



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

“MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DEL ACUÍFERO CUAUTITLÁN-PACHUCA”

EFRAÍN NERI RAMÍREZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2013

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe: **Efraín Neri Ramírez**, alumno de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor: **Dr. J. Enrique Rubiños Panta**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis: "**Modelación hidrogeológica y evaluación de la sustentabilidad del acuífero Cuautitlán-Pachuca**"; y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados.

Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 15 de noviembre de 2013.



Firma



Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: Modelación hidrogeológica y evaluación de la sustentabilidad del acuífero Cuautitlán-Pachuca; realizada por el alumno: Efraín Neri Ramírez, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. JUAN ENRIQUE RUBIÑOS PANTA

ASESOR



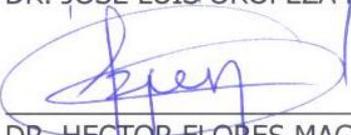
DR. OSCAR LUIS PALACIOS VELEZ

ASESOR



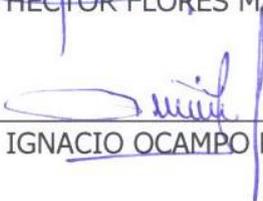
DR. JOSE LUIS OROPEZA MOTA

ASESOR



DR. HECTOR FLORES MAGDALENO

ASESOR



DR. IGNACIO OCAMPO FLETES

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Noviembre de 2013

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

Por darme la vida, el entendimiento y las capacidades para poder cumplir una meta más en la vida.

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA (CONACYT)

Por el financiamiento otorgado, sin el cual no hubiera sido posible realizar y culminar mis estudios de Doctorado.

AL COLEGIO DE POSTGRADUADOS

Por permitirme ser parte de la mejor Institución de formación en el sector agrícola.

AL DR. J. ENRIQUE RUBIÑOS PANTA

Por su amistad, orientación y paciencia para dirigir esta tesis.

AL DR. JOSE LUIS OROPEZA MOTA

Por sus consejos, dirección y valiosas observaciones a este trabajo.

AL DR. OSCAR L. PALACIOS VELEZ

Por compartir su tiempo, consejo y conocimientos para la realización de esta tesis.

DR. HECTOR FLORES MAGDALENO

Por sus valiosos consejos, orientación y dirección para realizar esta tesis.

AL DR. IGNACIO OCAMPO FLETES

Por su ayuda, amistad y valiosa orientación en la realización de este trabajo.

M.C. SALVADOR PEÑA DIAZ

Por su ayuda invaluable y consejos en el diseño del modelo simulación.

DEDICATORIA

A mi Papá y Mamá:

Efraín Neri Jiménez e Irma Ramírez Valdivia, les dedico con todo mi corazón este trabajo de tesis, porque gracias a su apoyo, consejos, oraciones, amor y confianza en mí, me impulsaron a seguir adelante y no dejarme vencer por las adversidades, hasta alcanzar la meta. Doy gracias a Dios por tenerlos como mi fortaleza y dirección en el diario caminar de la vida, y por darme su amor en todo momento. Con toda mi admiración, cariño y respeto, este trabajo es para ustedes. Los amo.

A mi esposa e hijo:

Ana Lilia Chacón Aguayo y Alessandro Efraín Neri Chacón, a ustedes por ser mi motor y mi más grande tesoro. Gracias Anita por brindarme todo tu amor, comprensión y ayuda no solo para esta tesis, sino también en nuestro diario vivir, te amo muchísimo y agradezco a Dios la dicha de poder conocerte y amarte. Y a ti mi pequeño hijo, esto es para ti, Alex, pues tú eres sin duda la parte más importante de mi vida y la mayor bendición, gracias por ser mi hijo, y gracias por permitirme ser tu papá. Te quiero y amo mucho.

A mis Hermanos:

Daniel, Iván, Lina y Mayarí. A todos ustedes hermanos, les dedico este logro en mi vida y les doy gracias por tantas cosas que han hecho por mí, tanto emocional como de forma material, gracias por su amor y apoyo; así como también por el cariño fraternal que siempre me han brindado, los quiero mucho.

A mis compañeros y amigos:

Al Dr. Erick Galindo, Dr. Bernardo Escobar, M.C. Daniel Arcos y al Ing. Joel Matos, muchas gracias por su amistad y valiosos aportes al trabajo de tesis, sin lugar a dudas esto no hubiera sido posible sin ustedes. A las secretarias Irene y María Elena del programa de hidrocencias, muchas gracias por su ayuda.

INDICE

Índice de cuadros.....	IX
Índice de figuras.....	X
Índice de anexos.....	XII
Resumen.....	XIII
Abstract.....	XIV
1. Introducción.....	1
2. Problemática y justificación.....	2
3. Hipótesis y objetivos.....	5
4. Revisión de literatura.....	6
4.1 Sobreexplotación de los acuíferos en México.....	28
4.2 Modelos de simulación de recarga de acuíferos.....	29
4.2.1 Derivación de la ecuación de diferencias finitas.....	31
4.2.2 Discretización.....	33
4.2.3 Ecuaciones en diferencias finitas.....	35
4.2.4 Método iterativo.....	42
4.2.5 Formulación de ecuaciones para su resolución.....	44
4.2.6 Tipos de celdas y condiciones de contorno.....	45
4.3 Ejemplos de modelación hidrológica de flujo subterráneo..	50
4.3.1 Informes técnicos y artículos científicos.....	51
4.3.2 Planes y programas para el manejo del agua en el área	55
4.4 Indicadores de sustentabilidad.....	57
4.5 Balance hidrológico.....	60
4.6 Balances hidrológicos previos.....	63
4.7 Pruebas de bombeo.....	66
4.8 Métodos de análisis para acuíferos semiconfinados.....	68
4.9 Métodos de análisis para acuíferos confinados.....	69
4.10 Métodos de análisis para acuíferos libres.....	70
4.10.1 Método de Neuman.....	71
4.10.2 Método de Boulton.....	73
4.10.3 Método de Thiem-Dupuit.....	73
5. Materiales y métodos.....	74
5.1 Descripción de la zona de estudio.....	75
5.2 Municipios.....	76

5.3 Fisiografía.....	77
5.4 Clima.....	78
5.5 Hidrología.....	79
5.6 Geología.....	81
5.7 Hidrogeología.....	81
5.7.1 Tipo de acuífero.....	81
5.8 Volúmenes de extracción.....	82
5.8.1 Concesiones de agua subterránea en el acuífero.....	83
5.8.2 Usos y aprovechamientos según los censos de 2009.....	84
5.9 Método de balance hidrológico.....	86
5.9.1 Entradas de agua al acuífero.....	86
5.9.2 Salidas de agua del acuífero.....	88
5.9.3 Método de abatimientos y coeficiente de almacenamiento....	88
5.10 Modelación hidrogeológica y generación de SIG.....	89
5.10.1 Selección de software a utilizar.....	89
5.11 Modelo matemático del acuífero.....	91
5.11.1 Generación del modelo matemático.....	91
5.11.2 Discretización horizontal y vertical.....	91
5.11.3 Calibración por ensayo y error del modelo.....	103
5.11.4 Validación del modelo.....	104
5.12 Metodología para evaluar la sustentabilidad.....	105
5.12.1 Definición de los indicadores de sustentabilidad.....	105
5.12.2 Determinación de indicadores y valores óptimos.....	106
5.12.3 Medición y monitoreo de indicadores.....	110
6. Resultados.....	114
6.1 Balance hidrológico.....	114
6.2 Balance hidrológico 2010.....	117
6.3 Nivel estático (NE).....	119
6.4 Evolución de los niveles piezométricos.....	126
6.5 Transmisividad.....	127
6.6 Calibración y validación.....	127
6.7 Análisis de sensibilidad.....	130

6.8 Análisis del comportamiento del acuífero en diferentes años con base en el modelo de simulación.....	133
6.8.1 Escenario 1: Tendencia de explotación actual.....	133
6.8.2 Escenario 2: Manejo eficiente.....	135
6.9 Sustentabilidad del acuífero.....	140
6.9.1 Resultados de la evaluación de sustentabilidad por MESMIS..	141
7. Conclusiones	146
8. Recomendaciones generales.....	149
8.1 Recomendaciones específicas.....	150
8.1.1 Planta de tratamiento en zona El Caracol.....	150
8.1.2 Acueducto Actopan-Pachuca.....	151
9. Bibliografía.....	152

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estado actual de los acuíferos del valle de México.....	2
Cuadro 2. Acuíferos sobreexplotados en México.....	2
Cuadro 3. Balance de aguas subterráneas, 1999.....	64
Cuadro 4. Balance de aguas subterráneas para 2002.....	64
Cuadro 5. Balance de aguas subterráneas, para 2004.....	65
Cuadro 6. Métodos de análisis de acuíferos semiconfinados.....	69
Cuadro 7. Métodos de análisis de acuíferos confinados.....	70
Cuadro 8. Relación de municipios en el acuífero Cuautitlán-Pachuca.....	76
Cuadro 9. Escurrimientos superficiales en hm ³ /año.....	80
Cuadro 10. Aprovechamientos concesionados de agua subterránea.....	83
Cuadro 11. Pozos y caudales de extracción por uso.....	85
Cuadro 12. Láminas de recarga empleadas en el modelo de simulación...	97
Cuadro 13. Conductividades hidráulicas en m/d.....	100
Cuadro 14. Valores de los coeficientes de almacenamiento.....	100
Cuadro 15. Criterios de diagnóstico e indicadores de sustentabilidad.....	112
Cuadro 16. Criterios para los atributos de sustentabilidad.....	113
Cuadro 17. Balance de aguas subterráneas 2010.....	117
Cuadro 18. Calculo de la evapotranspiración por método de Turc.....	118
Cuadro 19. Calculo del Coeficiente de infiltración.....	118
Cuadro 20. Calculo del escurrimiento superficial.....	119
Cuadro 21. Evapotranspiración real por método de Coutagne.....	119
Cuadro 22. Resultados del proceso de calibración.....	128
Cuadro 23. Valores de carga calculada vs observada.....	128
Cuadro 24. Resultados de la modelación de los años 2000-2030.....	135
Cuadro 25. Resultados de la modelación 2010-2030.....	137
Cuadro 26. Valores óptimos y valores ponderados de los indicadores.....	144
Cuadro 27. Estrategias para la recuperación del acuífero.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Balance de masa en un elemento diferencial de acuífero.....	14
Figura 2. Red de flujo en medio homogéneo e isótropo.....	18
Figura 3. Tubo de flujo. El caudal Q se conserva constante.....	19
Figura 4. Caudal circulante por un tubo de flujo de espesor unitario.....	20
Figura 5. Malla de celdas en diferencias finitas.....	26
Figura 6. Acuíferos sobreexplotados por Región Hidrológica-Adm.....	28
Figura 7. Relación extracción-recarga en los acuíferos del valle de México.....	29
Figura 8. Esquema de discretización de un sistema acuífero hipotético	33
Figura 9. Diferencias entre aproximación centrada en el bloque y en el punto.....	35
Figura 10. Notación para las celdas.....	36
Figura 11. Flujo desde la celda $i,j-1,k$ hacia la celda i,j,k	37
Figura 12. Representación de la filtración a través del lecho de un río...	39
Figura 13. Hidrograma para la celda i,j,k	40
Figura 14. Acuífero discretizado mostrando el contorno y tipos de celdas.....	45
Figura 15. Esquema de discretización vertical.....	53
Figura 16. Esquema de balance hídrico.....	63
Figura 17. Acuífero Cuautitlán-Pachuca.....	76
Figura 18. Aprovechamientos concesionados de agua subterránea.....	83
Figura 19. Volúmenes concesionados de agua subterránea.....	84
Figura 20. Porcentaje de pozos y gasto de extracción por uso.....	85
Figura 21. Discretización espacial del acuífero Cuautitlán-Pachuca.....	93
Figura 22. Sección hidrogeológica E-O.....	94
Figura 23. Sección hidrogeológica N-S.....	95
Figura 24. Localización de pozos de extracción.....	96
Figura 25. Distribución de las recargas en el acuífero.....	98
Figura 26. Distribución de la conductividad hidráulica.....	101
Figura 27. Distribución del coeficiente de almacenamiento.....	101
Figura 28. Curvas de igual elevación del nivel estático 1990.....	102

Figura 29. Celdas con entradas y salidas de flujo subterráneo.....	103
Figura 30. Ciclo de evaluación del MESMIS.....	114
Figura 31. Ubicación de 10 pozos del acuífero Cuautitlán-Pachuca con los mayores abatimientos (1990-2010).....	121
Figura 32. Evolución del N.E. del pozo 4908 (Tizayuca).....	121
Figura 33. Evolución del N.E. del pozo 78b (Cuautitlán Izcalli).....	122
Figura 34. Evolución del N.E. del pozo CB-73V (Cuautitlán Izcalli).....	122
Figura 35. Evolución del N.E. del pozo RF-41B (Nextlalpan).....	123
Figura 36. Evolución del N.E. del pozo BI-63 (Cuautitlán Izcalli).....	123
Figura 37. Evolución del N.E. del pozo RF-25B (Tultepec).....	124
Figura 38. Evolución del N.E. del pozo GO-14 (Zumpango).....	124
Figura 39. Evolución del N.E. del pozo CB-91 (Cuautitlán Izcalli).....	125
Figura 40. Evolución del N.E. del pozo 5690 (Zumpango).....	125
Figura 41. Evolución de N.E. del pozo 5014 (Tizayuca).....	126
Figura 42. Curvas de igual elevación N.E. 2000.....	129
Figura 43. Relación de carga observada vs calculada (1990).....	129
Figura 44. Relación de carga observada vs calculada (2000).....	130
Figura 45. Desviación estándar del N.E. al variar K.....	131
Figura 46. Desviación estándar del N.E. al variar S.....	132
Figura 47. Desviación estándar del N.E. al variar la carga.....	132
Figura 48. Comportamientos de los N.E. y N.D. (escenario 1).....	134
Figura 49. Comportamientos de los N.E. y N.D. (escenario 2).....	138
Figura 50. Gráfica de sustentabilidad del acuífero.....	145

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Vértices de la poligonal del acuífero Cuautitlán-Pachuca.....	158
Anexo 2. Pruebas de bombeo.....	159
Anexo 3. Crecimiento poblacional estimado para el 2030 según la CONAPO (2005).....	165
Anexo 4. Mapas de evolución de nivel piezométrico y niveles estáticos en el acuífero Cuautitlán-Pachuca.....	167

MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DEL ACUÍFERO CUAUTITLÁN-PACHUCA

Efraín Neri Ramírez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2013

El acuífero Cuautitlán-Pachuca ocupa la porción norte de la cuenca del Valle de México, justificando su nombre por la presencia de Cuautitlán en el Estado de México y Pachuca en el estado de Hidalgo. Dicho acuífero en la actualidad esta sobreexplotado. Por tal motivo en este trabajo se estimó la sustentabilidad del acuífero, utilizando el marco para la evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales incorporando indicadores de sustentabilidad (MESMIS). Se realizó un estudio longitudinal comparando dos sistemas, el primero se analizó para el periodo 1970-1990 (sistema de referencia) y el segundo para el periodo 1991-2010 (sistema alternativo). Se analizaron 14 indicadores ambientales, económicos y sociales, para los dos periodos de tiempo. Encontrándose que los aspectos ambientales y económicos presentan los mayores rezagos con el paso de los años, en el caso de los indicadores sociales mostraron avances hacia la equidad. También se encontró que 9 de los indicadores presentaron mayor cercanía al valor óptimo propuesto en el sistema de referencia y solo cinco mostraron un acercamiento hacia el óptimo en el sistema alternativo. Los resultados muestran que el acuífero es menos sustentable en la actualidad. Ahora bien desde el punto de vista de disponibilidad de agua y grado de sobreexplotación del acuífero, fue necesario establecer el déficit actual del acuífero Cuautitlán-Pachuca, y este fue estimado mediante el método de balance hidrológico, que consiste en medir o calcular las diferentes entradas y salidas de agua al área del acuífero, encontrándose un déficit o minado del acuífero del orden de $-406.9 \text{ hm}^3/\text{año}$, que ha dado como resultado un abatimiento anual de 1.5 m de los niveles estáticos. También se desarrolló un modelo de simulación del acuífero Cuautitlán-Pachuca mediante el uso del software Visual Modflow 4.2, que permitió prever que con los actuales manejos el acuífero llegara a un estado crítico en el año 2030, y se simuló un escenario de manejo eficiente del acuífero, que permitiría para el mismo año unas condiciones más controladas de la relación extracción-recarga, por lo que este trabajo pretendió dar pautas para un mejor manejo y recuperación del acuífero.

Palabras clave: Indicadores, sobreexplotación, evaluación, simulación de escenarios, balance hidrológico.

HYDROGEOLOGICAL MODELING AND SUSTAINABILITY EVALUATION OF THE CUAUTITLÁN-PACHUCA AQUIFER

The aquifer Cuautitlán-Pachuca occupies the northern portion of the basin of the Valley of Mexico, justifying its name from the presence of Cuautitlán in the State of Mexico and Pachuca in Hidalgo. This aquifer is overexploited at present, because the recharge is less than abstraction, for this reason in this work was estimated sustainability of the aquifer, using the framework for assessing management systems incorporating natural resources sustainability indicators (MESMIS). We performed a longitudinal study comparing of two systems, the first was analyzed for the period 1970-1990 (reference system) and the second for the period 1991-2010 (alternative system). They analyzed 14 environmental indicators, economic and social, for the two periods. We found that environmental and economic aspects present the greatest setbacks over the years, in the case of social indicators showed progress toward equity. We also found that 9 of the indicators presented closer to the optimum value proposed in the reference system and only five showed a close to optimal in the alternative system. The results show that the aquifer is less sustainable today.

From the point of view of water availability and degree of overexploitation of the aquifer, it was necessary to establish the current deficit Cuautitlán-Pachuca aquifer, and this was estimated by the water balance method, which consists in measuring or calculating the different inputs and outputs water to the aquifer area, was estimated a deficit or mining the aquifer of about $-406.9 \text{ hm}^3/\text{year}$, which has led to an annual abatement of 1.5 m static levels. Also developed a simulation model Cuautitlán-Pachuca aquifer by using Visual Modflow 4.2 software, which allowed anticipate that the current handling the aquifer reached a critical state in 2030, and I simulate a scenario of efficient management aquifer, which would allow for the same year more controlled conditions of the extraction - recharge relationship, so this work aimed to provide guidelines for better management of the aquifer and seek a speedy recovery.

Keywords: Indicators, overexploitation, evaluation, simulation scenarios, hydrological balance

1. INTRODUCCIÓN

La importancia del agua subterránea en el país se ha manifestado por la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios; cerca del 37% (28.9 miles de millones de m³/año) del volumen total concesionado para usos consuntivos es de origen subterráneo. Para fines de administración del agua subterránea, el país se ha dividido en 653 acuíferos, cuyos nombres oficiales fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de diciembre de 2001. De los cuales solo 282 acuíferos contaban con disponibilidad de agua subterránea en 2008, según la CONAGUA.

A partir de la década de los setentas, se presentó un aumento sustancial del número de acuíferos sobreexplotados, 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001, 102 en 2003 y 104 en el 2006, en el año 2007 se llegó a 101; sin embargo, en el año 2009 se redujo el número a 100 y así se ha mantenido hasta la actualidad. De éstos se extrae el 58% del agua subterránea para todos los usos.

En el caso del acuífero Cuautitlán-Pachuca, la extracción de agua subterránea en los últimos años ha provocado la sobreexplotación del mismo, ya que la recarga es menor que la extracción y aunado a esto se ha presentado un aumento exponencial de la población en la zona, lo que podría causar en un futuro que los más de 4.5 millones de personas que de él se alimentan se queden sin agua.

Según el Organismo Operador de la Cuenca del Valle de México perteneciente a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el acuífero tiene una relación extracción/recarga de 2.11 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estado actual de los acuíferos del valle de México

Nombre del Acuífero	Subregión	Recarga media (Hm ³ /año)	Extracción media (Hm ³ /año)	Recarga-Extracción (Hm ³ /año)	Relación Extracción-Recarga
1. Zona Metropolitana Ciudad de México	Valle de Mex.	512.8	623.8	-111	1.2
2. Chalco-Amecameca	Valle de Mex.	79.3	100.3	-21	1.3
3. Texcoco	Valle de Mex.	161	184.2	-23.2	1.1
4. Cuautitlán-Pachuca	Valle de Mex.	356.7	751.3	-394.6	2.1

Fuente: DOF, 2009

Para el caso específico del acuífero Cuautitlán-Pachuca se hizo un análisis de escenarios sobre el comportamiento del mismo, en cuanto a cuál sería su situación de mantenerse sin cambios los regímenes de extracción y recarga, en comparación con el aumento de población y cambio de uso del agua. Así como también se evaluó la sustentabilidad económica, social y ambiental del acuífero con base en indicadores tipo MESMIS.

2. PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN

De los 653 acuíferos que existen en el territorio nacional, 100 están sobreexplotados y de ellos se extrae el 58% del agua subterránea que se emplea en el país (Cuadro 2).

Cuadro 2. Acuíferos sobreexplotados en México

Año	No. de acuíferos sobreexplotados
1975	32
1985	80
2006	104
2007	101
2009	100
2011	100

Fuente: Estadísticas del Agua en México, edición 2011. Comisión Nacional del Agua.

El problema de la sobreexplotación tuvo sus orígenes en el país con un grave impacto ecológico que fue generado en las primeras décadas de 1960-80, que generó agotamiento de manantiales, desaparición de lagos y humedales, merma del gasto base de ríos, eliminación de vegetación nativa y pérdida de

ecosistemas, así como el asentamiento y agrietamiento del terreno, además de la contaminación del agua subterránea e intrusión salina en acuíferos costeros. Los mayores problemas sobre este último punto se presentan en la actualidad en 17 acuíferos costeros en los estados de Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz.

La importancia de los acuíferos se puede establecer por los siguientes hechos:

- Son las únicas fuentes confiables de suministro de agua en las regiones áridas y semiáridas del país.
- Proporcionan el agua que requiere prácticamente la totalidad de la población rural y en un contexto más amplio, el 70% de la población del territorio, así como de la mayoría de los desarrollos industriales.
- Sustentan el riego de dos millones de hectáreas, prácticamente la tercera parte de la superficie total bajo riego.

Actualmente, se extraen del subsuelo cerca de 28,000 hm³/año, de los cuales 71% se destina al uso agrícola y 20% al público-urbano. En los últimos 40 años la reserva estratégica de agua subterránea ha perdido por sobreexplotación, del orden de 60,000 hm³ y se sigue mermando a un ritmo de 5,400 hm³/año.

Por otro lado la calidad del agua subterránea se está convirtiendo en una limitante para la disponibilidad. Existen acuíferos contaminados que subyacen a las zonas agrícolas y urbano-industriales, además el medio rural ha provocado contaminación biológica del agua subterránea.

También algunos acuíferos ocasionan problemas de salud pública, derivados de la presencia de elementos químicos como el arsénico (As), flúor (F), hierro (Fe) y manganeso (Mn), aportados por las rocas y disueltos en el agua en concentraciones superiores a las permisibles. Ante este escenario, este trabajo tuvo como objetivo primordial el impulsar la exploración geohidrológica mediante la observación del comportamiento de los niveles de agua del acuífero Cuautitlán-Pachuca, como parte del monitoreo integral del ciclo hidrológico; la medición de las extracciones y sus descargas naturales; el monitoreo de su calidad natural y de su deterioro causado por las

actividades antropogénicas; así como la evaluación de las características, renovación y disponibilidad de agua del acuífero.

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la sustentabilidad del acuífero mediante un modelo de simulación e indicadores de sustentabilidad, probando diferentes escenarios de manejo y haciendo propuestas que permitan su recuperación y manejo sustentable.

Objetivos específicos

- Realizar el balance hidrológico del acuífero
- Realizar el modelo de simulación del acuífero de Cuautitlán-Pachuca.
- Evaluar la sustentabilidad del acuífero con base en indicadores tipo MESMIS.
- Evaluar escenarios para la recuperación del acuífero y hacer propuestas para su manejo sustentable.

Hipótesis general

La sustentabilidad del acuífero Cuautitlán-Pachuca a corto, mediano y largo plazo puede ser evaluada mediante el desarrollo del balance hidrológico, la modelación hidrogeológica, la simulación de escenarios y el uso de indicadores de sustentabilidad.

Hipótesis específicas

- El comportamiento del acuífero de Cuautitlán-Pachuca puede ser estimado mediante el balance hidrológico del mismo.
- El diseño y operación del modelo de simulación de flujo subterráneo permitirá comparar los niveles de abatimiento calculados con los datos estimados en campo mediante el balance hidrológico.
- El acuífero puede ser sostenible si se toman en cuenta algunos indicadores de sustentabilidad y se dan pautas para su recuperación, manejo y óptima utilización.

- La evaluación de escenarios de manejo puede hacerse mediante el modelo de simulación y se puede plantear políticas de manejo para su recuperación y mejorar los indicadores de sustentabilidad.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

En este apartado se presenta la información existente relacionada con el tema de estudio; se hace referencia por un lado al manejo de agua en el acuífero desde la perspectiva de su área de influencia, también se presentan algunos trabajos relacionados con el problema de sobreexplotación de acuíferos en nuestro país para después particularizar el caso del Cuautitlán-Pachuca.

También se presentan algunas definiciones de conceptos fundamentales como lo son los tipos de acuíferos, parámetros hidrogeológicos y propiedades importantes (porosidad, coeficiente de almacenamiento, conductividad hidráulica y permeabilidad) y se plantean las ecuaciones fundamentales del movimiento del agua en el suelo (ley de continuidad, ecuaciones de Boussinesq, función de corriente, potencial de velocidades, curvas equipotenciales y líneas de corriente). Otro de los aspectos que se tienen en este apartado son balances hidrológicos previos, además de las bases metodológicas para la evaluación de la sustentabilidad del acuífero mediante indicadores sociales, ambientales y económicos que establece el MESMIS.

Clasificación de las rocas desde el punto de vista hidrogeológico

Desde el punto de vista de su comportamiento hidrogeológico, es clásica la clasificación de las rocas en:

Acuíferos: Rocas que almacenan y transmiten agua en cantidades significativas.

Acuitardos: Rocas que almacenan agua y la transmiten lentamente.

Acuicuosos: Rocas con una capacidad de almacenamiento apreciable pero con capacidad de transmisión prácticamente nula.

Acuífugos: Rocas que ni almacenan ni transmiten agua.

El límite entre unos y otros tipos de roca no está claramente definido, y en la práctica la consideración de una unidad geológica como acuífero suele

establecerse en función de la naturaleza del resto de las unidades geológicas de la región.

La palabra acuífero (del latín aqua=agua y ferre=llevar), no hace referencia ni a la naturaleza litológica ni a la edad de la unidad geológica, sino solo a su capacidad de llevar agua. El agua almacenada en estas unidades geológicas es conocida con el nombre de agua subterránea (Custodio y Llamas, 1983).

Tipos de acuíferos

Cuando el agua almacenada en un acuífero está en contacto directo con la atmosfera a través de poros y fisuras de la roca, el acuífero se denomina *acuífero libre*, en este se cumple que el límite superior de la zona saturada, la superficie freática, es el lugar geométrico de los puntos en los que el agua subterránea se encuentra a la presión atmosférica. En cualquier punto por debajo de la superficie freática el agua está a una presión mayor que la atmosférica (está a la presión atmosférica más la correspondiente al peso de la columna de agua que carga sobre ese punto).

Cuando un acuífero está aislado de la atmosfera por unidades geológicas impermeables, se le denomina *acuífero confinado*. Un acuífero confinado esta siempre saturado de agua y en todos sus puntos el agua se encuentra a una presión mayor que la atmosférica. Debido a ello si se perfora un sondeo hasta alcanzar un acuífero confinado, el agua del acuífero ascenderá en el interior de este sondeo hasta alcanzar un equilibrio entre la presión a la que se encuentra sometida y la presión atmosférica. A este fenómeno se le denomina artesianismo. Si la presión fuese suficiente, el agua podría ascender por encima de la superficie del terreno originándose un fenómeno de surgencia. A la cota que alcanzaría el agua al interior de un sondeo ranurado en un punto del acuífero confinado se le denomina nivel piezométrico, y al lugar geométrico del nivel piezométrico de todos los puntos de un acuífero confinado se denomina superficie piezométrica. Puesto que la presión del agua en todos los puntos de un acuífero confinado es mayor que la atmosférica, la superficie piezométrica estará siempre por encima del techo del acuífero y será una superficie virtual. Si las unidades confinantes permiten un cierto flujo de agua

desde el acuífero hacia el exterior o viceversa, al acuífero se le llama semiconfinado.

La explicación de que la estructura geológica de los acuíferos es la que condiciona los fenómenos de artesianismo parece que fue dada por Vallisnieri en 1614. A partir de entonces se empieza a distinguir entre acuíferos libres y acuíferos confinados. Cuando en un acuífero confinado o semiconfinado el nivel piezométrico desciende por debajo de su techo, el acuífero adquiere la condición de libre.

Energía del agua en los acuíferos

Tanto el nivel piezométrico como el nivel freático, es decir, la altura que alcanza el agua subterránea en el interior de un sondeo ranurado exclusivamente en un punto de un acuífero, son consecuencia directa de la energía que tiene el agua en ese punto. A esta energía se le denomina potencial hidráulico en ese punto. El concepto como tal fue definido por Hubbert (1940). Como se manifiesta en una altura de agua en un sondeo, se mide en unidades de longitud. A efectos de poder establecer relaciones entre los niveles piezométricos o freáticos en diferentes puntos de un acuífero se dan todos ellos según una referencia común. Esta referencia suele ser la misma que se toma como origen para la medida de las cotas topográficas.

El potencial hidráulico es suma de una energía potencial, consecuencia de la posición del punto en el espacio, y una energía consecuencia de la presión a la que se encuentra el agua en el punto que se considere.

$$h = z + \frac{p}{\gamma} \quad (4.1)$$

Dónde:

- h es el potencial hidráulico (L)
- z es la cota del punto del acuífero sobre un plano de referencia (L)
- p es la presión a la que se encuentra sometida el agua en el punto del acuífero, o presión intersticial ($\text{ML}^{-1} \text{T}^{-2}$)
- γ es el peso específico del agua ($\text{ML}^{-2} \text{T}^{-2}$)

En un sistema estático el potencial hidráulico tiene el mismo valor en todos sus puntos (de no ser así el agua se movería de las zonas de mayor energía a las de menor energía). En un sistema dinámico la energía cinética es consecuencia de la velocidad del movimiento. Al ser, en la generalidad de los casos, la velocidad del flujo subterráneo muy lenta, este término suele ser despreciable.

Cuando un acuífero en condiciones ideales de rigidez aflora en una zona que constituye el área de recarga y en otra que constituye el área de descarga, estando confinado en el área intermedia por materiales que se han depositado posteriormente sobre el nivel piezométrico en la zona de confinamiento viene condicionado por el potencial hidráulico en las áreas de recarga y descarga. Cuando se trata de materiales no consolidados, en condiciones no ideales de rigidez, la presión del agua en los poros, y como consecuencia el nivel piezométrico son condicionados por el peso de los materiales que confinan al acuífero (Custodio y Llamas, 1983).

Coeficiente de almacenamiento

La capacidad de un acuífero para almacenar agua se mide a partir del coeficiente de almacenamiento, S , que se define como el volumen de agua que proporciona una columna de acuífero de base unitaria y altura del espesor saturado del acuífero al descender en una unidad el potencial hidráulico.

En el caso de un acuífero libre el volumen de agua que puede obtenerse de acuerdo con la definición de coeficiente de almacenamiento se corresponde con el agua almacenada en los poros interconectados del medio y que puede ser drenada por gravedad. Es el *specific yield* definido por Meinzer (1923b). Una vez drenada la muestra por gravedad, queda en el interior de la roca un cierto contenido en agua sorbida por la superficie de los poros y rellenando los capilares más finos. A este volumen de agua se le denomina *retención específica* (Meinzer, 1923b) y está sometida a unas fuerzas de succión mayores que las correspondientes al potencial gravífico.

La porosidad eficaz de la roca (volumen de poros interconectados con relación al volumen de roca, expresado en porcentaje), puede considerarse equivalente al specific yield cuando el volumen de agua correspondiente a la retención específica es despreciable. La diferencia con la porosidad total de una roca que se refiere al número total de huecos, interconectados entre sí. La porosidad eficaz será menor que la total. Solo serán equivalentes en el caso de que todos los huecos estuvieran interconectados.

En el caso del acuífero confinado o semiconfinado el volumen de agua que puede liberarse, según la definición de este parámetro, está en relación con los fenómenos elásticos que se producen en el sistema como consecuencia de la variación de la presión intersticial al disminuir el potencial hidráulico. Este hecho no supone el vaciado físico del acuífero; si el nivel piezométrico alcanzara el techo del acuífero este pasaría a ser libre.

El orden de magnitud de S está condicionado por los valores de los coeficientes de compresibilidad del agua y del acuífero. En la mayoría de los casos suele estar entre 10^{-3} y 10^{-5} . Se expresa como:

$$S = \gamma b (m_e \beta + \alpha) \quad (4.2)$$

Dónde:

- S es el coeficiente de almacenamiento (adimensional)
- γ es el peso específico del agua ($ML^{-2} T^{-2}$)
- m_e es la porosidad eficaz (adimensional)
- β es el módulo de compresibilidad del agua ($L^2 M^{-1}$)
- α es el módulo de compresibilidad del acuífero ($L^2 M^{-1} T^2$)
- b es el espesor saturado del acuífero (L)

También puede considerarse que:

$$S = \gamma b m_e \beta + \gamma b \alpha \quad (4.3)$$

En donde el primer sumando indica de acuerdo con las condiciones de la definición de coeficiente de almacenamiento, el volumen liberado como consecuencia de la compresibilidad del agua y el segundo como consecuencia de la del acuífero.

El coeficiente de almacenamiento no tiene dimensiones (volumen de agua que puede extraerse de un volumen de acuífero (L^3/L^3)). Para el volumen de agua que puede extraerse por unidad de espesor saturado del acuífero se define el coeficiente de almacenamiento específico que se representa como:

$$S^* = S/b \quad (4.4)$$

Dónde:

b es el espesor saturado del acuífero. S^* tiene dimensiones de (L^{-1}).

Ahora bien la *conductividad hidráulica* se define como el caudal de agua que pasa a través de una superficie unitaria del acuífero bajo un gradiente hidráulico. Tiene dimensiones de (L/T); cuando se considera el caudal de agua que pasa por una sección de acuífero de base y altura unitaria, su espesor saturado se considera como de transmisividad de acuífero. De las definiciones anteriores se desprende que la transmisividad es igual a la conductividad hidráulica por el espesor saturado y tiene de dimensiones L^2/T .

$$T = K b \quad (4.5)$$

La constante de proporcionalidad es denominada conductividad hidráulica

$$Q = A K \Delta h / \Delta l \quad (4.6)$$

Dónde:

- Q es el caudal circulante ($L^{-3} T^{-1}$)
- A es la sección del tubo normal al flujo subterráneo (L^2)
- K es la conductividad hidráulica (LT^{-1})
- Δh es la pérdida de energía que experimenta el agua (L)
- Δl es la distancia recorrida por el agua a través de la arena (L)

El cociente $\Delta h / \Delta l$ se denomina gradiente hidráulico “ i ” y representa la pérdida de energía por unidad de longitud de camino recorrido que experimenta el agua subterránea al circular a través de un medio poroso.

Generalización de la Ley de Darcy

La Ley de Darcy puede expresarse en términos de velocidad de flujo (caudal dividido por sección):

$$\vec{v} = -k \vec{i} \quad (4.7)$$

En donde el signo menos indica que los vectores velocidad y gradiente, aunque con la misma dirección, tienen sentido contrario. Esta velocidad no es con la que realmente se mueve el agua a través del medio poroso. La Ley de Darcy considera que el flujo subterráneo solo puede moverse a través de los huecos que dejan entre sí los elementos sólidos que constituyen el acuífero.

Puesto que la porosidad eficaz es siempre inferior a la unidad, el agua subterránea se mueve realmente a una velocidad mayor que la dada por la Ley de Darcy. Considerando un medio anisótropo, se puede descomponer el vector velocidad según sus tres componentes cartesianas, de manera que:

$$\vec{v}_x = K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4.8)$$

$$\vec{v}_y = K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4.9)$$

$$\vec{v}_z = K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (4.10)$$

Que se conoce como la expresión de la Ley de Darcy generalizada.

El cumplimiento de la Ley de Darcy exige que exista una relación lineal entre velocidad y gradiente hidráulico. El parámetro que mide esta linealidad (flujo laminar) es el número de Reynolds.

$$R_e = \frac{V_r d \rho}{\mu} \quad (4.11)$$

Cuando la velocidad real de flujo V_r se mide en cm/s; el diámetro medio de los poros o fisuras de la roca d , en cm; la densidad del agua ρ , en g/cm³; y la viscosidad μ , en dinas s/cm², para valores de R_e inferiores a 4, la velocidad del flujo y el gradiente hidráulico se relacionan linealmente, el flujo es laminar y es válida la Ley de Darcy. Para valores de R_e , mayores de 10 el flujo es turbulento y la Ley de Darcy no es válida. Para valores del número de Reynolds entre 4 y

10 puede asumirse el error de admitir flujo laminar y se puede considerar que la Ley de Darcy es aplicable.

En la práctica puede asumirse que la Ley de Darcy es aplicable en la totalidad de los medios con porosidad intergranular y en la mayoría de los medios fisurados en los que el grado de fracturación permita su asimilación a medios intergranulares. Si el medio es discontinuo el problema se complica puesto que el agua solo circula por las fracturas y la capacidad de transmisión de agua depende de la densidad de la fracturación, de la orientación y buzamiento de las fracturas, del grado de conexión, de la apertura de las fracturas, de la homogeneidad en el tamaño de las fracturas y de la rugosidad de las paredes de la fractura. En estos casos hay que acudir a las leyes más complejas, del tipo de la Ley Cubica. En los medios permeables por disolución –la mayoría de los acuíferos kársticos- se da con frecuencia la existencia de flujos turbulentos por lo que la aplicación de la Ley de Darcy resulta problemática.

Una vez definida la Ley de Darcy, a continuación se deduce la ecuación general de flujo subterráneo, tanto para régimen permanente como para régimen transitorio; se definen las condiciones de contorno necesarias para obtener soluciones particulares de esta ecuación y se indican los métodos de resolución de la misma: redes de flujo, soluciones analíticas y métodos numéricos (Martínez et al; 2006).

La ecuación general del flujo en régimen transitorio y en régimen permanente. Si se considera un pequeño elemento de un acuífero, de dimensiones dx , dy y dz , orientado en el espacio según unos ejes cartesianos X, Y, Z (Figura 1) y se aplica el principio de conservación de la masa (entradas de masa de agua menos salidas igual a variación de masa en el almacenamiento del elemento).

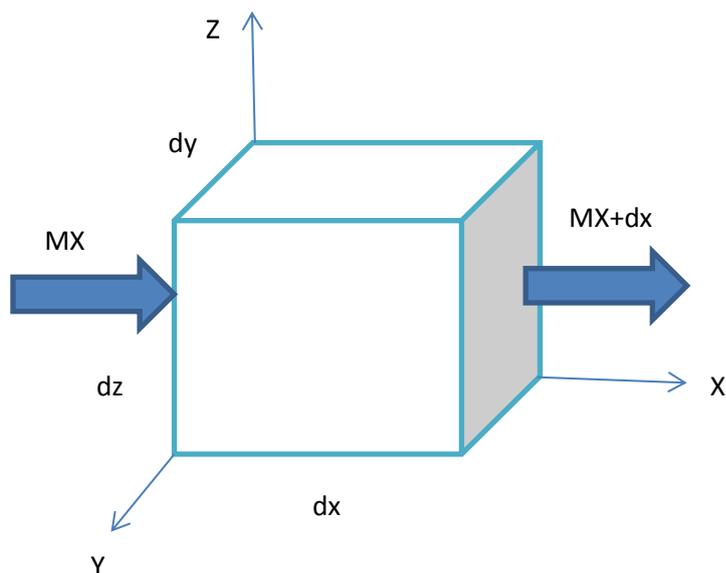


Figura 1. Balance de masa en un elemento diferencial de acuífero

La masa de agua que entrará en ese elemento de acuífero en un instante dt , según la dirección del eje X , se puede expresar como el volumen de agua que entra en ese instante (sección por velocidad y por tiempo), multiplicado por la densidad del agua.

$$M_x = (dy) (dz) (v_x) (\rho) (dt) \quad (4.12)$$

En donde:

- $(dy) (dz)$ es la sección perpendicular al flujo (L^2)
- v_x es la velocidad del flujo en la dirección del eje X (LT^{-1})
- ρ es la densidad del agua (ML^{-3})
- dt es el intervalo de tiempo considerado (T).

En ese mismo instante por la cara opuesta, separada de la anterior dx , sale el volumen de agua:

$$M_{x+dx} = (dy) (dz) (v_{x+dx}) (\rho) (dt) \quad (4.13)$$

La diferencia entre la masa que entra por una cara del elemento y la que sale por la opuesta ha de ser igual, para que se cumpla el principio de conservación de la masa, a la variación en el almacenamiento en esa dirección. La diferencia se calcula aplicando la fórmula de Taylor. Despreciando los términos superiores a la primera derivada queda de la siguiente manera:

$$\Delta M_x = \Delta v_x (p) = \frac{1}{1!} \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dy dz (p) dt = \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dy dz (p) \quad (4.14)$$

Considerando un volumen unitario, $dx dy dz=1$, un tiempo unitario, $dt=1$ y eliminando (p) de ambos miembros de la ecuación:

$$\Delta V_x = \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (4.15)$$

Teniendo en cuenta la Ley de Darcy,

$$v_x = K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4.16)$$

Y considerando medio homogéneo e isótropo quedaría:

$$\Delta V_x = \frac{\partial (K \frac{\partial h}{\partial x})}{\partial x} = K \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (4.17)$$

Haciendo un razonamiento semejante para las otras dos direcciones del espacio se tiene que:

$$\Delta V_y = K \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad (4.18)$$

$$\Delta V_z = K \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \quad (4.19)$$

Sumando las tres expresiones se tiene que:

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) (K) = \Delta V \quad (4.20)$$

Esta ecuación representa un balance de flujos de agua en la unidad de tiempo en el elemento unitario de acuífero que se ha considerado. El término de la izquierda representa las entradas menos las salidas de agua y el término de la derecha la variación del volumen almacenado, que puede expresarse:

$$\Delta V = S^* \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.21)$$

Siendo S^* el coeficiente de almacenamiento específico por tratarse de un elemento del acuífero que tiene de espesor la unidad. Al ser el área de la base del elemento de acuífero también la unidad, el producto queda como:

$$S^* \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.22)$$

Expresa el volumen de agua que gana o pierde el elemento del acuífero unitario considerado según varía el potencial hidráulico a lo largo del tiempo, por lo que se puede expresar de la siguiente manera:

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right) K = S^* \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.23)$$

Que es la ecuación general del flujo en régimen transitorio (h varia a lo largo del tiempo) en medio homogéneo e isótropo. Si el medio es homogéneo y anisótropo la ecuación general del flujo en régimen transitorio se expresa:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S^* \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.24)$$

Si el medio es heterogéneo y anisótropo es necesario recurrir al tensor de conductividad hidráulica para definir las características de este parámetro en cada punto. Si el régimen es permanente o estacionario, h es constante a lo largo del tiempo. Por la tanto se anula la derivada con respecto al tiempo, quedando la ecuación general de flujo en este caso:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4.25)$$

Resolución de la ecuación general del flujo

La ecuación general de flujo subterráneo es una ecuación diferencial en derivadas parciales de segundo orden que admite infinitas soluciones. Dicho de otro modo puede aplicarse a la inmensa mayoría de los sistemas hidrogeológicos, en concreto a todos aquellos a los que se puede aplicar la Ley de Darcy. La resolución de un problema concreto a partir de la ecuación general del flujo subterráneo exige la definición de las características particulares de ese sistema de flujo subterráneo, conocidas como sus condiciones de contorno, incluyendo su geometría (forma y dimensiones) y su relación con las unidades hidrogeológicas y otros elementos adyacentes.

Existen tres tipos de condiciones de contorno (Reilly, 2001):

Potencial impuesto, condición de contorno de primera clase o de Dirichet. En este tipo de límite el potencial se conserva constante a lo largo del tiempo. Si el potencial es el mismo en todos los puntos del contorno, constituye una línea, una superficie equipotencial. Suele estar asociado a contactos entre el acuífero y masas de agua de importancia: lagos, mares, ríos caudalosos, etc.

Flujo impuesto, condición de contorno de segunda clase o de Neuman. Existe un flujo de agua definido que sale del acuífero o penetra en él. Este flujo puede ser nulo en caso del contacto entre el acuífero y una unidad impermeable.

Flujo condicionado por el valor del potencial hidráulico, condición de contorno de tercera clase o de Cauchy. Se aplica a las entradas y salidas del agua de agua del acuífero a través de capas semiconfinantes que lo separan de otra fuente de recarga externa. El flujo que sale del acuífero o penetra en él depende de la diferencia de potencial entre el acuífero y la fuente externa, de la conductividad hidráulica vertical de acuitardo o capa semiconfinante, de su extensión superficial y de su espesor.

Una vez establecidas las correspondientes condiciones de contorno, la solución de la ecuación general del flujo es única y corresponde al problema que se ha planteado. La resolución de la ecuación general del flujo puede abordarse en tres maneras distintas:

- Gráficamente
- Analíticamente
- Numéricamente

Resolución grafica de la ecuación general de flujo

La solución grafica de la ecuación solo es aplicable en régimen permanente, es conocida con el nombre de método de las redes de flujo.

Red de flujo

La Ley de Darcy permite definir un vector velocidad que es el resultante de todos los vectores velocidad que podrían definirse para cada uno de los poros en la zona considerada. Se llamara línea de corriente a la línea que constantemente es tangente al vector velocidad definido en un medio poroso a partir de la Ley de Darcy, matemáticamente seria la envolvente del vector velocidad. Una trayectoria sería una línea, más o menos tortuosa, que constituiría el lugar geométrico de las sucesivas posiciones de una partícula de agua en su movimiento a través de un medio poroso. Superficies equipotenciales (en sistemas tridimensionales) o líneas equipotenciales (en sistemas uni o bidimensionales), son el lugar geométrico de los puntos que tienen el mismo potencial hidráulico. Se trataría de superficies o líneas en las que el agua subterránea tiene la misma energía en todos sus puntos.

El gradiente hidráulico indica la dirección en la que se produce el máximo cambio de energía entre cada dos equipotenciales. Por lo tanto es perpendicular a las equipotenciales. Como, según la Ley de Darcy, $v = -K i$, el vector velocidad y el vector gradiente son paralelos entre sí, el vector velocidad también será perpendicular a las equipotenciales. Puede concluirse que líneas de corriente y equipotenciales son perpendiculares entre sí. Para ello el medio ha de ser homogéneo e isótropo. En un acuífero homogéneo e isótropo, líneas de corriente y equipotenciales constituyen una malla ortogonal que se llama red de flujo. Será bi o tridimensional de acuerdo con el sistema de flujo. La red de flujo define el movimiento de las aguas subterráneas puesto que las líneas de corriente van en la dirección perpendicular a las equipotenciales y en el sentido de las potenciales decrecientes. Las redes de flujo permiten también el tratamiento cuantitativo del sistema hidrogeológico sin más que aplicar la Ley de Darcy a la malla definida (Martínez et al; 2006).

Se denomina tubo de flujo a la porción del acuífero limitada por una serie de líneas de corriente que pasan por un contorno cerrado. La propiedad esencial de los tubos de flujo es que el caudal que circula por ellos se conserva constante.

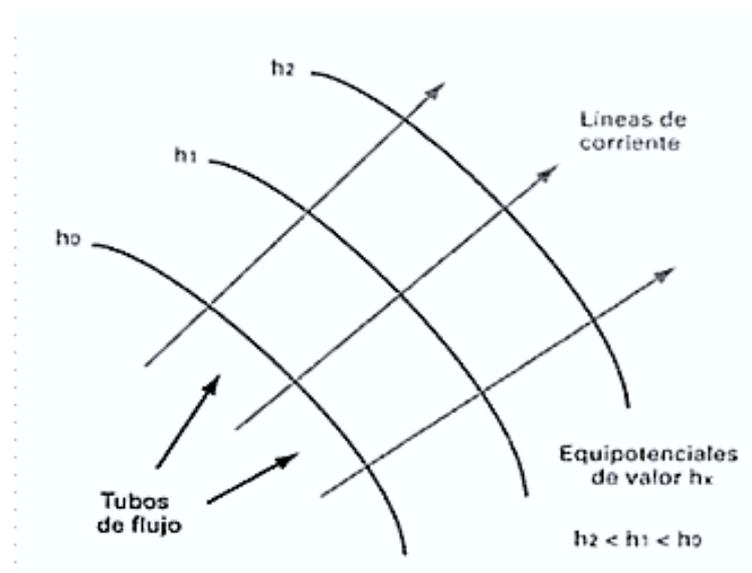


Figura 2. Red de flujo en medio homogéneo e isótropo

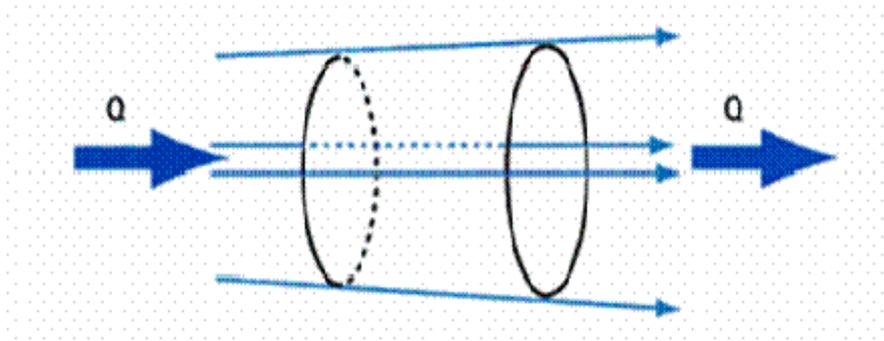


Figura 3. Tubo de flujo. El caudal Q se conserva constante en el interior

El tubo de flujo de la Figura 3 está definido por dos líneas de corriente en un sistema bidimensional homogéneo e isótropo de conductividad hidráulica K y en el que la distribución de energía del agua subterránea en su interior viene definida por las equipotenciales h_1 y h_2 , siendo $h_1 > h_2$.

Aplicando la Ley de Darcy se puede calcular el caudal circulante en la sección intermedia definida entre las dos equipotenciales:

$$Q = (a) (b) (K) \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (4.26)$$

Dónde:

Q es el caudal circulante por el tubo de flujo ($L^3 T^{-1}$)

a es el ancho del tubo de flujo (L)

b es el espesor del tubo de flujo (L)

K es la conductividad hidráulica del medio (LT^{-1})

Δh es la diferencia de potencial hidráulico ($h_1 - h_2$) (L)

Δl es la distancia entre las dos equipotenciales (L).

Este caudal será el mismo en cualquier sección del tubo de flujo perpendicular a las líneas de corriente. Si aumenta la sección disminuye la velocidad de flujo y viceversa, pero el caudal siempre es constante.

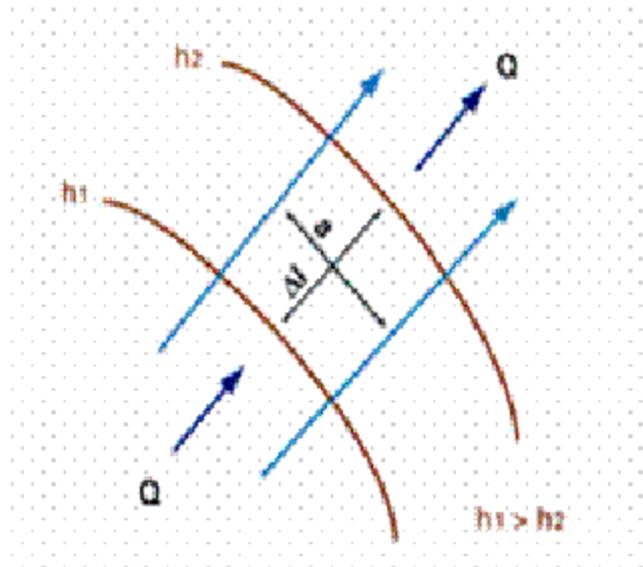


Figura 4. Caudal circulante por un tubo de flujo de espesor unitario

Si se dibuja la red de flujo cuadrada ($a=\Delta l$) quedara:

$$Q = (b) (K) (\Delta h) (L^3 T^{-1}) \quad (4.27)$$

Y para el tubo de flujo de espesor unitario:

$$Q = (K) (\Delta h) (L^3 T^{-1}) \quad (4.28)$$

Se observa que las dimensiones siguen siendo las de un caudal puesto que $b=1$ (L). Por lo tanto se puede decir que en una red de flujo cuadrada y de espesor unitario, el caudal circulante es independiente del tamaño de la malla, y que por todos los tubos de flujo de la red circula el mismo caudal.

Esta propiedad de las redes de flujo cuadradas es muy importante pues facilita en gran medida el tratamiento cuantitativo de la resolución de los problemas hidrológicos (Martínez et al; 2006)

Soluciones analíticas de la ecuación general de flujo

La resolución analítica de la ecuación de flujo es uno de los temas de mayor importancia en la investigación hidrogeológica a partir del trabajo de Darcy (1856). Quizá el primer trabajo que se basa en la Ley de Darcy, para el estudio del movimiento del flujo de agua hacia un pozo perforado en un acuífero libre, sea el de Dupuit (1863). Forchheimer (1886) y Slichter (1899), independientemente, llegan a la ecuación general de flujo para régimen permanente a partir del principio de conservación de la masa y la Ley de Darcy.

Jacob (1940), y posteriormente Cooper (1966), deducen la ecuación general del flujo para régimen transitorio (Martínez et al; 2006)

Establecida la ecuación general de flujo subterráneo para régimen estacionario y no estacionario, los primeros trabajos de investigación en la determinación de soluciones particulares están relacionados con el movimiento del agua subterránea hacia los pozos, captaciones de agua subterráneas por excelencia.

La aplicación de una ecuación matemática al medio natural exige una simplificación importante que implica la aceptación de las siguientes hipótesis de partida:

En cuanto al acuífero:

- Homogeneidad e isotropía en toda su extensión que se supone infinita
- Coeficiente de almacenamiento constante
- Muro horizontal y espesor constante

En cuanto al flujo subterráneo:

- Es válida la Ley de Darcy
- No hay flujo natural, es decir, la superficie piezométrica inicial es un plano horizontal.
- Una vez iniciado el bombeo el flujo es radial y horizontal (convergente hacia el pozo si el caudal es de extracción y divergente desde el pozo si el caudal es de inyección. Esto implica que las superficies equipotenciales sean cilindros verticales concéntricos con el pozo de bombeo.
- No existen pérdidas de energía por rozamiento al penetrar el agua en el pozo.
- El descenso en el infinito es cero.

En cuanto al pozo de bombeo:

- Está ranurado a lo largo de todo el acuífero, al que corta en su totalidad.
- El caudal de bombeo es constante a lo largo del tiempo.

- El pozo considerado es el único que bombea en el acuífero
- El radio del pozo es lo suficientemente pequeño como para poder suponer que el agua almacenada en el pozo no influye en el caudal de bombeo.
- La variación del nivel piezométrico consecuencia del bombeo es simultánea a la extracción (o inyección) de agua y proporcional al volumen extraído.

En cuanto al agua:

- Tiene densidad y viscosidad constantes en el espacio y en el tiempo.

Aceptando estas hipótesis, considerando que el régimen del acuífero puede ser estacionario o no estacionario y las condiciones de contorno propias de acuífero confinado, semiconfinado o libre, se llega para cada caso, a una solución analítica de la ecuación general del flujo, que es la ecuación de la superficie piezométrica en el entorno del pozo para unas determinadas condiciones de bombeo. En el caso de caudales de inyección la formulación es la misma, solo cambia el signo del caudal y pasan los descensos a ser negativos, es decir, se convierten en ascensos sobre el nivel piezométrico inicial.

Resolución de la ecuación general del flujo por métodos numéricos

La posibilidad de resolver la ecuación diferencial del flujo subterráneo mediante métodos numéricos con la ayuda de los ordenadores para abordar la resolución de problemas complejos impulsó desde mediados de la década de los sesenta del siglo pasado, el desarrollo de los modelos digitales de flujo, que han terminado por implantarse como metodología muy útil en el campo de la hidrogeología. Permiten la simulación del flujo subterráneo en una, dos y tres dimensiones, en medios homogéneos, heterogéneos, isótropos y anisótropos, y en la práctica totalidad de las circunstancias que pueden concurrir sobre un sistema hidrogeológico, siempre que sea posible asumir en todo momento la validez de la Ley de Darcy.

Proporcionan la ventaja del estudio de un sistema hidrogeológico complejo en todo su conjunto y no solo desde el punto de vista de un aspecto parcial. Son herramientas imprescindibles en la planificación hídrica puesto que permiten formular hipótesis de actuación sobre el medio hidrogeológico y predecir el impacto de estas actuaciones. También son útiles para la definición de perímetros de protección, para una explotación racional de los recursos hídricos subterráneos y para los estudios de recuperación de acuíferos entre otros.

El fundamento de los modelos digitales de flujo es sustituir el sistema hidrogeológico como medio físico continuo, representado por la ecuación general de flujo y sus correspondientes condiciones de contorno, por otro medio aproximado a él constituido por un número, n , finito de elementos discretos o celdas. A este proceso se le denomina discretización.

La ecuación general del flujo, cuyo sentido físico es un balance de flujo en un dominio continuo para un tiempo determinado, se sustituye por un sistema de n ecuaciones con n incógnitas, una para cada uno de los elementos o celdas definidos, que se resuelve para un intervalo de tiempo determinado. Cuanto mayor sea el grado de discretización, mas aproximada será la solución a la exacta, pero también será mayor el tiempo de cálculo y las necesidades de memoria del ordenador.

El intervalo de tiempo, o tiempo de simulación, puede discretizarse también en varios pasos de tiempo, iguales o diferentes entre sí. En este caso la distribución del potencial hidráulico calculada para un paso de tiempo determinado se utiliza como inicial para el paso de tiempo siguiente. Si se solicita al modelo que proporcione resultados (potenciales hidráulicos) al final de cada paso de tiempo, será posible analizar cuál ha sido la evolución de los potenciales hidráulicos a lo largo del tiempo de simulación.

La elaboración de un modelo digital del flujo exige definir la zona a modelar y sus condiciones de contorno de acuerdo con los objetivos del estudio. También exige conocer la distribución de parámetros hidrogeológicos, recarga y

acciones sobre el sistema para cada uno de los pasos de tiempo que constituyen el tiempo de simulación. La resolución de la ecuación general de flujo mediante cálculo numérico puede abordarse por varios métodos. Los más conocidos son el método de los elementos finitos y de las diferencias finitas.

En el método de elementos finitos, la distribución de potenciales se obtiene por el método de integración. Una vez aproximado el medio físico continuo mediante un número finito de puntos o nodos, se procede a unir cada uno de ellos con sus adyacentes, resultando la discretización del modelo conceptual en una serie de elementos finitos de tamaño y forma variables. Generalmente se utiliza la forma triangular. Dentro de cada elemento el potencial hidráulico, h^* , en cualquiera de sus puntos, se obtiene por interpolación a partir del potencial h_i en los nudos que constituyen los vértices del elemento, utilizando una serie de funciones base que ponderan la influencia del potencial de cada nudo sobre el del punto considerado en el interior de elemento.

$$h^* = \sum_{i=1}^n \Phi_i h_i \quad (4.29)$$

Donde:

h^* es el potencial hidráulico en un punto del elemento considerado

n es el número de vértices (nodos) de ese elemento

h_i es el potencial hidráulico en el nodo i

Φ_i es la función de interpolación correspondiente al nodo i .

Tanto h^* como h_i son desconocidos, pero h^* ha de satisfacer la ecuación general del flujo, y por lo tanto ha de cumplirse, por ejemplo, para el caso más sencillo de flujo unidireccional:

$$T \frac{\partial^2 h^*}{\partial x^2} - S \frac{\partial h^*}{\partial t} = \varepsilon \quad (4.30)$$

La diferencia no es cero al ser h^* un valor aproximado a la solución exacta. A "ε" se le llama residual. Sustituyendo h^* por su valor se tiene:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i h_i \quad (4.31)$$

Quedando la ecuación general de flujo en función del potencial en los nodos de cada elemento, también desconocido. Como se sabe para un punto en concreto, el residual será normalmente distinto de cero, pero puede forzarse a que el promedio de los residuales sobre todo el dominio considerado sea cero. Esto se hace mediante el método llamado de los residuales ponderados.

Este método implica una ecuación para cada nodo en el dominio, cuya incógnita es el valor del potencial hidráulico en el nodo. En total se obtiene un sistema de n ecuaciones con n incógnitas que se resuelve con la ayuda de un ordenador, para cada paso de tiempo. Conocido el valor del potencial hidráulico en los nudos, mediante las funciones base se puede obtener en cualquier punto del dominio. Por lo tanto la distribución del potencial hidráulico proporcionada por el método de los elementos finitos es una superficie continua.

La resolución de la ecuación general del flujo mediante el método de las diferencias finitas exige sustituir los infinitos puntos que constituyen el sistema hidrogeológico, reflejado en el modelo conceptual de flujo, por un número finito de puntos o nodos regularmente espaciados. Cada nodo es el centro de un bloque rectangular o cuadrado, llamado celda, en que se supone que las propiedades del acuífero no varían. Así el medio físico queda discretizado en un conjunto de celdas de dimensiones conocidas (Davies y De Weist, 1971)

El método consiste en sustituir las derivadas parciales de la ecuación general de flujo por unos incrementos finitos para cada uno de los nodos de cada una de las celdas en que se ha discretizado el medio físico. Por ejemplo en el esquema definido en la Figura 5 para el nodo E la ecuación general para flujo bidimensional es:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x b \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y b \frac{\partial h}{\partial y}) = S \frac{\partial h}{\partial t} + W (x, y, t) \quad (4.32)$$

A	B	C
D	E	F
G	H	I

Figura 5. Malla de celdas en diferencias finitas

Pasando las derivadas a incrementos finitos se tendría que para un intervalo de tiempo Δt que comprende desde el final del intervalo de tiempo anterior (k-1) hasta el final del intervalo presente k:

$$\frac{1}{\Delta x E} \left((K_{EF} b \frac{h_{F,K} - h_{E,K}}{\Delta X_{EF}}) - (K_{ED} b \frac{h_{E,K} - h_{D,K}}{\Delta X_{ED}}) \right) + \frac{1}{\Delta y E} \left((K_{EH} b \frac{h_{H,K} - h_{E,K}}{\Delta X_{EH}}) - (K_{EB} b \frac{h_{E,K} - h_{B,K}}{\Delta X_{EB}}) \right) = \frac{SE}{\Delta t} (h_{E,K} - h_{E(k-1)}) + W_{E,K} \quad (4.33)$$

Si esto se hace para cada uno de los n nodos de las celdas en las que se ha discretizado el acuífero, se tiene un sistema de n ecuaciones con n incógnitas (el potencial hidráulico en cada uno de los nodos de la malla) que se resuelve con la ayuda de un ordenador, para cada uno de los k intervalos de tiempo considerados. El resultado es la evolución del potencial hidráulico en el acuífero durante el intervalo de tiempo considerado. Cada una de las ecuaciones que constituyen el sistema representa el balance hidráulico en cada una de las celdas representadas por sus "n" nodos y para el paso de tiempo considerado.

Tanto las diferencias finitas como los elementos finitos proporcionan soluciones a los problemas que se plantean con un grado de fiabilidad muy parecido. En la gran mayoría de las ocasiones la mayor fiabilidad de un modelo de flujo subterráneo no depende del modelo matemático escogido, sino del grado de

fiabilidad del modelo hidrogeológico conceptual definido y del criterio hidrogeológico con el que se han manejado los reales disponibles.

El método de elementos finitos permite adaptar la malla con precisión al contorno de la zona a simular y a la litoestratigrafía del sistema. Su refinamiento se puede limitar a las zonas concretas en que se estime necesario. Los valores calculados para el potencial hidráulico son puntuales puesto que la distribución del potencial calculado es una superficie continua. Los pozos se asocian a nodos de malla, o a sucesiones de nodos en la vertical en el caso de los modelos tridimensionales. Las fallas pueden simularse como planos verticales; la malla puede deformarse automáticamente para adaptarse a las oscilaciones de la superficie freática, también puede adaptarse a cualquier dirección que pueda tener la conductividad hidráulica y simular así, con precisión, el efecto de anisotropía.

En el otro plano de la balanza se tiene que considerar que se trata de un método matemático complejo que solo es conservativo con respecto a la masa si se considera el sistema simulado globalmente, y que existe muy poco software disponible a nivel de hidrogeólogo usuario.

En lo que se refiere a las diferencias finitas se trata de un método conceptualmente más sencillo puesto que en esencia está basado en la realización de un balance de caudales en cada una de las celdas en las que se ha discretizado el sistema. Debido a esto es conservativo en cualquier zona del sistema. Por otro lado se tiene que es un método que exige una distribución regular de nodos con celdas asociadas a ellos, ya sean cuadradas o rectangulares. Es posible refinar la malla, pero afectando a todas las filas y columnas que intervienen en el refinamiento, en toda su extensión. Los valores de potencial calculados son constantes para toda la celda a la que corresponden. No es posible obtener, por lo tanto, descensos puntuales para los pozos de bombeo. La recuperación de la actividad de una celda, una vez que ha quedado seca como consecuencia de los procesos hidrogeológicos, plantea serios problemas de convergencia en los modelos numéricos de resolución (Davies y De Weist, 1971)

Los ríos y demás elementos de carácter lineal deben representarse como sucesiones de celdas y no de nodos, como en el caso de los elementos finitos. Las fallas y barreras verticales solo pueden simularse como planos verticales si coinciden con los ejes de la malla. Si no es así, han de ser discretizadas siguiendo las direcciones de las caras de las celdas afectadas por ellas.

4.1 Sobre explotación de acuíferos en México

La sobreexplotación de las aguas subterráneas es un problema que ha ido en aumento en forma proporcional con el aumento exponencial de la población y sus consecuentes necesidades del recurso hídrico para usos y servicios, en el caso específico del país los acuíferos con mayor estrés, se encuentran en el norte y centro del país, como se observa en la Figura 6; y que coincide con las grandes concentraciones urbanas; sin embargo el sector más demandante de las aguas subterráneas es la agricultura, el uso urbano y la industria. En el caso de los acuíferos del Valle de México todos se encuentran en desequilibrio en su relación extracción-recarga en mayor o menor medida, el Cuautitlán-Pachuca presentaba en el año 2003 una extracción de 483 Hm³/año y una recarga de 203 Hm³/año; mientras que en el 2009 la extracción fue de 751 Hm³ y una recarga de 357 Hm³/año, como se observa en la Figura 7.

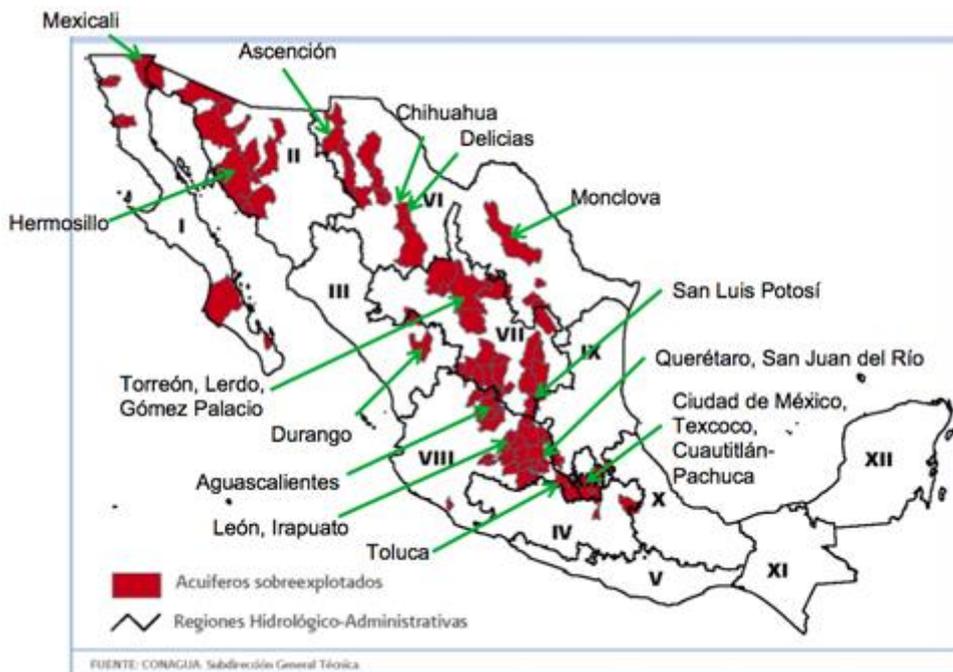


Figura 6. Acuíferos sobreexplotados por Región Hidrológico-Administrativa, (EAM, 2011)

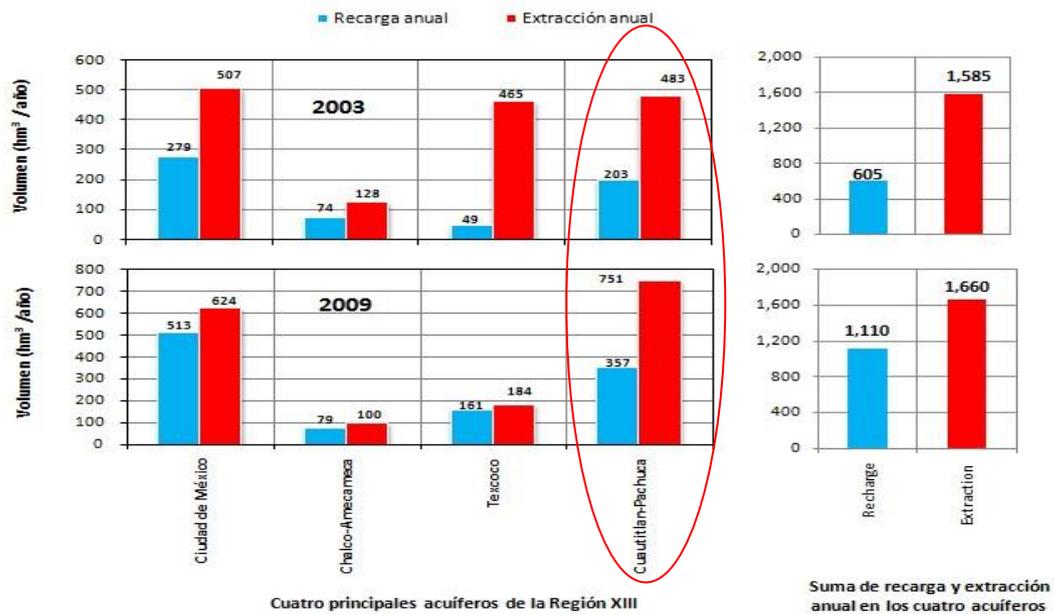


Figura 7. Relación extracción-recarga en los acuíferos del valle de México

4.2 Modelos de simulación de acuíferos

La modelación de un sistema hídrico subterráneo permite determinar la evolución de los niveles de agua subterránea, medir las velocidades de flujo en el acuífero y puede explicar el movimiento de un fluido en un medio poroso saturado.

Para poder llevar a cabo dicha simulación existen softwares como el Visual MODFLOW, que permite modelar el flujo del agua subterránea en tres dimensiones en una cuenca hidrogeológica; el cual fue desarrollado por McDonald y Harbaugh pertenecientes al U.S. Geological Survey (1988). Utiliza el método de diferencias finitas para resolver un sistema de ecuaciones basadas en fórmula de Darcy-Weisback. Es uno de los modelos más utilizados y reconocidos internacionalmente en el área de la hidrogeología para la simulación de flujo subterráneo.

El MODFLOW es un modelo multicapa que permite realizar una modelización tridimensional del flujo de aguas subterráneas en medios porosos saturados. El programa desarrollado inicialmente por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, *United States Geological Survey*) admite la definición

geométrica e hidrogeológica de un sistema tridimensional multicapa sometido a una serie de acciones exteriores de carácter natural o antrópico.

Presenta diferentes variantes atendiendo a los procesadores utilizados (PMWIN, Visual Modflow). Se divide en una serie de componentes llamados "paquetes." Cada paquete realiza una tarea específica. Algunos de estos paquetes son necesarios para realizar una simulación específica y otros pueden ser opcionales. La entrada para cada paquete se contiene en un archivo separado del texto. Además, como este programa tiene una concepción modular, facilita la adición de módulos complementarios desarrollados por terceras partes que dan respuesta a situaciones progresivamente más ambiciosas.

El software permite hacer modelos del flujo subterráneo tanto en régimen transitorio como estacionario, teniendo en éste último que identificar para el sistema los diferentes periodos de explotación en los que se produzcan variaciones de alguna de las condiciones del sistema. Asimismo permite unas condiciones de contorno para el área de estudio muy variadas y múltiples opciones de entrada.

El MODFLOW permite discretizar un acuífero mediante una malla rectangular irregular centrada en el bloque. A cada una de las mallas que constituyen el modelo se le asignan sus características hidrogeológicas (transmisividad, coeficiente de almacenamiento, porosidad, etc.). Una vez definida la geometría del modelo y sus características hidrogeológicas, se incorporan las acciones externas que pueden estar constituidas tanto por acciones naturales (por ejemplo, infiltración de agua de lluvia, evapotranspiración, conexiones río-acuífero, etc.) como por acciones antrópicas (por ejemplo, explotación de campos de pozos, retorno de agua de riego, recarga artificial, etc.). El modelo permite incorporar comportamientos que reproducen la totalidad de situaciones que se pueden encontrar en un sistema hidrogeológico: pozos, drenes, ríos, embalses, fenómenos de evapotranspiración, áreas de recarga y por intermedio de ellos se pueden hacer modelos de otros comportamientos no contemplados explícitamente

como por ejemplo la simulación de zonas de descarga por intermedio de una batería de drenes, o intercambios regionales con otros acuíferos a través de baterías de pozos.

Tras introducir los datos al modelo y seleccionar el método de cálculo, basado en las diferencias finitas, el programa ofrece como resultados los valores de la piezometría en todas y cada una de las celdas del modelo, capas y períodos de explotación establecidos.

El programa ofrece salidas alfanuméricas y gráficas (dibujo de isopiezas e isodescensos, evolución temporal de la piezometría en puntos señalados del modelo). En cuanto a la modelización del flujo en *la zona no saturada*, que tanta transcendencia tiene desde el punto de vista de la contaminación por actividades agrícolas, la aproximación más frecuente suele consistir en la determinación de lo que se podría llamar "conductividad hidráulica equivalente de *la zona no saturada*", que permite hacer una generalización de la Ley de Darcy a este medio. Normalmente, este procedimiento se basa en la incorporación al modelo de la metodología de estudio de la zona no saturada desarrollada por autores como Brooks y Corey o Van Genuchten, que permiten relacionar el flujo con el contenido de humedad del medio en un instante dado.

El flujo en *la zona no saturada* tiene una importancia grande desde el punto de vista agrícola, al desarrollarse en ella procesos físicos, químicos y biológicos de gran transcendencia en relación con fuentes de contaminación de origen agrario. En esta zona las posibilidades de modelización se complican al ser habitual la presencia de un flujo en multifásico: junto con el agua coexisten otros fluidos como el aire, gases disueltos de distinta procedencia, etc. Las aproximaciones actuales a este problema suelen pasar por simplificar el sistema considerándolo bifásico, constituido por agua y por aire, esencialmente (McDonald y Harbaugh, 1988).

4.2.1 Derivación de la ecuación de diferencias finitas

Modelo matemático

El flujo de agua de densidad constante en tres dimensiones en un medio poroso cualquiera cumple la ley de Darcy, y puede ser descrita por la ecuación en derivadas parciales:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.34)$$

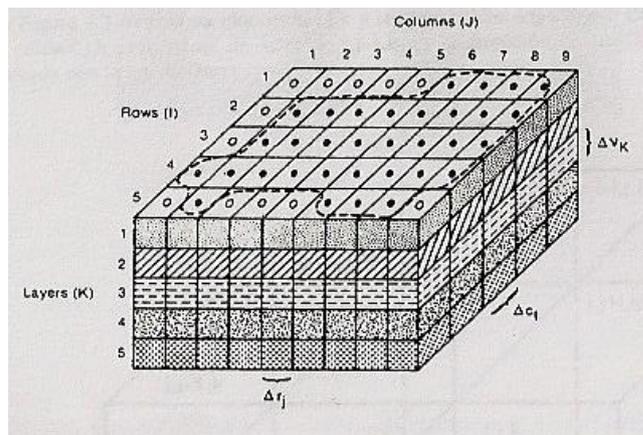
Dónde: x, y, z son las coordenadas cartesianas ortonormales alineadas a lo largo de las direcciones principales del tensor de conductividad hidráulica K_{ij} ;
 H es el potencial hidráulico por unidad de peso ($z+p/\gamma+v^2/2g$ expresado en metros, L);
 W es el término de fuente: volumen de agua por unidad de tiempo inyectado/extraído por unidad de volumen de acuífero en el punto (x,y,z) (T^{-1}); S_s es el coeficiente de almacenamiento específico del medio (L^{-1}); y t es el tiempo (T).

En general $S_s, K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$, pueden ser funciones del espacio: (x,y,z) y h y W del espacio del tiempo $(x, y, z; t)$ con lo que la ecuación anterior describe el flujo saturado en un medio poroso heterogéneo y anisótropo en régimen transitorio. La ecuación (4.34) junto con unas condiciones iniciales y de contorno, constituyen el modelo matemático del flujo subterráneo. La solución en sentido analítico es una función $h(x,y,z;t)$ cuyas derivadas satisfacen la ecuación anterior y verifican las condiciones de contorno e iniciales. Una vez conocido h puede obtenerse toda la información necesaria: velocidades de flujo, variación en el almacenamiento, caudales que atraviesan cualquier superficie, etc. Excepto en casos muy simples no existen soluciones analíticas de esta ecuación. En consecuencia se han de usar otros métodos. Entre ellos se encuentran los métodos numéricos de diversos tipos, uno de los cuales es el método de diferencias finitas. En esencia consiste en la sustitución del sistema continuo por un conjunto finito y discreto de puntos en el espacio, en el tiempo y de las derivadas parciales por diferencias de valores de la función h en dichos puntos. El proceso lleva a un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales

simultáneas. Su solución da como resultado el valor del potencial en los puntos especificados en los instantes de tiempo elegidos. Estos valores constituyen una aproximación a la distribución continua de valores en el tiempo que daría una solución analítica de la ecuación diferencial. La ecuación en diferencias finitas correspondiente a la ecuación (5.34) puede ser obtenida mediante las reglas del cálculo diferencial pero se obtiene también mediante conceptos físicos simples, que es el criterio a continuación descrito.

4.2.2 Discretización

En la Figura 8 puede verse la discretización espacial de un acuífero en una malla de puntos que se denominan nodos, formando filas, columnas y capas; se designaran con i, j, k al elemento genérico. En un sistema con "rows" filas, "columns" columnas y "layers" capas, i es el índice de fila, $i=1,2,\dots, nrow$; j el de columna, $j=1, 2,\dots, ncol$; y k el de capa, $k=1,2,\dots, nlay$. Por ejemplo la Figura 8 muestra un sistema con 5 filas, 9 columnas y 5 capas. El origen del sistema (1,1,1) es la esquina superior izquierda de la capa de arriba. Con respecto a un sistema cartesiano de referencia, los nodos a lo largo de fila son paralelos al eje x , a lo largo de una columna son paralelos al eje y , y a lo largo de una vertical paralelos al eje z .



- Frontera del acuífero
- Celda activa
- ° Celda inactiva
- Δr_j Dimensión de la celda en dirección de la fila. Subscrito (J) indicando el número en la columna
- Δc_l Dimensión de la celda en dirección de la columna. Subscrito (l) indicando el número en la fila
- Δv_k Dimensión de la celda en dirección de la vertical. Subscrito (K) indicando el número de capa.

Figura 8. Esquema de discretización de un sistema acuífero hipotético

Conceptualmente los nodos representan un prisma de medio poroso, llamados celdas, en las cuales las propiedades hidráulicas son constantes, por lo que cualquier valor asociado a un nodo se aplica o se distribuye sobre toda la extensión de esa celda.

La Figura 9 muestra dos métodos diferentes para realizar la discretización en diferencias finitas, según la posición relativa de los nodos: la formulación centrada en el bloque y la formulación centrada en los puntos. Ambos sistemas comienzan dividiendo el acuífero con dos conjuntos de líneas paralelas perpendiculares entre sí, en dos dimensiones.

En la formulación centrada en el bloque, los bloques formados por el conjunto de líneas paralelas son las celdas y los nodos corresponden a los centros de las mismas. En la formulación centrada en los puntos, los nodos están en las intersecciones de las líneas paralelas, y las celdas se dibujan alrededor de los nodos, a mitad de camino entre los nodos.

En ambos casos, el espaciamiento de los nodos debe ser tal que las propiedades hidráulicas de los nodos del sistema sean uniformes en la extensión de cada celda. El desarrollo de la formulación en diferencias finitas es común para los dos métodos, pero en el MODFLOW está implementada solo la formulación centrada en bloque.

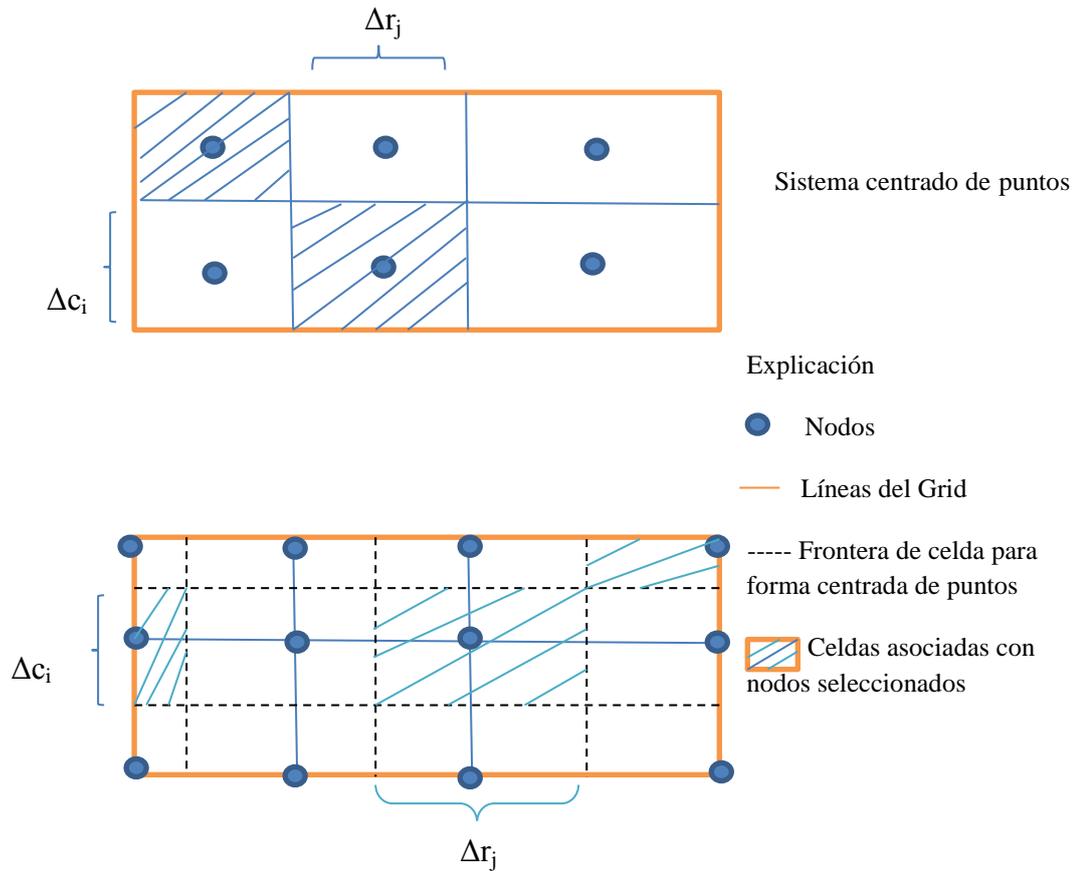


Figura 9. Diferencias entre aproximación centrada en el bloque y en el punto

4.2.3 Ecuaciones en diferencias finitas

El desarrollo de la ecuación de flujo en diferencias finitas resulta de aplicar la ecuación de continuidad a una celda: la suma de todos los flujos que entran y salen de la celda debe ser igual al cambio en el almacenamiento. Suponiendo que la densidad del agua subterránea es constante, la ecuación de continuidad que expresa el balance de flujos en una celda es:

$$\Sigma Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (4.35)$$

Dónde:

Q_i es el caudal que entra en la celda por una cara ($L^3 T^{-1}$)

S_s es el coeficiente de almacenamiento específico del medio (L^{-1})

ΔV es el volumen de la celda (L^3); y

Δh es la variación en el potencial por unidad de peso en el intervalo de tiempo Δt (L).

El término de la derecha es el volumen almacenado en la celda en el intervalo de tiempo Δt si h varía en un Δh . En esta ecuación el convenio de signos ha sido caudal entrante y ganancia en el almacenamiento como positivos. Los efectos contrarios se tomarían con signo negativo. La Figura 10 representa una celda i, j, k y las seis celdas adyacentes. El caudal que entra en la celda i, j, k procedente de la celda $i, j-1, k$ en la dirección de las filas, vendrá dada, de acuerdo con la ley de Darcy, por:

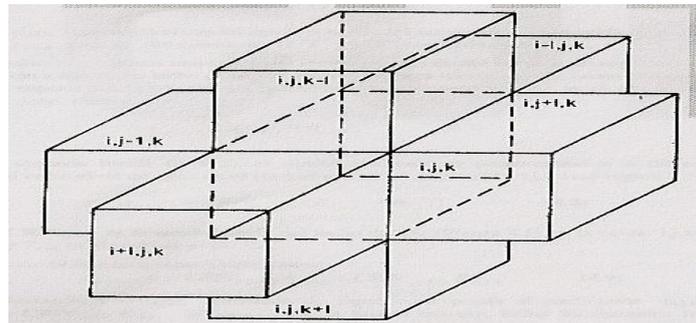


Figura 10. Notación para las celdas

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j,1/2}} \quad (4.36)$$

Dónde:

$Q_{i,j-1/2,k}$ es el caudal que atraviesa la cara de separación entre las celdas $i, j-1, k$ y la i, j, k ($L^3 T^{-1}$).

$KR_{i,j-1/2,k}$ es la conductividad hidráulica a lo largo de la fila entre los nodos $i, j-1, k$ y el i, j, k (LT^{-1});

$\Delta c_i \Delta v_k$ es la sección de la celda i, j, k normal a la dirección del flujo (dirección x , de las filas); y

$\Delta r_{i,j-1/2,k}$ es la distancia entre los nodos $i, j-1, k$ y el i, j, k (L).

El índice $j-1/2$ se usa para indicar el espacio entre nodos (Figura 11) no para indicar un punto exactamente a mitad del camino entre los nodos. Por ejemplo, $KR_{i,j-1/2,k}$ representa la conductividad hidráulica en toda la región existente entre los nodos $i, j-1, k$ y el i, j, k .

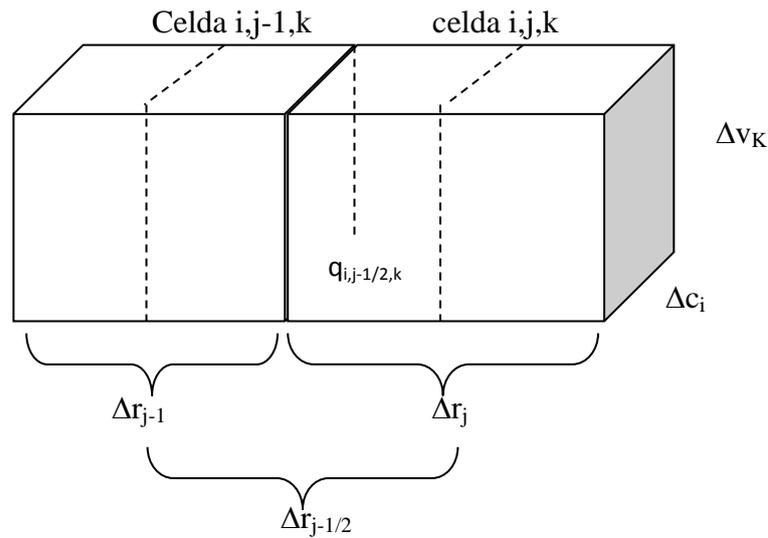


Figura 11. Flujo desde la celda $i,j-1,k$ hacia la celda i,j,k

Expresiones similares pueden escribirse para los restantes cinco nodos que rodean el i, j, k ; en estas expresiones las dimensiones de la malla y la conductividad hidráulica permanecen constantes a lo largo de la simulación, por lo que el desarrollo de expresiones y su cálculo pueden simplificarse mediante el uso de otra constante denominada conductancia hidráulica, que es básico en todo este proceso y se usa extensamente para muchas situaciones. Se podría definir como la constante de proporcionalidad que existe entre el efecto (el caudal que circula por un prisma de terreno entre las dos secciones que pasan por los nodos $i, j-1,k$ y el i, j, k) y su causa (diferencia de potencial entre dichos nodos):

$$CR_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k / \Delta r_{j-1/2} \quad (4.37)$$

Dónde:

$CR_{i,j-1/2,k}$ es la conductancia en la fila i , capa k entre los nodos $i,j-1,k$ y el i, j, k ($L^2 T^{-1}$)

La conductancia de un prisma de medio permeable es el producto de la conductividad hidráulica por la sección transversal dividida por la longitud del camino recorrido por el flujo, en este caso, la distancia entre los nodos. Sustituyendo esta expresión en la ecuación (5.36), da:

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad (4.38)$$

Y expresiones similares para las otras cinco direcciones que unen el nodo i,j,k con los que lo rodean.

La ecuación (4.38) y sus análogas contabilizan el flujo que entra en la celda i, j, k procedente de las seis que la rodean. Para tener en cuenta los flujos que entran en la celda desde fuera del acuífero, tal como filtración a través del lecho de un río, evapotranspiración o pozos, se requieren términos adicionales. Algunos de estos flujos pueden depender del potencial en la celda que recibe el flujo pero independientes de los demás potenciales en el acuífero o pueden ser totalmente independientes del potencial en el nodo. El flujo desde fuera del acuífero puede ser representado por la expresión:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad (4.39)$$

Dónde:

$a_{i,j,k,n}$ representa el caudal desde la n ésima fuente externa a la celda i,j,k ($L^3 T^{-1}$); $p_{i,j,k,n}$ y $q_{i,j,k,n}$ son constantes ($L^2 T^{-1}$ y $L^3 T^{-1}$ respectivamente).

Por ejemplo, si se supone una celda que recibe cargas de dos fuentes de recarga, es decir, desde un pozo e infiltra a través del lecho de un río. Para la primera fuente ($n=1$), como el flujo desde el pozo se supone independiente del potencial, $p_{i,j,k,1}$ es cero y $q_{i,j,k,1}$ es el caudal recargado desde el pozo. En este caso:

$$a_{i,j,k,1} = q_{i,j,k,1} \quad (4.40)$$

Para la segunda fuente ($n=2$), el caudal infiltrado es proporcional a la diferencia de potencial entre el nivel de agua en el río y el potencial en la celda i,j,k (ver Figura 12) por lo que:

$$a_{i,j,k,2} = CRIV_{i,j,k,2} (R_{i,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (4.41)$$

Dónde:

$CRIV_{i,j,k,2}$ es la conductancia del lecho del río (Figura 12) en la celda i,j,k ($L^2 T^{-1}$) y $R_{i,j,k}$ es el nivel del río (L)

La ecuación (4.41) puede reescribirse como:

$$a_{i,j,k,2} = - CRIV_{i,j,k,2} h_{i,j,k} + CRIV_{i,j,k,2} R_{i,j,k} \quad (4.42)$$

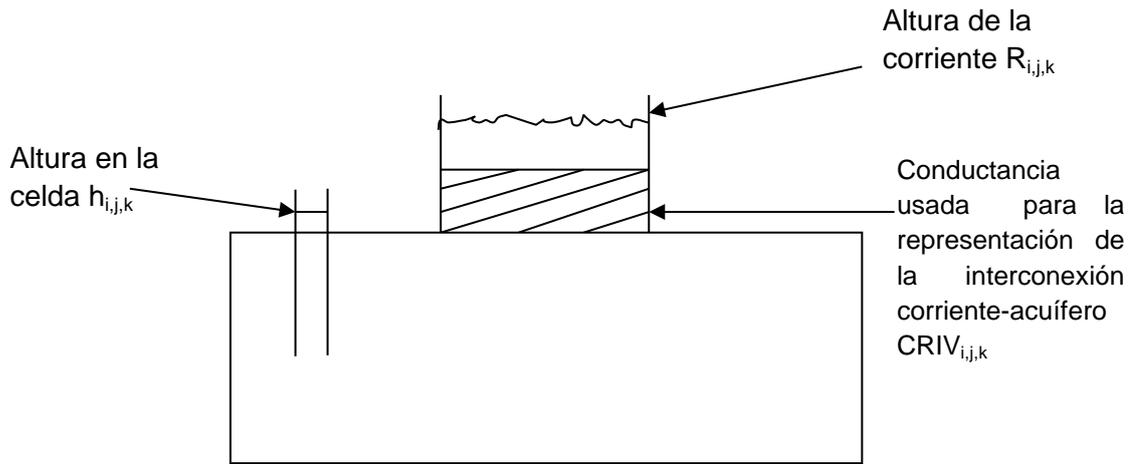


Figura 12. Representación de la filtración a través del lecho de un río

La conductancia $CRIV_{i,j,k,2}$ cambiada de signo corresponde al coeficiente $p_{i,j,k,2}$ y el producto $CRIV_{i,j,k,2} R_{i,j,k}$ al $q_{i,j,k,2}$. De la misma manera, todas las restantes fuentes externas pueden representarse por una expresión de la forma de la ecuación (4.39). En general, si hay N fuentes externas afectando a una celda, el caudal resultante puede ser expresado por:

$$QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad (4.43)$$

Definiendo $P_{i,j,k}$ y $Q_{i,j,k}$ por las expresiones se tiene que:

$$P_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} \quad ; \quad Q_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad (4.44)$$

El termino general de caudales externos para la celda i,j,k queda:

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k,n} \quad (4.45)$$

La ecuación de continuidad (4.2) incluyendo caudales entre el nodo i,j,k y los seis adyacentes así como el caudal externo QS lleva a :

$$q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \quad (4.46)$$

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}\right) = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (4.48)$$

Así pues la pendiente del hidrograma, o derivada respecto al tiempo, se aproxima usando el cambio del potencial en el nodo en el intervalo de tiempo que le precede, y termina con el tiempo en que se calculan los caudales. Este procedimiento se conoce como aproximación “diferencia hacia atrás”, en la que $\Delta h/\Delta t$ se calcula sobre un intervalo de tiempo que se extiende hacia atrás desde t_m . Este procedimiento es siempre numéricamente estable, es decir, errores introducidos en cualquier tiempo, disminuyen progresivamente en tiempos posteriores. Por esta razón se utiliza esta aproximación, aunque dé lugar a sistemas de ecuaciones más grandes que deben resolverse simultáneamente para cada instante en que se calculen los potenciales.

La ecuación (4.47) puede describirse en forma de diferencias hacia atrás especificando los términos de flujo a t_m , final del intervalo de tiempo y aproximando la derivada del potencial respecto al tiempo sobre el intervalo t_m a t_{m-1} ; es decir:

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = \\ & SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \end{aligned} \quad (4.49)$$

En esta ecuación el potencial al comienzo del paso de tiempo $h_{i,j,k}^m$ y todas las conductancias y coeficientes relativos al nodo i,j,k son conocidos. Los siete valores del potencial en el instante t_m , al final del paso de tiempo, son incógnitas; es decir, forman parte de la distribución de potencial que se pretende predecir. Así pues la ecuación (4.49) no se puede resolver independientemente ya que representa una sola ecuación con siete incógnitas. Sin embargo se puede escribir una ecuación de este tipo para cada una de las “n” celdas del sistema, con lo que nos queda una sola incógnita por celda, resultando en conjunto un sistema de “n” ecuaciones con “n” incógnitas que puede resolverse simultáneamente.

El objetivo de la simulación en régimen transitorio es predecir la distribución de potencial en sucesivos instantes de tiempo dada la distribución inicial y las condiciones de contorno. La distribución inicial consiste en un valor de $h_{i,j,k}^1$ en cada punto de la malla en el tiempo t_1 , el comienzo del primer intervalo de tiempo en que el eje de tiempos se divide en el proceso de cálculo en diferencias finitas. El primer paso en el proceso es calcular los valores de $h_{i,j,k}^2$, es decir, los potenciales hidráulicos en el tiempo t_2 que marca el final del primer paso de tiempo. En la ecuación (5.49) el subíndice m se tomó como 2 mientras que el subíndice $m-1$ corresponde al 1. Se resuelve el sistema de ecuaciones y se obtienen los valores de $h_{i,j,k}^2$. Se repite el proceso para obtener los valores al tiempo t_3 , final del segundo intervalo de tiempo, y así sucesivamente. El proceso continua con tantos intervalos como sea necesario hasta que se completa el periodo de interés. Es importante resaltar que el conjunto de ecuaciones en diferencias finitas se reformula en cada paso de tiempo, es decir, en cada paso de tiempo se resuelve un nuevo sistema de ecuaciones simultaneas (Davies y De Weist, 1971).

4.2.4 Método iterativo

La solución del sistema de ecuaciones simultáneas que hay que resolver en cada paso de tiempo podría obtenerse mediante métodos algebraicos, por ejemplo mediante algún procedimiento de eliminación de variables. Esto daría una solución “exacta” del conjunto de ecuaciones en diferencias finitas, en el sentido de que el único factor que limitaría la precisión de los resultados sería el número de cifras significativas con que se calcularan los potenciales. Aunque dicho procedimiento se usa a veces, los problemas numéricos asociados a su uso, cuando el número de ecuaciones es grande, lo hace menos deseable que los procedimientos iterativos.

Un método iterativo comienza con una solución inicial de prueba. Se inicia entonces con un procedimiento de cálculo que usa la solución de prueba para obtener una solución provisional que satisfaga el sistema de ecuaciones en diferencias finitas de forma más aproximada. La solución provisional se usa entonces como solución de prueba y se repite el proceso. Cada repetición se

denomina una iteración. El proceso se repite hasta que cierra, es decir, hasta que las soluciones de prueba y provisional son casi iguales.

La solución provisional y la solución de prueba se dice que son casi iguales si, en cada nodo la diferencia entre el valor de potencial de prueba y el provisional es menor que un valor arbitrario previamente establecido, normalmente denominado criterio de cierre. La solución provisional así obtenida se considera entonces como una buena aproximación a la solución del sistema de ecuaciones. Así pues, durante cada paso de tiempo se va generando una sucesión de matrices de valores de potencial, que contienen un valor de potencial provisional para cada nodo. Para cada paso de tiempo, los valores de potencial $h^{m-1}_{i,j,k}$ (los valores obtenidos al final del paso de tiempo anterior) se usan en el cálculo del término de almacenamiento y aparecen en las ecuaciones como constantes; así pues, retienen el mismo valor en las sucesivas iteraciones y no se modifican en el proceso. Cuando se completa el proceso iterativo para un paso de tiempo, se inicia el cálculo del paso siguiente y los valores calculados se utilizan como valores fijos para el cálculo del término de almacenamiento en el siguiente paso.

El proceso iterativo lleva solo a una aproximación a la solución del sistema de ecuaciones en diferencias finitas en cada paso de tiempo; la precisión de esta aproximación depende del criterio de error utilizado. Sin embargo, es importante hacer notar que, incluso si se obtuviera la solución exacta del sistema de ecuaciones, estas soluciones exactas serían solo una aproximación a la solución de la ecuación diferencial del flujo en medios permeables (ecuación 5.1). La diferencia entre el valor de potencial dado por la solución del sistema de ecuaciones en diferencias finitas para un nodo dado y en un instante dado, $h^m_{i,j,k}$ y el potencial $h(x_i, y_j, z_k, t_m)$ que resultaría de la solución formal de la ecuación diferencial para el correspondiente punto y tiempo, se denomina error de truncado. Por último conviene decir que, aunque se pueda obtener la solución analítica de la ecuación diferencial, sería solo una aproximación a las condiciones en el campo, en que la conductividad y coeficiente de almacenamiento específico son conocidos con precisión rara

vez, y las incertidumbres respecto de las condiciones hidrológicas en los bordes están generalmente presentes.

4.2.5 Formulación de las ecuaciones para su resolución

En resumen, el flujo puede ser simulado escribiendo la expresión de la ecuación de continuidad para cada celda (ecuación 4.49) y resolviendo el sistema de ecuaciones lineales resultante. El programa MODFLOW incorpora inicialmente dos métodos numéricos diferentes de resolución y está organizado para incorporar nuevos métodos en el futuro sin afectar la organización de la estructura del programa. Por ello es conveniente reagrupar la ecuación anterior de forma que todos los términos que contienen el potencial al final del paso de tiempo (las incógnitas) estén agrupados a la izquierda de la ecuación y los términos independientes en la derecha. La ecuación resultante es:

$$CV_{i,j,k-1/2} h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-1/2,j,k} h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-1/2,k} h_{i,j-1,k}^m + (-CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} - CR_{i,j-1/2,k} - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k}) h_{i,j,k}^m + CR_{i,j+1,k} h_{i,j+1,k}^m + CV_{i,j,k+1/2} h_{i,j,k+1}^m = RHS_{i,j,k} \quad (4.50)$$

Dónde:

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - SC1_{i,j,k} / (t_m - t_{m-1})$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - SC1_{i,j,k} h_{i,j,k}^{m-1} / (t_m - t_{m-1}); \text{ y}$$

$$SC1_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

La ecuación (4.50) es la ecuación en diferencias finitas que se utiliza para desarrollar el sistema de ecuaciones lineales con las que se calcula el potencial hidráulico por unidad de peso y es la base del modelo de flujo de agua subterránea. Incluye una ecuación por cada celda de potencial variable en la malla y puede ser escrito en forma matricial como:

$$[A] \{h\} = \{q\} \quad (4.51)$$

Donde [A] es la matriz de coeficientes del potencial del lado izquierdo de la ecuación (4.50), para todos los nodos activos de la malla; {h} es el vector de valores del potencial al final del paso del tiempo m para todos los nodos en la malla; y {q} es el vector de términos independientes del sistema, RHS, para

todos los nodos en la malla. El programa ensambla el vector $\{q\}$ y los términos incluidos en la matriz $[A]$ mediante una serie de subrutinas o módulos, y son transferidos a continuación a los módulos que resuelven realmente la ecuación matricial en el vector $\{h\}$.

4.2.6 Tipos de celdas y condiciones de contorno

En la práctica, no es necesario formular una ecuación de la forma (4.49) para cada una de las celdas de la malla, ya que algunas celdas tienen establecida de antemano una condición específica para simular condiciones de contorno. En este modelo las celdas de este tipo se agrupan en dos categorías: celdas de potencial conocido y celdas inactivas o sin flujo. Las celdas de potencial conocido son aquellas para las que se especifica el potencial de antemano y se mantiene en ese valor durante toda la simulación. Las celdas inactivas son aquellas en las que no se permite que entre o salga ningún flujo de ellas, en ningún paso de tiempo en la simulación. Corresponderían a una condición de borde impermeable. Las restantes celdas de la malla, denominadas celdas de potencial variable, están caracterizadas por tener un potencial no conocido a priori y que puede variar libremente a lo largo de la simulación en función de las condiciones de flujo que se produzcan en su zona. Cada una de estas celdas debe tener asociada una ecuación del tipo (4.49), y el sistema de ecuaciones resultante debe ser resuelto simultáneamente para cada paso de tiempo.

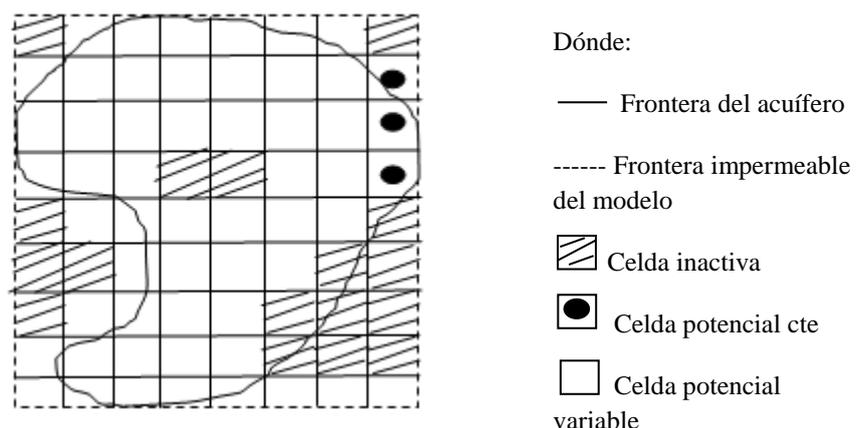


Figura 14. Acuífero discretizado mostrando el contorno y tipos de celdas

Los diferentes tipos de celda se usan para representar varios tipos de condiciones de contorno. Por ejemplo la Figura 14 muestra el mapa de un

acuífero supuesto a una malla de celdas generada para el modelo. El acuífero es de forma irregular mientras que la malla del modelo es siempre rectangular. Para eliminar las partes que no pertenecen al acuífero se han utilizado celdas inactivas. La figura también muestra varias celdas de potencial constante a lo largo de un trozo del borde que se utilizan para representar el contacto con una masa de aguas superficiales de mayor entidad. Condiciones de caudal impuesto y dependiente del potencial se pueden representar por combinación de bordes impermeables y acciones externas. En general, los tipos de contorno pueden imponerse incluyen potencial constante, bordes impermeables y caudales dependientes del potencial.

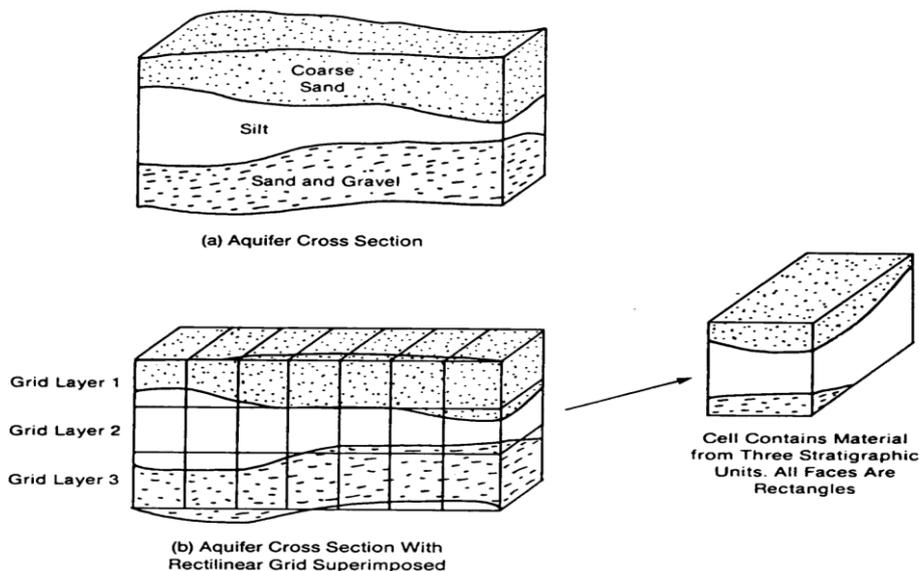
Aspectos conceptuales de la discretización vertical

El MODFLOW trata la discretización espacial en horizontal, leyendo el número de filas y columnas así como sus anchuras. La discretización en lo vertical, por el contrario, se trata en el modelo mediante el número de capas y los parámetros hidráulicos (en concreto la conductancia vertical entre dos celdas contiguas en vertical) que incluyen el espesor. Este método se utiliza con preferencia a la lectura del espesor de cada capa para acomodarse a las dos maneras de ver la discretización vertical.

En un extremo, la discretización vertical puede verse como una simple extensión de la horizontal; un proceso más o menos arbitrario de dividir el sistema a estudiar en segmentos a lo largo de la vertical, gobernado en parte por la resolución que se desee tener en los resultados. En el extremo opuesto, la discretización vertical puede ser considerada como un esfuerzo para representar en el modelo los diferentes acuíferos o zonas permeables por capas individuales en el modelo. En la Figura 15 se representa una secuencia geológica típica (15-a) que se ha discretizado siguiendo los dos esquemas, (15-b) con la primera interpretación y (15-c) con la segunda. Desde el primer punto de vista se superpone una malla ortogonal rígida al sistema hidrogeológico sin hacer ningún intento por adaptarse a las irregularidades de los estratos, aunque haya una cierta correspondencia entre unidades geológicas y capas. Bajo el segundo punto de vista, el espesor de las capas se considera variable, para disimular la variabilidad de las unidades geológicas, lo que lleva a una

malla deformada. Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas e inconvenientes. Las ecuaciones del modelo están basadas en la hipótesis de que todas las propiedades hidráulicas son uniformes a lo largo de cada celda o al menos que se puede dar un valor significativo medio o integrado; esta condición es más probable que se cumpla cuando la capa se ajusta a la geología, como en la Figura 15-c. Por otra parte se puede esperar mayor precisión si las capas del modelo corresponde a intervalos en que las pérdidas de potencial en una vertical son despreciables, y esto es más probable en la configuración (15-c). Por otra parte, la malla deformada no cumple con la mayoría de las hipótesis en que están basadas las ecuaciones.

En la práctica, muchos esquemas de discretización vertical son una combinación de ambos puntos de vista. Por ejemplo, aunque las capas se adapten a la geología, puede ser necesario incluir varias capas en la misma unidad para obtener la resolución necesaria en vertical. En general dependerá del esquema de flujo que se desee representar y de la resolución que se necesite en vertical. La diferencia entre las distintas aproximaciones reside en la forma en que se calculan los términos de conductancia y almacenamiento y, en general, en el número de ecuaciones a resolver simultáneamente, la resolución de los resultados y la precisión. El MODFLOW es capaz de implementar cualquiera de ellas, ya que de hecho, el programa no lee el espesor de las capas directamente sino que está incluido en los diferentes coeficientes especificados por el usuario.



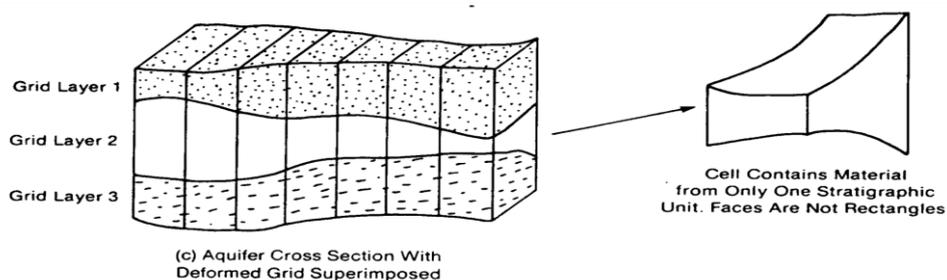


Figura 15 Esquema de discretización vertical

Contorno de malla y del acuífero

El modelo puede visualizarse como un conjunto tridimensional de celdas, cada una de las cuales está asociada a un nodo de la malla. El tamaño del modelo se indica por el usuario en términos de número de filas (ROW), columnas (COL) y de capas (NLAY); estos términos definen una matriz tridimensional de celdas en forma rectangular. En el desarrollo de la formulación de las ecuaciones en diferencias finitas no se incluye flujo hacia el exterior en las celdas que están en los planos externos, por lo que de hecho la matriz de celdas está limitada externamente por planos impermeables. Si estos contornos, que están de hecho incluidos en el modelo, coinciden con bordes impermeables del acuífero, no es necesaria ninguna intervención del usuario para definirlos.

Sin embargo, en general, los contornos del acuífero serán de forma irregular o no tendrán carácter impermeable. En estos casos los bordes del acuífero tendrán que ser simulados mediante celdas inactivas, de potencial constante, usando acciones externas o una combinación de celdas inactivas y acciones externas. Conviene resaltar que aunque no se incluyan términos de conductancia hacia arriba de la capa superior, puede existir un flujo hacia esta capa desde arriba, que es representada frecuentemente en el modelo por términos de acciones externas, por ejemplo, términos representando la evapotranspiración o infiltración desde un río.

Una ecuación en diferencias finitas (4.50) se formula para cada celda de potencial variable. En celdas de potencial constante no se formula ecuación

pero las celdas contiguas de potencial variable incluyen términos de conductancia que representan los caudales desde y hacia la celda de potencial constante. En cambio para las celdas inactivas no se formula ecuación ni aparecen términos de flujo hacia las celdas contiguas. Por consiguiente no se simula ningún flujo en el espacio comprendido entre la celda inactiva y las adyacentes.

El modelo genera inicialmente una malla rectangular. Cuando los límites de acuífero no coinciden con esa forma rectangular, se utilizan celdas inactivas para borrar las zonas que quedan fuera de los bordes del mismo. Celdas de nivel constante se pueden usar para representar características tales como masas de aguas superficiales de nivel constante que están en contacto con el acuífero.

Contornos caracterizados por un caudal que entra o sale del acuífero pueden representarse mediante contornos impermeables junto con el paquete de pozos, asignando los caudales de bombeo o recarga apropiados a los nodos junto al borde impermeable. Caudales que dependen del valor del potencial dado o el paquete de ríos, aplicando ambos en el interior de un contorno impermeable. En el paquete de ríos se darían unos valores de conductancia del lecho, nivel de agua en el río y fondo del río adecuados para obtener la entrada de caudal requerido.

Los distintos tipos de celdas: inactivas, de potencial constante y de potencial variable se distinguen en el modelo mediante una matriz entera, IBOUND, que contiene un elemento por cada celda de la malla, mediante lo siguiente:

IBOUND (I,J,K)<0.....la celda I,J,K es una celda de potencial constante

IBOUND (I,J,K)=0.....la celda I,J,K es una celda inactiva

IBOUND (I,J,K)>0.....la celda I,J,K es una celda de potencial variable

Los códigos son especificados inicialmente por el usuario. Si es necesario son ajustados posteriormente para ser consistentes con otros datos o resultados intermedios (Davies y De Weist, 1971).

4.3 Ejemplos de modelación hidrológica de flujo subterráneo

La modelación hidrológica simula los procesos físicos que ocurren en un sistema hidrológico, estos utilizan ecuaciones que gobiernan el flujo de agua, las cuales relacionan variables de estado, entrada/salida y parámetros. Estos modelos necesitan información fisiográfica, tal como una configuración.

Herrera et al; 2007 realizó una modelación del acuífero transfronterizo del Río San Pedro en Sonora, usando MODFLOW para establecer las bases de su funcionamiento de modo que fueran utilizadas como criterios de manejo de agua. Los autores combinaron datos históricos y medidas de flujo y nivel de agua, los resultados de la modelación mostraron que el acuífero sobre explotado se encuentra en un estado de cuasi-equilibrio con una ligera tendencia al descenso del nivel. La calibración del modelo mostro un excelente ajuste entre datos modelados y observados ($R^2=0.986$; $p<0.05$), las simulaciones a corto plazo indicaron que, con la explotación actual y de mantenerse las entradas de agua anuales, el acuífero no generaría cambios significativos, pero tampoco podría dar lugar a la recuperación de los niveles previos a la sobreexplotación. El estudio considero seis levantamientos de información de campo en un periodo de 14 meses, con mediciones cada dos o tres meses, intentando abarcar diferentes condiciones de humedad. Se seleccionaron 20 pozos a lo largo de la cuenca para la medición del nivel estático. El monitoreo del flujo de agua superficial se realizó en 5 zonas donde existió un flujo de agua perenne anual, donde se midió el caudal usando una sonda Global Flow Probe Modelo EP101. Toda la información hidrodinámica fue procesada con el Software Visual ModFlow Pro V.3.0.

Langevin y Guo, (2006), realizaron un modelo de simulación de densidad variable del flujo y transporte de agua subterránea usando el software MODFLOW/MT3DMS como una alternativa al uso del SEAWAT para estimar el movimiento de contaminantes y solutos por diferencia de densidades, los resultados del trabajo fueron que para el problema de intrusión salina, las condiciones simuladas mediante el modelo son mejores aun que las encontradas en laboratorio para casos de baja densidad y alta densidad. Los resultados de los casos analizados indicaron que el uso de

MODFLOW/MT3DMS provee soluciones viables que consideran los fenómenos de flujo y transporte de solutos de densidad variable en agua subterránea.

Ahora bien, dentro del área del acuífero Cuautitlán- Pachuca se han realizado previamente diferentes estudios; la mayoría son informes técnicos realizados por dependencias de gobierno y en menor cantidad son artículos científicos. Además, se han desarrollado planes y programas para el manejo del agua en la región. A continuación se hace una breve descripción de los más importantes.

4.3.1. Informes técnicos y artículos científicos

Con el fin de encontrar las mejores profundidades para explotar el agua subterránea en la zona y abastecer a la Ciudad de México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la empresa THORSA realizaron un informe técnico en 1991, denominado “Actualización Geohidrológica en el Valle de Pachuca-Tizayuca”, el cual realizó la interpretación de perfiles electrostratigráficos y estimó que las mejores profundidades para extraer el agua se encuentran entre los 250 m y 500 m de profundidad (THORSA, 1991). En base a este estudio se encontró que la mayoría de los pozos en la región del estado de México, al SO del valle, están perforados a profundidades entre los 250 m y 300 m.

En este mismo año, para complementar los resultados obtenidos del anterior informe, también se elaboró el “Diagnóstico de la Región XIII, Valle de México”. Éste presenta de manera general las condiciones cualitativas y cuantitativas existentes y los efectos al ambiente de los ecosistemas acuáticos. Además se edificó la infraestructura hidráulica actual, se determinó la demanda de ese momento y la futura por los diferentes tipos de usuarios y las interrelaciones con otras regiones debido al intercambio de agua.

Asimismo, se identificaron los problemas relevantes del uso del agua en la región, se realizó una estimación en esa época de futuras necesidades de infraestructura definiendo el tipo de obras requeridas, los costos estimados y las probables fuentes de financiamiento. Este estudio presentó el defecto de

que se enfocó más en solucionar el problema de la zona metropolitana de la Ciudad de México y minimiza el problema del Valle Pachuca – Tizayuca.

Por otra parte, para abastecer a la ciudad de Pachuca, situada al NE del valle, el estado de Hidalgo realizó en 1999 el estudio “Hidrológica subterránea y marco de apoyo geológico; en la subcuenca del Río Avenidas” con el objetivo de conocer las características del agua subterránea en la zona y determinar las mejores condiciones de explotación para la parte Norte del acuífero. Se obtienen resultados similares a los ya realizados por la empresa THORSA y se presentan como una opción para regular la explotación del acuífero un modelo matemático preliminar, el cual no considera los efectos de la temperatura del agua subterránea, el caudal de extracción de la zona minera, las fronteras reales del sistema y la conexión hidráulica entre las subcuencas vecinas, ya que no se contaba con la suficiente información. Este informe menciona que la principal preocupación de la zona, no era la falta de agua, ya que se tenían espesores granulares muy profundos en donde se puede alojar el acuífero, sino la calidad del agua, ya que al explotar a mayores profundidades ésta irá disminuyendo (Carrillo et al; 1999).

En el año 2002 la CONAGUA realizó un estudio para determinar la disponibilidad de agua en el acuífero Cuautitlán – Pachuca. Este estudio muestra que la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero presentaba una recarga total media de 202.96 hm³/año y una extracción de 243.39 hm³/año, lo que da un déficit de 40 hm³/año, considerando al acuífero como sobreexplotado (CONAGUA, 2002) y sin posibilidad de volumen disponible para nuevas concesiones. El estudio fue totalmente técnico e informativo y declaró el área como zona de veda restringida, como medida para disminuir la explotación del acuífero lo que impide otorgar permisos para realizar nuevas perforaciones de pozos o extraer más agua subterránea.

Al siguiente año, Huízar-Álvarez (2003) del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) elaboró un estudio en donde se hace una recopilación de información del acuífero Cuautitlán – Pachuca, junto con un modelo matemático del comportamiento del agua

subterránea, con ayuda del programa “VISUAL MODFLOW”. Mediante simulación, se estimó un incremento en la extracción del agua de $0.66 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto equivale que al año se iban a extraer 20.8 hm^3 más de los que se extraían, y dicho incremento lo aplico para cada periodo de 5 años del 2005 al 2020. Con esta condición, el modelo predijo un abatimiento de 15 m (0.8 m/año) de los niveles estáticos para el 2020.

La CONAGUA y el instituto de ingeniería de la UNAM realizaron el “Programa 2005-2015 de conservación y mantenimiento del sistema del plan de acción inmediata (PAI)”, en donde realizan una evaluación muy superficial sobre el acuífero Cuautitlán – Pachuca. Sin embargo, el balance de aguas subterráneas que realizan determina un déficit de $280 \text{ hm}^3/\text{año}$ (CONAGUA, 2005).

En el 2005 la CONAGUA diseñó el primer modelo matemático específico para el acuífero, el cual constaba solamente de 3 capas: la primera a una profundidad de 200 m que representa el material aluvial y lacustre, la segunda capa con un espesor de 500 m en promedio, constituido por basaltos, andesitas, tobas y cenizas, y la tercera capa representada por el basamento del acuífero a una profundidad de 1,500 msnm formado por calizas marinas del cretácico medio. Sin embargo, la información utilizada para generar el modelo no estaba actualizada y por ello presenta varias deficiencias, ya que no se contaba con información de la parte norte del acuífero, ni de las extracciones ilegales, por lo que se forzó al modelo a ajustarse al comportamiento del acuífero, dando resultados lejanos a la realidad.

Entre los años 2006 y 2007 el estado de Hidalgo, a través de la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado (CEAA) realizó el estudio geohidrológico del Valle Pachuca – Tizayuca, el cual contempló la recopilación de información, la exploración geofísica, el balance y el modelo matemático del acuífero. Este estudio aporta información importante de la parte Norte del acuífero que no se tenía. Sin embargo, se encuentra enfocado principalmente al estado Hidalgo y el modelo matemático que presenta es demasiado sencillo para poder hacer predicciones del comportamiento del acuífero a futuro. Se calcula un déficit de $217.8 \text{ hm}^3/\text{año}$ (CEAA, 2006), diferente al calculado por la CONAGUA, ya que

cada estudio toma diferentes consideraciones para los pozos ilegales que se encuentran dentro del acuífero. Además, se utilizó un coeficiente de infiltración promedio de 0.21 para estimar la recarga promedio del acuífero, que resultó de 530.1 hm³/año con una extracción de 747.9 hm³/año.

En el año 2009 la CONAGUA realizó una actualización del censo de pozos de bombeo en el área, con el fin de tener un mayor control de la cantidad de agua que se extrae del acuífero y actualizar la información de los aprovechamientos subterráneos. Se obtuvo así un total de 1,098 pozos en el acuífero, que extraen un caudal total de 546.69 hm³/año, es decir, 201.21 hm³/año menos que en el estudio anterior. Como complemento de esta información, en ese mismo año se realizó una actualización de la disponibilidad del acuífero, utilizando un coeficiente infiltración promedio de 0.14 para toda el área del acuífero y con ese dato se calculó una recarga media anual de 356.7 hm³/año (CONAGUA, 2009), muy diferente a la calculada en los estudios anteriores.

Todos los trabajos anteriores utilizaron coeficientes de infiltración con valores diferentes. Esto originó una gran dispersión en los datos reportados y por tanto, inexactitudes en el cálculo del caudal de recarga del acuífero. Este error afecta directamente el valor calculado para la disponibilidad de agua. Esto es muy grave, ya que el resultado ha servido como base para establecer las políticas de explotación y estimar las afectaciones que se tendrán a futuro. Estos errores son debidos a consideraciones generalizadas sin una base real: a) En todas las zonas consideraron valores idénticos de coeficientes de infiltración, sin considerar las diferentes características del suelo. b) No se particularizan para cada zona los datos utilizados en sus cálculos para la precipitación, evapotranspiración y escorrentía superficial. También se asume un solo valor promedio de cada uno de estos parámetros para todo el acuífero.

En el año 2010 Galindo et al; realizaron otro modelo de simulación del acuífero Cuautitlán-Pachuca utilizando el software Visual Modflow 4.2 en base a los parámetros de infiltración y coeficiente de escorrentía superficial, los cuales se calcularon a partir de imágenes raster mediante herramientas SIG; encontrando un déficit estimado de -413.66 hm³/año en el acuífero con un desarrollo

inestable, deterioro irreversible y sobreexplotación. Además detectaron zonas que podrían ser las más afectadas por la extracción incontrolada (zonas urbanas cercanas a Cuautitlán en el estado de México y la parte sureste de Pachuca), lo que advierte según Galindo et al; (2010) a las autoridades correspondientes para generar programas para la protección y recarga del área de influencia del acuífero Cuautitlán-Pachuca.

4.3.2 Planes y programas para el manejo del agua en el área

Dentro de la planeación de los recursos hídricos a nivel nacional se encuentra el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012, en el cual se asume como premisa básica la búsqueda del desarrollo humano sustentable, es decir, que todos tengan una vida digna sin comprometer el patrimonio de las generaciones futuras (Gob-Méx, 2007). De este plan se deriva el Programa Nacional Hídrico (PNH) 2007– 2012 (CONAGUA, 2008), que establece como uno de sus objetivos: “Promover el manejo integrado y sustentable del agua en cuencas y acuíferos”. Plantea como meta lograr el equilibrio y la calidad de agua adecuada en cada uno de los acuíferos del país. Dentro de las estrategias que plantea para llegar a esta meta ideal ese incluye elaborar planes de manejo en 18 acuíferos sobreexplotados, la publicación de su disponibilidad actualizada, normar y promover la recarga artificial de los acuíferos y reglamentar el uso del agua en las principales cuencas y acuíferos del país. (CONAGUA, 2008)

Sin embargo, a pesar de que maneja de estas acciones de manera cuantitativa, no establece dónde se realizarán. Derivado del PNH la CONAGUA elaboró el Programa Regional de Saneamiento y Recuperación de Acuíferos del Valle de México (CONAGUA, 2007), que se origina para dar solución a 3 problemas principales en la cuenca del Valle de México los cuales son: a) El tratamiento de sus aguas residuales, conforme a la normatividad vigente, b) el control de la contaminación de cuerpos de agua y cauces superficiales que reciben aguas residuales sin tratar y se ubican en zonas densamente pobladas del Valle de México y c) la sobreexplotación de los acuíferos del Valle de México, de los que depende el 70% del suministro de agua potable de la zona metropolitana de la ciudad de México (ZMCM). Asimismo, plantea tres objetivos principales, uno de los cuáles es “Revertir la sobre-explotación de los acuíferos del Valle de

México”. Sin embargo, el programa se enfoca al tratamiento de las aguas residuales y al reúso de las mismas como una fuente de aprovechamiento alterna. Considera la recarga artificial de los acuíferos, pero no establece ni el lugar, ni la cantidad de agua que se infiltraría al acuífero. Cabe mencionar que este programa está totalmente enfocado a la ZMCM y no contempla ninguna acción para la parte norte del acuífero.

En el Plan Estatal de Desarrollo del Estado de Hidalgo 2005 – 2011, se menciona que el estado adoptará una política de uso racional y de identificación de acciones para obtener, distribuir, desalojar, limpiar y reutilizar el agua, lo que sugiere un conocimiento exacto de los parámetros que controlan dichas acciones. Entre los objetivos planteados estuvo el de: “Establecer criterios de planeación integral orientada a la preservación del recurso hídrico, que permita establecer políticas públicas a corto, mediano y largo plazo” (Gob-Hgo, 2005), acciones que no se han logrado por la falta de un programa óptimo de manejo.

También se encuentran los planes de desarrollo municipal para cada municipio, de los cuales es importante señalar que no se toma en cuenta el problema de la sobreexplotación del acuífero y tan sólo manejan algunas estrategias enfocadas a la cultura del agua, ampliación o mejoramiento del servicio de agua potable.

Actualmente el acuífero Cuautitlán–Pachuca se encuentra sobreexplotado, y a pesar de existir varios estudios del área que advierten de esta situación, ninguno ha sido tomado en cuenta para realizar acciones correctivas que permitan disminuir la extracción de agua subterránea y/o aumentar la recarga del acuífero.

4.4 Indicadores de sustentabilidad

De acuerdo con Astier y Hollands (2005), un indicador es una variable que en función del valor que asume en determinado momento despliega significados

que no son aparentes inmediatamente, y que los usuarios decodificaran más allá de los que muestran directamente, porque existe un constructor cultural y de significado social que se asocia al mismo.

Es también una variable que brinda las bases para evaluar tendencias ambientales, sociales y económicas, para establecer metas políticas. De manera que los indicadores pueden ser cualitativos y cuantitativos; o también pueden ser índices compuestos por la relación entre diferentes variables (Astier y Hollands; 2005)

Los indicadores de sustentabilidad son herramientas útiles para reducir la complejidad de la descripción de un sistema (Matera y Lopez-Ridaura, 2000); ayudan a promover la comunicación entre los diferentes agentes relacionados con el sistema de manejo y a construir consensos.

Son parámetros con los que se puede evaluar la sustentabilidad de un sistema complejo, ya que sirven para monitorear cambios a través del sistema, incluyendo los componentes económicos y biofísicos (Achkar et al; 2005)

Los objetivos de los indicadores de sustentabilidad son medir la distancia y el sentido de la variación de un sistema ambiental entre: el estado inicial del sistema (dato de la realidad) y el estado de transición del sistema hacia un escenario sustentable de desempeño de la sociedad.

Existen dos grandes corrientes en la discusión sobre indicadores de sustentabilidad:

- La primer corriente parte del concepto de “sustentabilidad débil”, sostiene que es posible asignar valores monetarios actualizados a los recursos naturales y a los servicios ambientales de la naturaleza, pudiendo estimar así el desgaste del “Capital Natural” en términos monetarios (Achkar et al; 2005)

“La sustentabilidad débil se define como el mantenimiento de la suma del capital natural y el capital hecho por los humanos (stock constante de capital). La sustentabilidad débil permite la sustitución del capital natural, por el capital hecho por los humanos. Lo que importa en esta visión es que no disminuya el

stock total de capital” (Van Hauwermeiren, 1998). La solución que propone esta corriente se conoce con el nombre de “Indicadores monetarios de sustentabilidad”

- La segunda corriente parte del concepto de “Sustentabilidad Fuerte”, sostienen que es necesario determinar la capacidad del planeta para sostener al conjunto de la economía humana y mantener las funciones ecosistémicas que aseguren la vida en general.

La solución al problema de la sustentabilidad debe considerar que la ecósfera además de ser el soporte de la economía humana, debe ser el soporte del conjunto de la producción física de las demás poblaciones, ecosistemas y procesos biofísicos. Y mantener su capacidad de asimilación de residuos. La noción de sustentabilidad fuerte, se define como la capacidad de la economía humana de mantener el capital natural crítico (Van Hauwermeiren, 1998).

Tipos de indicadores

Los indicadores pueden resultar de un conjunto de mediciones de índices o de juicios de expertos (Achkar et al; 2005). Pueden ser: Simples, resultado de mediciones o estimaciones de una variable (p.ej. a través de un modelo de simulación) o compuestos, obtenidos mediante agregaciones de variables simples.

Existen indicadores cualitativos y cuantitativos. Las variables cuantitativas son aquellas que permiten medir propiedades tangibles, susceptibles de ser calculadas e interpretadas numéricamente. Se expresan en escalas que indican tanto el orden de los objetos como la distancia entre ellos. Ejemplos de indicadores cuantitativos son: rendimientos de cultivo, grado de contaminación de un acuífero, variación del nivel estático del mismo; etc. Las variables cualitativas se utilizan comúnmente para medir propiedades o cualidades que tienen o pueden tener naturaleza subjetiva.

Indicadores monetarios de sustentabilidad

Los indicadores monetarios de sustentabilidad intentan evaluar que parte de los ingresos por la venta de productos y satisfacción de necesidades de un país o una región pueden considerarse verdaderamente ingresos y que parte deben ser considerados como descapitalización o pérdida de patrimonio. Intentando aportar criterios para llegar a valorizaciones monetarias consensuadas tanto de la amortización de los recursos naturales como de los servicios ambientales.

Indicadores biofísicos de sustentabilidad

Son indicadores de la eficiencia en el uso de materia y energía por unidad de producto. Intenta evaluar si existe una desmaterialización de la economía y realizan un seguimiento en el tiempo. Se contabilizan las entradas de materia prima por unidad de producto en cinco categorías:

1. Materias primas abióticas
2. Materias primas bióticas
3. Los suelo utilizados
4. El agua extraída
5. El aire transformado

Huella Ecológica. Es el área de territorio productivo o ecosistema acuático, necesario para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos producidos por una población. La huella ecológica es un concepto que analiza el impacto que los individuos y grupos sociales provocan en el entorno natural.

Espacio Ambiental. La cantidad de recursos naturales renovables y no renovables que podemos usar (y los niveles de desperdicios y contaminación que podemos permitirnos) sin privar a las generaciones futuras de su derecho al mismo uso de los recursos naturales. El espacio ambiental se construye sobre la base de que el desarrollo sustentable requiere un equilibrio social y ambiental. El espacio ambiental per cápita debería ser igual para cualquier persona. Así la distribución equitativa de la cantidad física de recursos del planeta determina el límite superior del espacio ambiental, que es la medida del consumo máximo de recursos per cápita. El límite inferior del espacio ambiental es definido como la cantidad mínima de recursos per cápita que son necesarios para una vida digna. El principio de equidad intrageneracional define por lo

tanto un derecho humano de acceso a los recursos naturales necesarios para mantener su nivel de vida entre el límite máximo y mínimo del espacio ambiental.

Para orientar el cálculo del espacio ambiental se propone analizar los siguientes aspectos, con su dimensión territorial:

- Energía y materias primas no renovables, recurso global
- Las maderas y productos agrícolas, recursos continentales
- Agua, recurso local o regional, área de captación.

4.5 Balance hidrológico

Un balance hídrico es la cuantificación tanto de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico, como de los consumos de agua de los diferentes sectores de usuarios, en un área determinada, cuenca, y la interrelación entre ellos, dando como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área. Dado que el Balance Hídrico presenta un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en un área en particular, permite tomar medidas y establecer lineamientos y estrategias para su protección y utilización de una manera integrada, de tal forma que se garantice su disponibilidad tanto en cantidad como en calidad.

El modelo de balance hídrico se basa en la ecuación de conservación de masa:

ENTRADAS – SALIDAS = CAMBIO DE ALMACENAMIENTO

$$E - S = \Delta V \quad (4.52)$$

Las dimensiones de la ecuación 4.52 son las de volumen (L^3); si las entradas son mayores que las salidas, se almacena agua en el acuífero y por lo tanto ΔV conserva su signo positivo. Si las salidas son de mayor magnitud que las entradas, se mina el acuífero y ΔV toma el signo negativo. El cambio de almacenamiento en un acuífero, para un intervalo de tiempo Δt determinado, puede ser valuado mediante la ecuación

$$\Delta V = S A \Delta h \quad (4.53)$$

En donde S es el coeficiente de almacenaje, A el área del acuífero y Δh la variación de la carga hidráulica. En (5.53) se tienen las mismas dimensiones que en (5.52), es decir, L^3 . La ecuación de balance (5.52) puede ser planteada de muy diferentes formas, dependiendo de cuáles son las componentes importantes de las entradas y las salidas. Entre estas pueden ser citadas las siguientes:

Entradas horizontales: Intrusión salina, Ingreso de agua dulce por fronteras, Ingreso de agua desde acuíferos vecinos.

Entradas verticales: Lluvia, infiltración por riego, infiltraciones en canales de riego de tierra y revestidos, infiltraciones en cauces de ríos y arroyos, infiltraciones en vasos de presas, lagos y lagunas, recarga artificial.

Salidas horizontales: hacia el mar, hacia otros acuíferos, a drenes.

Salidas verticales: Extracción en pozos, manantiales, evaporación, evapotranspiración e infiltración profunda.

Por ejemplo, para un acuífero confinado, en el que actúa un sistema de pozos, la ecuación de balance puede ser escrita de la siguiente manera (en los acuíferos confinados las fronteras verticales son impermeables):

$$E_H - S_H - Q \cdot \Delta t + R = S \cdot A \cdot \Delta h \quad (4.54)$$

En donde:

E_H - entradas horizontales por las fronteras

S_H - salidas horizontales por las fronteras

Q- gastos de extracción de una batería de pozos

R-recarga natural del acuífero

La información disponible en nuestro país sobre las aplicaciones prácticas de la ecuación de balance, casi siempre ha resultado insuficiente. La escasez de datos dificulta la comprensión del funcionamiento real de una buena parte de los acuíferos nacionales.

Para el caso del modelo del Balance Hídrico se consideran las siguientes entradas:

- Precipitación,
- Importaciones superficiales de otra cuenca.
- Retornos de la demanda.

Las salidas consideradas son las siguientes:

- Evapotranspiración real,
- Evaporación de cuerpos de agua,
- Evaporación en áreas urbanas
- Escurrimiento superficial,
- Demanda interna en la cuenca,
- Demanda externa de la cuenca

Como Cambio de almacenamiento:

- Recarga de acuíferos.
- Variación de nivel en cuerpos de agua (lagos, lagunas, embalses)

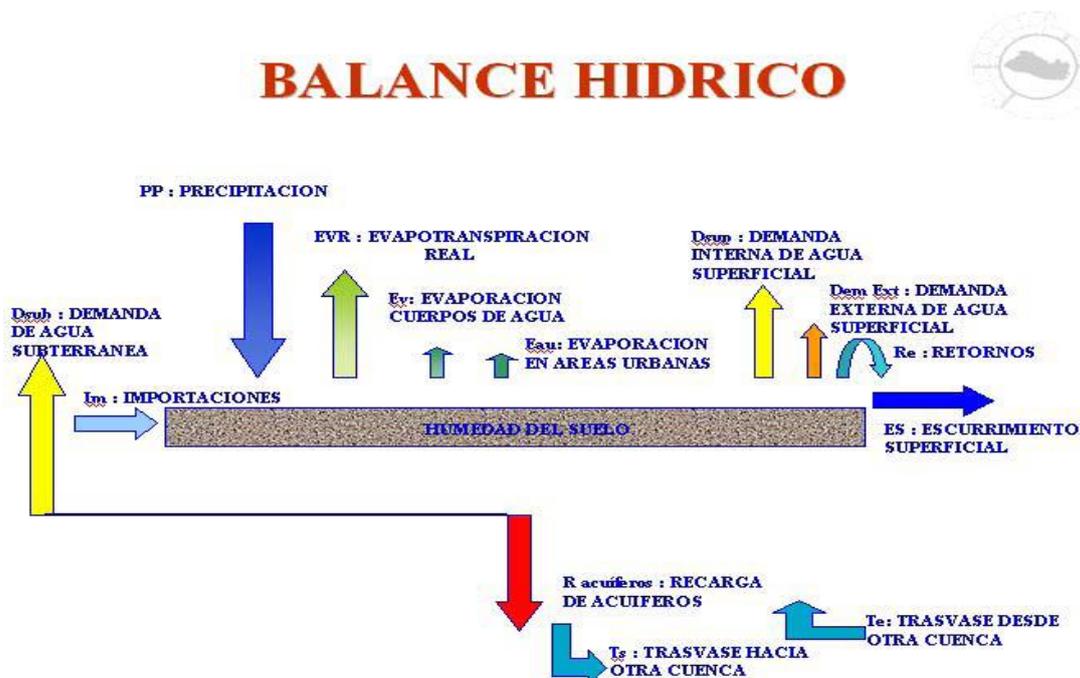


Figura 16. Esquema de balance hídrico

4.6 Balances hidrológicos previos

En 1991 Thorsa, consideró para la zona correspondiente al estado de Hidalgo una recarga media a los acuíferos del orden de 24 hm^3 para el periodo de 1984-1991 y una transmisividad general de $7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Sin embargo, el área cubierta por este balance estaba limitada al valle de Cuautitlán. Del estudio realizado en 1999 por Carrillo, se especifican con más detalle los parámetros que intervienen en un balance de aguas subterráneas. Proveniente del uso público urbano se estimó un volumen de aguas residuales del 45% del volumen abastecido, es decir, $26 \text{ hm}^3/\text{año}$, y sobre la diferencia del suministro menos el volumen residual; un coeficiente de infiltración de 0.30 para el uso agrícola también se adoptó al mismo coeficiente de infiltración. Con estos valores se formó el Cuadro 3, donde se consigna un balance tentativo que no fue posible comparar con el derivado del modelo de flujo hidrodinámico, pues desafortunadamente no se presentó en el informe respectivo realizado por Carrillo (1999). De la observación de esta misma (ver Cuadro 3) se aprecia que el volumen extraído a costa del almacenamiento subterráneo es del orden de $39 \text{ Mm}^3/\text{año}$, provocando un abatimiento de los niveles piezométricos en el acuífero del orden de medio metro anual, valor promedio para la zona Tizayuca-Pachuca.

Cuadro 3. Balance de aguas subterráneas, 1999
(Zona Tizayuca-Pachuca)

Entradas	Volumen $\text{hm}^3/\text{año}$	Salidas	Volumen $\text{hm}^3/\text{año}$
Lluvia	57.3	Bombeo	114.9
Uso público urbano	9.4	Lateral	4.0
Uso agrícola	3.4		
Lateral	10.0		
Suma:	80.1		118.9
Del almacenamiento			38.8

Cabe mencionar que la CONAGUA estimó que la parte del acuífero correspondiente a la zona Tizayuca-Pachuca está siendo sobreexplotado a razón de $33.6 \text{ hm}^3/\text{año}$, valor del mismo orden de magnitud que el citado con anterioridad, déficit que por supuesto se cubre a costa del almacenamiento subterráneo y que justamente origina los abatimientos piezométricos registrados y demás efectos nocivos indeseables.

Para el área completa del acuífero Cuautitlán–Pachuca, en el estudio realizado por la CONAGUA del año 2002 referente a la determinación de la disponibilidad del agua en el acuífero, se reporta la tabla resumen del balance de aguas subterráneas (ver Cuadro 4), y de la cual se desprende, en primer lugar, que no fue considerada la recarga inducida al acuífero, ni por las actividades agrícolas ni por fugas y pérdidas propias del uso público urbano en los sistemas de distribución de agua y alcantarillado de las poblaciones importantes.

Cuadro 4. Balance de aguas subterráneas para 2002
Acuífero Cuautitlán-Pachuca

Entradas	Volumen hm³/año
Recarga Total	
Flujo horizontal (Texcoco)	1.2
Flujo horizontal (Norte)	69.7
Lluvia	132.0
Total de entradas	202.9
Salidas	
Extracción	483.3
Total de salidas	483.3
Minado	280.4

En el estudio de referencia se tomaron en cuenta las salidas subterráneas hacia la parte meridional de la cuenca de México, pues la configuración piezométrica en que se apoya este balance corresponde a 1991 y sólo cubre la zona Tizayuca-Pachuca.

Para el año 2002, la configuración respectiva muestra en forma clara el flujo subterráneo con dirección hacia el sur ha sido interceptado por las captaciones del área septentrional, de tal manera que dicho flujo se divide hacia el norte, con dirección a las poblaciones de Tultepec y Cuautitlán, y hacia el sur, rumbo a las poblaciones Ecatepec y Texcoco del estado de México, por el oriente de la sierra de Guadalupe, y hacia los asentamientos de Atizapán de Zaragoza, también en el estado de México, y Azcapotzalco del Distrito Federal, por el poniente de la citada sierra de Guadalupe.

Cuadro 5. Balance de aguas subterráneas, acuífero Cuautitlán-Pachuca (2004)

Área total del acuífero		km ²	3,897
RECARGA			
Área de valle		km ²	1,750
	Coeficiente	I ₁	0.09
	Precipitación	mm/año	635
Recarga natural por lluvia		hm ³ /año	93.3
Entradas horizontales Zona partes altas acuífero		E	102.0
Entradas horizontales Apan y Tecocomulco		h	12.0
Total de recarga natural		hm ³ /año	207.3
	Público Urbano	I ₂	0.21
Retorno del uso Público Urbano			86.1
	Agrícola más otros	I ₃	0.17
Retorno de riego, agua subterránea			10.1
Retorno total de aguas subterráneas			96.2
	Agrícola más otros	I ₄	0.19
Retorno de riego, agua superficiales		99	18.8
	Agrícola más otros	I ₅	0.25
Retorno de riego, agua de reúso		15	39.0
		6	
Retorno total de aguas superficiales y de reúso			57.8
Retorno total			154.0
ENTRADAS TOTAL		Rt	361.4
DESCARGA			
Salidas horizontales		S	0.0
		h	
Caudal base		Q _b	0.0
		ase	
Evapotranspiración			0.0
	Extracción total bruta		587.6
	Agrícola		51.4
	Público urbano zona del acuífero		410.0
	Público urbano exportación		100.0
	Industrial		18.2
	Otros		8.0
DESCARGA TOTAL			587.6
Minado		Δ	-
		A	226.2
Coeficiente de almacenamiento		S	0.118
Volumen drenado (m/año)		V	1,925
		d	
Abatimiento m/año			1.10

La recarga total media anual corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, bien en forma natural o inducida, que según el Cuadro 6 de balance, para este caso es de 361.4 hm³ anuales.

La descarga natural comprometida se cuantifica mediante la medida de los volúmenes de agua procedentes de manantiales, o del caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionados como agua superficial, además de las salidas subterráneas que deben ser sostenidas para no afectar a las unidades hidrogeológicas adyacentes. Para el caso del acuífero Cuautitlán-Pachuca este concepto fue nulo.

4.7 Pruebas de bombeo

Una prueba de bombeo tiene dos objetivos principales. El primero es determinar las características hidráulicas de los acuíferos. Este tipo de pruebas estudian al acuífero mismo y al pozo, más no a la bomba, son llamadas también pruebas de acuífero.

Cuando se planifican y llevan a cabo correctamente estas pruebas pueden proporcionar información básica para la solución de problemas locales y aún regionales sobre el flujo del agua subterránea.

El segundo objetivo es proporcionar los datos necesarios para determinar la capacidad específica o la relación caudal-abatimiento, para seleccionar el equipo de bombeo adecuado. Dicha definición deberá basarse además de los resultados de esta prueba de bombeo (aforo) en las características físico-químicas de las aguas extraídas.

Los acuíferos de la Cuenca del Valle de México son de los más explotados en el país, debido a la gran cantidad de aprovechamientos en gran parte ocasionados por las concentraciones tan altas de población, y aunque para aliviar en parte dicha sobreexplotación se han realizado transferencias de aguas provenientes tanto del acuífero del Alto Lerma como de los aprovechamientos superficiales del Sistema Cutzamala, dichas acciones no

han sido suficientes para disminuir en forma importante las extracciones que se realizan del subsuelo del Valle de México.

Por lo anterior, la Comisión Nacional del Agua a través de su Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México ha decidido continuar y actualizar los estudios del comportamiento del acuífero de este valle para disponer de mayores elementos que permitan conocer, controlar, manejar y aprovechar de mejor forma los aprovechamientos subterráneos.

Una de las actividades para actualizar el conocimiento de las características hidrogeológicas de los acuíferos consiste en determinar la transmisividad, los coeficientes de almacenamiento y la capacidad específica entre otros parámetros. Para este caso la ejecución de pruebas de bombeo es una de las herramientas útiles y recomendables, que se utiliza como una de las mejores alternativas para el conocimiento de dichos parámetros, en cuanto a la obtención de las recargas por flujo horizontal y al mismo tiempo para el diseño de nuevas captaciones y calcular interferencias entre pozos.

La prueba de bombeo consiste en observar los efectos provocados en la superficie freática o piezométrica de un acuífero por la extracción de un caudal conocido. Los efectos (abatimientos) son registrados en el pozo de bombeo y en pozos próximos a él. Para poder realizar una prueba de bombeo se necesita cumplir con ciertos requerimientos:

- Que el equipo de bombeo esté en condiciones apropiadas para sostener un caudal constante durante la prueba.
- Que la profundidad al nivel del agua sea fácilmente medible.
- Que el caudal de extracción pueda medirse.
- Que el agua bombeada no se infiltre nuevamente al acuífero en las proximidades del pozo de bombeo.
- Que las características constructivas y el corte geológico del pozo sean conocidos, y
- Que los pozos próximos no operen durante la prueba.

Puesto que no es fácil que se cumplan simultáneamente con todos estos requisitos, en cada caso debe juzgarse con cierto criterio, si el incumplimiento de uno o varios de ellos obstaculiza significativamente o no, el buen desarrollo y la interpretación de la prueba (Martínez et al; 2006)

4.8 Métodos de análisis para acuíferos semiconfinados

En la naturaleza, los acuíferos perfectamente confinados o libres son menos frecuentes que los semiconfinados. Cuando se somete a bombeo un acuífero semiconfinado, el agua extraída no proviene únicamente del acuífero, sino también de la capa suprayacente, la cual es semipermeable (acuitardo).

Como resultado del bombeo, el nivel piezométrico del acuífero desciende, creando una diferencia de carga hidráulica entre el acuífero y la capa semipermeable. Por consecuencia, el agua del acuitardo comenzará a moverse hacia abajo, en dirección vertical hacia el acuífero. Por lo tanto, el caudal que fluye del acuitardo hacia el acuífero es directamente proporcional a la diferencia de carga hidráulica entre el nivel freático del acuitardo (h_{fn}) y el piezométrico del acuífero semiconfinado (h_{piez}), e inversamente proporcional a la resistencia hidráulica de la capa semipermeable (c), es decir:

$$q = \frac{h_{fn} - h_{piez}}{c} \quad (4.55)$$

Los métodos de análisis para acuíferos semiconfinados tratados en este capítulo, se sintetizan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Métodos de análisis de acuíferos semiconfinados

Tipo de acuífero	Regimen de flujo	Ecuación de flujo	Método de análisis	Notas	Parametros hidráulicos	Bibliografía
Semiconfinado	Estable	$S_m = \frac{2.3Q}{2\pi T} \left(\log 1.12 \frac{L}{r} \right)$	Hantush-Jacob	$r/L \leq 0.05$	T y c	Hantush-Jacob, 1995
Semiconfinado	Estable	$S_m = \frac{Q}{[2\pi KD] \left[K_0(r/L) \right]}$	De Glee		T y c	De Glee 1930, 1951
Semiconfinado	Estable	$S_m = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/L)$	Walton		T y S	Walton, 1962
Semiconfinado	Estable	$S = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/L)$	Hantush I		T y C y c	Hantush, 1956
Semiconfinado	Estable	$S = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/L)$ $[2k_0(r/L) - W(u, r/L)]$	Hantush III	$q = Tt SL_2$ $q > 2r SL_2$	T y S, S' y c	Hantush, 1960
Semiconfinado	Estable	$S_c = \frac{Q}{[4\pi KD] W(u, u_c)}$	Neuman-Witherspoon		T y S, S' y u	Neuman y Witherspoon, 1972

4.9 Métodos de análisis para acuíferos confinados

Todos los métodos que se tratan a continuación se basan en las siguientes hipótesis:

- El acuífero es de extensión infinita.
- El acuífero es homogéneo, isótropo y de espesor uniforme en el área de influencia de la prueba; esto es, la conductividad hidráulica del acuífero tiene el mismo valor en toda la profundidad.
- Antes del bombeo, la superficie piezométrica es casi horizontal en el área que será influenciada por el bombeo.
- El caudal que extrae el pozo por bombeo del acuífero, es constante.
- El pozo penetra totalmente el acuífero.
- El diámetro del pozo de bombeo es pequeño, es decir, que el almacenamiento en el pozo puede ser despreciado.
- El agua removida del almacenamiento es descargada instantáneamente al decrecer la carga hidráulica (nivel piezométrico) en el acuífero.
- Las pérdidas de carga en el pozo-acuífero son despreciables.

El omitir alguna de estas suposiciones en la interpretación de pruebas de bombeo con los métodos presentados en este capítulo, puede repercutir significativamente en los resultados obtenidos. Por ejemplo, si el efecto del almacenamiento en el pozo de bombeo es importante y no se considera,

generalmente la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento se sobrestimarán con estos métodos. De la misma forma, si las pérdidas de carga en el pozo de bombeo son importantes y no se toman en cuenta, las características hidráulicas del acuífero estudiado se subestimarán.

Cuadro 7. Métodos de análisis de acuíferos confinados

Tipo de acuífero	Regimen de flujo	Ecuación de flujo	Método de análisis	Notas	Parametros hidráulicos	Bibliografía
Confinado	Estable	$Q = \frac{2\pi T(S_1 - S_2)}{\ln(r_2/r_1)}$	Thiem		T	Thiem, 1906
Confinado	Transitorio	$s = \left[\frac{Q}{4\pi T} \right] \int_0^u \frac{e^{-u}}{u} du$ $- (2.25T) W(u)$	Theis	$U = \frac{r^2 S}{4\pi T}$	T, S	Theis, 1935
Confinado		$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tr}{r_1 S}$	Jacob	$\frac{r^2 S}{4\pi T} \leq 0.01$	T, S	Cooper y Jacob, 1946

4.10 Métodos de análisis para acuíferos libres

En un acuífero libre, el nivel del agua en los piezómetros cercanos a un pozo de bombeo a menudo no se comporta de acuerdo a la ecuación de Theis (1935). Boulton (1963) fue el primero en introducir un método de interpretación para pruebas de bombeo en un acuífero libre. Sin embargo, el ajuste de curvas de Neuman (1975) es un método que permite determinar para el acuífero sus conductividades hidráulicas horizontal (Kh) y vertical (Kv), coeficiente de almacenamiento (S) y el rendimiento específico (SY).

Bajo las condiciones limitantes del caso y en ciertos intervalos de tiempo, los métodos empleados para acuíferos confinados, se pueden emplear en acuíferos libres, por ejemplo el Método de Theis (1935). El Método de Thiem-Dupuit se emplea en acuíferos libres cuando el flujo en los pozos es estacionario. Al aplicar los métodos presentados en este capítulo es menester notar las hipótesis que en ellos se manejan. Esto es, se deberá aplicar el método y, en su caso corregir y, evaluar los resultados de acuerdo con las limitantes siguientes:

- El acuífero es libre
- Se considera de extensión infinita

- El acuífero es homogéneo y de espesor uniforme, principalmente en el área de prueba
- La superficie freática se encuentra en forma horizontal antes del bombeo
- El acuífero es bombeado a caudal constante
- El pozo es de penetración total y recibe agua de todo el espesor del acuífero
- El agua entra al pozo debido a los gradientes hidráulicos provocados por el bombeo.

En la práctica, el efecto de flujo en la zona no saturada en la respuesta tardía del nivel freático se considera despreciable. Se supone que un acuífero libre presenta un espesor constante en la vecindad del pozo durante el bombeo, condición que es en muchos casos difícilmente cierta. Un valor correcto en este sentido, tomando como base la dimensión del abatimiento en los pozos al bombear, es la aplicación de Jacob (1944), quien propone una corrección a los abatimientos medidos:

$$s' = s - (s^2 / 2D) \quad (4.56)$$

Donde:

s' = Abatimiento corregido

s = Abatimiento observado

D = Espesor saturado

Según Neuman (1975), la corrección de Jacob (1944) es aplicable estrictamente para los períodos tardíos de descenso, registrados en las pruebas, los cuales caen dentro de la curva de Theis (1935).

A continuación, se describen los métodos de Neuman (1975) y Boulton (1963) para interpretar pruebas de bombeo en condiciones de flujo transitorio. La diferencia principal entre estos métodos es que el primero permite estimar la K , del acuífero, en tanto que el segundo cuantifica el rendimiento retardado.

4.10. 1 Método de Neuman

Neuman (1975) desarrolló una teoría sobre la respuesta tardía del nivel freático al bombear un pozo, la cual se basa en parámetros físicos bien definidos de un acuífero libre. El autor considera al acuífero como un sistema compresible y al

nivel freático como un límite de dicho sistema, pero en movimiento. Reconoce la existencia de componentes de flujo en sentido vertical y establece que la solución del descenso del nivel es una función de la distancia (r) al pozo de bombeo.

Matemáticamente, se simula la respuesta tardía del nivel freático, considera al coeficiente de almacenamiento S_A y al rendimiento específico S_y como constantes. La ecuación de abatimiento de Neuman (1975) es la siguiente:

$$S = \frac{Q}{4\pi KD} W(U_A, U_B, \beta) \quad (4.57)$$

Para condiciones iniciales de tiempo de bombeo, la ecuación 5.74 se reduce a la siguiente:

$$S = \frac{Q}{4zKD} W(U_A, \beta) \quad (4.58)$$

Dónde:

$$U_A = r^2 S_A / 14KDt \quad (4.59)$$

S_A = Volumen de agua almacenada liberada instantáneamente por unidad de área y por unidad de abatimiento.

Para condiciones avanzadas de tiempo, la ecuación 4.59 se reduce a la expresión 4.60:

$$S = \frac{Q}{4\pi KD} W(U_B, \beta) \quad (4.60)$$

Dónde:

$$U_B = r^2 S_y / 14KDt \quad (4.61)$$

$$\beta = r^2 K_v / D^2 K_h \quad (\text{Parámetro de Neuman}) \quad (4.62)$$

Dónde:

K_v = Conductividad hidráulica para el flujo vertical (m/día)

K_h = Conductividad hidráulica para el flujo horizontal (m/día)

S_y = Volumen de agua liberada por unidad de área y por unidad de abatimiento del nivel freático.

Para acuíferos isótropos se tiene que $K_v = K_h$, así como $\beta = r^2 / D^2$

El método de ajuste de curvas de Neuman (1975) puede emplearse si se supone que las siguientes hipótesis son satisfechas.

- El acuífero puede ser isótropo o anisótropo
- El flujo en dirección al pozo es transitorio
- La influencia de la zona no saturada sobre el área de abatimiento es despreciable
- $S_y / S_A > 10$
- Los pozos de bombeo y de observación son de penetración total
- El diámetro de los pozos de observación y de bombeo se consideran pequeños, es decir el almacenamiento de agua en ellos puede ser despreciable
- No existen pérdidas de carga en el pozo de bombeo.

4.10.2 Método de Boulton

Boulton (1963) introdujo un método de interpretación para pruebas de bombeo en acuíferos libres donde cuantifica el rendimiento retardado. Este método se puede utilizar si el acuífero cumple con las hipótesis antes mencionadas.

4.10.3 Método de Thiem - Dupuit

Cuando las diferencias de abatimiento son insignificantes con el transcurso del tiempo, puede emplearse el método de Thiem-Dupuit para calcular la transmisividad de un acuífero libre.

Para que pueda emplearse con mayor seguridad este método, deben cumplir lo siguiente:

- El acuífero es isótropo
- El flujo en dirección al pozo es estacionario

Las hipótesis de Dupuit se cumplen cuando:

- El flujo es horizontal
- El gradiente que origina el movimiento del agua está definido por la pendiente de la superficie freática
- La velocidad es constante a lo largo de una misma sección vertical.

Si estas consideraciones se cumplen, la descarga del pozo para flujo horizontal y en régimen estacionario en un acuífero libre puede expresarse como:

$$dQ=(2\pi rhK_h)\frac{dh}{dr} \quad (4.63)$$

Integrando entre r_1 y r_2 (con $r_2 > r_1$) se tiene:

$$Q= \pi K \{(h_2^2 - h_1^2) / \ln (r_2/ r_1)\} \quad (4.64)$$

La expresión 4.64 se conoce como Fórmula de Dupuit. (Custodio y Llamas, 1983).

5. MATERIALES Y METODOS

Para desarrollar esta investigación, se consideraron tres etapas: revisión de literatura y visitas de campo, la captura de información y el análisis de resultados, a continuación se describen cada una de ellas.

a) Etapa preparatoria.

En este apartado se realizó una revisión de literatura. Un recorrido de campo del acuífero para identificar y ubicar geográficamente mediante un geoposicionador global (GPS) los aprovechamientos de agua subterránea y delimitar el acuífero con base en la poligonal del mismo.

b) Etapa de captura de información

Durante esta etapa con base en la revisión bibliográfica se establecieron los pasos a seguir en la investigación, en primer lugar se diseñó del modelo hidrogeológico del acuífero Cuautitlán-Pachuca, se identificaron los pozos pilotos del mismo, para después sondearlos y poder establecer la evolución del nivel estático, se definieron los indicadores de sustentabilidad basados en los criterios de elección del método MESMIS anteriormente mencionados.

c) Etapa de análisis de resultados.

En esta etapa se revisó de manera detenida los diversos resultados obtenidos con base en la modelación hidrogeológica, el ejercicio de evaluación de indicadores de sustentabilidad, el balance de agua subterránea y demás aspectos de este trabajo de investigación, con la finalidad de poder establecer conclusiones y recomendaciones acerca de las medidas a tomar para una posible recuperación de un estado de equilibrio ecológico, económico y social dentro del entorno y área de influencia del acuífero Cuautitlán-Pachuca.

5.1 Descripción de la zona de estudio

El acuífero Cuautitlán-Pachuca ocupa la porción norte de la cuenca del valle de México, justificando su nombre por la presencia de las poblaciones de Cuautitlán en el estado de México y Pachuca, capital del estado de Hidalgo. El límite del acuífero corresponde al publicado por el Diario Oficial de la Federación (DOF) en el 2009, las referencias topográficas del acuífero Cuautitlán-Pachuca, que se transcriben en el Anexo 1 y se muestran objetivamente en la Figura 17 en donde se han anotado el número de vértices correspondiente a la tabla antes mencionada. De acuerdo a los límites establecidos en la poligonal, el área administrativa es 3,893 km²



Figura 17. Acuífero Cuautitlán-Pachuca (Galindo et al; 2010)

5.2 Municipios

Los municipios comprendidos dentro del acuífero, son 47, 13 correspondientes al estado de Hidalgo y 34 al Estado de México. Cabe mencionar que se consideraron algunos municipios con una pequeña porción de su territorio dentro del área del acuífero, en comparación de otros con las mismas características que no se incluyeron. Sin embargo éstos cuentan con al menos un aprovechamiento dentro de los límites del acuífero. (Ver Cuadro 8).

Cuadro 8. Relación de municipios contenidos en el acuífero Cuautitlán-Pachuca

MUNICIPIOS		
Estado de Hidalgo		Estado de México
1. Epazoyucan	1. Acolman	18. Nextlalpan
2. Mineral de Reforma	2. Atenco	19. Nicolás Romero
3. Mineral del Monte	3. Atizapán de Zaragoza	20. Nopaltepec
4. Pachuca de Soto	4. Axapusco	21. Otumba
5. Sn. Agustín Tlaxiaca	5. Chiautla	22. Sn. Martín de las Pirámides
6. Singuilucan	6. Coacalco de Berriozábal	23. Tecámac
7. Tepeapulco	7. Coyotepec	24. Temascalapa
8. Tizayuca	8. Cuautitlán	25. Teoloyucán
9. Tlanalapa	9. Cuautitlán Izcalli	26. Teotihuacan
10. Tolcayuca	10. Ecatepec de Morelos	27. Tepetlaoxtoc
11. Villa de Tezontepec	11. Huehuetoca	28. Tepotzotlán
12. Zapotitlán de Juárez	12. Hueyponxtla	29. Tequixquiac
13. Zempoala	13. Isidro Fabela	30. Tezoyuca
	14. Jaltenco	31. Tlalnepantla de Baz
	15. Jilotzingo	32. Tultepec
	16. Melchor Ocampo	33. Tultitlán
	17. Naucalpan de Juárez	34. Zumpango

Por pertenecer a dos estados diferentes a la parte correspondiente al estado de Hidalgo se la ha denominado Valle Pachuca – Tizayuca, ya que en ella se encuentran las ciudades de Pachuca y Tizayuca, considerada como la segunda zona en importancia económica y social dentro de la Cuenca del Valle de México, después de la ciudad de México y su zona metropolitana. Las principales actividades económicas en la zona estudiada corresponden con: la industria, el comercio, la ganadería y la agricultura.

5.3 Fisiografía

El acuífero en estudio queda comprendido dentro de la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico, Subprovincias Llanuras y Sierra de Querétaro e Hidalgo, y Lagos y Volcanes del Anahuac. La Provincia Eje Neovolcánico se caracteriza en general por su gran extensión y espesor de rocas ígneas, como resultado de la actividad volcánica del Terciario.

En la primera Subprovincia predominan vulcanitas en las sierras de origen volcánico, en las porciones norte y occidental del área bajo estudio, en tanto que en la segunda de las Subprovincias se observan llanuras formadas por depósitos aluviales como la de Tizayuca-Pachuca, y sierras volcánicas junto a lomeríos de tobas que constituyen la transición entre estas dos formas fisiográficas, en la porción oriental del área estudiada. Así pues, la zona de trabajo se caracteriza por una extensa planicie con abanicos y llanuras aluviales, rodeada por sierras volcánicas.

Desde el punto de vista fisiográfico la cuenca del valle de México puede dividirse en la zona meridional, la septentrional y la nororiental. La primera de ellas queda fuera de la zona de estudio, por lo que no se describirá. La zona septentrional es en parte la continuación de la planicie meridional, quedando comprendida desde la sierra de Guadalupe hasta las estribaciones de la Sierra de Pachuca. Precisamente en la parte norte de la cuenca del valle y de la zona en estudio, mencionados de oriente a poniente, se aprecian la sierra de Pachuca, la sierra de Tezontlalpan, los cerros de Xalpan y Sincoque.

Por el oriente, citadas de norte a sur, la cuenca está limitada por la sierra de Pachuca, sierra de Chilcuautla y sierra Tepozán. Su clima es casi desértico y su drenaje superficial no está bien definido, aunque los escurrimientos finalmente descargan al río de las Avenidas.

Por el poniente, mencionadas de norte a sur, limitan al valle las sierras Tepozotlán, Monte Bajo y Monte Alto, así como prominencias menores. En esta zona se desarrolla el río Cuautitlán, mismo que representa casi la mitad de las descargas superficiales de todo el valle de México.

Por el sur, el límite de la zona estudiada lo constituyen las sierras de Guadalupe y Chiconautla, con una comunicación superficial hacia la porción meridional del valle de México, a través de los depósitos aluviales que rodean la sierra de Guadalupe por el oriente y poniente.

5.4 Clima

De acuerdo con los criterios de Köppen para la República Mexicana, el clima de la región varía de seco y semiseco a templado. La precipitación media anual es del orden de 653 mm/año. La temperatura media anual es de unos 14.7 °C.

Según el estudio de la disponibilidad del 2002, se describen las condiciones climáticas con mayor detalle para el área del acuífero Cuautitlán-Pachuca, reportando cuatro tipos de climas con diferencias muy sutiles: semiseco templado, identificado con las siglas $BS_1kw(w)$ y que ocupa la mayor parte del área; templado subhúmedo $Cb(w_2)(w)$, con lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor al 10%; templado subhúmedo $Cb(w_1)(w)$, intermedio en cuanto a humedad, lluvias en verano y un porcentaje invernal de lluvia menor al 8%; y por último, el semifrío subhúmedo $Cb'(w_2)(w)$, el más húmedo de los semifríos, con lluvias en verano y un porcentaje invernal de lluvia menor a 8%.

El periodo de lluvias se presenta entre mayo y octubre, en tanto que el periodo de secas tiene lugar entre noviembre y abril. La evaporación potencial media

anual es del orden de 1650 mm. Dentro de los aspectos climatológicos, la precipitación pluvial es un parámetro de la mayor importancia en la geohidrología. Bajo esta premisa, se reporta la precipitación de 23 estaciones climatológicas, 6 ubicadas en el estado de México y 17 en el de Hidalgo. Se reporta la precipitación pluvial desde el año 1986 al 2001 y los promedios anuales reportados en los diferentes boletines hidrológicos de la Gerencia de Aguas del Valle de México (CNA).

En promedio todas las estaciones consideradas dentro de la zona de estudio manifiestan una precipitación anual de 653 mm, aunque no todas corresponden a períodos iguales de observación, que pueden variar de 1930-2000 (70 años) en Huehuetoca a 1984-2000 (16 años) en el Observatorio de Pachuca. Las estaciones del estado de México, situadas al sur de la zona estudiada, promedian 618 mm/año aproximadamente, lo cual representa una precipitación mayor a las estaciones de Hidalgo, cuyo promedio es del orden de 526 mm/año, ratificando la calidad de aridez en la porción septentrional de la cuenca del valle de México.

5.5 Hidrología

La cuenca del Valle de México (a la cual pertenece el acuífero) es una cuenca endorreica y que debido a las inundaciones y al desarrollo urbano de la Ciudad de México y sus zonas conurbanas, le ha dado una salida a las aguas pluviales y residuales hacia la cuenca del río Tula a través de la construcción de diversos canales y drenes. Dentro del área del acuífero la planicie representa una superficie importante de infiltración dada su alta conductividad hidráulica; esta característica se ve confirmada por la baja densidad del drenaje superficial representada por los ríos Avenidas en la parte NE y Cuautitlán al Oeste. El río de las Avenidas es la corriente superficial más importante en la porción nororiental del acuífero Cuautitlán-Pachuca. Nace en la sierra situada al norte de la ciudad de Pachuca; después de recorrer la planicie Tizayuca-Pachuca con dirección general norte sur en sus primeros kilómetros, cambia de dirección hacia el NE-SW a la altura de la presa El Manantial. En este tramo recibe parte de las aguas residuales que generan las poblaciones que están a su paso, incluyendo las de Pachuca, aguas que sin tratamiento alguno se

aprovechan en la agricultura. Asimismo, recibe por margen izquierda y al norte de Temascalapa al río Papalote, el cual presenta escurrimientos de una parte de las aguas superficiales generadas en el área de Tecocomulco, Apan y Tochac, y que llegan al río Papalote artificialmente por medio de canales. Los escurrimientos del río de Las Avenidas se controlan en la presa El Manantial y sus desfogues se aforan en la estación hidrométrica del mismo nombre, así como en los dos canales que desvían las aguas hacia las áreas de cultivo. En las escasas ocasiones de escurrimientos extraordinarios, parte de estos volúmenes se derivan al Gran Canal del Desagüe para proseguir después al valle del Mezquital, estado de Hidalgo. El régimen del río de las Avenidas es intermitente, pues solamente se registran escurrimientos durante la temporada de lluvias que tiene lugar de junio a octubre, en tanto que desde diciembre a mayo el escurrimiento disminuye sensiblemente hasta ser nulo. Las avenidas mayores se presentan en julio y septiembre, llegando hasta del orden de 300 y 330 l/s. En total escurren fuera del estado de Hidalgo unos 3.8 hm³ anuales. Considerando las tres estaciones hidrométricas, el escurrimiento del río y las derivaciones de los canales, el volumen generado es de 4.2 hm³/año; tal como se muestra en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Escurrimientos superficiales en hm³/año

Estación hidrométrica	Corriente	Volumen anual medio en el período hm ³ /año	Período años
Zona IV			
San Lorenzo Km 24+523	Emisor Poniente	93.905	26
Puente Colgante	Río Cuautitlán	92.727	24
Huehuetoca	Río Cuautitlán	66.011	61
Conejos	Río El Salto	513.994	19
Tajo de Tequixquiac	Salida Túnel Viejo	225.056	60
Túnel Nuevo de Tequixquiac	Salida Túnel Nuevo	368.455	38
Desfogue Presa Guadalupe	Río Cuautitlán	74.386	39
La Aurora	Canal La Aurora	27.059	50
San Lorenzo	Río Cuautitlán	71.317	26
Santo Tomás II	Canal Santo Tomás	28.194	42
Zona V			
El Manantial (río)	Río Avenidas Pachuca	3.835	29
El Manantial (CMD)	Canal Margen Derecha	0.070	24
El Manantial (CMI)	Canal Margen Izquierda	0.348	23

Es importante señalar que en el área de Tizayuca-Pachuca la red hidrográfica es más bien pobre. Si bien la precipitación anual es del orden de 550 mm, los volúmenes de escurrimiento son bajos debido a que la mayor parte se infiltra en la planicie.

Por el poniente, el río Cuautitlán es la corriente más importante de la cuenca del valle de México. Su origen se remonta a las corrientes que nacen en las sierras Monte Alto y Monte Bajo, conocidas como ríos Chiquito, Monte Alto y los arroyos Bata, La Colmena y Guadalupe, que confluyen al actual vaso de la presa de Guadalupe. Aguas abajo de la cortina de la citada presa, ya con el nombre de río Cuautitlán, escurre con dirección general nornoroeste en una zona donde se rectificó su cauce para beneficiar terrenos agrícolas; poco después recibe por su margen izquierda al río Tepetzotlán y llega a Huehuetoca, donde sale del valle de México a través del Tajo de Nochistongo y en ocasiones por el canal Santo Tomás se deriva a la Laguna de Zumpango, para posteriormente salir de la cuenca del valle de México por los túneles de Tequisquiac.

5.6 Geología

El área de estudio queda comprendida dentro de la Provincia Geológica de Eje Neovolcánico, la edad de las formaciones geológicas en esta porción de la Cuenca de México varía desde el Terciario Inferior (Eoceno) hasta el Reciente.

5.7 Hidrogeología

5.7.1 Tipo de Acuífero

La secuencia oligo-miocénica forma parte de la unidad hidrogeológica denominada volcánicos Inferiores del Terciario, que está representada por materiales riolíticos, con algo de material dacítico y andesítico intercalado, hacia la cima se presenta un predominio de materiales andesíticos; esta unidad puede dividirse en dos unidades:

- La unidad basal está representada por los materiales riolíticos, donde el fracturamiento es moderado, al cual se le atribuye una permeabilidad baja.

- La unidad superior corresponde con los materiales andesíticos, con intenso fracturamiento, asociada con brechas volcánicas poco consolidadas y tobas arenosas, de grano grueso y bastante alteradas, por lo que se considera tienen una buena permeabilidad, constituyen el principal acuífero profundo.

Sobre la unidad anterior descansa una secuencia de materiales basálticos del Terciario, la cual es considerada dentro de la unidad geohidrológica denominada Volcánicos Superiores del Terciario.

Dentro de esta unidad se incluye a la secuencia de basaltos, brechas y tobas intercalada con materiales piroclásticos finos y sedimentos lacustres, que probablemente correspondan con la segunda actividad volcánica del Terciario; de acuerdo con la estructura que presentan se consideran altamente permeables.

Finalmente sobre esta última secuencia se tienen arenas, arcillas y tobas poco permeables del Cuaternario-Reciente, además de derrames de lava intercalados por tobas, comúnmente drenadas pero con buena permeabilidad; estos materiales constituyen la unidad hidrogeológica del Cuaternario. Localmente constituyen acuíferos subordinados de baja capacidad productora. De acuerdo a los materiales que conforman el valle, se considera que el acuífero de Cuautitlán-Pachuca es de tipo semiconfinado.

5.8 Volúmenes de extracción

Actualmente los derechos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), son menores en más del 50% respecto a los estimados como extracción en los estudios de campo. Esta diferencia se da básicamente en el uso público urbano, ya que el volumen registrado en el REPGA para este uso es de solo 164 hm³/año a diferencia del estimado en estudios que es de 510 hm³/año; solo la extracción estimada por los pozos de los ramales propiedad del Organismo de cuenca del valle de México es de 270 hm³/año, valor superior al inscrito en REPGA.

5.8.1 Concesiones de agua subterránea en el acuífero (REPDA, 2005)

El Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), tiene registrados en este acuífero a 485 aprovechamientos de agua subterránea, con un volumen concesionado de 247 hm³/año.

Cuadro. 10 Aprovechamientos concesionados de agua subterránea, acuífero Cuautitlán-Pachuca (REPDA)

Uso	No. Aprovechamientos concesionados	Volumen Concesionado hm ³ /año
Agrícola	181	55.91
Agroindustrial	2	0.14
Domestico	5	0.07
Industrial	95	20.80
Múltiples	19	2.94
Pecuario	21	2.86
Público urbano	152	163.75
Servicios	10	0.18
Totales	485	246.66

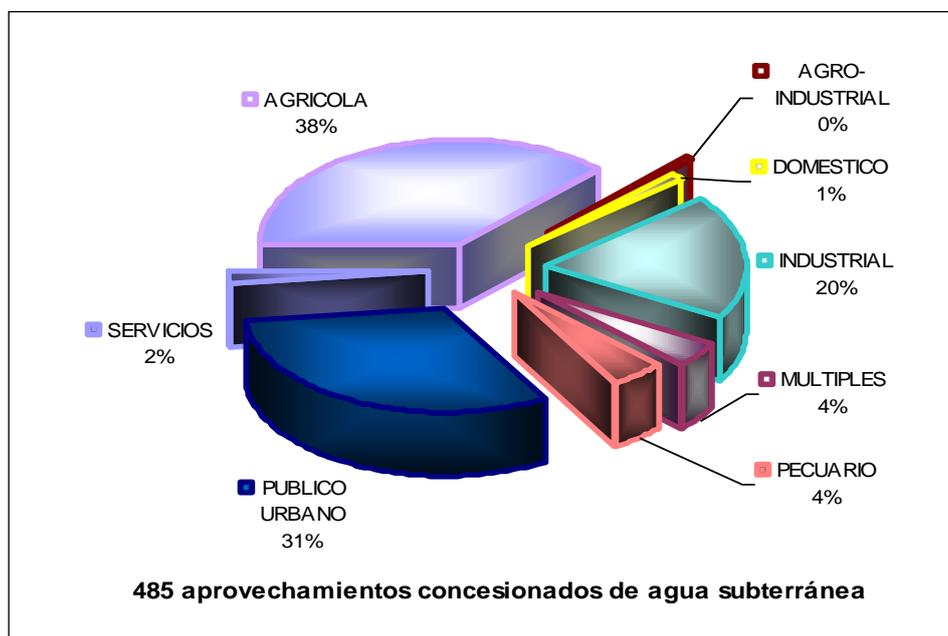


Figura 18. Aprovechamientos concesionados de agua subterránea, Acuífero Cuautitlán-Pachuca

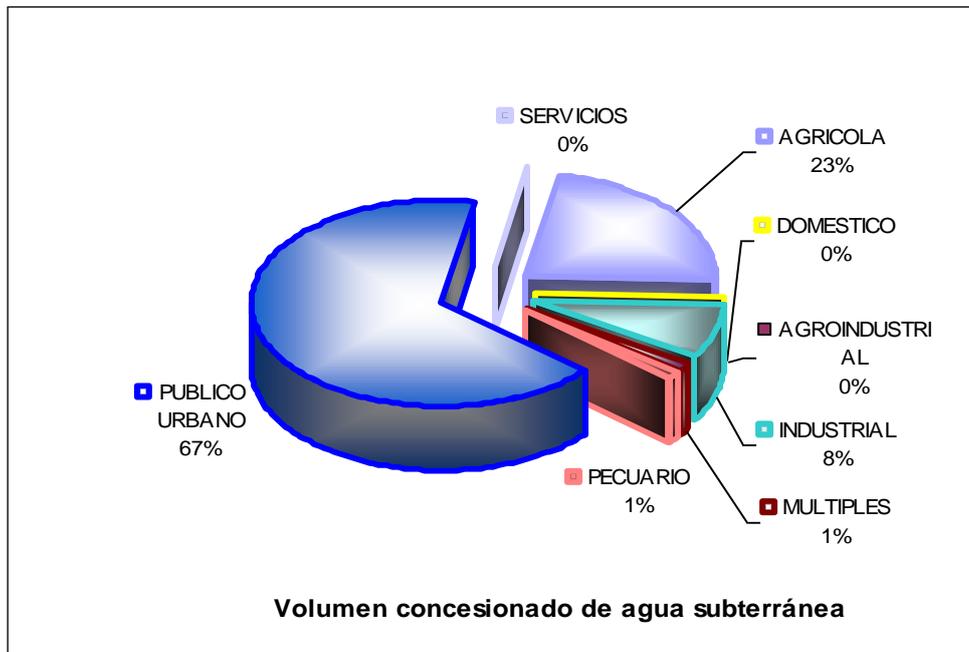


Figura 19. Volúmenes concesionados de agua subterránea en el acuífero Cuautitlán-Pachuca

De acuerdo con el Cuadro 10 y las Figuras 18 y 19, el servicio público-urbano, mediante 152 pozos ocupa 164 hm³/año, o sea el 66 % del total; le siguen en importancia el uso agrícola, que con 181 captaciones reporta 56 hm³/año concesionados, esto es, el 23 % del total; el uso industrial con 95 aprovechamientos que tienen concesionados una extracción de 21 hm³/año, cifra que representa el 8 %. El restante 3 % se reparte entre los demás usos, o sea que los tres usos principales representan el 97 % de las concesiones.

En cuanto al número de aprovechamientos y extracciones por municipio, en el estado de Hidalgo, con 81 aprovechamientos, las extracciones concesionadas son del orden de 50 hm³/año, mientras que en el estado de México con 404 aprovechamientos los volúmenes concesionados son de 197 hm³/año. Integrando todos los aprovechamientos ubicados en el acuífero Cuautitlán-Pachuca, el REPDA tiene registrados en total 485 aprovechamientos con 246.7 hm³/año concesionados.

5.8.2 Usos y aprovechamientos según los censos de 2009

Con base en el censo realizado por el CEEA, 2009; el 25.69% de los pozos que se encuentran en el acuífero se dedican a la agricultura y solamente extraen 6.31% del caudal que se extrae del acuífero. El uso industrial cuenta con el

2.93% del total de los pozos y extrae el 2.21% del total del agua. Los usos de servicios cuentan con 747 pozos (68.28%) y explotan el 91.07% del agua, como se muestra en la Figura 20. En el cuadro 11 se muestran los caudales de extracción y el número de pozos por uso.

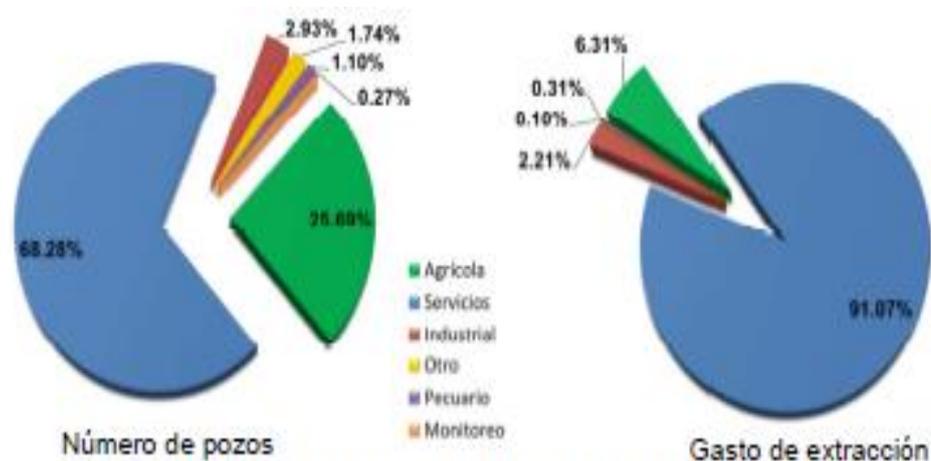


Figura 20. Porcentaje del número de pozos y gasto de extracción por uso

Cuadro 11. Pozos y caudales de extracción por uso

Uso	Pozos			Gasto
	Total	Activos	Inactivos	L/s
Agrícola	281	205	76	1590.14
Servicios	747	627	120	22080.87
Industrial	32	23	9	535.79
Otro	19	1	18	25.43
Pecuario	12	11	1	74
Monitoreo	3	0	3	0
Total	1094	867	227	24246.23

De los 867 pozos, 90 (8.23%) corresponden al estado de Hidalgo, extrayendo un caudal aproximado de 3,425.32 L/s (13.92%). En contraste, el Estado de México extrae 20,871.40 L/s (86.08%), con 777 (71.02 %) pozos activos.

Los caudales de extracción con los que trabajan los pozos varían desde los 0.10 L/s a los 570 L/s y en promedio la extracción es de 26.86 L/s. Los pozos con los mayores caudales de extracción pertenecen al uso de servicios con

gastos de 394 y 570 L/s, localizándose el primero en el municipio de Zapotlán de Juárez, Hidalgo y el otro en el municipio de Teoloyucan, Estado de México. Los mayores gastos de extracción se localizan en la parte central del acuífero, correspondiente al Estado de México. Existen 22 pozos del uso de servicios cuyos caudales se encuentran entre los 75 a 125 L/s, de los cuales 8 se localizan en el estado de Hidalgo.

5.9 Método del balance hidrológico

$$E - S = \Delta V \quad (5.1)$$

Dónde: **E** = Entradas de agua (m³/año)
S = Salidas de agua (m³/año)
ΔV = Cambio de almacenamiento (m³/año)
(Sobre-explotación = ΔV, es negativo)

Método de abatimiento y coeficiente de almacenamiento

$$\sum_{i=1}^{nc} a_i h_i S_i = \Delta V \quad (5.2)$$

Dónde: a_i = Elemento de área (m²) con:
 h_i = Evolución media (m/año),
 S_i = Coeficiente de almacenamiento (en acuíferos confinados) o rendimiento específico (en acuíferos libres) (adimensional),
nc = Número de elementos en que se divide el área de balance,
ΔV = Cambio de almacenamiento (m³/año)
(Sobre-explotación = ΔV, es negativo)

5.9.1 Método del Balance Hidrológico; Entradas de agua al acuífero (1-2):

$$E = (V_P - V_{ETR} - V_E) + R_{ia} + R_{ipu} + E_H \quad (5.3)$$

Dónde:

V_p = Volumen llovido,

$$V_p = \sum_{i=1}^{nc} P_i a_i \quad (5.4)$$

P_i = Precipitación del elemento de área i ,

a_i = Elemento de área i del acuífero ,

V_{ETR} = volumen evapotranspirado,

$$V_{ETR} = \sum_{i=1}^{nc} (ETR_i) a_i \quad (5.5)$$

ETR_i = Evapotranspiración del elemento de área i ,
determinado por el método de Turc,

V_E = Salidas superficiales netas del acuífero,

$$V_E = Ce \sum_{i=1}^{nc} P_i \quad (5.6)$$

Ce = Coeficiente de Escurrimiento, determinado según la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CNA-2000)

Método del Balance Hidrológico; Entradas de agua al acuífero (2-2):

$$E = (V_P - V_{ETR} - V_E) + R_{ia} + R_{ipu} + E_H \quad (5.7)$$

Dónde:

R_{ia} = Pérdidas por infiltración por uso de agua superficial y subterránea en la agricultura,

$$R_{ia} = (0.38)V_{agr} \quad (5.8)$$

V_{agr} = Volumen de agua usado en agricultura,

- **R_{ipu} = Pérdidas por fugas en las redes en el uso público urbano**

$$R_{ipu} = (0.30)V_{pu} \quad (5.9)$$

V_{pu} = volumen de agua de uso público urbano

- **E_H = Entradas Horizontales por flujo subterráneo**

$$E_H = \sum_{j=1}^{nc} L_j T_j i_j ; \quad (5.10)$$

L_j = Ancho de la celda,

T_j = Transmisividad, determinada mediante pruebas de bombeo,

i_j = Gradiente hidráulico,

$$i_j = \frac{dh}{ds} \approx \frac{h_{j+1} - h_j}{\Delta s}$$

h_j = Abatimiento , obtenido de pozos de observación

5.9.2 Método del Balance Hidrológico; *salidas de agua del acuífero:*

$$S = V_{EAS} + V_{DNC} + S_H \quad (5.11)$$

Dónde:

V_{EAS} = Volumen total de extracción de agua subterránea mediante pozos de bombeo.

V_{DNC} = Descarga natural comprometida (usualmente de manantiales para diferentes usos).

- **S_H = Salidas Horizontales por flujo subterráneo,**

$$S_H = \sum_{j=1}^{nc} L_j T_j i_j \quad (5.12)$$

L_j = Ancho de celda,

T_j = Transmisividad, determinada mediante pruebas de bombeo,

i_j = Gradiente hidráulico,

$$i_j = \frac{dh}{ds} \approx \frac{h_{j+1} - h_j}{\Delta s} \quad (5.13)$$

h_j = Abatimiento , obtenido de pozos de observación

5.9.3 Método de Abatimientos y Coeficiente de Almacenamiento

$$\sum_{i=1}^{nc} a_i h_i S_i = \Delta V \quad (5.14)$$

Dónde:

a_i = Elemento de área del Acuífero (m^2)

h_i = Abatimiento (m/año),

(La medida de éste parámetro requiere el monitoreo sistemático de los pozos de observación o de piezómetros si es posible)

S_i = Coeficiente de almacenamiento (acuíferos confinados) o rendimiento específico (acuíferos libres) (adimensional),

(Este coeficiente es muy variable espacialmente y se determina mediante pruebas de bombeo con pozos de observación), (adimensional).

ΔV = Cambio de almacenamiento de agua en el acuífero ($m^3/año$)
(Sobre-explotación = ΔV es negativo)

5.10 Modelación hidrogeológica y generación de SIG del acuífero

Para poder realizar el modelamiento hidrogeológico del acuífero Cuautitlán-Pachuca se utilizara el software Visual MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) el cual permite modelar el flujo subterráneo del agua y hacer estimaciones sobre los escenarios de evolución del nivel de agua, así como los diferentes escenarios de recarga.

También se generara un sistema de información geográfica del acuífero, con el uso del software AutoCAD 2012. Con el manejo de estas imágenes se podrá caracterizar el acuífero de forma geográfica e hidrogeológica.

5.10.1 Selección del software a utilizar

Los modelos son herramientas frecuentemente utilizadas en el estudio de las aguas subterráneas. En general son aplicados para simular o predecir el flujo del agua subterránea y en algunos casos el transporte de contaminantes. Actualmente en el mercado existen una gran cantidad de programas para resolver la ecuación de flujo del agua subterránea de Darcy y la ecuación de transporte de solutos.

Las ecuaciones que gobiernan las aguas subterráneas usualmente son resueltas de forma analítica o numérica. Los modelos analíticos contienen soluciones de las ecuaciones de campo, continuas en espacio y tiempo. En los modelos numéricos se obtiene una solución discreta en ambos dominios de espacio y tiempo usando aproximaciones discretas gobernadas por ecuaciones diferenciales parciales.

Variados métodos de solución numérica son utilizados en los modelos de aguas subterráneas. Entre los más empleados se destacan el método del elemento finito, el método de diferencias finitas y el método del elemento analítico. Todos tienen sus ventajas y desventajas con respecto a la

disponibilidad, costo, aplicabilidad, amigable con el usuario y conocimiento del usuario. (Kumar, 2002).

Tomando en cuenta lo que menciona Kumar (2002) en su nota técnica en donde dice: “El mejor método para eliminar o reducir los errores en la modelación es aplicar un buen juicio hidrogeológico y cuestionar los resultado de las simulaciones del modelo“. Se podría trabajar con la mayoría de los programas para modelar el acuífero de este trabajo, exceptuando a los que solo modelan el transporte de contaminantes ya que no es objetivo del mismo. Destacan tres programas en particular por ser los más usados a nivel internacional:

Groundwater Modelling System (GMS), es un sofisticado y extenso software para la modelación de agua subterránea, provisto de herramientas para cada fase de la simulación incluyendo caracterización del sitio, desarrollo del modelo, calibración, post procesamiento y visualización. Soportado en los métodos de diferencias finitas y elemento finito en 2 y 3 dimensiones. La única desventaja que tiene el software es su alto costo.

Groundwater Vistas (GV), es un sofisticado graficador con una interface para modelar en tres dimensiones el flujo y transporte de agua subterránea. Une el diseño del modelado del sistema con una gran cantidad de herramientas para el análisis gráfico. Se basa en el método de las diferencias finitas y los resultados del modelo son presentados usando contornos, sombras de contorno, vectores de velocidad y un análisis minucioso del balance de masas. Tiene un costo accesible.

MODFLOW, es un modelador en tres dimensiones, originalmente desarrollado por el U.S. Geological Survey (McDonald y Harbaugh, 1988). Usa un esquema de bloque central de diferencias finitas para la zona saturada. Este programa es muy amigable, y presenta ventajas como son las grandes facilidades para la preparación de los datos, comodidad en el cambio de datos de forma estándar, la existencia de una gran cantidad de experiencias mundiales, un desarrollo continuo de nuevas mejoras, la disponibilidad del código fuente y un costo bajo.

De estos tres programas se considera el MODFLOW como el más adecuado para simular el acuífero, debido a su bajo costo y a su continuo desarrollo de mejoras. Por ello se ha utilizado mucho a nivel mundial y se cuenta con una gran cantidad de experiencias.

5.11 Modelo matemático del acuífero Cuautitlán – Pachuca

La información de las características hidrogeológicas del modelo conceptual, se toman como base de partida para introducir datos en el software Visual MODFLOW 4.2 y construir el modelo matemático del flujo del agua subterránea. Las bases para el diseño del modelo fueron las siguientes:

- Transmisividad, almacenamiento y su distribución espacial,
- La tasa de la recarga vertical,
- Las condiciones de frontera,

5.11.1 Generación del modelo matemático

El programa Visual MODFLOW 4.2, emplea el método de diferencias finitas para resolver la ecuación de flujo en derivadas parciales (McDonald y Harbaugh, 1984), obtenida a partir de la ley de la conservación de la masa y la ley de Darcy.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] \pm Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.15)$$

Dónde: h es altura del espesor saturado del acuífero, K_x , K_y y K_z son la conductividad hidráulica en tres dimensiones (x , y , z), Q es el gasto y S_s es el coeficiente de almacenamiento.

El procedimiento de introducción de los datos hidrogeológicos en el software para llevar a cabo la simulación de los distintos escenarios se dividió en 4 etapas.

5.11.2 Discretización horizontal y vertical

Consistió en definir los límites del modelo y localización geográfica del acuífero, así como su profundidad y las capas (diferentes profundidades) con que se

trabajaré. Para los límites se utilizaron los publicados por la CONAGUA en el 2009 en el Diario Oficial de la Federación (DOF), como ya se mencionó.

El área del modelo se discretizó usando una malla rectangular, uniforme compuesta por 9744 elementos con 84 filas y 116 columnas. Las celdas de la malla son asignadas con dimensiones uniformes $D_{rj} = D_{ci} = 1000$ m. Se asignó la elevación del terreno como la frontera superior de la primera capa, de acuerdo a los modelos digitales de elevación elaborados por INEGI en 2005.

El origen en coordenadas UTM fueron 2, 153,000 de latitud norte y 447,000 de longitud oeste, como se muestra en la Figura 21. Consta de celdas activas e inactivas; estas últimas se localizan generalmente en los alrededores del límite del acuífero, por lo cual el modelo contiene propiamente a todo el acuífero con celdas activas. Para el caso de las formaciones geológicas que se consideran básicamente impermeables se les asignó un coeficiente de conductividad hidráulica muy bajo, como en las partes altas de la sierra de Pachuca.

El área total del modelo es de 9744 km^2 , de los cuales 3900 km^2 corresponden a celdas activas, es decir, prácticamente los 3893 km^2 de extensión del acuífero, tal como se observa en la misma Figura 21, donde también se aprecia que el límite del acuífero coincide sensiblemente con el límite de las áreas activas. Conviene señalar que el límite de la zona de influencia del acuífero en su partes norte y poniente, coinciden a su vez con el parteaguas de la cuenca del valle de México, y que en su parte sur y oriente sus límites son sensiblemente iguales a los parteaguas topográficos de las regiones hidrológicas denominadas Ciudad de México, Apan y Tecocomulco.

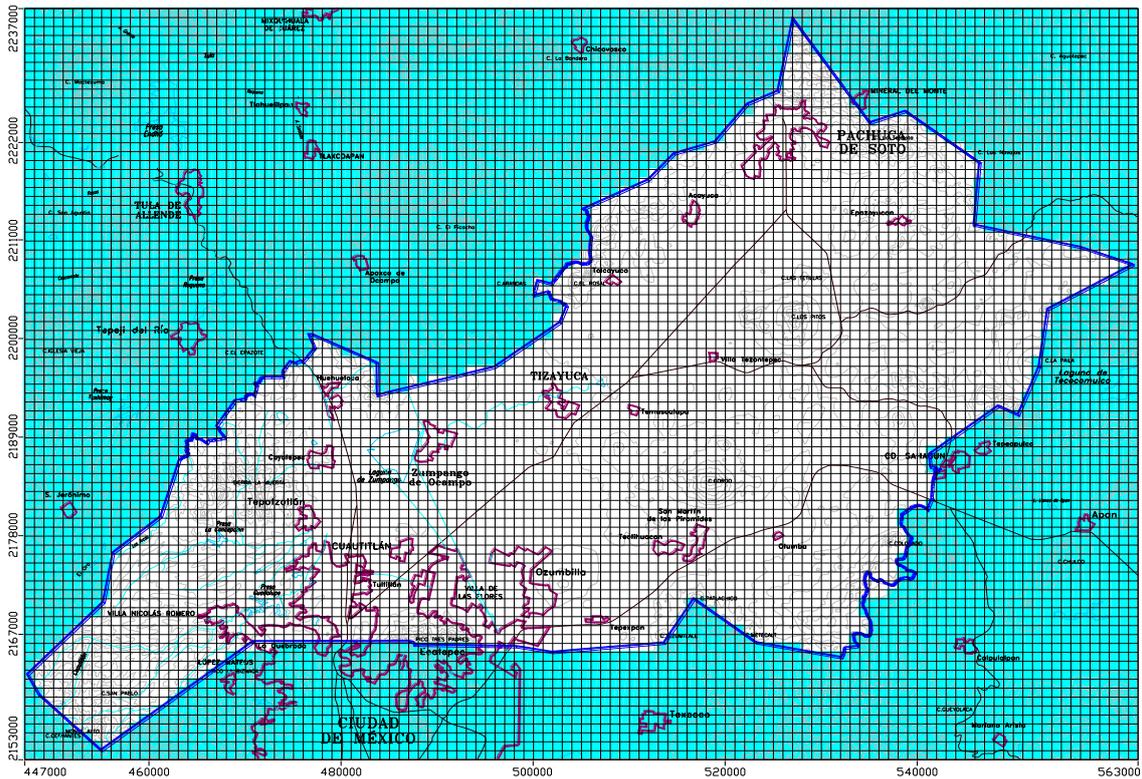


Figura 21. Discretización espacial del acuífero Cuautitlán-Pachuca

Para la discretización vertical se consideró la geología disponible (Figura 21); en este sentido el modelo quedó dividido en tres capas. La primera contiene a los materiales lacustres y aluviales de relleno del valle, que corresponden básicamente al medio granular donde el acuífero es de tipo libre. La capa 2 se relaciona con los materiales tanto de los basaltos, andesitas y tobas, que en algunas zonas afloran, con materiales granulares interdigitados con ellos; el acuífero contenido en esta capa constituida por materiales de origen ígneo y sedimentario se considera del tipo semiconfinado. La capa 3 constituye el basamento que se correlaciona con las calizas marinas del Cretácico, localizadas según perforaciones profundas hasta más de 2000 m de profundidad; en este sentido se ha observado que sus límites alcanzan altitudes que llegan a ser del orden de los 1500 msnm, cabe destacar que las calizas perforadas en los pozos profundos que alcanzaron hasta 3200 m se han correlacionado con las formaciones conocidas como Xochicalco, Orizaba, El Doctor y Morelos, algunas de las cuales afloran en los estados de México, Morelos, Hidalgo y Puebla, colindantes con la cuenca del valle de México. Las fronteras laterales del acuífero están representadas por las mismas rocas

volcánicas antiguas que ocupan los núcleos de las serranías circundantes a la planicie.

La Figura 22 muestra una sección del modelo del valle de Cuautitlan-Pachuca en sentido E-W y la Figura 23 presenta una sección con orientación N-S, donde se pueden apreciar las variaciones de las capas.

Desde un punto de vista temporal, el modelo contempla para su calibración un lapso de tiempo de 20 años, que corresponde al período 1990-2010. Este período se seleccionó atendiendo a la información disponible sobre extracciones, ya que sólo se cuenta con el censo completo de aprovechamientos subterráneos del año de 1990 y corroborado por datos del 2010. Asimismo, se analizaron cuatro períodos de esfuerzo, 10, 20, 30 y 40 años (3650, 7300, 10950 y 14600 días), correspondientes a los años 2000, 2010, 2020 y 2030.

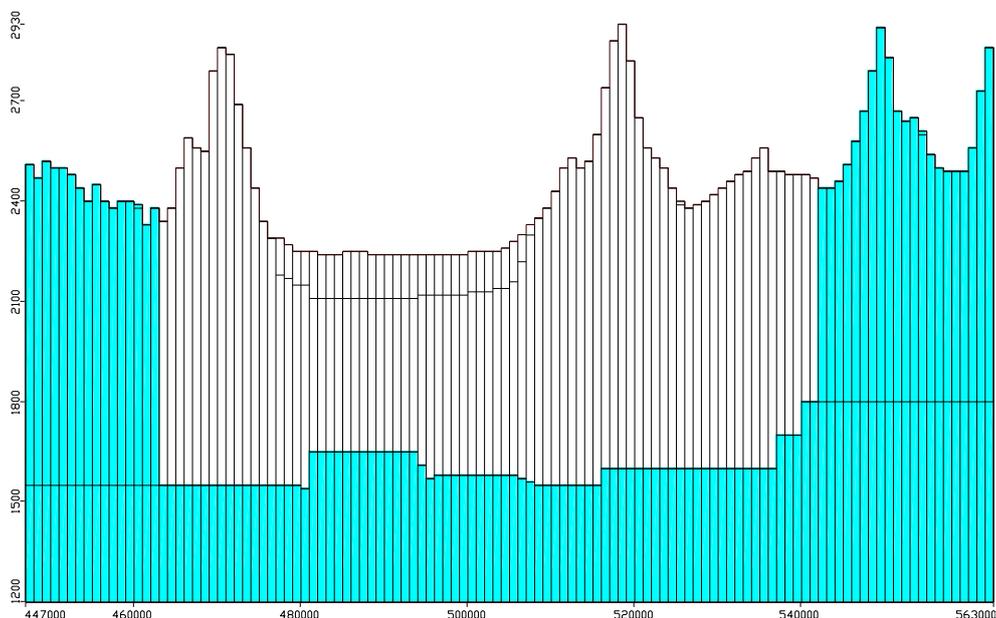


Figura 22. Sección hidrogeológica E-O

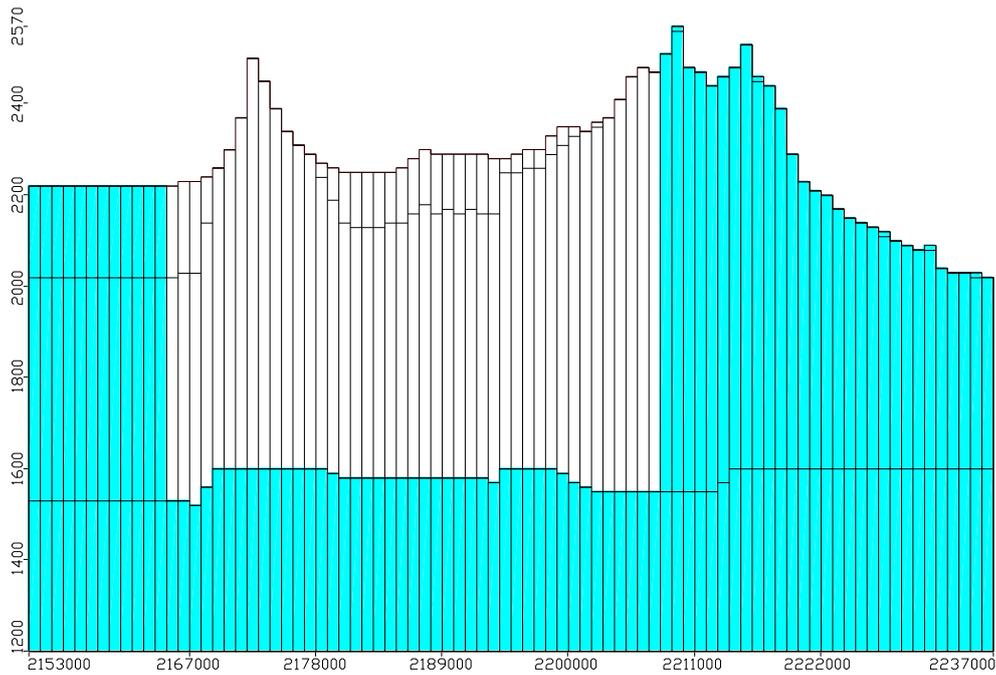


Figura 23. Sección hidrogeológica N-S

Extracciones de agua subterránea

Los bombeos de agua subterránea prácticamente se han mantenido iguales durante todo el período de calibración, ya que por un lado no se han autorizado extracciones adicionales dentro de ese período, y por otro, los sistemas de pozos para abastecimiento de agua potable, que extraen los mayores volúmenes y que están operados por diversos organismos estatales y federales, tampoco han incrementado su extracción, existiendo solamente variaciones relativas durante la operación de los mismos ya que existen compromisos de entrega de agua en bloque y suministro de ella a diversas poblaciones de la región que no pueden variar significativamente; por tanto, tampoco han disminuido dichas extracciones.

En cuanto a los bombeos para uso agrícola y otros, además de ser bajos en comparación con los destinados al uso público urbano, se han mantenido relativamente en forma constante. El volumen de extracción de acuerdo al censo de 1990 realizado por la GRAVAMEXSC fue de 587.6 hm³/año y de 751.28 hm³/año en 2010 de acuerdo al balance.

De acuerdo a lo anterior, el modelo se efectuó con los cuatro períodos de esfuerzo citados anteriormente, manteniendo los caudales constantes.

El número de aprovechamientos subterráneos con los que se realizaron dichas extracciones fue de 1094; sin embargo, el número de pozos operando es sensiblemente menor: 867 pozos activos (CEAA, 2009); En la Figura 24 se muestra la distribución de pozos de extracción.

Recargas

En el modelo de simulación del acuífero, se contemplaron las recargas que recibe el sistema en diferentes formas y atendiendo a diversas acciones, lo anterior en base a información de la propia CNA.

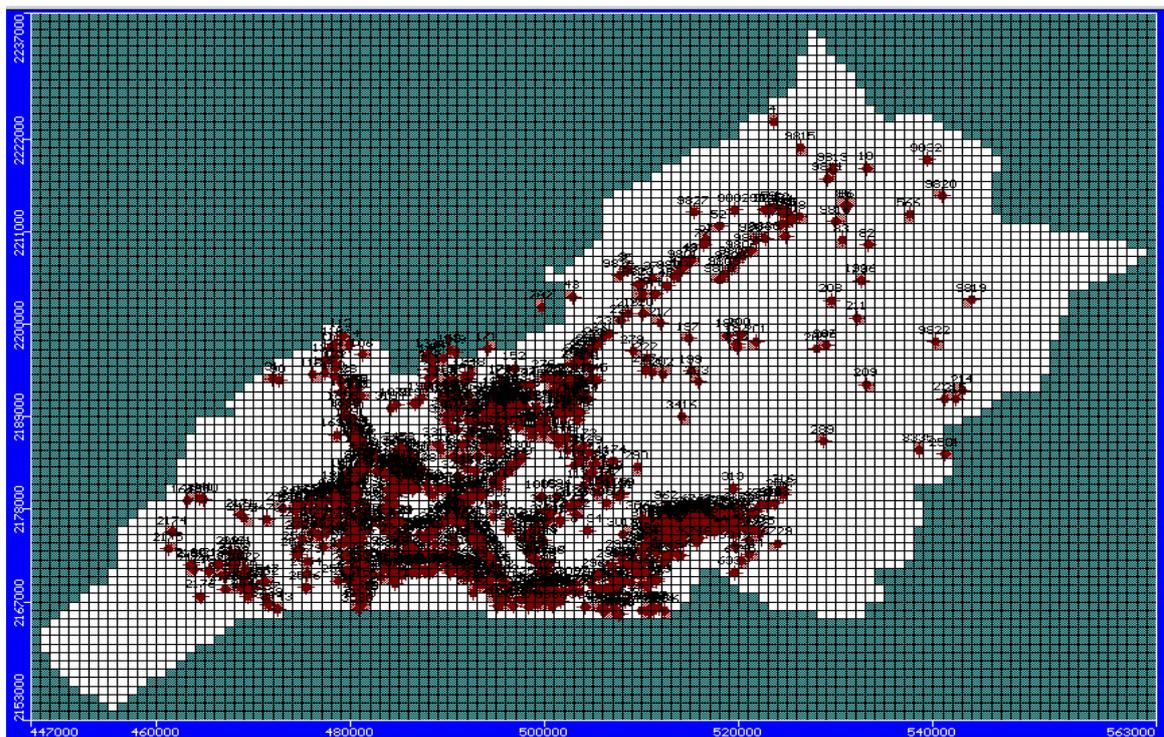


Figura 24. Localización de pozos de extracción acuífero Cuautitlán-Pachuca

La principal recarga que recibe el acuífero en forma natural se debe a los volúmenes provenientes de la infiltración de agua de lluvia que se presentan en el área de influencia del mismo; asimismo, el acuífero recibe una recarga por flujo horizontal subterráneo proveniente de la zona de Apan como se puede observar en las configuraciones de curvas de igual elevación del nivel estático

señaladas en planos elaborados por la propia GRAVAMEXSC; otro tipo de recargas que se consideraron en el modelo fueron de carácter inducido, las cuales provienen de una parte de los volúmenes de agua que se emplean en el riego, ya sea de origen subterráneo, superficial y de reuso. De igual manera se consideraron las recargas debidas a las fugas de los sistemas de abastecimiento locales, sin tomar en cuenta aquellos volúmenes que se exportan al Distrito Federal y que son del orden de 100 hm³/año.

Los índices de infiltración considerados se obtuvieron básicamente al aplicar la ecuación de conservación de la masa, de una retroalimentación entre el balance de aguas subterráneas y durante la calibración del propio modelo, en donde las celdas activas de las partes altas contemplaron exclusivamente recarga por lluvia, mientras que en las zonas de valle algunas celdas, además de considerar la recarga por lluvia, incluyeron recargas inducidas por la irrigación, así como en zonas urbanas donde se manejan volúmenes importantes de agua debido a fugas en la red de agua potable y alcantarillado. En la Figura 25 se muestra la distribución de las recargas al acuífero que se consideraron en el modelo. En el Cuadro 12 se muestran los valores empleados para la estimación de la recarga.

Cuadro 12. Láminas de recarga empleadas en el modelo de simulación del acuífero Cuautitlán-Pachuca

Recargas por zona	m/día	Color	
Zona urbana (área poniente)	8.93E-04	Verde claro	
Zona urbana (área central y oriente)	1.64E-03	Rojo	
Zona de valle fuera área urbana y riego	1.44E-04	Azul	
Zonas de Riego	1.06E-03	Verde	
Zonas altas	1.31E-04	Blanco	

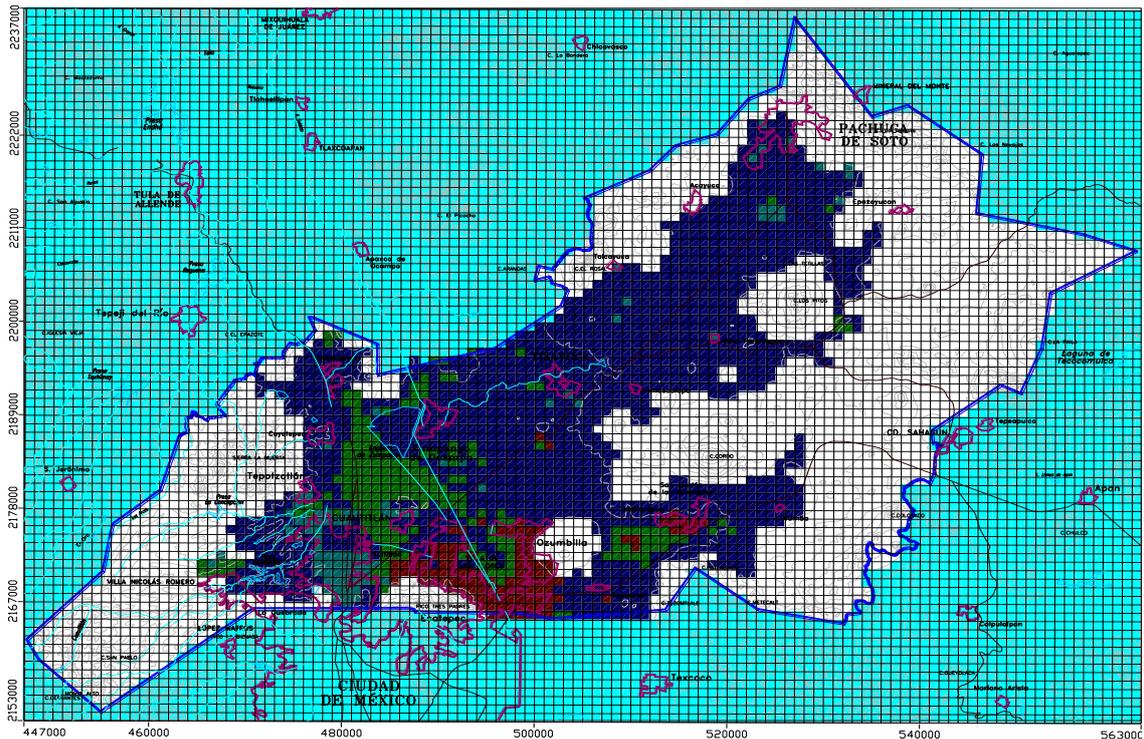


Figura 25. Distribución de las recargas en el acuífero Cuautitlán-Pachuca

Parámetros de conductividad hidráulica y de almacenamiento

Para el parámetro de conductividad hidráulica “k”, atribuida al modelo, inicialmente se utilizaron los valores obtenidos de información recopilada en la CNA, como pruebas de bombeo y de información consultada para el tipo de materiales que conforman el acuífero. Para obtener el valor de la conductividad hidráulica a partir de la transmisividad se utilizó la ecuación siguiente:

$$T = kb \quad (5.16)$$

En donde:

- T = transmisividad,
- k = conductividad hidráulica, y
- b = espesor saturado de la capa.

De la ecuación anterior se despeja la conductividad hidráulica considerando los espesores estimados para las capas.

Una vez revisados los datos de conductividades manejados en los estudios anteriores, se utilizaron en forma preliminar y posteriormente durante el proceso de la calibración, se requirió aplicar el método de ensayo y error para asignar las conductividades hidráulicas con las cuales se logró dicha calibración. Los valores finalmente utilizados se muestran en el Cuadro 13 y en la Figura 26 se presenta la distribución espacial de este parámetro con el cual se logró la calibración.

Debido a que se tiene poca información sobre los coeficientes de almacenamiento, se aplicaron los valores consultados en estudios generales elaborados en la CNA, considerando siempre que fueran de tipo libre y semiconfinados. Posteriormente y durante la calibración, además de tener una retroalimentación con el balance desarrollado, se obtuvieron los valores finales que representan al acuífero con los cuales se logró la calibración. Para la determinación final de este parámetro se aplicó también el método de ensayo y error. El cuadro 14 y la Figura 27 muestran los valores y la distribución de los coeficientes de almacenamiento empleados en el modelo de este acuífero.

Condiciones iniciales y de frontera

Las condiciones de frontera incluyen la geometría del modelo, así como los valores de las cargas hidráulicas iniciales y finales. Las condiciones iniciales consideradas para la elaboración del modelo fueron las de 1990, tal como ya se mencionó. La Figura 28 muestra la configuración del nivel estático de ese año.

Cuadro 13. Conductividades hidráulicas en m/d

Property #	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]	Color
1	3	3	0.3	
2	0.001	0.001	0.001	Blue
3	0.002	0.002	0.002	Green
4	0.03	0.03	0.003	Teal
5	4	4	0.45	Red
6	0.1	0.1	0.01	Purple
7	0.5	0.5	0.05	Olive
8	5.5	5.5	0.55	Grey
9	10	10	0.5	Dark Grey
10	5	5	0.5	Blue
11	4.5	4.5	0.45	Bright Green
12	0.5	0.5	0.05	Cyan
13	0.7	0.7	0.07	Red
14	0.2	0.2	0.02	Magenta
15	0.8	0.8	0.08	Patterned Grey
16	0.5	0.5	0.05	Patterned Green
17	1	1	0.1	Patterned Teal

Cuadro 14. Valores de los coeficientes de almacenamiento acuífero Cuautitlán-Pachuca

Property #	Ss [1/m]	Sy [-]	Eff.Por[-]	Tot.Por[-]	Color
1	0.0001	0.28	0.15	0.15	
2	0.0001	0.01	0.15	0.15	Blue
3	0.0001	0.3	0.15	0.15	Green
4	0.0001	0.25	0.15	0.15	Teal
5	1E-5	0.1	0.15	0.15	Red
6	1E-5	0.05	0.15	0.15	Purple
7	0.0001	0.2	0.15	0.15	Olive
8	0.0001	0.05	0.15	0.15	Grey

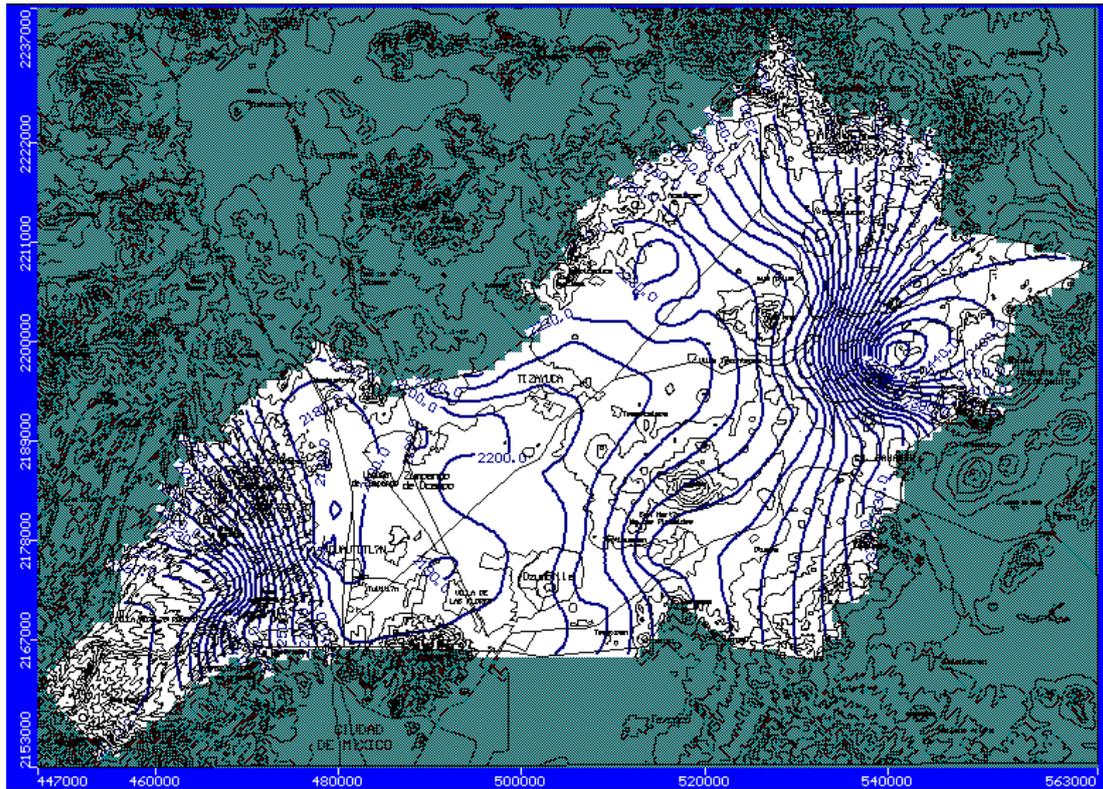


Figura 28. Curvas de igual elevación del nivel estático 1990

Cabe mencionar que para simular las recargas y salidas por flujo horizontal subterráneo se utilizó el paquete GHB, denominado General Head Boundaries, el cual agrega términos de carga de frontera. La Figura 29 muestra la ubicación de las celdas donde se aplicaron estos términos. Las entradas se ubicaron en la parte adyacente a la zona de Apan y salidas en la zona de Tepexpan donde se tiene una pequeña comunicación al sur de esta área. No se utilizó este paquete para simular las entradas de agua provenientes de las partes altas por encontrarse activa dicha zona en el modelo.

La calibración se realizara para los niveles observados en el año 1990, por ser este el año correspondiente al censo más completo realizado por la CONAGUA a través de GRAVAMEX, (1990), en el que se tienen registrados volúmenes de extracción.

Para determinar el error obtenido en el programa existen varias formas de expresar la diferencia entre los niveles simulados y calculados: Error Medio, Medio Absoluto y Raíz cuadrática media del error.

Error medio: Es el promedio de las diferencias entre las cargas medidas y las simuladas para n valores de calibración:

$$EM = \sum_{i=1}^n (H_M - H_{OBS}) \quad (5.17)$$

Error medio absoluto: Es el promedio del valor absoluto de las diferencias entre las cargas medidas y las simuladas para n valores de calibración:

$$EM_{ABS} = \sum_{i=1}^n (H_M - H_{OBS}) \quad (5.18)$$

La raíz del error cuadrático medio o desviación estándar es la raíz cuadrada del promedio del cuadrado de las diferencias entre las cargas medidas y observadas para n valores de calibración:

$$RMS = \sum_{i=1}^n (H_M - H_{OBS}) \quad (5.19)$$

El porcentaje del error (PE) o el cociente de la desviación estándar y la pérdida total de carga del sistema (PTCS):

$$PE = \frac{RMS}{(H_{MAX} - H_{MIN})} \times 100 \quad (5.20)$$

5.11.4 Validación del modelo

La validación se realizara para un segundo conjunto de datos de niveles observados, el año elegido para este propósito es el 2000, por considerarlo,

dentro del conjunto de años de registro posteriores a 1990, como el año en que la configuración piezométrica tiene el comportamiento más lógico respecto al de 1990. En los otros años, se tienen configuraciones tan variadas, que es posible atribuirlos errores en la toma de datos.

5.12 Metodología para evaluar la sustentabilidad

La sustentabilidad considera el estado de condición (vinculado al uso y estilo) del **sistema ambiental** en el momento de producción, renovación y movilización de sustancias o elementos de la naturaleza, minimizando la generación de procesos de degradación del sistema (tanto en el presente como en el futuro). En este sentido la sustentabilidad de los recursos hídricos contempla las siguientes dimensiones:

- **Dimensión físico-biológica:** considera aquellos aspectos que tienen que ver con preservar y potenciar la diversidad y complejidad de los ecosistemas, su productividad, los ciclos naturales y la biodiversidad.
- **Dimensión socio-política:** considera el acceso equitativo a los bienes de la naturaleza, entre géneros y culturas, entre grupos y clases sociales, refiriendo a la participación directa de las personas en la toma de decisiones para asumir nuevos comportamientos y compromisos alrededor del agua; así como mejorar las estructuras de gestión de los bienes públicos y el contenido de la democracia.
- **Dimensión económica:** incluye todo el conjunto de actividades humanas relacionadas con la producción, distribución y consumo de bienes y servicios.

Contemplando estas dimensiones se tendrá la base para encaminar procesos participativos en los que la toma de decisiones para el uso, gestión y desarrollo del agua, así como el establecimiento de funciones sea derecho y obligación de los usuarios.

5.12.1 Definición de los indicadores de sustentabilidad

El acuífero se analizó desde dos escenarios distintos, el primero comprendió un periodo de tiempo de 1970 a 1990 (sistema de referencia) y el segundo de

1991 a 2010 (sistema alternativo), de manera que pudieran ser comparados para evaluar el estado de sustentabilidad.

Dicho ejercicio se hizo con la ayuda del “Marco para la evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales incorporando indicadores de sustentabilidad (MESMIS)” desarrollada por Masera et al. (1999). El proceso para la definición y medición de los 14 indicadores (6 ambientales, 5 económicos y 3 sociales) de este trabajo tuvo que ajustarse a una serie de principios o atributos de los sistemas sustentables.

En el marco MESMIS, el conjunto de indicadores medidos y monitoreados puede considerarse como un termómetro de los atributos de sustentabilidad para un sistema socioambiental específico, como lo fue para el caso del acuífero Cuautitlán-Pachuca.

El conjunto de indicadores y sus formas de medición fueron determinados por la escala y el objetivo de la evaluación, además de los aspectos que debilitan o fortalecen la sustentabilidad, es decir, cada indicador corresponde a los atributos relacionados con: a) Productividad, b) Estabilidad, resiliencia y confiabilidad, c) Adaptabilidad, d) Equidad y e) Autogestión (Ver Cuadro 15).

5.12.2 Determinación de los indicadores y valores óptimos

El valor óptimo del indicador de volumen de extracción se obtuvo utilizando el software Visual Modflow (McDonald y Harbaugh, 1988), el cual permite realizar simulaciones de flujo subterráneo al mantener una extracción constante y variar el volumen de recarga; dando como resultado un volumen racional de extracción de 400 Hm³/año.

Para la recarga del acuífero se tomó como valor óptimo 450 Hm³/año que es un valor mayor al registrado por el Diario Oficial de la Federación en el 2009 (356.70 Hm³/año); y fue estimado con base en la simulación de escenarios al igual que en el caso de la extracción. De acuerdo con la publicación “Estadísticas del Agua en México”, (2011), la agricultura utiliza tres cuartas

partes del agua que se consume a nivel mundial; la industria utiliza 15% y el uso en los hogares tan solo 10%.

Dentro del acuífero Cuautitlán-Pachuca, el 25.69% de los pozos se usan para la agricultura, esto equivale a 55.91 Hm³/año, valor que fue tomado como óptimo (CEAA, 2009). Se tiene registro de 867 pozos, de los cuales 90 (8.23%) corresponden al estado de Hidalgo, extrayendo un caudal aproximado de 3,425.32 l/s (13.92%). En contraste, el Estado de México extrae 20,871.40 l/s (86.08%), con 777 (71.02%) pozos activos (CEAA, 2009). De manera que para determinar el valor óptimo de número de pozos fue necesario considerar los pozos activos (867), además del volumen de extracción y recarga del acuífero, por lo que se estimó el número de pozos óptimo en 694 pozos. Para el caso de la calidad del agua subterránea, el parámetro con que se evaluó fue la salinización determinada por los sólidos totales.

De acuerdo a su concentración las aguas subterráneas se clasifican en dulces (<1,000 mg/L), ligeramente salobres (1,000 a 2,000 mg/L), salobres (2,000 a 10,000 mg/L) y salinas (>10,000 mg/L) (EAM, 2011). El límite entre el agua dulce y la ligeramente salobre coincide con la concentración máxima señalada por la modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127- SSA1-1994, considerando lo anterior se tomó un valor óptimo de 800 mg/L de sólidos totales. En cuanto al cambio de uso de suelo, el 51.16% corresponde a área urbana, mientras que el uso agrícola ocupa un 48.83% (PND, 2007); de manera que para mantener un equilibrio, el valor óptimo propuesto de superficie con cambio de uso de suelo (agrícola a público urbano) fue de 50 ha/año.

En relación al costo de reúso de agua, el m³ de agua tratada varía de entre \$1.48 y \$5.00 dependiendo del nivel y tipo de tratamiento (Escalante et al., 2003). De manera que el valor óptimo para este indicador fue de \$1 por m³. En cuanto a los costos de extracción de agua, estos son regulados por las tarifas de bombeo de agua. Los precios en el consumo de energía eléctrica incluyen: servicios públicos, uso agrícola, así como tarifas generales para industriales (CFE, 2010). El KWH tuvo un valor promedio en los últimos veinte años de

menos de 0.80 centavos, considerando lo anterior se tomó como costo óptimo para el indicador un valor de \$1/KWH.

La disponibilidad es el volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de una unidad hidrogeológica para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas (NOM-011-CNA-2000). De acuerdo a lo publicado en el Diario Oficial de la Federación en 2009, el acuífero no cuenta con disponibilidad de agua subterránea, al contrario tiene un déficit de 190 Hm³/año de manera que con base una simulación de escenarios mediante el uso del software Visual Modflow (McDonald y Harbaugh, 1988), se consideró como valor óptimo 50 Hm³/año. Con relación a la evolución del nivel estático, de acuerdo con registros históricos del CEEA y trabajo de campo (2010), se encontró que el abatimiento medio anual en el periodo de 1970 a 2010 fue de 2.1 m/año. Considerando lo anterior se tomó un valor de 0.5 m/año como el abatimiento óptimo.

En cuanto al consumo per cápita que se refiere a la cantidad adecuada de agua para consumo humano (beber, cocinar, higiene personal y limpieza del hogar) es de 50 L/hab/día, es decir, 18250 L/hab/día según lo publicado por la UNESCO, (2003). Sin embargo se consideró una cantidad mínima de 100 L/hab/día o 36500 L/persona/año como óptimo para el área urbana (dominante en la zona de estudio).

En referencia al valor económico del agua subterránea, éste se mide con los beneficios que genera o, en otras palabras, en los servicios que proporciona (Kemper, 2002). El costo promedio de un m³ de agua es de \$11.60 para uso público urbano y para agricultura es de \$3.00 debido al subsidio. De manera que se tomó como valor óptimo de costo de agua por m³ de \$12.00, es decir, un costo homogenizado sin importar el uso.

El nivel de participación de los usuarios se estimó a través de los Consejos Técnicos de Aguas subterráneas (COTAS) que están formados por todos aquellos que cuentan con un título de concesión por cada uso del agua y son

representados a través de un Consejo Directivo (Sandoval, 2004). De manera que el nivel de participación en la toma de decisiones por parte de los usuarios de acuerdo a su uso fue establecido en 100% como el valor óptimo.

Finalmente el índice de desarrollo humano (IDH), que permite medir como una sociedad mejora sus condiciones de vida a través de un incremento de los bienes con los que puede cubrir sus necesidades básicas (salud, educación, ingreso); un IDH con un valor de uno corresponde al máximo, mientras que cero establece que no existe avance. En el caso del acuífero Cuautitlán-Pachuca este índice se encuentra con un valor promedio de 0.86 (CONAGUA, 2009), sin embargo se consideró para este indicador un valor óptimo de 1 o 100%.

Ahora bien el sistema considerado en este trabajo y que comprendió dos periodos de tiempo, fueron seleccionados debido a que se contaban con datos históricos de esos años, sin embargo para poder implementar la metodología MESMIS para la determinación de la sustentabilidad en el acuífero Cuautitlán-Pachuca, fue necesario establecer valores ponderados puntuales para cada indicador en su respectivo subsistema.

Ahora bien en cuanto al volumen de extracción, los valores encontrados se obtuvieron de la comparativa del registro histórico de extracción en la zona comprendida por el acuífero Cuautitlán-Pachuca, y con base en lo publicado por el Diario Oficial de la Federación, 2009.

Para el volumen de recarga se consideraron valores calculados con base en las precipitaciones históricas y mediciones de la CONAGUA; y con lo publicado en el DOF (2009). Para el consumo de agua en la agricultura, se tomaron valores de registros históricos publicados por la CONAGUA (CONAGUA, 2011). El número de usuarios con pozo de agua para los dos periodos considerados fueron obtenidos de registros históricos del CEEA y CONAGUA.

En cuanto a la calidad química del agua, se tomaron las concentraciones de sólidos totales con base en estudios realizados por la CONAGUA (2011). El cambio de uso de suelo presentó una variación en la superficie promedio de 10 ha/año en el primer periodo analizado y 40 Ha/año en el segundo, lo anterior según datos históricos registrados en los planes de desarrollo del estado de México y de Hidalgo.

El costo de reúso de agua consideró un costo de \$5/L y \$2/L para cada sistema respectivamente con base en lo presentado por Escalante et al., (2003). En cuanto a los costos de extracción, se consideró un valor de \$0.8/KWH y de \$2.5/KWH de acuerdo a registros históricos de la CFE. En referencia a la disponibilidad de agua, se tomaron valores con base en cálculos según la metodología de la NOM-011 y registros históricos de la CONAGUA. Los valores considerados en la evolución del nivel estático, fueron obtenidos mediante mediciones en campo y registros históricos del organismo de cuenca del valle de México. En relación al consumo per cápita, se tomaron valores promedio de consumo durante los dos periodos analizados obtenidos con base en lo publicado por la UNESCO (2003). El valor económico del agua subterránea se obtuvo mediante estimaciones, tomando como base las cuotas de agua potable. Para determinar el grado de participación de los usuarios en la toma de decisiones, se tomó como base el COTAS del acuífero. Finalmente para el índice de desarrollo humano se consideró un grado de 40% y 86% para cada periodo respectivamente (CONAGUA, 2009).

5.12.3 Medición y monitoreo de indicadores

Un mismo indicador puede medirse de muchas maneras. En esta fase es muy importante que la medición implique características específicas en cuanto a: a) inversión en tiempo, infraestructura y recursos humanos, b) unidad de medición y c) el público objetivo. La segunda opción es de bajo costo pero los resultados, no se podrán utilizar en estudios científicos más específicos ni en modelos de simulación. De modo general los diversos métodos accesibles incluyen:

- La revisión bibliográfica, incluida la información que permita establecer tendencias en el comportamiento de los indicadores (método usado en este trabajo de investigación).
- Las mediciones directas
- Modelos de simulación
- Encuestas, entrevistas y técnicas grupales

La selección final de la intensidad y del tipo de métodos utilizados para la medición de indicadores dependerá de los recursos humanos y económicos disponibles para la evaluación. Sin embargo deben evitarse esquemas muy simples basados únicamente en la recopilación de información indirecta. En este caso, es mejor simplemente posponer la evaluación.

Técnicas para indicadores ambientales:

- Revisión bibliográfica extensa sobre características ambientales
- Mediciones directas
- Establecimiento de aparatos de medición fijos
- Elaboración de una matriz de coeficientes técnicos
- Utilización de modelos de simulación para determinar a largo plazo el comportamiento esperado del indicador cuantitativo.

Técnicas para indicadores sociales y económicos

- Revisión bibliográfica
- Levantamiento de encuestas familiares
- Entrevistas abiertas y semiestructuradas.

Fundamentalmente, una herramienta útil para la medición y el monitoreo de indicadores es la elaboración de una matriz de factibilidad Bell y Coudert (2005). En esta, el equipo debe definir:

- Los límites superior e inferior del indicador
- Si el indicador se relaciona con otro
- La unidad de medida
- Cuando, como y quien realiza la medición
- La confianza en obtener el resultado

Cuadro 15. Criterios de diagnóstico de indicadores de sustentabilidad

Atributo	Criterios de diagnóstico	Indicadores	Método de medición	Instrumento	Área de evaluación
Productividad	Eficiencia	1) Volumen de extracción	Volumen de extracción por pozo profundo	REPDA*	Ambiental
		2) Volumen de recarga	Volumen de recarga por lluvia	CONAGUA	Ambiental
		3) Consumo de agua en la agricultura	Volumen de agua destinado al riego	CONAGUA	Económico
Estabilidad, resiliencia y confiabilidad	Diversidad	4) Número de usuarios con pozo de agua de acuerdo a su uso	Número de usuarios con agua de acuerdo a su uso	CENSO DEL CEEA	Social
	Conservación de recursos	5) Calidad química de agua	Nivel de contaminación de las aguas	CONAGUA	Ambiental
		6) Cambio de uso de suelo	Superficie agrícola cambiadas a uso urbano	PND*	Ambiental
		7) Costos de reúso del agua	Precio por L reutilizado en la agricultura	Variaciones históricas en registros	Económico
	Uso de energía eléctrica	8) Costos de extracción	Precio por KW/h	CFE	Económico
Adaptabilidad	Evolución del acuífero	9) Disponibilidad	Volumen de agua disponible para extracción.	CONAGUA	Ambiental
		10) Evolución del nivel estático	Medición del nivel de agua en el acuífero.	Sondeos en campo y CONAGUA	Ambiental
Equidad	Distribución del agua	11) Consumo per cápita	Consumo de agua por habitante.	Según metodología UNESCO	Económico
Autogestión	Generación de recursos	12) Valor económico del agua	Costo de un m ³ de agua subterránea	Variaciones históricas en registros	Económico
		13) Participación social en toma de decisiones	Porcentaje de usuarios participando en reunión de cotas	COTAS*	Social
		14) Índice de desarrollo humano	Grado de incremento de bienes para mejora de vida	CONAGUA	Social

*Consejo técnico de aguas subterráneas, (COTAS), Plan Nacional de Desarrollo (2007-2012), Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comisión Estatal de Agua y Alcantarillado de Hidalgo (CEAA)

En el MESMIS se plantea la premisa de que la participación de los agentes involucrados en el manejo de recursos debe ocurrir desde la definición de los sistemas a evaluar, pasando por la formulación, la medición y la integración de indicadores, hasta la elaboración y puesta en marcha de la propuesta o políticas alternativas.

Cuadro 16. Criterios de diagnóstico utilizados para cubrir los atributos de sustentabilidad en sistemas socioambientales.

Atributos	Criterios de diagnóstico
Productividad	Retorno
Estabilidad	Eficiencia
Resiliencia	Diversidad
Confiabilidad	Conservación
Adaptabilidad	Distribución de costos y beneficios
Equidad	Participación
Autogestión	Capacidad de cambio e innovación
	Autosuficiencia
	Organización/control

De acuerdo con Sarondon, (2002) el proceso para la definición y medición de indicadores debe ajustarse a una serie de principios o atributos de los sistemas sustentables. En el marco MESMIS, el conjunto de indicadores medidos y monitoreados puede considerarse como un termómetro de los atributos de sustentabilidad para un sistema socioambiental específico. El conjunto de indicadores y sus formas de medición están determinados por la escala y el objetivo de la evaluación, además de los aspectos que debilitan a fortalecen la sustentabilidad.

Finalmente, no hay que perder de vista que el objetivo final de la evaluación no es la obtención del indicador o su valor correspondiente sino la respuesta que esta información genere entre los agentes sociales involucrados en el manejo de los recursos. En síntesis, lograr que los indicadores sean herramientas de cambio hacia sistemas más sustentables.

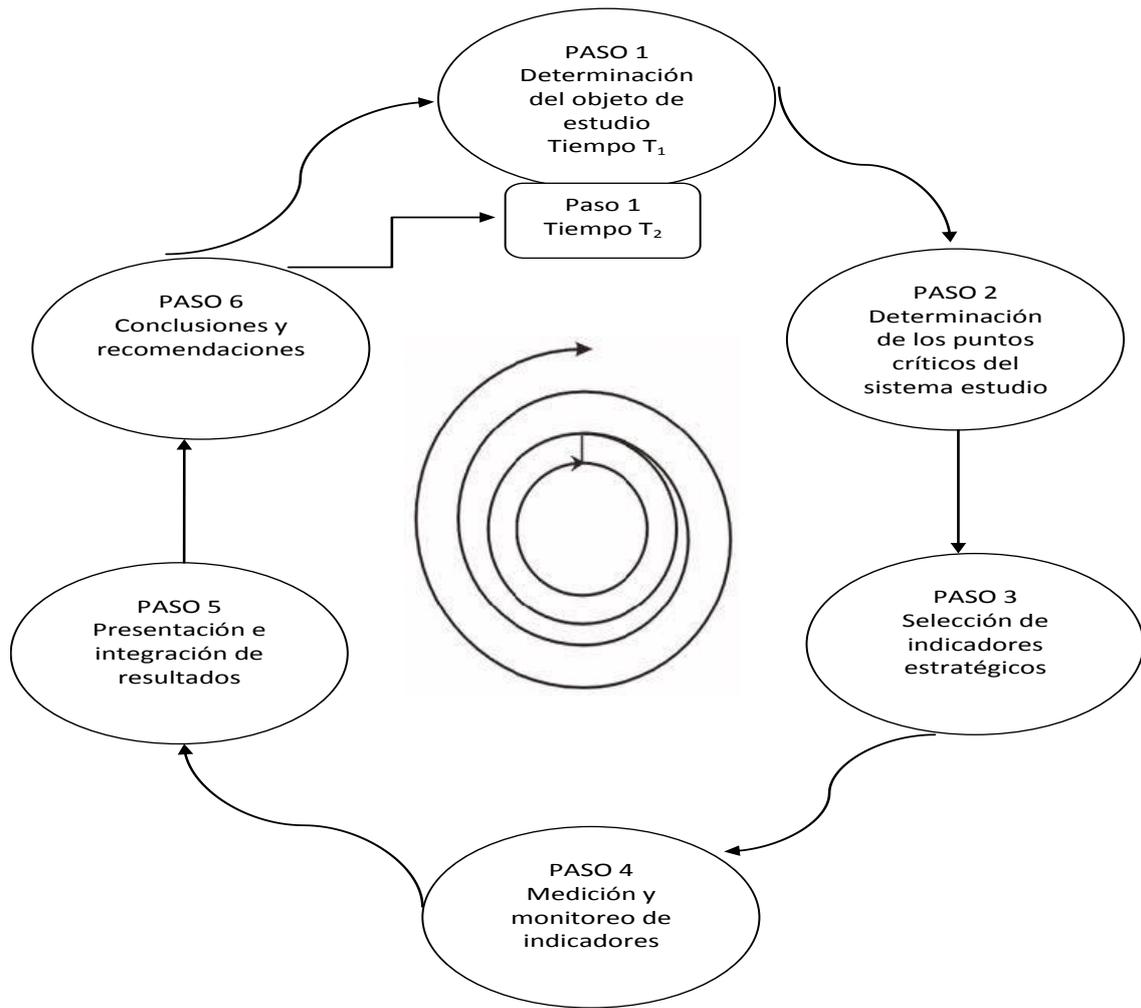


Figura 30. Ciclo de evaluación del MESMIS

6. RESULTADOS

6.1 Balance hidrológico

Para elaborar el balance que se presenta en este trabajo se consideró el límite establecido en el DOF, (2009). De acuerdo a este límite se obtuvo el área del valle y de las zonas altas que alimentan al acuífero. En el Cuadro 17 se consignan en forma resumida los parámetros que intervienen en dicho balance.

El área de valle resultó ser de 1680 km², y los restantes 2213 km² a las zonas altas; para obtener la recarga por lluvia en el área del valle y en las zonas altas, se consideraron por separado las láminas de precipitación que ocurren en ellas; así, para las zonas bajas, de acuerdo a la información climatológica se obtuvo un valor de 615 mm/año, y para las zonas altas fue de 685 mm/año, resultando un valor medio en toda el área del acuífero del orden de 655 mm/año. Esta lámina de lluvia por el área total que es del orden de 1680 km², y por el coeficiente de infiltración de 0.07 proporciona un volumen promedio total de lluvia de aproximadamente 115 hm³/año.

Para conocer inicialmente el orden de magnitud del coeficiente de infiltración por lluvia que se presenta en el acuífero, se realizó un balance de agua superficial con apoyo en la fórmula de Turc para determinar la evapotranspiración y dejar como incógnita a la infiltración, obteniendo un valor promedio del orden de 529.73 mm de lámina evapotranspirada, lo que conduce a un volumen anual del orden de 2062.24 hm³/año, y de acuerdo con las estimaciones de escurrimiento que se tienen, del orden de 299 hm³/año, el orden de magnitud de la infiltración se obtiene como a continuación se indica, después de aplicar el método de Turc para obtener la evapotranspiración potencial real (ETR):

$$ETR = P / (0.9 + (P/L)^2)^{0.5} \quad (6.1)$$

Dónde:

P = precipitación en metros

L = $300 + 25 \cdot T + 0.05 \cdot T^3$

T : Temperatura en °C

En nuestro caso la precipitación promedio es de 0.655 m/año y la temperatura promedio anual es de 14.7 °C, valores que una vez sustituidos en la ecuación dan un valor de 655 mm/año, que multiplicado por el área da un volumen de 2549.11 hm³/año. Por otro lado se tiene:

Infiltración = precipitación – evapotranspiración - escurrimiento

$$\text{Infiltración} = 2549.11 - 2062.24 - 299 = 187.85 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Dividiendo el volumen anual promedio infiltrado entre el volumen total precipitado en el área de la zona de estudio se obtiene un coeficiente de infiltración promedio del orden de 0.073. Este valor se retroalimentó tanto con la aplicación del balance geohidrológico como con el modelo de simulación para darle validez, obteniendo finalmente un valor promedio de 0.07. Para desarrollar el balance de aguas subterráneas, además de considerar la recarga natural por lluvia se tomaron en cuenta las recargas inducidas por la aplicación de volúmenes empleados en el riego, y por las fugas existentes en los sistemas de abastecimiento de agua potable. Los índices promedio que se manejan en diversos acuíferos del país donde se han realizado este tipo de estudios, atendiendo al tipo de cultivos, láminas de riego y clima son semejantes a los reportados en el Cuadro 20 donde se muestran los valores que finalmente se adjudicaron a cada uno de los índices considerados para obtener las recargas inducidas (I_2 , I_3 , I_4), y los volúmenes resultantes.

Respecto a los retornos generados por el uso de agua subterránea, en el uso público urbano se adoptó el coeficiente de 0.25 al suponer que del 30 al 40 % de las fugas que se dan en la red, del orden de la mitad contribuye como recarga inducida, además de que está aplicado sobre el volumen de 687.16 $\text{hm}^3/\text{año}$, ya que los restantes 105.56 $\text{hm}^3/\text{año}$ son transferidos fuera del área del acuífero. Cabe mencionar que de acuerdo con información a nivel nacional, los organismos operadores del agua tienen considerados índices ligeramente mayores debido a las fugas. Estos índices antes señalados fueron retroalimentados entre el balance de aguas subterráneas y el modelo que permitió la calibración del mismo

6.2 Balance hidrológico del acuífero 2010

Cuadro 17. Balance de aguas subterráneas 2010

BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, ACUÍFERO CUAUTITLAN-PACHUCA, MEX.					
Área total del acuífero				km ²	3,893
RECARGA					
Área de valle				km ²	1,680.0
Coeficiente		I_1			0.0729
Precipitación				mm/año	652.63
Recarga natural por lluvia				hm ³ /año	79.93
Entradas horizontales			E_h	hm ³ /año	115.85
Total de recarga natural				hm ³ /año	195.78
Exportaciones	Chiconautla	-31.536			
	CNA Cuautitlan_Pachuca	-233.3664			
	Suma	-264.9024			
Público Urbano(excluye Exportaciones)			I_2		0.25
Retorno del uso Público Urbano (incluye transf. al acuífero ZMCM)				hm ³ /año	105.56
Agrícola más otros			I_3		0.15
Retorno de riego, agua subterránea				hm ³ /año	7.29
Retorno total de aguas subterráneas					112.9
			I_4		0.25
Retorno por el uso de agua superficiales				142.8	hm ³ /año
Retorno total de aguas superficiales y de reuso					35.7
Retorno total					148.56
ENTRADAS TOTAL			R_t	hm ³ /año	344.34
DESCARGA					
Drenado pozos y manantiales				hm ³ /año	0.00
Evapotranspiración				hm ³ /año	0.00
Flujo subterráneo				hm ³ /año	0.00
Extracción total bruta				hm ³ /año	751.28
Agrícola				hm ³ /año	44.67
Público urbano				hm ³ /año	687.16
Industrial				hm ³ /año	15.51
Otros, incluye pecuario,multiple, servicios				hm ³ /año	3.94
DESCARGA TOTAL				hm ³ /año	751.28
Minado			DA	hm ³ /año	-406.94
Coeficiente de almacenamiento			S		0.161
Volumen drenado (m/año)			Vd	hm ³ /año	2,520.00
Abatimiento m/año				m	1.50
Extracción total neta					638.4
Recarga natural más retorno agua superficial y residual					195.8
Recarga por uso de agua superficial					35.7
Minado del acuífero					406.9
Extracción total bruta					751.3
Recarga total					344.3
Minado del acuífero					-406.9

Cuadro 18. Calculo de la evapotranspiración por método de Turc

CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN		
Area total del acuífero	3,893	Km ²
Area valle	1680.0	Km ²
Area zonas altas	2213	Km ²
Promedio anual de precipitación valle	0.62	m
Promedio anual de precipitación (zonas altas)	0.69	m
Vol precipitado	2,549	hm ³ /año
Promedio total anual precipitado	0.655	m
Temperatura	14.7	°C
	L=	826.33
	0.31L=	0.26
Condición si la precipitación<0.31L, entonces ETR=P		
Si P> 0.31L entonces continua aplicación de fórmula		
$(0.9+(P/L)^2)^{0.5}$	1.24	
ETR=	529.73	mm
Volumen ETR=	2,062.24	Hm ³ /año

Cuadro 19. Calculo del Coeficiente de infiltración

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN		
Área total del acuífero	3,893	Km ²
Precipitación promedio anual (valle)	0.615	m/año
Precipitación promedio anual (zonas altas)	0.685	m/año
Volumen anual precipitado	2,549.11	Hm ³ /año
Temperatura media anual	14.7	°C
Evapotranspiración	2,062.24	Hm ³ /año
Escurrimiento +Infiltración	486.9	Hm ³ /año
Escurrimiento de lluvia medio anual	299.01	Hm ³ /año
Volumen de Infiltrado	187.85	Hm ³ /año
Coeficiente de infiltración	0.073700	

Cuadro 20. Cálculo del escurrimiento superficial

Cálculo del Escurrimiento superficial		
Dato hidrométrico	0.00	hm ³ /año
Coefficiente de escurrimiento resultante	0.000	
Coefficiente de escurrimiento tablas	0.117	
Volumen escurrido con coeficiente de esc. de tabla	299.01	hm ³ /año
Vol escurrimiento medio anual	299.01	hm ³ /año

Cuadro 21. Evapotranspiración real por método de Coutagne

Fórmula de Coutagne para calcular evapotranspiración real		
Para valores de precipitación entre:		
1/(8χ) y	0.35725	
1/(2χ)	1.429	
siendo		
$\chi = 1/(0.8+0.14t)$		
t= temperatura en °C		
Coutagne propone la fórmula		
$ETR = P - \chi P^2$		
en la que		
ETR= evapotranspiración real en m/año		
P = precipitación en m/año		
$\chi =$	0.350	
ETR, con Coutagne	0.505	m
Volumen evapotranspirado ("real"), con Coutagne	1965.08	hm ³ /año

Comparando los resultados del cálculo de la evapotranspiración de acuerdo a los métodos se tiene que:

Coutagne: 503.60 mm

Turc: 528.70 mm

6.3 Nivel Estático (N. E.)

En la distribución del nivel estático que se tenía en el año 1990, se distingue una franja que atraviesa el acuífero de NO a SE, esta franja que varía de 90 a 110 m de profundidad. En la parte Sur y SO se presentan las menores profundidades (30 a 40 m). Para 1995 se observó la misma franja de NO-SE, con menor profundidad (80 y 90 m) y en la parte Sur la menor profundidad es

de 50 m. Este aparente aumento en los niveles estáticos en la parte Norte puede deberse a diferentes causas: los datos se tomaron en diferentes periodos del año y no son de los mismos pozos, por lo tanto la distribución no es igual, lo cual genera diferencias apreciables al compararlos.

En 2000 la franja NO–SE, se profundiza más que en los años anteriores, creciendo el área donde el NE se encuentra entre los 100 y 110 m, mientras que en la parte central del acuífero las profundidades varían entre los 60 a 70 m, disminuyen el N. E. en 1 m por año. Con los datos de 2005 se pudo notar que la franja NO–SE cubre en su totalidad la parte NE del acuífero, correspondiente al estado de Hidalgo.

En 2007 la franja NO – SE vuelve aparecer, pero con valores entre los 100 y 120 m de profundidad y con algunas pequeñas zonas con N. E. entre los 130 a 140 m. Así mismo en 1990 existían zonas donde el agua se podía extraer entre los 40 y 60 m por debajo del nivel del terreno y éstas desaparecen en el 2007, dejando lugares en donde el agua se extrae a los 60 m. En 2010 la franja de abatimiento de nivel estático (NE) se encuentra también en posición NO-SE con valores de 80 y 100 m de profundidad y con algunas zonas con niveles estáticos de 120 a 150 m. En 2010 solo en la zona de Nextlalpan el NE del agua se encuentra a 62 metros, es decir, 2 metros más profundo que en el 2007. Comparando el nivel estático de 1990 con 2010 se pudo apreciar una similitud entre las zonas de 40 m de 1990 con las de 62 m en 2010 (parte Sur del acuífero), las cuales se localizan en la misma área con una diferencia de 22 m de profundidad.

Ahora bien con base en los sondeos realizados a 100 pozos pilotos de la zona de influencia del acuífero Cuautitlán-Pachuca, realizados en la época de estiaje y lluvias del año 2010 y su comparación con datos históricos desde 1990, con la finalidad de ejemplificar de mejor forma lo antes mencionado se presenta la información de diez pozos representativos de la zona de influencia sondeados, así como su ubicación (ver Figura 31)

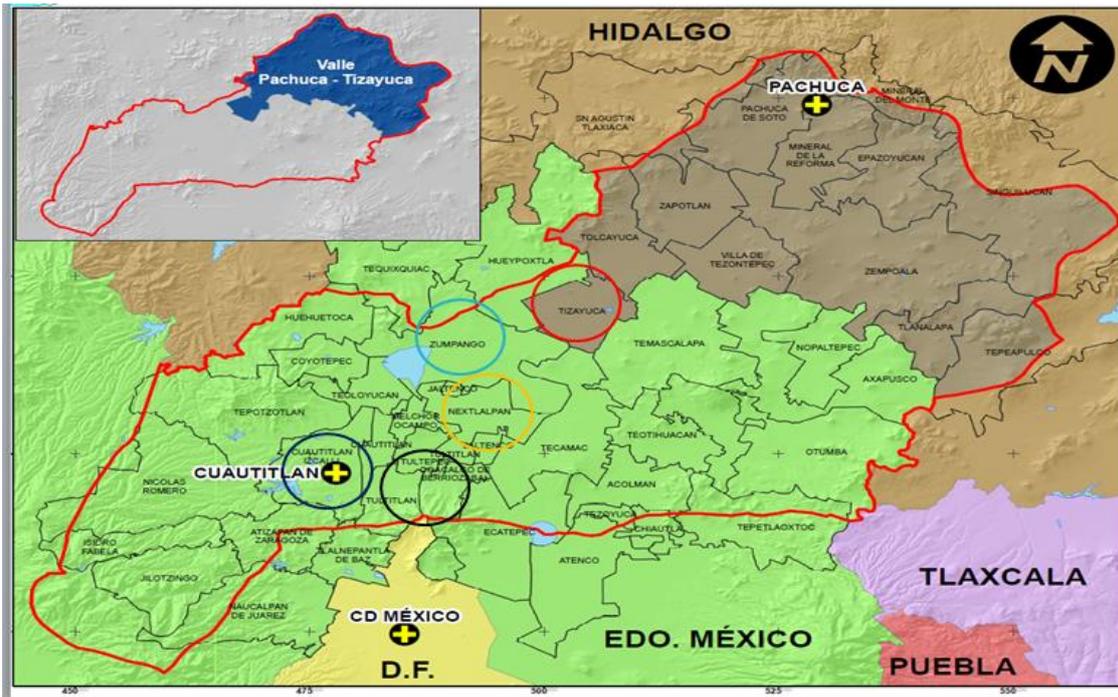


Figura 31. Ubicación de 10 pozos del acuífero Cuautitlán-Pachuca con los mayores abatimientos (1990-2010)

Como se observa en la Figura 31 las zonas de mayor abatimiento se encuentran en la franja NO-SE, que contiene a los municipios de: Tizayuca, Zumpango, Nextlalpan, Cuautitlán Izcalli, Tultitlán y Tultepec.

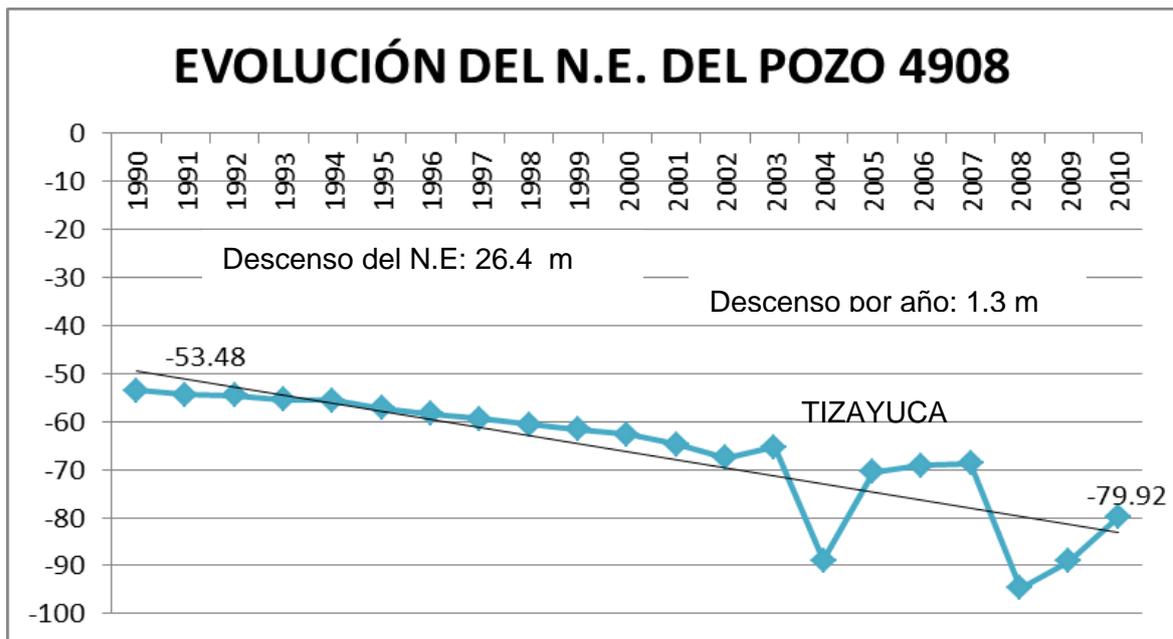


Figura 32. Evolución del N.E. del pozo 4908 (Tizayuca)

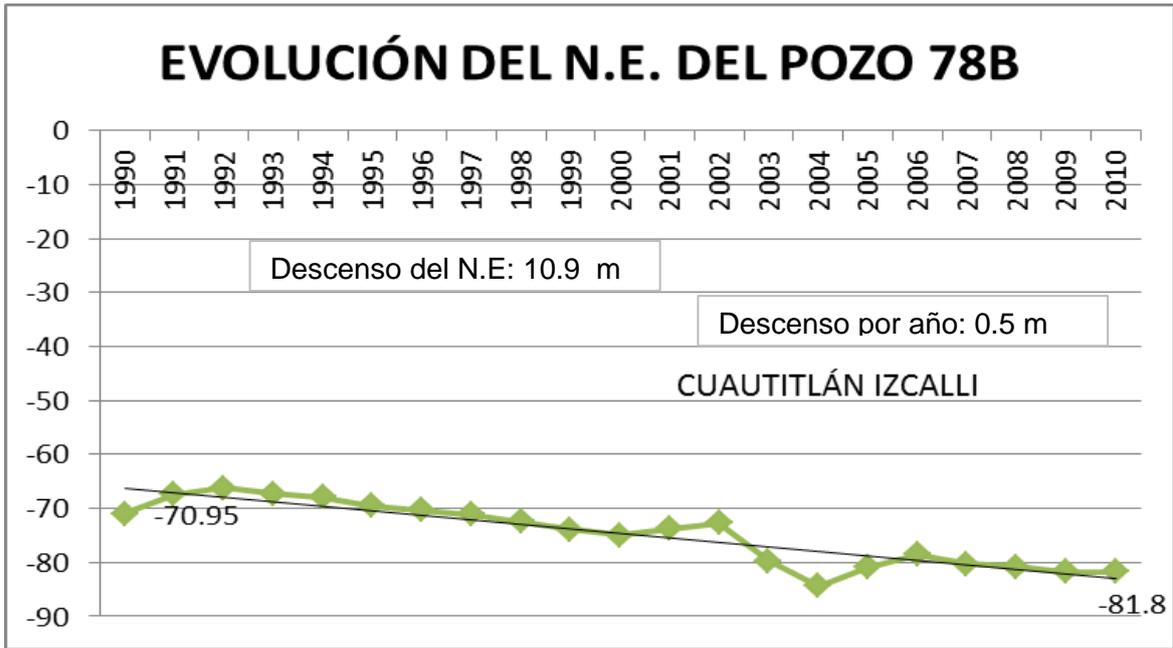


Figura 33. Evolución del N.E. del pozo 78b (Cauatitlán Izcalli)

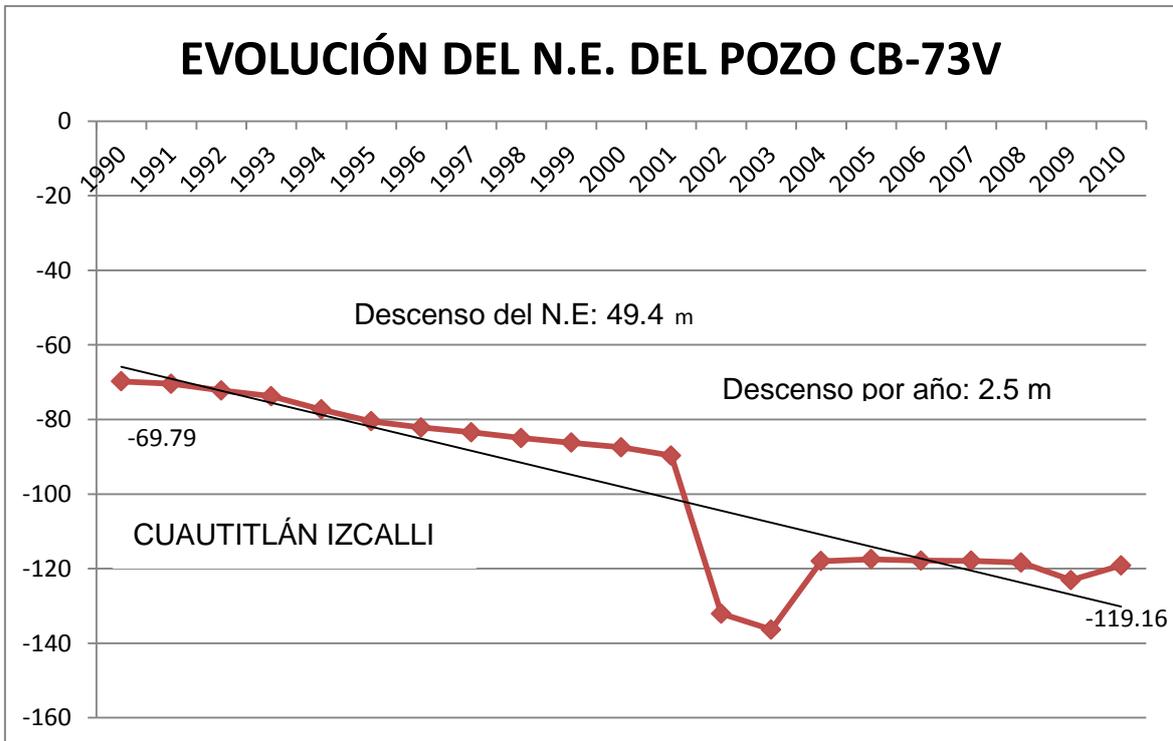


Figura 34. Evolución del N.E. del pozo CB-73V (Cauatitlán Izcalli)

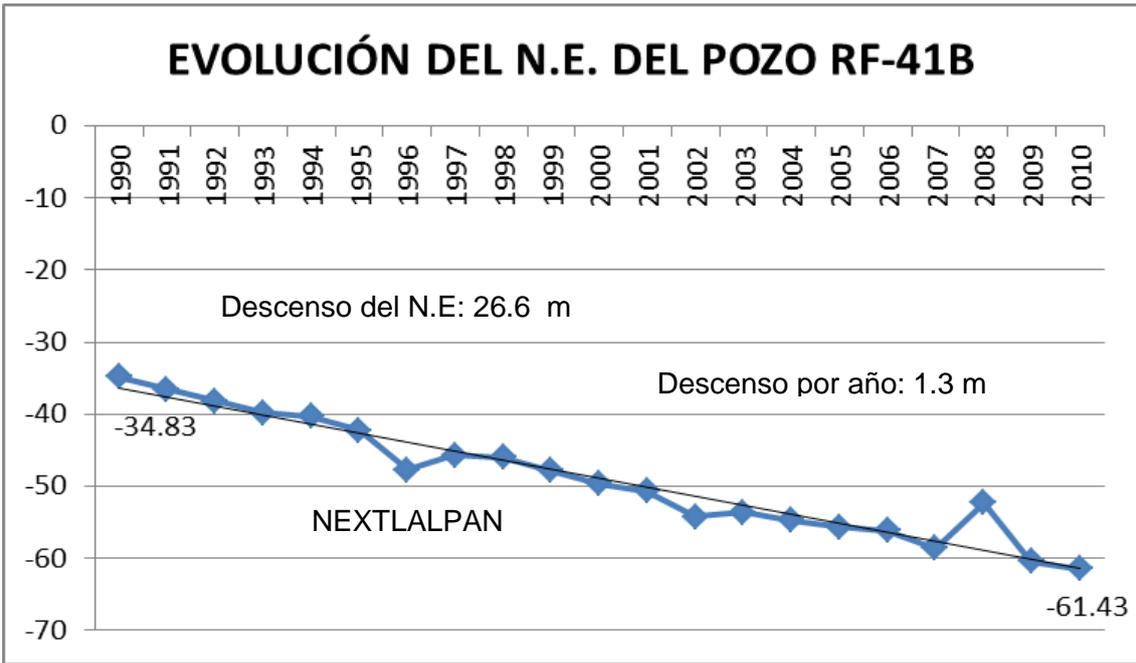


Figura 35. Evolución del N.E. del pozo RF-41B (Nextlalpan)

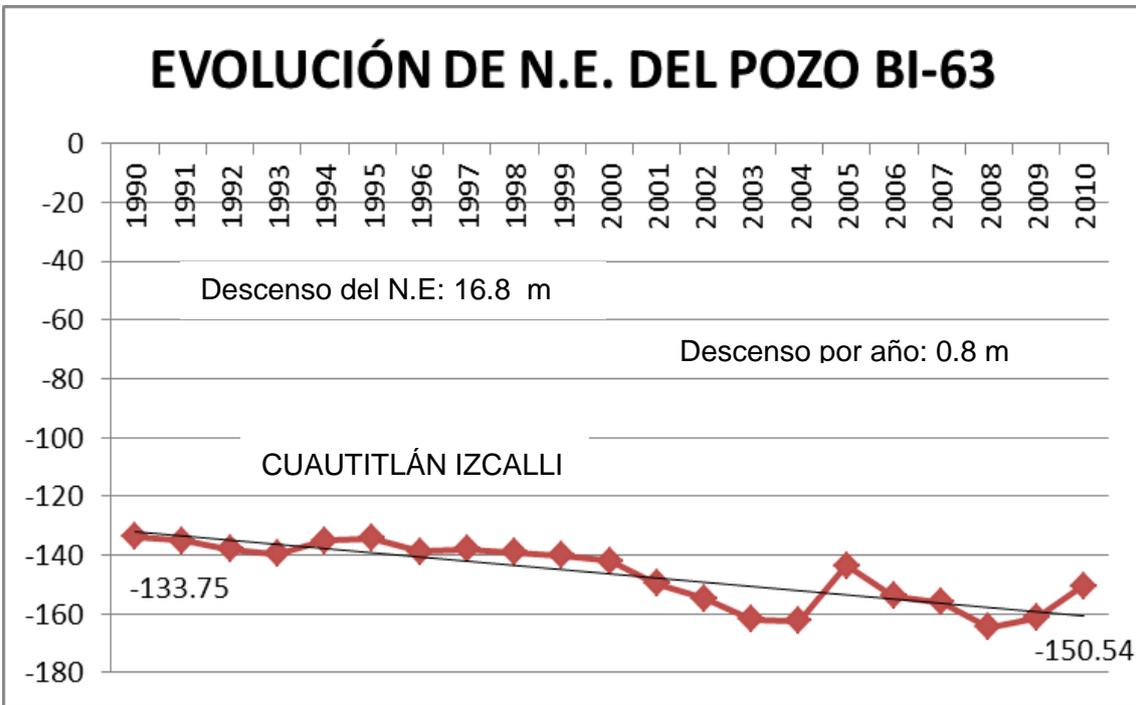


Figura 36. Evolución del N.E. del pozo BI-63 (Cuautitlán Izcalli)

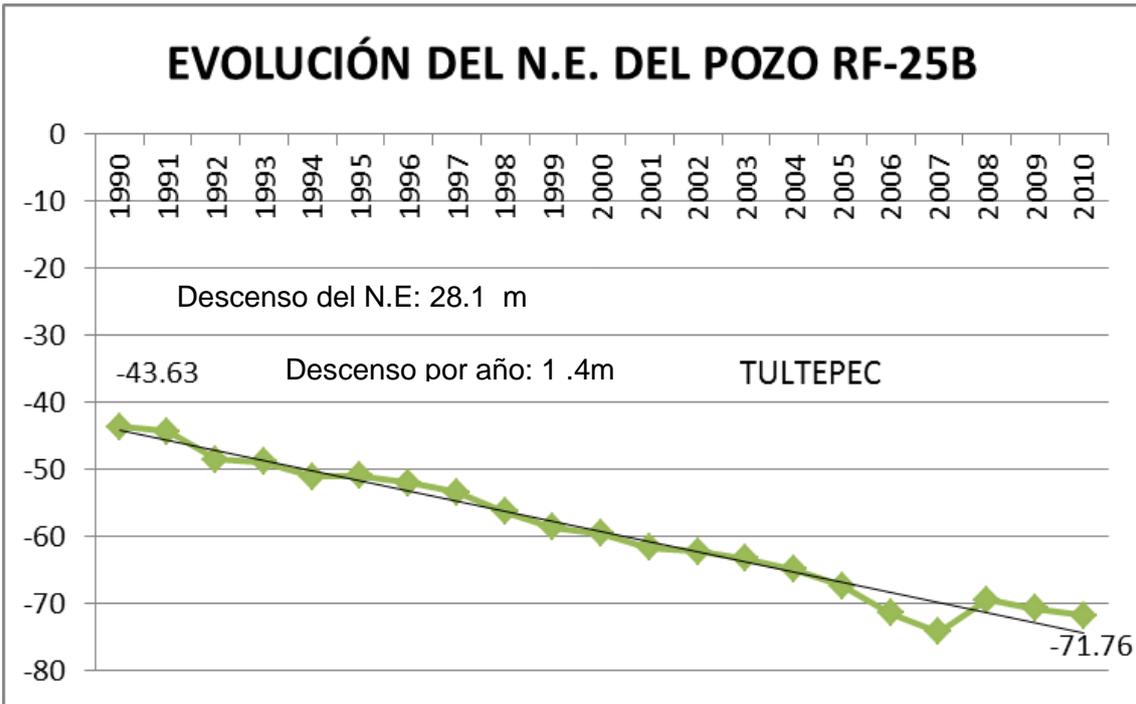


Figura 37. Evolución del N.E. del pozo RF-25B (Tultepec)

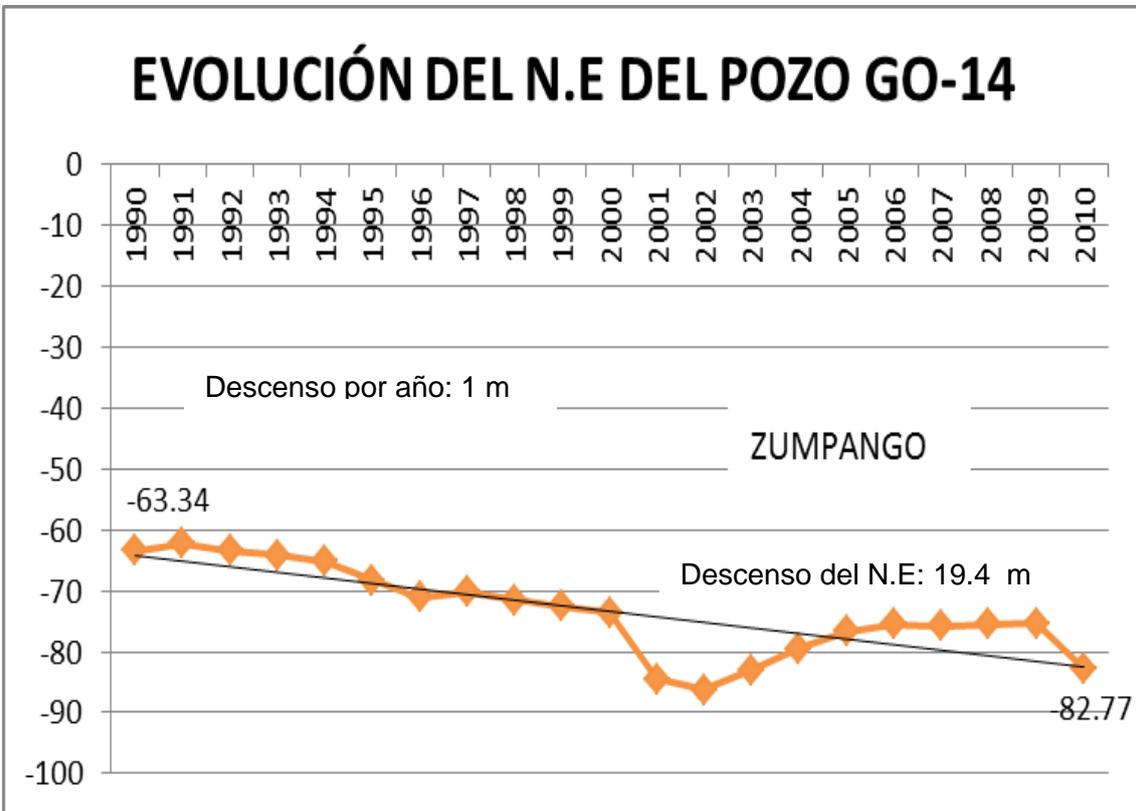


Figura 38. Evolución del N.E. del pozo GO-14 (Zumpango)

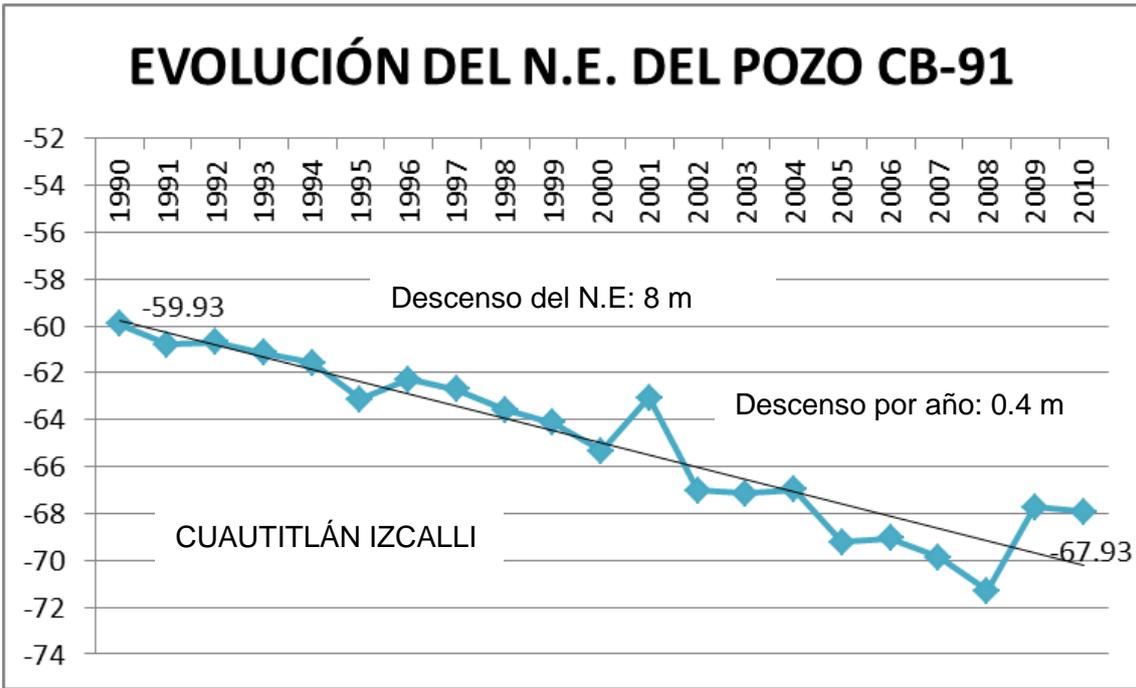


Figura 39. Evolución del N.E. del pozo CB-91 (Cuautitlán Izcalli)

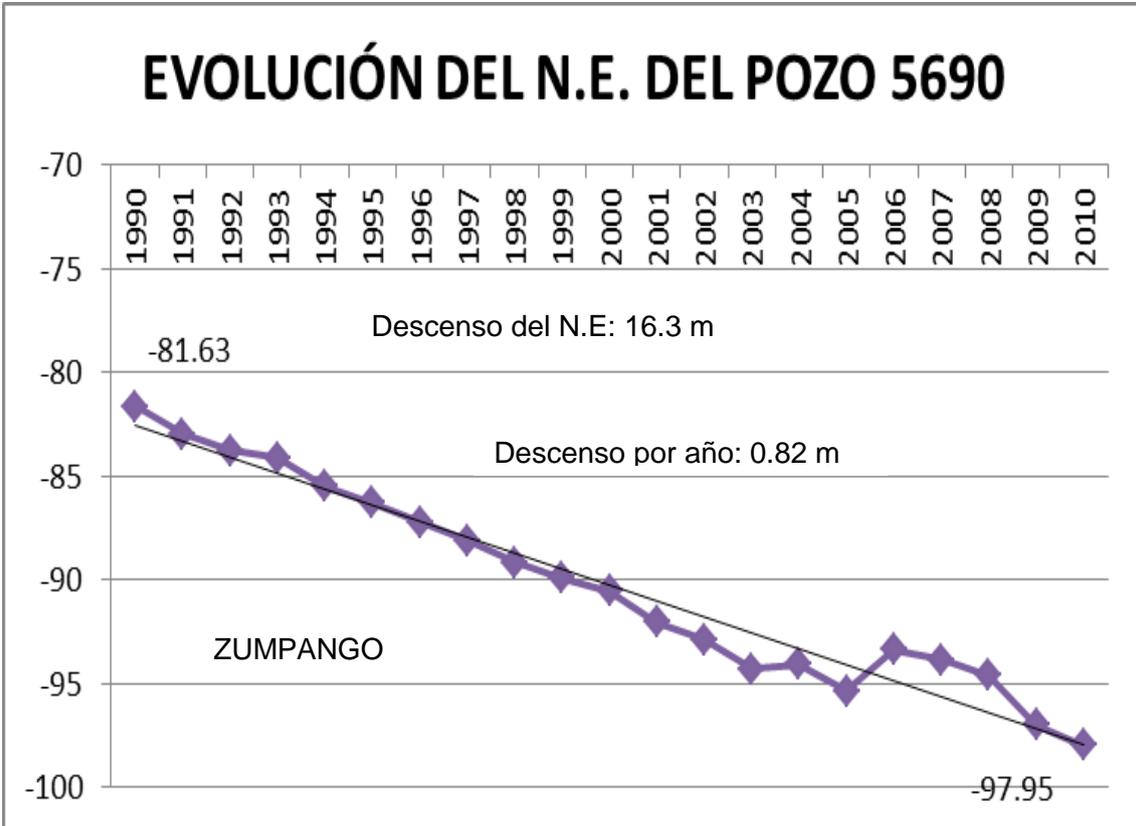


Figura 40. Evolución del N.E. del pozo 5690 (Zumpango)

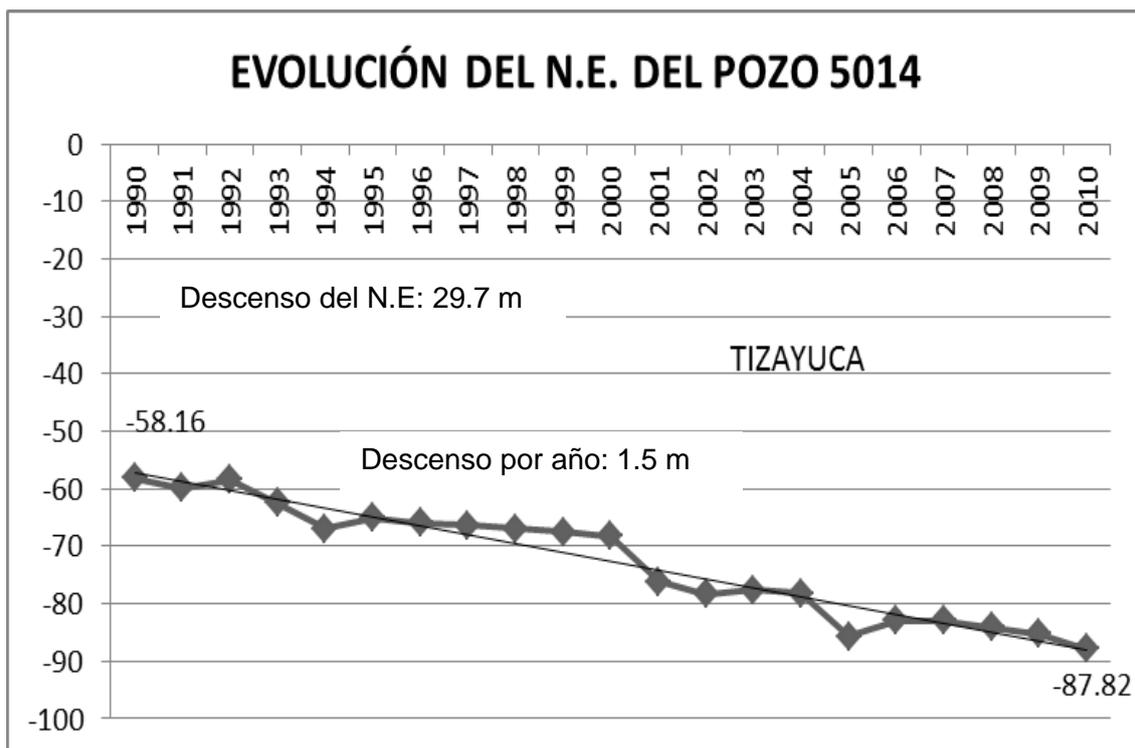


Figura 41. Evolución de N.E. del pozo 5014 (Tizayuca)

6.4 Evolución de los niveles piezométricos

En la mayor parte del área de estudio (Figura 32 a 41) se presentan abatimientos de 0.1 m/año a 1 m/año. Las zonas más afectadas se presentan en base de los municipios en donde se localizan, quedando de la siguiente manera: zona Cuautitlán Izcalli, con abatimientos entre los 2 m/año y 3.5 m/año, zonas Ecatepec, Zapotlán, Tizayuca y Zumpango con abatimientos de 2 m/año a 2.5 m/año, y la zona Zempoala–Nopaltepec en donde los abatimientos fueron de 2 a 4.5 m/año. Lo anterior indica que en 17 años el nivel del agua ha descendido entre 34 m y 76.5 m respectivamente. Además de las anteriores zonas, se observan otras dos en los extremos de la imagen las cuales no se incluyen en el presente trabajo por existir menor confiabilidad en los datos. La configuración de la elevación piezométrica muestra que el agua del subsuelo, desde el punto de vista regional, se desplaza del norte hacia el sur, interpretándose que las sierras que delimitan la cuenca, actúan como zonas de recarga de los acuíferos alojados en el subsuelo del valle, por otra parte se observa que el bombeo de los pozos de los sistemas de Tizayuca y Téllez provocaron un cono de abatimiento definido por la equipotencial 2230 msnm.

Otras zonas de abatimiento se encuentran en los alrededores de Tizayuca, donde la densidad de obras se encuentra bastante concentrada. Finalmente se estiman recargas laterales, procedentes de la sierra enclavada en el límite occidental del valle (ver anexo 4).

6.5 Transmisividad

Para obtener los valores de transmisividad se revisaron 19 pruebas de bombeo realizadas por la CONAGUA (2007), distribuidas en diferentes zonas del acuífero, los resultados de cada una de ellas se encuentra en el Anexo 2.

Con base en dichas pruebas, se observó que los mayores valores de transmisividad se localizan al sur del estado de Hidalgo (Ramal Tellez) y en la zona de Ecatepec en el estado de México principalmente, mientras que los menores se observan en la parte NE del acuífero. Estas configuraciones se utilizaron como base para definir las conductividades hidráulicas en el modelado matemático del acuífero.

6.6 Calibración y validación

La calibración se efectuó por el método de prueba y error para el año 1990, los parámetros a modificar fueron la conductividad hidráulica K y la transmisividad T , ya que se decidió considerar el valor de la recarga como confiable, detectando una mayor grado de sensibilidad por parte de la conductividad. Los valores finales de conductividad hidráulica para el acuífero principal y el freático fueron 3×10^{-3} y 1.0×10^{-3} respectivamente. En el Cuadro 22 se presenta el grado en que se logró disminuir el error. La validación se realizó para el año 2000, el modelo se corrió en régimen transitorio, para lo cual los gastos de los pozos se modificaron en función del aumento de la demanda por la población principalmente. Los pozos de observación usados para la calibración y validación del modelo fueron 99, pero para fines ilustrativos se muestran 10 pozos. Los valores de carga calculada contra observada para cada uno de estos pozos se presenta el Cuadro 23. Las Figuras 43 y 44, muestran las gráficas de salida según el modelo para la etapa de calibración y validación respectivamente.

Cuadro 22. Resultado del proceso de calibración sobre el error obtenido reportado en función de la desviación estándar, RMS y porcentual.

VALORES CALIBRADOS			
ACUÍFERO	K	RMS	Error%
FREÁTICO	1×10^{-3}		
		3.6	1.7
PRINCIPAL	3×10^{-3}		

Cuadro 23. Valores de carga calculada contra carga observada en la etapa de calibración y validación del modelo conceptual para el acuífero Cuautitlán-Pachuca

POZO	CALIBRACIÓN (1990)		VALIDACIÓN (2000)	
	OBSERVADO	CALCULADO	OBSERVADO	CALCULADO
100-B	2185.8	2188.2	2182.2	2178.6
101-B	2191.6	2191.8	2188.0	2184.4
104-B	2179.2	2180.7	2175.6	2172.0
129-B	2200.9	2202.4	2197.3	2193.7
130-B	2189.0	2190.5	2185.4	2181.8
131-B	2182.1	2183.6	2178.5	2174.9
135-B	2175.7	2177.2	2172.1	2168.5
2819	2230.1	2231.6	2226.5	2222.9
3198	2263.8	2265.3	2260.2	2256.6
4200	2259.1	2260.6	2255.5	2251.9

En el modelo de simulación, las recargas provenientes de la infiltración vertical de la lluvia, los retornos de riego provenientes del uso agrícola tanto de agua subterránea y superficial, además de las infiltraciones provenientes de fugas de los sistemas de abastecimiento de agua potable para uso público urbano, así como las descargas por bombeo, son parámetros calculados con base a la información disponible.

De igual forma en la Figura 42 se muestra la configuración de los niveles estáticos al año 2000; en ella se aprecian los flujos subterráneos, los cuales tienden hacia los conos de abatimiento ubicados en las zonas de mayor explotación del acuífero.

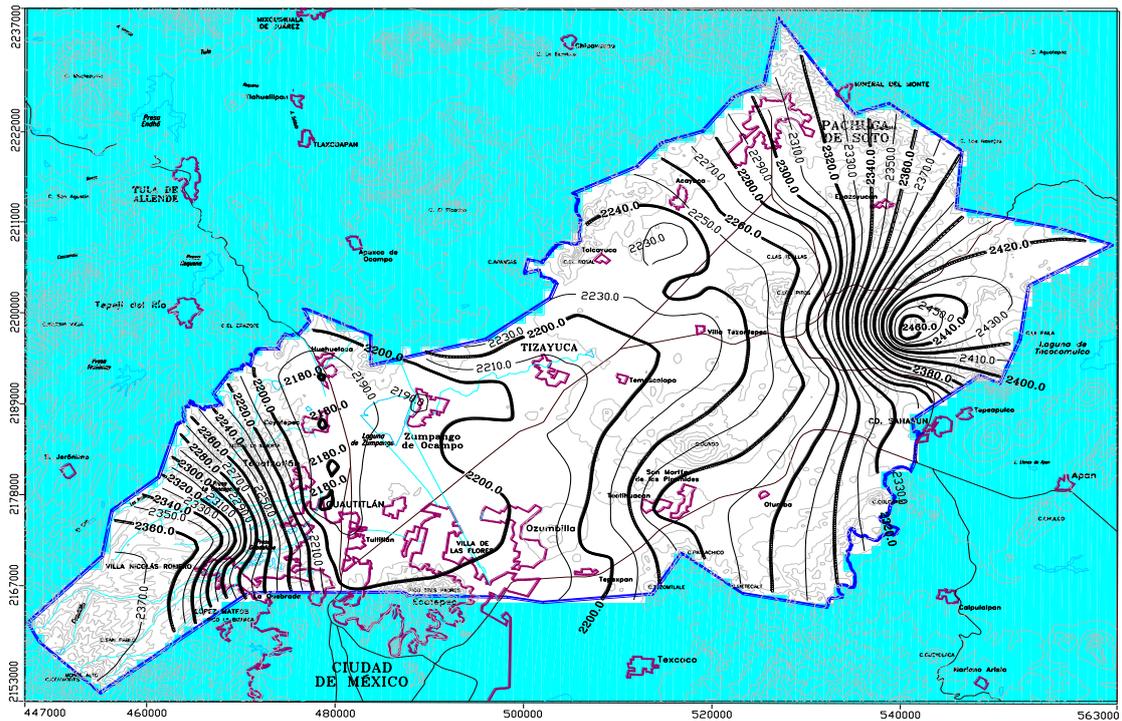


Figura 42. Curvas de igual elevación del nivel estático 2000

La calibración resulta aceptable, si al comparar en forma puntual los valores de las cargas observadas en pozos piloto de observación y las obtenidas por el modelo para esa misma fecha, resultan semejantes y con errores permisibles, que para el caso del acuífero de Cuautitlán-Pachuca resultaron del orden de 1.7 %, como se muestra en la Figura 43.

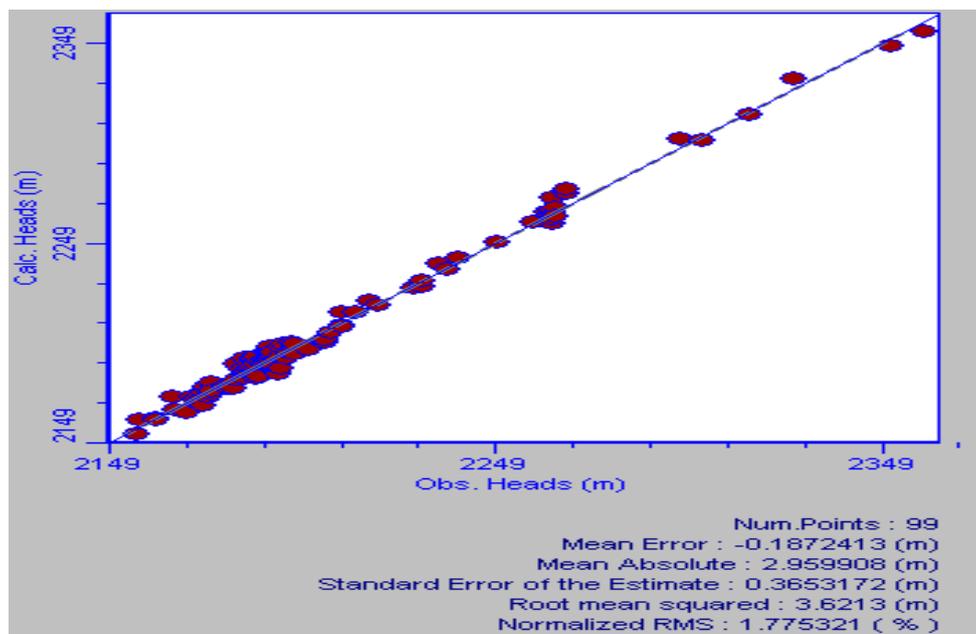


Figura 43. Relación de carga observada contra la calculada para la etapa de calibración (1990)

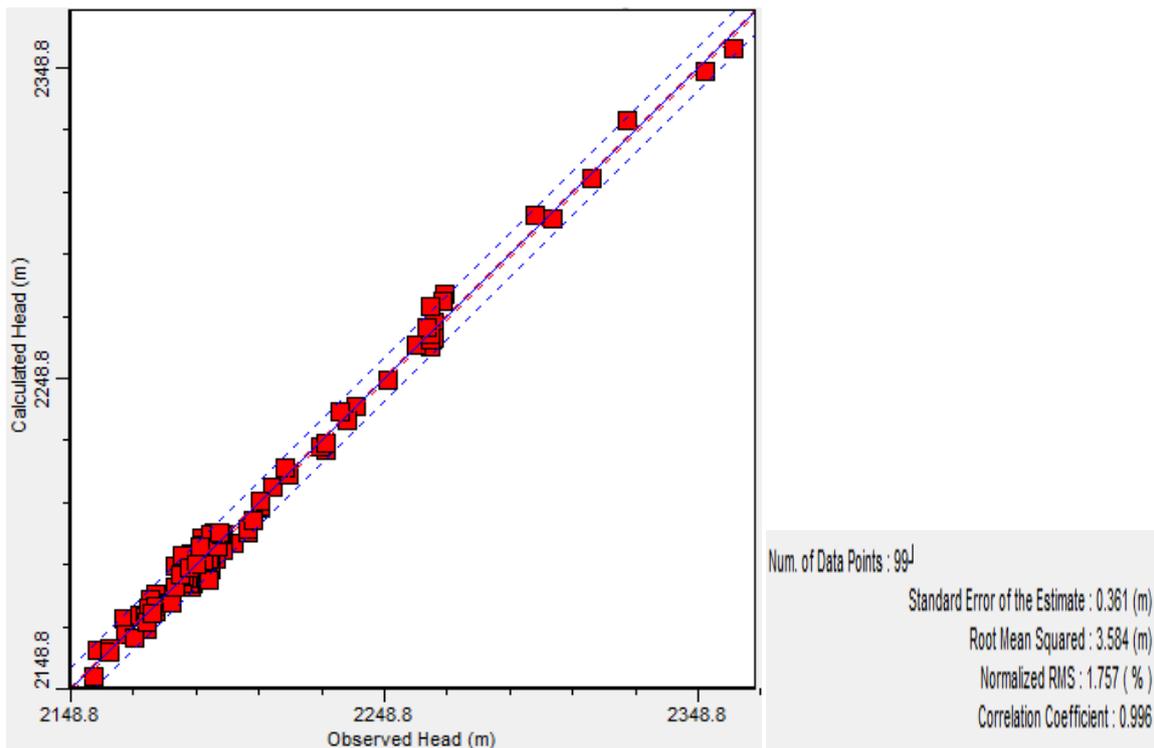


Figura 44. Relación de carga observada contra calculada en la etapa de validación (2000).

Como se puede ver en la Figura 44 el porcentaje de error es de 1.75% con un error cuadrático medio de 3.58 m y un error medio de 0.36 m de acuerdo con la salida del modelo, con un coeficiente de correlación de 0.996.

6.7 Análisis de sensibilidad

Para simular el comportamiento de un acuífero es posible hacerlo a través de un modelo matemático y para ello se requiere que la información básica que lo integre se encuentre validada, a fin de que los resultados que presente dicho modelo sean lo más confiables posible. Entre los datos básicos se pueden citar a los parámetros hidráulicos de conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, los cuales tienen una injerencia relevante en la modelación; asimismo, se encuentran las recargas que actúan sobre el sistema, las cuales varían a través del tiempo. Estos tres componentes conforman la base del análisis de sensibilidad que se realiza en este apartado, el cual tiene por objeto conocer el grado de influencia de cada uno de ellos.

Un análisis de sensibilidad incluye la variación de los valores de conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y recarga, lo que indica el grado de incertidumbre que acarrea la variación de los parámetros mencionados y la confiabilidad del modelo; es decir, el análisis muestra qué parámetros adquieren una mayor influencia, así como aquellos que podrían provocar mayores diferencias en la calibración y por tanto en los resultados de las simulaciones.

Para realizar el análisis de sensibilidad, se optó por variar el valor del parámetro de interés en un porcentaje aceptable dentro del rango del modelo hidrogeológico (incrementando y disminuyendo valores con respecto al obtenido en la calibración). El método implica comparar la desviación estándar de las cargas hidráulicas, obtenida a partir de la misma ecuación que para la calibración, con el parámetro modificado. Para los parámetros de recarga y conductividad se realizó una variación de 10, 20 y 30 %, y para el de almacenamiento de 10, 20 y 25%; los resultados obtenidos de estas variaciones se presentan en las Figuras 36 a 38, donde se puede apreciar que el parámetro de conductividad es el que tiene mayor influencia en las cargas del modelo, siguiéndole en orden de importancia el de almacenamiento y por último el de recarga. De acuerdo a la calibración y a los valores aquí asentados se puede considerar que el modelo calibrado es aceptable.

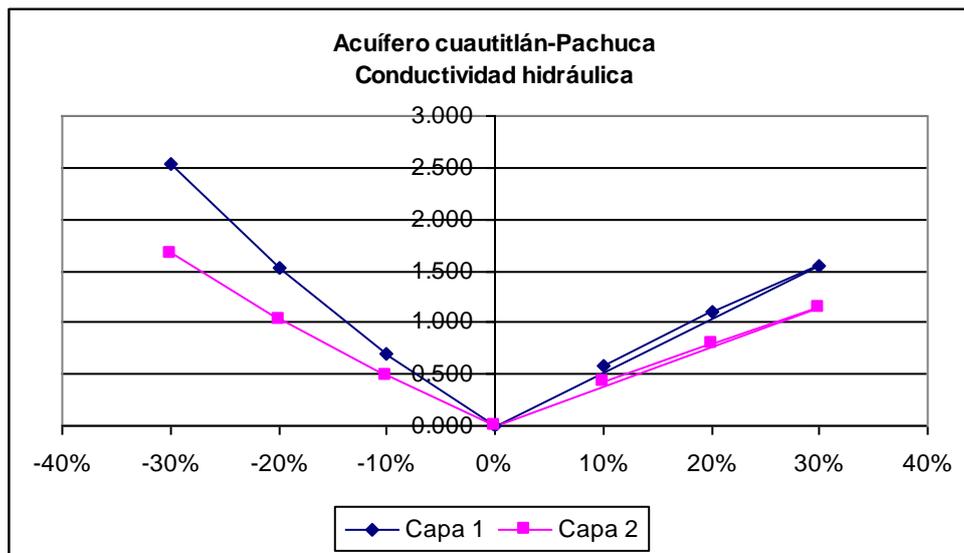


Figura 45. Desviación estándar de la elevación del nivel estático, al variar la conductividad hidráulica

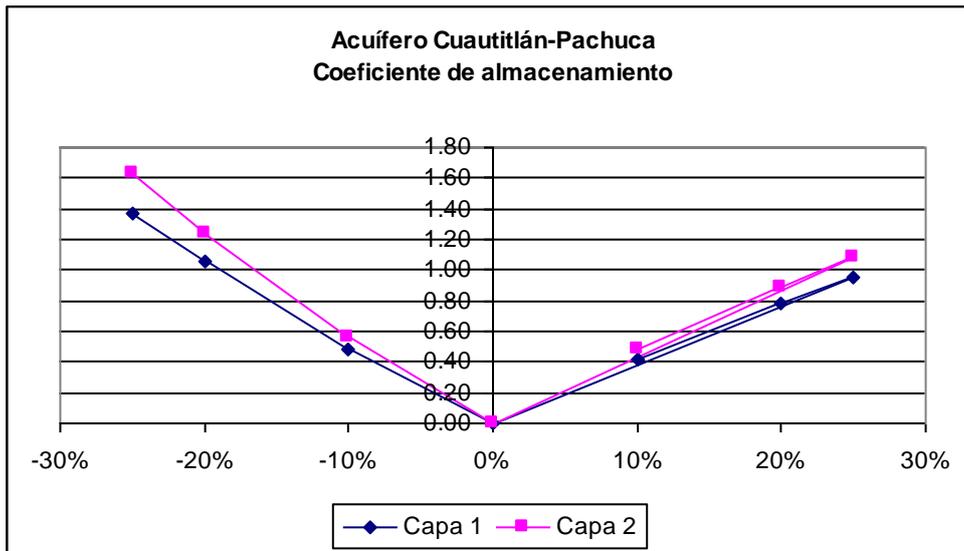


Figura 46. Desviación estándar de la elevación del nivel estático, al variar el coeficiente de almacenamiento

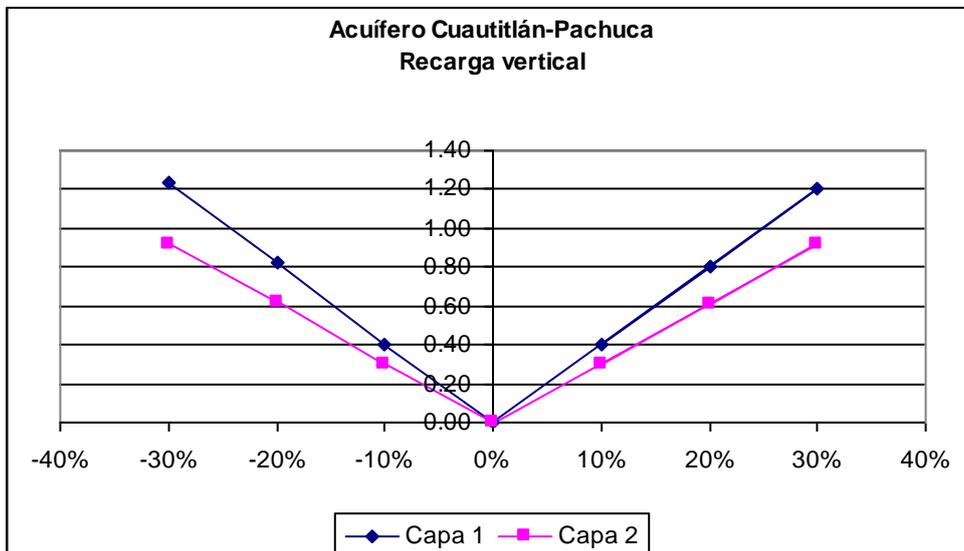


Figura 47. Desviación estándar de la elevación del nivel estático, al variar la recarga

6.8 Análisis del comportamiento del acuífero en diferentes años con base en el modelo de simulación

Con ayuda del software Visual Modflow 4.2 se hicieron predicciones en el tiempo del comportamiento del acuífero Cuautitlán-Pachuca, a través de un modelo de simulación, se realizaron para dos situaciones diferentes de manejo del acuífero, una que contemple la tendencia actual y otra en la que se supuso un uso eficiente del agua subterránea.

6.8.1 Escenario 1: Tendencia de explotación actual

La extracción de agua subterránea variará de seguir con la misma tendencia hasta el año 2030 de forma significativa, de 587.3 hm³/año que se extraían en el año 2000 a 849.2 hm³/año en el 2030, esto al considerar las demandas futuras de agua potable de la población asentada en esta región, que según estimaciones basadas en datos de CONAPO, (2005) (ver anexo 3), serán del orden de 6.3 millones de habitantes, los cuales tendrán como fuente de suministro de agua el mismo acuífero, es decir, no se contempla en este escenario acciones de importación de agua proveniente de otra zona o región para cubrir las demandas futuras de agua, tanto para uso público urbano como agrícola e industrial. Se considera que para el año 2030, el volumen de agua subterránea destinado actualmente al uso agrícola dentro del área que cubre el acuífero tendrá una reducción cercana al 50 %.

Para este escenario se consideró que las recargas que recibiría el acuífero durante el período 2000-2030 serían tanto las provenientes por la infiltración de agua de lluvia, como las inducidas; para las primeras se consideró que continuarán siendo iguales a las actuales; es decir, serían del orden de 93.3 hm³/año en las partes del valle y en las zonas altas de 102 hm³/año.

De igual forma los volúmenes de recarga provenientes de las actividades agrícolas permanecerán constantes respecto a los de origen superficial y de reúso, como se observa en la Cuadro 24; sin embargo, las recargas debidas a los excesos por riego con agua de origen subterráneo disminuirán proporcionalmente debido a la menor extracción para ese uso. Por otra parte las recargas inducidas originadas por las fugas de los sistemas de

abastecimiento se verán incrementadas al aumentar los volúmenes empleados para este fin, con base en lo anterior se realizó una simulación del comportamiento del acuífero ante las acciones expuestas; al respecto se obtuvieron los resultados que se presentan en la parte derecha del Cuadro 27 que muestra los balances en lapsos de 5 años para el período 2000-2030.

Otros resultados que se obtuvieron con el modelo de simulación fueron los promedios de los niveles estáticos, observándose que se incrementaron de -0.82 m/año a -1.35 m/año en el período 2000-2030, como se muestra en la Figura 39.

Es importante observar que bajo este escenario el minado del acuífero se incrementó al pasar de un valor en el año 2000 del orden de -226 hm³/año a -435 hm³/año en el 2030, con sus respectivas consecuencias ambientales, sociales y económicas.

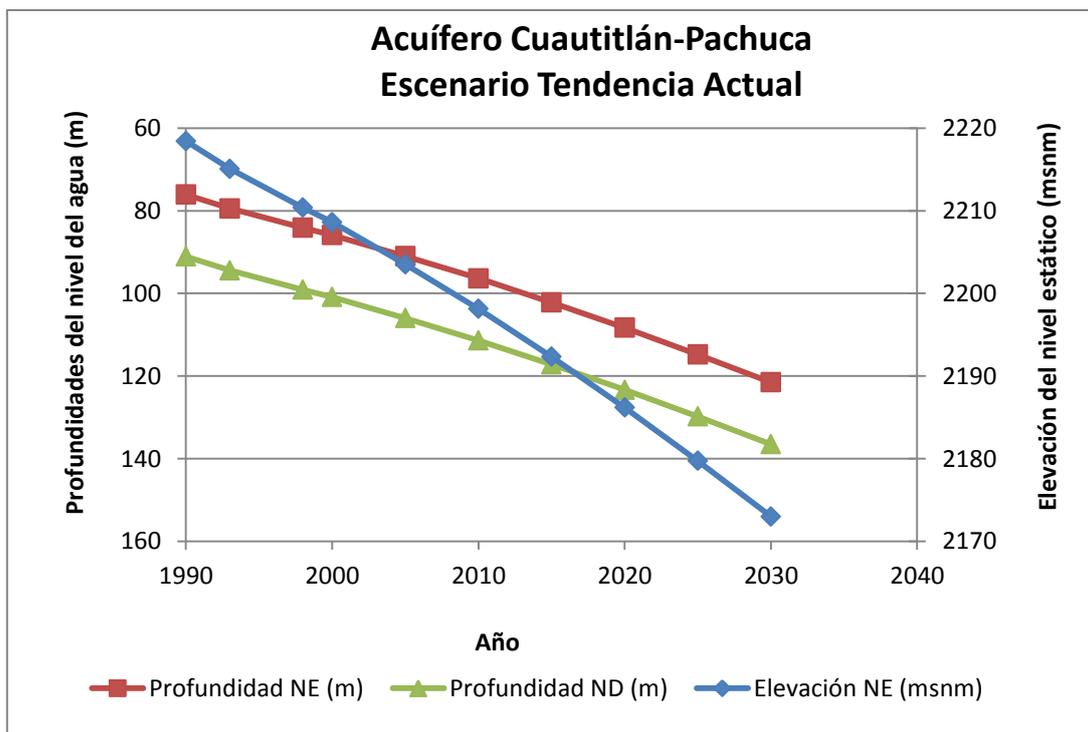


Figura 48. Comportamiento de los niveles estáticos y dinámicos en el escenario inercial o con condiciones de tendencia actual

Cuadro 24. Resultados de la modelación de los años 2000-2030 bajo la tendencia de manejo actual

Escenario 1 Tendencia actual de explotación							
AÑO	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Población (millones de habitantes)	4.01	4.48	4.92	5.33	5.71	6.05	6.33
Uso publico urbano total (hm ³ /año)	409.70	457.60	565.50	600.50	620.10	647.40	676.71
P.U. Agua subterránea (hm ³ /año)	409.75	457.60	570.50	600.50	620.10	647.40	676.71
Agrícola Subterránea (hm ³ /año)	51.40	46.26	41.63	37.47	33.72	30.35	27.32
Otros	8.00	8.40	9.72	10.21	10.72	11.22	11.72
Industrial (hm ³ /año)	18.20	20.33	25.92	27.45	29.50	31.50	33.50
Exportación al AMCD	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Extracción bruta total (hm ³ /año)	587.35	632.59	747.77	775.63	794.04	820.47	849.25
Salidas horizontales	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SALIDAS TOTALES	587.35	632.59	747.77	775.63	794.04	820.47	849.25
Agua superficial uso agrícola más otros (hm ³ /año)	99.00	99.00	99.00	99.00	99.00	99.00	99.00
Retorno de riego, agua de reuso (hm ³ /año)	156.00	156.00	156.00	156.00	156.00	156.00	156.00
Recarga lluvia Valle (hm ³ /año)	93.35	93.35	93.35	93.35	93.35	93.35	93.35
Recarga lluvia partes altas (hm ³ /año)	102.00	102.00	102.00	102.00	102.00	102.00	102.00
Entradas horizontales (hm ³ /año)	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Recarga Público urbano (hm ³ /año)	86.05	96.10	119.81	126.11	130.22	135.95	142.11
Recarga por retornos de riego Subterránea.(hm ³ /año)	10.10	9.29	8.73	8.11	7.55	7.07	6.64
Recarga por retorno agua superficial por riego, otros (hm ³ /año)	18.81	18.81	18.81	18.81	18.81	18.81	18.81
Recarga por retorno de riego, agua de reuso (hm ³ /año)	39.00	39.00	39.00	39.00	39.00	39.00	39.00
RECARGA TOTAL (hm³/año)	361.30	370.54	393.69	399.37	402.93	408.18	413.90
Minado (hm ³ /año)	-226.05	-262.04	-354.08	-376.27	-391.11	-412.30	-435.35
Profundidad del nivel estático (m)	85.87	90.98	96.37	102.17	108.31	114.77	121.50
Profundidad del nivel dinámico (m)	100.87	105.98	111.37	117.17	123.31	129.77	136.50
Abatimiento del nivel estático (m/año)	-0.82	-1.02	-1.08	-1.16	-1.23	-1.29	-1.35
Elevación del nivel estático (msnm)	2,209	2,204	2,198	2,192	2,186	2,180	2,173

6.8.2 Escenario 2: Manejo eficiente

Para poder desarrollar este modelo fue necesario hacer algunas consideraciones como el crecimiento poblacional esperado hasta el 2030, el aumento en la demanda del agua principalmente en sector de servicio público urbano, agrícola e industrial que son en orden de importancia los más representativos, así como también la localización de las zonas de recarga y volumen de las mismas para contrarrestar el minado del acuífero; por lo que a continuación se describen las previsiones estimadas por la CONAPO, (2005) (ver anexo 3) Y CONAGUA para los años de análisis en este escenario.

El principal uso es el público urbano, y las acciones deberán incluir una serie de políticas sobre el uso eficiente del recurso en este sector, consistentes principalmente en disminuciones de fugas en las redes de distribución y las tomas domiciliarias, como parte de la responsabilidad de los organismos operadores que suministran el preciado líquido.

Dichos organismos operadores encargados del suministro del agua potable, deberán incrementar su eficiencia operativa en general, hasta lograr reducir sus pérdidas a un 20% en lugar del 40% y aún más con los que actualmente operan. También mejorar las eficiencias hidráulicas de los pozos y electromecánicas de los equipos de bombeo que estén bajas, operando a menos del 40 %, acatando la norma mexicana respectiva; también mejorar las condiciones de las conducciones primarias y secundarias de la red de distribución y en las tomas domiciliarias, renglones donde se presentan las mayores pérdidas por fugas. Estas recomendaciones no se restringen al ámbito local del acuífero Cuautitlán-Pachuca, sino a las demás zonas vecinas, pues el agua exportada a los municipios mexiquenses vecinos y aun al Distrito Federal, no debería quedar fuera de control.

El solo hecho de disminuir fugas en las redes de distribución y tomas domiciliarias del 40% al 25%, representaría un ahorro en extracción bruta superior a los 50 hm³/año en el año 2030. Aunque, si bien es cierto también, disminuiría la recarga inducida al acuífero por el uso de este volumen en 88 hm³/año. Si a la disminución de fugas se le adicionan los ahorros domiciliarios, el ahorro deberá ser aún mayor. En el escenario denominado de uso eficiente se, estima que los volúmenes de extracción serían como los presentados en el Cuadro 28, donde se aprecia que la extracción de agua subterránea durante el período 2010-2030 se incrementará de un valor actual de 743.28 hm³/año a 797.29 hm³/año para el año 2030, principalmente para cubrir las demandas de agua potable de una población creciente, y que se calcula en aproximadamente 6.3 millones de habitantes para el año 2030; en general se puede decir que este valor en comparación con el escenario 1 corresponde a 52 hm³/año menos que el volumen de agua por extraer del acuífero en el mismo período. El resto de la extracción de agua subterránea para los otros usos es similar en

los dos escenarios. Un factor adicional que tiene relevancia en el comportamiento del acuífero corresponde a la disminución de recargas que se presentaran en el futuro bajo este escenario, debido a que los volúmenes de agua provenientes de las fugas de los diversos sistemas de abastecimiento disminuirían de forma importante, de tal manera que mientras en el escenario inercial hacia el año 2030 la recarga por fugas se estima en 142 hm³/año, para el escenario de uso eficiente, la recarga por este concepto es de 31 hm³/año, es decir, 111 hm³/año menos de recarga por este concepto. El resto de las recargas naturales e inducidas son semejantes al escenario inercial expuestas anteriormente.

Cuadro 25. Resultados de la modelación de los años 2010-2030, manejo eficiente

Escenario 2 Uso eficiente					
Año	2010	2015	2020	2025	2030
Población (millones de habitantes)	4.92	5.33	5.71	6.05	6.33
Uso publico urbano total (hm ³ /año)	570.50	585.50	600.50	615.50	630.50
P.U. Agua subterránea (hm ³ /año)	570.50	585.50	600.50	615.50	630.50
Agrícola Subterránea (hm ³ /año)	41.63	37.47	33.72	30.35	27.32
Otros	8.82	9.26	9.72	10.21	10.72
Industrial (hm ³ /año)	22.32	24.19	25.92	27.45	28.76
Exportación al AMCD	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Extracción bruta total (hm ³ /año)	743.28	756.42	769.87	783.52	797.29
Salidas horizontales	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SALIDAS TOTALES	743.28	756.42	769.87	783.52	797.29
Agua superficial uso agrícola más otros (hm ³ /año)	99.00	99.00	99.00	99.00	99.00
Retorno de riego, agua de reuso (hm ³ /año)	156.00	156.00	156.00	156.00	156.00
Recarga lluvia Valle (hm ³ /año)	93.35	93.35	93.35	93.35	93.35
Recarga lluvia partes altas (hm ³ /año)	102.00	102.00	102.00	102.00	102.00
Entradas horizontales (hm ³ /año)	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Recarga Público urbano (hm ³ /año)	119.81	29.28	30.03	30.78	31.53
Recarga por retornos de riego Subterránea.(hm ³ /año)	8.58	7.94	7.39	6.90	6.47
Recarga por retorno agua superficial por riego, otros (hm ³ /año)	18.81	18.81	18.81	18.81	18.81
Recarga por retorno de riego, agua de reuso (hm ³ /año)	39.00	39.00	39.00	39.00	39.00
RECARGA TOTAL (hm³/año)	393.54	302.37	302.57	302.83	303.15
Minado (hm ³ /año)	-349.74	-454.05	-467.30	-480.69	-494.15
Profundidad del nivel estático (m)	94.22	99.37	104.82	110.48	116.48
Profundidad del nivel dinámico (m)	109.22	114.37	119.82	125.48	131.48
Abatimiento del nivel estático (m/año)	-0.95	-1.03	-1.09	-1.13	-1.20
Elevación del nivel estático (msnm)	2200	2195	2190	2184	2178

De igual forma, el modelo proporciona configuraciones de los niveles estáticos para diferentes períodos, así como los abatimientos que se presentarían en ellos. Como ejemplo de lo anterior, la Figura 40 muestra una distribución espacial de los abatimientos del nivel estático en el acuífero esperados en el período 2010-2030, donde se observa que los mayores descensos son de hasta 80.0 m correspondientes a zonas localizadas en el valle de Cuautitlán, existiendo un valor de 100 m al sur del cerro de Chiconautla pero muy puntual; valores de 40 y 50 m cubren en forma más genérica al valle del área de estudio (1.0 a 1.2 m/año).

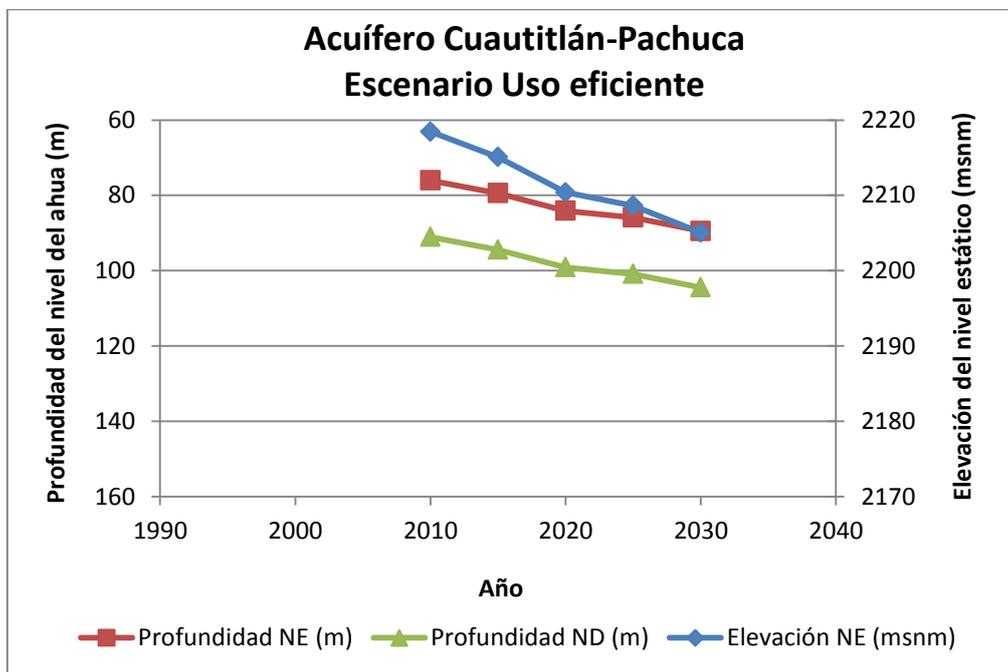


Figura 49. Comportamiento de los niveles estáticos y dinámicos en el escenario de manejo eficiente

El minado del acuífero en este escenario se incrementará de $-349.74 \text{ hm}^3/\text{año}$ a $-494.15 \text{ hm}^3/\text{año}$, lo cual ocasionará que los problemas actuales debidos a la sobreexplotación también se incrementen; consecuentemente será necesario tomar las medidas pertinentes y acordes con el manejo del recurso hídrico para evitar una sobreexplotación mayor del acuífero.

Si se comparan los resultados de las simulaciones efectuadas con el modelo, correspondientes a los escenarios inercial y de uso eficiente, se observan los siguientes aspectos relevantes:

Las extracciones brutas del acuífero en el escenario inercial son mayores que para el uso eficiente en un 5%, lo cual incrementa los costos de extracción al utilizar entre otros aspectos un mayor consumo de energía al bombear mayores volúmenes de agua, provocando un incremento en la profundidad de extracción.

Se prevé que las extracciones netas en el escenario inercial sean del orden de un 5% mayor que en el de uso eficiente, debido a que en este último escenario las recargas inducidas por fugas existentes en los sistemas de abastecimiento de agua potable descenderían, al utilizar menor volumen destinado al uso público, así como por hacer más eficientes dichos sistemas, reduciendo el actual coeficiente de infiltración por pérdidas estimado en 0.21 a 0.05.

Cabe mencionar que en los dos escenarios, los minados del acuífero son significativos, y pueden provocar que algunas consecuencias que actualmente están presentes en el medio se incrementen con el tiempo, como la aparición de grietas en el terreno, hundimientos del terreno, deterioro de la calidad al mezclarse agua reciente con agua más antigua, reposición de pozos, profundizaciones, etc.

Ahora bien, al comparar los resultados encontrados en este trabajo con los realizados anteriormente, se observa que en el caso específico del déficit del acuífero, la CONAGUA encontró que en 2002 había un déficit de $-40 \text{ hm}^3/\text{año}$, que contrasta con lo encontrado en este trabajo ya que se encontró un déficit de $-226 \text{ hm}^3/\text{año}$; en 2005 la misma dependencia, con ayuda de la empresa Ariel Consultores S.A., realizó otro estudio reportando un déficit de $-280 \text{ hm}^3/\text{año}$, mientras que en el trabajo aquí presentado se encontró un valor de $-262 \text{ hm}^3/\text{año}$, estos valores son parecidos entre sí, lo que nos permite decir que los valores del año 2005 se acercan más a la realidad al existir mayor coincidencia. Sin embargo en 2007, la Comisión Estatal de Agua y

Alcantarillado del estado de Hidalgo realizó un nuevo balance en el acuífero encontrando un déficit de $-217.8 \text{ hm}^3/\text{año}$, que es un valor menor al encontrado en este trabajo y por la CONAGUA para este mismo año. Finalmente el último esfuerzo anterior a este trabajo, relacionado con establecer el grado de minado dentro del acuífero Cuautitlán-Pachuca, lo realizaron Galindo et al; 2010 encontrando un déficit del orden de los -413.66 hm^3 , valor muy cercano al encontrado mediante el método de balance hidrológico que fue de -406.9 hm^3 , dicha variación puede deberse a la calidad de los datos usados, ya que para el caso del trabajo del 2010, se usaron datos de extracción del censo de 2009 realizado por el CEEA, mientras que en este trabajo se usaron los valores facilitados por la CONAGUA, para el 2010.

En cuanto a los abatimientos del nivel estático estimado en trabajos anteriores, Huízar-Álvarez, (2003) estimó un abatimiento anual de 0.8 m/año que se asemeja mucho a lo reportado en este trabajo 1.02 m/año para ese mismo año, sin embargo en este trabajo se estimó un abatimiento medio de 1990 a 2010 de 1.5 m/año , que es un valor mayor al reportado en los trabajos aquí referidos, en relación a los años 2003 al 2010 que son del orden de 0.8 a 1.3 m/año .

Finalmente se puede ver que existe gran variabilidad en cuanto a los resultados reportados en trabajos realizados con anterioridad y el presentado en este trabajo dentro del acuífero Cuautitlán-Pachuca, esto debido a la diferente metodología usada, la certeza de los datos usados en los modelos y balances, sin embargo, se puede decir que en todos los trabajos se reporta que el acuífero presenta graves abatimientos de los niveles estáticos y déficits muy altos.

6.9 Sustentabilidad del acuífero

Para estimar la distancia y el sentido de la variación del sistema ambiental correspondiente al acuífero Cuautitlán-Pachuca entre: el estado inicial del sistema (dato de la realidad) y el estado de transición del sistema hacia un escenario sustentable de desempeño de la sociedad. Se utilizaron indicadores que representen variables del sistema, que permitan medir el grado de

afectación ambiental, económica y social de la sobreexplotación del acuífero, como lo recomienda Achkar, (2005).

Lo anterior con la finalidad de determinar en cada aspecto (ambiental, económico y social) las variables que pueden determinar la viabilidad de que el acuífero sea sustentable mediante la implementación de medidas correctivas que permitan la recuperación del mismo, o puedan determinar también si se ha rebasado el umbral de acción para hacerlo sustentable.

Dichos indicadores serán medidos mediante la aplicación de encuestas a la población de la zona de interés, para después ser analizados y expresar el nivel de sustentabilidad del mismo.

6.9.1 Resultados de la evaluación de sustentabilidad por método MESMIS

Con base en el Cuadro 26 y la Figura 50, para el caso del volumen de extracción en el sistema de referencia se encontró por debajo del límite máximo de extracción calculado ($400 \text{ hm}^3/\text{año}$), es decir, se explotó en un 50 % ($200 \text{ hm}^3/\text{año}$); y el sistema alternativo sobrepasó en un 20.75% las capacidades de sustentabilidad del acuífero, lo que implica que las condiciones del sistema de referencia eran más controladas, tal vez debido a la menor población y demanda de agua.

El volumen de recarga, al igual que en el caso anterior en el sistema de referencia se acercaba hasta en 88.8% al óptimo; sin embargo para el alternativo se perdió hasta en 45% la capacidad de recarga, ocasionado por el crecimiento de la mancha urbana y al cambio de uso de suelo que ha mermado la capacidad del suelo de infiltrar el agua.

Para el caso del consumo de agua en la agricultura, en el sistema de referencia ya se encontraba cerca del volumen máximo por año destinado para ese rubro (40 de $55.91 \text{ Hm}^3/\text{año}$), sin embargo, para el sistema alternativo se sobrepasó ese límite comprometiendo la sostenibilidad del acuífero. En cuanto al número de usuarios que cuentan con pozo de agua, se pudo observar que el sistema

de referencia estaba cerca de un número de pozos ideal para el acuífero, sin embargo, en el sistema alternativo se presentó un incremento hasta llegar a 867 pozos, los cuales sobrepasan el número óptimo para proveer agua a los distintos sectores.

En el aspecto de calidad química del agua, en el sistema de referencia se contaba con una menor concentración promedio de sólidos totales; sin embargo, disminuyó su calidad en el sistema alternativo, haciendo que las aguas pertenecientes al acuífero tengan una alta presencia de sólidos totales. En el caso del cambio de uso de suelo, se observó que en el sistema de referencia se tenía un valor cercano al óptimo, sin embargo debido a factores como el crecimiento demográfico principalmente, en los últimos 20 años se presentó un aumento acelerado en este rubro, alejándose del valor de equilibrio hasta en un 80%.

Para el costo de reúso del agua, en el sistema alternativo se observó que en los últimos 20 años se han hecho esfuerzos por hacer rentable el reúso de agua como una alternativa para ahorrar, ya que de acuerdo a la Figura 50 este indicador se acerca hasta en un 50% al valor óptimo, mientras que en el sistema de referencia se tuvo tan solo un 15%, lo que permite decir que en la actualidad este indicador económico tiene una tendencia hacia la sustentabilidad.

Los costos de extracción en los últimos 40 años han variado considerablemente y de acuerdo a la Figura 50 se observó que en el sistema de referencia se registró un valor muy cercano al óptimo, para el caso del sistema alternativo, se encontró que el costo sobrepaso en 75% el valor óptimo, esto debido al aumento en las tarifas eléctricas y al hecho de que se esté extrayendo en la actualidad un mayor volumen de agua que hace 40 años. En el caso de la disponibilidad se observa una diferencia marcada entre los dos sistemas, ya que mientras en el de referencia se estaba por encima del óptimo, en el alternativo la disponibilidad fue nula, lo que convierte a este indicador ambiental en un problema grave para la sustentabilidad y equilibrio del acuífero. En relación a la evolución del nivel estático se encontró que la

variación entre los sistemas de referencia y alternativo fue mínima, siendo el sistema de referencia, el que presentó un valor más cercano al óptimo con un 70%, mientras que el sistema alternativo tuvo una disminución a 58%, lo cual aún representa un problema para el acuífero, ya que el nivel estático disminuye en el orden de 1.5 m/año (CEAA, 2009).

Para los casos del consumo per cápita, valor económico del agua, participación de usuarios en toma de decisiones e índice de desarrollo humano; el sistema alternativo mostró un avance firme del acuífero Cuautitlán-Pachuca hacia el equilibrio, equidad y sustentabilidad, lo cual puede deberse a la evolución en cuestiones de cultura y bienestar social que se han incrementado a la par del desarrollo del país.

Sin embargo es importante notar que con el pasar de los años los indicadores económicos y sociales sean los que se han desarrollado hacia la sustentabilidad en el sistema alternativo, mientras que los indicadores ambientales sobrepasaron los valores óptimos que permitirían un acuífero con tendencias hacia el equilibrio

Cuadro 26. Valores óptimos y valores ponderados de los indicadores

Atributo	Indicador y unidades	Criterio para el óptimo	Valor óptimo 100%	Sistema 1970-1990	Sistema 1991-2010
Productividad	1) Volumen de extracción (Hm ³ /año) (A)	Volumen máximo de extracción	400	200 (50%)	483 (20.75%)
	2) Volumen de recarga(hm ³ /año) (A)	Volumen mínimo de recarga	450	400 (88.88%)	203 (45.11%)
	3) Consumo de agua en la agricultura (Hm ³ /año) (E)	Volumen máximo para uso en agricultura	55.91	40 (71.54%)	60 (7.32%)
Estabilidad, resiliencia y confiabilidad	4) Número de usuarios con pozo de agua de acuerdo a su uso (No) (S)	Número ideal de pozos de extracción	694	600 (86.45%)	867 (24.93%)
	5) Calidad química de agua (mg/L) (A)	Grado de contaminación de las aguas (ST)	800	1000 (75%)	1500 (12.5%)
	6) Cambio de uso de suelo (Ha/año) (A)	Número máximo de ha cambiadas de uso de suelo	50	10 (80%)	40 (20%)
	7) Costos de reúso del agua (\$/L) (E)	Costo máximo de reúso de agua	1	5 (15%)	2 (50%)
	8) Costos de extracción (\$/KWH) (E)	Costo KWH	1	0.8 (80%)	2.5 (25%)
Adaptabilidad	9)Disponibilidad (Hm ³ /año) (A)	Volumen máximo disponible	50	100 (100%)	0 (0%)
	10)Evolución del nivel estático (m/año) (A)	Grado máximo de abatimiento	0.5	1.5 (70%)	2.1 (58%)
Equidad	11)Consumo per cápita (L/persona/año) (E)	Consumo máximo de agua por persona	36500	18250 (50%)	32850 (90%)
Autogestión	12) Valor económico del agua subterránea (\$/m ³) (E)	Costo por m ³ de agua subterránea	12	1 (8.33%)	11 (91.66%)
	13 Participación de usuarios en toma de decisiones (%) (S)	Porcentaje de usuarios que participen en toma de decisiones	100	30 (30%)	90 (90%)
	14) Índice de desarrollo humano (%) (S)	Porcentaje de incremento de bienes para mejora de vida	100	40(40%)	86 (86%)

(A): Indicador Ambiental; (E): Económico y (S): Social.

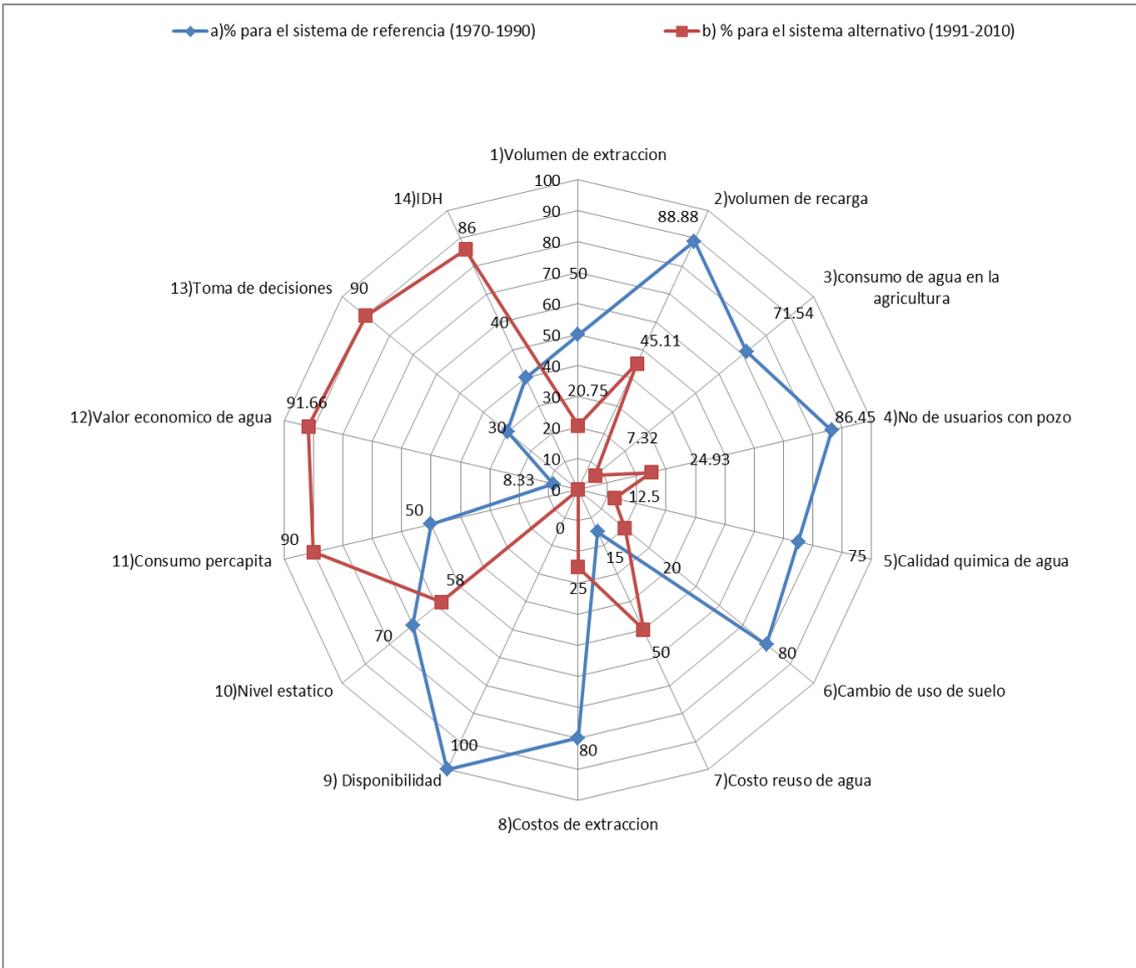


Figura 50. Gráfica de sustentabilidad del acuífero

7. CONCLUSIONES

Con base en los objetivos planteados al inicio se puede decir que: Se logró actualizar el modelo de simulación del acuífero de forma exitosa, encontrándose que con los actuales manejos en el año 2030 se presentara un panorama muy desalentador de disponibilidad de agua, por lo que será necesario tomar medidas correctivas para incrementar la recarga y reducir la extracción de forma paulatina en la próxima década para revertir la situación actual de uso desmedido del recurso agua principalmente para el uso de servicio público-urbano.

La determinación del balance de aguas subterráneas del acuífero Cuautitlán-Pachuca, permitió obtener los valores reales de extracción y recarga del acuífero en la actualidad, lo que permitió notar que el acuífero se encuentra en estado crítico debido a la incesante demanda de agua de los diferentes sectores, sobresaliendo el uso público-urbano como el que requiere más volumen de agua año con año; ocasionando que el acuífero presente grandes abatimientos de los niveles estáticos en los últimos 40 años, del orden de 1.5 m por año.

Se puede concluir que el mejor escenario para la recuperación del acuífero sería: aumentar el volumen de recarga mediante la inyección de agua tratada ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) como lo propone la CONAGUA, (2011) en la zona El Caracol, en Ecatepec, Estado de México, así como también la importación de agua de Actopan, Hidalgo, mediante la construcción de un acueducto que traería $2 \text{ m}^3/\text{s}$, y así aumentar la disponibilidad del agua, sería valioso proponer un uso eficiente de los volúmenes actuales de extracción, es decir, establecer por norma un número de pozos máximo de explotación en la zona de influencia del acuífero Cuautitlán-Pachuca, de los cuales solo se pueda extraer un volumen fijo por año para los diferentes sectores, lo cual permita que a un mediano plazo el volumen recargado revertir el déficit con el que se cuenta hoy día.

Con base en lo expuesto en este trabajo se puede decir que los actores políticos y sociales que conviven en la zona de influencia del acuífero deben considerar el promover el establecimiento de áreas de reserva dedicadas a la

infiltración natural del mismo, como son zonas boscosas y de alta cobertura vegetal; también sería de gran ayuda el proteger las zonas agrícolas dentro del acuífero mediante la tecnificación de las mismas, ya que la tendencia de los últimos 40 años ha sido la de desplazar a la agricultura para dar cabida a nuevas zonas urbanas, lo cual ha ocasionado que la zona agrícola este destinada a desaparecer a más tardar en el año 2030, de seguir la misma tendencia de crecimiento de la mancha urbana, ocasionando con ello graves problemas en la seguridad alimentaria de la misma población.

Se puede decir que el acuífero Cuautitlán-Pachuca presentaba condiciones de más equilibrio durante el sistema de referencia, debido a que en 9 de los 14 indicadores analizados estos tuvieron un comportamiento muy cercano al valor óptimo, mientras que en sistema alternativo, solo 5 indicadores presentaron tendencias hacia la sustentabilidad.

El acuífero se encuentra en un estado crítico, por lo que será necesario implementar medidas correctivas, principalmente en los indicadores que se detectó una mayor distancia entre los valores encontrados y los valores óptimos, ya que son los que condicionan en mayor o menor medida la recuperación del equilibrio económico, ambiental y social del sistema. Finalmente se puede concluir que el sistema requiere de nuevas políticas de gestión y uso de agua, una ley más estricta en cuanto a los niveles de contaminación de las aguas residuales vertidas y sistemas de tratamiento de las mismas para implementar un programa de recarga inducida del acuífero. Asimismo, sería de gran valor el promover el desarrollo de obras de conservación de suelo y agua, en zonas de alta permeabilidad dentro del acuífero, tal es caso de las presas de mampostería y las tinas ciegas, que facilitarían la retención e infiltración de agua dentro del área de influencia del acuífero.

Se puede concluir que el sistema requiere de nuevas políticas de gestión y uso de agua dentro de la zona de influencia del acuífero, ya que en aspectos puntuales como los mencionados anteriormente se deben implementar cambios tales como un programa de recarga inducida del acuífero, un

replanteamiento de los costos de extracción de las aguas subterráneas, de manera que sean revisadas las tarifas de agua y estas se ajusten al valor real del agua y permitan que los diferentes usuarios hagan un uso más eficiente del preciado recurso.

Asimismo, sería de gran valor el promover el desarrollo de obras de conservación de suelo y agua, tales como presas de mampostería y tinajas ciegas en zonas de alta permeabilidad dentro del acuífero, lo que facilitaría la retención de azoles y la infiltración de agua, también sería bueno concientizar al usuario a través de campañas a través de los diferentes medios de comunicación para buscar erradicar el desperdicio en los diferentes sectores de la sociedad.

8. RECOMENDACIONES GENERALES

Cuadro 27. Estrategias propuestas para la recuperación del acuífero

Área	Estrategia
Restauración ambiental del acuífero	<ol style="list-style-type: none"> 1. Extraer el agua del subsuelo sustentablemente 2. Planear el abastecimiento en función de la disponibilidad. 3. Conservar y restaurar las zonas naturales de recarga del acuífero 4. Evitar la contaminación de mantos acuíferos 5. Promover pagos por servicios ambientales. 6. Inducir la captación de agua de lluvia en techos para evitar que el volumen escurrido salga del acuífero en la red de drenaje. 7. Promover el establecimiento de presas de mampostería para control de azolves y tinajas para aumentar la recarga
Distribución del agua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Atender fugas y daños a infraestructura de conducción. 2. Revisar las concesiones de agua en la zona de mayor extracción del acuífero. 3. Modernizar los sistemas de riego en las zonas agrícolas del acuífero. 4. Revisar tarifas y subsidios.
Desalojo de aguas y tratamiento de aguas residuales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Promover la construcción de plantas de tratamiento de agua residual. 2. Separar el drenaje pluvial y sanitario de las zonas industriales y de los desarrollos habitacionales. 3. Promover la recarga del acuífero con agua residual tratada. 4. Promover el reúso del agua en los diferentes sectores.
Cultura del agua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Incentivar el ahorro y uso racional del agua en los diferentes sectores. 2. Sensibilizar sobre el costo real del agua y la importancia del pago oportuno.
Organismos operadores	<ol style="list-style-type: none"> 1. Promover la autosuficiencia financiera y operativa. 2. Propiciar la cooperación entre organismos operadores.
Normatividad	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar el cumplimiento de la normativa existente. 2. Promover normativas más estrictas con el consumidor final para promover un buen uso del recurso.

8.1 Recomendaciones específicas

8.1.1 Planta de tratamiento en la zona El Caracol

La planta tendrá la capacidad de tratar 4 m³/s de los cuales 2 m³/s se emplearán para riego agrícola, 1 m³/s se emplearán para el reúso urbano e industrial, y el restante 1 m³/s para recarga artificial del acuífero Cuautitlán-Pachuca. En la zona se tienen identificados diversas demandas de agua que pueden ser satisfechas con agua residual tratadas, estas son:

- a) Usos industriales, municipales y recreativos
- b) Riego agrícola en los municipios de Atenco y Texcoco
- c) Recarga directa al acuífero.

El objetivo general del proyecto cuando se encuentre en operación se resume en instalar la infraestructura necesaria para operar una planta de tratamiento del agua residual proveniente de la red de drenaje, la cual estará diseñada para manejar el caudal, en una primera etapa de 2 m³/s, y en una segunda etapa 2 m³/s adicionales dando un total de 4 m³/s.

Las obras contempladas en el programa son el túnel emisor oriente y las plantas de tratamiento de agua residuales Atotonilco, el caracol, Zumpango, vaso de Cristo y barrio Zabal, como las más representativas sumando una capacidad total para ser tratada de 42 m³/s con una capacidad hidráulica adicional para manejar los gastos de aguas.

El volumen de agua que se inyectaría en los pozos de recarga sería del orden de 31.53 hm³/año, lo que la hace una alternativa altamente rentable en lo concerniente a la recuperación del acuífero; sin embargo en términos financieros resultaría muy costoso llevar a cabo la construcción de la planta, su posterior operación, la perforación de los pozos y la inyección diaria del agua al acuífero. Por lo que se puede concluir que este proyecto solo sería factible si existe la seguridad financiera para la operación del mismo, porque en cuestión de aumentar la recarga del acuífero sería muy representativo.

8.1.2 Acueducto Actopan – Pachuca

La zona metropolitana de la Ciudad de Pachuca en el Estado de Hidalgo presenta un déficit importante en el abastecimiento de agua, situación que se verá agravada en el futuro próximo, y a largo plazo. Aunado a esto existe una sobreexplotación de los recursos en el acuífero Cuautitlán – Pachuca. Esto pone en riesgo las actividades económicas y sociales que dependen del agua en el corredor Tizayuca – Pachuca, ya que para obtener volúmenes adicionales se requiere de nuevas disponibilidades para el desarrollo de ésta zona.

De acuerdo con lo anterior la Comisión Estatal de Agua y Alcantarillado exploró diversas alternativas para abastecer de agua a estas zonas, resultando una de las más factibles la extracción de agua subterránea del acuífero Actopan – Santiago de Anaya. A fin de resolver esta problemática el gobierno proyecta la construcción del acueducto Actopan-Pachuca, que posibilitaría traer hasta dos metros cúbicos por segundo de agua a la capital hidalguense y no sólo subsanar el faltante actual en la zona metropolitana, sino afrontar el desarrollo esperado en la región Tizayuca, la explosión demográfica en Mineral de la Reforma y el crecimiento de la región en general para los próximos 20 o 30 años. El costo aproximado de los trabajos asciende a 1,426 MDP. La realización de este proyecto permitiría:

- a) Abatir el rezago en servicio de agua potable en la zona metropolitana de Pachuca,
- b) Permitir la recarga y el consecuente equilibrio del acuífero Cuautitlán – Pachuca.
- c) Ampliar la disponibilidad del recurso hídrico para el corredor Tizayuca-Pachuca.
- d) Beneficio para 713 mil habitantes al año 2026 en Pachuca y su zona conurbada.
- e) La introducción de 2 m³/s aumentaría la disponibilidad de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca con un volumen de 63.07 hm³/año, es decir, el doble que con el proyecto de recarga inducida en la zona El Caracol.

9. BIBLIOGRAFÍA

Achkar, M., Canton, V., Cayssials, R., Domínguez, A., Fernández, G. y F. Pesce. Ordenamiento Ambiental del Territorio 2005. Comisión Sectorial de Educación Permanente. DIRAC, Facultad de Ciencias. Montevideo. 104pp.

Astier, M; Hollands, J. 2005. Sustentabilidad y campesinado: seis experiencias agroecológicas en Latinoamérica. Mundi-Prensa. Grupo Interdisciplinario de tecnología rural aplicada, A.C. México.

Carrillo-R., J.J., Cardona, A., Herat, T., Huizar-A, R and Kobr, M. (1999). Marco geológico, hidrogeología subterránea, hidrogeoquímica, análisis geomorfológico y registros de temperatura en la subcuenca del río de las Avenidas. Informe Técnico. CAASIM, Hidalgo, México. V. 1, p. 268.

CEAA. (2005). Programa Estatal de Desarrollo Hídrico 2005 –2011. Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado, Hidalgo. Gobierno del Estado de Hidalgo.

CEAA. (2006). Estudio geohidrológico del Valle Pachuca - Tizayuca. Informe Técnico. Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado, Hidalgo. Gobierno del Estado de Hidalgo.

Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2010). Tarifas eléctricas domesticas de alto consumo (DAC) y agrícolas. Consultado 22 de agosto de 2011. <http://www.cfe.gob.mx>

Comisión Nacional del Agua (CNA), 2008. Estadísticas del agua en México. Editor Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales; Tlalpan, México, D.F. 233 pp.

Comisión Nacional del Agua. (2009). Estadísticas del Agua de la Región Hidrológica Administrativa XIII, Aguas del Valle de México (EAVM). Obtenido

de:<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/OCAVM-1>
[EAOCAVM2009.pdf](#)

Comisión Nacional del Agua. (2011). Estadísticas del Agua en México (EAM). Obtenido de <http://semarnat.janium.net/janium/Documentos/218057.pdf>

Comisión Nacional del Agua. (CONAGUA). 2007. Pruebas de Bombeo en la Zona Metropolitana del Valle de México (segunda edición). México.

CONAGUA. (2004). Estudio de Modelación hidrodinámica del Acuífero Cuautitlán-Pachuca. Informe Técnico. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México.

CONAGUA. (2007). Programa Regional de Saneamiento y Recuperación de Acuíferos del Valle de México, Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento y Coordinación de Proyectos de Saneamiento del Valle de México.

CONAGUA. (2008). Programa Nacional Hídrico 2007 – 2012. Comisión Nacional del Agua. Gobierno de México. Disponible en:http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PNH_05-08.pdf

Consejo Nacional de Población. 2005. Proyecciones de crecimiento poblacional en México. Disponible en:
www.portal.conapo.gob.mx/00cifras/proy/RM.xls

Custodio E. y M. R. Llamas (1983). Hidrología Subterránea. Editorial Omega (2 Vol.) Barcelona, España. 2359 pp.

Davis, S.N. y De Wiest, R.J.M. (1971). *Hidrogeología*. Ariel, Barcelona. 563 pp.

De Wiest, R. 1965. *Geohydrology*. John Wiley. USA.

Diario Oficial de la Federación. (2009). Acuerdo por el que se da a conocer la ubicación geográfica de 371 acuíferos del territorio nacional, se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de 282 acuíferos, y se modifica, para su mejor precisión, la descripción geográfica de 202 acuíferos. Comisión Nacional del Agua. México. Disponible en:<http://www.cofemermir.gob.mx/crLecAnte.asp?submitid=17811>

Escalante, V., Cardoso, L., Ramírez, E., Moeller, G., Mantilla, G., Montecillos, J., Servín C., y Villavicencio, F. (2003). Valoración de Mercado para el Reúso del Agua Residual Tratada. Informe final. Proyecto realizado por el IMTA para la CONAGUA. pp. 230–236.

Galindo C. E., Otazo S. E. Ma., Reyes G. L. R., Arellano I. S. M., Gordillo M. A., González R. C. A. (2010). Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlán-Pachuca. GeoFocus (Informes y comentarios), nº 10, p. 65-90.

Gob-Méx, Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. (2007). Plan Nacional de Desarrollo 2007- 2012. Presidencia de la República, México. Disponible en:http://pnd.calderon.presidencia.gob.mx/pdf/PND_2007-2012.pdf

GRAVAMEX . 1990. Soporte Técnico de la Disponibilidad del Acuífero de Cuautitlán – Tizayuca – Pachuca.

Hauwermeiren Van, S. 1998 Manual de Economía Ecológica. Instituto de Economía Ecológica. Santiago de Chile. 265 pp.

Herrera G., Simuta R. y Bravo A. (2007). Modelo de flujo del agua subterránea y diseño de red de monitoreo para el acuífero del valle de Querétaro. 4to Congreso Internacional, 2do Congreso Nacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. UMSNH–aSMMNI-CIMNE, México.

Huizar-Alvares R., Hernández G., Carrillo-Martinez M., Carrillo-Rivera J.J., Herat T., Ángeles G. (2003). Geologic structure and groundwater flow in the Pachuca-Zumpango sub-basin, central México, Environmental Geology. V. 43, p. 385-399.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2005. Modelo digital de elevación de la zona del acuífero Cuautitlán-Pachuca. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>

Kemper, K. (2002). Formal Water Markets: Why, When, and How to Introduce Tradable Water Rights. Oxford, England. Oxford University Press.

Kumar C. P. (2002). Groundwater Flow Models. Scientist E1. National Institute of Hydrology. India, Roorkee – 247667 (Uttaranchal).

Langevin C. D., and Guo W. 2006. MODFLOW/MT3DMS-Based Simulation of variable-density ground water flow and transport. Ground Water Magazine. 44(3): 339-351 pp.

Martínez. P.E.; Martínez S. P. y Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Mundi-Prensa, Madrid. 284 pp.

Masera, O; Astier, M. y López, R. S, 1999. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales. El marco de evaluación MESMIS. GIRA-Mundi-Prensa, México.

Masera. O, Lopez-Ridaura, S. 2000. Sustentabilidad y sistemas campesinos: cinco experiencias de evaluación en el México rural. Mundi-Prensa Grupo Interdisciplinario de tecnología rural aplicada, A.C. Mexico.

McDonald M.G. y Harbaugh, A.W., 1988. A modular threedimensional finite-difference groundwater flow model: U.S. Geological Survey, Techniques of Water Resources Investigations, Book 6. Washington DC.

Meinzer. O.E. (1923b) Outline of groundwater Hidrology, with definitions. USGS. Water Supply Paper, 489 pp.

NOM-127-SSA1-1994. (1994). "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". Disponible en:<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>

Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000. Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2003). Agua para Todos, Agua para Vida: Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo Hídrico en el Mundo. Obtenido de <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556s.pdf>

Peña, S. 2007. Introducción a la hidrología Subterránea. Colegio de Postgraduados.

Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). 2005. Aprovechamientos de aguas subterráneas registrados, en la zona de influencia del acuífero Cuautitlán-Pachuca. Disponible en: <http>

Reilly, T.E. (2001) System and boundary conceptualization in groundwater flow simulation. Us Geological Survey Technique of Water Resource Investigation, book 3, chapter B8. 26 pp.

Sandoval, R. (2004). A participatory approach to integrated aquifer management: The case of Guanajuato State, México. Hydrogeology J., 12(1): 6-10.

Sarandon S. J. 2002. Agroecología: El camino hacia una agricultura sustentable. Ediciones Cientificas Americanas. Argentina.

Theis, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometrical surface and the rate and duration of discharge of well using groundwater storage. Transaction American Geophysical Union. USA.

THORSA. (1991). Actualización Geohidrológica en el Valle de Pachuca-Tizayuca, estado de Hidalgo. Informe Técnico. Ingenieros Consultores y Constructores S.A. de C.V.

Walton, C.W. 1970. Groundwater Resources Evaluation. McGraw-Hill. USA.

Anexo 1. Vértices de la poligonal del acuífero 1508: Cuautitlán-Pachuca

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	24	7	19	58	17.4	
2	98	29	14.6	19	55	35.4	
3	98	29	45.7	19	52	6.5	
4	98	31	1.2	19	49	12.2	
5	98	32	11.8	19	49	44.4	
6	98	36	19.7	19	46	48.8	
7	98	36	15.3	19	46	2.4	Del 7 al 8 por el límite estatal
8	98	39	50.8	19	36	17.5	Del 8 al 9 por el límite estatal
9	98	41	35.1	19	34	30.4	
10	98	46	41.1	19	35	25.6	
11	98	50	23.5	19	38	4.7	
12	98	52	9.8	19	35	24.2	
13	98	58	48.8	19	34	50.6	
14	99	1	0.7	19	35	11.6	
15	99	7	2.9	19	35	17.2	Del 15 al 16 por el límite estatal
16	99	7	23.2	19	35	30.7	
17	99	16	40.2	19	35	28.2	
18	99	25	42.6	19	28	51.6	
19	99	30	6.3	19	33	27	
20	99	25	36	19	37	50.6	
21	99	25	1.9	19	40	50.6	
22	99	22	11	19	43	2.7	
23	99	21	4.4	19	46	31	Del 23 al 24 por el límite estatal
24	99	17	48	19	50	4.5	Del 24 al 25 por el límite estatal
25	99	13	8.5	19	54	5.6	
26	99	9	18.3	19	52	24	
27	99	9	16.5	19	50	25.4	
28	99	2	17.4	19	52	7.7	
29	98	58	22.3	19	54	49.9	
30	98	57	58.4	19	55	48.5	Del 30 al 31 por el límite estatal
31	98	56	57.9	20	1	43.3	
32	98	53	5.1	20	3	29	
33	98	51	33.1	20	5	3.8	
34	98	49	4.9	20	5	47.8	
35	98	47	10.2	20	8	3.9	
36	98	45	19.4	20	8	51.9	
37	98	44	25.9	20	13	13.9	
38	98	39	50.7	20	6	55.3	
39	98	37	42	20	7	37.6	
40	98	33	17	20	4	29.9	
41	98	33	37.1	20	0	43.4	
42	98	27	15.2	19	59	21.1	
1	98	24	7	19	58	17.4	

Fuente: Diario Oficial de la Federación (DOF) del viernes 28 de agosto de 2009

Anexo 2. Pruebas de bombeo

La realización de una prueba de bombeo consiste en observar los efectos de abatimiento o recuperación de los niveles piezométricos en un acuífero. Los niveles se obtienen midiendo el descenso del nivel del agua con respecto al tiempo para un caudal de bombeo constante a través de captaciones hidráulicas del tipo de pozos o norias y pueden observarse en el propio pozo de bombeo (pozo de operación) o en pozos próximos a él (pozo de observación).

Al iniciarse el bombeo en un pozo, el nivel del agua sufre un abatimiento, el cual es mayor en el propio pozo y decrece conforme aumenta la distancia. La fuerza responsable de que el agua se mueva hacia el pozo, es el gradiente que se genera entre las cargas hidráulicas del propio pozo y las próximas a él. El agua fluye a través del acuífero en todas direcciones, aumentando su velocidad conforme se acerca al pozo, de acuerdo a la Ley de Darcy; esta expresa que, en un medio poroso el gradiente hidráulico es directamente proporcional a la velocidad, por lo que el abatimiento en la superficie piezométrica forma un cono de depresión, cuyo tamaño y forma dependen del caudal, tiempo de bombeo y características del acuífero. La influencia de algunos de estos factores en la forma de la depresión piezométrica se muestra en la Figura 1a.

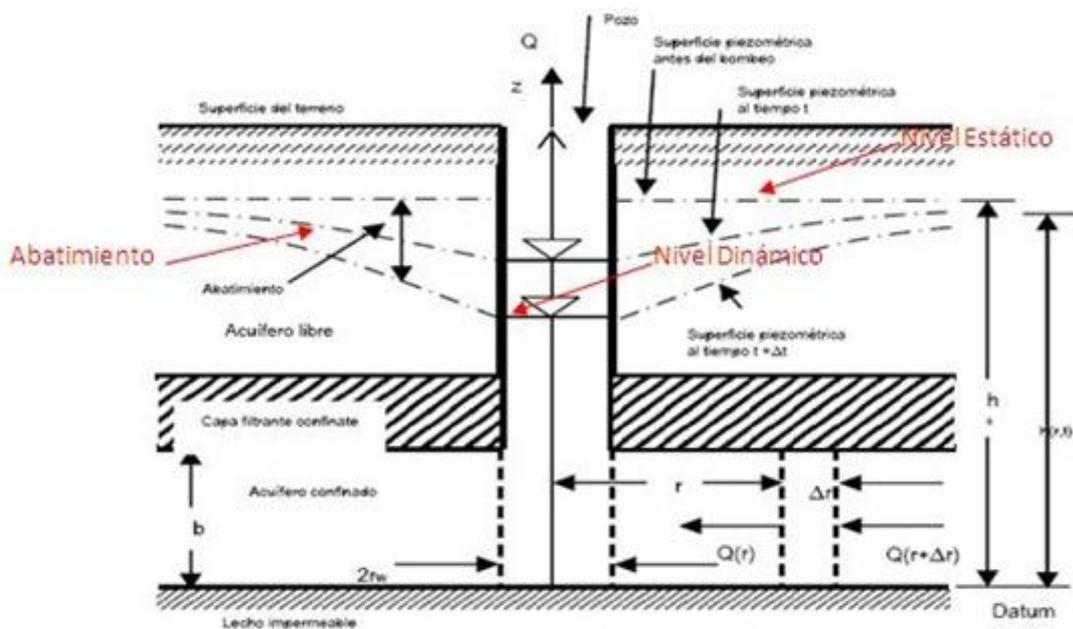
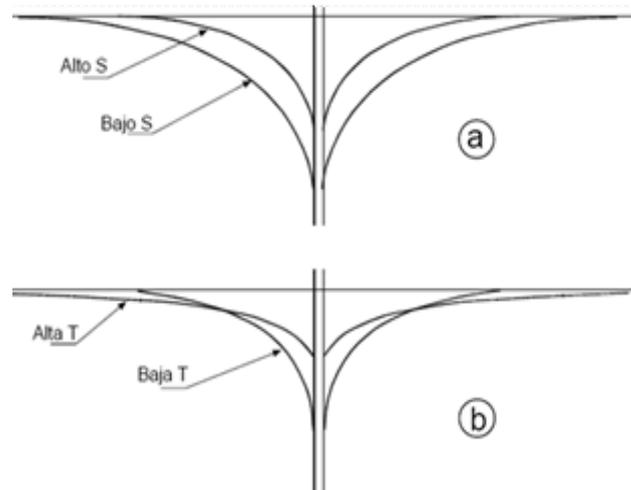


Figura 1a. Nivel piezométrico antes y después de bombeo



(a) A igual transmisividad (T), el cono es mayor cuanto más bajo es el Coeficiente de Almacenamiento (S). (b) A igual coeficiente de almacenamiento, la pendiente del cono aumenta cuanto más baja es la transmisividad

Figura 2b. Influencia de algunos factores en la depresión piezométrica

El propósito de las pruebas de bombeo es el de estimar las características hidrodinámicas de la formación acuífera como son la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S). También con la interpretación de estas se puede llegar a definir la existencia de fronteras laterales, recarga de ríos o manantiales, radio de influencia del pozo, factor de infiltración y predicción del comportamiento de los niveles piezométricos.

La transmisividad de un acuífero, se define como la cantidad de agua, por unidad de ancho, que puede transmitirse horizontalmente a través del espesor saturado de un acuífero con un gradiente hidráulico unitario, Ésta se puede calcular a través de la siguiente ecuación.

$$T = (K) \cdot (b) \quad (1a)$$

Dónde:

T es la transmisividad (L^2/T), b es el espesor saturado del acuífero (L) y K es la conductividad hidráulica (L/T). Sin embargo para un acuífero compuesto de varios estratos la transmisividad total es la suma de las transmisividades de cada estrato.

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (2b)$$

Dónde: n es el número total de estratos y
 T_i es la transmisividad del estrato i .

El coeficiente de almacenamiento (S) en un acuífero confinado, se define como el volumen de agua que causa un descenso de una unidad en el nivel piezométrico, coincide con la suma del agua liberada por el acuífero como consecuencia de la dilatación que ésta sufre al descomprimirse y el agua que cede el terreno al compactarse el armazón por tener que soportar en mayor parte el peso del terreno suprayacente. Este coeficiente se puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$S = (b) \cdot (S_s) \quad (3b)$$

Donde S_s es el almacenamiento específico y b el espesor del acuífero. El valor del coeficiente de almacenamiento en este tipo de acuíferos varía entre 0.001 y 0.00001. En un acuífero libre el valor del coeficiente de almacenamiento coincide con el valor de rendimiento específico (**Sy**), que es el volumen de agua que podemos obtener de un medio poroso saturado.

$$S = Sy \quad (4b)$$

La forma experimental más confiable para la determinación de las características geohidrológicas de un acuífero alrededor del pozo, son las pruebas de bombeo. La selección del pozo en donde se efectuara la prueba deberá, en medida de lo posible, cumplir con la mayoría de los siguientes requisitos:

- Ser un pozo de reciente perforación, con el fin de lograr que los parámetros a obtener sean representativos del medio natural que rodea al pozo.
- Estar dotado de un equipo de bombeo en condiciones apropiadas para someter un caudal constante durante el tiempo de ejecución de la prueba.
- No haber sido bombeado en las últimas 24 hrs.

- Contar con los dispositivos necesarios para ser sondeado y aforado con facilidad.
- Presentar condiciones satisfactorias para evitar que el agua bombeada se infiltre en las proximidades del pozo.
- Estar colocado a una distancia no menor de un kilómetro de pozos que se estén bombeando durante la prueba, o hayan estado operándose hasta 24 hrs antes de la iniciación de la misma.
- Ser de características constructivas (profundidad, diámetro, entubado, etc.) y de corte geológico conocido.
- Encontrarse próximo a pozos, de características constructivas similares, que no hayan operado en las últimas 24 hrs y que puedan ser fácilmente sondeados para utilizarlos como pozos de observación.

Perforación de pozos de observación

Los pozos de observación deben ser perforados en un diámetro tal que hagan posible la medición rápida y precisa de los niveles del agua. Estos por lo común se perforan con diámetros de 5, 7.5 y 10 cm. Su profundidad y colocación de las rejillas deberá ser similar a la del pozo bombeado. De no ser posible, su profundidad deberá coincidir con la línea media de la rejilla instalada en el pozo de bombeo.

El emplazamiento de los pozos de observación se determina al tomar en cuenta la influencia que ejercen varios factores, entre ellos, la estratificación del subsuelo, la dirección del flujo del agua, la profundidad del pozo del bombeo, etc. Por lo común, se sitúan a distancias de 10 a 100 m del pozo de bombeo.

Duración de la prueba de bombeo

Una prueba de bombeo completa consta de dos etapas: la de bombeo y la de recuperación. En la primera etapa se extrae agua del pozo de bombeo midiendo los abatimientos tanto en este como en los pozos de observación, durante un cierto tiempo. La duración de la prueba varía de 4 a 96 horas, cuando se tienen pozos de observación y de 4 a 24 horas cuando se carece de estos. Sin embargo, es conveniente tender a la máxima duración, sobre todo

cuando se sospeche la presencia de fronteras hidrogeológicas que puedan afectar de manera sensible la productividad del pozo. En estos casos, la duración inicialmente fijada puede ser modificada en el transcurso de la prueba.

Al terminar la prueba de bombeo y desconectar el motor de la bomba, se inicia la prueba de recuperación. Teóricamente, la prueba de recuperación debería prolongarse el mismo tiempo que la de bombeo. En la práctica, su duración es mucho menor que la prueba de bombeo, debido al hecho de que los acuíferos tienden rápidamente al estado estacionario al cesar la extracción. Esto hace que el tiempo que dura la prueba de recuperación sea varias veces menor que el de bombeo.

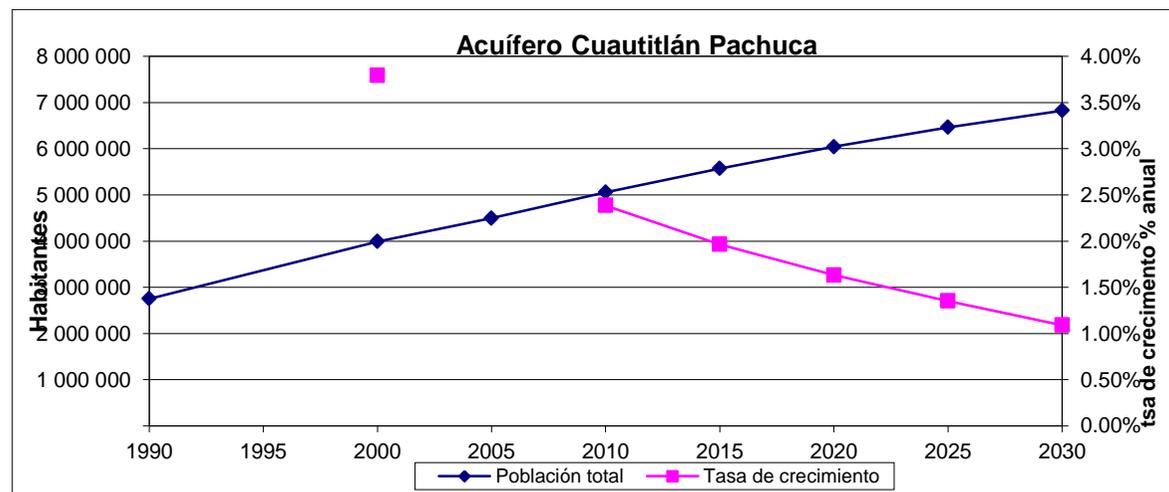
La prueba de bombeo podrá tener una sola etapa (la de bombeo o la de recuperación) en aquellos casos en que no pueda disponerse del equipo de bombeo por un tiempo mayor o en que las condiciones existentes no sean favorables para la ejecución de ambas etapas. Cuando solo se ejecute la prueba de recuperación, deberá anotarse el caudal, la duración y la hora de suspensión del bombeo. Al diseñar una prueba de bombeo antes de llevarla a cabo en el campo, es conveniente recordar que la curva de abatimientos que se obtenga debe estar constituida por un número suficiente de puntos y de tiempos, de tal manera que se observen con claridad la forma y las variaciones de la curva (puntos de inflexión, pendiente de curva, etc.)

No. de Censo	Pozo No.	Nombre	Pozo bombeo y/o Observación	Nivel	Nivel	Q	Capacidad	T	T	T	T	K	B	T	Sy	Observaciones	T	
				estático	Dinámico	Extracción	específica	Abatimiento	Recuperación			Abatimiento	Esesor	Abatimiento			Recomendabl	
				m	m	l/s	lps/m	m ² /d	m ² /d	m ² /d	m ² /d	m/d	m	m ² /d			m ² /d	
				Manual	Manual	GWW Theis	GWW Hantush	Rathod y Rushton	Rathod y Rushton	Rathod y Rushton								
399	33	Ramal Teoloyucan	Bombeo	86.78	90.32	93.53	26.42	13444	14788	*****	*****		24	163	3912	0.005	Abatimientos muy pequeños, no interpretable. Los resultados obtenidos con los métodos no son representativos	****
352	11	Ramal Teoloyucan	Bombeo	104.61	130.82	50.60	1.93	229	239	347	62		1.4	200	280	0.005	Se recomienda promedio de métodos, manual, Theis y Rathod y Rushton.	274
568	17 Bis	Ramal FFCC	Bombeo	80.55	97.37	60.00	3.57	730	499	382	162		2.1	225	472.5	0.005	De acuerdo con las gráficas se recomienda un promedio entre métodos, rec. manual, Theis, Hantush y Rathod y Rushton.	379
262	38 Z	Ramal Tizayuca-Zumpango	Bombeo	81.75	108.59	18.00	0.67	150	141	*****	*****		0.4	195	78	0.045	Se recomienda métodos manual, Rathod y Rushton	123
7-19	Viveros 1-B	Viveros 1-B	Bombeo	64.00	88.48	35.50	1.45	225	281	217	81		1.0	185	185	0.05	Se recomienda un promedio de todos los métodos	198
11-11	4	Ramal Mixquic-Santa Catarina	Bombeo	47.40	96.51	54.26	1.10	156	214	150	26		0.7	152	106.4	0.05	Se recomienda un promedio de los métodos manual, Theis, Rathod y Rushton.	156
606	11	Ramal Ecatepec	Bombeo	84.17	87.04	37.30	13.00	1474	939	1400	567		8.0	220	1760	0.03	Se recomienda un promedio de todos los métodos, presenta abatimientos bajos.	1228
	11 Bis	Ramal Ecatepec	Observación	72.58	72.60			*****	*****	*****	*****						Prácticamente no presenta abatimientos, no interpretable	****
601	8	Ramal Ecatepec	Bombeo	89.22	97.07	37.47	4.77	423	294	378	281		3.6	175	630	0.04	Se recomienda un promedio de todos los métodos	401
	8Bis	Ramal Ecatepec	Observación	84.56	85.06			3950	3840	4694	2958						Abatimientos muy pequeños, no interpretable.	****
9-7	10	Sistema Tecomitl	Bombeo	39.91	63.44	41.00	1.74	324	324	294	73		4.5	60	270	0.05	Se recomienda un promedio de todos los métodos	257
10-9	5-B	Pedregal	Bombeo	78.73	104.22	40.00	1.57	253	211	153	65		4.7	52	244.4	0.1	Se recomienda promedio de los métodos manual, Theis y Rathod y Rushton.	215
148	4	Cda. Hgo. Tecomac, Méx.	Bombeo	82.20	94.45	28.00	2.29	295.14	442.71	343.81	66.39		4.7	65	305.5	0.1	se recomienda promedio de los métodos, manual, Theis y Rathod y Rushton.	347
	27	Los Reyes Nopala, Tepetlaoxtoc, M	Bombeo	50.28	88.45	10.00	0.26	*****	*****	15.13	0.13		0.86	55	47.3	0.15	No interpretable, una aproximación es el del método de Rathod y Rushton	55
15	760	Viveros La Loma (El Palmar)	Bombeo	114.95	125.29	47.75	4.62	3774.92	3774.92	*****	108.06		4.5	135	607.5	0.15	Los niveles de agua se establecieron rápidamente, en GWW -Hantush tiene error 26.15, se recomienda el método de Rathod y Rushton	608
1254	21	San Javier, Autop. Méx -Pachuca.	Bombeo	132.89	147.27	54.00	3.75	1219.72	1707.60	*****	*****		1.9	267	507.3	0.1	Se recomienda promedio de los métodos manual y Rathod y Rushton.	1145
1248	2	Télez, Hgo.	Bombeo	71.59	73.82	35.00	15.70	2912.59	1844.64	2532.70	*****		9.7	238.41	2312.577	0.005	Los abatimientos son bajos se considera como una aproximación el promedio de los métodos manual, Theis y Rathod y Rushton.	2401
714	318	SAPASE, Jardines de Santa Clara	Bombeo	49.75	64.16	42.00	2.91	664.07	202.77	342.53	311.57		2.05	200.2	410.41	0.005	Se recomienda un promedio de todos los métodos	386
69	A-52	San Martín de las Pirámides	Bombeo	41.25	41.56	42.00	135.48	*****	*****	*****	*****		*****	*****			No presenta abatimientos de importancia, no es interpretable	****

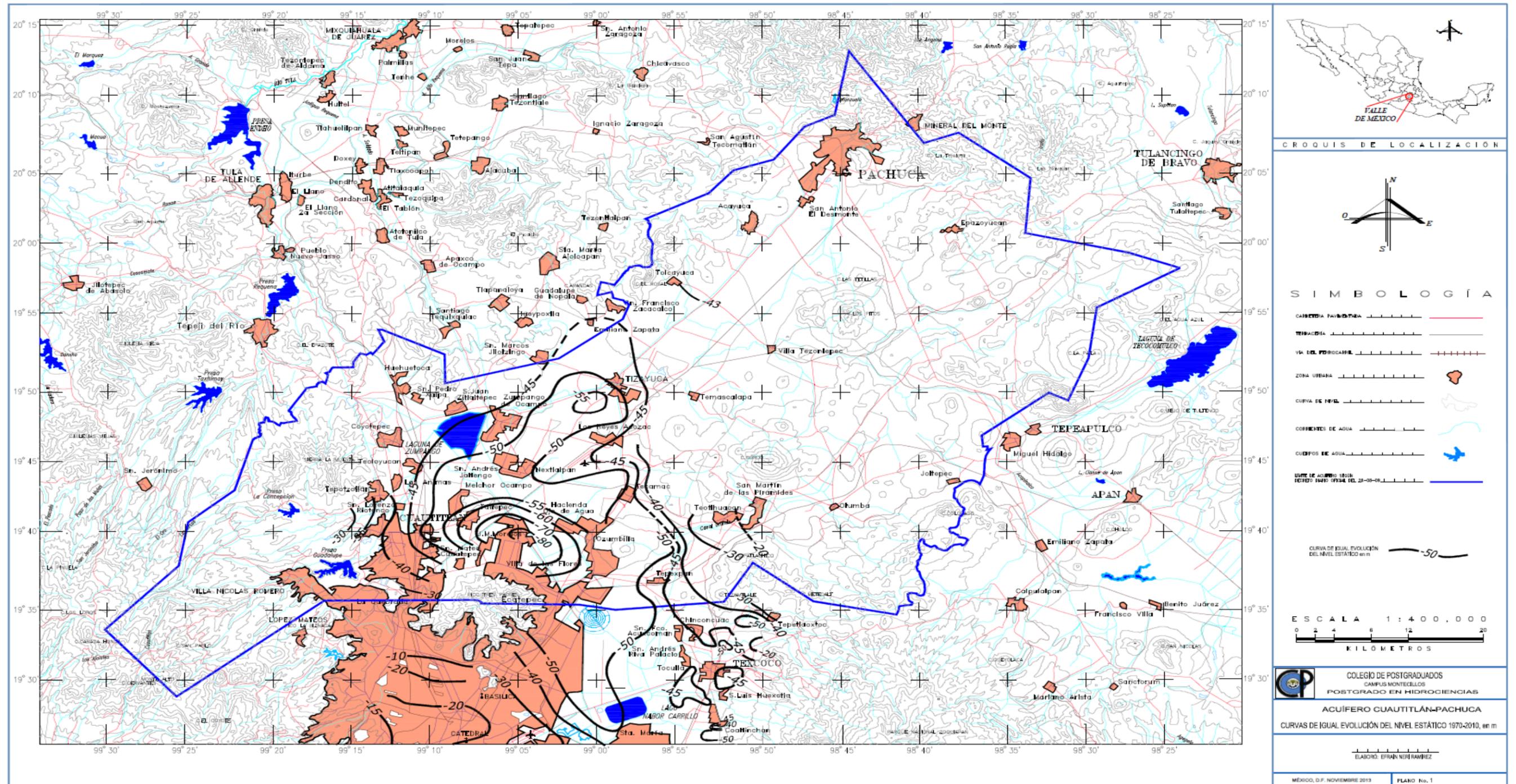
Anexo 3. Crecimiento poblacional estimado para el 2030 según la CONAPO (2005)

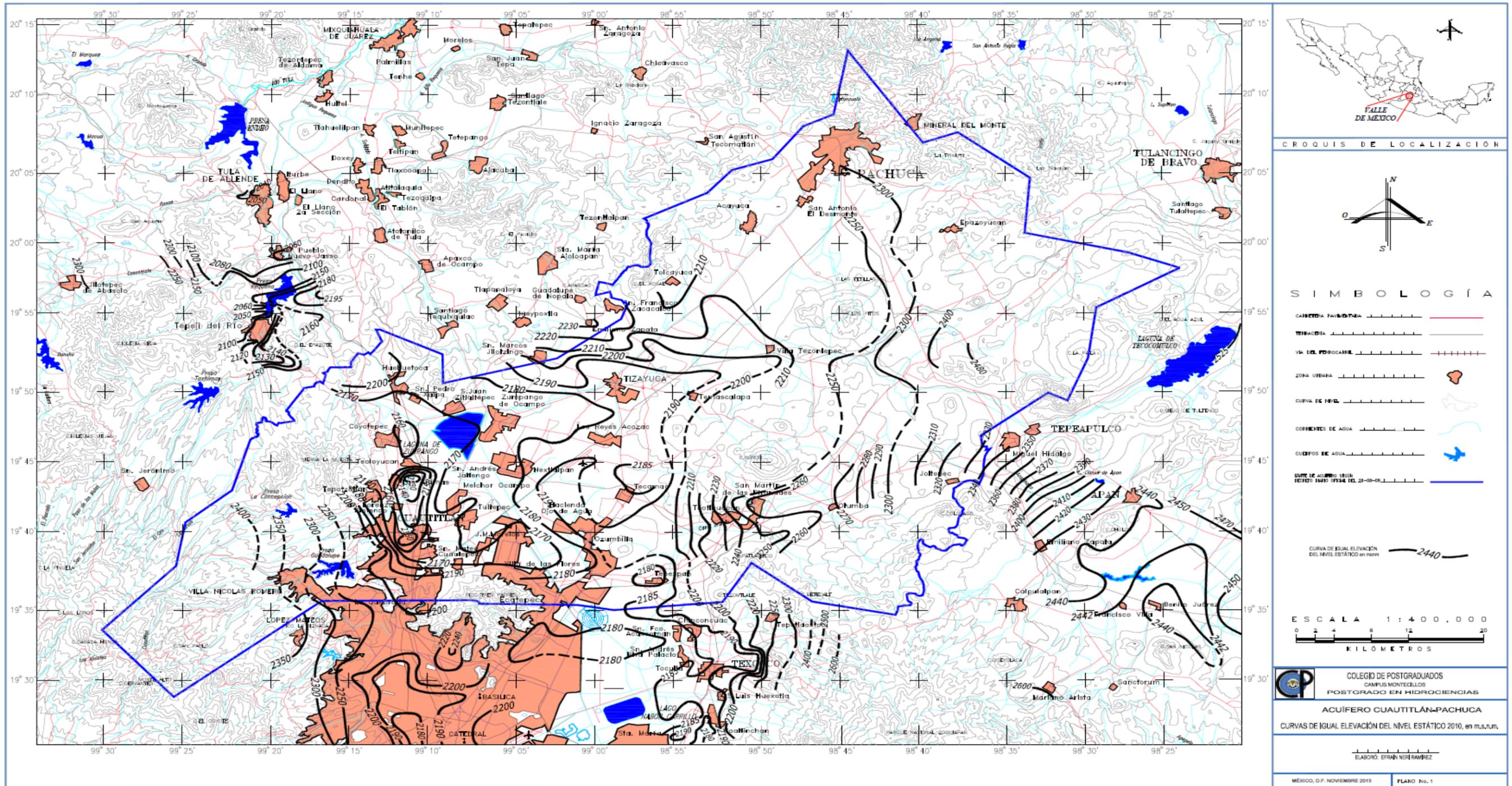
Acuífero Cuautitlán- Pachuca	Proporción de área Aprox en Cuautitlán- Pachuca	Clave	Municipio	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
1	1	15002	Acolman	43 276	61 250	76 042	92 735	109 444	125 872	141 780	156 810
1	1	15011	Atenco	21 219	34 435	42 272	51 240	60 482	69 750	78 907	87 745
1	1	15016	Axapusco	15 803	20 516	21 980	24 267	26 435	28 462	30 329	31 985
1	1	15020	Coacalco de Berriozábal	152 082	252 555	284 223	325 391	361 124	391 938	417 708	438 023
1	1	15023	Coyotepec	24 451	35 358	39 443	43 619	47 698	51 557	55 156	58 404
1	1	15024	Cuautitlán	48 858	75 836	106 934	143 496	178 164	210 531	240 135	266 387
1	0.7	15033	Ecatepec de Morelos	1 218 135	1 622 697	1 687 378	1 743 838	1 777 646	1 794 211	1 795 294	1 780 946
1	1	15035	Huehuetoca	25 529	38 458	58 105	80 711	104 145	127 868	151 535	174 665
1	1	15038	Isidro Fabela	5 190	8 168	8 806	9 844	10 865	11 851	12 785	13 647
1	1	15044	Jaltenco	22 803	31 629	26 438	27 951	29 187	30 165	30 892	31 348
1	0.5	15046	Jilotzingo	9 011	15 086	14 074	13 596	13 029	12 396	11 719	11 008
1	1	15053	Melchor Ocampo	26 154	37 716	38 173	38 210	38 043	37 677	37 146	36 444
1	1	15059	Nextlalpan	10 840	19 532	22 338	25 843	29 314	32 659	35 837	38 771
1	1	15060	Nicolás Romero	184 134	269 546	305 476	343 870	379 469	412 101	441 445	466 825
1	1	15061	Nopaltepec	5 234	7 512	8 212	9 182	10 136	11 057	11 931	12 742
1	1	15065	Otumba	21 834	29 097	30 088	31 406	32 442	33 216	33 743	34 001
1	1	15075	San Martín de las Pirámides	13 563	19 694	21 466	23 679	25 791	27 775	29 613	31 257
1	1	15081	Tecámac	123 218	172 813	262 244	364 620	468 575	571 969	673 142	769 885
1	1	15084	Temascalapa	19 099	29 307	32 952	37 629	42 339	46 945	51 391	55 571
1	1	15091	Teoloyucán	41 964	66 556	73 563	81 476	88 938	95 815	102 036	107 447
1	1	15092	Teotihuacán	30 486	44 653	47 001	49 795	52 267	54 381	56 143	57 503
1	1	15095	Tepetzotlán	39 647	62 280	67 841	74 452	80 580	86 152	91 120	95 354
1	1	15100	Tezoyuca	12 416	18 852	24 985	31 957	39 042	46 081	52 970	59 553
1	1	15108	Tultepec	47 323	93 277	108 383	126 177	142 987	158 594	172 792	185 253
1	1	15109	Tultitlán	246 464	432 141	471 117	522 887	567 251	604 813	635 534	658 889
1	1	15120	Zumpango	71 413	99 774	123 644	150 863	178 965	207 283	235 421	262 755
1	1	15121	Cuautitlán Izcalli	326 750	453 298	496 427	541 170	578 280	609 244	634 089	652 328
			Suma en estado de México	2 806 896	4 052 036	4 499 605	5 009 904	5 472 638	5 890 363	6 260 593	6 575 546
			Suma estado de México sin Ecatepec	1 588 761	2 429 339	2 812 227	3 266 066	3 694 992	4 096 152	4 465 299	4 794 600
			70 %Ecatepec	852 695	1 135 888	1 181 165	1 220 687	1 244 352	1 255 948	1 256 706	1 246 662
			Total estado de México	2 441 456	3 565 227	3 993 392	4 486 753	4 939 344	5 352 100	5 722 005	6 041 262

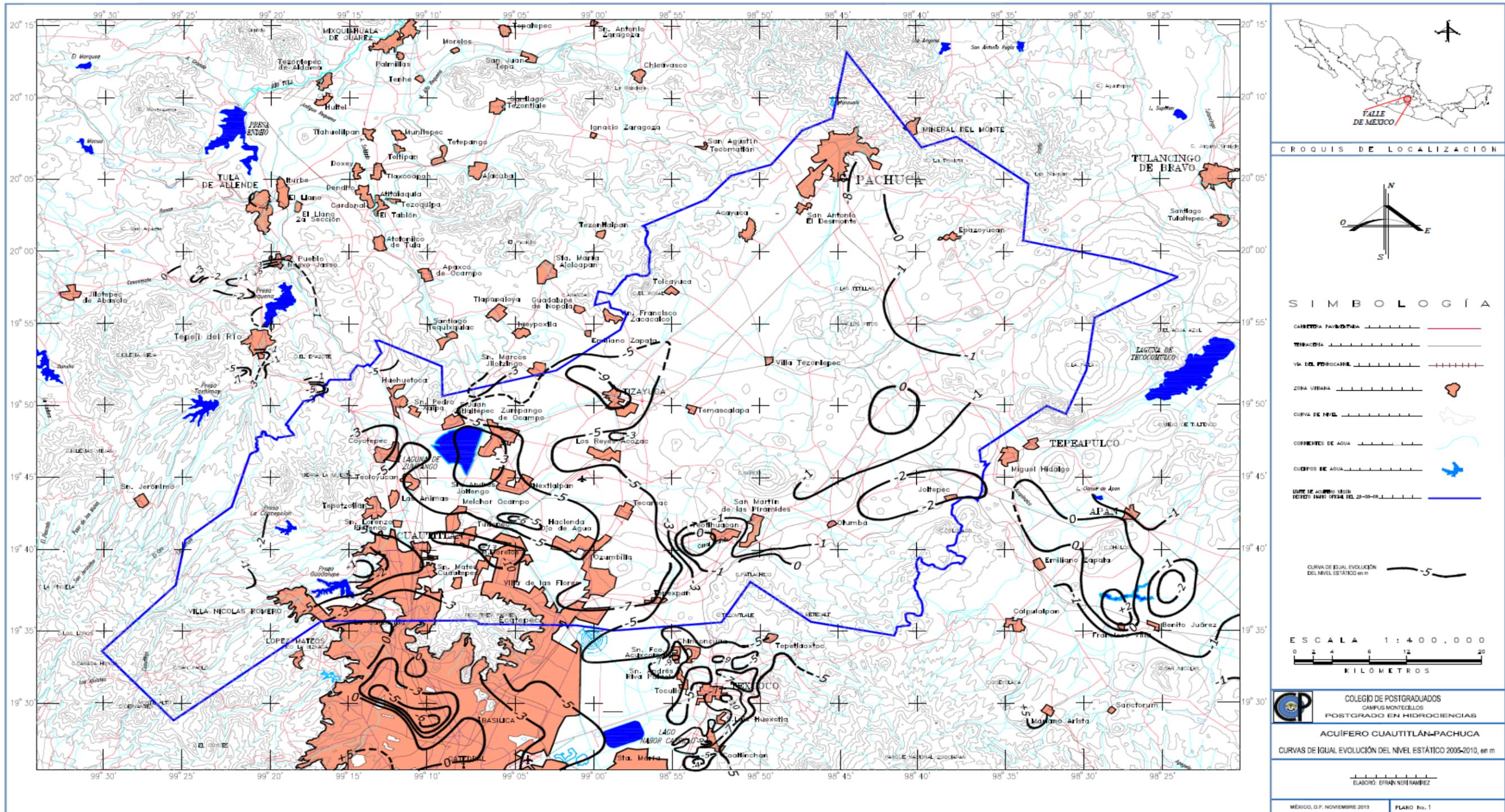
Estado de Hidalgo											
		Clave	Año	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
1	1	13022	Epazoyucan	9 302	11 054	11 569	10 960	10 152	9 368	8 616	7 899
1	1	13048	Pachuca de Soto	180 630	245 208	276 825	303 990	327 113	345 451	359 101	367 743
1	1	13051	Mineral de la Reforma	20 820	42 223	67 442	95 160	122 983	149 859	175 363	198 838
1	0.4	13057	Singuilucan	12 201	13 269	13 274	12 159	10 978	9 924	8 994	8 173
1	1	13066	Villa de Tezontepec	7 394	8 982	10 770	12 823	14 974	17 083	19 112	20 999
1	1	13069	Tizayuca	30 293	46 344	56 495	66 750	76 781	86 148	94 698	102 169
1	1	13072	Tlanalapa	9 051	9 839	8 923	7 979	7 192	6 500	5 898	5 376
1	1	13075	Tolcayuca	8 011	11 317	11 902	12 265	12 551	12 730	12 807	12 769
1	1	13082	Zapotlán de Juárez	11 481	14 888	16 599	17 897	19 030	19 981	20 745	21 291
1	1	13083	Zempoala	21 295	24 516	27 520	30 199	32 532	34 458	35 988	37 080
Total estado de Hidalgo				310 478	427 640	501 319	570 182	634 286	691 502	741 322	782 337
Población total				2 751 934	3 992 867	4 494 711	5 056 935	5 573 630	6 043 602	6 463 327	6 823 599
Tasa de crecimiento					3.79%		2.39%	1.96%	1.63%	1.35%	1.09%

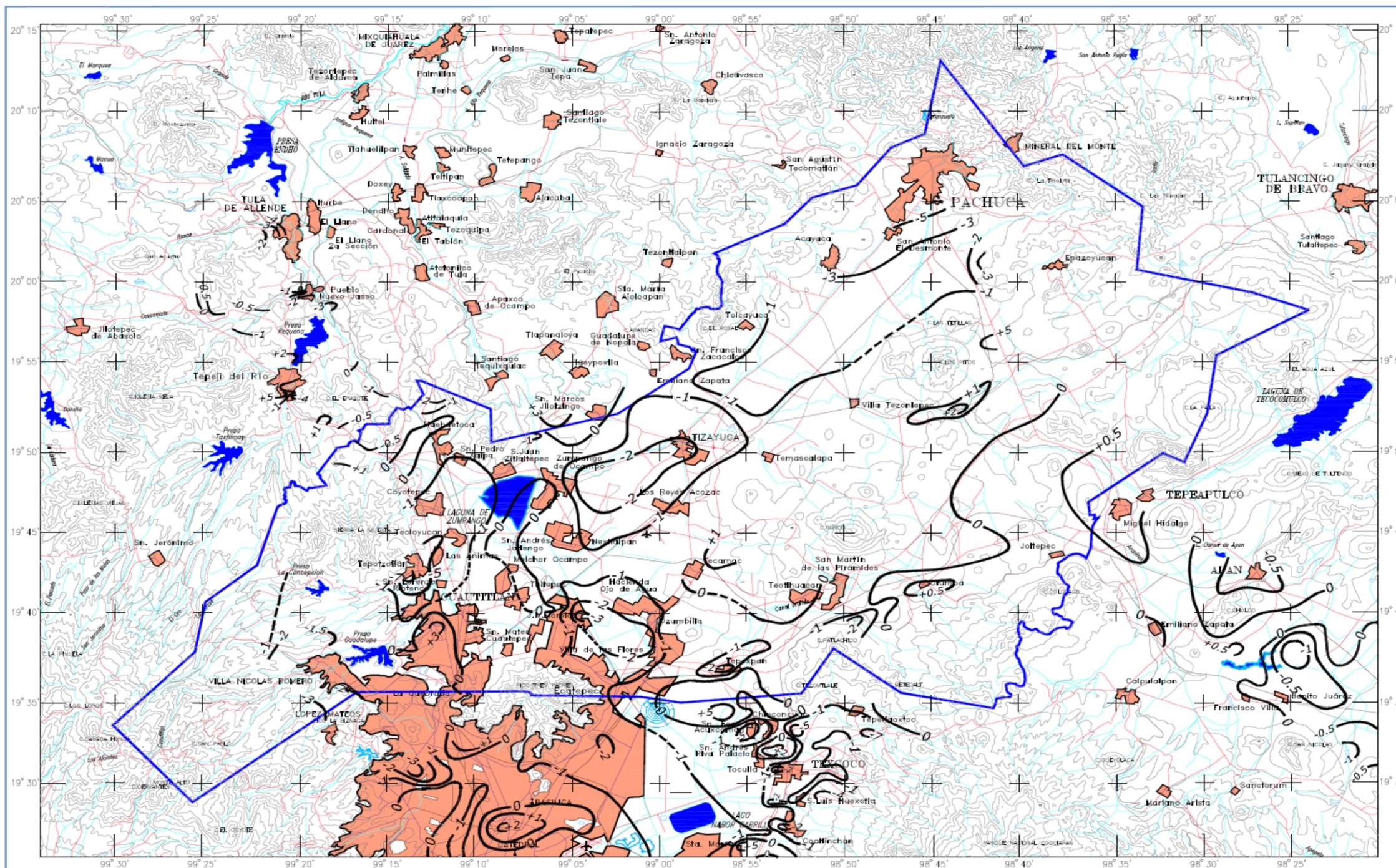


Anexo 4. Mapas de evolución de nivel piezométrico y niveles estáticos en el acuífero Cuautitlán-Pachuca

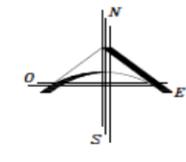








CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA

- CARRETERA PAVIMENTADA
- TERRESTRE
- VA DEL FERROCARRIL
- ZONA URBANA
- CURVA DE NEVL
- CORRIENTES DE AGUA
- CUERPOS DE AGUA
- LÍMITE DE ACUÍFERO SEGUN DETECTO 1940: OFICIA DEL 23-05-06
- CURVA DE IGUAL EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO en m



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 CAMPUS MONTECILLOS
 POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS
ACUÍFERO CUAUTITLÁN-PACHUCA
 CURVAS DE IGUAL EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 2009-2010, en m
 ELABORÓ: EFRAN NERI RAMÍREZ
 MÉXICO, D.F. NOVIEMBRE 2015 FLAJO No. 1

