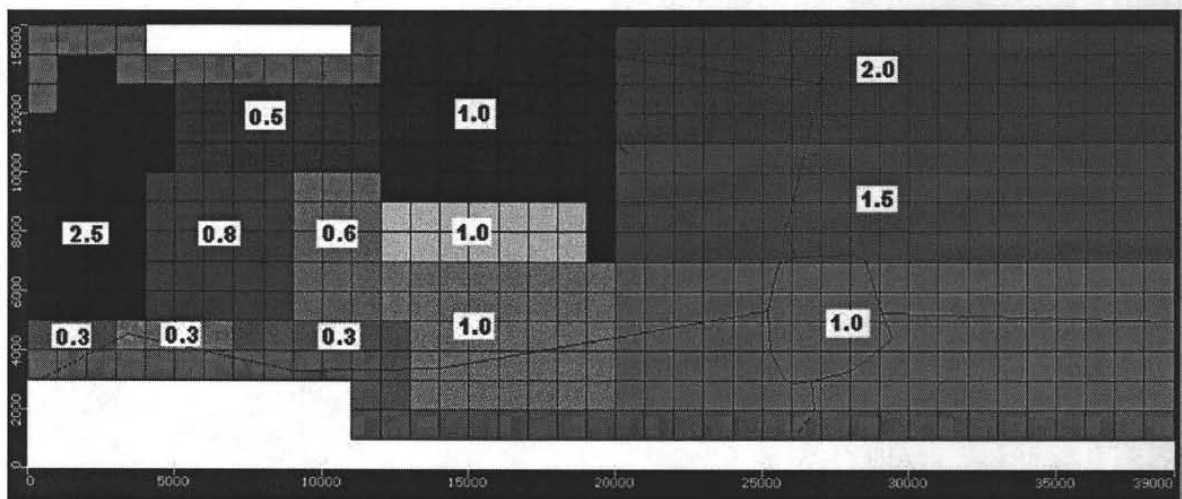


Figura 3.5 Distribución de la conductividad hidráulica final en m/día.

D. Rendimiento específico (S_y)

El termino almacenamiento para acuíferos libres se conoce como rendimiento específico S_y y se define como el volumen de agua que un acuífero libre libera de su almacenamiento por unidad de área y por unidad de descenso del nivel freático (Freeze y Cherry, 1979). El rendimiento específico es una fracción de

la porosidad del acuífero y sus valores dependen del tamaño de grano, forma y distribución de los poros y de la compactación del estrato. Los rangos usuales fluctúan entre 0.01 y 0.30. Para arena uniforme, el rendimiento específico puede ser mayor al 30%, pero la mayoría de los acuíferos aluviales tienen valores que fluctúan entre el 10 y 20% (Todd, 1959). El valor de rendimiento específico utilizado fue de 0.10.

E. Porosidad

Para un volumen unitario total de una roca o suelo, la porosidad n se define como $n = V_v / V_T$, donde V_T es el volumen total y V_v el volumen de vacíos. El acuífero está compuesto de material aluvial principalmente de gravas y arenas, desconociendo su proporción. Cabe señalar que este parámetro no se utiliza en la modelación del flujo y se menciona por su relación con el rendimiento específico. En el cuadro 3.2 se muestra un resumen de la variación de la porosidad para varios materiales geológicos.

Cuadro 3.2. Rango de valores de porosidad (CNA, 1994)

Materiales Geológicos	Porosidad (%)
Suelo	50 - 60
Arcilla	45 - 55
Limo	40 - 50
Arena gruesa	39 - 41
Arena media	41 - 48
Arena fina	44 - 48
Grava	30 - 40
Grava y arena	20 - 35
Arenisca	10 - 20
Pizarra	1 - 10
Caliza	1 - 10

F. Recarga vertical por lluvia

Para asignar el valor de la recarga a cada celda de la malla se tomo en cuenta el valor de la precipitación media anual de la estación climatológica Aguascalientes. El porcentaje de la precipitación considerado como recarga se estimó en el capítulo II y asciende al 9 %; lo cual representa un volumen de 30 Mm³/año distribuidos sobre toda la zona de estudio.

G. Recarga por fugas en la red de agua potable

Las fugas en el sistema de la red de agua potable de la zona metropolitana ascienden a 25 Mm³/año, de acuerdo a información de la Comisión Estatal de Agua Potable y Alcantarillado. La distribución de estos volúmenes se realizó en forma uniforme en las celdas correspondientes a la zona urbana.

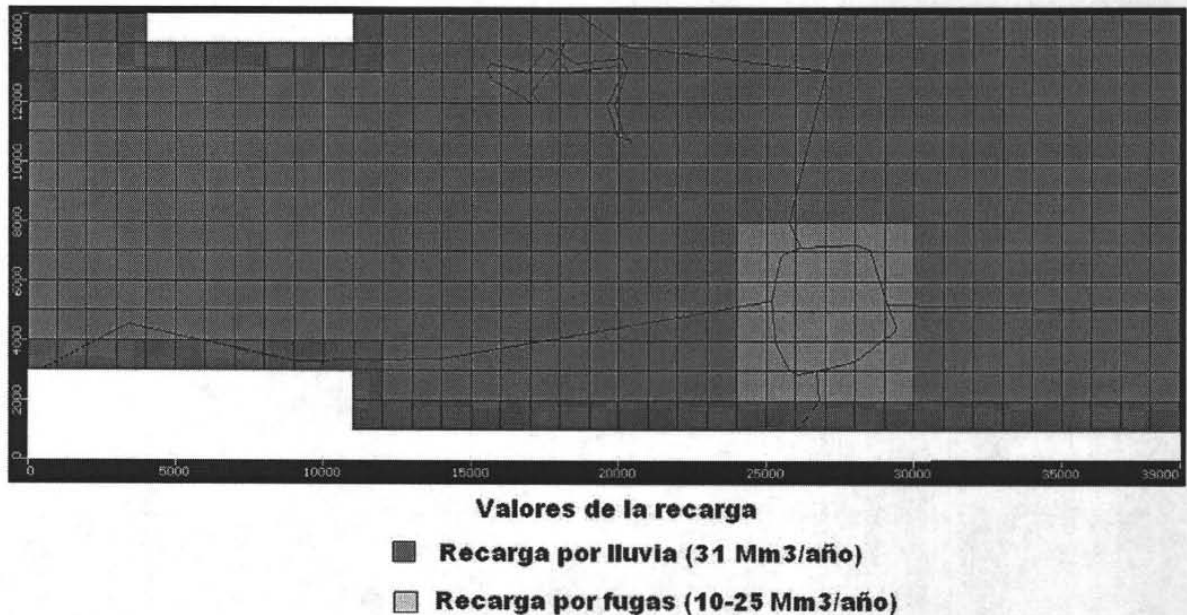


Figura 3.6 Distribución de la recarga.

H. Pozos de extracción

De acuerdo con los resultados del estudio realizado en el Valle de Aguascalientes por Ariel Consultores (1971), en 1969 se tenían emplazados en la zona de modelación actual alrededor de 310 aprovechamientos, de los cuales 72 pozos explotaban agua subterránea para uso municipal, los 238 restantes se destinaban a los usos agrícolas, abrevadero y domestico rural principalmente. Los volúmenes de extracción considerados se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 3.3. Volúmenes de extracción considerados en el primer periodo de modelación (1969-1980).

Alumbramientos de Agua subterránea	Uso	Volumen anual (Mm ³)
72	Municipal	24
238	Agrícola, abrevadero, otros	60

Para 1995, de acuerdo con la Gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua en Aguascalientes, se tenían emplazados 585 aprovechamientos en la zona de estudio, de los cuales 137 correspondían a pozos que explotan agua subterránea para uso municipal en la zona metropolitana y 448 destinados a otros usos, destacando el agrícola. El volumen de extracción anual de los 585 pozos ascendía a los 180.760 Mm³/año.

Para el periodo comprendido entre 1995 al 2001, se considera que no existen nuevos aprovechamientos, debido a la veda establecida en 1963, mediante el Decreto publicado en el Diario de la Federación. Los nuevos aprovechamientos, a saber por información verbal de personal del CEAPA se han perforado (ejemplo pozo El Campanario) a profundidades mayores a

los 400 metros y la zona productora se ubica solamente en el acuífero riolítico, que en este modelo no se considera, por lo que el volumen de extracción considerado es el mismo que en el periodo anterior.

En la figura 3.7 se muestra la distribución espacial de los 585 aprovechamientos que fueron ubicados por la Comisión Nacional del Agua.

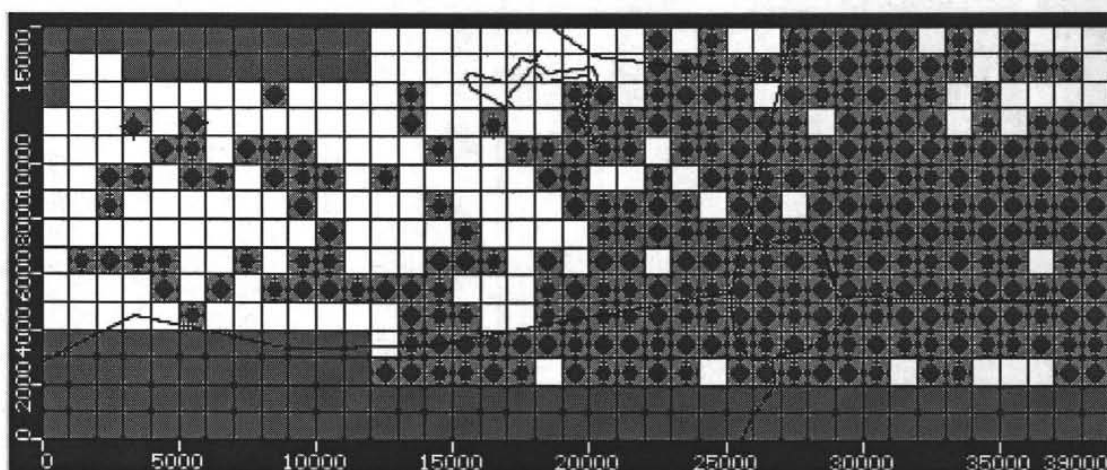


Figura 3.7 Ubicación de los pozos de extracción.

3.3 Calibración del modelo

El proceso de calibración del modelo de flujo consiste en demostrar que el modelo es capaz de producir cargas hidráulicas y flujos observados, de acuerdo con las mediciones en campo (Anderson y Woessner, 1992).

La calibración del modelo fue realizada con simulaciones en estado transitorio, ya que estas simulaciones son más realistas y reflejan las condiciones de no – equilibrio que está ocurriendo en el acuífero considerado.

3.3.1 Calibración en condiciones iniciales

La explotación del acuífero del Valle de Aguascalientes inició alrededor de los años 30's (Ariel Consultores, 1971) y los escasos registros piezométricos no permiten identificar una condición en estado estacionario.

3.3.2 Calibración en estado transitorio

Una vez asignados los parámetros a cada celda de la malla, se procedió a correr el programa Visual Modflow en régimen transitorio para tiempos de 4015, 9490 y 11680 días comprendidos entre 1969-1980, 1980-1995 y 1995-2001, utilizando la configuración piezométrica de 1969 como condición inicial. El proceso de calibración consistió en comparar las cargas hidráulicas calculadas contra las observadas, ajustando la conductividad hidráulica, rendimiento específico, recarga, entradas y salidas por flujo subterráneo horizontal mediante la metodología de prueba y error.

La comparación de las configuraciones de las elevaciones del nivel medidas y simuladas proporciona una medida cualitativa de la similaridad entre ellas, dando alguna idea de la distribución del error en la calibración. A continuación se muestran las comparaciones para los años 1980, 1995 y 2001.

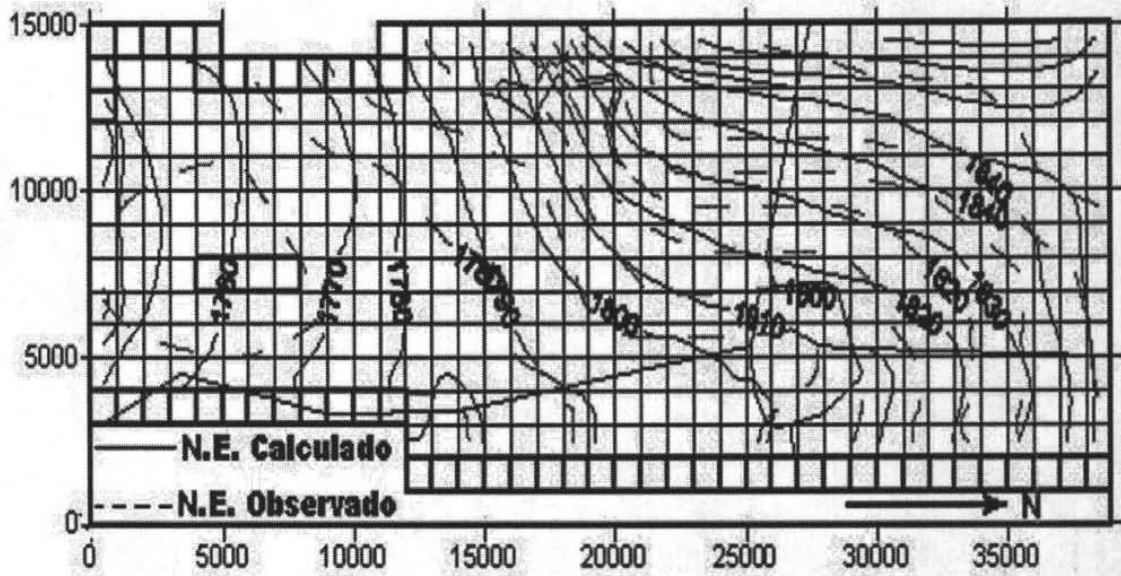


Figura 3.8 Comparación de la configuración piezometrica calculada y observada para 1980.

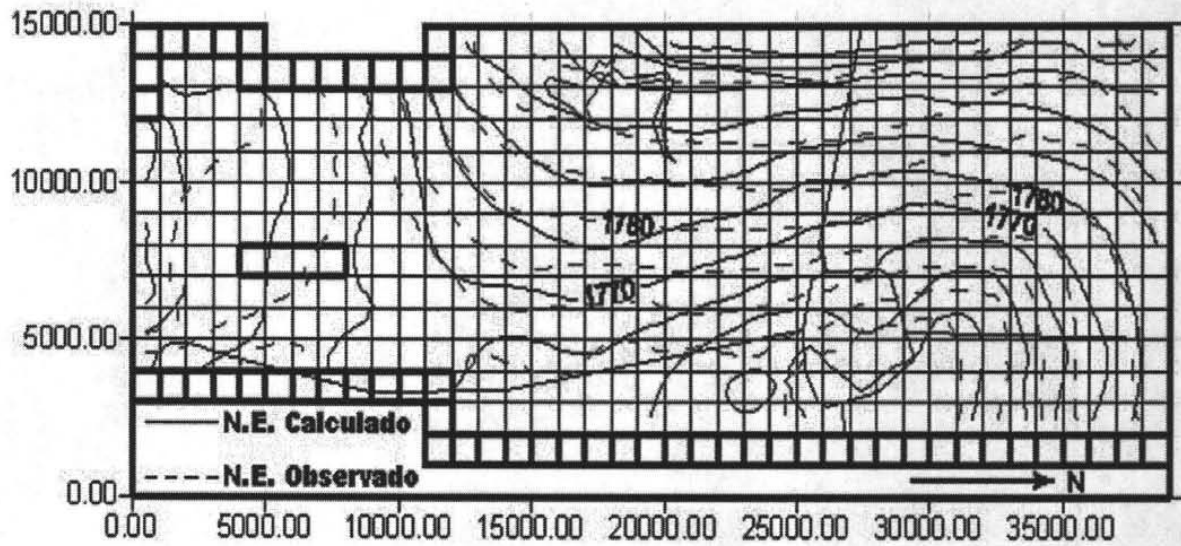


Figura 3.9 Comparación de la configuración piezometrica calculada y observada para 1995.

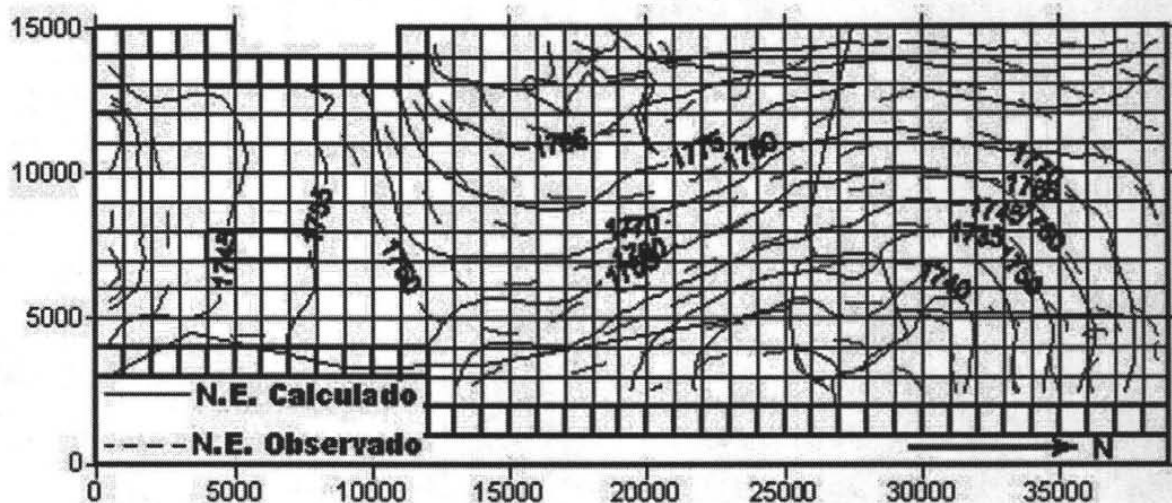


Figura 3.10 Comparación de la configuración piezométrica calculada y observada para 2001.

La comparación de las cargas hidráulicas simuladas contra las observadas para el año de 1980 presentan una tendencia de flujo similar al observado, se tienen algunas discrepancias hacia la zona sur, las cuales no fueron afinadas por la escasa información piezométrica con que se cuenta. Las configuraciones piezométricas simuladas para 1995 y 2001, presentan una mejor correlación con respecto a las observadas desde un punto de vista práctico. Cabe señalar que las diferencias entre las cargas hidráulicas observadas y simuladas para estos años consumieron gran parte del tiempo de calibración.

3.3.2.1 Cargas hidráulicas

Las gráficas de los niveles estáticos medidos contra los calculados son útiles para observar en forma visual el ajuste calibrado (figuras 3.11 y 3.12).

Para cuantificar el grado de exactitud en la calibración del modelo se calcularon los siguientes errores:

Simulación de políticas de operación en el acuífero de Aguascalientes

A. Error medio (EM). Corresponde a la diferencia entre las cargas medidas y las calculadas, para un número n de pozos de observación.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_c)$$

B. Error medio absoluto (EMA). Corresponde al promedio de las diferencias entre las cargas medidas y calculadas.

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_m - h_c|$$

C. Raíz cuadrada media (RMS). Corresponde al promedio del cuadrado de las diferencias entre cargas hidráulicas medidas y calculadas.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_c)^2}$$

Los errores calculados, se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.4. Errores calculados durante la calibración (m),

Descripción	1980	1995	2001
Error medio	4.14	1.15	2.55
Error medio absoluto	5.9	5.39	4.76
Desviación estándar	6.23	6.9	6.98

Simulación de políticas de operación en el acuífero de Aguascalientes

Como se observa en el cuadro 3.4, la desviación estándar fluctúa entre 6.23 y 6.98 metros entre las cargas hidráulicas simuladas y observadas. Este valor es relativamente alto. Sin embargo la configuración inicial de la elevación del nivel estático para 1969 presenta errores significativos al determinar las elevaciones del terreno natural de la zona de modelación, además de la incertidumbre asociada con la determinación de la profundidad del nivel estático durante cada año de observación.

Los errores medios para 1995 y 2001 fluctúan entre 1.15 y 2.55 metros entre las cargas hidráulicas simuladas y observadas, los cuales se consideran aceptables. Para 1995 se observa que la comparación de cargas esta mas o menos distribuida, mientras que en la de 2001 no se presenta esta distribución, considerando que las cargas simuladas son subestimadas.

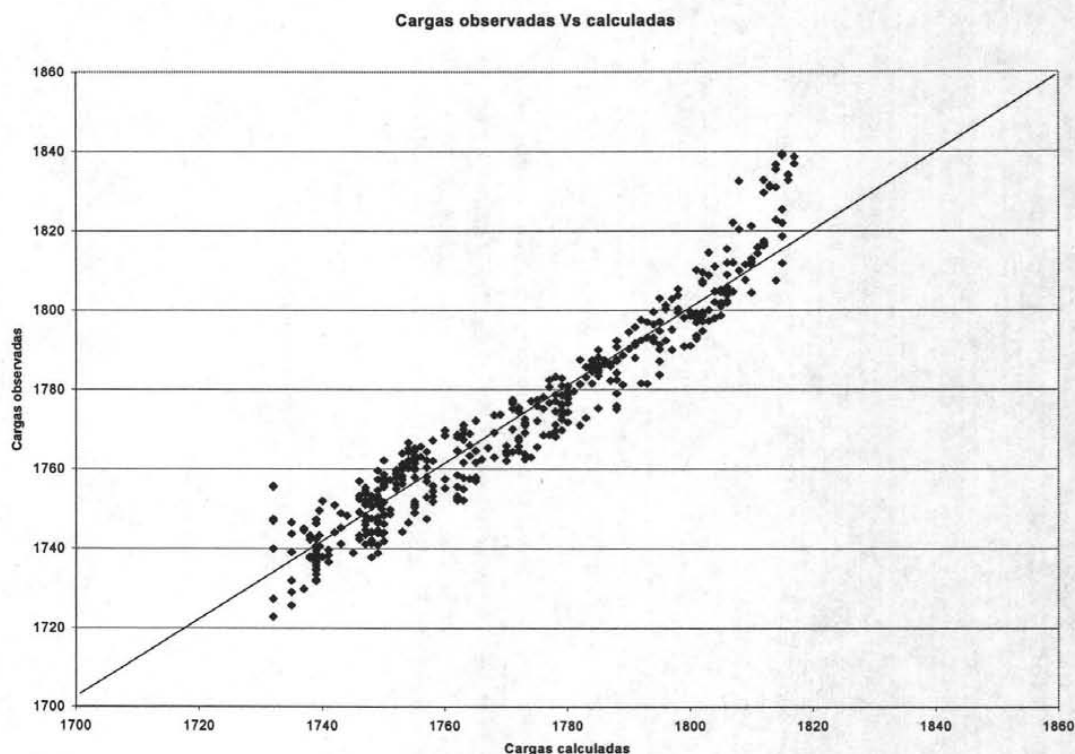


Figura 3.11 Comparación de cargas observadas y calculadas para 1995 (m).

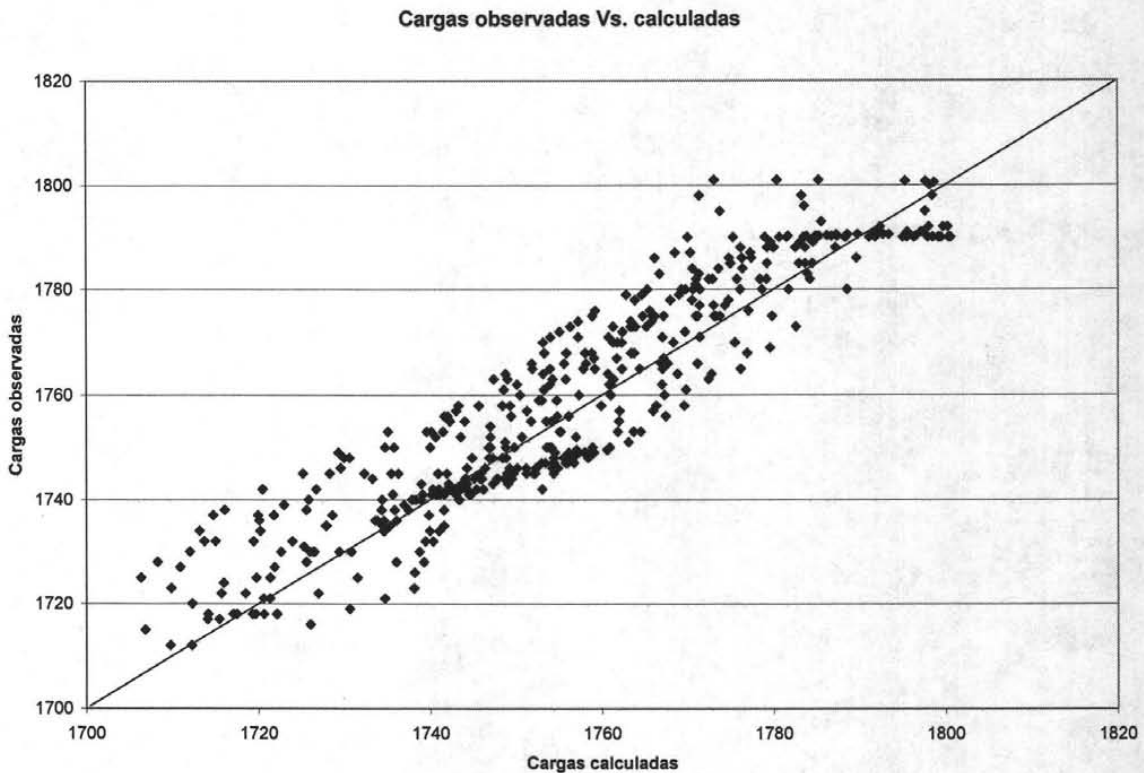


Figura 3.12 Comparación de cargas observadas y calculadas para 2001 (m).

3.3.2.2 Balance de agua

Durante el proceso de calibración del modelo, se verificó que el balance de entradas y salidas del acuífero presentaran diferencias pequeñas con respecto a los valores obtenidos durante el balance hidrológico, y congruente con lo establecido en el modelo conceptual.

En los cuadros 3.5 al 3.7 se presentan los valores de las variables utilizadas en el balance, tanto observados como calculados en el modelo:

Cuadro 3.5 Comparación del balance hidrológico calculado y simulado para 1980 (en Mm³/año).

Variable	Calculado	Simulado	Diferencias
Entradas			
Recarga	30.00	30.27	0.27
Ríos	0.22	0.091	0.13
Flujo subterráneo N-S	13.20	12.66	0.54
Flujo subterráneo O-E	37.02	38.93	1.91
Total	80.44	81.95	2.85
Salidas			
Bombeo	84.00	84.31	0.31
Flujo subterráneo	6.91	7.10	0.19
Total	90.91	91.41	0.50

Cuadro 3.6 Comparación del balance hidrológico calculado y simulado para 1995 (en Mm³/año).

Variable	Calculado	Simulado	Diferencias
Entradas			
Recarga	45.00	45.24	0.24
Ríos	0.22	0.21	0.01
Flujo subterráneo N-S	13.07	12.59	0.48
Flujo subterráneo O-E	33.82	35.20	1.38
Total	92.11	93.24	2.11
Salidas			
Bombeo	180.760	179.65	1.11
Flujo subterráneo	4.77	4.45	0.32
Total	189.53	184.10	1.43

Cuadro 3.7 Comparación del balance hidrológico calculado y simulado para 2001 (en Mm³/año).

Variable	Calculado	Simulado	Diferencias
Entradas			
Recarga	45.00	45.23	0.23
Ríos	0.22	0.241	0.021
Flujo subterráneo N-S	15.22	13.06	2.16
Flujo subterráneo O-E	24.78	23.58	1.20
Total	85.22	82.11	3.61
Salidas			
Bombeo	180.760	179.653	1.11
Flujo subterráneo	4.82	4.76	0.06
Total	185.58	184.413	1.17

Las diferencias calculadas en el balance hidrológico son relativamente bajas, ya que los cálculos hidrológicos fueron realizados en base a datos históricos.

De acuerdo con los valores mostrados en los cuadros 3.5 al 3.7, se observa que las entradas menos las salidas proporcionan un déficit de -10.47, -93.42 y -100.36 Mm³/año para los años 1980, 1995 y 2001, respectivamente. Lo anterior nos muestra la evolución de la explotación intensiva del acuífero, el cual libera agua subterránea a costa del almacenamiento.

3.3.3 Análisis de sensibilidad

El objetivo del análisis de sensibilidad es cuantificar la incertidumbre en el modelo calibrado producto de los amplios rangos en la estimación de los parámetros hidráulicos y del medio, bombeo y condiciones de frontera (Anderson y Woessner, 1992). Los parámetros evaluados en este análisis fueron: recarga, conductividad

hidráulica y dimensiones de la malla en la zona urbana donde se tiene la concentración de los pozos municipales.

A. Recarga

Este parámetro fue modificado con respecto al valor alcanzado en la calibración, incrementando y disminuyendo en un 10 y 25 % su valor. Los resultados indican que el error medio y la desviación estándar aumentan proporcionalmente con respecto a las condiciones obtenidas en el modelo calibrado. En las figura 3.13 y 3.14 se muestran el comportamiento del error medio absoluto y la desviación estándar en la variación de las cargas hidráulicas con respecto a los cambios en los valores iniciales de calibración. Los resultados del análisis, nos indican que existe una influencia importante de la recarga con respecto a los valores obtenidos durante la calibración.

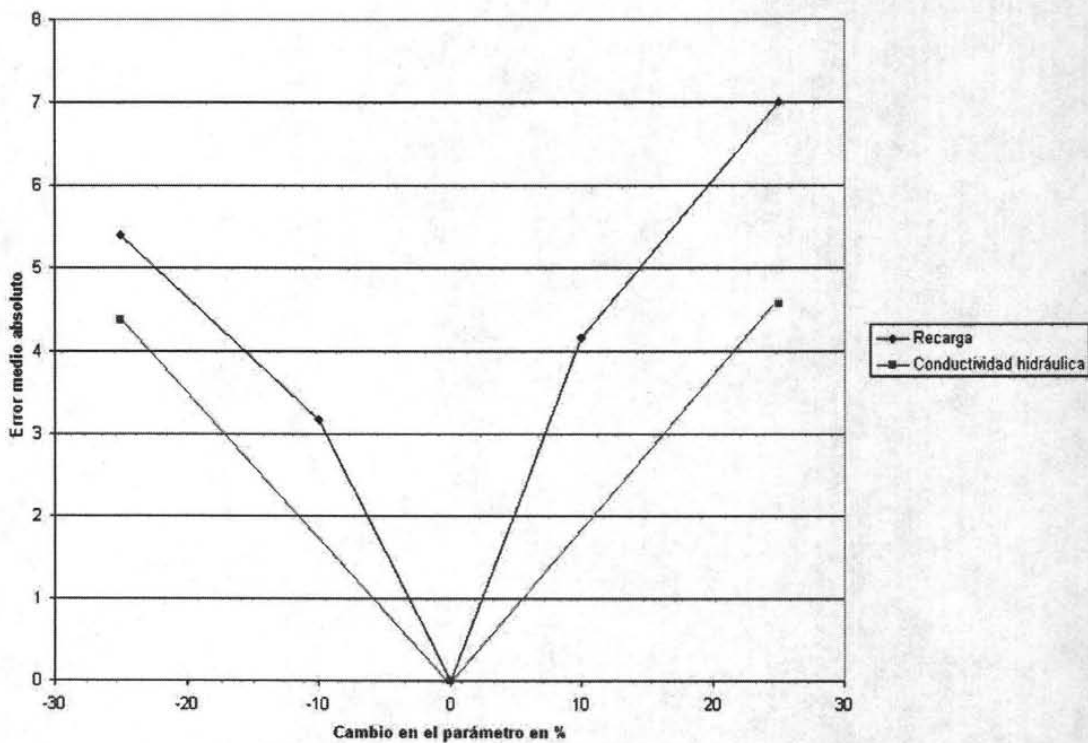


Figura 3.13 Error medio absoluto para el análisis de sensibilidad.

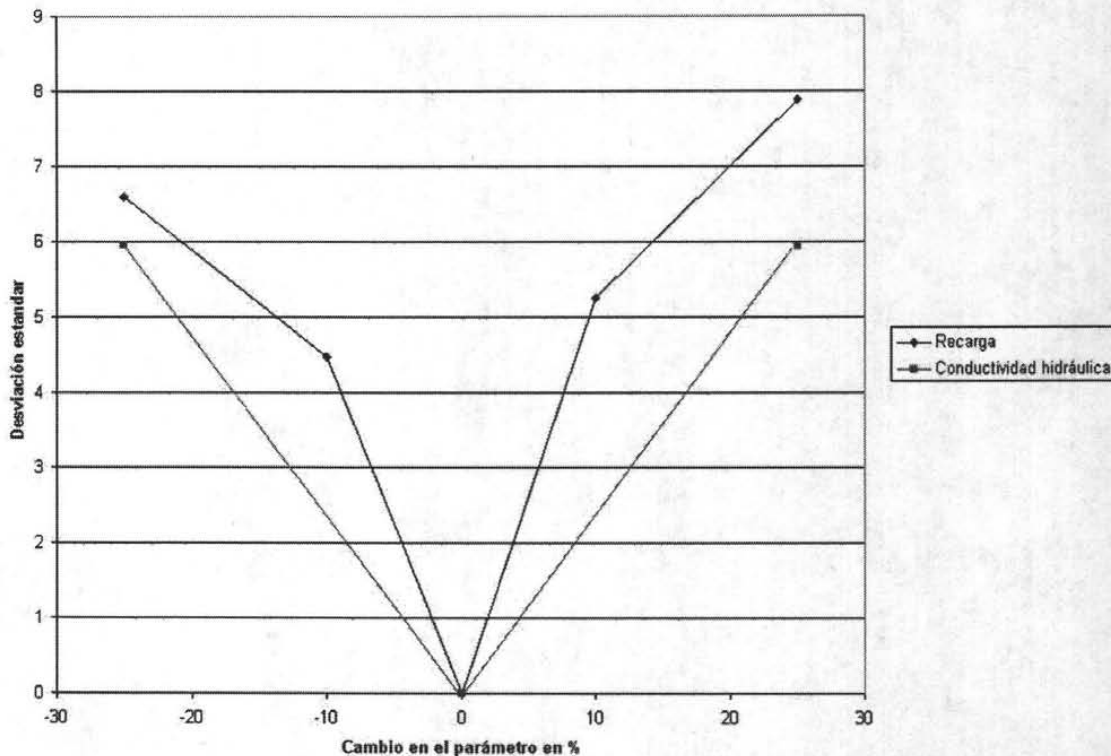


Figura 3.14 Desviación estándar para el análisis de sensibilidad.

B. Conductividad hidráulica

Para realizar el análisis de sensibilidad del parámetro conductividad hidráulica con respecto a los valores obtenidos durante el proceso de calibración se procedió a incrementar y disminuir en un 25% los valores calibrados. Posteriormente se calculó el error medio absoluto y la desviación estándar a las cargas hidráulicas calibradas contra las obtenidas en cada uno de los cambios del parámetro.

Los resultados del análisis indican que existe una influencia importante de la conductividad hidráulica con respecto a los valores obtenidos en la calibración. El comportamiento del análisis se muestra en las figuras 3.13 y 3.14.

C. Refinamiento de la malla.

Para evaluar la sensibilidad del área modelada a un cambio en las dimensiones de la malla, se realizó un refinamiento de esta, disminuyendo las dimensiones a 500 m en las direcciones X y Y. posteriormente se hizo un análisis de las cargas hidráulicas calibradas contra las obtenidas con esta modificación, mediante la ecuación del error medio absoluto.

Los resultados del análisis indican que la reducción de las dimensiones de la malla juega un papel muy importante con respecto a los valores obtenidos durante la calibración, ya que el error medio absoluto es de 2.87 metros.

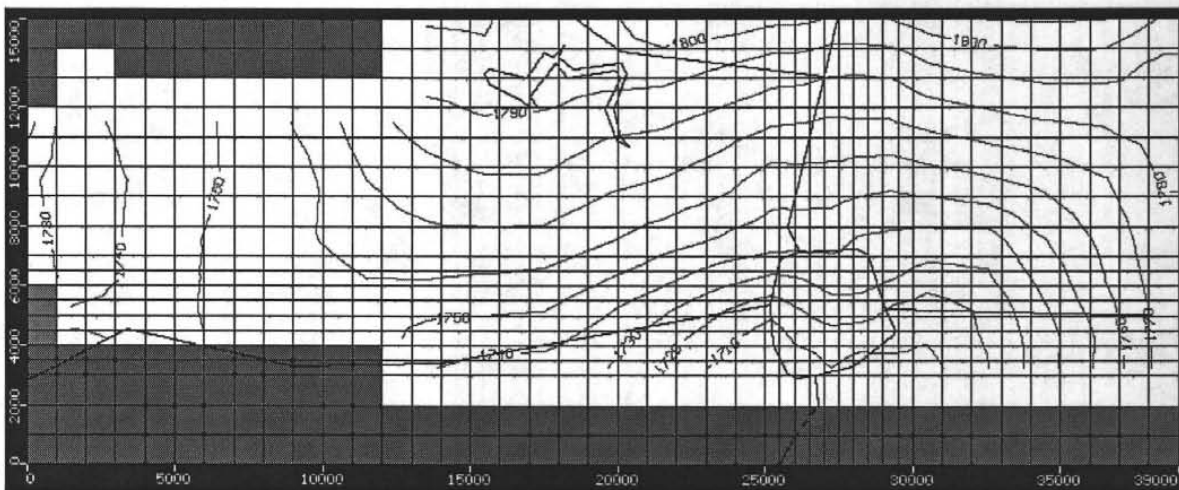


Figura 3.15 Refinamiento de malla y configuración piezometrica calculada (2001).

IV. SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

La simulación de las políticas de operación consiste básicamente en la reubicación de pozos hacia la zona sur del valle. La reubicación está basada en los distintos arreglos de las baterías de pozos ubicados de manera perpendicular y lo más alejado posible de la falla. Se propusieron tres escenarios: i) Régimen de explotación sin variación respecto al año 2001; ii) Considera la reubicación de 21 pozos en la zona sur, quedando fuera de operación algunos pozos que explotan el acuífero en la zona urbana y iii) Considera la reubicación de 33 pozos en la zona sur del valle. Las simulaciones del comportamiento del sistema se realizan para un período de 9 y 19 años, en los periodos comprendidos del año 2001 al 2010 y 2001 al 2020.

4.1 SIMULACIONES AL AÑO 2010

4.1.1 Escenario 1. Explotación actual constante

Esta alternativa simula el comportamiento del acuífero para el año 2010 manteniendo el régimen de explotación registrado hasta el año 2001, el cual asciende a 180.76 Mm³/año, con 137 pozos que explotan el acuífero en la zona urbana y 448 en la porción restante de la zona de estudio.

Como resultado de la simulación se observa que la elevación del nivel piezométrico se presenta como se describe a continuación: en el primer cuadro de la ciudad se tienen valores de 1680, de 1770 hacia la frontera norte, de 1720 hacia la frontera sur y de 1800 m.s.n.m. en las inmediaciones de la presa El Niágara (figura 4.1). Los abatimientos son del orden de los 3.6 m/año, disminuyendo hacia los alrededores con valores que fluctúan entre los 1 y 2 m/año.

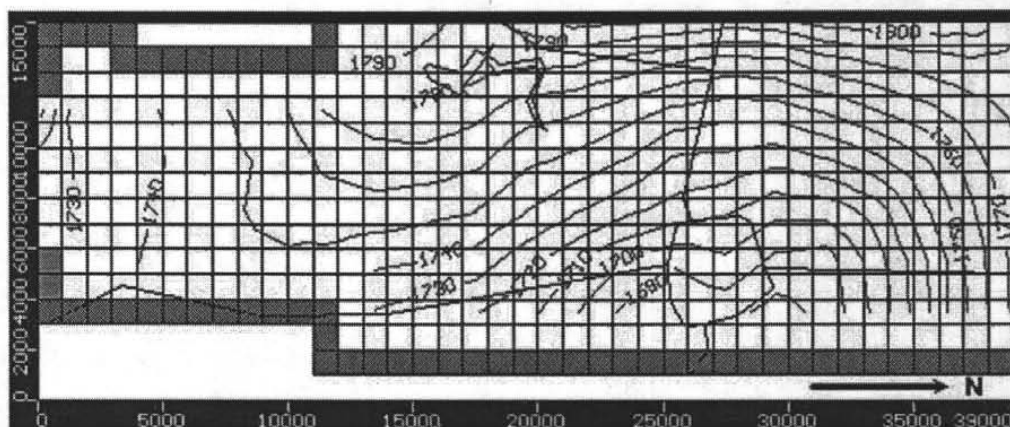


Figura 4.1 Configuración piezométrica (2010). Escenario 1.

Considerando que el nivel topográfico medio de la Ciudad de Aguascalientes se encuentra en los 1860 m.s.n.m., y las profundidades de 63 pozos es menor o igual a 200 m, por lo que se estima que para el año 2010 se tendrá aproximadamente un 30 % de los pozos de abastecimiento secos. Al mismo tiempo la profundidad del nivel estático sería de 180 m lo cual implica que los pozos restantes tendrán que aumentar su columna de succión. Por otra parte, los asentamientos del terreno serán más evidentes hacia la zona oriente donde se presentan los mayores abatimientos.

4.1.2 Escenario 2. Reubicación de 21 pozos de la zona urbana.

Se consideró la reubicación de 21 pozos en la zona sur con una distancia entre ellos de 1 Km. y un gasto de 30 litros por segundo para cada pozo. El volumen total de extracción de la batería es de 19.9 Mm³/año el cual corresponde al 24.2 % del volumen extraído para uso municipal. Este volumen se dejaría de explotar en la zona urbana al mismo tiempo que se inicia la extracción por la batería nueva. De acuerdo con los resultados de la simulación para este escenario, tenemos que la elevación del nivel estático en la zona urbana fluctúa entre los 1720 y 1730 m.s.n.m., lo cual implica una recuperación del orden de los 2 m/año con respecto al escenario 1 en la misma zona.

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

En la zona donde se ubican los pozos propuestos, se observa que la elevación del nivel estático fluctúa entre los 1720 y 1730 msnm, presentando abatimientos de 3 m/año con respecto a los valores presentados en el escenario 1.

En la siguiente figura se muestra la ubicación de los nuevos pozos:

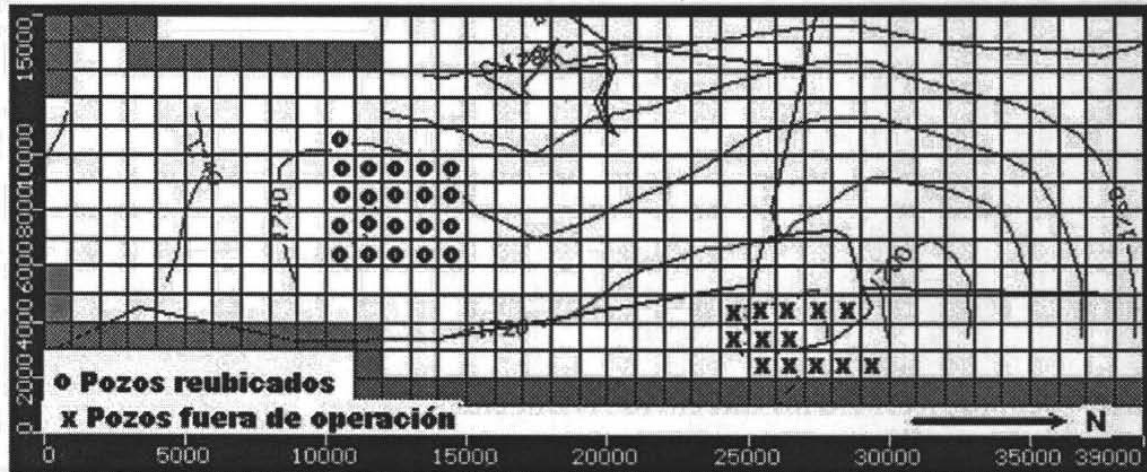


Figura 4.2 Configuración piezométrica (2010). Escenario 2.

4.1.3 Escenario 3. Reubicación de 33 pozos de la zona urbana.

Se consideró una batería de 33 pozos ubicados en forma diagonal a la barrera semipermeable. La distancia entre los pozos es de 1.4 Km. Con un gasto de 30 litros por segundo para cada pozo.

El volumen total de extracción asciende a $31 \text{ Mm}^3/\text{año}$ que corresponde al 38 % del volumen de extracción para uso municipal. De acuerdo con los resultados de la simulación (figura 4.3) en la zona urbana los niveles fluctúan entre 1720 y 1740 m.s.n.m. lo que implica una recuperación del orden de los 2.5 m/año con respecto al escenario 1. Cabe señalar que esta recuperación es propiciada por la reducción del 40% del bombeo en la zona urbana y por la continua recarga de las fugas en la red de agua potable hacia el acuífero. En la zona donde se reubican los nuevos pozos,

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

la elevación del nivel estático fluctúa entre 1720 y 1730 m.s.n.m. con abatimientos entre 2 y 3 m/año con respecto al escenario 1.

En la siguiente figura se muestra la ubicación de los nuevos pozos:

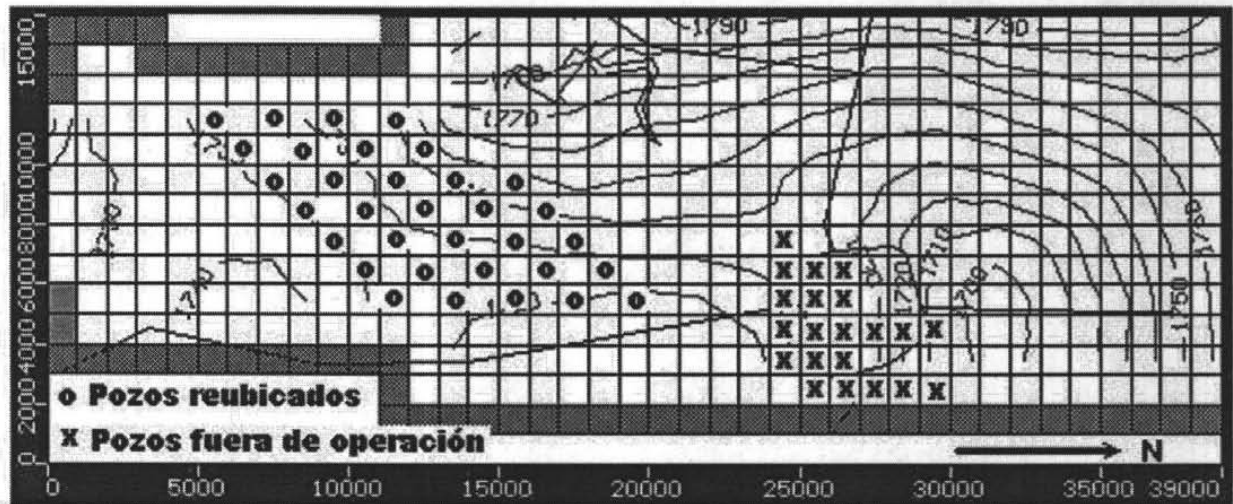


Figura 4.3 Configuración piezométrica (2010). Escenario 3.

4.2 SIMULACIONES AL AÑO 2020

4.2.1 Escenario 4. Explotación actual constante.

Esta alternativa simula el comportamiento del acuífero para el año 2020 manteniendo el régimen de explotación registrado hasta el año 2001, el cual asciende a 180.76 Mm³/año, correspondiente a los 137 pozos que explotan el acuífero en la zona urbana y 448 en la porción restante de la zona de estudio.

Como un resultado de la simulación se observa que la elevación del nivel piezométrico se presenta como se describe a continuación: en el primer cuadro de la ciudad se tienen valores que fluctúan entre 1645 a 1675, de 1760 hacia la frontera

norte, de 1720 hacia la frontera sur y de 1780 m.s.n.m. en las inmediaciones de la presa El Niágara (figura 4.4).

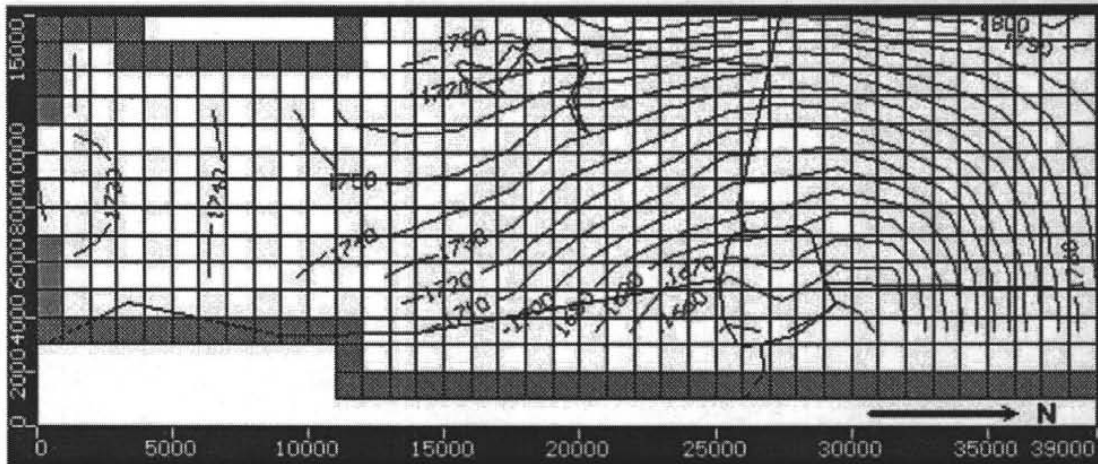


Figura 4.4 Configuración piezométrica (2020). Escenario 1.

Considerando que el nivel topográfico medio de la Ciudad de Aguascalientes se encuentra en los 1860 m.s.n.m., y las profundidades de 63 pozos es menor o igual a los 200 m, por lo que se estima que para el año 2020 todos los 63 pozos de abastecimiento quedaran fuera de operación (secos). Al mismo tiempo la profundidad del nivel estático sería de 240 m lo cual implica que los pozos restantes tendrán que aumentar su columna de succión. Por otra parte, los asentamientos del terreno serán más evidentes hacia la zona oriente donde se presentan los mayores abatimientos.

4.2.2 Escenario 5. Reubicación de 21 pozos de la zona urbana.

Se consideró la reubicación de 21 pozos en la zona sur con una distancia entre ellos de 1 Km. y un gasto de 30 litros por segundo para cada pozo. El volumen total de extracción de la batería es de 19.9 Mm³/año el cual corresponde al 24.2 % del volumen extraído para uso municipal. Este volumen se dejaría de explotar en la zona urbana al mismo tiempo que se inicia la extracción por la batería nueva. De acuerdo con los resultados de la simulación para este escenario, tenemos que la elevación del nivel estático en la zona urbana fluctúa entre los 1700 y 1710 m.s.n.m., lo cual

implica una recuperación del orden de los 2 y 3 m/año con respecto al escenario 1 en la misma zona.

En la zona donde se ubican los pozos propuestos, se observa que la elevación del nivel estático se encuentra a los 1700 msnm, presentando abatimientos entre 4 y 5 m/año con respecto a los valores presentados en el escenario 1.

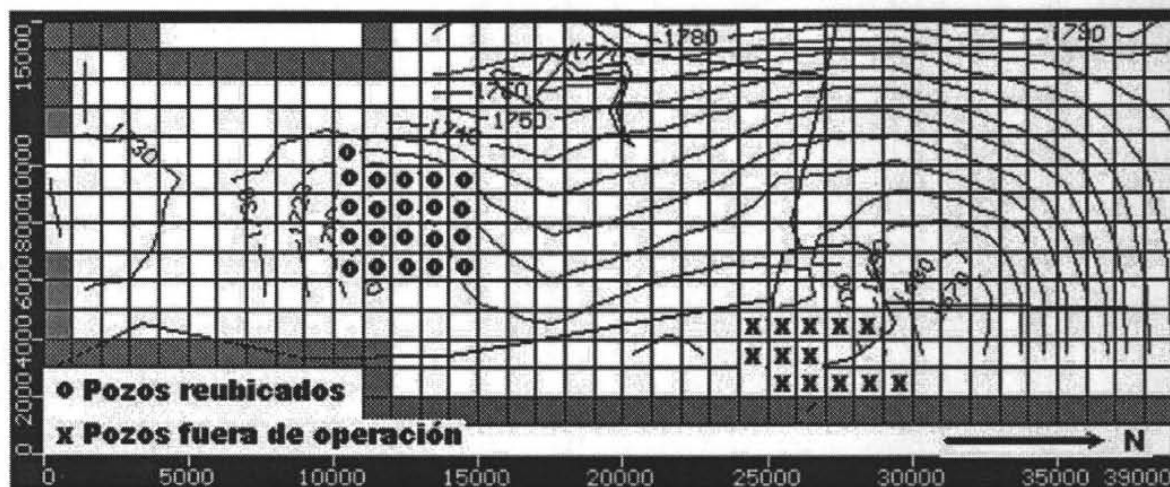


Figura 4.5 Configuración piezométrica (2020). Escenario 2.

4.2.3 Escenario 6. Reubicación de 33 pozos de la zona urbana.

Se consideró una batería de 33 pozos ubicados en forma diagonal a la barrera semipermeable. La distancia entre los pozos es de 1.4 Km. Con un gasto de 30 litros por segundo para cada pozo.

El volumen total de extracción asciende a 31 Mm³/año que corresponde al 38 % del volumen de extracción para uso municipal. De acuerdo con los resultados de la simulación (figura 4.6) en la zona urbana los niveles fluctúan entre 1710 y 1730 m.s.n.m. lo que implica una recuperación del orden de los 3 a 5 m/año con respecto al escenario 1. Cabe señalar que esta recuperación es propiciada por la reducción del 40% del bombeo en la zona urbana y por la continua recarga de las fugas en la red de agua potable hacia el acuífero. En la zona donde se reubican los nuevos

pozos, la elevación del nivel estático se encuentra a los 1700 m.s.n.m. con abatimientos de 2 m/año con respecto al escenario 1.

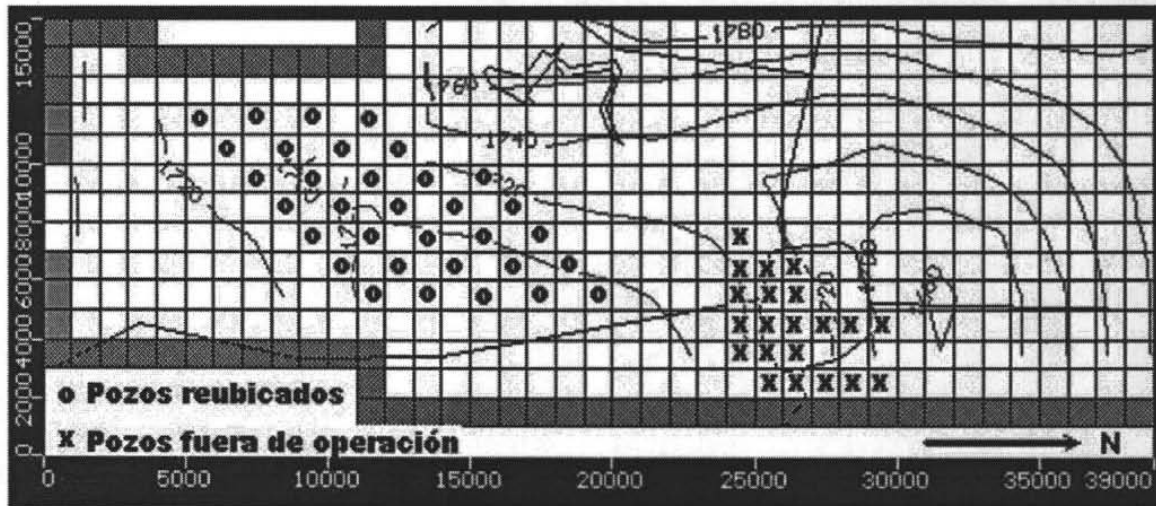


Figura 4.6 Configuración piezométrica (2020). Escenario 3.

4.3. Evaluación de Alternativas

Para la evaluar los tres escenarios propuestos, en los cuadros 4.1 y 4.2 se muestran con signos negativos los abatimientos resultantes para las simulaciones al 2010 y 2020, así como con signos positivos los valores de recuperación simulados por el programa, después de que algunos pozos dejan de operar en la zona urbana. En las Figuras 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 se muestran las cargas hidráulicas simuladas a lo largo de las filas 5 ($Y = 4500$ m) Y 8 ($Y = 7500$ m), en donde podemos observar los abatimientos y recuperaciones producidos por los escenarios simulados en la zona urbana y propuesta para el nuevo campo de pozos.

Cuadro 4.1 Evolución del nivel estático simulados para el año 2010 en m/año.

Escenario	No de pozos	Caudal (l/s)	Zona propuesta	Zona urbana
1	0	0	-1.0	-3.6
2	21*	630	-2.5	+2.0
3	33*	990	-2.2	+2.5

(*) Pozos reubicados

Cuadro 4.2 Evolución del nivel estático simulados para el año 2020 en m/año.

Escenario	No de pozos	Caudal (l/s)	Zona propuesta	Zona urbana
1	0	0	-1.25	-4.00
2	21*	630	-3.5	+2.5
3	33*	990	-2.5	+3.5

(*) Pozos reubicados

Como puede observarse, el escenario 2 produce los mayores abatimientos y recuperaciones, en la zona sur y urbana, respectivamente. El mejor escenario es el numero 3, debido a que el arreglo de los pozos diagonal a 1.4 km de distancia entre ellos produce menores abatimientos que el escenario 2.

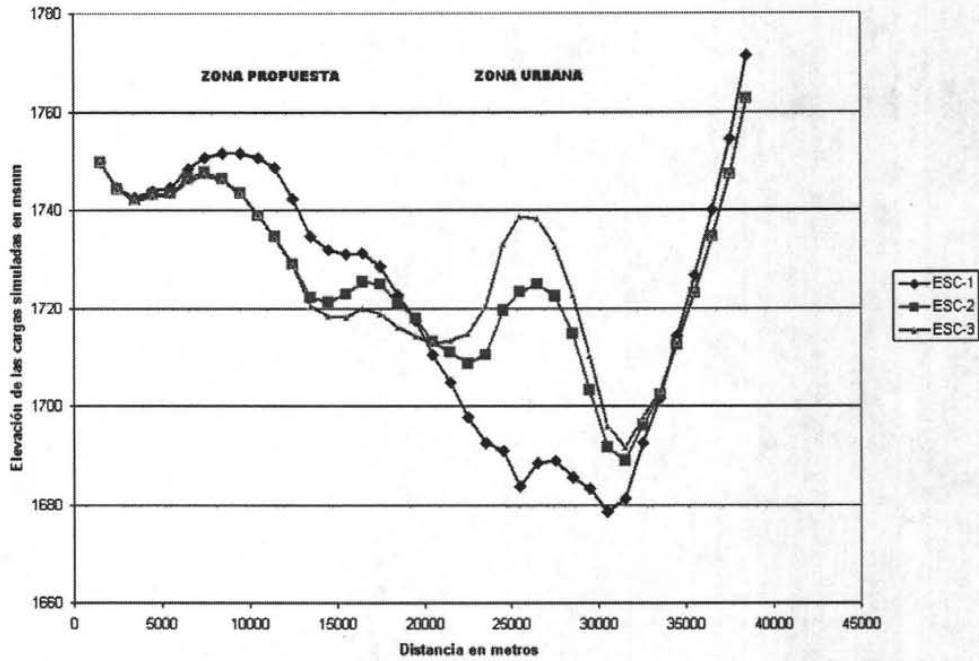


Figura 4.7 Comparación de las alternativas simuladas al año 2010. Fila 5.

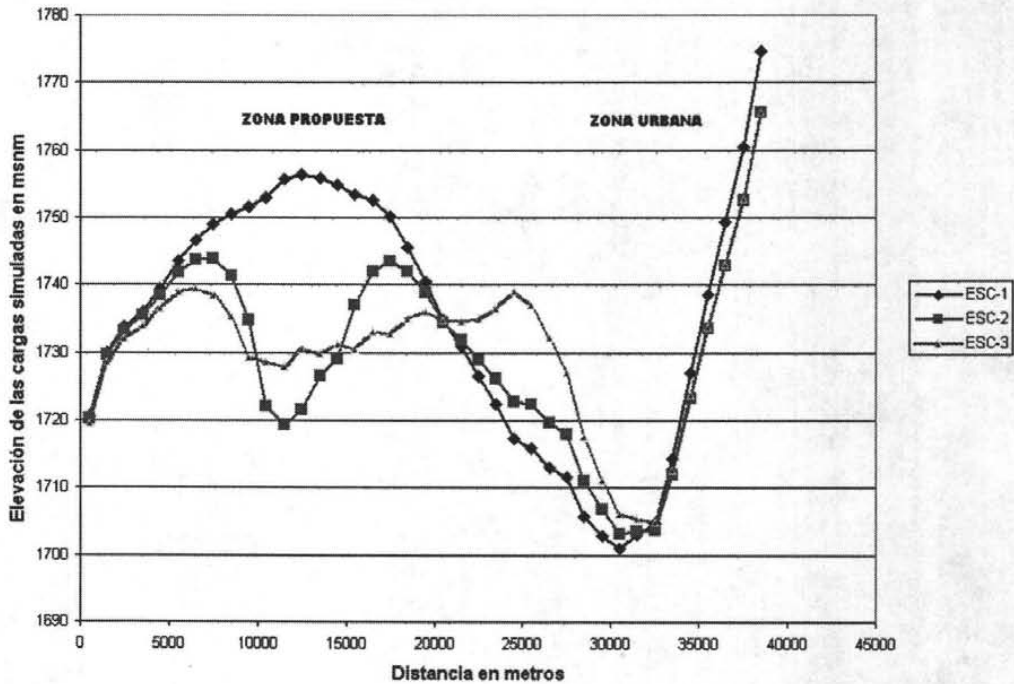


Figura 4.8 Comparación de las alternativas simuladas al año 2010. Fila 8.

Simulación de políticas de operación en el acuífero del Valle de Aguascalientes

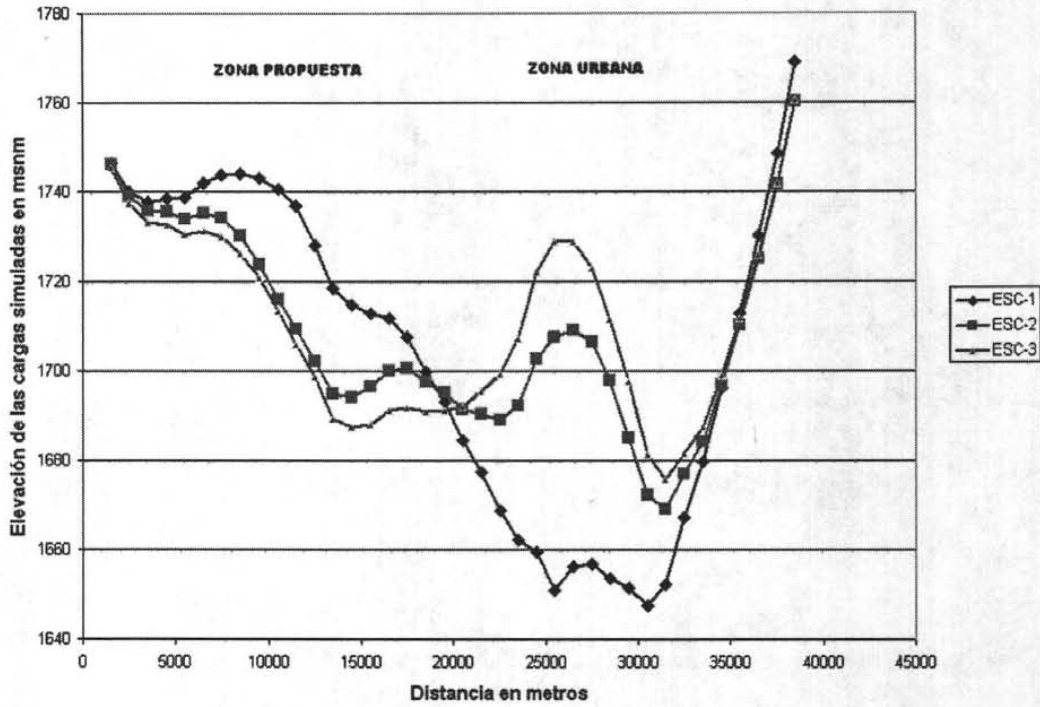


Figura 4.9 Comparación de las alternativas simuladas al año 2020. Fila 5.

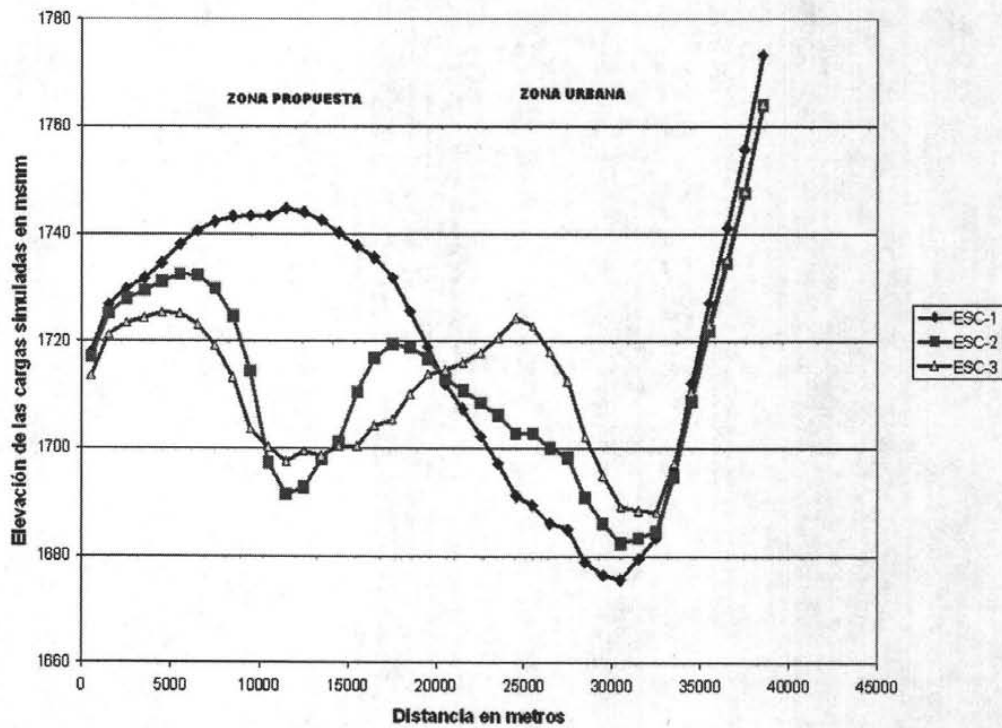


Figura 4.10 Comparación de las alternativas simuladas al año 2020. Fila 8.

4.4 Ventajas y limitaciones

De acuerdo con el desarrollo y calibración del modelo, se tiene que este se encuentra en condiciones de ser utilizado para predecir la respuesta hidráulica ante las distintas alternativas de bombeo a que pueda someterse, dentro de los horizontes de predicción razonables. Cabe señalar que durante el proceso de calibración y análisis de sensibilidad se identificaron algunos parámetros, cuya asignación de valores pueden limitar los alcances del modelo.

1. Fronteras de carga específica. Las entradas y salidas por flujo subterráneo en el modelo fueron consideradas como dependientes de la carga hidráulica y el caudal que ingresa por estas fronteras se calculó como el producto de la conductancia por la diferencia entre las cargas interior e exterior. En la determinación de la conductancia se tiene la incertidumbre en el cálculo del área de la sección transversal perpendicular al flujo en cada celda considerada, ya que el basamento del acuífero en las fronteras no se conocen totalmente y los caudales determinados mediante esta metodología pueden estar subestimados o sobrestimados.
2. Conductividad hidráulica. Los valores de este parámetro fueron asignados de acuerdo a las tablas de rangos de valores de la conductividad hidráulica y permeabilidad para diferentes tipos de rocas (Freeze y Cherry, 1979), y corresponden a los materiales geológicos que afloran en la zona estudiada. Los valores de la conductividad hidráulica asignados de las tablas, fueron determinantes, ya que solo se dispuso de tres pruebas de bombeo (IMTA, 1996). El análisis de sensibilidad realizado para este parámetro mostró que el modelo es muy sensible, por lo que se concluye que la conductividad puede estar sobre o subestimado.

3. Recarga por cuerpos de agua superficial. La determinación de esta variable se realizó en el subcapítulo 2.5, y para su evaluación es necesario conocer el valor de la conductividad hidráulica en el lecho de los ríos y vasos de almacenamiento. Este valor sólo se conoce en un tramo del río San Pedro en donde si se realizó una evaluación de las infiltraciones, mientras que en la presa El Niagara no se pudo estimar las infiltraciones ya que no se conoce las características hidrogeológicas del material sedimentado en el fondo. Se considera importante la determinación de los volúmenes infiltrados por este cuerpo que almacena agua residual tratada, ya que si existieran infiltraciones podrían afectar la calidad del agua subterránea respecto a la zona donde se propone la reubicación de los pozos.

4. La reducción de las dimensiones de la malla, indica que esta representa un papel muy importante con respecto a los valores obtenidos durante la calibración, ya que la reducción de las dimensiones de 1000 a 500 metros, arrojó un error medio absoluto de casi 3 metros.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En la aplicación del modelo de flujo del acuífero del Valle de Aguascalientes se ha ilustrado brevemente las distintas etapas para la construcción de un modelo digital. Estas etapas incluyen la conceptualización del sistema, el diseño de la malla, la asignación inicial de parámetros, la calibración y el análisis de sensibilidad. Como resultado se tiene que el modelo está en condiciones de ser empleado para predecir la respuesta hidráulica del sistema ante las distintas alternativas de bombeo.
2. Del análisis de la información hidrogeológica, el agua subterránea que abastece a la Ciudad de Aguascalientes proviene de dos acuíferos, a saber, el primero está alojado en un medio granular, compuesto de gravas, arenas, limos y arcilla, y se clasifica como del tipo libre y el segundo se aloja en rocas ígneas fracturadas, no conociendo su distribución y límites, por lo que no fue incluido en el modelo.
3. Los resultados de la simulación de las políticas de explotación del agua subterránea que prevalecen en el acuífero del Valle de Aguascalientes, especialmente en la zona urbana, estiman que para el año 2010 y 2020 la elevación del nivel estático será de 1680 y 1660 m.s.n.m., respectivamente. Causando efectos colaterales como: entre el 30 y 40 % de los pozos que actualmente extraen agua para uso municipal quedaran fuera de operación. Por otra parte, el resto de los aprovechamientos extraerán agua de profundidades superiores a los 180 metros de profundidad, con el consiguiente aumento en los costos de operación y mantenimiento de los equipos de bombeo.
4. Los abatimientos descritos en el punto anterior son una consecuencia del bombeo de los 137 pozos municipales distribuidos en esta porción del acuífero aproximadamente en un área de 80 km², dentro de la zona urbana, la cual se encuentra limitada al oriente por una falla impermeable. Lo anterior se debe a que en esta porción el acuífero está limitado, produciendo abatimientos mayores.

5. El escenario 2 constituye una buena opción para la relocalización de los pozos de la zona urbana, el arreglo consiste de 21 pozos, con una distancia entre ellos de 1000 metros y con un caudal de extracción de 640 litros por segundo. Este caudal corresponde a un volumen de aproximadamente 20 Mm³/año y representa un 25% de la extracción actual en la zona urbana.

6. El escenario 3 puede constituir la opción más apropiada, debido al arreglo de los pozos que se ubican en una dirección NE-SO, con una separación de 1400 metros entre cada uno y con un caudal de extracción de 1000 litros por segundo. Este caudal corresponde a un volumen de aproximadamente 31.5 Mm³/año y representa un 40% de la extracción actual en la zona urbana. Para este escenario es importante señalar que también es el que presenta los mayores abatimientos que los otros escenarios en la zona de reubicación y las descargas de agua residual y almacenamiento en los cuerpos de agua gradiente arriba pueden afectar la calidad del agua subterránea.

7. Los pozos que pueden ser seleccionados para quedar fuera de operación en la zona urbana tendrán las siguientes características:
 - Profundidades menores o iguales que 250 metros.
 - Que por su emplazamiento se localicen a una distancia menor a los 1000 metros con respecto a la falla oriente.
 - Que su caudal de operación sea mayor o igual que los 30 litros por segundo.

8. La reubicación de los pozos constituye una alternativa para atenuar los efectos de la explotación intensiva del agua subterránea en la zona acuífera aledaña a la falla principalmente. Sin embargo, la reubicación de los pozos debe ser reforzada con programas sobre el manejo de recursos hídricos en el estado.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Simulación de políticas de operación en el Acuífero del Valle de Aguascalientes

1. Anderson, M and Woessner, W.W, Applied groundwater modeling. Academic Press. USA, 1992.
2. Aranda, G.J. Geología preliminar del Graben de Aguascalientes, Ags. Instituto de Geología, UNAM, Vol. 8, pp. 22.83, 1989.
3. Ariel Consultores S.A. Estudio Hidrogeológico Completo de los Acuíferos en el estado de Aguascalientes, SARH, 1971.
4. Balderas R. Y. y González R. E. Prospección hidrogeológica en la secuencia volcánica al Este de la ciudad de Aguascalientes. Facultad de Ingeniería. Tesis Profesional. UNAM, 1992.
5. Bear, J.; Beljin, M.S.; Ross, R.R. Fundamentals of Ground-Water Modeling. Ground Water Issue. EPA, 1992.
6. Briseño, R.J.V; Camacho, G.H.D; Ramírez F.E. Recalibración del modelo hidrodinámico del flujo subterráneo y obtención de políticas de manejo del sistema acuífero de Aguascalientes. Tesis de licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura IPN, 2000.
7. Comisión Estatal de Agua Potable y Saneamiento – Secretaria de Obras Públicas. Estudio geohidrológico del SE de la Ciudad de Aguascalientes, 1991.
8. Comisión Nacional del Agua. Manual para evaluar Recursos Hidráulicos subterráneos. Subdirección General de Administración del Agua. México, DF, 1994
9. Díaz, N.J.J. Simulación numérica del flujo subterráneo en el acuífero del Soconusco, Chiapas. Tesis de Posgrado. Facultad de Ingeniería. División de Estudios de Posgrado UNAM, 2001.

Simulación de políticas de operación en el Acuífero del Valle de Aguascalientes

- 10.** García, R.O. Manejo óptimo del acuífero del Valle de Aguascalientes bajo control de asentamientos. Tesis de Posgrado. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura IPN, 1995.
- 11.** Gutiérrez, O.C. Metodologías para estimar la recarga de acuíferos (primera etapa). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México, 1998.
- 12.** Heath, C.R.. Basic Ground – Water Hydrology. USGS. Water Supply Paper 220, 1982
- 13.** Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Estudio de factibilidad para la reubicación de pozos de agua potable en la zona sur de la ciudad de Aguascalientes, Ags. Coordinación de Tecnología Hidrológica. Subcoordinación de Hidrología Subterránea, 1996.
- 14.** Información climatológica consultada en el web del INEGI, 2003.
- 15.** Murillo, R.F. Comentarios sobre los agrietamientos en el Valle de Aguascalientes, Ags. Consultivo Técnico. Comisión Nacional del Agua. Comunicación Interna, 1993.
- 16.** Rodarte, R.L. Apuntes de la clase mecánica de acuíferos. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa, 1980.
- 17.** Síntesis Geográfica de Aguascalientes. INEGI, 1981.
- 18.** Secretaría de Recursos Hidráulicos. Sinopsis Geohidrológica del Estado de Aguascalientes. 1986.
- 19.** Todd, D.K. Groundwater Hydrology. Wiley, New York. 1959.