



Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Geología

Gobierno de la Ciudad de México

Informe Final

Oscar Escolero Fuentes

Eric Morales Casique

José Luis Lezama campos

Plan 20 años de desarrollo Ciudad de México

Propuesta estudio sistema agua

Plan 20 años de desarrollo Ciudad de México

Contenido

Resumen	5
Capítulo 1. Antecedentes.....	6
1.1 Contexto geográfico	6
1.1.1 Cuenca de México.....	7
1.1.2 Cuenca Tula - Hidalgo	9
1.1.3 Cuenca Alto Lerma	10
1.1.4 Cuenca Cutzamala	11
1.2 Contexto social.....	12
Capítulo 2. Agua, origen, usos y demanda del recurso	18
2.1 Aprovechamientos superficiales	18
2.2 Aprovechamiento de agua subterránea	22
Capítulo 3. Modelación y escenarios	33
3.1 Marco Hidrogeológico Regional.....	33
3.2 Modelación computacional de flujo de agua subterránea	45
3.3 Modelación de la Cuenca Tula - Valle del Mezquital	45
3.3.1 Escenario Base 2020.....	48
3.3.2 Escenario Tendencial	51
3.3.3 Abatimiento.....	55
3.3.4 Cambio Climático.....	56
3.3.5 Aumento de demanda.....	59

3.3.6 Hidrógrafos-Escenarios.....	60
3.4 Cuenca de México.....	65
3.4.1 Modelo Cuautitlán-Pachuca	69
3.4.2 Modelo ZMCM-Chalco-Texcoco.....	73
3.4.3 Cambio climático Modelo Cuautitlán-Pachuca	77
3.4.4 Cambio climático Modelo ZMCM-Chalco-Texcoco	83
3.5 Otros escenarios	88
3.5.1 Escenario de demanda Modelo Cuautitlán-Pachuca.....	88
3.5.2 Escenario de demanda Modelo ZMCM-Chalco-Texcoco	93
3.6 Incremento de recarga	98
3.6.1 Escenario de recarga Modelo Cuautitlán-Pachuca.....	98
3.6.2 Escenario de recarga Modelo ZMCM-Chalco-Texcoco	103
Capítulo 4. Manejo sostenible del agua	112
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	112

Resumen

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Contexto geográfico

Desde un punto de vista de administración del agua, la Ciudad de México (CDMX) es parte de la Región Hidrológica número 26, Panuco, que también contempla los estados de Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí y gran parte del Estado de México (Figura 1.1), mientras que las cuencas colindantes son la número 18, Balsas y número 12, Lerma-Santiago.



Actualmente el país cuenta con 37 **Regiones Hidrológicas**, que a su vez se agrupan en 13 regiones Hidrológicas-Administrativas. Estos organismos de cuenca, son los responsables de administrar y preservar las aguas nacionales en cada una de las regiones en que se divide el país.



Figura 1.1.

Regiones administrativas involucradas dentro del área de estudio

A menor escala, la CDMX se encuentra en la Cuenca de México, mientras que las cuencas colindantes son Cutzamala, Alto Lerma y Tula (Figura 1.2). Estas cuencas están íntimamente relacionadas con el suministro de agua en la Ciudad de México, y como se detallará más adelante, son fundamentales para el suministro de actual de la ciudad y son

vitales para la planeación a mediano y largo plazo. El entendimiento del funcionamiento son de gran importancia para en análisis de administración del agua, su disponibilidad, sus usos y la búsqueda de un aprovechamiento sostenible



Una **Cuenca hidrográfica** es un área de captación natural del agua de precipitación de la lluvia que hace converger los escurrimientos hacia un único punto de salida



Figura 1.2. Cuencas del área de estudio

1.1.1 Cuenca de México

La Cuenca de México localizada al centro del país, con una altura promedio de 2,200 metros sobre el nivel del mar (msnm) se compone de cuatro diferentes valles, al noroeste el Valle de Cuautitlán, al nororiente el Valle de Apan, al norte el valle de Tizayuca y el al sur se ubica el Valle de México, que ocasionalmente se confunde con la Cuenca misma, sin embargo

en un contexto hidrogeológico son distintos. Por otra parte, dentro de la Cuenca, existen cinco subcuencas más: Tepetzotlán, Río Cuautitlán, Lago de Texcoco y Zumpango, Río Tezontepec y Lago Tochac Tecocomulco y desde un punto de vista del agua subterránea existen siete acuíferos dentro de la cuenca, el acuífero de la Zona Metropolitana de la Cd de México, A. Chalco-Amecameca, A. Cuautitlán-Pachuca, A. Texcoco, , A. Apan, A. Soltepec y A. Tecocomulco (Figura 1.3). Esta distinción entre agua superficial (sub cuencas) y agua subterránea (acuíferos) se seguirá utilizando para separar las fuentes y usos del recurso.



Un **Acuífero** es un conjunto de una o más capas subterráneas de roca o de otras formaciones geológicas que permiten el almacenamiento y flujo significativo de agua.

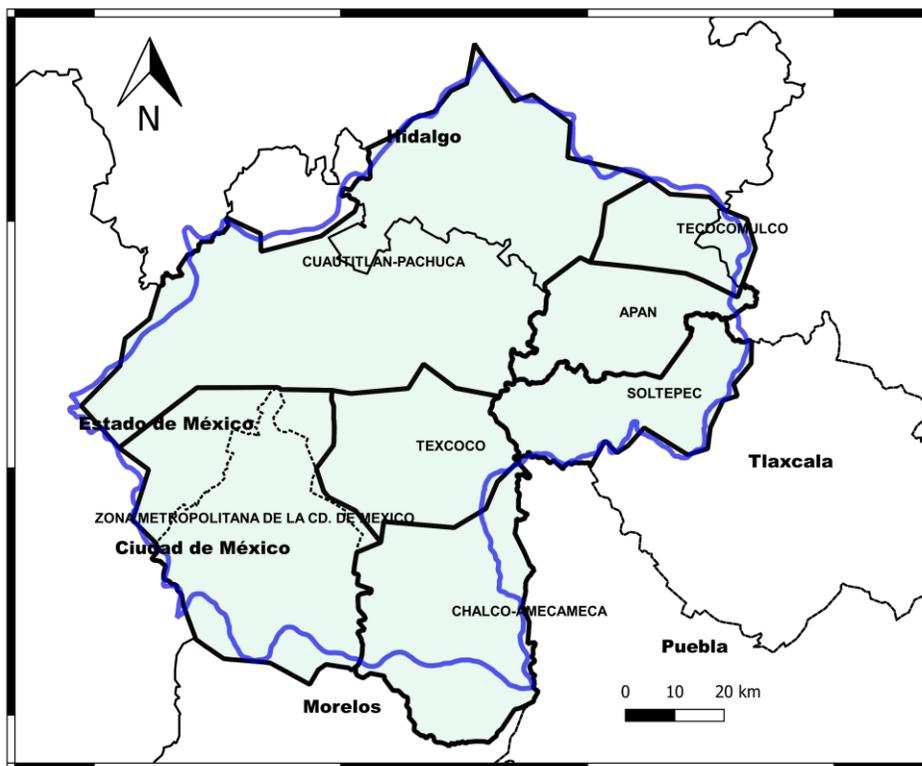


Figura 1.3. Distribución de los acuíferos dentro de la Cuenca de México.

1.1.2 Cuenca Tula - Hidalgo

La Cuenca Tula – Hidalgo se localiza al norte de la Cuenca de México, principalmente en los estados de Hidalgo, México y Querétaro (Figura 1.4). Dentro de esta cuenca se ubican los valles del Mezquital en la parte centro-oriental del estado de Hidalgo, el valle de Ixmiquilpan al norte, y al este el valle de Actopan. Esta cuenca adquiere su importancia en este estudio, ya que son en las aguas del Río Tula donde desembocan gran parte de las aguas negras provenientes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y son aguas utilizadas para riego principalmente en el Valle del Mezquital .

Dentro de la cuenca, existen 9 acuíferos, Actopan-Santiago, Ajacuba, Chapatongo - Alfajayucan, El Astillero, Huchiapan - Tecozahutla, Ixmiquilpan, Tepeji del Río Valle de Cadereyta y Valle del Mezquital (Figura 1.4) y 8 subcuencas: Tepotzotlán, Río Cuautitlán, Lago de Texcoco y Zumpango, Río Tezontepec y Lago Tochac y Tecocomulco.

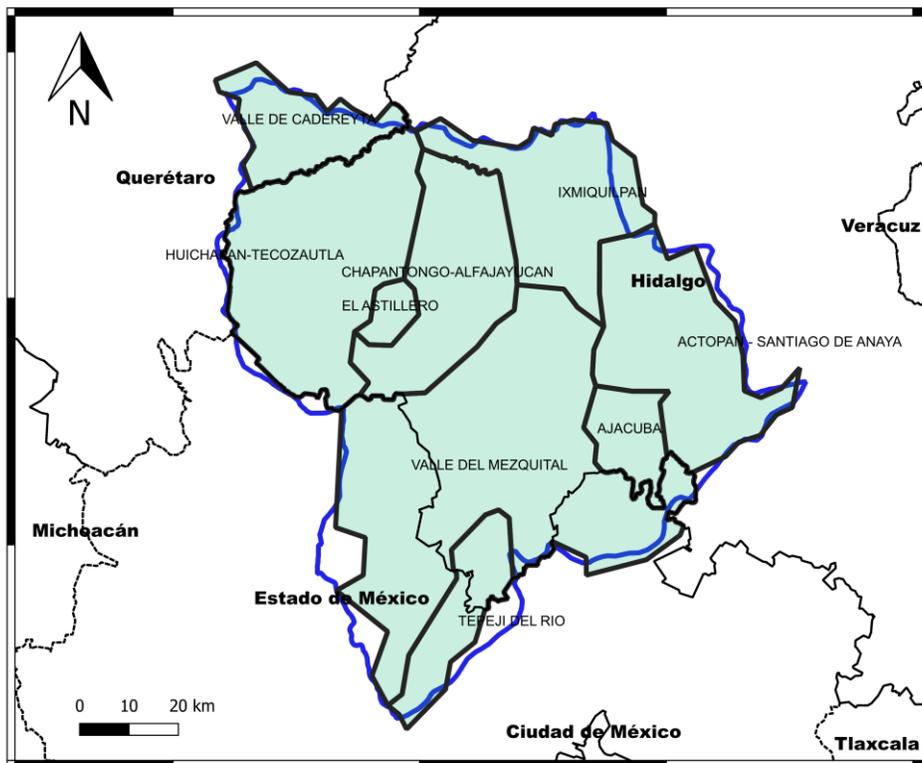


Figura 1.4. Distribución de los acuíferos dentro de la Cuenca Tula.

1.1.3 Cuenca Alto Lerma

La Cuenca del Alto Lerma corresponde a la parte de la cuenca Lerma-Chapala que se extiende al noroccidente del Estado de México, y es de gran importancia ya que es el origen del río Lerma (Figura 1.5). Esta cuenca es un significativo abastecedor de agua para la Ciudad de México, además de que dentro de su extensión se encuentran municipios altamente urbanizados como lo son los municipios de Toluca, Atlacomulco y Lerma.

Esta Cuenca ha estado sometida desde hace varios años, a procesos de contaminación severos originados principalmente por el complejo industrial localizado en Lerma, y por el desalojo de los drenajes de varias poblaciones cercanas al río. Además, a lo largo de la cuenca se encuentran las obras de más 230 pozos a lo largo de 170 km que aportaban más de 14 m³/s a la Ciudad de México lo que modificó profundamente los sistemas lacustres de la zona. Dentro de la Cuenca se encuentran 6 acuíferos que son los del Valle de Toluca, V. Acambaro, V. Amealco, V de la Cuevita, Ixtlahucaca-Atlacomulco y Maravatio-Contepec-Huerta.

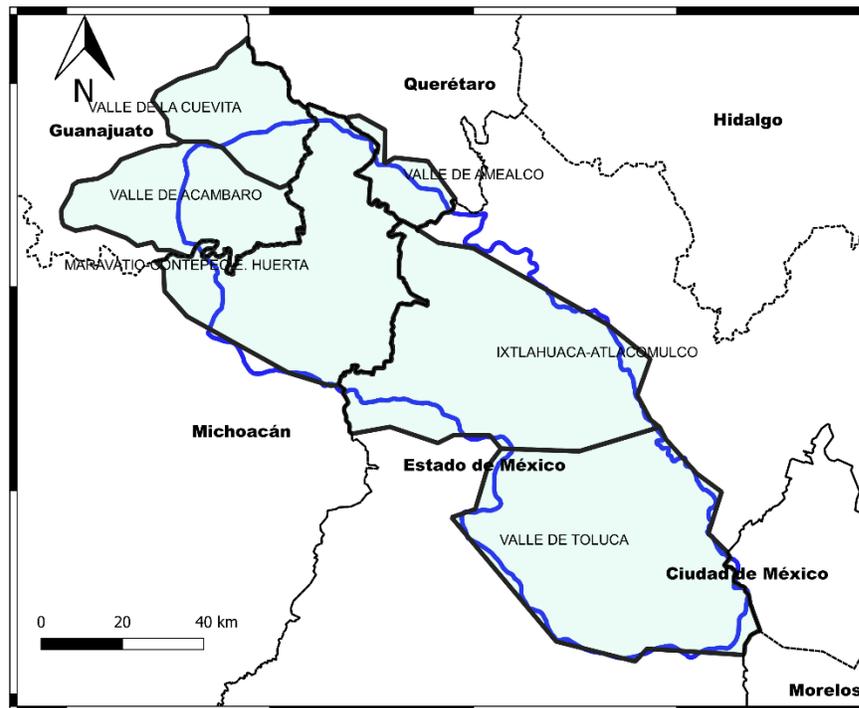


Figura 1.5. Distribución de los acuíferos dentro de la Cuenca Alto-Lerma.

1.1.4 Cuenca Cutzamala

La Cuenca del Río Cutzamala (Figura 1.6) comprende desde el nacimiento de los escurrimientos del Río Zitácuaro que desciende del eje volcánico de las sierras de Angangeo y Zitácuaro en el Estado de Michoacán y del Río Tilostoc que se origina en el Estado de México. Se encuentran siete subcuencas pertenecientes a la Cuenca Río Cutzamala, con un área de influencia de 13,347.88 Km² Aproximadamente, además de cinco acuíferos: Altamirano-Cutzamala, Ciudad Hidalgo-Tuxpan, Huetamo, Temascaltepec, Villa Victoria-Valle de Bravo. Esta cuenca provee a la Ciudad de México y su zona metropolitana de una gran cantidad de agua gracias al Sistema Cutzamala que se encuentra dentro de ella. Más adelante se detallara los detalles de este sistema que es vital para el abasto de agua dentro de la ciudad.

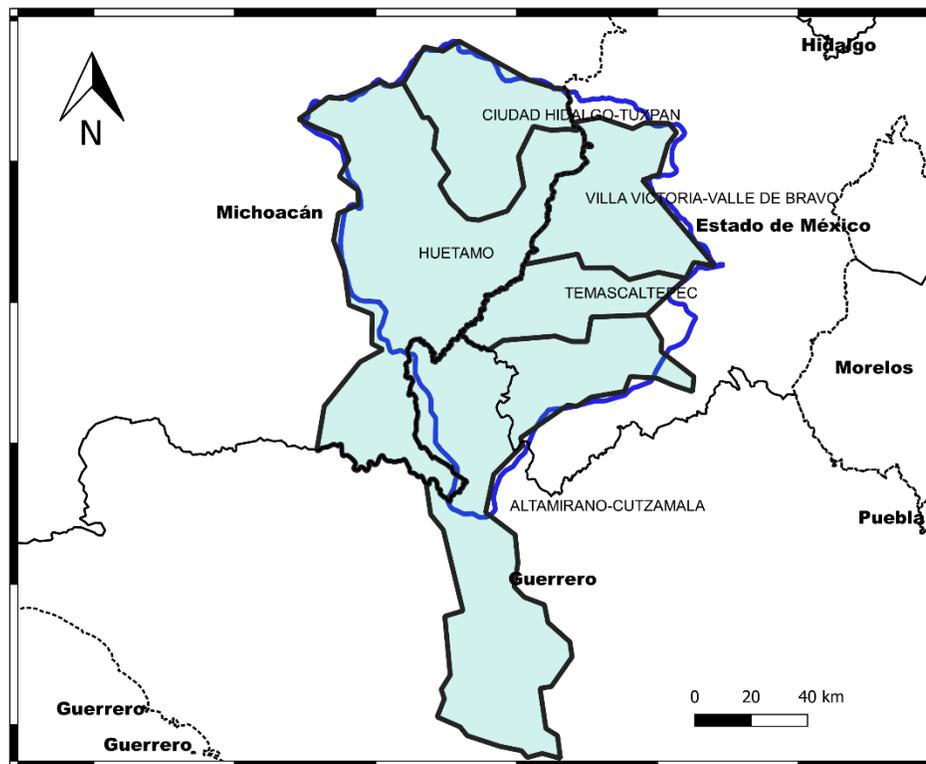


Figura 1.6. Distribución de los acuíferos dentro de la Cuenca Cutzamala.

1.2 Contexto social

Dentro del área de estudio se concentran más de veintitrés millones de habitantes (Tabla 1.1) además, se encuentran las alcaldías y municipios más poblados del país junto con las zonas metropolitanas más densamente pobladas. Destaca en primer lugar, la Zona Metropolitana del Valle de México; que comprenden las 16 alcaldías de la Ciudad de México y los 14 municipios colindantes del Estado de México. En estas 30 entidades policías se concentran más de dieciocho millones de habitantes, ocho dentro de la Ciudad y el resto en el Estado de México. Por otra parte se suma la población de las Zonas Metropolitanas de Toluca, la quinta más poblada del país, solo por debajo de la misma Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey; y la zona metropolitana de Pachuca de Soto, que de acuerdo con el Consejo Nacional de Población CONAPO es la zona metropolitana con las tasas de crecimiento más grandes reportadas para el 2030.

En la Figura 1.7 se muestra un mapa donde con la distribución de la población en las cuatro cuencas del área de estudio, al centro, en rojo intenso se observan las alcaldías de Iztapalapa, Gustav A. Madero y los municipios de Nezahualcóyotl y Ecatepec con más de un millón de habitantes en cada uno.

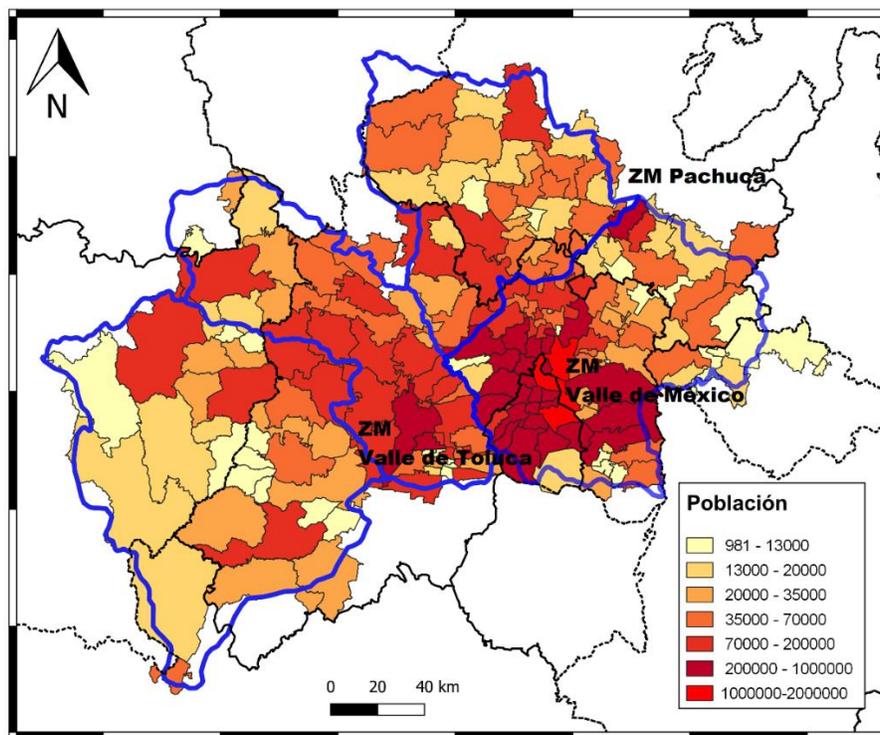


Figura 1.7. Cantidad de población por municipio dentro del área de estudio.

Tabla 1.1. Población dentro de cada una de las Cuencas hidrológicas que intervienen en el área de estudio.

Cuenca	Población (INEGI,2015)
Cuenca Cutzamala	737,366
Cuenca Tula	1,190,819
Cuenca Lerma	3,041,112
Cuenca de México	18,048,490
Total	23,017,787

La cuenca que concentra menos población en comparación con las demás cuencas es la Cuenca Cutzamala, donde destacan los municipios de San Felipe del Progreso, Villa Victoria y San José del Rincón como más de 100,000 habitantes cada uno. Sin embargo, municipios cercanos al área metropolitana de Toluca como Valle de Bravo, Villa de Allende, Coatepec de las Harinas y la ya mencionada Villa Victoria han presentado un crecimiento acelerado a partir del año 2000 debido al crecimiento de zonas residenciales, duplicando su población registrada en tan sólo 25 años o menos. En la Figura 1.8 se puede observar la densidad de la población y cómo esta se concentra cerca de los municipios cercanos al Estado de México, es específico, a la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

La Cuenca de San Juan Tula concentra más de un millón de habitantes, la mayoría concentrada en la zona industrial de Tula de allende (Figura 1.9), donde 8 municipios concentran más de la mitad de la población de toda la cuenca. Destacando los municipios de Tula de Allende, Ixmiquilpan, Jilotepec, Tepeji del Río y Actopan con más de 60,000 habitantes por municipio.

Para la Cuenca del Alto Lerma los municipios mayormente poblados son los de Toluca con más de 870,000 habitantes, Metepec con 227 000 y Zinacantepec 188 000, además de que municipios como los de Atlacomulco, Temoaya, Lerma, Ixtlahuca y Almoloya actualmente con más de cien mil habitantes cada uno, han visto duplicada en menos de 25 años. En la Figura 1.10 se observa como las zonas con mayo de densidad de población se concentran dentro del área Metropolitana de Toluca.

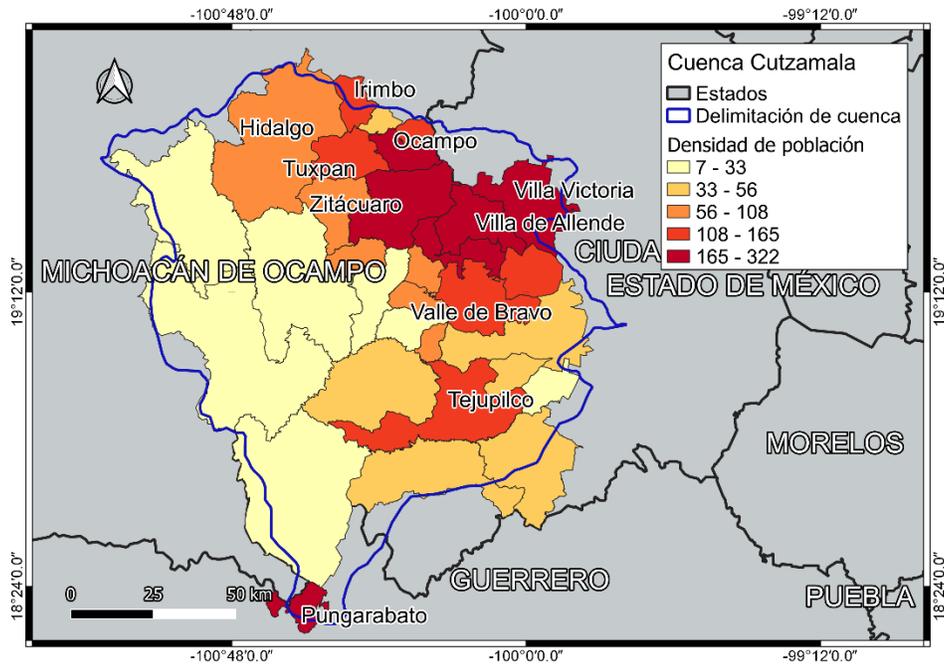


Figura 1.8. Densidad de población de la Cuenca Cutzamala.

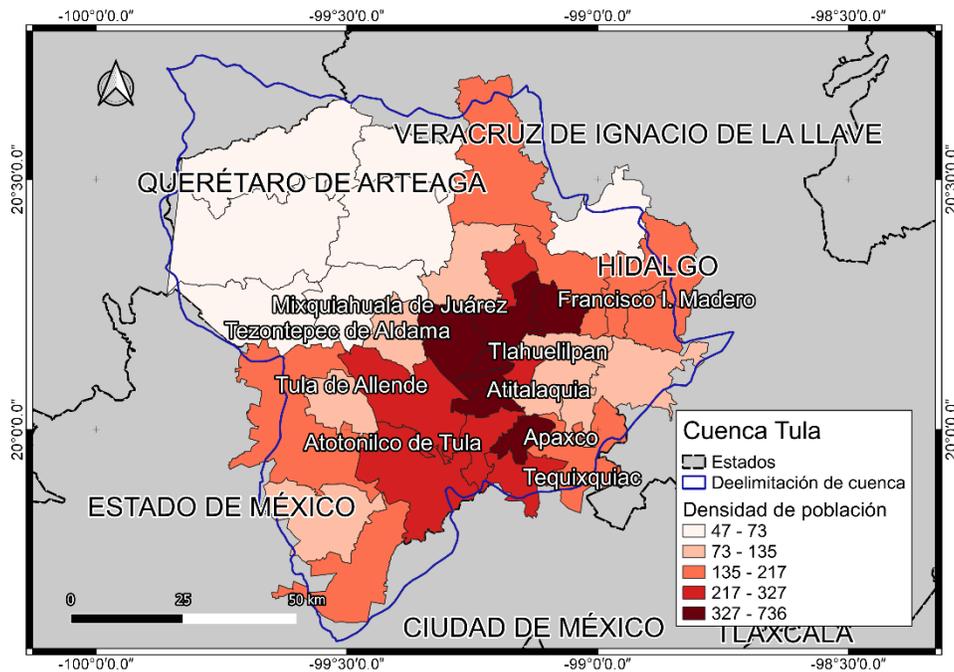


Figura 1.9. Densidad de población de la Cuenca San Juan Tula.

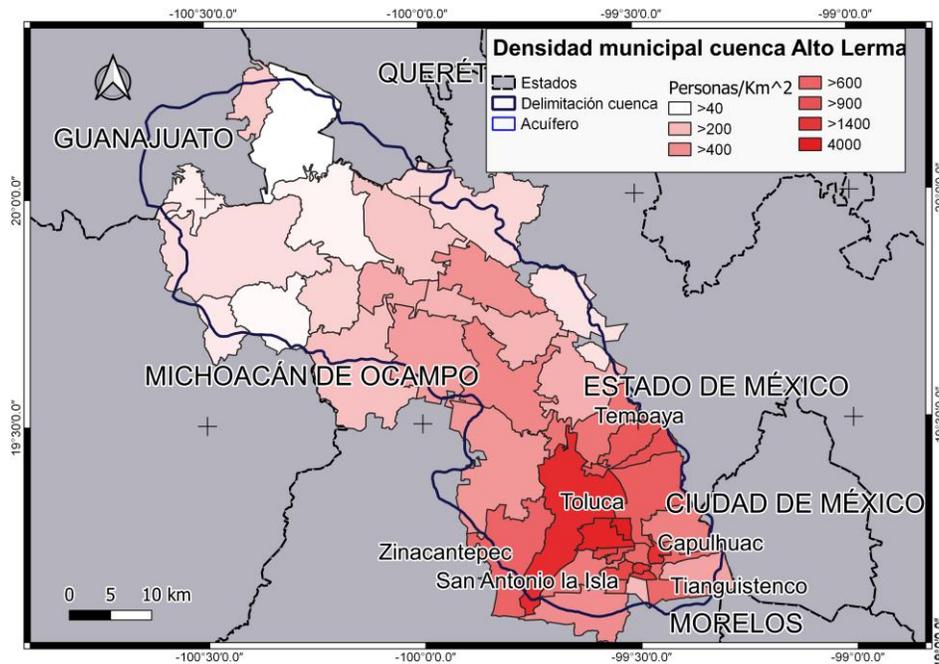


Figura 1.10. Densidad de población de la Cuenca Alto Lerma

Para la Cuenca de México, la población es mucho mayor a la de las cuencas anteriores, tan solo la alcaldía de Iztapalapa supera el millón ochocientos mil habitantes, equivalentes a todos los habitantes de las cuencas de Cutzamala y San Juan Tula y concentrada en una sólo una fracción de área. En total la suma de los habitantes de las dieciséis alcaldías supera los 8 millones, sin contar la población flotante que todos los días ingresa a la capital de los estados colindantes. La gentrificación se distribuye en la mayoría de las alcaldías, a excepción de Magdalena Contreras, Cuajimalpa y Milpa Alta con menos de 500,000 habitantes entre las tres delegaciones, que sin embargo, no es un número menor de habitantes. Los municipios del Estado de México colindantes con la ciudad con mayor población son Nezahualcóyotl con más de un millón de habitantes, Naucalpan, Tlalnepantla, Cuautitlán Izcalli, Atizapán, Tultitlán e Ixtapaluca con más de 500,000 cada uno.

Hacia la parte norte de la Cuenca, se encuentra la Zona Metropolitana de Pachuca, que si bien, comparada con la Zona Metropolitana de la Ciudad de México es mucho menor, la tasa de crecimiento de los municipios como Pachuca de Soto y Reforma son de las más grandes del país siendo mayores al 2% y 3% anualmente.

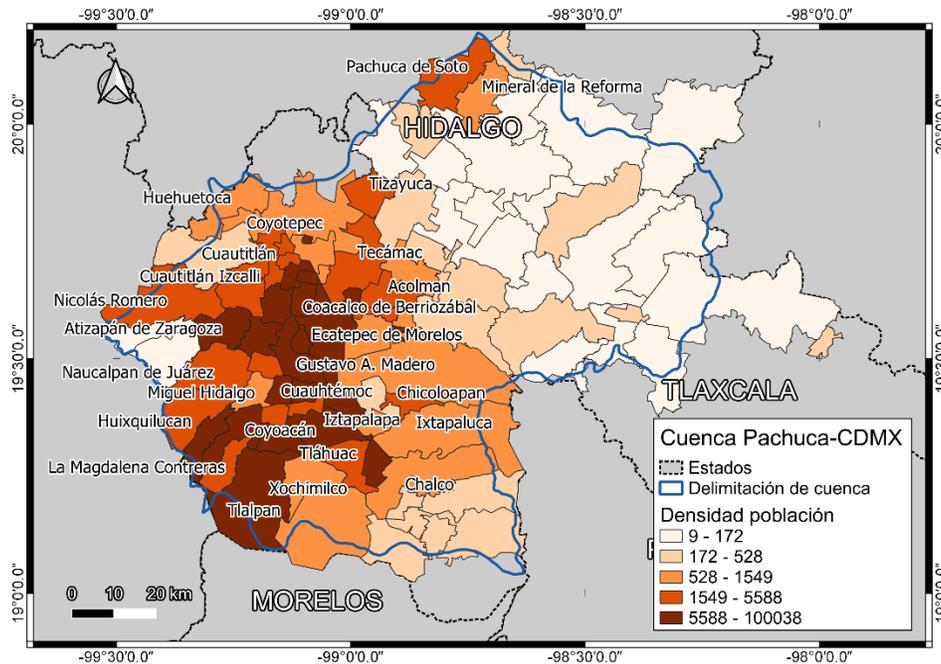


Figura 1.11. Cantidad de población por municipio dentro del área de estudio.

Finalmente, para la generación de los escenarios utilizados en este informe para el cálculo de la disponibilidad y futuros usos del agua, fue necesario estimar el comportamiento de los cambios en la población esperados por quinquenio hasta el año 2050 en cada una de las escalas utilizadas en este trabajo (Cuenca hidrológica, acuífero y municipio). Para ello se hicieron estimaciones con base a las tasas de incremento o decremento y los valores esperados por CONAPO para el año 2030 en los 193 municipios que se encuentran dentro de las cuencas en estudio. Las tablas completas de las estimaciones de población se encuentran en el Anexo 1.

En la Figura 1.12 se observa que para el año 2050 la Ciudad de México, en sus alcaldías más pobladas, a excepción de Iztapalapa, comenzaran a estabilizar su población o esta comenzará a disminuir debido a la migración y descertificación. Sin embargo, alcaldías al sur de la Ciudad continuaran a la alza. Los cambios esperados más significativos se esperan en la periferia de la Zona Metropolitana, el Valle de Toluca y la Zona Metropolitana de Pachuca, en donde los últimos años se han observado los gradientes y se estima, esta tendencia no variara los próximos años. Estos incrementos en estas regiones de las cuencas se sitúan muy cerca de las fuentes que actualmente abastecen de la Ciudad de México, lo que implicará una menor disponibilidad para la exportación de agua entre cuencas. Más adelante se hablará más a detalle sobre este tema.

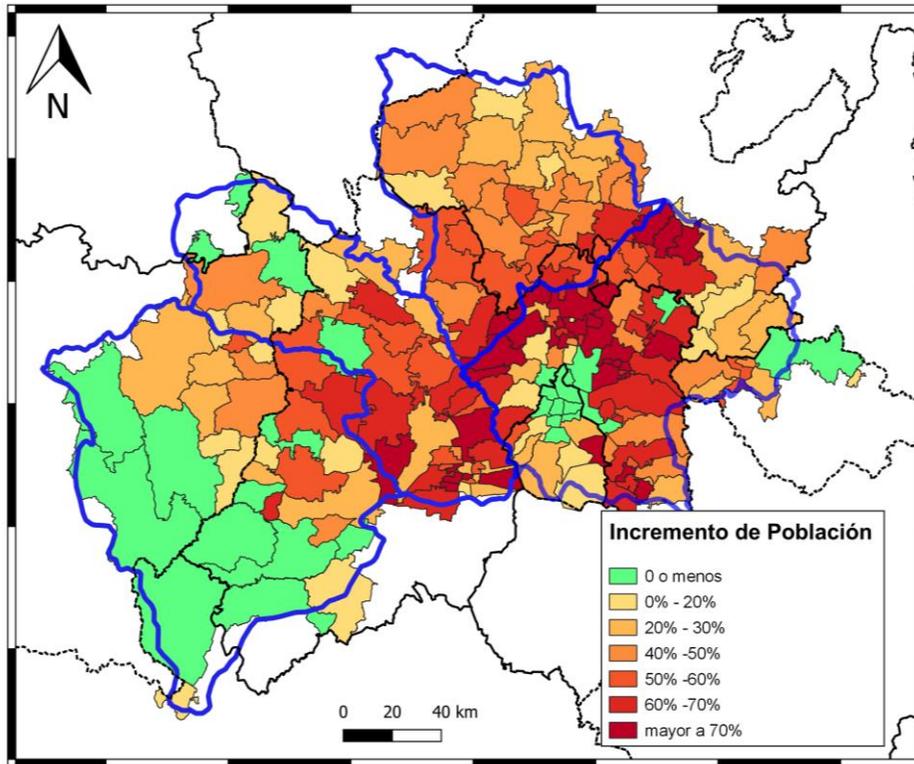


Figura 1.12. Cantidad de población por municipio dentro del área de estudio.

Resumen. En este capítulo se presentó el contexto general del área de estudio, con énfasis en las diferentes escalas que se presentan al analizar la disponibilidad del recurso hídrico. Se detalló y explicó las diferencias entre cada una de las escalas y contextos geográficos que intervendrán en el estudio como lo es una cuenca hidrológica y un acuífero, y su distribución espacial respecto a las divisiones políticas. Se mostró los panoramas poblacionales y se da una introducción del porque el estrés hídrico actual. Si bien el presente trabajo centrara su atención en un Plan sustentable para la Ciudad de México, el estudio y la caracterización hidrológica se hará en cada una de las escalas presentadas anteriormente.

Capítulo 2. Agua, origen, usos y demanda del recurso

Todos los títulos de concesión otorgados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tanto para Aprovechamientos Subterráneos como Aprovechamientos Superficiales, se encuentran alojados en una base de datos que es el Registro Público de Derechos del Agua (REPDa), esta base contiene información sobre el volumen de las concesiones, permisos o autorizaciones otorgados, especificando los titulares de aquellos, además de los usos asignados a dicha concesión. La información se encuentra organizada a nivel nacional, por Estado y por Organismo de Cuenca.



Aprovechamientos Subterráneos. Son aquellos puntos geográficos en un mapa donde se extrae aguas del subsuelo definidas en el Art. 3, fracción IV de la Ley de Aguas Nacionales.

Aprovechamientos Superficiales. Son aquellos puntos geográficos en el mapa donde se extrae aguas de cauces o ríos, manantiales y lagos.

2.1 Aprovechamientos superficiales

Para conocer el volumen concesionado de aprovechamientos superficiales se recopilamos más de 4000 entradas del REPDa, asociados a las cuencas Alto – Lerma, Cutzamala, México y San Juan Tula. Cada punto fue situado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) con la finalidad de observar la distribución espacial de los aprovechamientos y para corroborar que se encontraran dentro del área de estudio. En la Figura 2.1 se presenta el mapa resultado de localizar cada una de los registros revisando; como puede observarse existen diversos puntos con inconsistencias en su localización, por lo que se realizó un trabajo de depuración de cada una de las entradas, en donde se verificara la consistencia de ubicación, dejando fuera información lejos del área de estudio o cuyos volúmenes no estuvieran reportados.

Una vez depurada la base de datos, se generaron cuatro sub bases (Figura 2.2), de tal forma que los datos quedaron separados según la cuenca correspondiente. Posteriormente se clasificaron las concesiones por tipo de uso (acuacultura, agricultura, diferentes usos, doméstico, generación de energía, industrial, pecuario, público urbano, servicios) de tal forma que se construyeron diagramas circulares que permiten observar porcentualmente,

la adjudicación de las concesiones dependiendo el uso del agua superficial. Los diagramas circulares permiten evidenciar que la mayor demanda de agua superficial se enfoca en los sectores: agrícola, generación de energía, industrial y público urbano.

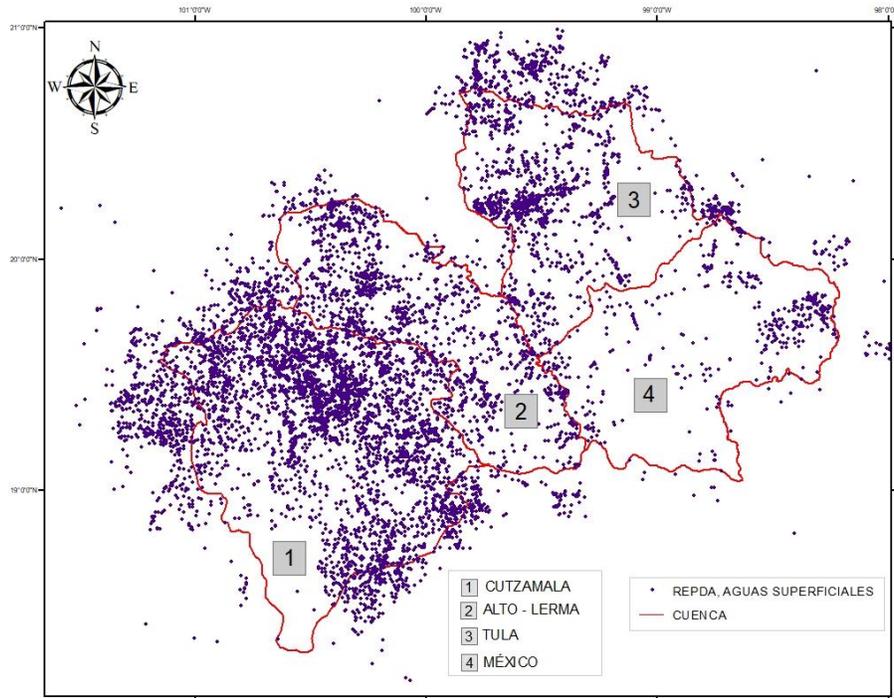


Figura 2.1. Localización de las concesiones de agua superficial en el área de estudio.

	Latitud	Longitud	Estado	Municipio	Región Hidrológica	Cuenca	Fuente	Afluente	Volumen de agua superficial por anexo (m ³ /año)	Titular	Título	Uso	Autoridad que emite el acto	Fecha de registro	Volumen de extracción de aguas nacionales (m ³ /año)	Número de anexos de aguas superficiales	Vol ag su (m ³)
1	19.27	-99.29	CIUDAD DE LA MAGDAL	PANUICO	0	RIO LA MAG	PRESA ANZ	14600	COMISARIAD	13DFE101199	DOMESTICO	DIRECCION D	30/11/2016	14600.0	1.0		
2	19.21	-99.23	CIUDAD DE TLALPAN	PANUICO	3	ARROYO AR	ARROYO AT	2100	C. AGUSTO	13DFE101112	ACUACULTUR	DIRECCION D	13/04/2009	2100.0	1.0		
3	19.30	-99.16	CIUDAD DE COYOACAN	PANUICO	3	MANANTIAL	NO TIENE	4640	SINDICATO U	13DFE100708	SERVICIOS	DIRECCION D	19/08/1998	4640.0	1.0		
4	19.34	-99.29	CIUDAD DE CUAJIMALPA	PANUICO	3	ARROYO SA	BARRANCA	189216	BIENES COMI	13DFE100708	ACUACULTUR	DIRECCION D	31/12/1997	189216.0	1.0		
5	19.21	-100.18	MEXICO	VALLE DE BRAN	BALSAS	82	SISTEMA CUTZ	RIO BALSAS	283824000	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996	108956800	18.0	30
6	19.13	-99.12	CIUDAD DE MEXICO	MILPA ALTA	PANUICO	23	MANANTIAL TL	ACUIFERO: ZO	63072	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
7	19.20	-99.24	CIUDAD DE MEXICO	TLALPAN	PANUICO	23	MANANTIAL P	ACUIFERO: ZO	599184	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
8	19.23	-99.28	CIUDAD DE MEXICO	LA MAGDALEN	PANUICO	28	MANANTIAL M	ACUIFERO: ZO	3374352	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
9	19.22	-99.30	CIUDAD DE MEXICO	TLALPAN	PANUICO	28	MANANTIAL V	ACUIFERO: ZO	126144	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
10	19.24	-99.26	CIUDAD DE MEXICO	LA MAGDAL	PANUICO	28	MANANTIAL	ACUIFERO: ZO	63072	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
11	19.28	-99.18	CIUDAD DE MEXICO	TLALPAN	PANUICO	23	MANANTIAL	ACUIFERO: ZO	2491344	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
12	19.26	-99.28	CIUDAD DE MEXICO	LA MAGDAL	PANUICO	28	MANANTIAL	ACUIFERO: ZO	94608	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
13	19.26	-99.28	CIUDAD DE MEXICO	LA MAGDAL	PANUICO	28	MANANTIAL	ACUIFERO: ZO	914544	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
14	19.28	-99.30	CIUDAD DE MEXICO	LA MAGDAL	PANUICO	28	MANANTIAL	ACUIFERO: ZO	1198368	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
15	19.29	-99.28	CIUDAD DE MEXICO	LA MAGDAL	PANUICO	28	MANANTIAL	ACUIFERO: ZO	126144	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
16	19.33	-99.27	CIUDAD DE MEXICO	ALVARO OB	PANUICO	28	MANANTIAL	ACUIFERO: ZO	1009152	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
17	19.49	-99.29	CIUDAD DE MEXICO	ALVARO OB	PANUICO	28	MANANTIAL	ACUIFERO: ZO	94608	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
18	19.33	-99.30	CIUDAD DE MEXICO	CUAJIMALPA	PANUICO	28	MANANTIAL	ACUIFERO: ZO	1103760	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
19	19.38	-99.24	CIUDAD DE MEXICO	ALVARO OB	PANUICO	28	MANANTIAL	ACUIFERO: ZO	6054912	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
20	19.36	-99.32	CIUDAD DE MEXICO	CUAJIMALPA	PANUICO	28	MANANTIAL C	ACUIFERO: ZO	220752	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
21	19.32	-99.31	CIUDAD DE MEXICO	CUAJIMALPA	PANUICO	28	MANANTIAL D	ACUIFERO: ZO	3342816	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
22	19.30	-99.19	CIUDAD DE MEXICO	TLALPAN	PANUICO	23	MANANTIAL P	ACUIFERO: ZO	4351968	SISTEMA DE A	13DFE100309	PUBLICO UR	GERENCIA D	28/06/1996			
23	19.38	-99.28	CIUDAD DE MEXICO	CUAJIMALPA	PANUICO	3	BARRANCA	RIO SAN JO	365040	CLUB DE GO	13DFE100012	AGRICOLA	DIRECCION D	6/11/1995	365040.0	1.0	

Figura 2.2. Ejemplo de la base resultado de minar la base de datos del REPDA.

En la Figura 2.3 se muestra la distribución de agua superficial concesionada para la Cuenca Tula donde, los principales usos son para la generación eléctrica y uso agrícola

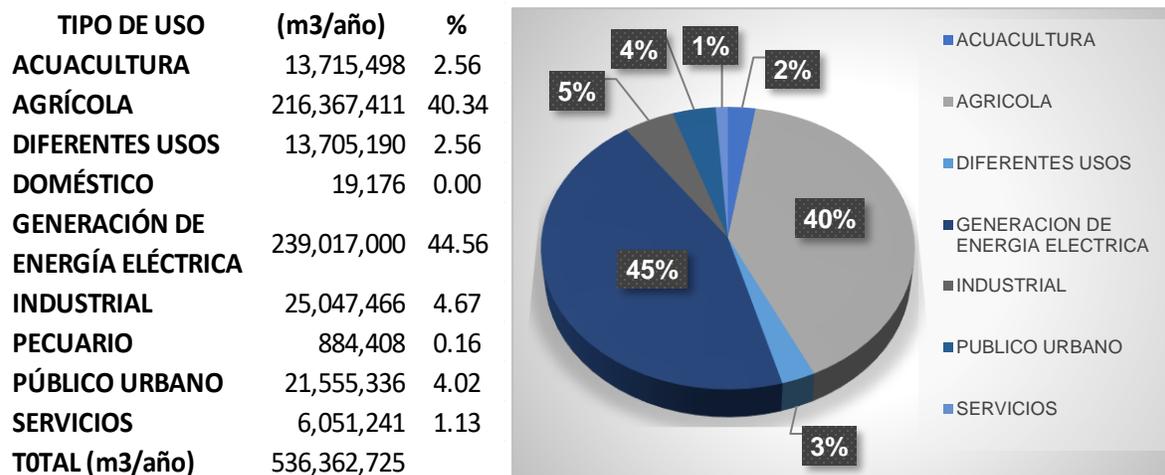


Figura 2.3. Distribución porcentual del tipo de uso de agua superficial, concesionado por el REPDA para la Cuenca del Tula.

En la Figura 2.4 se muestra la distribución porcentual del tipo de uso de agua superficial, concesionado por el REPDA para la Cuenca Cutzamala. Con un mayor enfoque a los sectores, generación de energía eléctrica y público urbano. El volumen de agua superficial al sector de generación de energía eléctrica, probablemente se debe a las hidroeléctricas instaladas a lo largo de la cuenca.

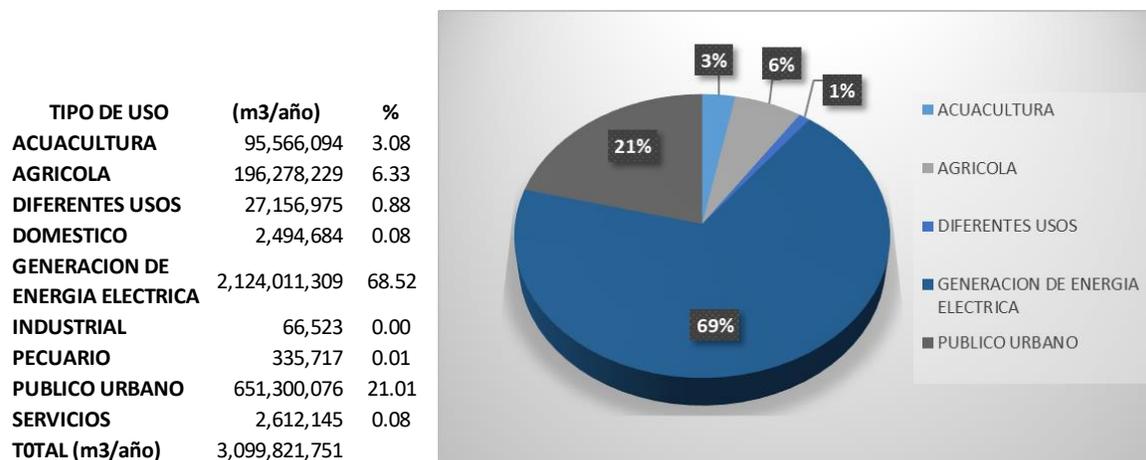


Figura 2.4. Distribución porcentual del tipo de uso de agua superficial, concesionado por el REPDA para la Cuenca Cutzamala.

En la Figura 2.5 se muestra la distribución porcentual del tipo de uso de agua superficial, concesionado para la Cuenca de Alto – Lerma. Sus principales usos son en los sectores de generación de energía eléctrica, público urbano y agrícola. El sector público urbano, a diferencia de las cuencas anteriores exige un volumen considerable, debido a la Zona Metropolitana de Toluca.

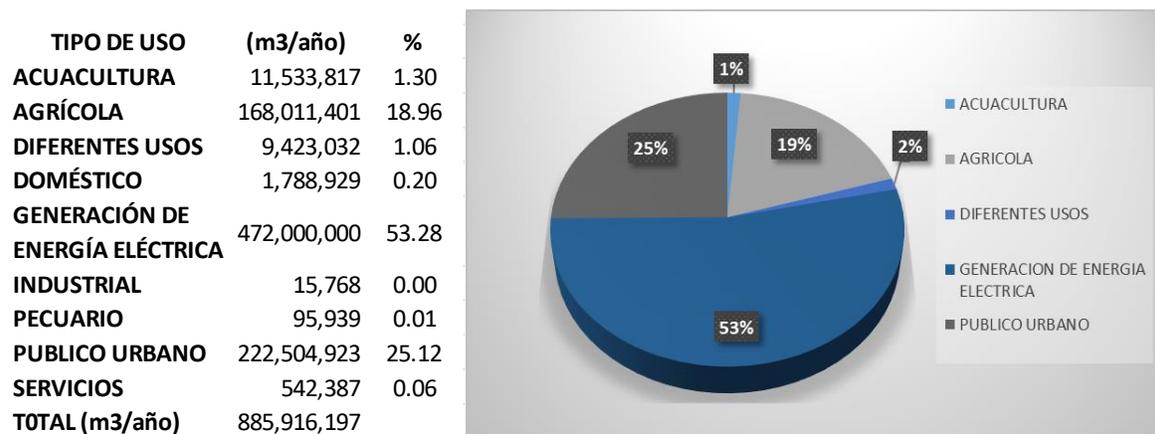


Figura 2.5. Distribución porcentual del tipo de uso de agua superficial, concesionado por el REPDA para la Cuenca Cutzamala.

Para el caso de la Cuenca de México (Figura 2.6), un porcentaje considerable es dedicado al sector público urbano (28%), mientras que más de la mitad esta utilizado al sector agrícola: se encontró que dentro de la Ciudad de México existe un único punto de uso agrícola en la Delegación Cuajimalpa de Morelos, con un volumen de 365,040 m3/año.

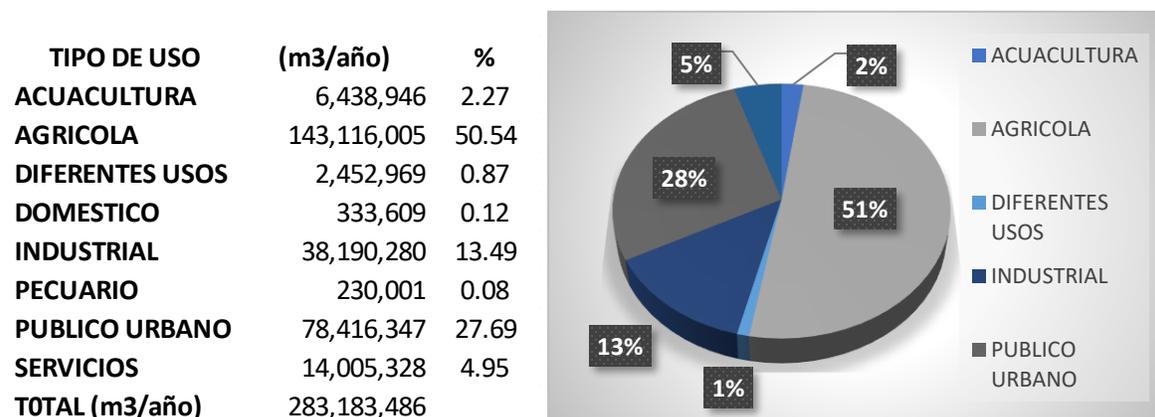


Figura 2.6. Distribución porcentual del tipo de uso de agua superficial, concesionado por el REPDA para la Cuenca de México.



¿Cuál es el rango de aportación de aguas superficiales al abastecimiento de agua para los distintos usos? La aportación de las aguas superficiales para los diferentes usos, depende directamente de las escalas utilizadas, en las Figuras 15 a 18 se realiza un desglose del uso del agua por cada una de las cuencas, sin embargo, los volúmenes determinados para cada uno pueden variar de acuerdo a la sub cuenca o acuífero individual analizado. Como parte de los entregables a la dependencia se encuentran las bases de datos con la información desglosada para cada su cuenca.

2.2 Aprovechamiento de agua subterránea

Para conocer el volumen concesionado de aprovechamientos de agua subterránea se recopilaron 508,583 datos correspondientes a los pozos concesionados distribuidos en cada uno de los 27 acuíferos dentro del área de estudio. Cada punto fue situado en un SIG, con la finalidad de observar la distribución espacial de los aprovechamientos y para corroborar que se encontraran dentro del área de estudio. En la Figura 2.7 se presenta el mapa resultado de localizar cada una de los registros revisando, al igual con lo observado en la base de aprovechamiento superficial, existe un número importante de puntos fuera de los límites de los acuíferos. Por cada acuífero se generó una sub-base, A partir de la segunda base de datos, se están realizando clasificaciones por acuífero, posteriormente se clasificaron los tipos de usos y se observa la relación porcentual entre estos.

De igual forma que los aprovechamientos superficiales, se realizó una clasificación de los tipos de uso, para observar el rango de distribución. Para la Cuenca Tula los sectores público urbano, agrícola, industrial y diferentes usos se encuentra entre los principales, cada uno con una proporción aproximada del 25%, esto debido a que las principales actividades económicas en la Zona Metropolitana de Tula y el Municipio de Tepeji del Río, que es donde se concentra la mayor cantidad de población se enfocan en el sector industrial y agropecuario.

Para la Cuenca Cutzamala la mayor cantidad de agua subterránea es asignada a los sectores: público urbano, industrial y agrícola (Figura 2.8).

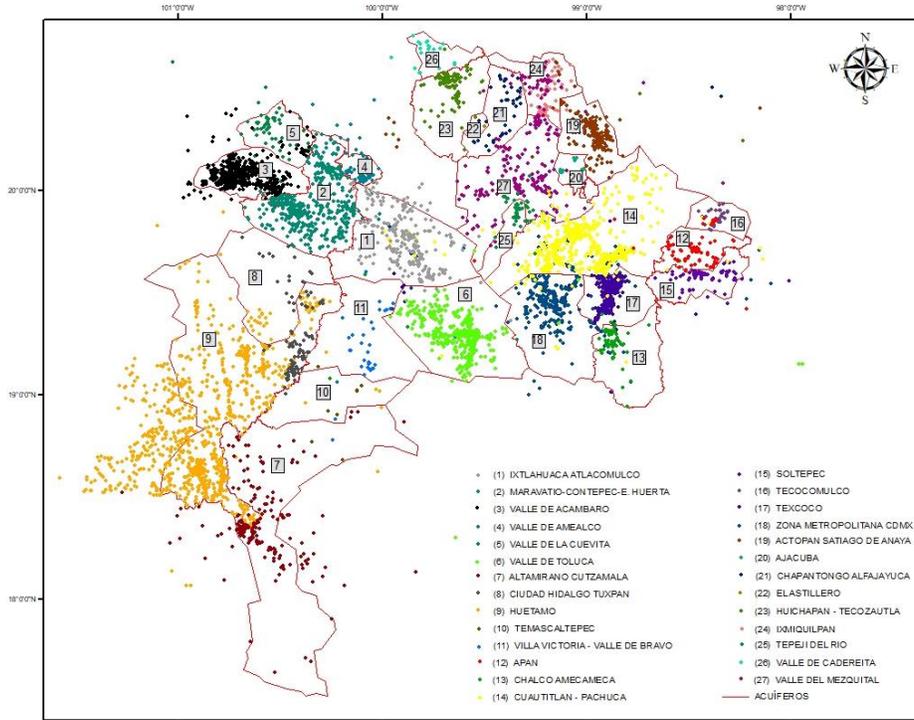


Figura 2.7. Localización de las concesiones de agua subterránea en el área de estudio.

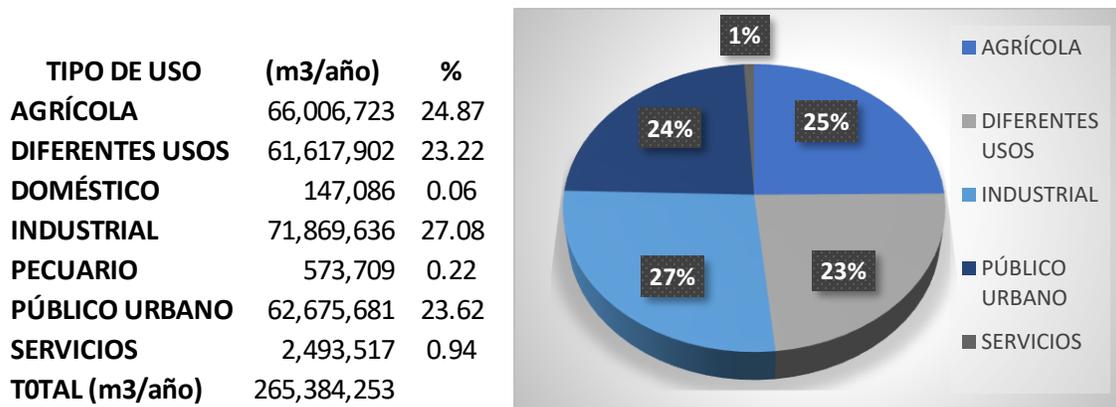


Figura 2.8. Localización de las concesiones de agua subterránea para la Cuenca Tula.

TIPO DE USO	(m3/año)	%
ACUACULTURA	15,000	0.02
AGRÍCOLA	12,130,770	17.13
DIFERENTES USOS	2,869,106	4.05
DOMÉSTICO	769,939	1.09
INDUSTRIAL	23,409,063	33.06
PECUARIO	194,115	0.27
PÚBLICO URBANO	30,410,175	42.95
SERVICIOS	1,006,619	1.42
TOTAL (m3/año)	70,804,787	

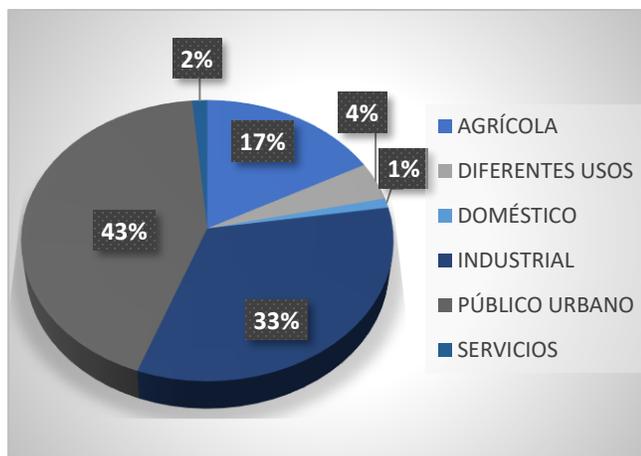


Figura 2.9. Localización de las concesiones de agua subterránea para la Cuenca Cutzamala.

Con una mayor cantidad de agua subterránea asignada a los sectores: público urbano y agrícola, la Cuenca del Alto Lerma tiene gran parte de las concesiones dentro y cerca de la Zona Metropolitana de Toluca, con aprovechamientos menores en el sector agrícola, industrial y servicios.

TIPO DE USO	(m3/año)	%
ACUACULTURA	42,000	0.00
AGRÍCOLA	194,589,803	14.35
DIFERENTES USOS	64,066,489	4.73
DOMÉSTICO	1,067,413	0.08
INDUSTRIAL	31,837,774	2.35
PECUARIO	176,573	0.01
PÚBLICO URBANO	1,040,339,186	76.74
SERVICIOS	23,574,118	1.74
TOTAL (m3/año)	1,355,693,357	

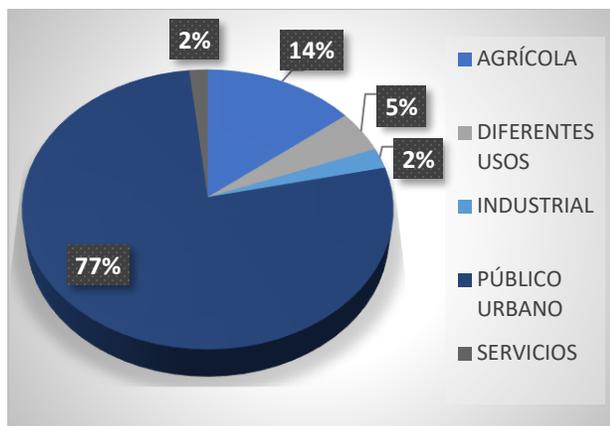


Figura 2.10. Localización de las concesiones de agua subterránea para la Cuenca del Alto Lerma

Para el caso de la Cuenca de México, el 80% de los aprovechamientos están concesionados para el sector público urbano, esto debido a la densidad poblacional de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

TIPO DE USO	(m3/año)	%
ACUACULTURA	475	0.00
AGRICOLA	158,176,276	7.15
DIFERENTES USOS	95,833,023	4.33
DOMÉSTICO	1,530,323	0.07
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	73,600	0.00
INDUSTRIAL	125,408,080	5.67
PECUARIO	2,897,330	0.13
PÚBLICO URBANO	1,772,152,981	80.05
SERVICIOS	57,602,079	2.60
TOTAL (m3/año)	2,213,674,167	

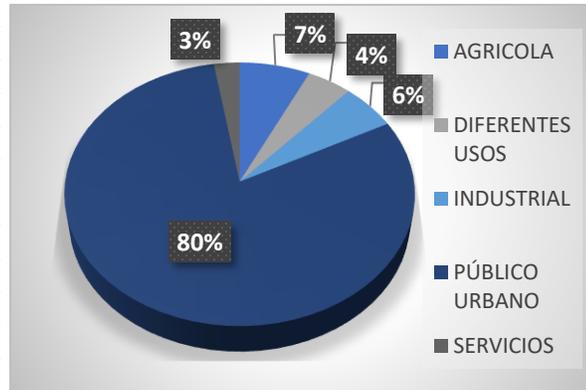


Figura 2.11. Localización de las concesiones de agua subterránea en el área de estudio.



¿Cuál es el rango de aportación de aguas subterráneas al abastecimiento de agua para los distintos usos? La aportación de las aguas subterráneas para los diferentes usos, como para el caso de aguas superficiales, depende directamente de las escalas utilizadas, en las Figuras 20 a 23 se realiza un desglose del uso del agua por cada una de las cuencas, sin embargo, los volúmenes determinados para cada uno pueden variar de acuerdo a la sub cuenca o acuífero individual analizado. Como parte de los entregables a la dependencia se encuentran las bases de datos con la información desglosada para cada acuífero.

En el caso particular del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en la Figura 2.12 se muestra el volumen concesionado en donde se observan dos picos muy grandes correspondientes a los años de 1996 y 1999 en los cuales existió un mayor volumen de agua subterránea concesionada en comparación con los demás años. En la Figura 2.13 se representa el volumen de concesión acumulado desde 1990 en donde se aprecia el efecto de dicho aumento en el número de concesiones.

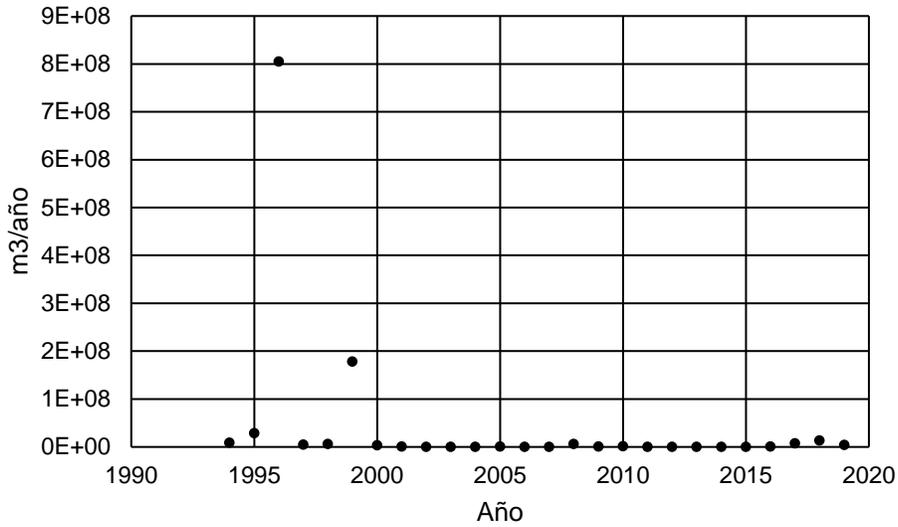


Figura 2.12. Localización de las concesiones de agua subterránea en el área de estudio.

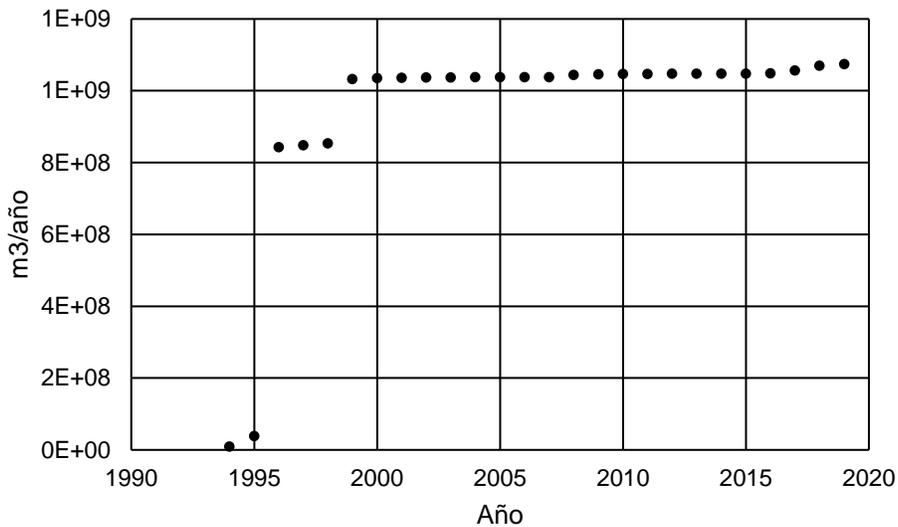


Figura 2.13. Localización de las concesiones de agua subterránea en el área de estudio.

Por otra parte, a partir de los informes de la CONAGUA que contienen la Disponibilidad Media Anual de agua de los veintisiete acuíferos, se construyeron bases de datos más robustas que permiten observar otros índices y poder calcular nuevas relaciones a partir del área total del acuífero, la precipitación media anual, volumen precipitado, entradas, salidas, almacenamiento y disponibilidad de agua, todas estas bases se concentran en los archivos *XLSX* entregados a la dependencia.

En la Figura 2.14 se presenta una relación entre el Volumen Concesionado Anual de agua Subterránea e inscrito en el REPDA (VCAS) y la Recarga total anual para cada uno de los veintisiete acuíferos. Esta relación permite observar que acuíferos presentan altos volúmenes de agua subterránea concesionada en referencia a su recarga. Se observan casos como el acuífero de la ZMCDMX que están por encima de la relación identidad, la cual indica que existe una extracción intensiva. (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** - 0)



Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea (DAS): Es el volumen medio anual de agua subterránea que, cuando es positivo, puede ser extraído de un acuífero para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas. Cuando este valor es negativo indica un déficit

Destacan por ser de los mayores acuíferos con déficit, el acuífero de la ZMCDMX con 888 hm³, el acuífero de Texcoco con 111 hm³ Toluca con 46 hm³ y Cuautla Pachuca con 40.5 hm³. Los detalles de cada acuífero se presentan en la Tabla 2.1. Además, asociado a la recarga total se tiene que existen varios acuíferos en donde las entradas no suplen el volumen anual de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA (VCAS), lo cual genera un déficit negativo, como por ejemplo el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y 0)

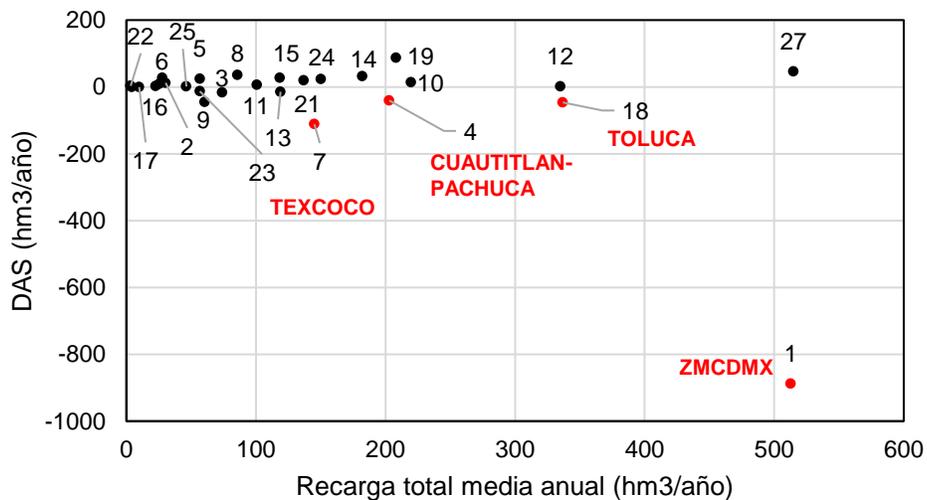


Figura 2.14. Relación entre la Disponibilidad media anual de Agua Subterránea del acuífero (DAS) versus la Recarga total media anual (Rt).

Otra relación en donde se puede observar el déficit de los acuíferos con mayor explotación respecto a un punto de equilibrio, es la relación del bombeo contra la recarga total media anual, lo cual permite mostrar que acuíferos se encuentran con mayor estrés debido el bombeo. La relación identidad, es la línea de equilibrio, entre el agua bombeada y el agua recargada en el acuífero. Es fácil concluir que cualquier punto localizado por encima de esta línea representa acuíferos que están extrayendo más agua de la que recarga, ejemplo de ello son: Cuautitlán – Pachuca, Valle de Toluca, Zona Metropolitana de la Ciudad de México (en rojo), etc. (Figura 2.15).

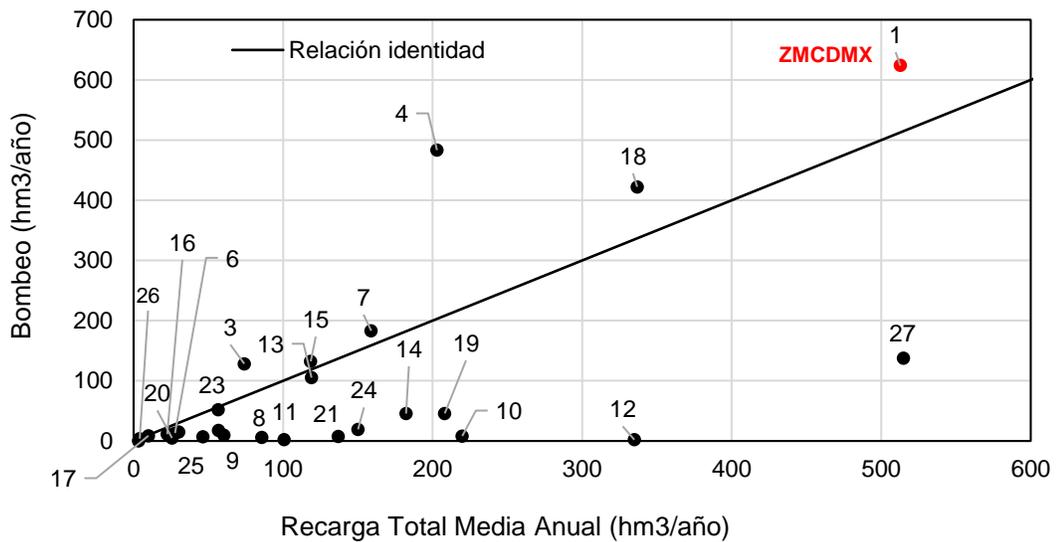


Figura 2.15. Relación entre el bombeo contra la recarga total media anual para los veintisiete acuíferos de la zona de estudio.

Tabla 2.1. Datos recopilados de los informes de disponibilidad de la CONAGUA. Área y precipitación media anual, a partir de estos se obtienen el volumen llovido y la relación de recarga vertical y volumen llovido. La ecuación a continuación se utiliza para calcular la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea, $DAS = R_r - DNCOM - VCAS$

#	NOMBRE	Área Total (km2)	Área Total (hm2)	Precipitación Media Anual (mm)	Volumen Llovido (hm3/año)	Recarga vertical/volumen llovido (%)	DNCOM: Descarga Natural Comprometida (hm3/año)	VCAS: Volumen Anual de Agua Subterránea Concesionado e Inscrito en el REPDA (hm3/año)	DAS: Disponibilidad media anual de Agua Subterránea del acuífero (hm3/año)
1	Zona Metropolitana Cd. México	2139.0	213900.0	769.0	1644.9	2.7	0	1400.97	-888.166
2	Apan	733.0	73300.0	610.0	447.1	0.5	0	18.01	12.285
3	Chalco - Amecameca	1431.0	143100.0	600.0	858.6	0	0	90.37	-16.370
4	Cuautitlán-Pachuca	2850.0	285000.0	578.6	1648.9	8.1	0	243.39	-40.494
5	Soltepec	820.0	82000.0	659.0	540.4	2.3	16.2	16.64	23.977
6	Tecocomulco	564.0	56400.0	669.0	377.3	2.2	0.52	0.01	27.168
7	Texcoco	934.0	93400.0	750.0	700.5	14.4	10.4	246.48	-111.776
8	Altamirano - Cutzamala	5856.0	585600.0	1106.0	6476.7	0.5	40.8	9.32	35.721
9	Ciudad Hidalgo - Tuxpan	2100.0	210000.0	175.0	367.5	8.1	41.3	64.53	-45.332
10	Huetamo	5912.0	591200.0	950.0	5616.4	3.5	197.40	8.16	14.239
11	Temascaltepec	1410.0	141000.0	1158.0	1632.8	6.2	94.6	0.36	5.844
12	Villa Victoria-Valle de Bravo	2144.0	214400.0	1005.0	2154.7	15.5	331.5	2.09	1.306
13	Ixtlahuaca-Atlacomulco	2894.0	289400.0	800.0	2315.2	5.1	18	115.30	-14.301
14	Maravatio-Contepec-Epitacio Huerta	2108.0	210800.0	808.0	1703.3	3.0	95.3	54.49	32.417
15	Valle de Acambaro	1123.0	112300.0	723.4	812.4	4.3	1.1	90.23	27.125
16	Valle de Amealco	304.0	30400.0	659.0	200.3	3.1	0.8	19.68	2.016
17	Valle La Cueva	783.0	78300.0	544.0	426.0	0.8	0.3	10.08	-0.476
18	Valle de Toluca	2738.0	273800.0	785.0	2149.3	8.3	53.6	329.59	-46.391
19	Actopan-Santiago de Anaya	1065.0	106500.0	550.0	585.8	4.1	90	30.83	87.289
20	Ajacuba	271.0	27100.0	550.0	149.1	4.0	15.6	0.69	9.377
21	Chapantongo-Alfajayucan	895.0	89500.0	550.0	492.3	6.7	112.9	4.30	19.682
22	El Astillero	105.7	10570.0	604.0	63.8	5.2	0	0	3.300
23	Huichapan-Tecoautla	1448.0	144800.0	544.0	787.7	1.4	33.5	36.25	-13.049
24	Ixmiquilpan	885.0	88500.0	550.0	486.8	6.0	124.6	2.12	23.394
25	Tepeji del Río	406.0	40600.0	800.0	324.8	9.1	35.2	9.64	1.464
26	Valle de Cadereyta	462.0	46200.0	500.0	231.0	1.1	0	4.17	-0.075
27	Valle del Mezquital	2714.0	271400.0	600.0	1628.4	3.0	293	175.61	46.400

Tabla 2.2. Base de datos con las diferentes variables de entrada y salida de agua subterránea, recopiladas de los informes de disponibilidad media anual de agua para los veintisiete acuíferos de la Comisión Nacional del Agua

#	ACUÍFERO	Rv: Recarga Vertical (hm3/año)	Ras: Recarga por escurrimiento superficial (hm3/año)	Ri: Recarga inducida			Eh: flujo subterráneo horizontal (hm3/año)	Rt: Recarga Total media anual (hm3/año)	ETR: Evapotranspiración (hm/año)	Descargas Naturales		B: Bombeo (hm3/año)	Sh: Salidas subterráneas (hm3/año)	Dt: Descarga Total media anual (hm3/año)
				Rr: Infiltración de los excedentes del riego agrícola (hm3/año)	Rc: Canales de distribución de agua subterránea (hm3/año)	Rpu: Fugas en la red de agua potable y alcantarillado (hm3/año)				Dfb: Descarga natural por flujo base (hm3/año)	Dm: Descarga por manantiales (hm3/año)			
1	Zona Metropolitana Cd. México	45.0	0	0	0	361.4	106.4	512.8	0	0	0	623.8	0	623.8
2	Apan	2.30	0	0	0	0	28.0	30.3	0	0	0	14.8	5.7	20.5
3	Chalco - Amecameca	0	0	0	0	0	74.0	74.0	0	0	0	128.4	0	128.4
4	Cuautitlán-Pachuca	133.2	0	0	0	0	69.7	202.9	0	0	0	483.3	0	483.3
5	Soltepec	12.6	0	1.2	0	1.5	41.5	56.8	0	0	0.9	17.8	39.0	57.7
6	Tecocomulco	8.4	0	0	0	0	19.3	27.7	0	0	0.5	13.1	0	13.6
7	Texcoco	101.1	0	2.7	0	2.6	38.7	145.1	0	0	10.4	183.1	0	193.5
8	Altamirano - Cutzamala	32.9	9.6	6.9	0	0	36.4	85.8	38.1	28.3	0	5.9	13.5	85.8
9	Ciudad Hidalgo - Tuxpan	29.6	0	3.7	0	2.4	24.8	60.5	0	0	2	10.0	49.2	61.2
10	Huetamo	199.1	0	1	0	0	19.7	219.8	0	197.4	0	8.2	14.2	219.8
11	Temascaltepec	100.8	0	0	0	0	0	100.8	0	94.6	0	2.6	3.6	100.8
12	Villa Victoria-Valle de Bravo	334.9	0	0	0	0	0	334.9	0	189.2	142.3	2.1	1.3	334.9
13	Ixtlahuaca-Atzacmulco	119.0	0	0	0	0	0	119.0	0	0	0	105.2	0	105.2
14	Maravatio-Contepec-Epitacio Huerta	51.3	0	6.9	0	3.1	120.9	182.2	19.5	18.8	19	45.5	63.6	166.4
15	Valle de Acambaro	34.9	0	11	0	3.9	68.7	118.5	0	0	1.1	132.3	0	133.4
16	Valle de Amealco	6.2	0	2.5	0	0.4	13.5	22.5	0.6	0	0.8	11.2	9.9	22.5
17	Valle La Cuevita	3.5	0	0.6	0	0.3	5.5	9.9	0	0	0.3	8.6	0	8.9
18	Valle de Toluca	177.8	0	1.3	0	0	157.7	336.8	0	0	53.6	422.4	0	476
19	Actopan-Santiago de Anaya	23.8	0	48.6	96.9	8.1	30.7	208.1	5.9	142.4	10.6	45.9	0.8	205.6
20	Ajacuba	6.0	0	5.7	12	1.4	0.6	25.7	1.1	15.0	0.6	5.0	0.1	21.8
21	Chapantongo-Alfajayucan	32.9	0	32.7	68.4	2.3	0.6	136.9	0	104.9	8.0	7.8	5.0	125.7
22	El Astillero	3.3	0	0	0	0	0	3.3	0	0	0	0	0	0
23	Huichapan-Tecozautla	11.4	0	6.3	0	1.5	37.5	56.7	0	0	5.0	52.3	28.5	85.8
24	Ixmiquilpan	29.3	0	33.2	69.0	4.3	14.3	150.1	0	111.2	13.4	19.3	0	143.9
25	Tepej del Río	29.7	0	2.4	4.9	3.7	5.6	46.3	0	28.7	6.5	7.0	4.1	46.3
26	Valle de Cadereyta	2.5	0	0	0	0.9	0.7	4.1	0	0	0	3.9	0.2	4.1
27	Valle del Mezquital	49.5	0	107.1	217.3	18.8	122.3	515.0	9.8	280.0	85.1	137.7	0	512.6

Algunos acuíferos con valores bajos de Recarga total media anual en proporción a la cantidad de agua precipitada, como El Astillero, Valle de Cadereyta, Valle la Cuevita, etc. son debido a que la principal fuente de recarga es inducida, de baja infiltración o debida a pequeños flujos provenientes de otros acuíferos. (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** - 0 y Figura 2.16). Resalta por otra parte la ZMCDMX y el Valle del Mezquital, con altos valores de recarga debido a factores exógenos como son el caso de las fugas en la red de agua potable para el caso de la CDMX y la cantidad de aguas negras que desembocan en Valle del Mezquital

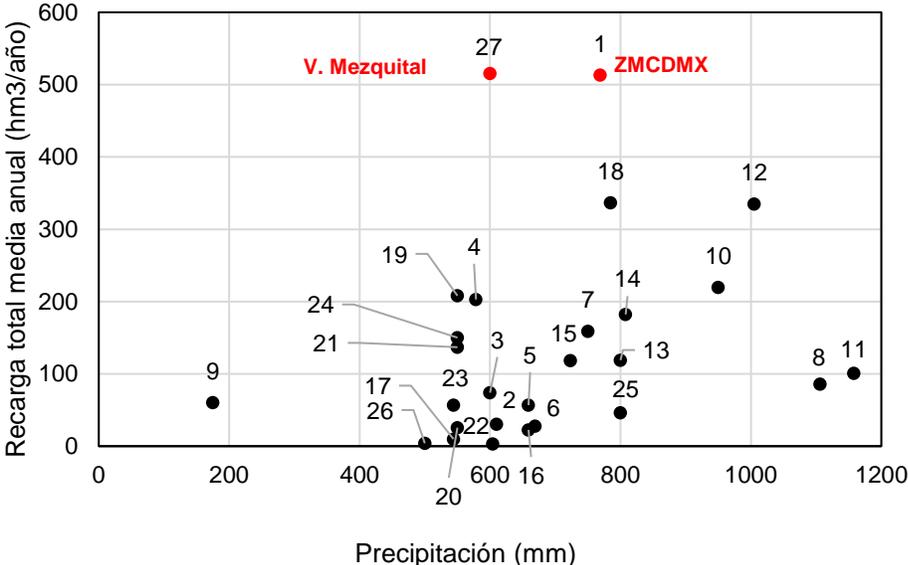


Figura 2.16. Relación entre la recarga total media anual versus precipitación

Finalmente, en la relación entre recarga Vertical (R_v) + Flujo horizontal (E_h) y la precipitación para cada uno de los 27 acuíferos se puede apreciar acuíferos que disminuyen los volúmenes de entrada de estas dos componentes en comparación con la recarga total media anual, como por ejemplo los acuíferos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y el Valle del Mezquital, porque las principales entradas son inducidas.

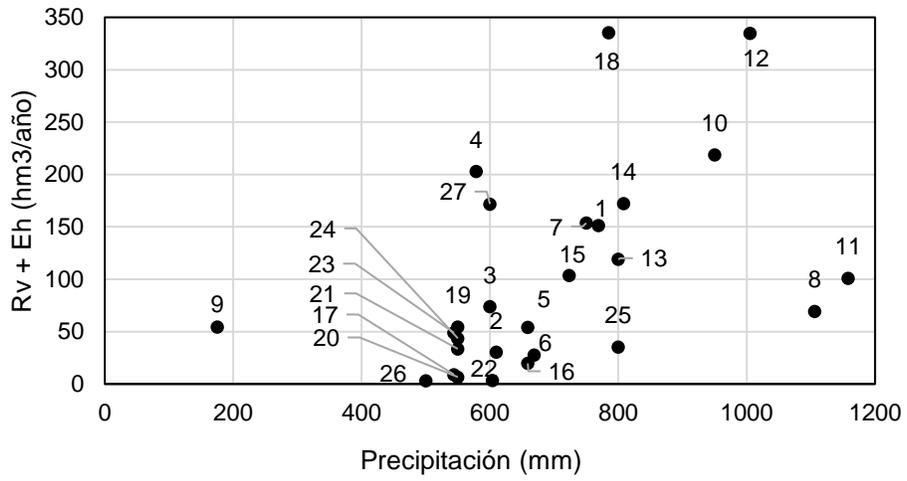


Figura 2.18. Relación entre la Recarga Vertical + Flujo Horizontal contra la precipitación en cada uno de los veintisiete acuíferos.

Resumen..

Capítulo 3. Modelación y escenarios

Una de las herramientas para toma de decisiones es el uso de modelación matemática que puede tener diferentes propósitos. Actualmente es una herramienta muy útil para conocer el funcionamiento hidrológico cuando éste se somete a varias condiciones ya sea naturales o antropogénicas, también se aplican para realizar simulaciones con el objeto de contar con elementos para definir políticas de manejo del recurso agua es decir, “ los modelos permiten entender lo que no conocemos del medio físico, identificar los parámetros de mayor sensibilidad del sistema, así como sus puntos vulnerables, planteando escenarios diferentes” para una mejor toma de decisiones. (Escolero, 2004). La elaboración del Plan Nacional 20 años de la Ciudad de México, considera que el manejo sustentable del agua es un imperativo en el camino a garantizar los derechos sociales y una vida digna en la ciudad. En este apartado, se presentan los resultados de la modelación hidrogeológica en las principales cuencas hasta 2050, considerando cambio climático y aumento en la demanda de acuerdo con crecimiento poblacional. En particular se presenta el análisis para el acuífero Valle Mezquital, por su importancia en la gestión de los recursos hídricos de la Ciudad de México, las configuraciones de flujo para la Cuenca de Cutzamala y Lerma, así como un análisis detallado para las subcuentas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

3.1 Marco Hidrogeológico Regional

La zona de estudio pertenece principalmente a la región conocida como faja volcánica transmexicana. Los derrames basálticos y la mayoría de rocas que se extienden en toda la faja volcánica transmexicana se caracterizan por una alta permeabilidad que varía en un amplio rango, controlado principalmente por su grado de fracturamiento, la presencia de tubificaciones en los derrames y la intercalación de material extrusivo. En el subsuelo de los valles, las rocas consolidadas y no fracturadas abajo del nivel regional de saturación forman barreras para el flujo de agua subterránea, como los derrames andesíticos que funcionan como basamento geohidrológico. Los derrames de rocas no fracturadas intercaladas con relleno aluvial en diferentes profundidades forman acuíferos locales independientes en rocas adyacentes. La mayoría de las rocas de composición riolítica, forman acuíferos de gran densidad y permeabilidad moderada debido a su fracturamiento. En las partes más bajas de las cuencas, los acuíferos en derrames volcánicos fracturados están cubiertos por depósitos lacustres y aluviales de menor permeabilidad, por lo que son acuíferos confinados o semiconfinados y se caracterizan por un coeficiente de

almacenamiento bajo. Los piroclastos tienen una alta porosidad, aunque su permeabilidad sea baja, en la zona de saturación funcionan como acuitardos, los cuales en escala regional pueden transmitir agua a los acuíferos adyacentes. En la superficie se encuentran depósitos lacustres porosos y de poca permeabilidad que forman acuitardos de algunos metros de espesor. Los materiales aluviales no consolidados, gravas, arenas y sedimentos finos, están ampliamente expuestos en los valles y forman acuíferos someros. El espesor y la alta permeabilidad de los clásticos son comunes en los arroyos, también forman canales activos y viejos que funcionan como acuíferos semiconfinados. Sobre las extensas llanuras inundadas son más abundantes los clásticos de granos medios a finos y permeabilidad moderada a baja. Los flujos de lava basáltica y los gruesos paquetes de piroclásticos que forman el mayor volumen de las rocas volcánicas jóvenes, producen excelentes áreas de recarga y rápidamente transmiten el agua a profundidad, alimentando al acuífero profundo (Velázquez-Ordaz, 1993)

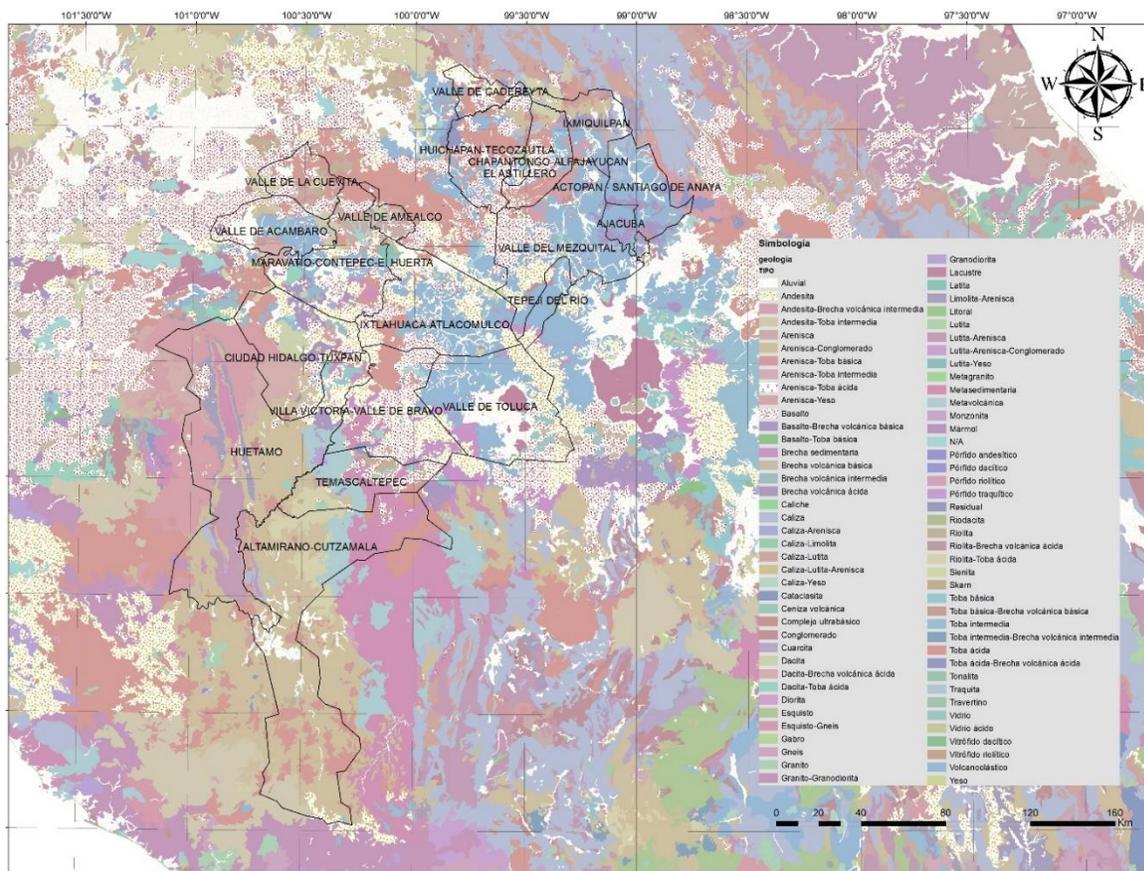


Figura 3.1. Unidades litológicas de los acuíferos (Elaboración propia con capa temática de INEGI, 2002)

En la Figura 3.1. se presentan las unidades litológicas del centro de México. Se observa que su composición es principalmente de rocas ígneas extrusivas (basaltos, tobas, brechas volcánicas, dacitas), lo que le confiere una permeabilidad secundaria, principalmente por fracturamiento. Hacia el Oeste (Huetamo) existen rocas metamórficas y sedimentarias del tipo lutitas-areniscas. Al Sur(Altamirano-Cutzamala) predominan rocas sedimentarias del tipo areniscas-conglomerados.

Ixtlahuaca-Atlacomulco

Este acuífero está conformado por materiales lacustres y depósitos aluviales, de granulometría y porosidad variable; los primeros cubren al valle desde el sur de Ixtlahuaca hasta el norte de Atlacomulco; de igual forma se encuentra limitado al norte y noreste por rocas volcánicas básicas lávicas con la mayor potencialidad hidrogeológica, que funcionan como zona de recarga hacia el acuífero del valle. Se considera como semiconfinado. (DOFb, 2015).

Maravatío-Contepec-E.Huerta

Con base en la geología del subsuelo, en este acuífero se identifican dos principales unidades: una capa tipo granular de unos 100m de espesor y una de origen volcánico de más de 300m. El tipo granular se presentan materiales vulcano-clastos y aluviones poco consolidados, la capa de material volcánico se presentan basalto, andesita, tobas y areniscas, con buen potencial para almacenamiento de agua subterránea. Se suponen interconectados hidráulicamente formando una vasta unidad hidrogeológica. Se considera de tipo libre o semiconfinado (DOFc, 2015)

Valle de Acámbaro

Las evidencias geológicas y geofísicas permiten establecer la dinámica del agua subterránea se presenta en un sistema acuífero libre a semiconfinado, tipo granular-fracturado con doble porosidad, heterogéneo y anisótropo de continuidad hidráulica regional, entre unidades volcánicas, piroclásticas, vulcano-sedimentarias y depósitos terrígenos de compacidad y granulometría variables. Está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, areniscas y conglomerados; y en su porción inferior por rocas volcánicas fracturadas, principalmente de composición basáltica. La granulometría de los materiales aluviales varía desde arcilla a grava y su espesor alcanza los 100 m, de acuerdo a su distribución y forma de las fosas tectónicas que los contienen. Por su parte, el medio volcánico fracturado presenta un gran espesor, con marcadas propiedades

heterogéneas-anisótropas debido al patrón de fracturamiento que determina la ocurrencia y distribución de agua subterránea (DOFd, 2015).

Valle de Amealco

Este acuífero se desarrolla principalmente en un paquete de depósitos de origen volcánico como son las tobas (principalmente denominada la Toba Amealco), también se encuentran ignimbritas y basaltos fracturados, hacia las zonas de planicie en la capa superficial se presentan depósitos aluviales. El medio granular constituido por depósitos fluviales, conglomerático areno-arcilloso el acuífero es libre alcanzando profundidades de 15 m. La capa constituida por depósitos aluviales, volcánicos, areno-arcillosos con intercalaciones de derrames basálticos andesíticos el acuífero es del tipo semiconfinado y es explotado a través de la mayor parte de los pozos localizados en la zona a profundidades del orden de 200m. (DOFe, 2015).

Valle de la Cuevita

Está conformado por rocas de composición volcánica y sedimentos continentales del Terciario Cuaternario. Dichos materiales constituyen estructuras geológicas y tienen en general, buena permeabilidad. Se considera de tipo libre (DOFf, 2015)

Valle de Toluca

Las unidades litológicas de la formación Tarango, los flujos piroclásticos del Nevado de Toluca, la formación Chichinautzin, conos recientes, tobas y arenas, depósitos lacustres y aluviales forman acuíferos. Los flujos del Nevado, la formación Chichinautzin y los conos recientes funcionan como zonas de recarga, propiciando la infiltración del agua de lluvia y los escurrimientos superficiales; sin embargo, ocasionalmente pueden funcionar como acuíferos someros. La unidad Tarango también propicia la infiltración en sus partes topográficamente más altas y que están por encima del nivel freático. Funciona como un buen acuífero en general, con permeabilidad variable, de media a alta. Las unidades acuífugas (se consideran impermeables), son los domos andesíticos, el Complejo volcánico de andesitas Xochitepec, basaltos antiguos y Formación Las Cruces, representan fronteras de los acuíferos. En algunas partes presentan fracturación, lo que les confiere permeabilidad secundaria que propicia infiltración del agua de lluvia. Como acuitardos se han considerado a las tobas lacustres que no afloran pero que están presentes en el subsuelo intercaladas en los depósitos lacustres y de aluvión, de algunos materiales finos

del Nevado y lahares de la Tarango, así como algunas áreas con arcillas lacustres. (DOFg, 2015)

Altamirano-Cutzamala

En este acuífero existen afloramientos de toba ácida y de rocas metamórficas (metasedimentaria y metavolcánica), en la porción baja de la zona afloran rocas sedimentarias clásticas (areniscas, conglomerados). En el noroeste del acuífero se aprecian afloramientos de rocas calcáreas (caliza, caliza-lutita) y de lutita-arenisca, al sur se aprecia rocas ígneas extrusivas como la andesita, riolitas y tobas. (DOFh, 2015)

Ciudad Hidalgo-Tuxpan

El acuífero presenta condiciones hidráulicas de tipo libre, emplazado en depósitos volcánicos de lahares y materiales piroclásticos, derivados de explosiones volcánicas, sin embargo, las rocas sedimentarias junto con los derrames de lavas intermedias y básicas presentan un intenso fracturamiento secundario, que aún no ha sido explotada. Esta unidad hidrogeológica de mayor importancia dentro del área de explotación, ya que en ella se encuentran ubicados los aprovechamientos de agua subterránea. Está constituida por depósitos de fragmentos que se han acumulado por la acción de la gravedad y la sobresaturación de agua. Su granulometría varía de fina a gruesa, predominan esta última, al igual que los materiales aluviales. Tanto los depósitos volcánicos como los aluviales, presentan un alto grado de porosidad y permeabilidad. El flujo a través de los poros está restringido debido a la poca distribución de los depósitos granulares en el acuífero. (DOFi, 2015)

Huetamo

La distribución de la secuencia de materiales granulares que constituyen el medio poroso, asociada con las rocas volcánicas del medio fracturado y el patrón de fallas regionales integran el sistema que controla el movimiento del agua subterránea en la zona. Por las características geomorfológicas de la región, los pozos alojados en el medio granular son escasos debido a su distribución tan restringida. Se considera que en el sistema, los medios poroso y fracturado identificados previamente, forman parte de un acuífero de tipo libre heterogéneo, en donde el movimiento del agua subterránea está en función de la geología estructural del área y del tipo de sistema de flujo al que se encuentre integrado. El acuífero es heterogéneo debido a que incluye sedimentos y material litológico diverso, tanto en el sentido vertical como horizontal. Es importante recalcar que, debido a las características

topográficas de la región, a pesar de presentar altos índices de precipitación pluvial, los niveles de escurrimiento son muy elevados, por lo cual la mayor parte de la zona representa una zona de recarga en donde los flujos verticales deben ser los dominantes en este sistema, las zonas de descarga se presentan muy restringidas, fenómeno que es generado por lo estrecho de los valles intermontanos y poco espesor de los materiales de relleno (DOFj, 2015)

Temascaltepec

Existen tres unidades hidrogeológicas principales: a) Materiales de permeabilidad alta que constituyen zonas de recarga y/o acuíferos de potencialidad alta. En esta unidad hidrogeológica se agrupan los derrames volcánicos y los depósitos aluviales. Son materiales que están constituidos por materiales granulares y por rocas fracturadas, principalmente de composición básica; se agrupan debido a su alta permeabilidad, lo que les permite constituir acuíferos de alta potencialidad, así como zonas de recarga importantes. En el caso de los materiales granulares, su potencialidad es menor por su reducido espesor y extensión lateral. b) Materiales de permeabilidad media que constituyen zonas de recarga y/o acuíferos de potencialidad media. Estas unidades comprenden a rocas que presentan permeabilidad media a alta, originada principalmente por fracturamiento. La mayor parte de estas unidades están conformadas por rocas. Se considera un acuífero de tipo libre. (DOFk, 2015)

Villa Victoria-Valle de Bravo

Se identificaron tres unidades hidrogeológicas principales: a) Materiales de permeabilidad alta que constituyen zonas de recarga y/o acuíferos de potencialidad alta. En esta unidad se agruparon a los derrames volcánicos y los depósitos aluviales. Son materiales que están constituidos por materiales granulares y por rocas fracturadas, principalmente de composición básica; se agrupan debido a su alta permeabilidad, lo que les permite constituir acuíferos de alta potencialidad, así como zonas de recarga importantes. En el caso de los materiales granulares, su potencialidad es menor por su reducido espesor y extensión lateral. b) Materiales de permeabilidad media que constituyen zonas de recarga y/o acuíferos de potencialidad media. Estas unidades comprenden a rocas que presentan permeabilidad media a alta, la cual es originada principalmente por fracturamiento. La mayor parte de estas unidades están conformadas por rocas ígneas extrusivas de composición intermedia; en las zonas en donde afloran constituyen zonas de recarga y en el subsuelo conforman acuíferos de potencialidad media. c) Materiales de permeabilidad

baja que constituyen zonas de barreras. En esta unidad hidrogeológica se agrupa a las rocas metamórficas que se localizan en la parte suroccidental del área; debido a que su litología y fracturamiento escaso y discontinuo, su permeabilidad puede ser de baja a prácticamente nula. El acuífero se considera de tipo libre, con condiciones locales de semiconfinamiento (DOFI, 2018)

Actopan-Santiago de Anaya

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero libre a semiconfinado; heterogéneo y anisótropo constituido, en su porción superior, por una alternancia de materiales granulares aluviales, rocas volcánicas y sedimentos piroclásticos, con intercalaciones de tobas de menor permeabilidad que funcionan como semiconfinantes; que en conjunto presentan permeabilidad media y espesor promedio de 400 m, permitiendo la infiltración, circulación y almacenamiento de agua subterránea. La porción inferior está conformada por rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras, barreras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico están representados por las mismas rocas volcánicas especialmente las rocas riolíticas y secuencia de lutitas, limolitas y areniscas. A mayor profundidad, las rocas calizas cretácicas pueden alojar un acuífero confinado por sedimentos lacustres y rocas arcillosas, como lo demuestra el artesianismo que se presenta en la porción central del valle, cuando el acuífero recibe alimentación de la zona poniente, desde las partes altas del valle Progreso-Tepatepec-Actopan, por infiltración de los canales de conducción y excedentes de riego. La recarga de acuíferos más profundos se produce de manera vertical, a través de estratos semiconfinantes y piedemonte, incluso de las calizas. La descarga se lleva a cabo por medio de pozos profundos, manantiales y pozos brotantes debido al artesianismo sobre todo en la zona cercana a la localidad San Salvador y por salidas subterráneas en la porción noroeste del acuífero hacia Ixmiquilpan (DOFm, 2015)

Ajacuba

La mayor parte del subsuelo se encuentra constituida por sedimentos y materiales granulares de origen continental, interdigitados con depósitos vulcanoclásticos. La unidad inferior está alojada en rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico están constituidos por las mismas rocas volcánicas cuando a profundidad desaparece su fracturamiento y por rocas marinas calcáreo-arcillosas del Cretácico, de las que se desconoce su potencial geohidrológico. (DOFn, 2015)

Chapatongo-Alfayucan

La mayor parte del subsuelo se encuentra constituida por sedimentos y materiales granulares de origen continental, interdigitados con productos volcánicos. El basamento de los depósitos granulares y de las rocas volcánicas, está constituido por rocas marinas calcáreo-arcillosas del Cretácico, de las que se desconoce su potencial geohidrológico. En prácticamente toda la zona, se encuentra una capa de basaltos a profundidad somera que varía de 10 a 60 m aproximadamente, cuya presencia es muy importantes desde el punto de vista geohidrológico por su alta permeabilidad. En la parte oeste del valle, se ha detectado otra capa de basaltos a mayor profundidad que varía de 90 a 120 m. Encajonando a los basaltos, se encuentran materiales granulares, sedimentos lacustres y tobos de la Formación Tarango en un paquete de 300 a 600 m de espesor. (DOFo,2015)

El Astillero

El acuífero se encuentra ubicado en el Eje Neovolcánico, predominan las rocas ígneas extrusivas de tipo basalto, brecha volcánica, material volcanoclástico y dacita. En el centro del acuífero se identifica material aluvial. (DOFp, 2015).

Huichapan-Tecozautla

Los materiales componentes del principal acuífero de la región están constituidos litológicamente por andesitas, andesitas basálticas, aglomerados y brechas de composición andesítica y basáltica, los cuales en superficie presentan un fuerte fracturamiento, en el subsuelo los paquetes de rocas volcánicas granulares presentan fracturamiento. La posición estratigráfica de las formaciones geológicas aflorantes y del subsuelo, así como su relación estructural, junto con las características antes citadas, son los factores que norman el comportamiento del principal acuífero de la región. Por otro lado, la recarga al acuífero proviene de la infiltración del agua de lluvia, la cual se precipita tanto en las partes altas de las sierras, como en los lomeríos y valles de la región, infiltrándose en el subsuelo hasta alcanzar las rocas volcánicas que constituyen el acuífero, a través y por medio de los sistemas de fracturamiento. Otra parte escurre en los depósitos de pie de monte o en las rocas compactas, y se desplaza a través de los arroyos intermitentes; esta infiltración está influenciada y controlada por los escurrimientos superficiales, que se forman durante la época de lluvias y que, al encontrar formaciones permeables, penetran en ellas y complementan la recarga. El comportamiento del agua subterránea está determinado por el marco geológico, el cual está regido principalmente por tres factores: el estratigráfico; el geomorfológico y el tectónico-estructural. El factor tectónico estructural juega un papel

relevante. El fracturamiento que sufrieron las unidades incrementó su permeabilidad; la continuidad de las estructuras, tanto longitudinal como transversalmente, conjugado con los factores estratigráfico y geomorfológico, permiten definir los sistemas hidrológicos de una zona. El flujo principal adopta una dirección de sur a norte, pero además se ve alimentado lateralmente por las infiltraciones provenientes de las estribaciones de las sierras que limitan al valle, tanto por el oriente como por el poniente. Finalmente se concentra en la zona de Tecozautla y Gandhó, donde las condiciones en el subsuelo son favorables, al grado de ser el área que contiene el mayor número de pozos y donde se concentra la extracción, ocasionando la interceptación del flujo hacia el Río San Juan y la aparición de un cono de abatimiento local. Este acuífero se considera de tipo libre a semiconfinado. (DOFq, 2015)

Ixmiquilpan

La mayor parte del subsuelo se encuentra constituida por sedimentos, materiales granulares de origen continental, areniscas y conglomerados, interestratificados e interdigitados con depósitos vulcanoclásticos. La unidad inferior está alojada en rocas volcánicas de composición andesítica y riolítica, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico están constituidas por las mismas rocas volcánicas cuando a profundidad desaparece su fracturamiento y por rocas marinas calcáreo-arcillosas del Cretácico, de las que se desconoce su potencial geohidrológico. La Formación Tarango constituye la fuente de agua subterránea aprovechada por la mayoría de las captaciones existentes dentro de la zona. En las partes altas de los valles forman acuíferos “colgados”. Por su reducida extensión superficial, los basaltos cuaternarios fracturados expuestos en la porción sur de la zona, tienen poca importancia desde el punto de vista regional; localmente actúan como receptores de carga. (DOFr, 2015)

Tepejí del Río

El acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos fluviales y conglomerados que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los arroyos; en su porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas fracturadas de diferente composición, intercaladas con productos piroclásticos. Las tobas y andesitas que forman parte de la porción inferior del acuífero, constituyen el basamento y fronteras al flujo subterráneo en el acuífero, cuando a profundidad desaparece su fracturamiento. A mayor profundidad, el basamento regional está conformado por las calizas de la Formación El

Doctor y la secuencia de lutitas, calizas y areniscas de las formaciones Soyatal y Mexcala. Se considera de tipo libre a semiconfinado. (DOFs, 2015)

Valle de Cadereyta

Se identifican tres unidades hidrogeológicas principales: a) Relleno aluvial y lacustre b) andesita fracturada y c) depósitos arcillo-limosos con presencia de gravas y gravillas. La primera y tercera unidades corresponden a zonas acuíferas en medios granulares. La unidad de relleno aluvial y lacustre en el área se presenta después del suelo vegetal y hasta profundidades del orden de 70 m. El material que lo constituye es como sigue: Material lacustre formado por limos, se encuentran también gravas, gravillas y boleos empacados en material arcilloso; los boleos son fragmentos de andesitas y riolitas, existen además materiales que corresponden a tobas lacustres de pómez, y se encuentran algunos horizontes formados por escoria volcánica como tezontle y material arenoso de grano medio a fino. Esta unidad es permeable y puede constituir un acuífero si el nivel de saturación es somero y se almacena agua en un espesor significativo. Los depósitos arcillo-arenosos se localizan debajo de la andesita fracturada que constituye el medio fracturado; estos depósitos arcillo-arenosos se localizan aproximadamente a una profundidad promedio de 215 m, su límite inferior no ha sido atravesado pero los sondeos eléctricos indican que es mayor a 300 m de profundidad. Esta unidad presenta baja resistividad, se asocia con depósitos granulares como arcillas y limos con gravas y arenas probablemente saturados, pero de escasa permeabilidad. El medio fracturado, constituido por la unidad de andesitas fracturadas, subyace a la primera unidad y se encuentra a una profundidad promedio de aproximadamente 170 m, su límite inferior se localiza a una profundidad del orden de 210 m. Esta es la unidad productora principal del acuífero, ya que por fracturamiento los pozos captan caudales apreciables de agua en esta unidad. En su conjunto el acuífero constituido por los depósitos clásticos y las rocas volcánicas fracturadas se comporta como un acuífero semiconfinado (DOFt, 2018)

Valle del Mezquital

La mayor parte del subsuelo se encuentra constituida por sedimentos y materiales granulares de origen continental, interdigitados con productos volcánicos. El basamento de los depósitos granulares y de las rocas volcánicas, está constituido por rocas marinas calcáreo-arcillosas del Cretácico, de las que se desconoce su potencial geohidrológico. En prácticamente toda la zona, se encuentra una capa de basaltos a profundidad somera que varía de 10 a 60 m aproximadamente, cuya presencia es muy importante desde el punto de

vista geohidrológico por su alta permeabilidad. En la porción occidental del valle, se ha detectado otra capa de basaltos a mayor profundidad que varía de 90 a 120 m. Encajonando a los basaltos, se encuentran materiales granulares, sedimentos lacustres y tobas de la Formación Tarango, en un paquete de 300 a 600 m de espesor. (DOFu,2015)

En la Figura 3.2, se presenta el volumen de extracción por región. Los acuíferos que pertenecen a la región Alto Lerma extraen un volumen anual de 770.234 Mm³/a, en la región Cutzamala de 97.649 Mm³/a y en la región de Tula 214.66 Mm³/a. Los acuíferos con mayor extracción son Valle de Toluca y Valle del Mezquital.

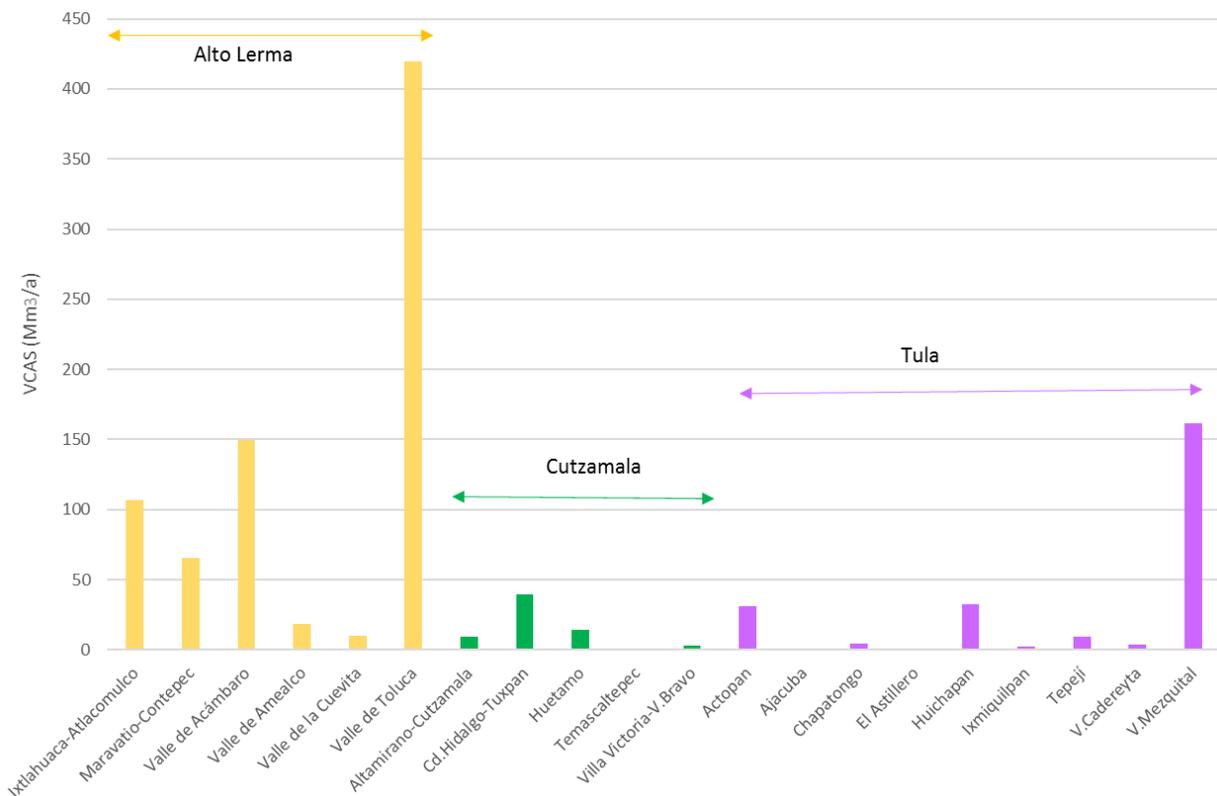


Figura 3.2. Volúmenes de agua subterránea para las regiones de Alto Lerma, Cutzamala y Tula (Elaboración propia con datos de Conagua)

En la Figura 3.3, se presenta la configuración de la red de flujo subterráneo con base en la red piezométrica de CONAGUA. Se observa que en la región que corresponde al acuífero Valle de Toluca, tiene elevaciones del nivel estático mayores a 2100 msnm, lo que representa una zona de recarga de agua subterránea, dividiendo las direcciones de flujo subterráneo. Se identifica un flujo subterráneo hacia al noroeste, donde se localizan los acuíferos de Ixtlahuaca, Maravito, Valle de Acambaro, Valle de la Cueva y Valle de Amealco. Existe otro hacia el Noreste que pertenecen a los acuíferos de Tepejí del Río, Valle del Mezquital, Ajacuba, Actopan, Ixmiquilpan, Chapatongo, El Astillero, Huichapan y Valle de Cadereyta. Hacia el suroeste, sigue una dirección preferencial de flujo subterráneo desde el acuífero Valle de Toluca hacia Valle de Bravo, Huetamo, Temascaltepec y Altamirano-Cutzamala. En la Figura 3.4, se muestra una representación esquemática del funcionamiento hidrogeológico conceptual en una sección orientada SW-NE. Se observa que los altos topográficos son zonas de recarga y hacia el acuífero valle de Toluca se tienen elevaciones de 2400 msnm del nivel estático, hacia el acuífero Altamirano Cutzamala de 700 msnm y hacia el acuífero de Valle del Mezquital (al Norte) de 1900 msnm.

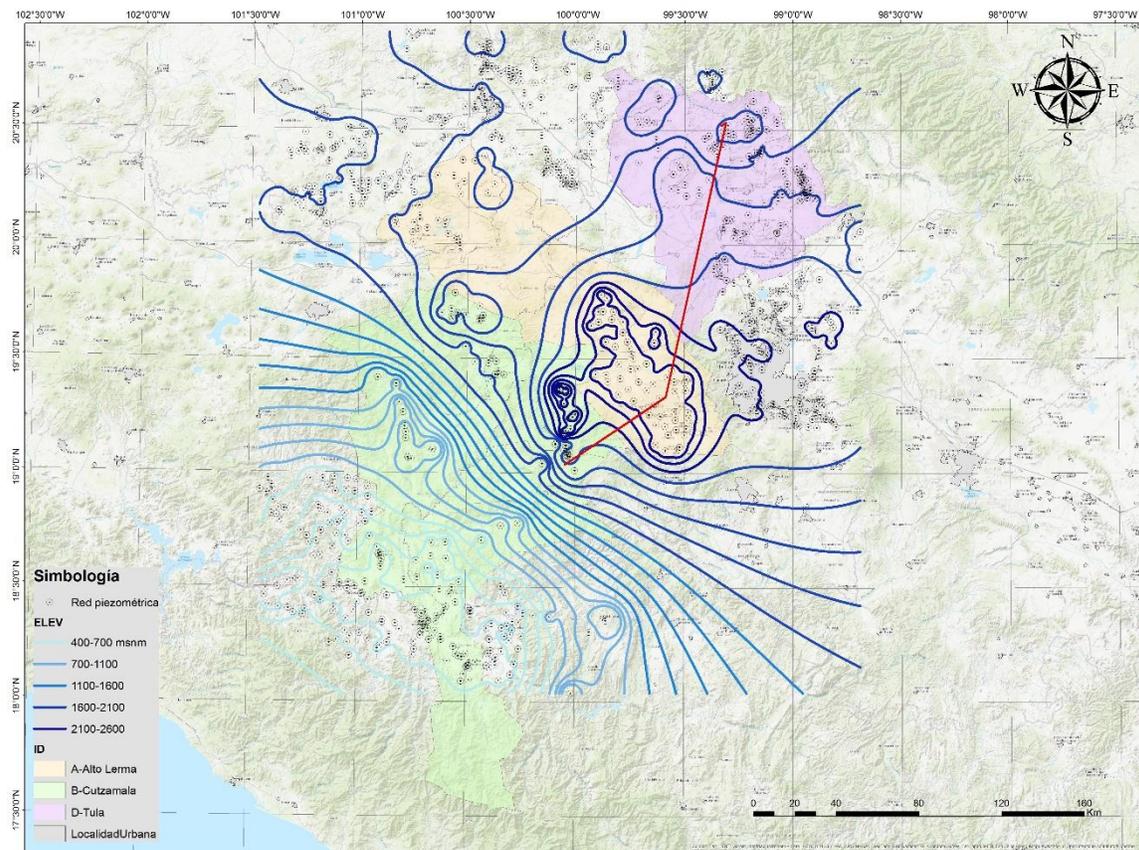


Figura 3.3. Curvas de igual elevación del Nivel Estático regional (Elaboración propia con datos de CONAGUA,2016)

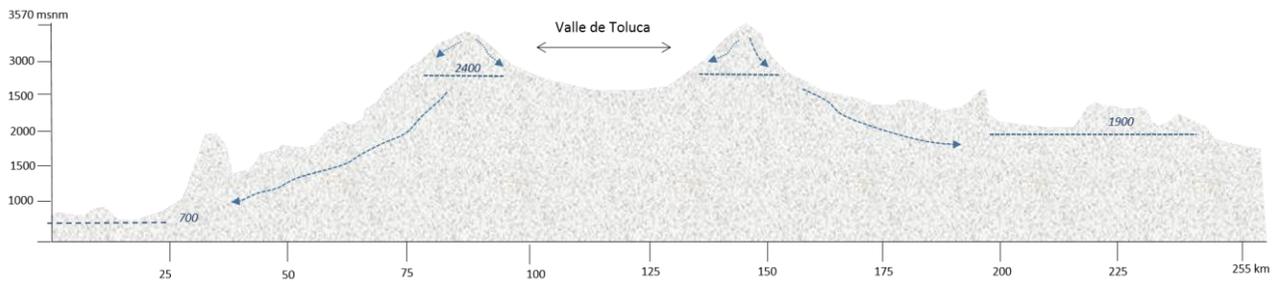


Figura 3.4. Representación esquemática del funcionamiento hidrogeológico.

3.2 Modelación computacional de flujo de agua subterránea

En general, un modelo debe simular las cargas hidráulicas observadas con el menor error posible. En un caso ideal, el coeficiente de correlación lineal entre la carga hidráulica observada y la carga hidráulica simulada debe ser equivalente a uno, es decir, que el error de la simulación debe tender a cero. En la práctica, es muy difícil alcanzar un coeficiente de correlación lineal unitario ya que no hay modelos perfectos, sobre todo cuando la escala es regional, es decir, de una extensión de decenas de kilómetros.

Para este trabajo se realizaron diversos modelos computacionales, cada uno adecuado a cada una de las escalas antes referidas, primeramente, un modelo para cada cuenca analizada, y en particular, la Cuenca de México es subdividida en las cuencas Texcoco, Cuautla Pachuca, Chalco Amecameca y las Zona Metropolitana de la Ciudad de México con el objetivo de obtener más detalle en la Ciudad de México.

3.3 Modelación de la Cuenca Tula - Valle del Mezquital

Para una mejor interpretación, para la Cuenca San Juan Tula se consideró la región del Valle del Mezquital, el cuál recibe las aportaciones de aguas residuales provenientes de la CDMX a través de los llamados: Gran Canal del Desagüe, Interceptor Poniente y Emisor Central. Los dos primeros cruzan la divisoria entre las Cuencas de México y Mezquital a través de los túneles de Tequisquiac y el tajo de Nochistongo, para incorporarse a los ríos Salado y El Salto. El río El Salto descarga en la presa Requena, de donde continúa como el río Tula circulando hacia el norte. La zona recibe aprox. $50 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua residual no tratada que riega alrededor de 45,214 ha. El Valle del Mezquital es una planicie con ligera pendiente que desciende hacia el Norte, limitada por elevaciones topográficas que son en su mayoría conos volcánicos y productos asociados. El valle está constituido por una alternancia de material piroclástico, lava y sedimentos lacustres conocidos como Formación

Tarango del Paleógeno, que se encuentran cubiertos por una delgada capa de aluvión del Cuaternario. Las sierras que bordean al Valle del Mezquital están formadas por rocas volcánicas, principalmente lava y en menor proporción toba del Paleógeno. Al Norte están constituidos por sedimentos marinos calcáreos del cretácico (Lesser et al, 2011)

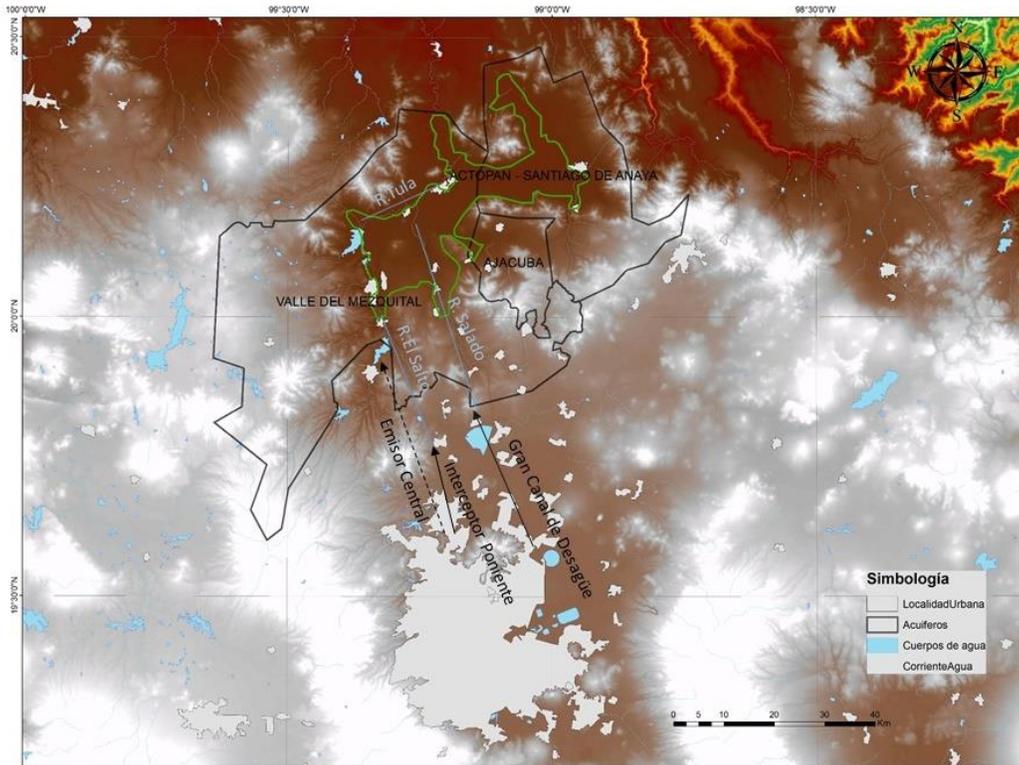


Figura 3.5. Flujo de las descargas de aguas negras de la CDMX hacia la Cuenca Tula en el Valle del Mezquital (Lesser et al ,2011)

Se definió una zona de modelación que está contenida en los acuíferos del Valle del Mezquital, Actopan y Ajacuba, en donde predominan los materiales de rocas ígneas extrusivas. En este estudio se realizó el balance hidrogeológico, y se calculó que la recarga total media anual es de 515.01 hm³/año, la descarga natural comprometida de 293 hm³/año (802,739.7 m³/d) y el volumen concesionado de 107.7 hm³/año, por lo que se tiene una disponibilidad de 114.26 hm³/año. Para fines de modelación hidrogeológica se consideró la recarga de 1,410,986.3 m³/d (515 hm³/a) y el volumen concesionado inscrito en el REPDA de 481,156.16 m³/d (175.6 hm³/a).

En la Figura 3.5 se presenta la extensión de la zona de modelación, considerando principalmente la zona de distrito de riego. Se consideró la configuración de elevación del nivel estático para el año 2013, se observa que el flujo subterráneo sigue una configuración

Sur-Noreste con cargas hidráulicas que van de los 2,140 msnm a 1,910 para la zona de Ajacuba sigue un flujo preferencial Este-Oeste y hacia Actopan del Sureste-Noroeste. La sección hidrogeológica S-NNE, se presenta en la Figura 3.6.

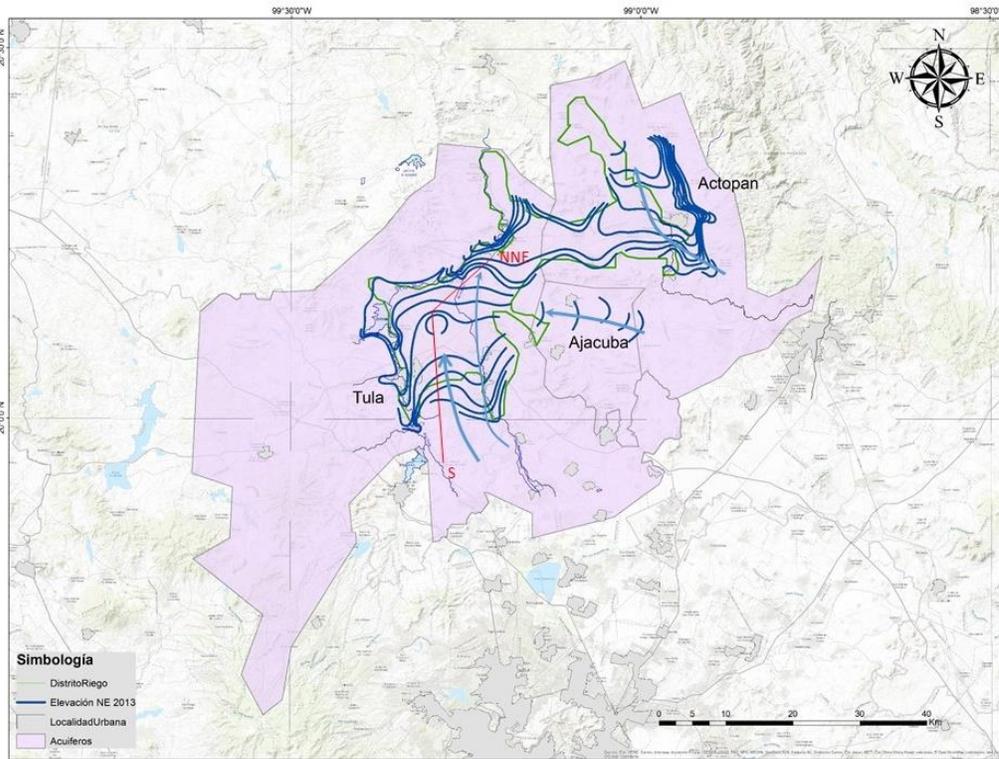
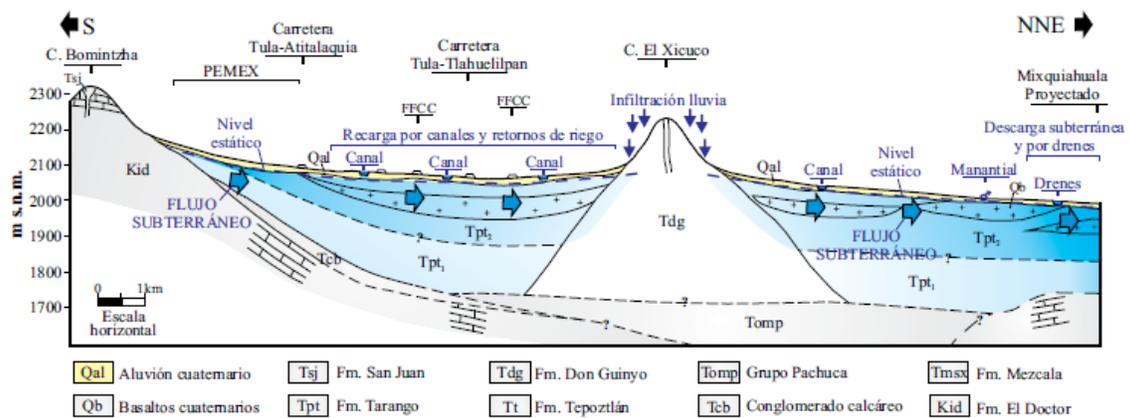


Figura 3.6. Extensión de la zona de modelación y configuración de la elevación del nivel estático para el año 2013.



3.7. Sección hidrogeológica conceptual Valle Mezquital (Lesser et al, 2011)

Una vez definidos los parámetros hidrogeológicos (los detalles se presentan en el anexo 2), se realizó la modelación a fin de obtener la representación de la red de flujo. Con base en estos resultados se ajustó la calibración con los datos observados En la Figura 3.8, se presenta su configuración de la red de flujo en el modelo.

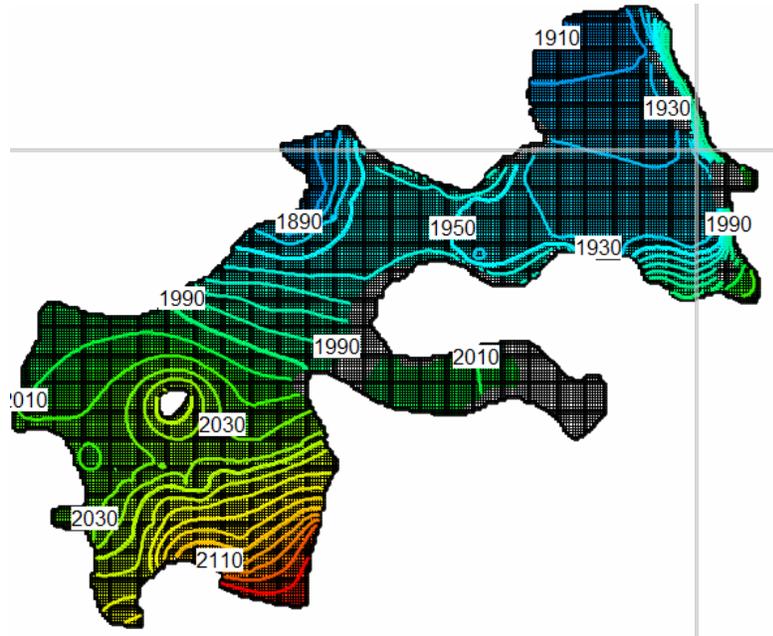


Figura 3.8. Resultado de la simulación de flujo subterráneo

3.3.1 Escenario Base 2020

Una vez calibrado, se consideró la simulación a 2020 como línea base para la propuesta de escenarios futuros. En la Figura 3.9, se presenta la configuración para 2020. Las cargas hidráulicas indican al sur equipotenciales de 2145 m y van disminuyendo hacia el Norte con cargas de 1885 m. En la figura 3.10, se presenta la configuración para el abatimiento. Se observa que el mayor abatimiento se localiza en la parte media de acuífero.

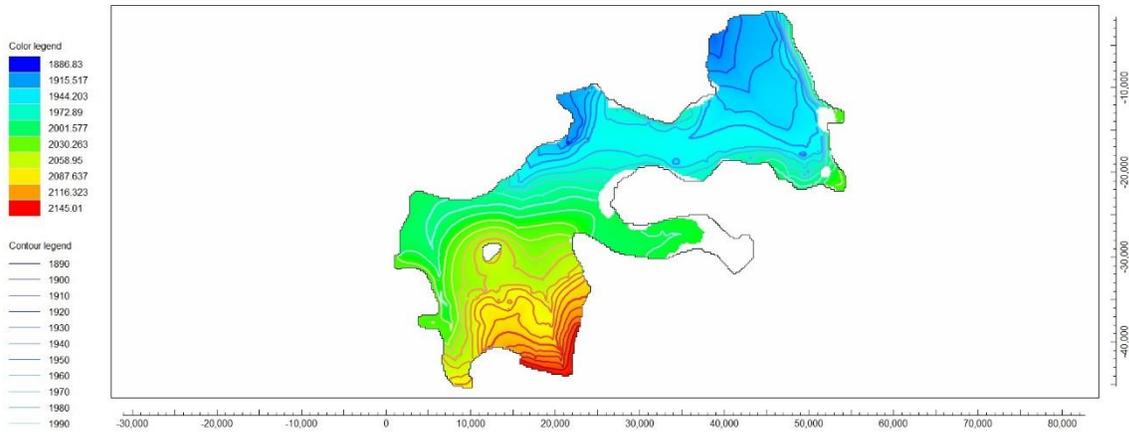


Figura 3.9. Configuración de cargas hidráulicas para el año base 2020.

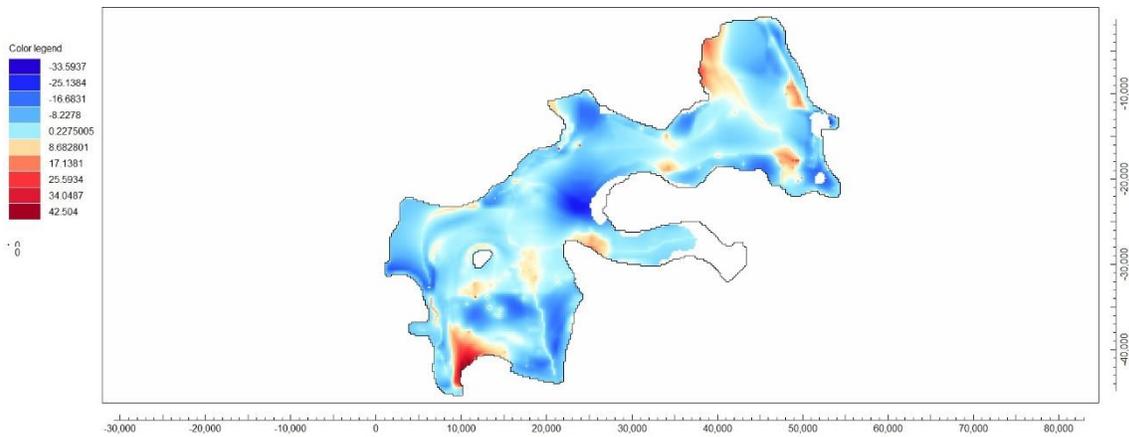


Figura 3.10. Configuración de abatimiento para el año base 2020.

El Balance volumétrico en m^3/d , se presenta en la Tabla 3.1. En esta simulación se mantiene constante la Recarga y la Extracción de los pozos de bombeo. Se observa que la recarga es de las principales entradas al sistema y las salidas por drenes son mayores que la extracción. (Figura 3.1)

Tabla 3.1. Balance para el año base 2020

	2020	
	Entradas	Salidas
Almacenamiento	9040.66	37562.43
Carga Constante	0.00	0.00
Pozos	0.00	481156.16
Drenes	0.00	1281732.38
Fronteras de Carga	443887.94	63446.17
Recarga	1410986.25	0.00
Total	1863914.88	1863897.13
Entradas-Salidas	17.75	

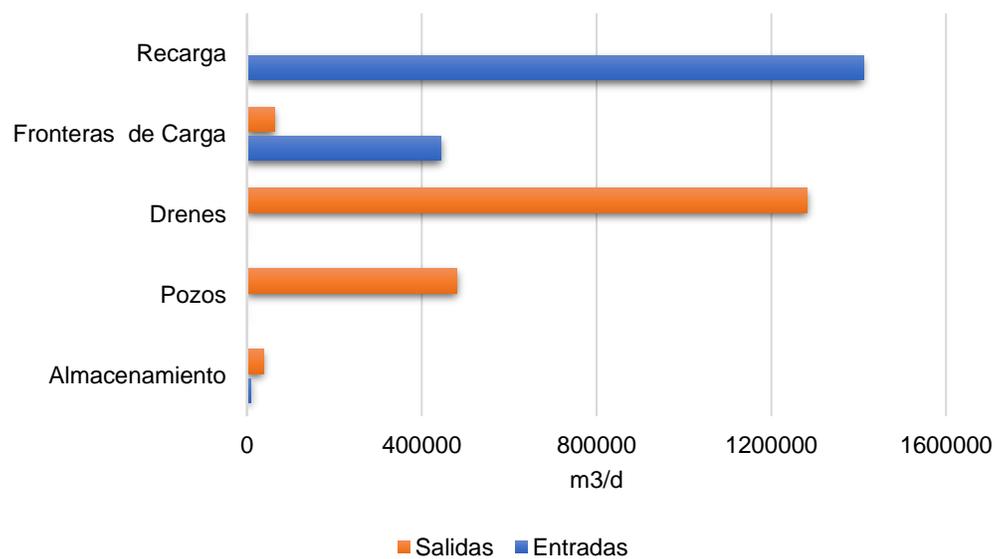


Figura 3.11. Balance volumétrico para el año base 2020.

3.3.2 Escenario Tendencial

- **Carga Hidráulica**

En la Figura 3.12 se presenta la configuración para 2030, 2040 y 2050. Las cargas hidráulicas indican al sur equipotenciales de 2145 m y van disminuyendo hacia el Norte con cargas de 1885 m, indicando una tendencia estable respecto a 2020. Los cuadros marcados, representan pozos de predicción propuestos en el modelo para Tula (al Sur), Mixquihuala (centro), Actopan (Norte).

- **Abatimiento**

La configuración de abatimiento presenta valores negativos en zonas focalizadas del Valle del Mezquital como es la parte central, con valores de hasta -30m, en 2040 aumenta el abatimiento (-35m) y en 2050 hay una recuperación (-32m). (Figura 3.13)

En la Tabla 6, se presenta los datos obtenidos con los modelos, donde se mantienen la recarga y la extracción constante. Respecto al almacenamiento existe una disminución tanto de entradas y salidas. Los drenes indican una disminución hacia 2040 y vuelve a aumentar hacia 2050, la frontera de carga tiene una tendencia de aumento hacia 2050.

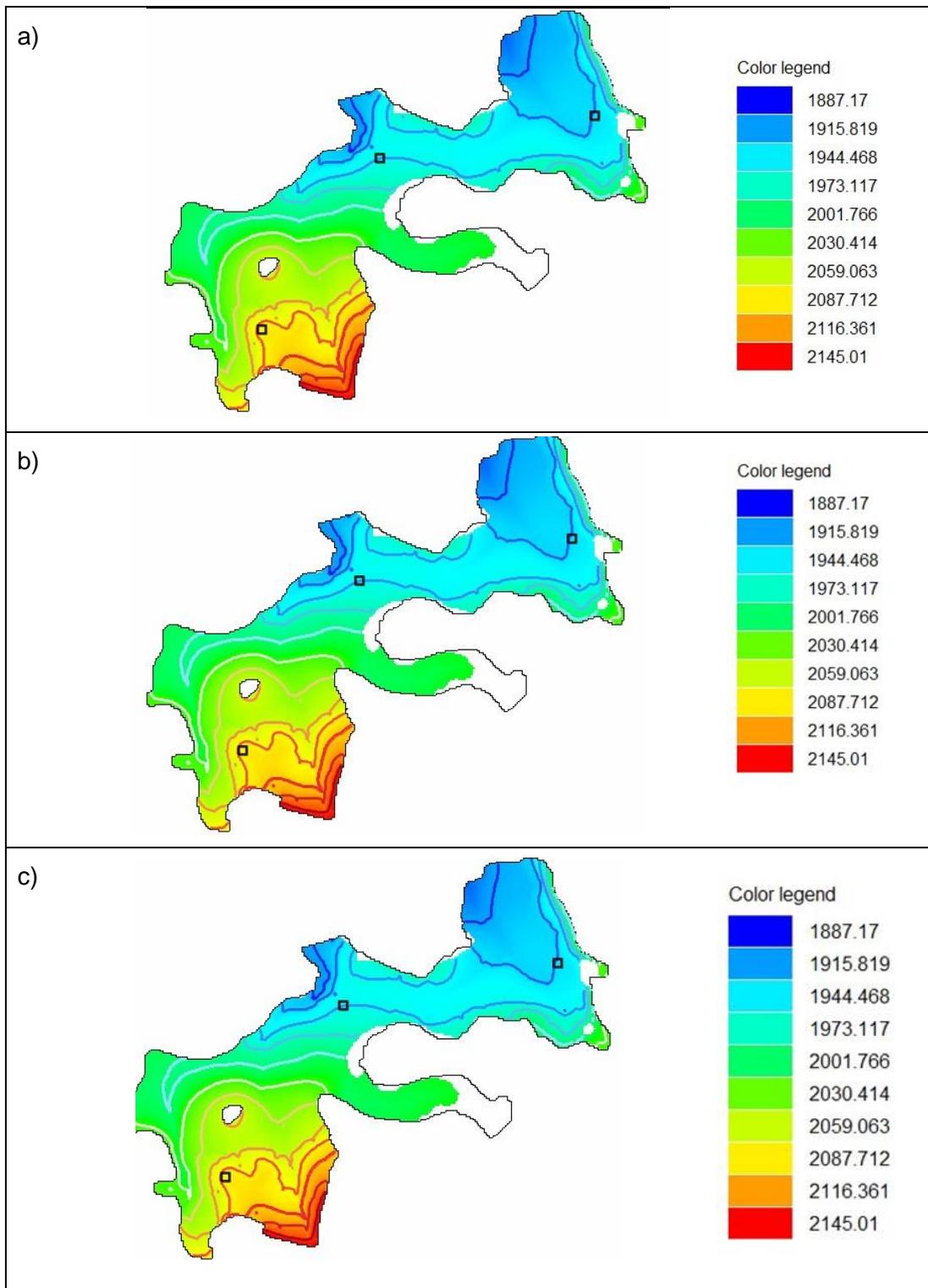


Figura 3.12. Configuración de cargas hidráulicas para el año a)2030, b)2040 y c)2050.

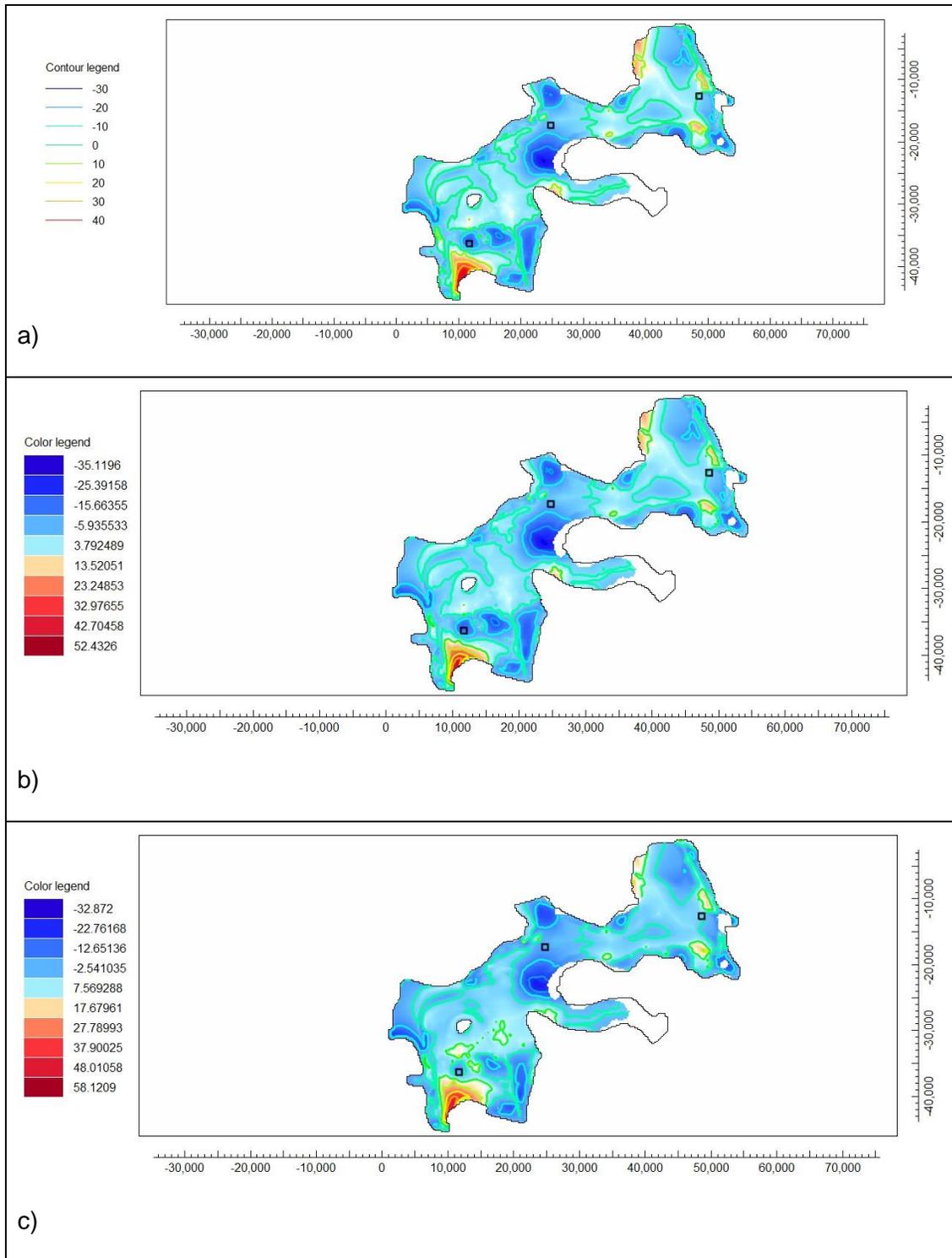


Figura 3.13. Configuración de abatimiento para a)2030, b)2040 y c) 2050.

Tabla 3.2. Balance volumétrico para 2030,2040 y 2050.

	2030		2040		2050	
	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas
Almacenamiento	3079.48	6046.05	1635.73	1689.64	1092.96	816.89
Carga Constante	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pozos	0.00	481156.16	0.00	481156.16	0.00	481156.16
Drenes	0.00	1301653.13	0.00	1303854.13	0.00	1304135.25
Fronteras de Carga	440193.59	65392.71	439698.06	65574.02	439658.19	65617.26
Recarga	1410986.25	0.00	1410986.25	0.00	1410986.25	0.00
Total	1854259.25	1854248.00	1852320.00	1852273.88	1851737.38	1851725.50
IN-OUT	11.25		46.13		11.88	

El balance de Entradas-Salidas se presenta en la figura x, donde se observa una tendencia de disminución tanto de entradas y salidas. Y aunque el bombeo se mantiene constante, la tendencia indica que las entradas siguen siendo ligeramente mayores a las salidas por lo que existe un balance positivo. (Figura 3.14)

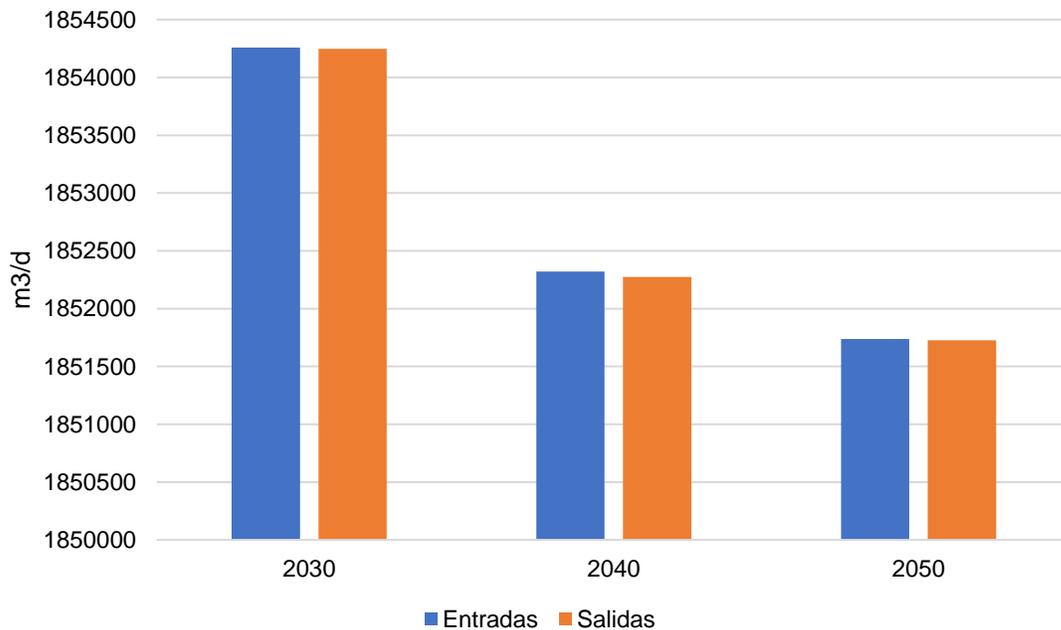


Figura 3.14. Balance de entradas y salidas para 2030 a 2050

Para tres pozos de predicción localizados en Tula, Mixquiahuala, y Actopan se realizaron los hidrógrafos que se presentan en la Figura 3.15, se observa que considerando la recarga y la extracción constante para el pozo de Tula existe una recuperación de la carga hidráulica, para Mixquiahuala y Actopan se mantiene constante.

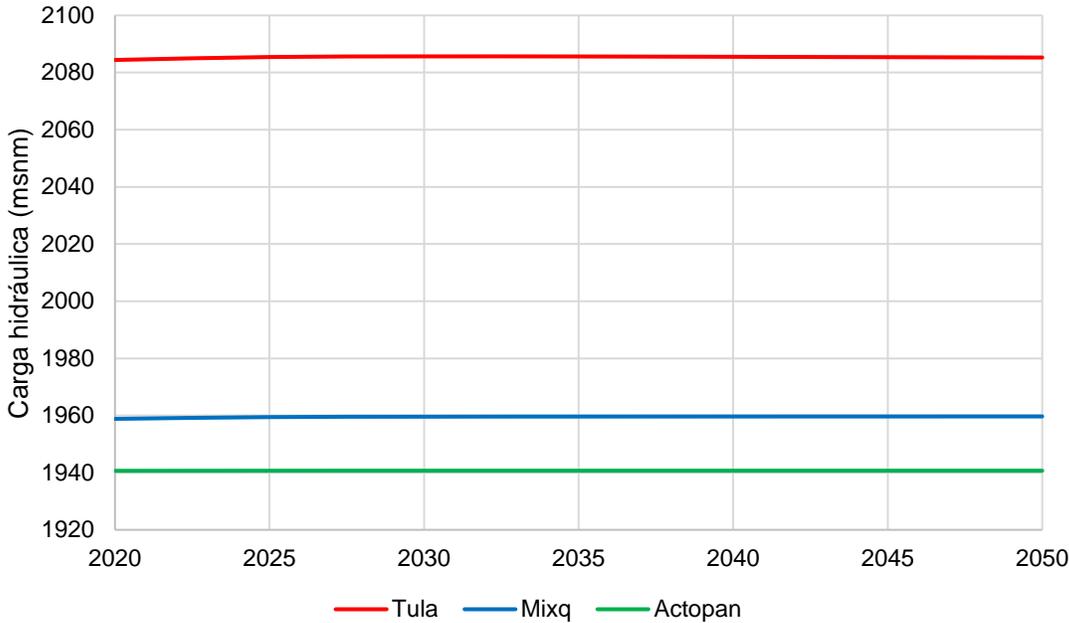


Figura 3.15. Hidrógrafos de carga hidráulica de pozos de predicción

3.3.3 Abatimiento

En la Figura 3.16, se presenta el abatimiento para los pozos de predicción. Se observa que el pozo de Actopan presenta un ligero abatimiento de -0.03m, durante el período de observación. En Mixquiahuala existe un abatimiento de -0.7m para 2030, hasta alcanzar los -0.8m para 2050. Para el pozo de Tula es donde existe un mayor abatimiento, alcanzando hasta -1.2m para 2030, posteriormente existe una recuperación de los niveles alcanzando los -0.8m para 2050.

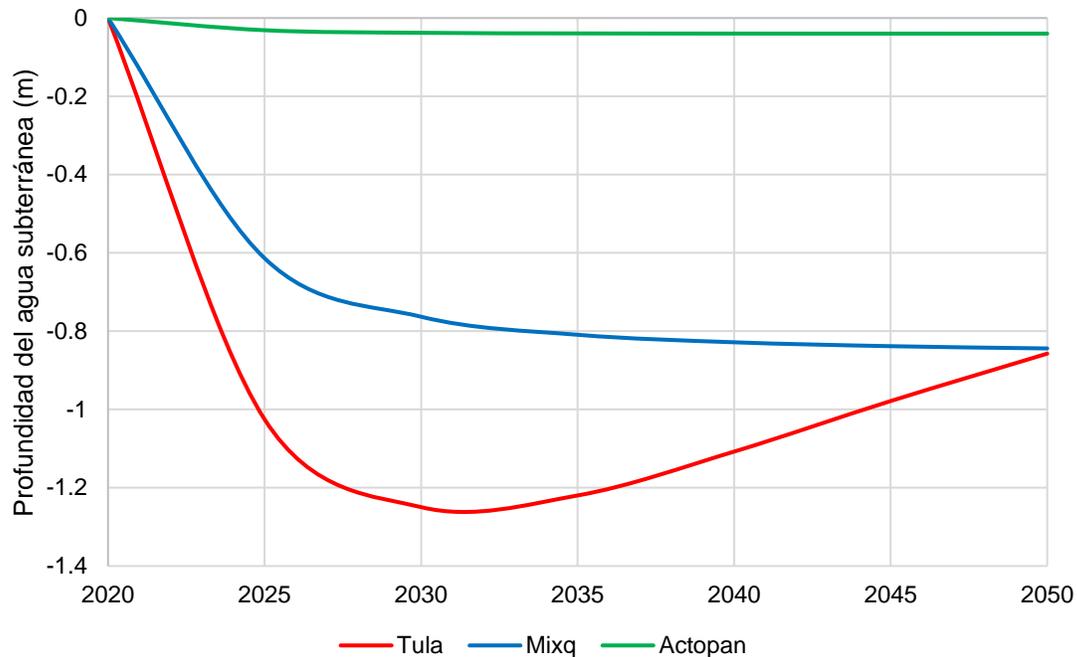


Figura 3.16. Hidrógrafos de abatimiento de pozos de predicción

3.3.4 Cambio Climático

Los efectos del cambio climático se han evidenciado de manera incremental. Actualmente, los pronósticos de aumento de 1.4°C - 6°C en la temperatura global dentro de este siglo, reciben una amplia aceptación en la comunidad científica. Los escenarios de cambio climático implican un alto grado de incertidumbre que se debe a tres factores: a) los modelos climáticos, b) los escenarios de desarrollo y de emisión de gases invernaderos, y c) el método “*downscaling*”. Los escenarios planteados tienen como referencia las corridas de los modelos HADGEM1 y ECHAM5, los cuáles aportan resultados razonables para México. Los escenarios de emisión se conocen como A2 y A1B. El A2 corresponde a un escenario pesimista con emisiones altas, tipo “business as usual”. Existe un crecimiento poblacional constante, el desarrollo económico está regionalmente orientado y cambio tecnológico es muy fragmentado y más lento que en otros escenarios. El A1B es un escenario intermedio que contempla una estabilización de los niveles de CO₂. En este escenario el crecimiento poblacional decrece después de un lapso, y el desarrollo económico es alto con la introducción de tecnología nuevas y eficientes, existiendo un balance entre el uso de fuentes de energía fósil y no fósil (Escolero *et al.*,2009).

En un estudio de la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático (Escolero *et al.*,2009) se realizó un cálculo del efecto de los escenarios climáticos sobre la disponibilidad de agua, a partir de la precipitación y evapotranspiración real. Considerando estos resultados para la ZMVM (Zona Metropolitana del Valle de México), se definieron los siguientes escenarios:

- CC1. Escenario con una disminución de la recarga de -5.2%. Se basa en el modelo HADGEM- A1B para junio-septiembre.
- CCA1Ba. Escenario con una disminución de recarga de -1.2%. Se basa en el modelo ECHAM A1B para junio-septiembre.
- CCA1Bb. Escenario con una disminución de recarga de -15.7%. Se basa en el modelo ECHAM A1B para octubre-mayo.
- CCA2- Escenario con un aumento de recarga de 6.7%. Se basa en el modelo ECHAM A2 para junio-sep.

En las Tablas 3.3 a 3.6, se presentan los balances para los diferentes escenarios de cambio climático. Se observa que la disminución de la recarga provoca un balance negativo, es decir las salidas son mayores que las entradas. Para el escenario de aumento de recarga existe un balance positivo.

Tabla 3.3. CC1-Escenario con una disminución en Recarga de -5.2%

	2030		2040		2050	
	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas
Almacenamiento	10141.53	30176.22	4072.81	4498.31	1723.98	647.59
Carga Constante	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pozos	0.00	481156.16	0.00	481156.16	0.00	481156.16
Drenes	0.00	1232956.50	0.00	1248368.38	0.00	1249600.50
Fronteras de Carga	456644.16	60194.14	454178.06	61931.91	454089.91	62123.41
Recarga	1337615.00	0.00	1337615.00	0.00	1337615.00	0.00
Total	1804400.75	1804483.00	1795865.88	1795954.75	1793428.88	1793527.63
IN-OUT	-82.25		-88.88		-98.75	

Tabla 3.4. CCA1Ba-Escenario con una disminución en Recarga de -1.2%

	2030		2040		2050	
	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas
Almacenamiento	9258.66	35796.87	3283.53	5635.17	1234.31	750.96
Carga Constante	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pozos	0.00	481156.16	0.00	481156.16	0.00	481156.16
Drenes	0.00	1270494.25	0.00	1289380.25	0.00	1291572.63
Fronteras de Carga	446788.34	62687.26	443382.84	64584.16	442952.22	64801.69
Recarga	1394054.50	0.00	1394054.50	0.00	1394054.50	0.00
Total	1850101.50	1850134.50	1840720.88	1840755.63	1838241.00	1838281.50
IN-OUT	-33.00		-34.75		-40.50	

Tabla 3.5. CCA1Bb-Escenario con una disminución en Recarga de -15.7%

	2030		2040		2050	
	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas
Almacenamiento	17827.05	18579.90	7613.00	2185.42	3273.75	448.14
Carga Constante	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pozos	0.00	481156.16	0.00	481156.16	0.00	481156.16
Drenes	0.00	1136871.00	0.00	1142202.75	0.00	55714.78
Fronteras de Carga	17827.05	54304.36	484030.22	55597.61	485016.34	64801.69
Recarga	1189461.50	0.00	1189461.50	0.00	1189461.50	0.00
Total	1690789.75	1690911.38	1681104.75	1681141.88	1677751.63	1677802.88
IN-OUT	-121.63		-37.13		-51.25	

Tabla 3.6. CCA2-Escenario con un aumento de Recarga de 6.7%

	2030		2040		2050	
	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas
Almacenamiento	8081.54	45682.51	2281.21	8031.38	478.48	976.23
Carga Constante	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pozos	0.00	483639.84	0.00	483639.84	0.00	483639.84
Drenes	0.00	1344366.13	0.00	1369263.38	0.00	1373041.63
Fronteras de Carga	428050.25	67932.86	423308.28	70144.58	422340.75	70402.99
Recarga	1505522.38	0.00	1505522.38	0.00	1505522.38	0.00
Total	1941654.13	1941621.38	1931111.88	1931079.25	1928341.63	1928060.75
IN-OUT	32.75		32.63		280.88	

3.3.5 Aumento de demanda

En el Capítulo 1, se realizó la proyección de la población, con base en los datos de 2010 y la tasa de crecimiento de la CONAPO. Para el Valle del Mezquital en 2020, se tiene una población de 480,610 habitantes con una tasa de crecimiento promedio de 0.83 %, alcanzando para 2050 666674 habitantes. Para fines de modelación se tomó como línea base el 2013 con una población de 500092 habitantes, y una extracción de 481156.156 m³/d. Con base en esto para cada año se calculó un factor de demanda considerando población y extracción, el cual se aplicó a cada período para la simulación. En la Figura 3.17, se presentan los resultados del crecimiento de la demanda. Para el año 2020 se calculó de 523401.66 m³/d, para 2030 de 574533.50 m³/d, para 2040 de 598320.94 m³/d y para 2050 de 630165.13 m³/d

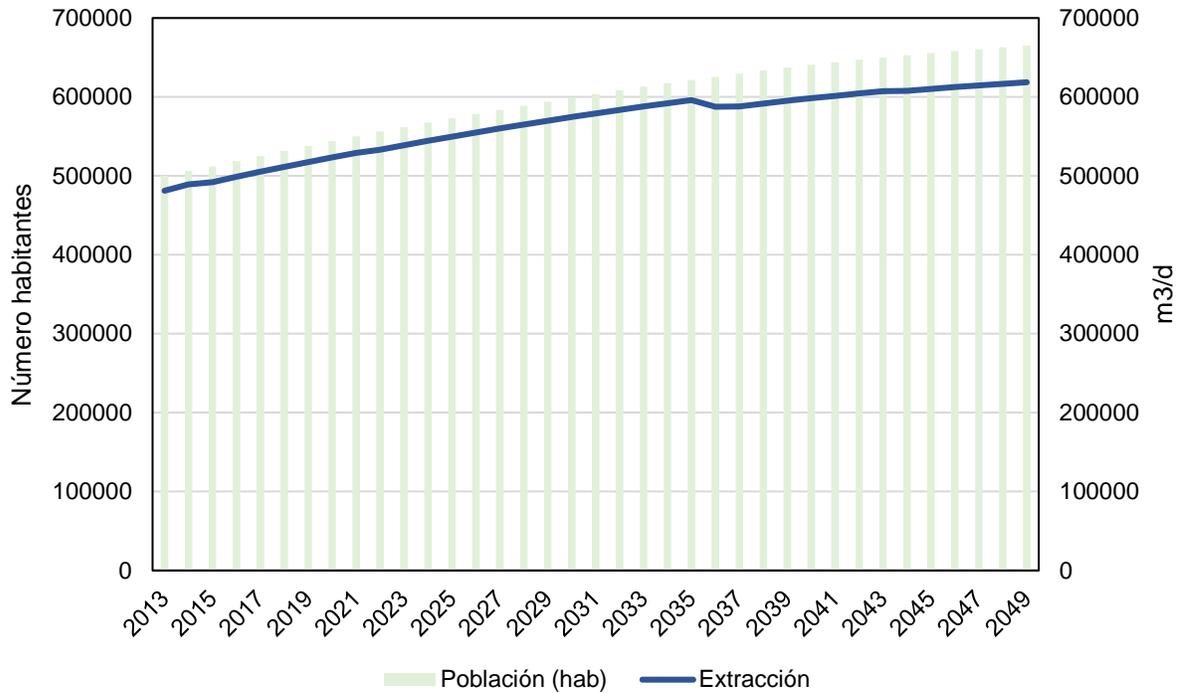


Figura 3.17. Crecimiento de demanda.

3.3.6 Hidrógrafos-Escenarios

- **Tula**

En la Figura 3.18, se presenta la simulación para un pozo de predicción en Tula. Se observa que considerando cambio climático los escenarios que plantean disminución de la recarga CC1 (-5.2%) y CC1Bb (-15.7%) presentan un abatimiento de sus niveles de 1.09 m y 5.2m. Para el caso de CC1Ba (-1.2%), existe una ligera recuperación de sus niveles de 0.4m, y su comportamiento es equivalente al escenario tendencial. Para el caso de una disminución de la recarga de -15.7% el abatimiento es significativo hasta de 5.2 m. Para el escenario de demanda se considera que la recarga se mantiene constante con 1,410,986.25 m³/d y considerando un aumento de demanda por extracción se presenta el mayor abatimiento hasta de 6.3 m.

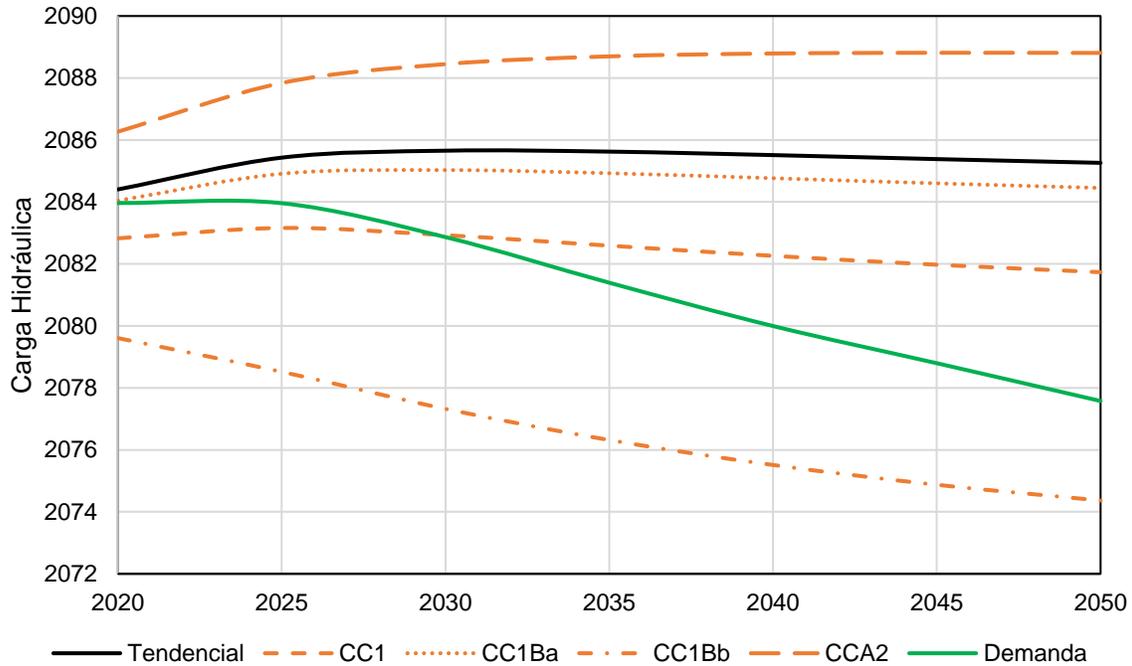


Figura 3.18. Hidrógrafos de escenarios de cambio climático y demanda para Tula

- **Mixquiahuala**

En la Figura 3.19, se presenta la simulación para un pozo de predicción de Actopan. Se observa que considerando cambio climático los escenarios que plantean disminución de la recarga CC1 (-5.2%), CC1Ba (-1.2%) y CC1Bb (-15.7%) presentan una tendencia similar al escenario sin cambio climático, pero con una carga hidráulica menor, de 1959.08 msnm; 1959.40 msnm, 1958.21msnm respectivamente, siendo el promedio tendencial de 1959.5 msnm. En general las gráficas tienen una tendencia constante durante el período. Para el caso del escenario CCA2, se presenta una recuperación de la carga hidráulica promedio de hasta 0.5 m, respecto al análisis tendencial, alcanzando un promedio de 1960.04 msnm. Para el escenario de demanda se considera que la recarga se mantiene constante con 1,410,986.25 m³/d y considerando un aumento de demanda por extracción se presenta una disminución de la carga hidráulica respecto al comportamiento tendencial, pero que se mantiene casi constante desde 2025, con un promedio de carga hidráulica de 1959.2 msnm.

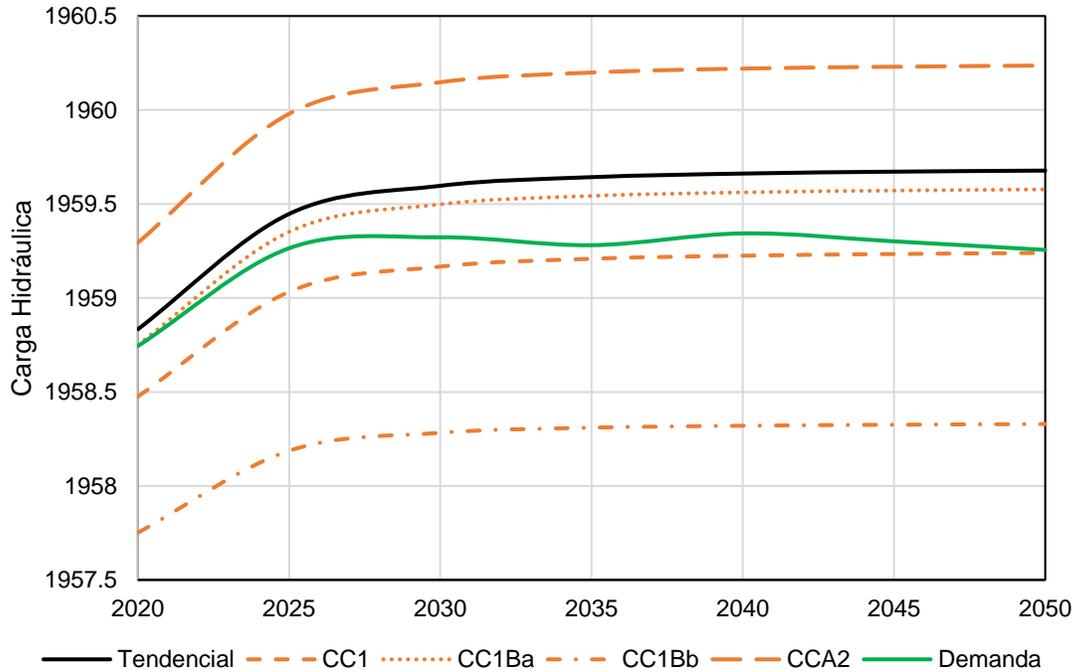


Figura 3.19. Hidrógrafos de escenarios de cambio climático y demanda para Tula

- **Actopan**

En la figura 3.20, se presenta la simulación para un pozo de predicción de Actopan. Se observa que considerando cambio climático los escenarios que plantean disminución de la recarga CC1 (-5.2%), CC1Ba (-1.2%) y CC1Bb (-15.7%) presentan una tendencia similar al escenario sin cambio climático, pero con una carga hidráulica menor, de 1940.67 msnm; 1940.16 msnm, 1939.08 msnm respectivamente, siendo el promedio tendencial de 1940.16 msnm. En general las gráficas tienen una tendencia constante durante el período. Para el caso del escenario CCA2, se presenta una recuperación de la carga hidráulica promedio de hasta 0.6 m, respecto al análisis tendencial, alcanzando un promedio de 1941.31 msnm. Para el escenario de demanda se considera que la recarga se mantiene constante con 1,410,986.25 m³/d y considerando un aumento de demanda por extracción se presenta una disminución de la carga hidráulica de 1.4m respecto al comportamiento tendencial alcanzando niveles promedio de 1939.25 msnm.

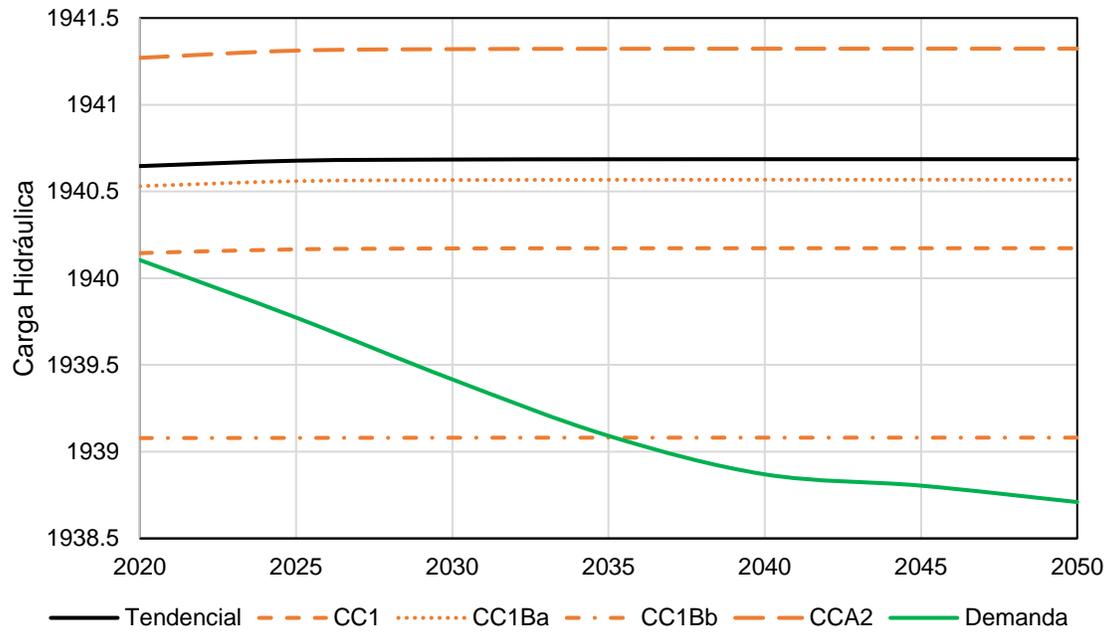


Figura 3.20. Hidrógrafos de escenarios de cambio climático y demanda para Tula

¿Cuál sería el ritmo y grado de recarga de acuíferos al que se debería aspirar para lograr la sustentabilidad?

Considerando la recarga de 1,410,986.25 m³/d y la extracción de 481,156.16 m³/d constantes, se plantearon los escenarios para 2030, 2040 y 2050. Con base en este análisis se observa que las condiciones de frontera de drenes y fronteras de carga no presenta variaciones significativas en estas décadas, siendo el parámetro más sensible el almacenamiento. En todos los escenarios desde el 2020 al 2050, el balance es positivo (las entradas son mayores que las salidas). La recarga es de las propiedades que pueden influir en el balance hidrogeológico. La condición de frontera de drenes son salidas del sistema que influyen en el balance, por lo que se recomienda conservarlos como sistemas hidrológicos que influyen en la conectividad tanto lateral como a profundidad y en el funcionamiento hidrogeológico. Considerando los hidrógrafos de predicción para Tula, Mixquiahuala, existe un abatimiento para 2030 y posteriormente una recuperación. En Actopan, existe una ligera recuperación de los niveles y en general se considera estable. Por lo anterior, la condición actual 2020 es favorable y mantiene un balance positivo, por lo que los actuales valores de recarga y extracción se pueden conservar.



Para el caso de cambio climático, en todos los escenarios donde existe una disminución de recarga y el balance es negativo (las salidas son mayores que las entradas). Se recomienda que esta disminución no supere el 5% de la recarga actual. Es decir, con una recarga de 1,394,054.5 m³/d, se tiene un balance de negativo (-40.5 m³/d), y aunque disminuyen las cargas hidráulicas respecto al análisis tendencial aún se considera sostenible, siempre y cuando no incremente la demanda. Para el caso de un aumento de la recarga (1,505,522.38 m³/d), existe un balance positivo y una recuperación de los niveles en los pozos de predicción.

El aumento de la extracción según el crecimiento poblacional indica una disminución de los niveles en el sistema acuífero. En los pozos de predicción de Tula y Mixquiahua se calculó una disminución de la carga hidráulica de 6.3 m y 1.3m, respectivamente. Para el pozo de Mixquiahuala se mantiene estable. En todos los pozos la carga hidráulica es menor respecto al análisis tendencial. Tula representa la zona más sensible de "agotamiento" del acuífero por aumento de la demanda. Esto implica que el aumento de la extracción ocasionará el abatimiento de niveles, por lo que se recomienda conservar la extracción actual.(481,156.16 m³/d).

3.4 Cuenca de México

Se distingue por estar rodeada por montañas y cubierta en diferentes puntos por áreas lacustres producto de lagos que existieron al final de la época glacial. Al cerrarse la Cuenca en el Cuaternario Superior, las aguas pluviales quedaron encajonadas, formando un conjunto de lagos someros, hacia el centro el Lago de México, al este el Lago de Texcoco, al sur los lagos de Xochimilco y Chalco, que formaban uno sólo y al norte el Lago de Zumpango.

El acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (clave 0901), se localiza al suroeste de la Cuenca de México (Figura 3.21), y ocupa el 17% de la superficie de la cuenca endorreica. La Ciudad de México y su área conurbada dependen fundamentalmente para abastecimiento de agua potable del suministro del acuífero (CONAGUA, 2018a).

Al sureste de la Cuenca de México, se distingue la subcuenca de Chalco, que se limita al norte por la Sierra de Santa Catarina, al sur por la Sierra Chichinautzin, al este por la Sierra de Río Frío (con orientación N-S) y por la Sierra Nevada (con estructuras importantes como el volcán Popocatepetl e Iztlacíhuatl), y al oeste se limita por el área chinampera de Tláhuac. En la parte central de la subcuenca de Chalco se localiza el área del ex-lago de Chalco. En esta subcuenca se encuentra el acuífero Chalco-Amecameca (Figura 3.21) que se distingue con la clave 1506 (CONAGUA, 2018b).

El acuífero Texcoco (clave 1507) se ubica en la parte este de la Cuenca de México, limita al norte con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, al este con la Sierra Nevada y el acuífero Soltepec, al sur con parte de la Sierra de Santa Catarina y con el acuífero Chalco-Amecameca, y al oeste con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (CONAGUA, 2018c). Posee una superficie de 934 km² (Figura 3.21).

El acuífero de Cuautitlán-Pachuca (clave 1508) se localiza en la parte norte de la Cuenca de México (Figura 3.21), se delimita al norte por las Sierras Tezontlalpan y Pachuca, al sur por la Sierra de Guadalupe y parte de la Sierra de Río Frío, al este por la Sierra de Chichicauautla y al oeste por la Sierra de Monte Bajo y Tepozotlán (CONAGUA, 2018d).

Hidrológicamente hablando, en la Cuenca de México se distinguen cuatro unidades (Herrera- Revilla y Cortés-Silva, 1989; Vázquez-Sánchez, 1995): un acuitardo en materiales lacustres Cuaternarios; acuífero en rocas volcánicas y materiales piroclásticos Cuaternarios y Plio-Cuaternarios; acuitardo en depósitos vulcanosedimentarios del Plioceno inferior,

rocas andesíticas del Mioceno y rocas basálticas y riolíticas del Oligoceno; y acuífero en rocas carbonatadas Cretácicas.

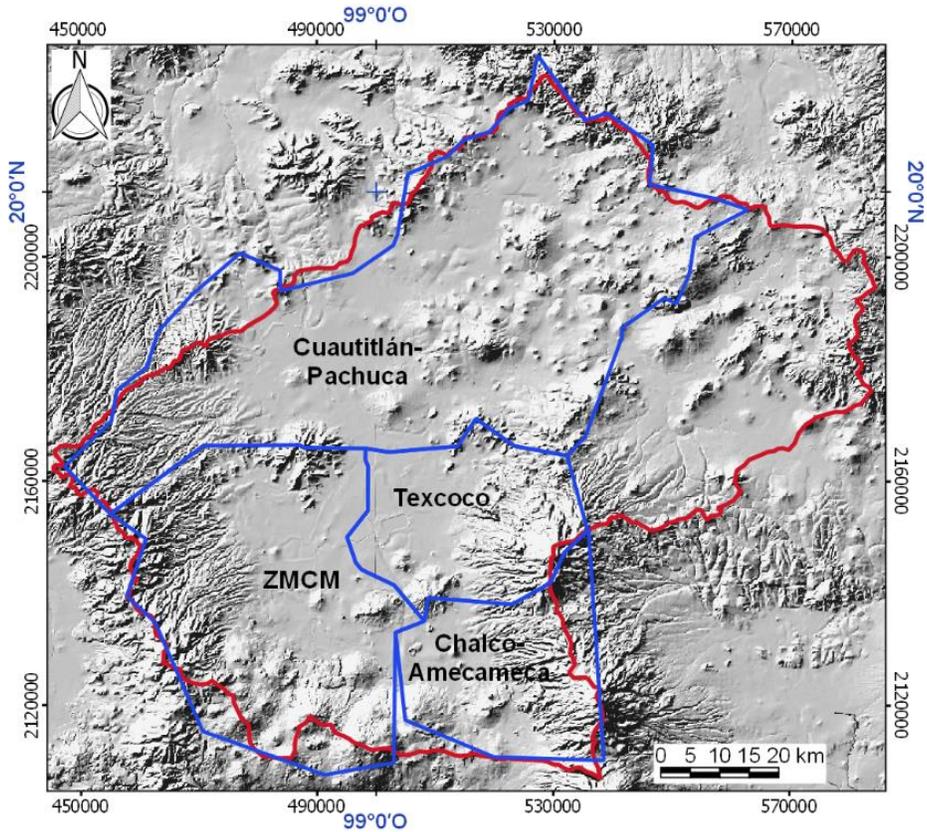


Figura 3.21. Acuíferos dentro de la Cuenca de México

El Acuitardo Superior se extiende desde a lo largo de la traza del antiguo Lago de Texcoco (1519) en las planicies de Chalco, Texcoco y de la Ciudad de México (Vargas y Ortega-Guerrero, 2004). El Acuitardo Superior alcanza sus espesores máximos en las planicies de Chalco con 120 m (Vázquez-Sánchez, 1995) y en la Ciudad de México con 95 m según los cortes litológicos (DGCOH, 1994). Según Santoyo-Villa *et al.* (2005) el Acuitardo Superior se puede subdividir en (1) Costra Superficial con espesor variable constituida por un relleno artificial heterogéneo, (2) Formación Arcillosa Superior con espesor variable entre 25 y 50 m, que se caracteriza por contener pequeños “lentes duros” de arena basáltica o pómez con espesor de algunos cm hasta 2 m, (3) Capa Dura constituida de limos arenosos, arcilla y algunas gravas cuyo espesor máximo es de 5 m, y (4) Formación Arcillosa Inferior con espesor máximo de 15 m al centro del antiguo lago de Texcoco, se constituye por estratos de arcilla separados por “lentes duros” semejantes a los de la Formación Arcillosa Superior.

Bajo condiciones naturales, es decir, sin los efectos del bombeo, el Acuitardo Superior representa una zona de descarga, sin embargo, debido a la explotación intensiva que se lleva a cabo en el Acuífero Superior se indujo la inversión del gradiente hidráulico y actualmente representa una zona de recarga (Ortega-Guerrero, 1989).

El Acuífero Superior está constituido por las unidades que se encuentran en contacto hidráulico debido a su posición estratigráfica. Incluye a los depósitos piroclásticos y las rocas andesítico-basálticas y basálticas del Cuaternario, material clástico aluvial (gravas y arenas) del Cuaternario, depósitos volcánicos del Pleistoceno (lapilli, cenizas, brechas), depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno (gravas, arenas, limos, arcillas volcánicas interestratificadas con tobas). Cuenta con una importante permeabilidad debido a la presencia de fracturas, cavernas y fragmentos del tamaño de piroclastos (Ortega y Farvolden, 1989). Se comporta como acuífero libre en las zonas altas, en los abanicos piroclásticos y en las llanuras aluviales y como acuífero semiconfinado en la parte central de la cuenca donde se extiende el material arcilloso del Acuitardo Superior.

El Acuitardo Inferior según Vázquez-Sánchez (1995) se constituye por los depósitos lacustres y piroclásticos del Plioceno inferior, rocas andesíticas del Mioceno, rocas basálticas y riolíticas del Oligoceno, el Grupo Balsas y la Fm. Mexcala. Se considera como un solo acuitardo debido a su baja permeabilidad a pesar de que contiene zonas más permeables debido al fracturamiento de las unidades volcánicas que lo conforman. Mantiene comunicación hidráulica con el acuífero superior debido a su posición estratigráfica. Se piensa que existe filtración ascendente hacia el Acuífero Superior inducida por el bombeo de las unidades permeables superiores (Vázquez-Sánchez, 1995).

El Acuífero en Rocas Carbonatadas Cretácicas se constituye por las unidades calcáreas del Cretácico que presentan permeabilidad por fracturamiento y disolución; se les asigna un espesor estimado de 2000 m (Ortega y Farvolden, 1989).

En la Cuenca de México se tienen reportadas sólo algunas pruebas de bombeo, la mayoría en la ZMCM, que se han interpretado en algunos estudios técnicos (p.e. DDF, 1984; Ortega y Farvolden, 1989; Lesser y Asociados, 1992, 1997 y 2000; CAEM, 2013) para determinar los valores de conductividad hidráulica y coeficientes de almacenamiento. De estudios técnicos, se conoce que la conductividad hidráulica se encuentra entre 0.1 y 50 m/d, el coeficiente de almacenamiento se encuentra entre 5×10^{-6} y 9×10^{-3} y el rendimiento específico entre 0.01 y 0.2.

En este trabajo se inspeccionaron los modelos de simulación de agua subterránea en cada una de los acuíferos de la Cuenca de México mediante tres etapas: 1) validación, 2) modificación/actualización y 3) calibración.

En la validación de los modelos (1), cada uno se sometió a un proceso de evaluación de su construcción, la cual debe representar el modelo conceptual del acuífero. En esta etapa se identificaron los principales aspectos que requieren modificarse y/o actualizarse, de ser necesario para su posterior re-calibración.

En la modificación/actualización de los modelos (2), se realizaron los cambios pertinentes, identificados en la etapa previa, para representar adecuadamente el modelo conceptual del acuífero, así como los aspectos antropogénicos que lo modifican. En este último aspecto se engloba la extracción del agua subterránea que tiene repercusiones directas en los niveles del agua subterránea.

En la calibración de los modelos (3), se evaluó su capacidad de imitar los niveles del agua subterránea en función de sus observaciones derivadas de las bases de datos del Organismo de Cuenca de Aguas del Valle de México. En este proceso se modifican las propiedades hidráulicas del acuífero mediante alguna metodología de calibración, en este caso, se utilizó el sistema prueba y error.

Para evaluar la precisión de la calibración, se utilizó la estadística del error, principalmente el error cuadrático medio (RMSE) y el error cuadrático medio normalizado (NRMSE). Los detalles de cada modelo se detallan en el [anexo 3](#)

Escenario base o Laisser Faire

Los acuíferos de la cuenca de México se encuentran en explotación intensiva ya que su balance de agua subterránea proporciona un déficit importante en su almacenamiento (CONAGUA, 2018a, 2018b, 2018c y 2018d). Lo anterior indica que no hay volumen de agua disponible para nuevas concesiones de aprovechamientos de agua subterránea. De lo anterior, se sustenta que el escenario base (*Laisser Faire*) considere constante el volumen de extracción de agua subterránea para el periodo 2020-2070, es decir, que el escenario base sigue la tendencia actual de la extracción del agua subterránea, sin cambios en los componentes restantes del modelo.

3.4.1 Modelo Cuautitlán-Pachuca

Al continuar con el volumen de extracción constante durante el periodo 2020-2070 en el modelo Cuautitlán-Pachuca, se encuentra que la configuración de carga hidráulica tiene cambios casi imperceptibles en cuanto a la dirección de flujo subterráneo, pero importantes en cuanto a la magnitud de la carga hidráulica.

En la Figura 3.22 se proporcionan las configuraciones de carga hidráulica simuladas por el modelo Cuautitlán-Pachuca. En la Figura 3.22 cada renglón corresponde con la carga hidráulica de los años 2020 (condiciones iniciales), 2040 y 2050. La configuración de carga hidráulica en Pachuca se muestra estable en los tres años observados (2020, 2030, 2040 y 2050); en Tizayuca y Cuautitlán se aprecia que hay disminución de los valores de carga hidráulica pero que las isóneas conservan la definición del gradiente hidráulico en la zona.

En la Figura 3.23 se muestran los abatimientos calculados a partir de 2020, se observa que aumentan gradualmente desde Pachuca hasta Cuautitlán en dirección SW-S, por lo que los mayores abatimientos se encuentran en la zona este de Cuautitlán mientras que los menores abatimientos se observan al noreste de Pachuca y al este del dominio. En el gráfico de la Figura 3.24 se resumen los valores de carga hidráulica simulados en el periodo 2020-2050, se observa más claramente que en Pachuca la carga permanece estable, mientras que en Tizayuca hay una disminución gradual lineal de la carga hidráulica, la cual es más severa en Cuautitlán. En la Figura 3.25 se resumen los valores de abatimiento simulado en el periodo 2020-2050, se observa que en Pachuca el abatimiento total es 7.2 m, que equivale a 0.24 m/año; en Cuautitlán el abatimiento total es 34.9 m, es decir 1.16 m/año; y en Tizayuca, el abatimiento total es 28.3 m, es decir 0.94 m/año.

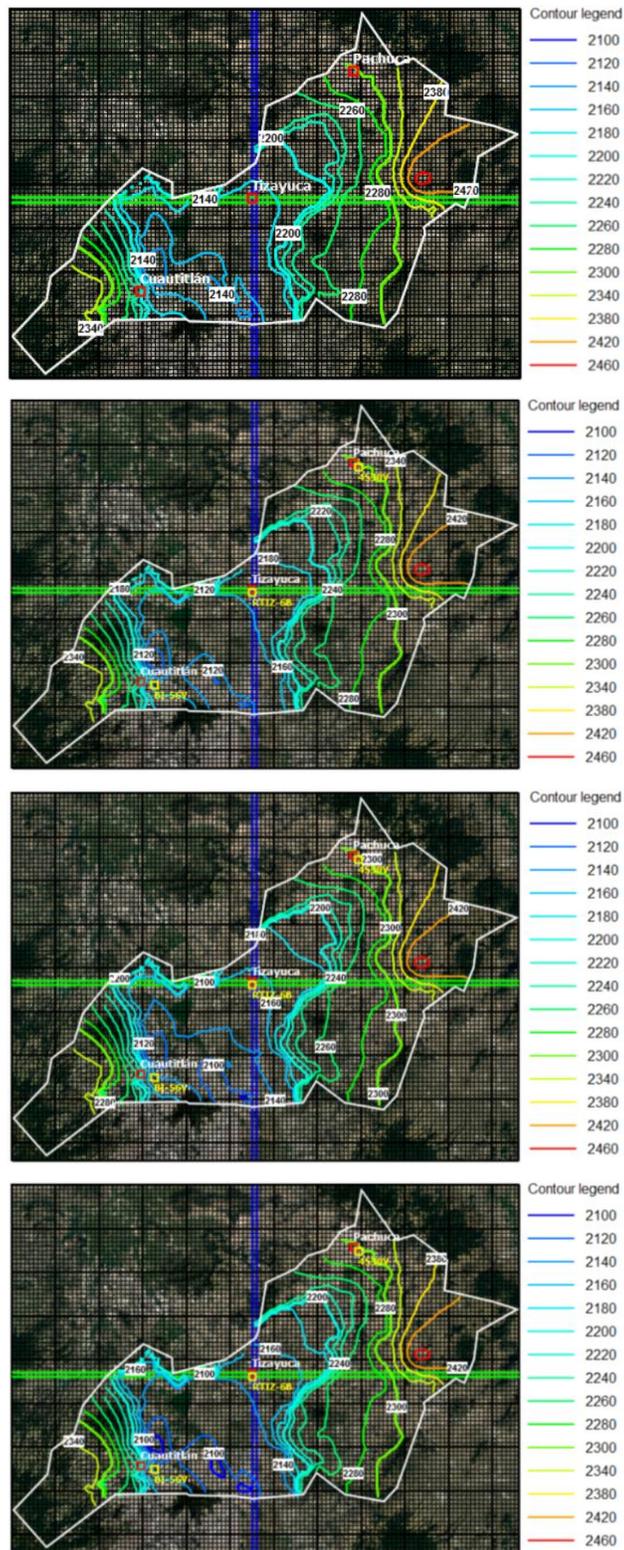


Figura 3.22 Carga hidráulica simulada con caudal de extracción constante en el modelo Cuautitlán-Pachuca para los años 2020 (renglón 1), 2030 (renglón 2), 2040 (renglón 3) y 2050 (renglón 4).

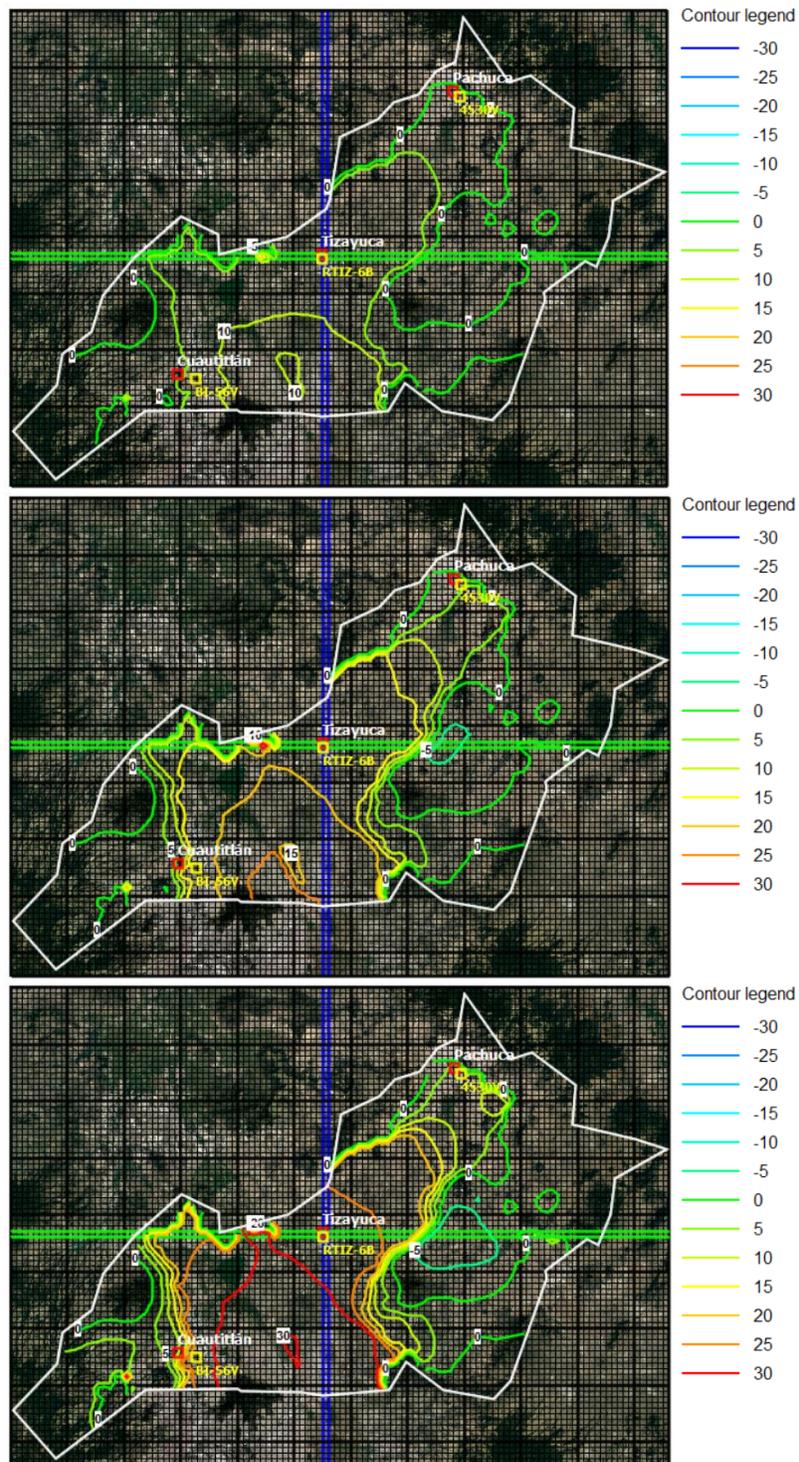


Figura 3.23 Abatimiento simulado con caudal de extracción constante en el modelo Cuautitlán-Pachuca para los años 2030 (renglón 1), 2040 (renglón 2) y 2050 (renglón 3).

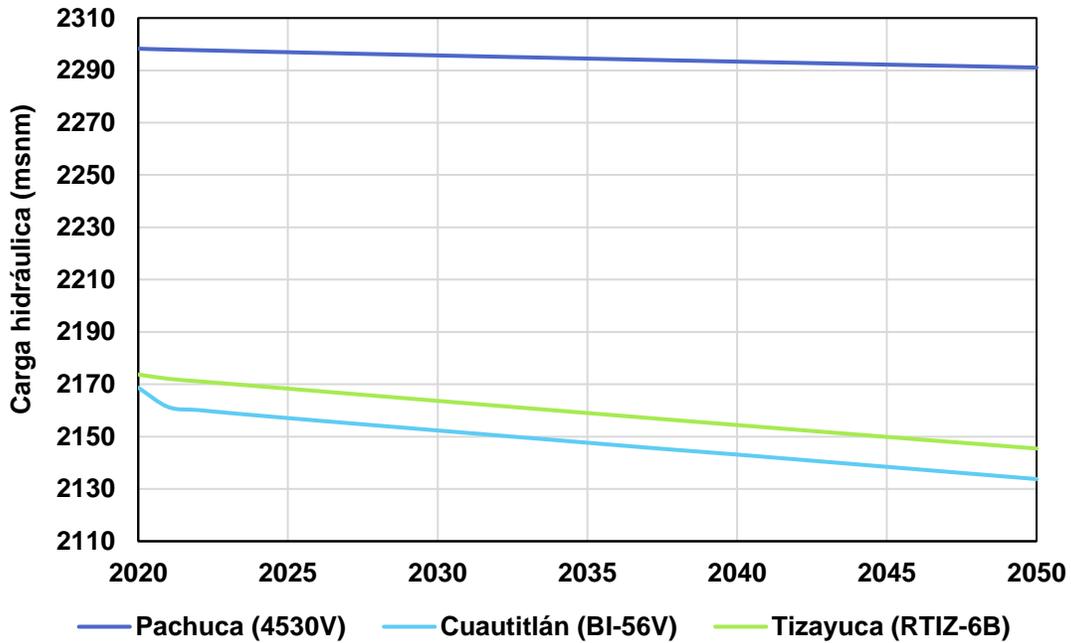


Figura 3.24 Gráfico que muestra la evolución de carga hidráulica simulada con caudal de extracción constante en el modelo Cuautitlán-Pachuca en el periodo 2020-2050.

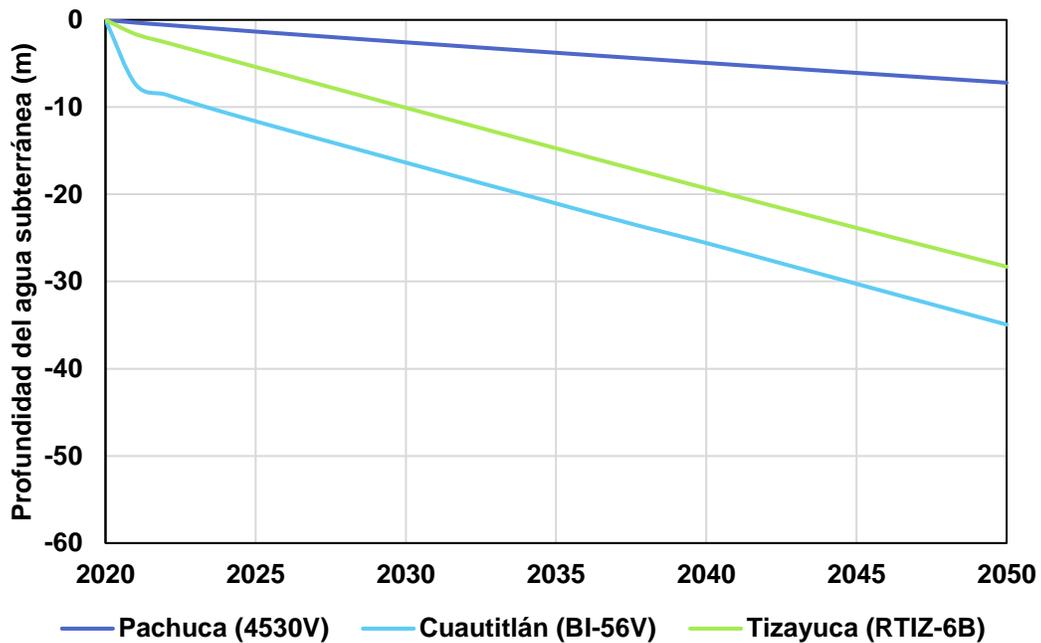


Figura 3.25 Gráfico que muestra la evolución del abatimiento simulado con caudal de extracción constante en el modelo Cuautitlán-Pachuca para el periodo 2020-2050.

3.4.2 Modelo ZMCM-Chalco-Texcoco

Al simular una tasa de extracción constante en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco en el periodo 2020-2070, se observa una clara evolución de los valores de carga hidráulica en todo el dominio del modelo. En general, en esta evolución de carga hidráulica se conservan la dirección de flujo, hacia el centro del valle, y la magnitud del gradiente hidráulico.

En la Figura 3.26 se proporcionan las configuraciones de carga hidráulica para los años 2020 (condiciones iniciales), 2030, 2040 y 2050. Se observa que con respecto a la configuración de 2020, algunas de las equipotenciales extienden su área, por ejemplo al noroeste de CDMX y al oeste de Texcoco, mientras que otras isolíneas disminuyen su área, por ejemplo alrededor del Zócalo de la CDMX. En Chalco se tiene una disminución de carga hidráulica, pero en general se conserva la configuración de las isolíneas en esta zona.

En la Figura 3.27 se muestran los abatimientos calculados a partir de 2020, para los años 2030, 2040 y 2050. Se observa que el abatimiento crece gradualmente hacia el centro del dominio, entre el Lago Nabor Carrillo y la zona urbana de Chalco, hasta alcanzar más de 20 m en 2050. Hacia el noroeste y sureste, los abatimientos se suavizan y toman valores de 5 m, en el año 2030, hasta 15 m en el año 2050.

En la Figura 3.28 se proporciona un resumen de los niveles de carga hidráulica a lo largo del periodo 2020-2050, donde se observa que hay un decremento lineal de carga hidráulica en las tres zonas analizadas, el Zócalo de la CDMX, Chalco y Texcoco. Se observa que en el Zócalo de CDMX hay mayor elevación de carga hidráulica en comparación con Chalco y Texcoco.

En la Figura 3.29 se resumen los abatimientos simulados por el modelo ZMCM-Chalco- Texcoco para el periodo 2020-2050. En el Zócalo de CDMX el abatimiento total es 9.5 m, que equivale a una tasa de abatimiento de 0.32 m/año; en Chalco el abatimiento total es 22.3 m, es decir, una tasa de abatimiento de 0.75 m/año; y en Texcoco el abatimiento total es 24.2 m que refleja una tasa de abatimiento de 0.81 m/año.

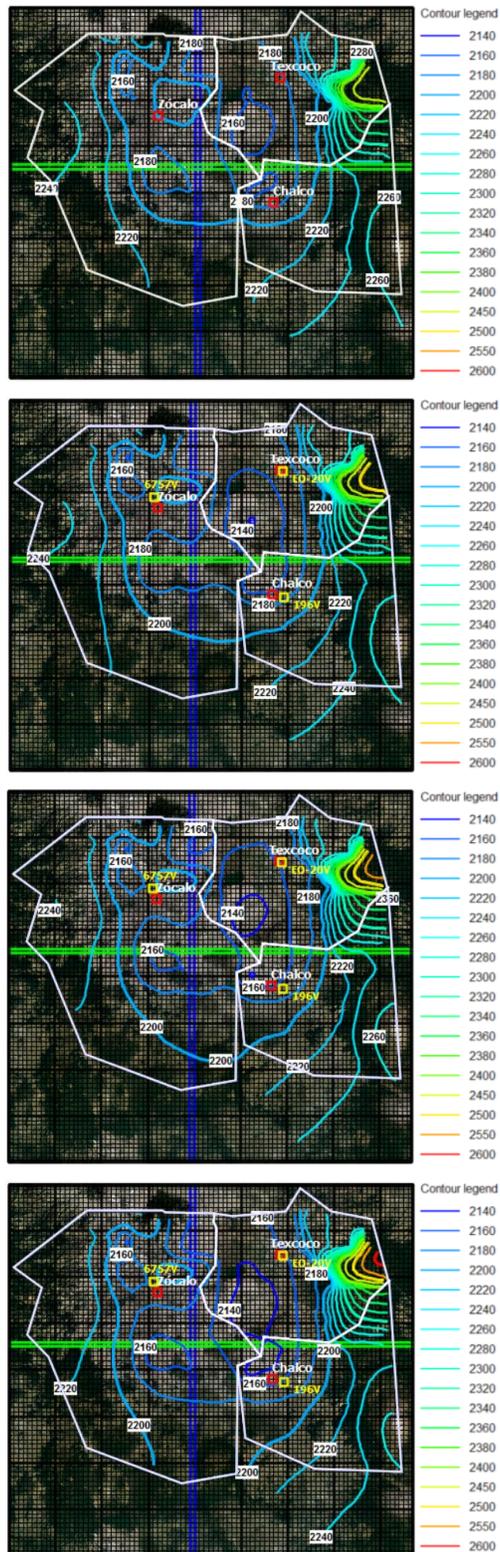


Figura 3.26 Carga hidráulica simulada con caudal de extracción constante en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco para los años 2020 (renglón 1), 2030 (renglón 2), 2040 (renglón 3) y 2050 (renglón 4).

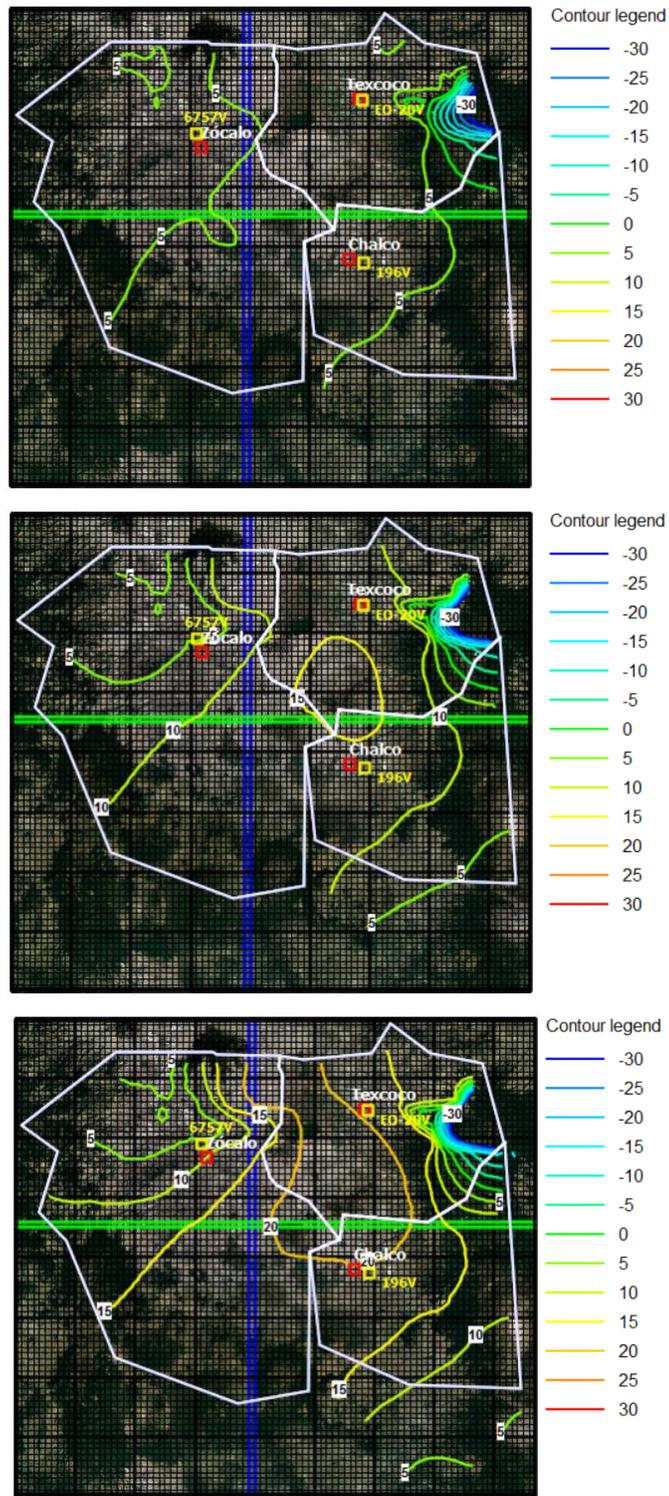


Figura 3.27 Abatimiento simulado con caudal de extracción constante en el modelo ZMCM-Chalco-
Texcoco para los años 2030 (renglón 1), 2040 (renglón 2) y 2050 (renglón 3).

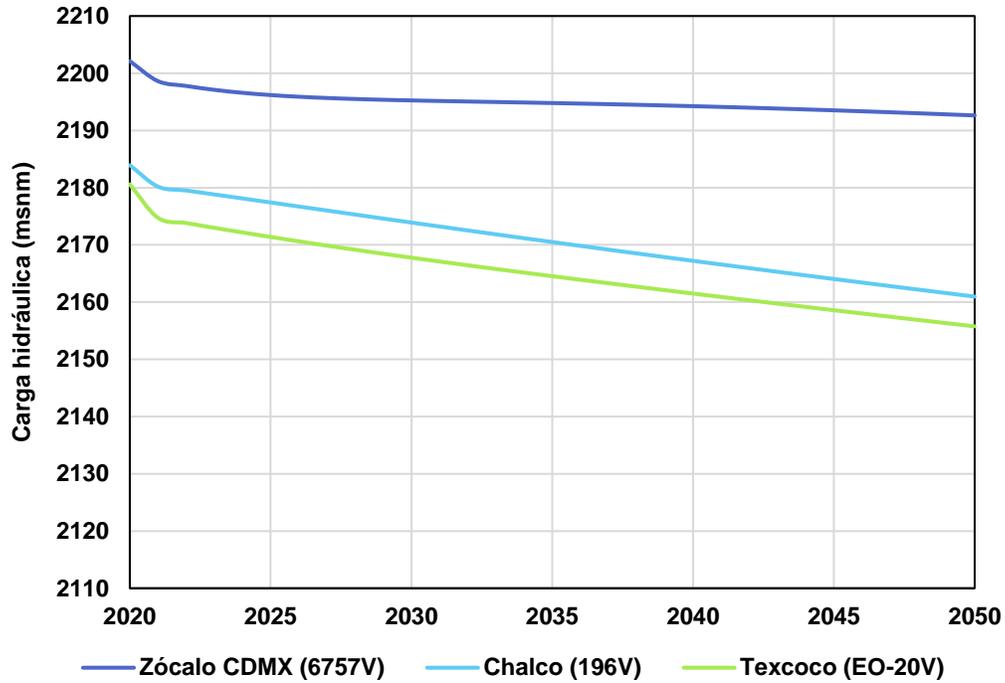


Figura 3.28 Gráfico que muestra la evolución de carga hidráulica simulada con caudal de extracción constante en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco para el periodo 2020-2050.

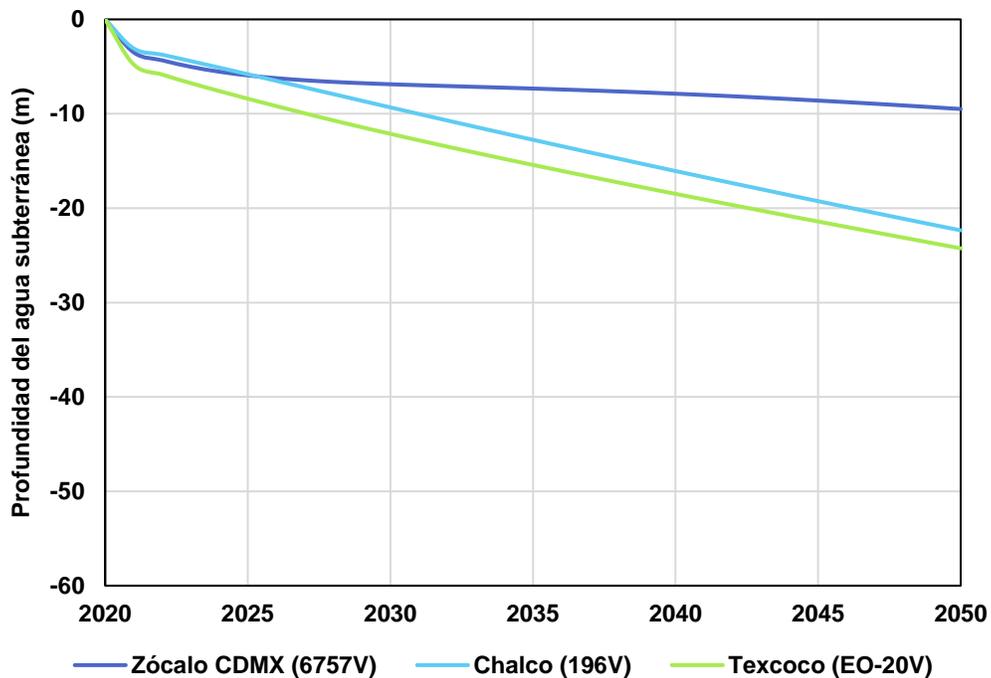


Figura 3.29 Gráfico que muestra la evolución del abatimiento simulado con caudal de extracción constante en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco para el periodo 2020-2050.

3.4.3 Cambio climático Modelo Cuautitlán-Pachuca

El cambio climático es un fenómeno mundial de vital importancia y consecuencias irreversibles. En Escolero *et al.* (2009) se determinó que la disponibilidad natural de agua en la ZMCM, considerando diversos escenarios climáticos, tiende a disminuir en un rango del 13% al 17%. Por tanto, es importante considerar el efecto que tendrá esta disminución de disponibilidad natural de agua en los modelos de simulación de agua subterránea en la cuenca de México.

Para simular el efecto del cambio climático, se utilizó una reducción del 15% (valor promedio en la cuenca) de la tasa de recarga proveniente de infiltración por precipitación, reportada en la literatura reciente de cada acuífero (p. e. CONAGUA, 2018a; 2018b; 2018c; 2018d). Es preciso aclarar que el efecto del cambio climático en realidad causaría una disminución gradual en la tasa de infiltración vertical en las zonas de recarga, sin embargo, se desconoce el tiempo que se requiere para vislumbrar dichos efectos. En este escenario, la simulación considera que los efectos de reducción en la tasa de recarga son inmediatos.

En los gráficos del nivel de los pozos utilizados como referencia, se indica en línea discontinua el nivel simulado en el escenario base o Laisser Faire (LF) y en líneas continuas se muestra la simulación del escenario actual.

En la simulación del modelo Cuautitlán-Pachuca con el efecto de cambio climático en el periodo 2020-2070, se redujo la tasa de recarga en un 15%, es decir que de 202.9 hm³/año se redujo a 172.46 hm³/año, y se mantuvo constante durante toda la simulación como se observa en la Figura 3.30 En el balance de masa del modelo Cuautitlán-Pachuca, se muestra que al reducir la tasa de recarga también se reduce gradualmente el volumen de agua total de entradas y salidas (Figura 3.31).

En la Figura 3.32 se muestran los resultados de carga hidráulica simulados con el efecto de cambio climático para el acuífero Cuautitlán-Pachuca para los años 2020 (condiciones iniciales), 2030, 2040 y 2050. Al comparar la configuración inicial de carga hidráulica con las subsecuentes, se encuentra que las isolíneas disminuyen su magnitud alrededor de Tizayuca, mientras que en Cuautitlán y Pachuca, su evolución no es tan notable.

En la Figura 3.33 se proporciona el abatimiento simulado a partir de 2020, para los años 2030, 2040 y 2050. Se observa que el patrón de abatimientos sigue la misma dirección SW-

S desde Pachuca a Cuautitlán, que el patrón observado en el escenario Laisser Faire, y muestra que los mayores abatimientos se extienden de Tizayuca a Cuautitlán. A diferencia del abatimiento simulado en Laisser Faire, a finales del año 2050 hay un ligero aumento de la magnitud.

En la Figura 3.34 se muestra el resumen del comportamiento de carga hidráulica a lo largo de la simulación del modelo Cuautitlán-Pachuca con el efecto de cambio climático. En la Figura 3.34 se demuestra que, en efecto la carga hidráulica en Pachuca y Tizayuca muestra menos impacto al cambio climático en comparación con la carga hidráulica en Cuautitlán, que decrece aceleradamente.

En la Figura 3.35 se proporciona el abatimiento total para el periodo 2020-2050, donde se observa que en Pachuca el abatimiento total es 8.36 m, es decir que la tasa de abatimiento es 0.28 m/año; en Cuautitlán, el abatimiento total es 38.41 m, que equivale a una tasa de abatimiento de 1.28 m/año; y en Tizayuca, el abatimiento total es 30.24 m, que representa a una tasa de abatimiento de 1.01 m/año. Con respecto al abatimiento simulado en el escenario Laisser Faire, hay un aumento del 16.08% en Pachuca, aumento del 9.91% en Cuautitlán y aumento del 6.85% en Tizayuca.

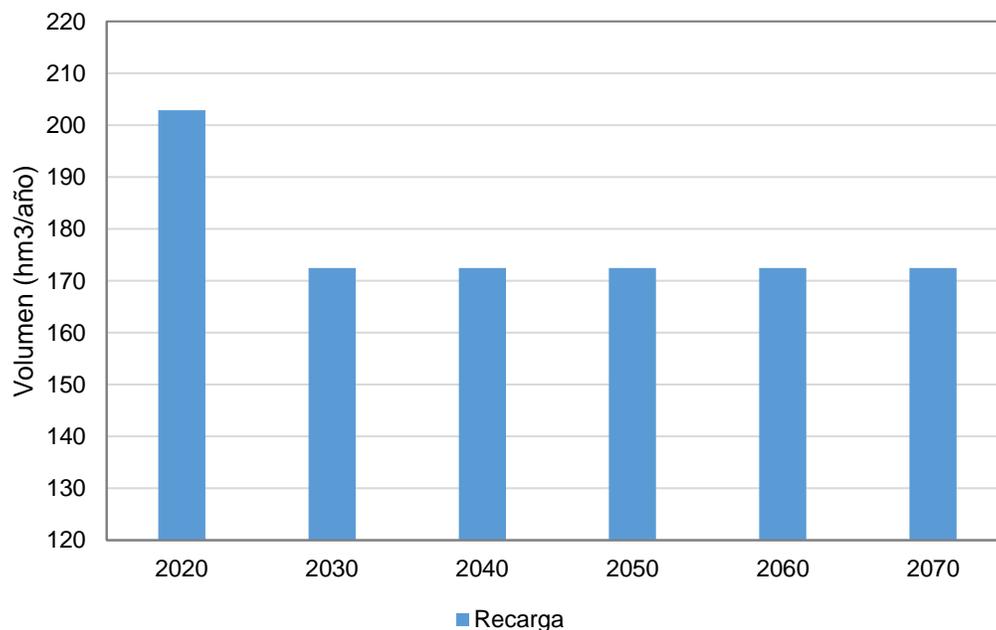


Figura 3.30 Volumen de recarga anual simulado en el modelo Cuautitlán-Pachuca con efecto de cambio climático en el periodo 2020-2070.

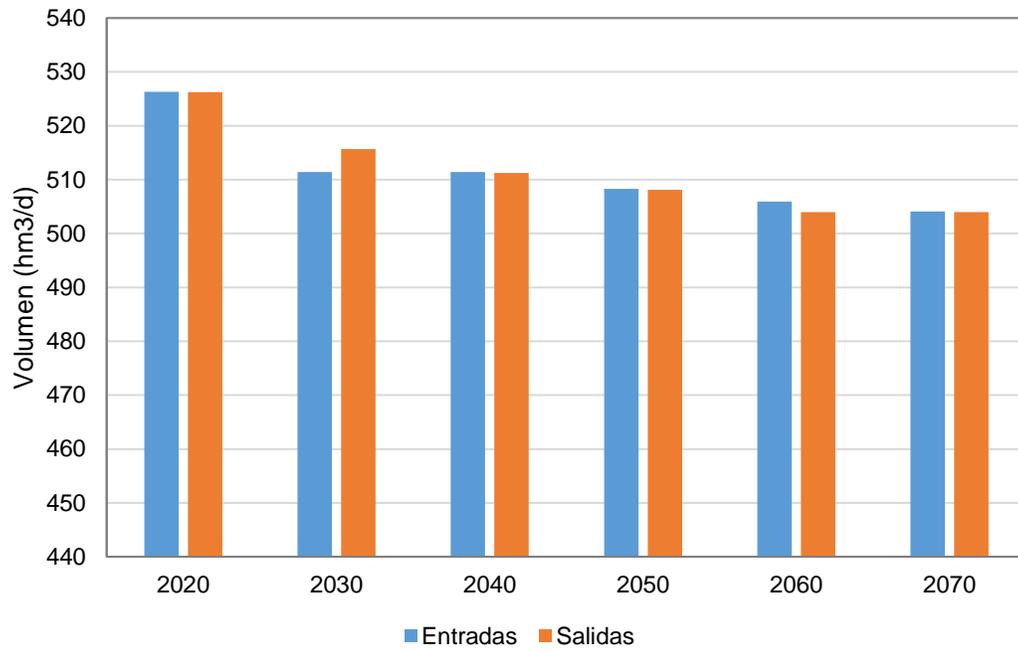


Figura 6.10 Balance de masa en el modelo Cuautitlán-Pachuca con efecto de cambio climático en el periodo 2020-2070.

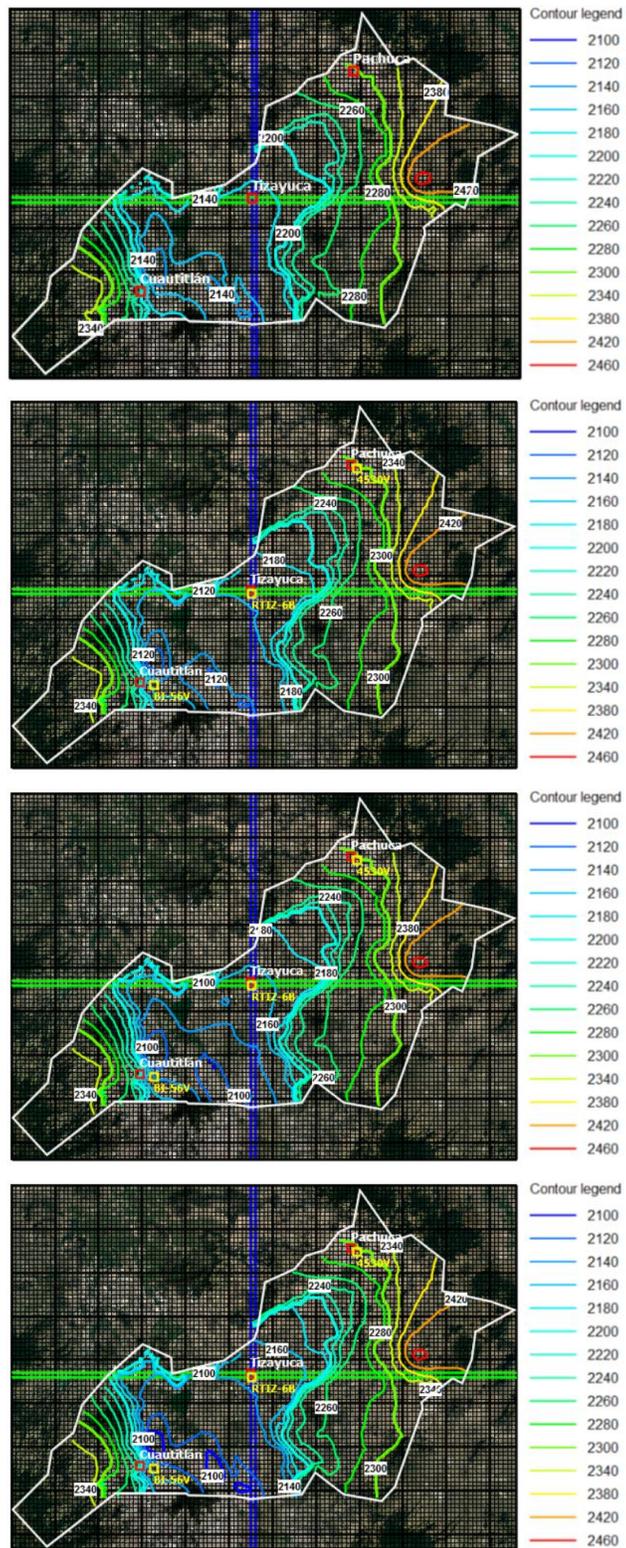


Figura 3.32 Carga hidráulica simulada con efecto de cambio climático en el modelo Cuautitlán-Pachuca para los años 2020 (renglón 1), 2030 (renglón 2), 2040 (renglón 3) y 2050 (renglón 4).

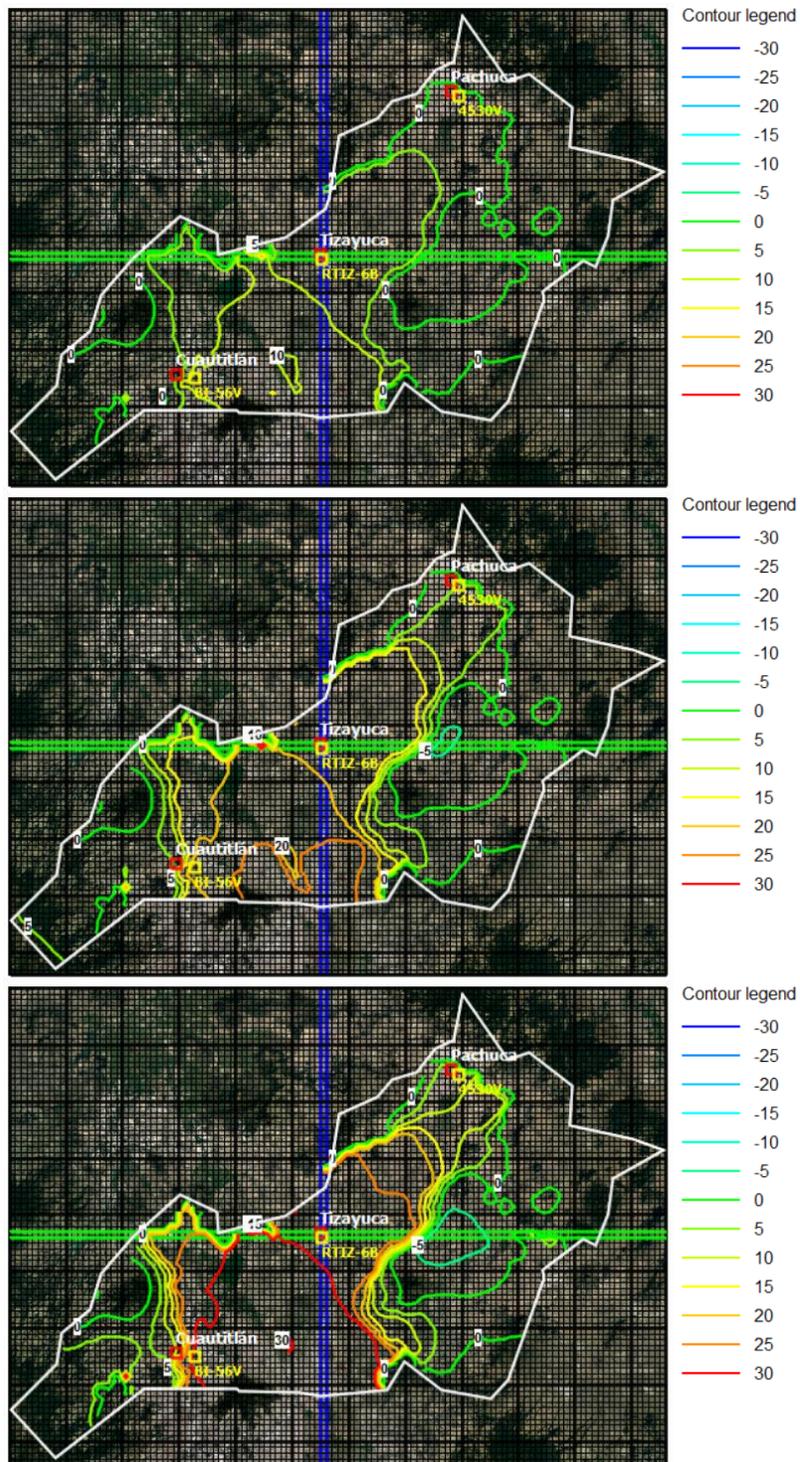


Figura 3.33 Abatimiento simulado con efecto de cambio climático en el modelo Cuautitlán-Pachuca para los años 2030 (renglón 1), 2040 (renglón 2) y 2050 (renglón 3).

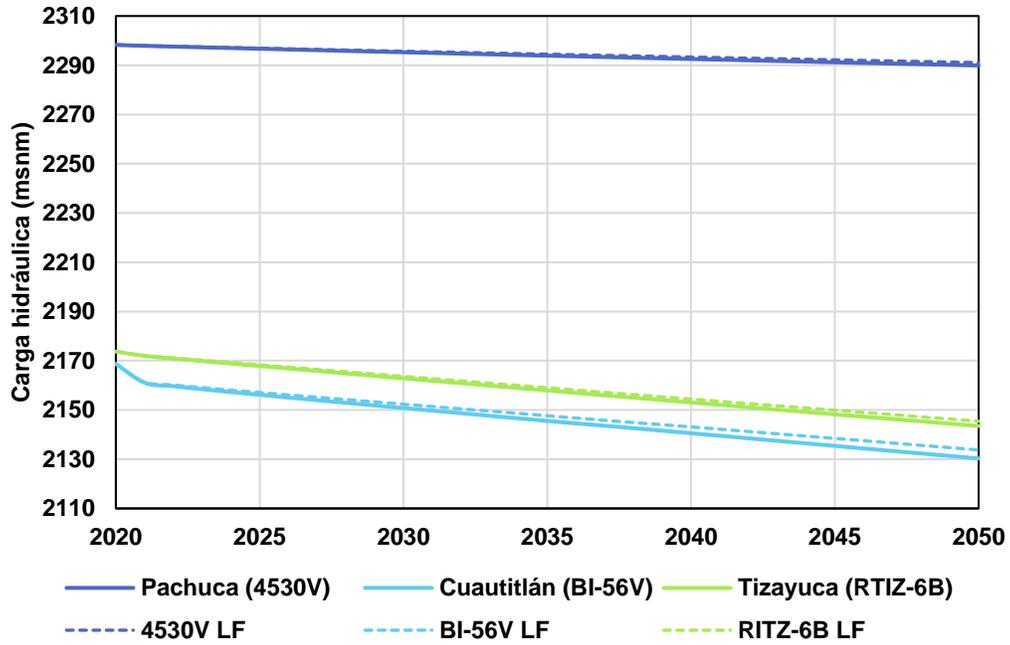


Figura 3.34 Gráfico que muestra la evolución de carga hidráulica simulada con efecto de cambio climático en el modelo Cuautitlán-Pachuca en el periodo 2020-2050.

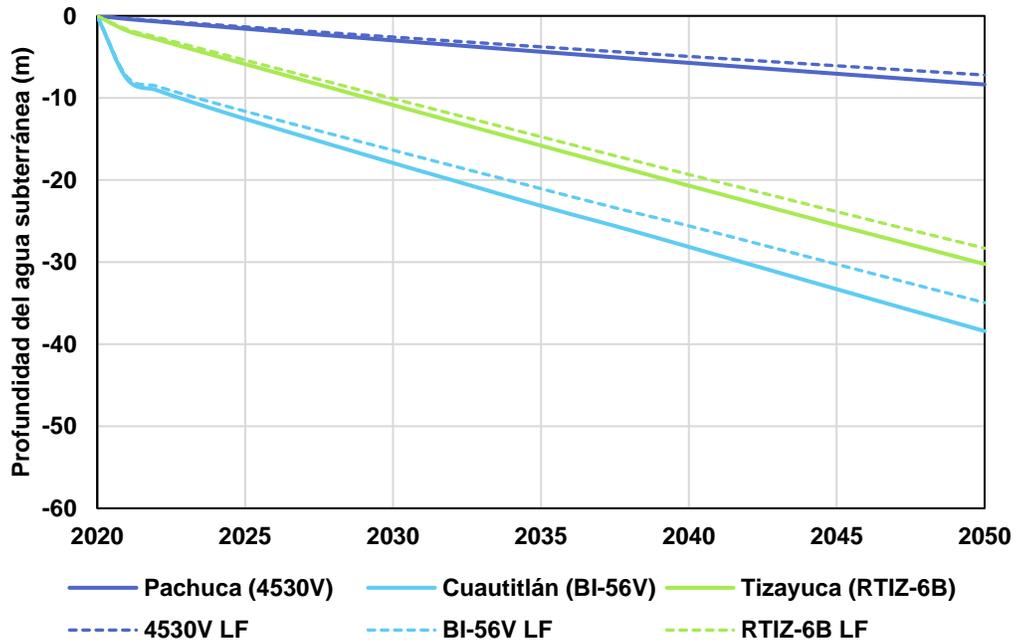


Figura 3.35. Gráfico que muestra la evolución del abatimiento simulado con efecto de cambio climático en el modelo Cuautitlán-Pachuca para el periodo 2020-2050.

3.4.4 Cambio climático Modelo ZMCM-Chalco-Texcoco

Para simular el efecto de cambio climático en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco, la tasa de recarga se redujo en 15% y se mantuvo constante en el periodo 2020-2070. En la ZMCM originalmente se tenía un volumen de recarga vertical de 45 hm³/año que por efecto de cambio climático se redujo a 38.25 hm³/año, lo que equivale a reducir la recarga total de 512 hm³/año hasta 506.5 hm³/año. En Texcoco, el volumen original de recarga vertical es 101.1 hm³/año y se redujo hasta 85.935 hm³/año, que equivale a reducir la recarga total de 158.94 hm³/año hasta 143.775 hm³/año. En Chalco no se tiene estimación de recarga vertical. En la Figura 3.36 se muestra el volumen de recarga aplicado al modelo durante la simulación. En la Figura 3.37 se proporciona el balance de masa en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco donde se muestra que ante la reducción de la tasa de recarga en ZMCM y Texcoco, se presenta un ligero aumento gradual del volumen total de agua utilizado.

En la Figura 3.38 se presenta la configuración de carga hidráulica simulada con efecto de cambio climático en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco para los años 2020 (condiciones iniciales), 2030, 2040 y 2050. Con respecto a la carga inicial se observa una reducción de los valores de carga hidráulica en toda el área del modelo, en especial en Texcoco y Chalco.

En la Figura 6.39 se muestra la distribución de abatimientos, calculados a partir de 2020, para los años 2030, 2040 y 2050. Se observa que los mayores abatimientos se localizan en Texcoco y al noroeste de Chalco, mientras que los menores abatimientos se localizan al noroeste y este del dominio. A finales de 2050, el abatimiento en Texcoco tiene mayor magnitud que el reportado en el escenario Laisser Faire.

En la Figura 6.40 se presenta la evolución de carga hidráulica a lo largo de la simulación en el periodo 2020-2050, se observa que en los tres puntos de análisis la carga disminuye rápidamente, pero con mayor énfasis en Texcoco. En la Figura 3.41 se presenta la evolución del abatimiento en los tres pozos de observación. Al analizar los cambios de carga hidráulica simulados hasta 2050, se obtiene que el abatimiento total en el Zócalo de CDMX será 10.08 m, es decir, que tendrá una tasa de abatimiento de 0.34 m/año; en Chalco el abatimiento total será 24.36 m y su tasa de abatimiento anual será 0.81 m/año; y en Texcoco, el abatimiento total será 38.96 m, que representa una tasa de abatimiento de 1.30 m/año. Con respecto al escenario base, en el Zócalo de CDMX el abatimiento anual

aumenta 6.19%, en Chalco, la tasa anual de abatimiento aumenta 8.99%; y en Texcoco el abatimiento anual aumenta 60.62%.

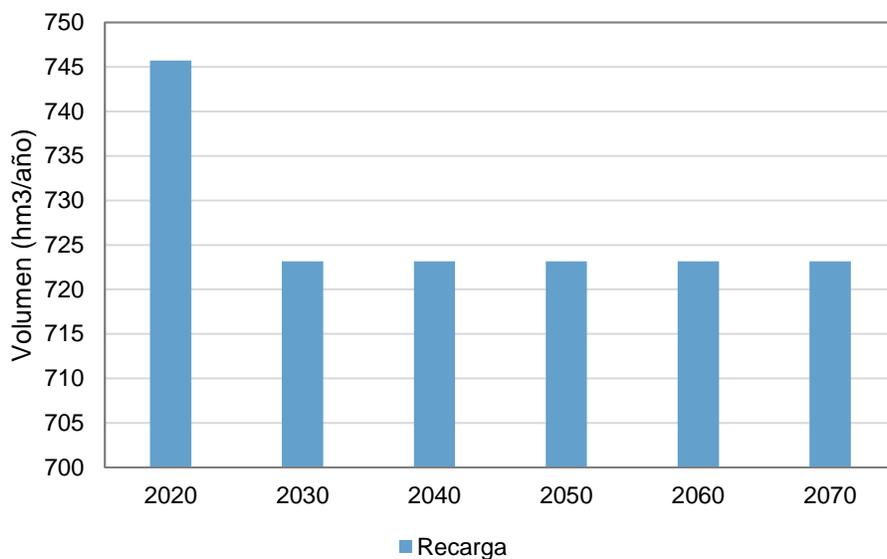


Figura 3.36. Volumen de recarga anual simulado en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco con efecto de cambio climático en el periodo 2020-2070.

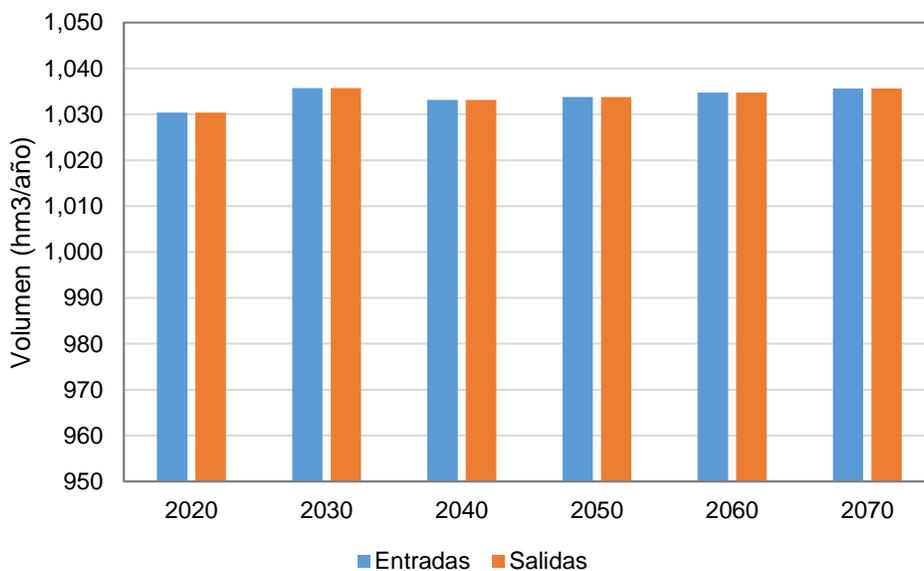


Figura 3.37. Balance de masa en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco con efecto de cambio climático en el periodo 2020-2070.

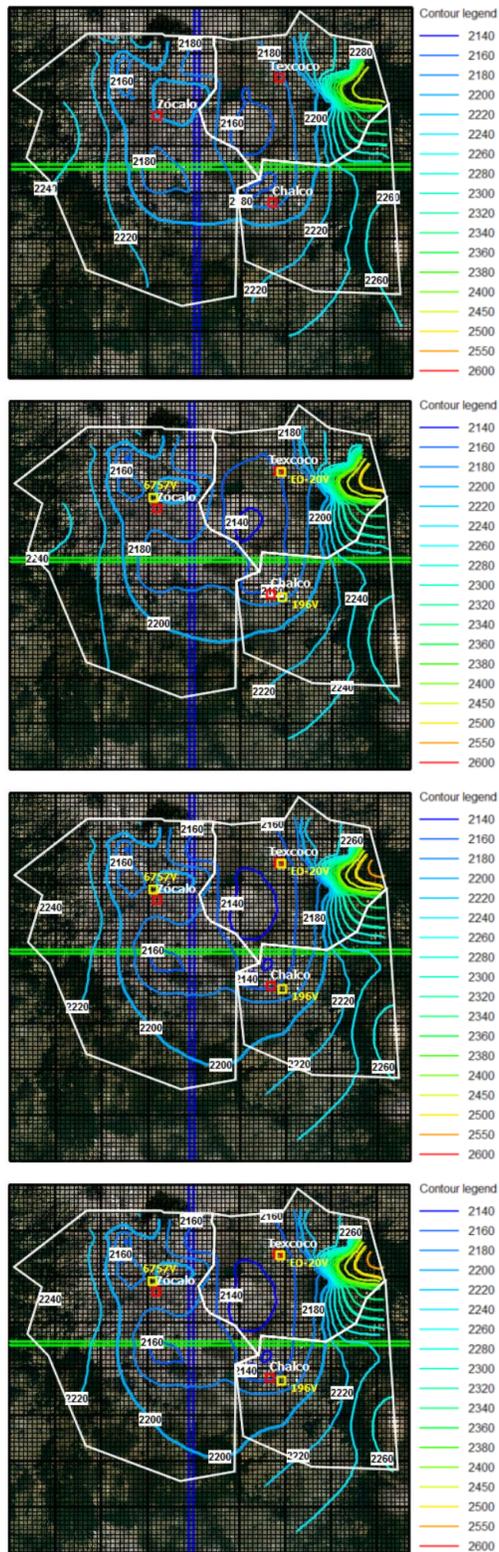


Figura 3.38. Carga hidráulica simulada con efecto de cambio climático en el modelo ZMCM-Chalco-
Texcoco para los años 2020 (renglón 1), 2030 (renglón 2), 2040 (renglón 3) y 2050 (renglón 4).



Figura 3.39. Abatimiento simulado con efecto de cambio climático en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco para los años 2030 (renglón 1), 2040 (renglón 2) y 2050 (renglón 3).

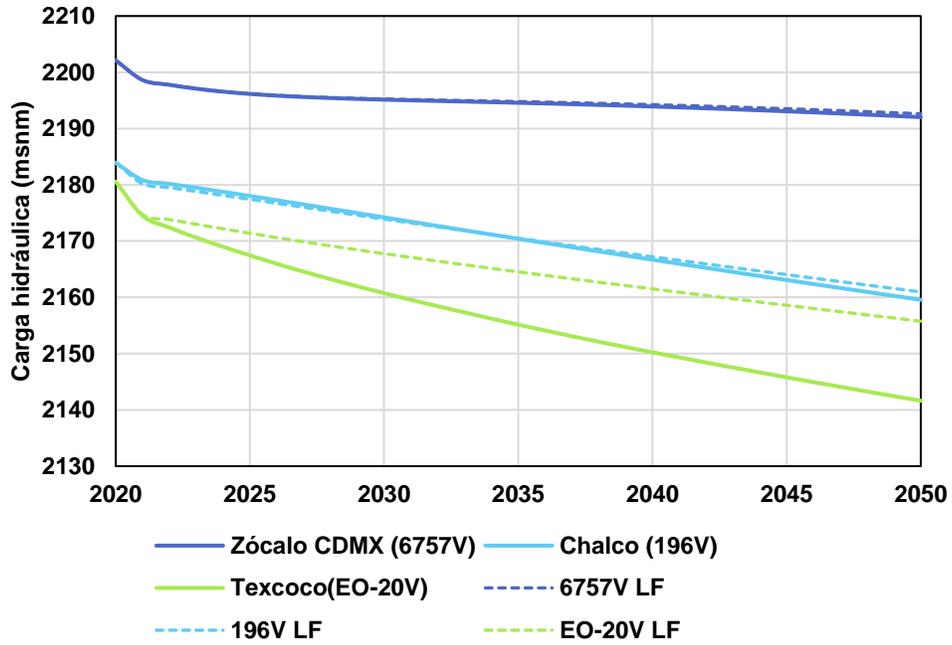


Figura 3.40. Gráfico que muestra la evolución de carga hidráulica simulada con efecto de cambio climático en el modelo ZMCM-Chalco-Textcoco en el periodo 2020-2050.

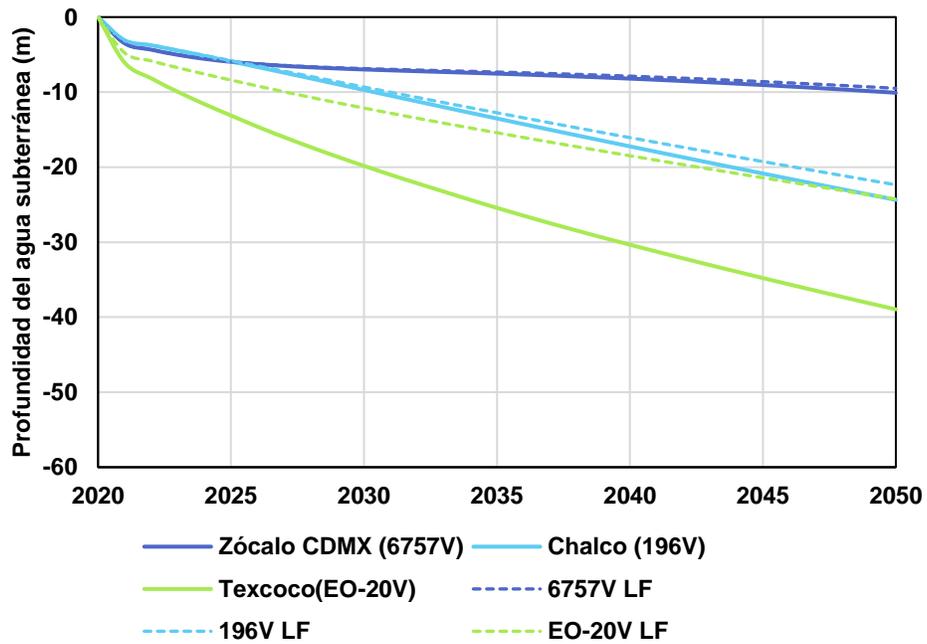


Figura 3.41 Gráfico que muestra la evolución del abatimiento simulado con efecto de cambio climático en el modelo ZMCM-Chalco-Textcoco para el periodo 2020-2050.

3.5 Otros escenarios

En esta sección se plantean otros aspectos que deben considerarse al plantear la gestión de agua subterránea en la cuenca de México. El primer aspecto es el aumento demográfico ya que en algunas partes de la cuenca de México, como en Pachuca se pronostica un aumento constante, por lo cual se espera que la demanda de agua de uso público-urbano crezca proporcionalmente. El segundo aspecto considera iniciativas que pueden servir para reducir el impacto del abatimiento, tales como la recarga inducida.

Para simular el aumento de demanda, se tomó en cuenta la tasa de crecimiento demográfico por acuífero y se incrementó la tasa de extracción en forma proporcional. De esta forma se espera que la extracción total para el año 2050 permanezca constante en ZMCM (con 623.80 hm³/año), en Chalco se aumente hasta 12% (143.94 hm³/año), en Texcoco se aumente hasta 9% (200.04 hm³/año) y en Cuautitlán-Pachuca se aumente en 6.76% (515.99 hm³/año).

3.5.1 Escenario de demanda Modelo Cuautitlán-Pachuca

En la Figura 3.42 se muestra el aumento simulado en la demanda del uso público-urbano en el modelo Cuautitlán-Pachuca, se observa que se logró obtener el volumen calculado para 2050. En la Figura 3.43, se muestra que en el balance de masa del modelo los volúmenes de entradas y salidas aumentan gradualmente.

En cuanto a la carga hidráulica simulada, en la Figura 3.44 se proporcionan las configuraciones para los años 2020 (condiciones iniciales), 2030, 2040 y 2050. Se observa que con respecto a los valores iniciales de carga hidráulica, éstos disminuyen notablemente en Tizayuca y Cuautitlán, y en Pachuca parecen estables. En la Figura 3.45 se muestra el abatimiento calculado a partir de 2020, para los años 2030, 2040 y 2050. Se observa que los abatimientos crecen en dirección SW-S por lo que entre Cuautitlán y Tizayuca, en 2050 se tienen los mayores abatimientos.

En la Figura 3.46 se resume el comportamiento de carga hidráulica para algunos pozos de monitoreo en las ciudades anteriormente mencionadas en el periodo 2020-2050. Se observa que en efecto, la carga hidráulica en Pachuca se muestra poco susceptible al aumento de demanda, mientras que en Tizayuca y Cuautitlán los niveles decrecen ligeramente. En la Figura 3.47 se muestra el abatimiento simulado en el periodo 2020-2050,

donde se aprecia que en Pachuca el abatimiento total es 7.28 m, que corresponde a una tasa de 0.24 m/año; en Cuautitlán, el abatimiento total es 37.53 m y la tasa de abatimiento anual es 1.28 m/año; finalmente, en Tizayuca el abatimiento total es 30.85 m, lo cual indica una tasa de abatimiento es 1.03 m/año. Con respecto al escenario Laisser Faire, el abatimiento anual en Pachuca aumenta en 1.01%, en Cuautitlán aumenta en 7.41% y en Tizayuca aumenta en 9%.

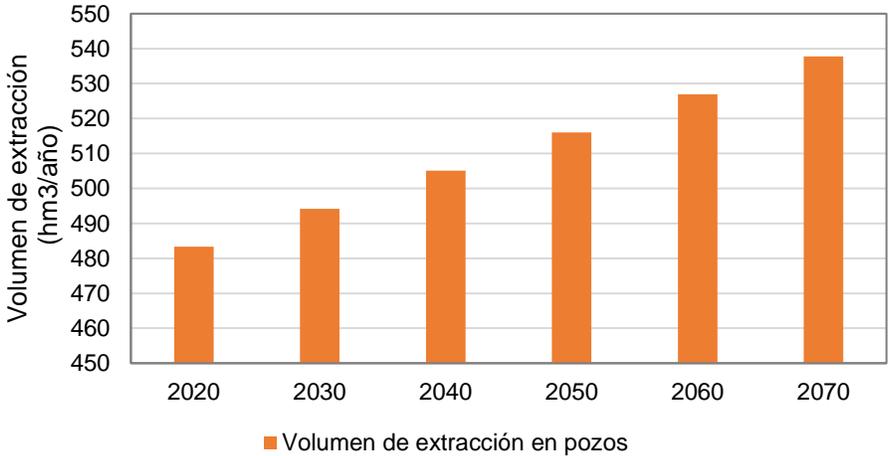


Figura 3.42. Volumen de extracción anual simulado en el modelo Cuautitlán-Pachuca como efecto de aumento demográfico en el periodo 2020-2070.

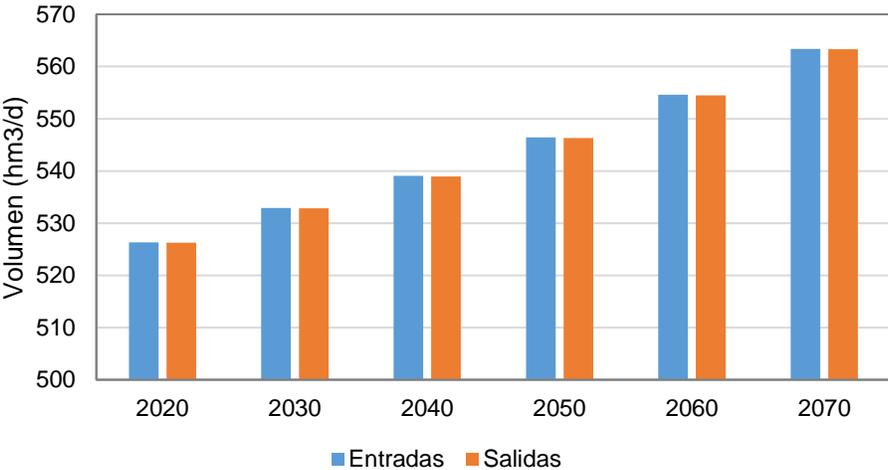


Figura 3.43. Balance de masa en el modelo Cuautitlán-Pachuca como efecto de aumento demográfico en el periodo 2020-2070.

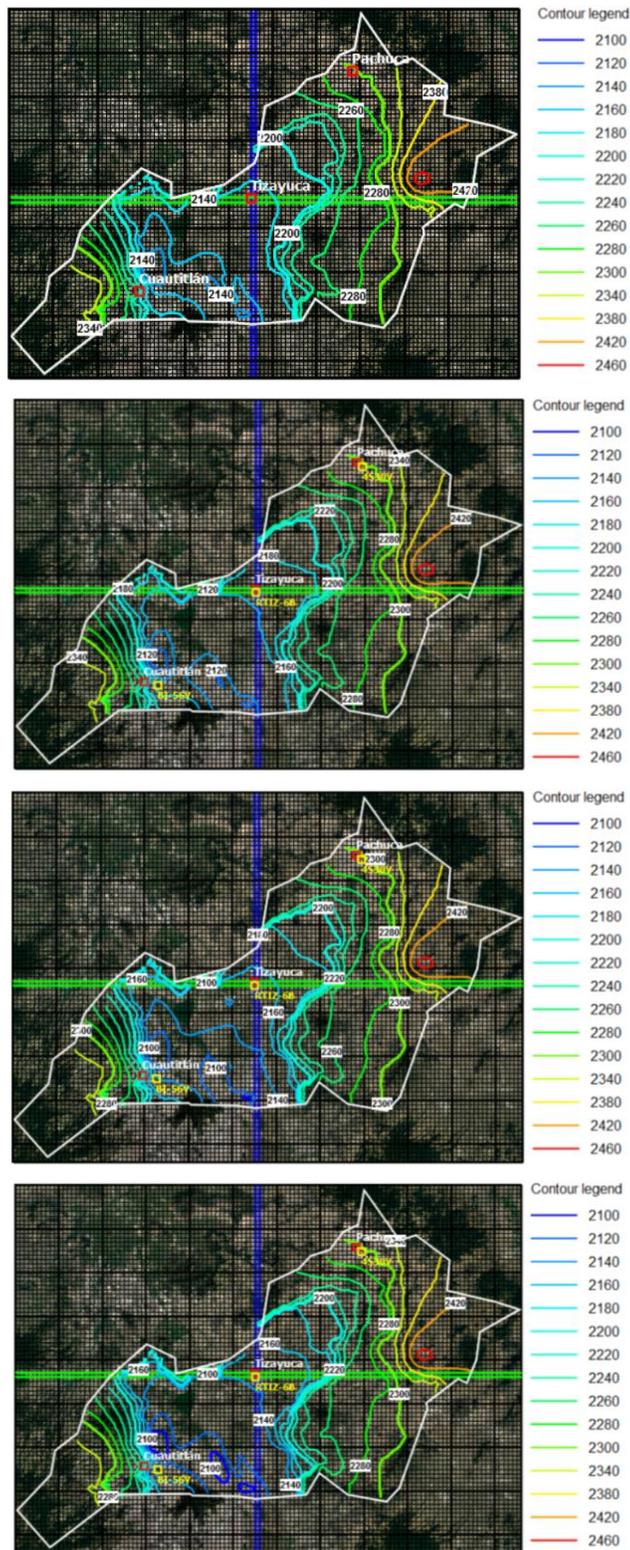


Figura 3.44. Carga hidráulica simulada con efecto de aumento demográfico en el modelo Cautitlán-Pachuca para los años 2020 (renglón 1), 2030 (renglón 2), 2040 (renglón 3) y 2050 (renglón 4).

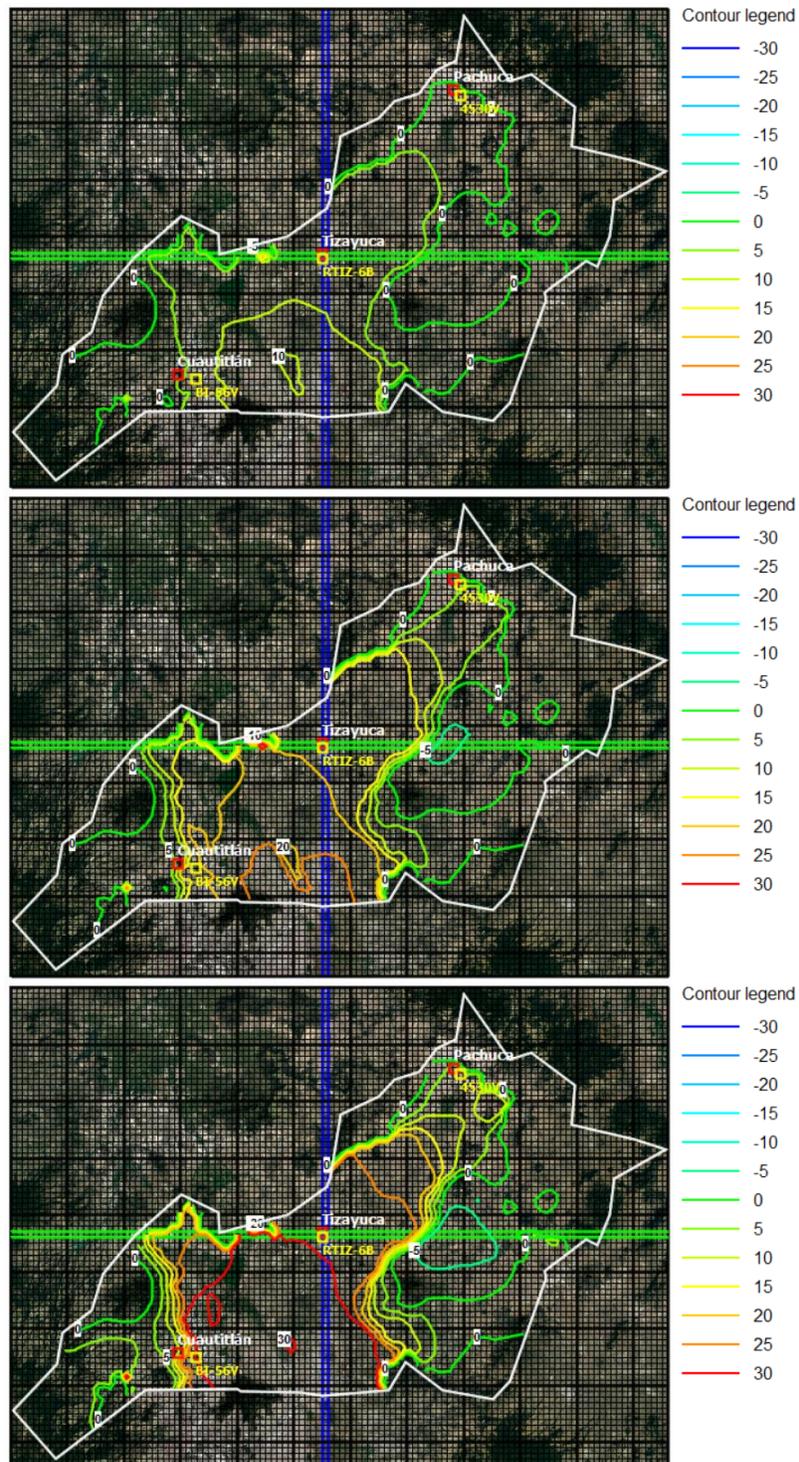


Figura 3.45 Abatimiento simulado con efecto de aumento demográfico en el modelo Cuautitlán-Pachuca para los años 2030 (renglón 1), 2040 (renglón 2) y 2050 (renglón 3).

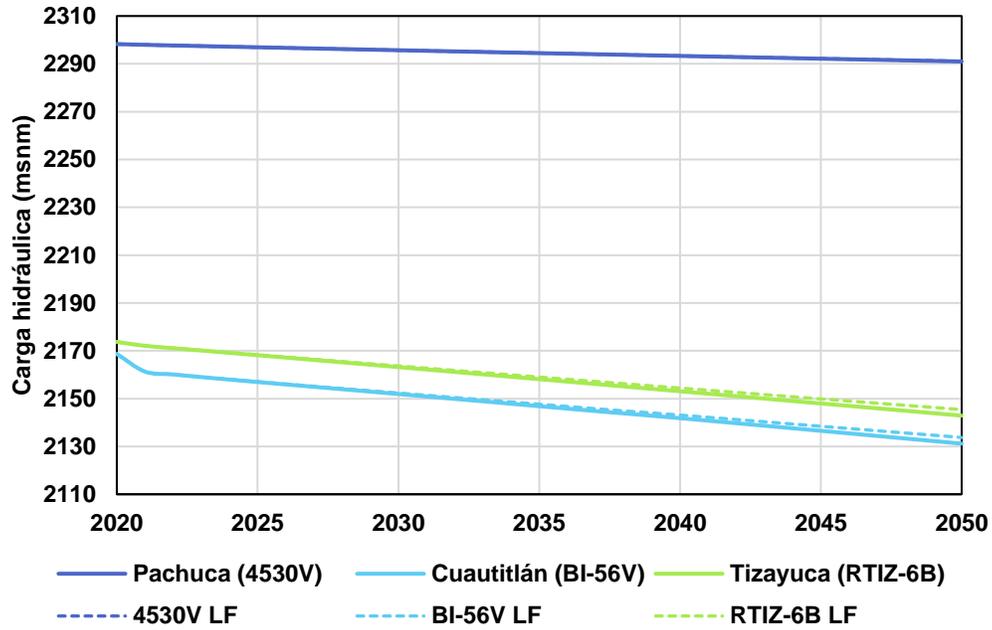


Figura 3.46. Gráfico que muestra la evolución de carga hidráulica simulada con efecto de aumento demográfico en el modelo Cuautitlán-Pachuca en el periodo 2020-2050.

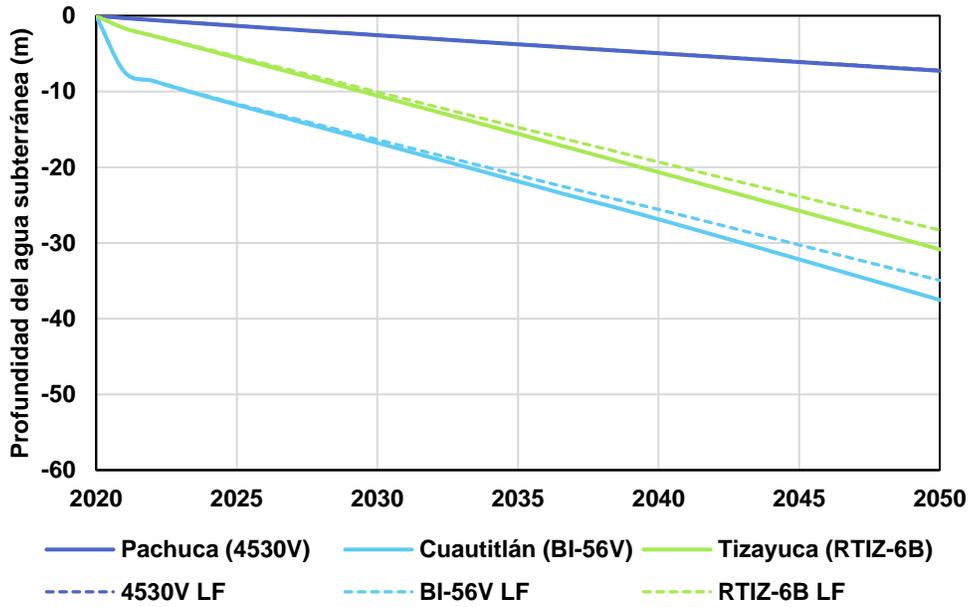


Figura 3.47 Gráfico que muestra la evolución del abatimiento simulado con efecto de crecimiento demográfico en el modelo Cuautitlán-Pachuca para el periodo 2020-2050.

3.5.2 Escenario de demanda Modelo ZMCM-Chalco-Texcoco

En la Figura 3.48 se muestra el aumento simulado en el uso público-urbano en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco, donde se observa que el volumen de extracción total en ZMCM es prácticamente estable, mientras que aumenta considerablemente en Texcoco y en menor medida en Chalco. En la Figura 6.49 se proporciona el balance de masa simulado a lo largo del periodo 2020-2070, donde se muestra que el volumen total de entradas y salidas tiene un aumento gradual.

En la Figura 3.50 se muestra la configuración de carga hidráulica simulada con efecto de aumento de demanda en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco para los años 2020 (condiciones iniciales), 2030, 2040 y 2050. Se observa que hay un decremento gradual de los valores de carga hidráulica en todo el dominio, pero que la zona con menos impacto se muestra alrededor del Zócalo de CDMX, mientras que los mayores efectos ocurren en Texcoco. En la Figura 3.51 se proporciona el abatimiento determinado a partir de 2020, para los años 2030, 2040 y 2050. Se observa que el abatimiento crece gradualmente en la zona de Texcoco y Chalco, donde el nivel estático disminuye hasta más de 30 m en el año 2050.

En el gráfico de la Figura 3.52 se muestra la evolución de carga hidráulica en el periodo 2020-2050, donde se corrobora que en los tres sitios observados hay un decremento constante de carga hidráulica, el cual es más impactante en el área de Texcoco. En el gráfico de la Figura 3.53 se resumen los abatimientos simulados en consecuencia del aumento en la demanda, se muestra que en el Zócalo de CDMX el abatimiento total simulado para el año 2050 es 9.57 m, que se traduce en una tasa de abatimiento anual de 0.32 m/año; en Chalco el abatimiento total es 24.36 m que corresponden con una tasa de abatimiento de 0.99 m/año; y en Texcoco se simuló un abatimiento total de 36.57 m, es decir una tasa de abatimiento anual de 1.22 m/año. Al comparar las tasas de abatimiento anual con las determinadas en el caso Laisser Faire, se encuentra que en el Zócalo de CDMX hay un aumento de hasta 0.8%, en Chalco hay un aumento de 32.71% y en Texcoco el aumento es 50.78%.

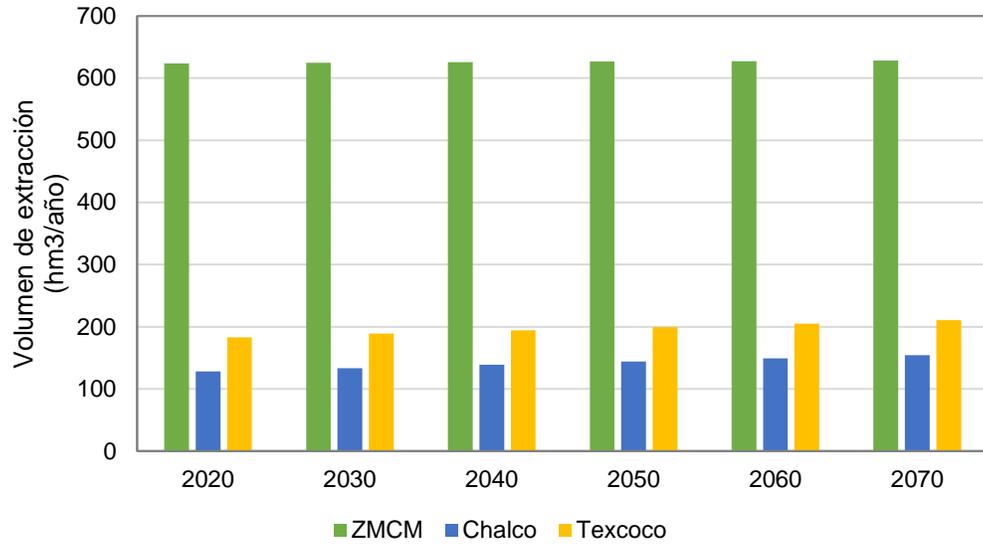


Figura 3.48. Volumen de extracción anual simulado en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco como efecto de aumento demográfico en el periodo 2020-2070.

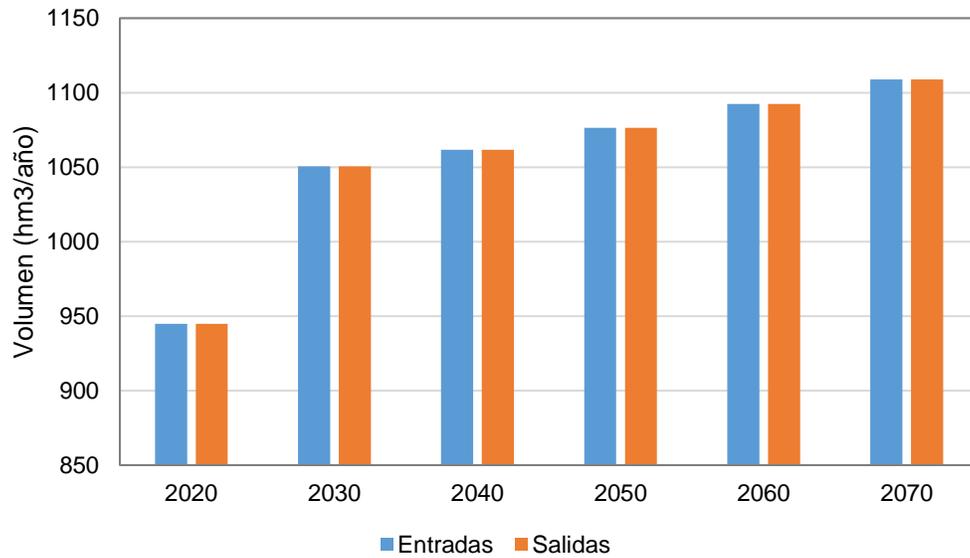


Figura 3.49. Balance de masa en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco como efecto de aumento demográfico en el periodo 2020-2070.

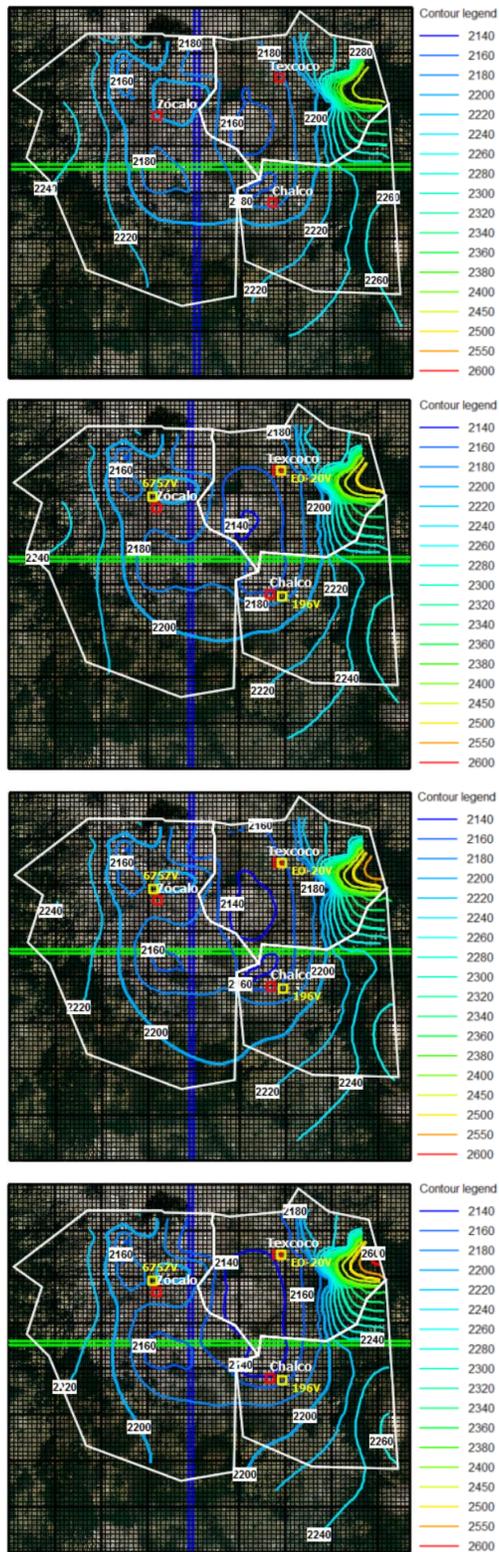


Figura 3.50. Carga hidráulica simulada con efecto de aumento demográfico en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco para los años 2020 (renglón 1), 2030 (renglón 2), 2040 (renglón 3) y 2050 (renglón 4).

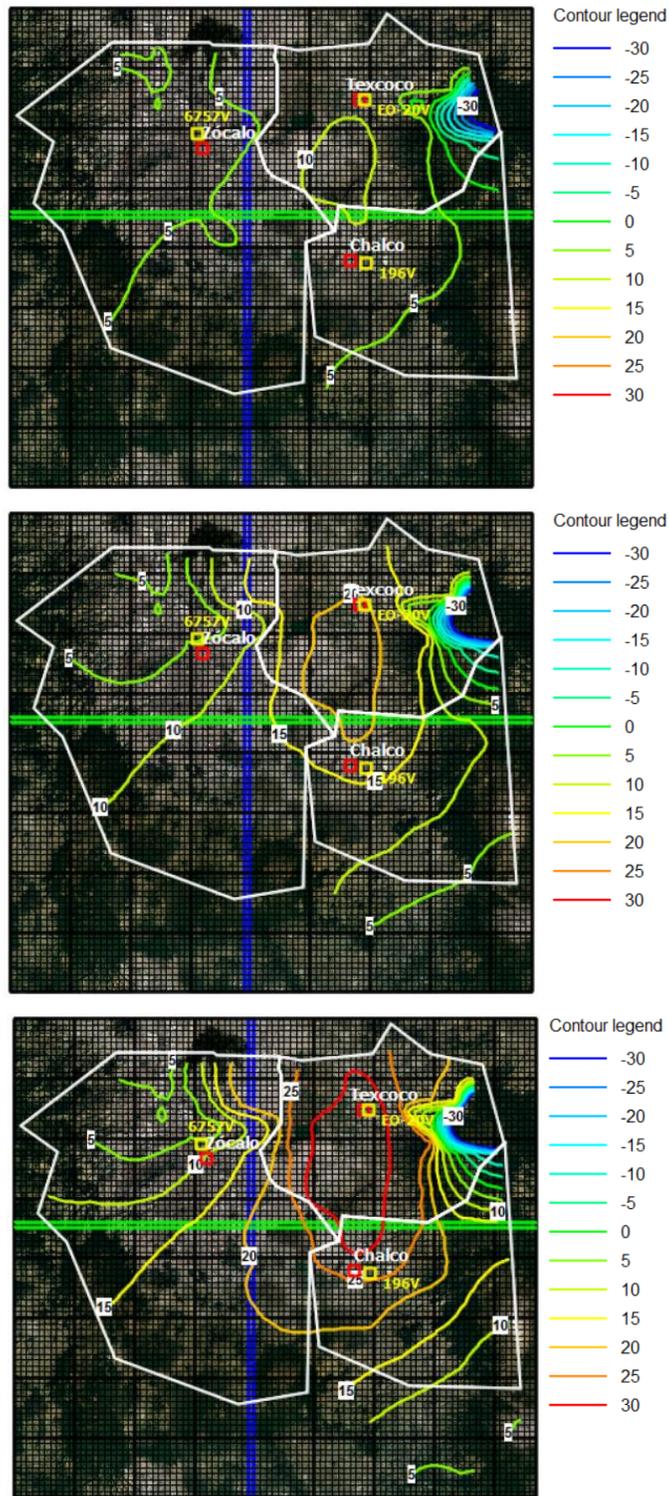


Figura 3.51. Abatimiento simulado con efecto de aumento demográfico en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco para los años 2030 (renglón 1), 2040 (renglón 2) y 2050 (renglón 3).

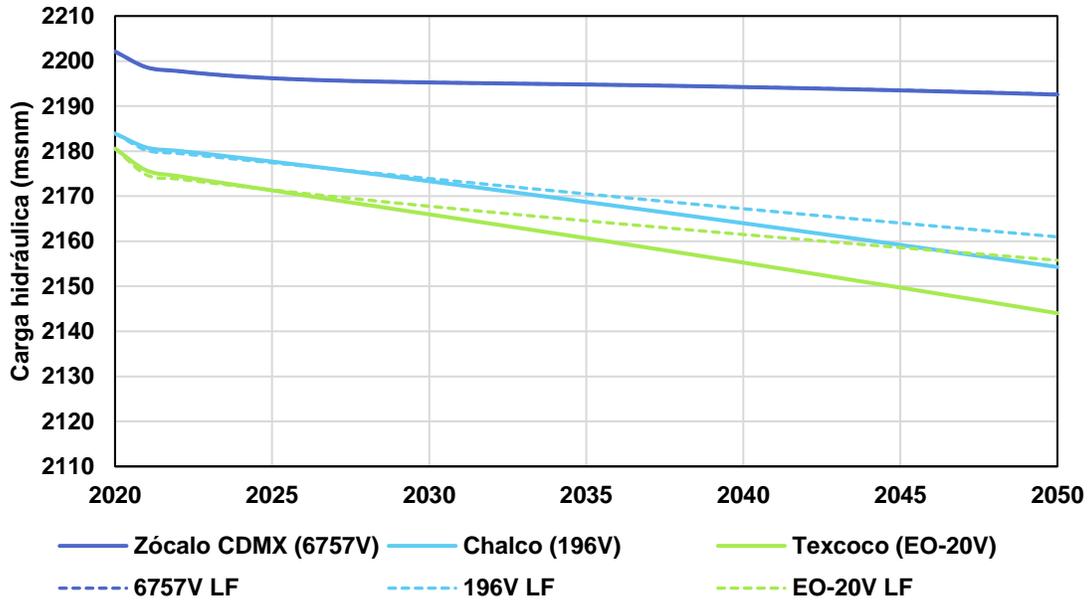


Figura 3.52 Gráfico que muestra la evolución de carga hidráulica simulada con efecto de aumento demográfico en el modelo ZMCM-Chalco-Textcoco en el periodo 2020-2050.

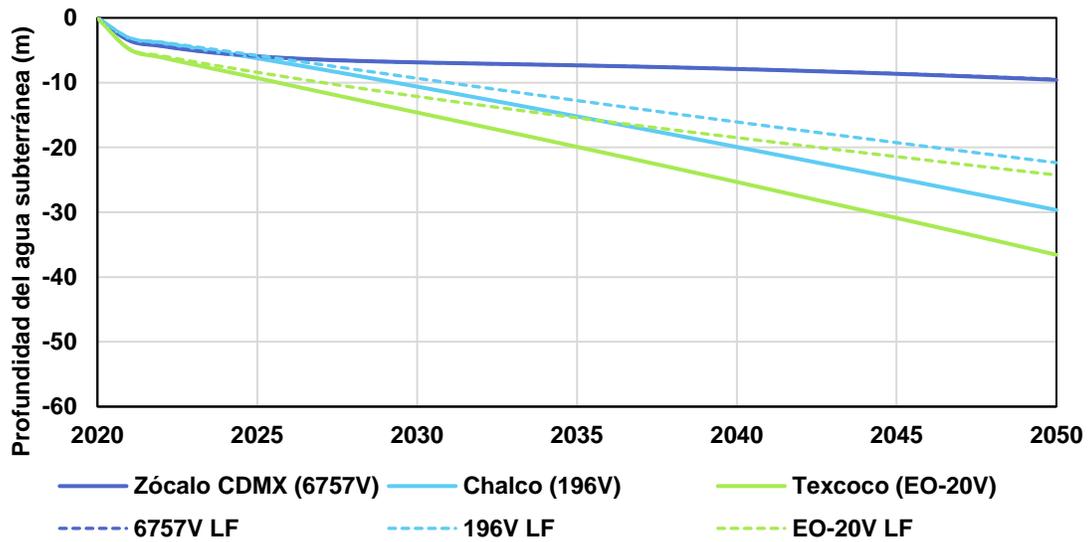


Figura 3.53 Gráfico que muestra la evolución del abatimiento simulado con efecto de crecimiento demográfico en el modelo ZMCM-Chalco-Textcoco para el periodo 2020-2050.

3.6 Incremento de recarga

En este escenario se trata de abordar el impacto de aplicar un incremento gradual y uniforme en la tasa de recarga en los modelos de simulación de agua subterránea de la Cuenca de México con el objetivo de reducir el abatimiento.

En este ejercicio se considera que la máxima tasa de recarga total, en el periodo 2020-2070, puede incrementarse hasta igualar el volumen de extracción en los pozos, lo cual en realidad resulta muy poco probable, pero puede ayudar a identificar qué zonas responden positivamente a este estímulo.

3.6.1 Escenario de recarga Modelo Cuautitlán-Pachuca

En la Figura 3.54 se muestran los volúmenes de recarga y de extracción anual simulados con el modelo Cuautitlán-Pachuca en el periodo 2020-2070. Se observa que a medida que se avanza en el tiempo, el volumen de recarga aumenta hasta alcanzar la magnitud del volumen de extracción. En este proceso, los volúmenes totales de entradas y salidas observados en el balance de masa, aumentan gradualmente (Figura 3.55).

En la Figura 3.56 se presentan las configuraciones de carga hidráulica simuladas con incremento de recarga para los años 2020 (condiciones iniciales), 2030, 2040 y 2050. Se observa que en Pachuca prácticamente la carga permanece constante, mientras que en Tizayuca y sobretodo en Cuautitlán continúa bajando la elevación de carga hidráulica. En la Figura 3.57 se proporciona el abatimiento determinado a partir de 2020, para los años 2030, 2040 y 2050. Se observa que a medida que se avanza en el tiempo, el abatimiento incrementa su magnitud sobretodo en la parte este de Cuautitlán, mientras que en Pachuca hay un incremento mínimo del abatimiento.

En la Figura 3.58 se resume el comportamiento de la carga hidráulica en el periodo 2020-2050, donde se aprecia que en Pachuca se induce una ligera recuperación del nivel de agua subterránea (mayor elevación que la inicial), mientras que en Cuautitlán y Tizayuca se han reducido los efectos del abatimiento. En la Figura 3.59 se presenta el abatimiento simulado a lo largo del periodo 2020-2050, se muestra que en Pachuca hay un abatimiento de 3.81 m, que representa una tasa de recuperación de 0.13 m/año; en Cuautitlán hay abatimiento de 23.61 m, es decir, una tasa de abatimiento de 0.79 m/año; y en Tizayuca el abatimiento total es 22.27 m y la tasa de abatimiento es 0.74 m/año. Con respecto al

escenario base, la tasa de abatimiento en Pachuca se reduce en 47.11%, en Cuautitlán se reduce en 32.42%, y en Tizayuca se reduce en 21.31%.

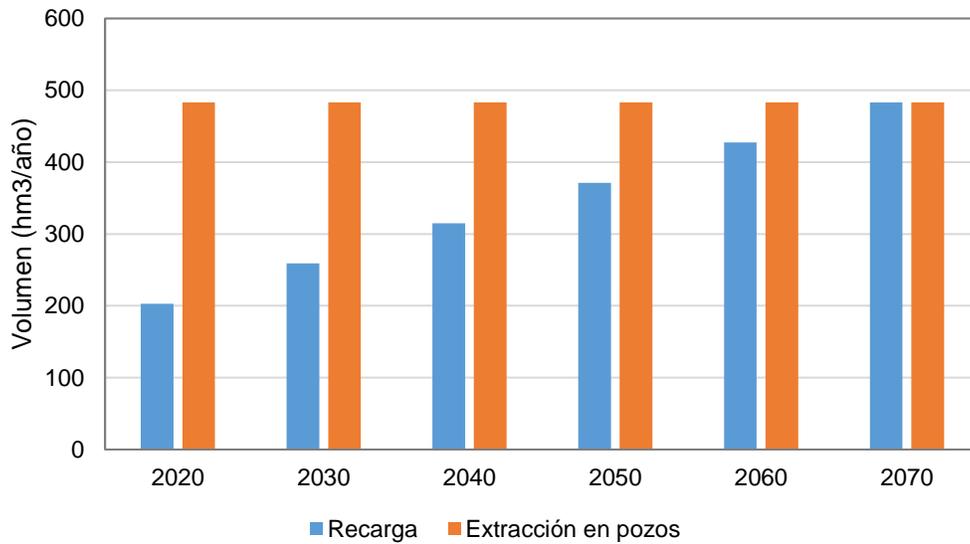


Figura 3.54. Volumen de recarga y extracción anual simulados en el modelo Cuautitlán-Pachuca con incremento de recarga gradual y uniforme en el periodo 2020-2070.

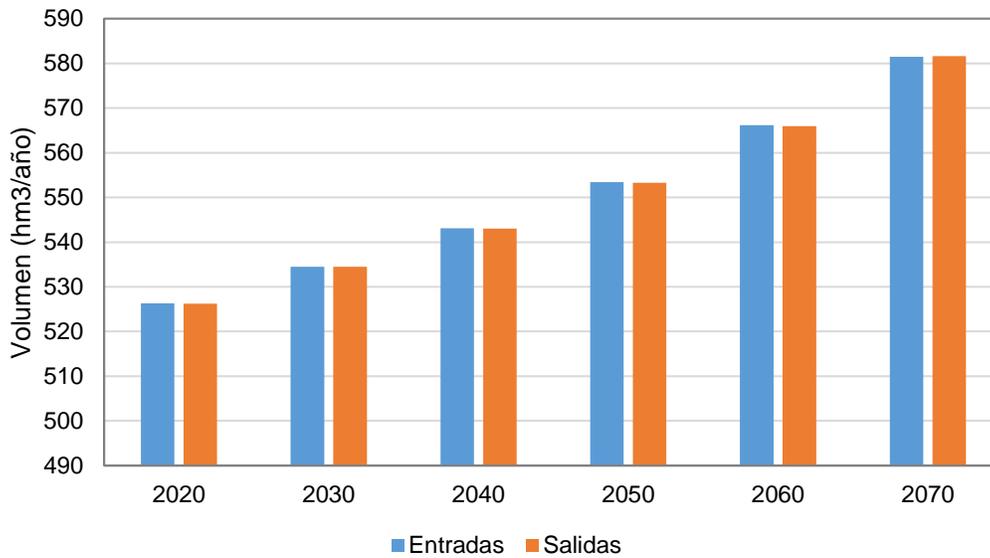


Figura 3.55. Balance de masa en el modelo Cuautitlán-Pachuca con incremento de recarga gradual y uniforme en el periodo 2020-2070.

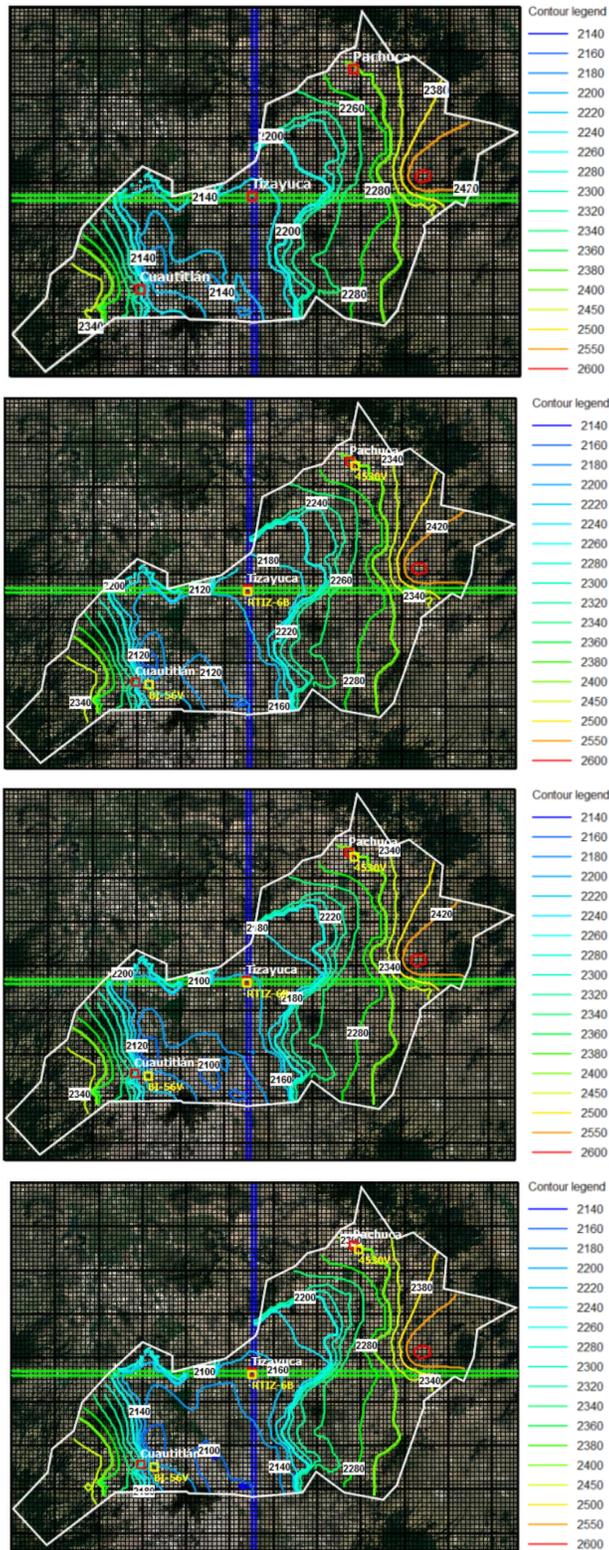


Figura 3.56 Carga hidráulica simulada con incremento de recarga gradual y uniforme en el modelo Cautitlán-Pachuca para los años 2020 (renglón 1), 2030 (renglón 2), 2040 (renglón 3) y 2050 (renglón 4).

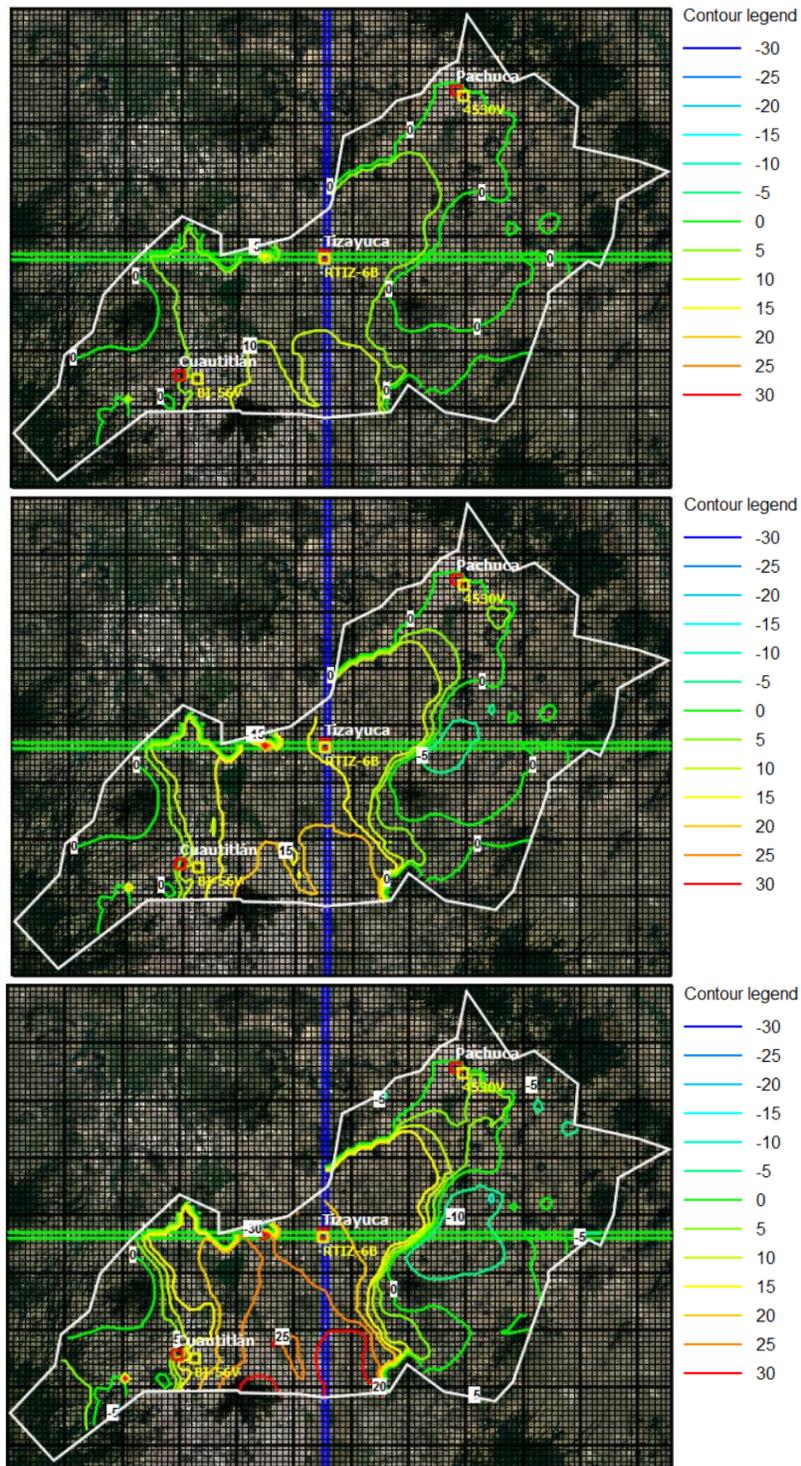


Figura 3.57. Abatimiento simulado con incremento de recarga gradual y uniforme en el modelo Cuautitlán-Pachuca para los años 2030 (renglón 1), 2040 (renglón 2) y 2050 (renglón 3).

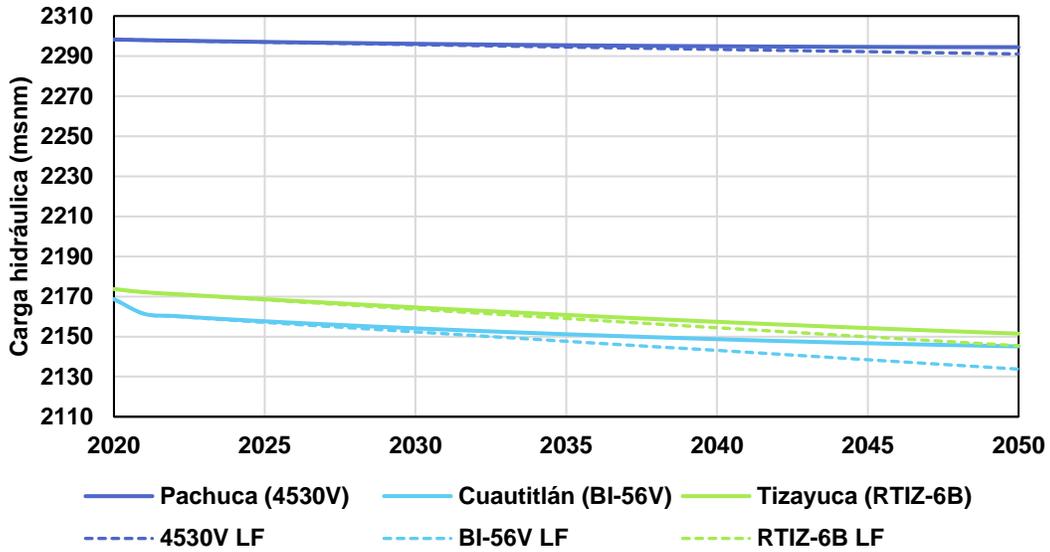


Figura 3.58 Gráfico que muestra la evolución de carga hidráulica simulada con incremento de recarga gradual y uniforme en el modelo Cuautitlán-Pachuca en el periodo 2020-2050.

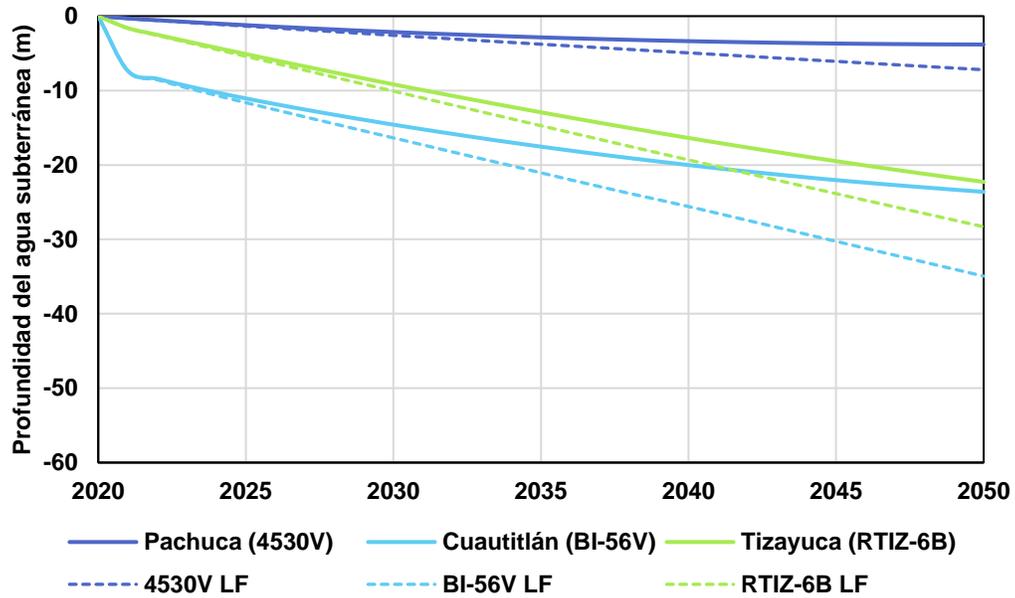


Figura 3.59 Gráfico que muestra la evolución del abatimiento simulado con incremento de recarga gradual y uniforme en el modelo Cuautitlán-Pachuca para el periodo 2020-2050.

3.6.2 Escenario de recarga Modelo ZMCM-Chalco-Texcoco

En la Figura 3.60 se muestra que el volumen de recarga simulado en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco en el periodo 2020-2070, aumenta gradualmente a lo largo de la simulación hasta igualar el volumen de extracción de los pozos. El balance de masa muestra que durante la simulación, los volúmenes totales de entradas y salidas también aumentan gradualmente (Figura 3.61).

En la Figura 3.62 se proporciona la configuración de carga hidráulica simulada con efecto de recarga gradual y uniforme en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco en los años 2020 (condiciones iniciales), 2030, 2040 y 2050. Se observa que con respecto a las condiciones iniciales, la carga hidráulica en el Zócalo de CDMX disminuye sólo unos metros, pero en Chalco y Texcoco se aprecia una reducción continua de su magnitud. En la Figura 3.63 se muestran los abatimientos determinados a partir de 2020, para los años 2030, 2040 y 2050. Se observa que el abatimiento crece gradualmente en la zona sur del dominio, es decir se ubican entre Chalco y la CDMX, donde en 2050 alcanzan una magnitud de más de 15 m.

En la Figura 3.64 se resume el comportamiento de carga hidráulica a lo largo del periodo 2020-2050, donde se observa que la carga hidráulica en el Zócalo de CDMX se reduce en los primeros cinco años y después parece permanecer constante, en Chalco la carga hidráulica decrece con una pendiente positiva suave, mientras que en Texcoco la carga hidráulica decrece con una pendiente positiva mínima que cambia de signo a partir de 2035, es decir, que a partir de ese año comienza a recuperarse el nivel de carga hidráulica. En la Figura 3.65 se presenta el abatimiento simulado en los pozos de monitoreo en el periodo 2020-2050, se observa que en el Zócalo de CDMX se alcanza un abatimiento total de 6.96 m, que equivale a una tasa de abatimiento de 0.23 m/año; en Chalco se alcanza un abatimiento máximo de 16.49 m y una tasa de abatimiento de 0.55 m/año; y en Texcoco el abatimiento total es 9.34 m, es decir, que tiene una tasa de abatimiento de 0.31 m/año. Con respecto al escenario base, la tasa de abatimiento en el Zócalo de CDMX se reduce en 26.68%, en Chalco se reduce en 26.24% y en Texcoco se reduce en 61.51%

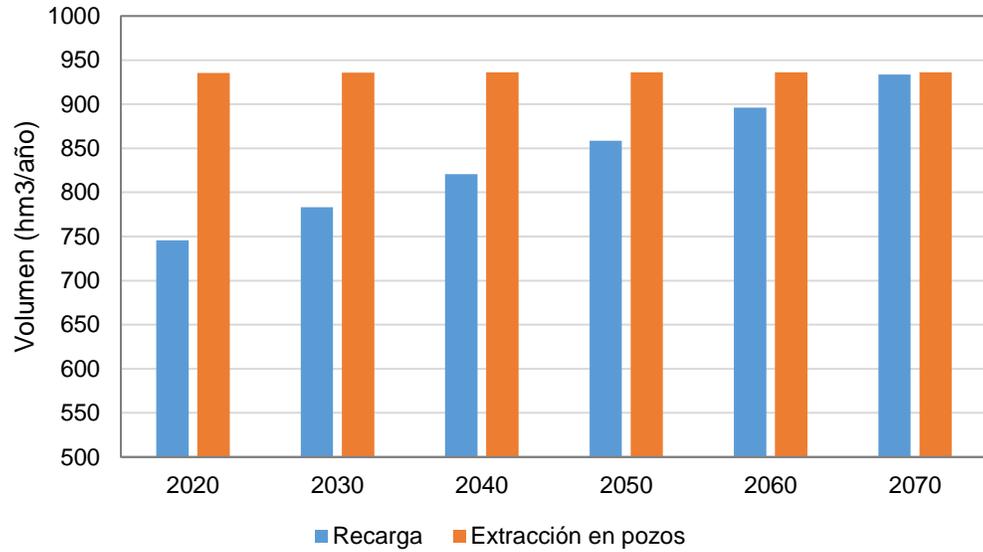


Figura 3.60. Volumen de recarga y extracción anual simulado en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco con incremento de recarga gradual y uniforme en el periodo 2020-2070.

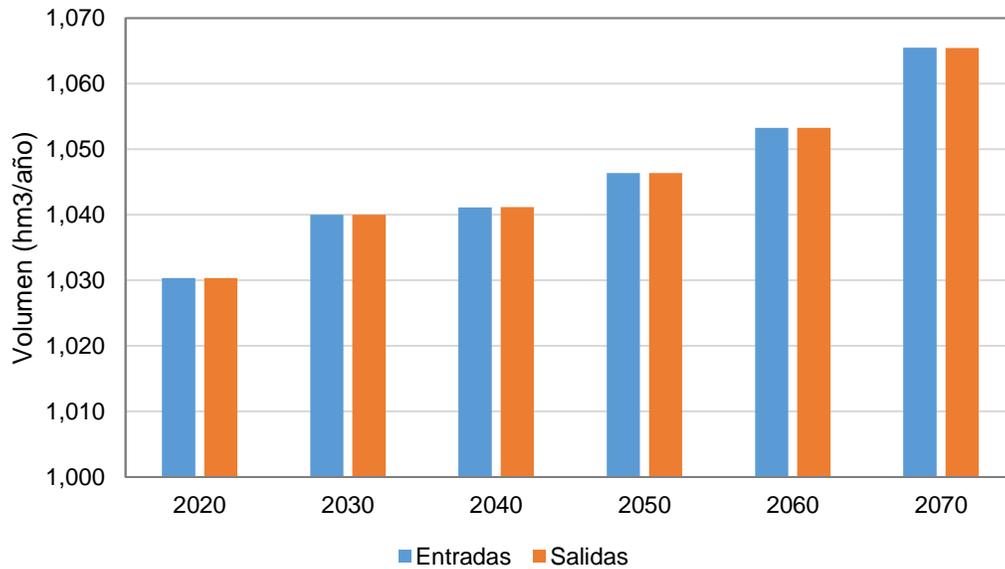


Figura 3.61. Balance de masa en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco con incremento de recarga gradual y uniforme en el periodo 2020-2070.

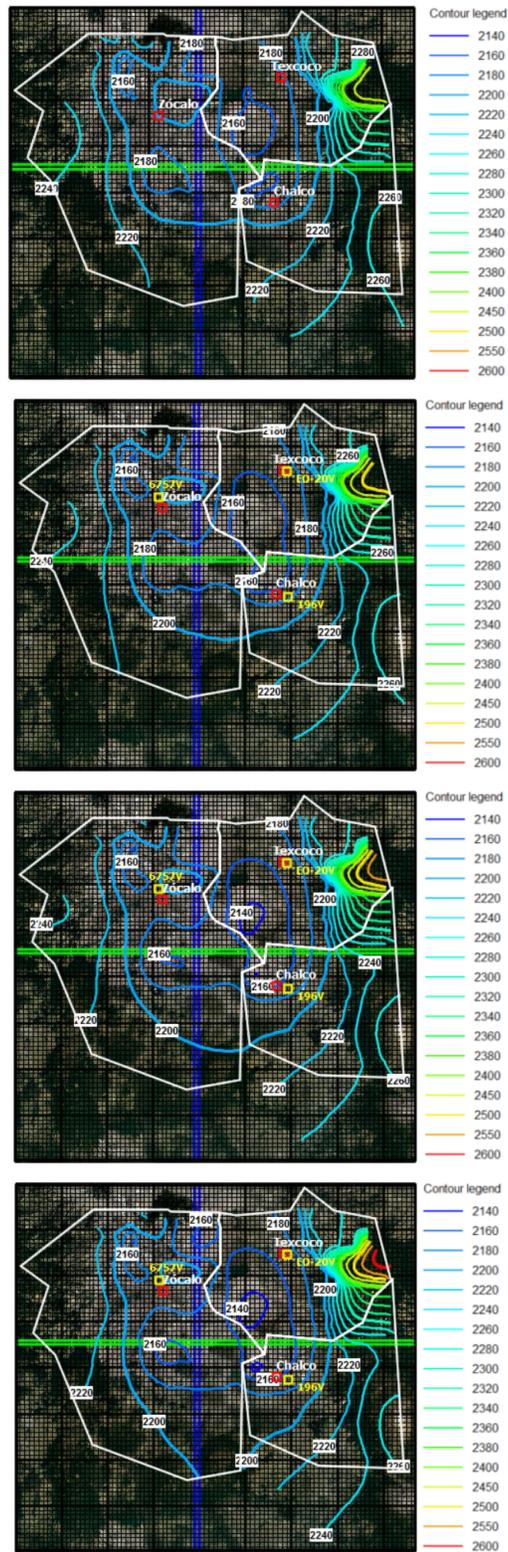


Figura 3.62. Carga hidráulica simulada con incremento de recarga gradual y uniforme en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco para los años 2020 (renglón 1), 2030 (renglón 2), 2040 (renglón 3) y 2050 (renglón 4).

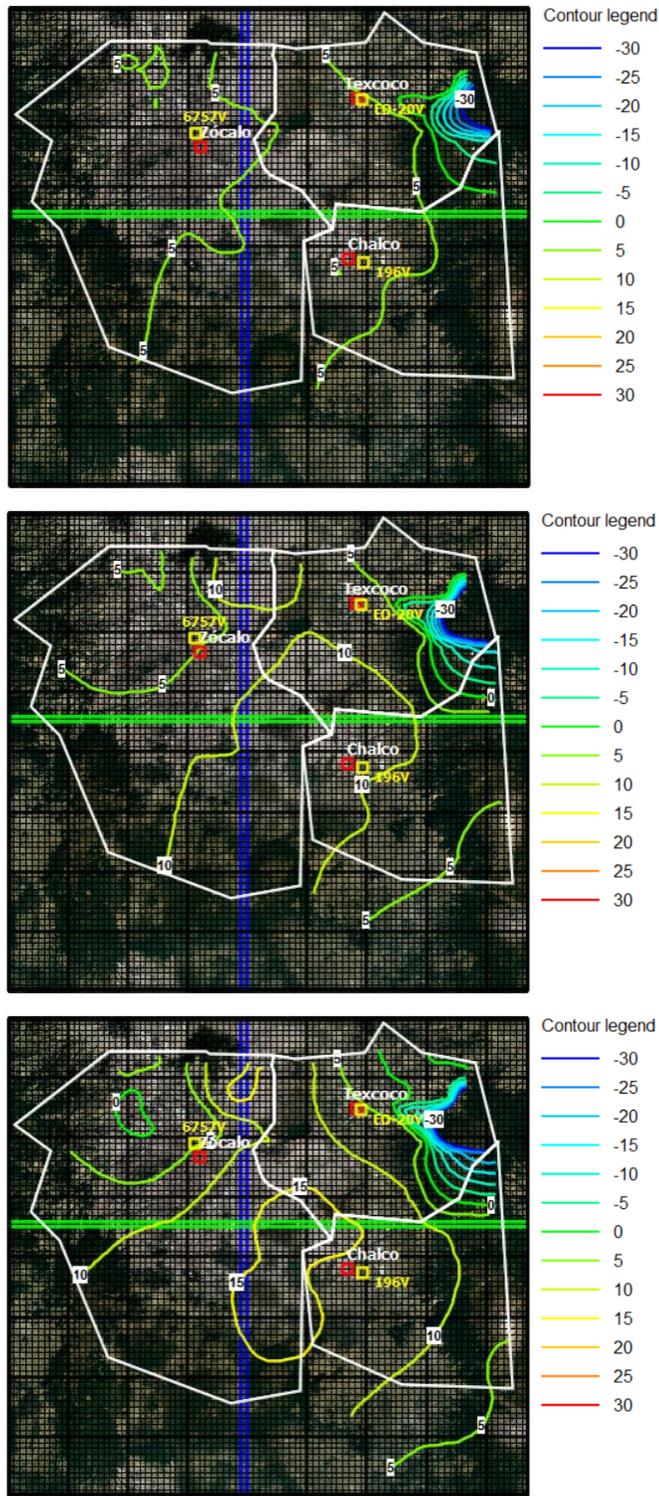


Figura 3.63. Abatimiento simulado con incremento de recarga gradual y uniforme en el modelo ZMCM-Chalco-Texcoco para los años 2030 (renglón 1), 2040 (renglón 2) y 2050 (renglón 3).

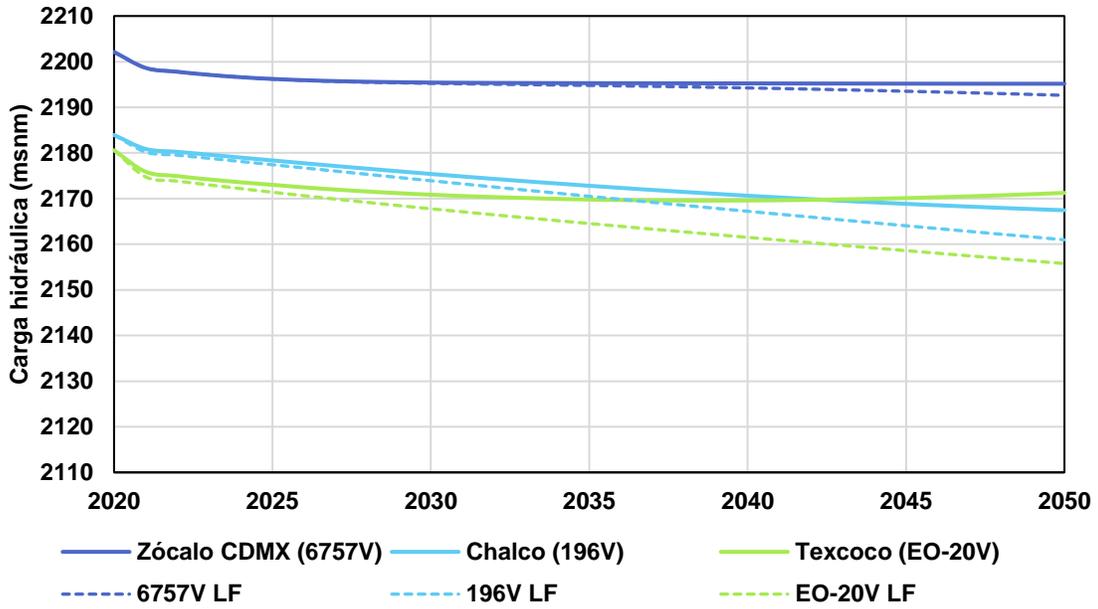


Figura 3.64. Gráfico que muestra la evolución de carga hidráulica simulada con recarga gradual y uniforme en el modelo ZMCM-Chalco-Textcoco en el periodo 2020-2050.

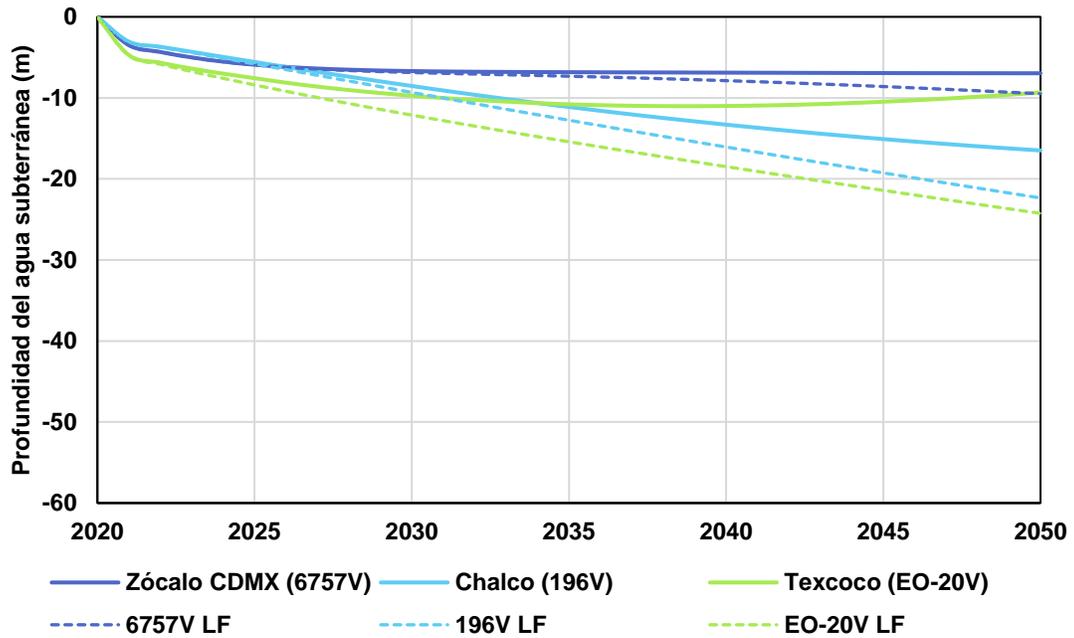


Figura 3.65. Gráfico que muestra la evolución del abatimiento simulado con recarga gradual y uniforme en el modelo ZMCM-Chalco-Textcoco para el periodo 2020-2050.

En la Tabla 3.7 se presentan los valores de abatimiento acumulado hasta el año 2050 en cada escenario simulado y en cada pozo de monitoreo, y estos datos se grafican en la Figura 3.66.

Tabla 3.7. Abatimiento acumulado 2050 simulado en cada escenario de predicción y en diversos pozos de monitoreo en la Cuenca de México.

Zona	Escenario			
	Laisser Faire	Cambio climático	Aumento de demanda	Incremento de recarga
Abatimiento acumulado 2050 (m)				
Zócalo CDMX (6757V)	9.50	10.08	9.57	6.96
Chalco (196V)	22.35	24.36	29.66	16.49
Texcoco (EO-20V)	24.25	38.96	36.57	9.34
Cuautitlán (BI-56V)	34.94	38.41	37.53	23.61
Tizayuca (RTIZ-6B)	28.30	30.24	30.85	22.27
Pachuca (4530V)	7.20	8.36	7.28	3.81

De acuerdo con la Tabla 3.7, al comparar las magnitudes de abatimiento del escenario Laisser Faire se muestra que en Pachuca (4530V) y en Zócalo CDMX (6757V) se tienen valores bajos, mientras que en Chalco (196V) y Texcoco (EO-20V) se tienen valores intermedios y, finalmente, en Tizayuca (RTIZ-6B) y Cuautitlán (BI-56V) se tienen los valores máximos. De lo anterior se destaca que las ciudades que requieren la implementación inmediata de fuentes y medidas alternativas que reduzcan la explotación intensiva del agua subterránea son Cuautitlán y Tizayuca.

Si se comparan los abatimientos generados en el escenario cambio climático, se encuentra que tanto Pachuca (4530V) como Zócalo CDMX (6757V) son relativamente poco sensibles a la reducción de la tasa de recarga natural, mientras que zonas como Texcoco (EO-20V) y Cuautitlán (BI-56V) son más receptivas a ésta reducción. En el caso del Zócalo de CDMX

(6757V), el aumento mínimo del abatimiento se debe a que el volumen de recarga inducida es mucho mayor que el volumen de recarga natural, por lo cual la reducción del 15% no es tan impactante. En Texcoco (EO-20V) el volumen de recarga natural es mayor al volumen de recarga inducida por riego, por lo cual la reducción en la tasa de recarga tiene un gran impacto reflejado en el aumento de abatimiento. En Cuautitlán (BI-56V) sólo se cuenta con el volumen de recarga natural, por lo cual la reducción del 15% en la tasa de recarga se aplicó directamente, y en consecuencia generó mayor abatimiento.

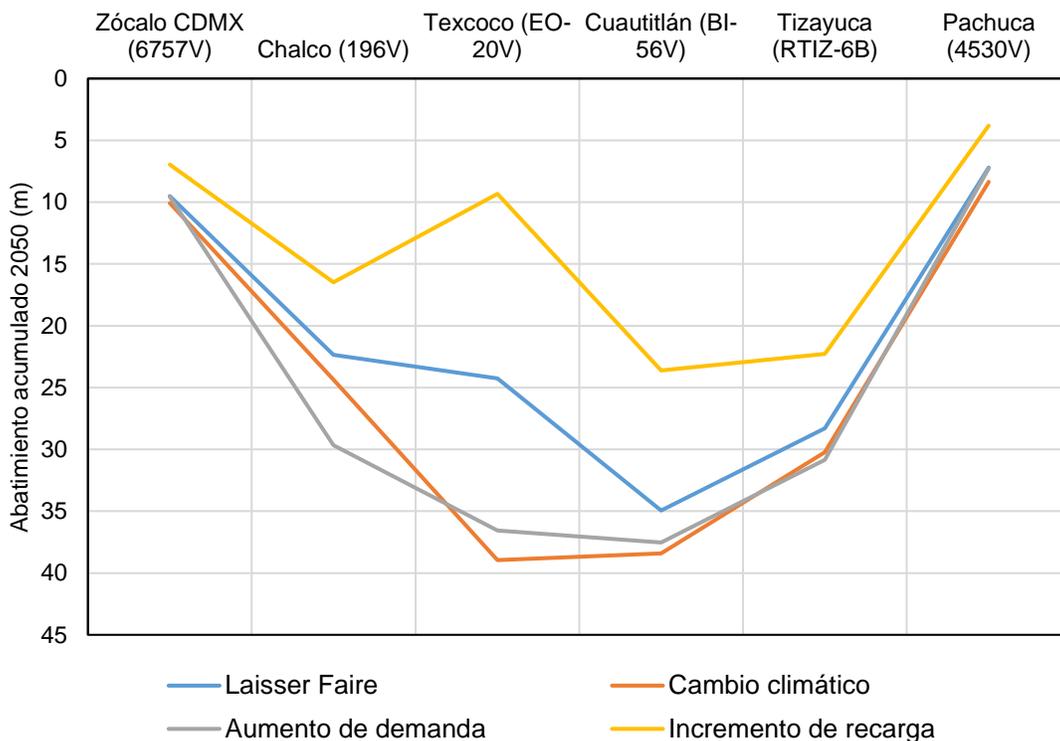


Figura 3.66. Gráfico de abatimiento acumulado 2050 simulado en cada escenario de predicción y en diversos pozos de monitoreo en la Cuenca de México.

Al comparar el escenario de aumento de demanda (proporcional al aumento demográfico) con Laisser Faire, se observa que en Zócalo de CDMX (6757V) y en Pachuca (4530V) aumenta ligeramente el abatimiento, mientras que en Chalco (196V) y Tizayuca (RTIZ-6B) se tienen un aumento marcado del abatimiento, pero en Cuautitlán (BI-56V) y Texcoco (EO-20V) se tienen los casos más severos. El abatimiento en Zócalo de CDMX (6757V) se infiere como consecuencia del aumento de demanda en sus vecinos Chalco (196V) y Texcoco

(EO-20V); algo similar ocurre con Pachuca (4530V) y sus vecinos Cuautitlán (BI-56V) y Tizayuca (RTIZ-6B), la diferencia es que, en este caso, sí aumenta la población en Pachuca pero la cantidad de pozos de extracción no es tan importante como en las otras ciudades.

Finalmente, en el escenario de incremento de recarga (un caso muy idealizado), se observa que se siguen produciendo abatimientos pero con menor magnitud. Los menores abatimientos se presentan en Pachuca (4530V) y el Zócalo de CDMX (6757V), los abatimientos intermedios se tienen en Texcoco (EO-20V) y Chalco (196V), y los abatimientos máximos se presentan en Tizayuca (RTIZ-6B) y Cuautitlán (BI-56V).

De los escenarios de predicción, el más severo en los pozos de monitoreo es cambio climático, ya que produce los mayores abatimientos en Zócalo de CDMX (6757V), Texcoco (EO-20V), Cuautitlán (BI-56V), y Pachuca (4530V), mientras que para Chalco (196V) y Tizayuca (RTIZ-6B), el escenario con mayor afectación es aumento de demanda (proporcional al aumento demográfico).

Resumen..

En la modificación los modelos de simulación en la Cuenca de México, las etapas de actualización y calibración, resultan de vital importancia y son la base para la generación de escenarios de predicción que auxilien en la gestión del agua subterránea. En este caso, los modelos de la Cuenca de México son capaces de proporcionar la respuesta de los niveles del agua subterránea y su dirección de flujo de acuerdo a la hidrogeología de la zona, pero no se descarta que necesiten seguir mejorando su diseño o adicionar/modificar componentes.

Adicionalmente, se recomienda construir un modelo de flujo de agua subterránea que cubra el total del área de la Cuenca de México, de manera que el sistema hidrogeológico esté completo y vinculado, en otras palabras, que se represente adecuadamente la continuidad de las unidades hidrogeológicas, el sistema de flujo, se precisen las fronteras (principalmente bombeo y recarga inducida) para que, en consecuencia, se puedan aportar resultados relativamente más precisos y adecuados al modelo conceptual actual (hidrogeología de la Cuenca de México).

De los escenarios de predicción simulados se establece que las consecuencias del cambio climático serán más severas con el nivel del agua subterránea en comparación con las consecuencias derivadas de un aumento de demanda. Sin embargo, hay que destacar que en realidad el efecto de cambio climático, es decir, la reducción de la recarga natural, irá disminuyendo gradualmente y en función de las características del subsuelo en la zona, en cambio, el aumento de demanda (incremento del volumen de extracción en pozos de bombeo de agua subterránea) tiene consecuencias inmediatas y que también aumentan gradualmente.

Además, se establece que la carga hidráulica del sistema acuífero de la Cuenca de México, en algunas zonas, responde positivamente a la recarga inducida mediante grandes volúmenes de agua, pero que el efecto de abatimiento, aunque logra atenuarse, es predominante. De lo anterior se destaca que la reducción del bombeo es una medida poco probable pero necesaria (y combinable con otras medidas) para reducir el abatimiento del agua subterránea en la Cuenca de México.

Capítulo 4. Manejo sostenible del agua

Resumen..

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

REFERENCIAS

Aldama Rodríguez.A.A. (2004). El agua en México: una crisis que no debe ser ignorada. Capítulo de libro. En: Jacobo-Saborio (ed). La gestión del agua en México: los retos para el desarrollo sustentable.UAM. México.

Baalousha H. (2011). Fundamentals of Groundwater Modelling.Capítulo de libro. En: L.F. Konig and J.L.Weill. Groundwater Modelling Management. Nova Science Publishers Inc.

CONAGUA (2016). Capa temática de red piezométrica. Conjunto Nacional.

Gidahatari (2016). Manual de Modelamiento Numérico con MODFLOW.

DOFa (2015). Norma Oficial Mexicana. NOM-011-CONAGUA-2015. Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. 27/03/2015.

DOFb (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ixtlahuaca-Atacomulco (1502). Estado de México. 20/04/2015.

DOFc (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta (1601). Estado de Michoacán. 20/04/2015.

DOFd (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Acámbaro (1117). Estado de Guanajuato. 20/04/2015.

DOFe (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Amealco (2209). Estado de Querétaro. 20/04/2015.

DOFf (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de la Cuevita (1116). Estado de Guanajuato. 20/04/2015.

DOFg (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Toluca (1501). Estado de México. 20/04/2015.

DOFh (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Altamirano-Cutzamala (1208). Estado de Guerrero. 20/04/2015.

DOFi (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Ciudad Hidalgo-Tuxpan (1610). Estado de Michoacán. 20/04/2015.

DOFj (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Huetamo (1612). Estado de Michoacán. 20/04/2015.

DOFk (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Temascaltepec (1509). Estado de México. 20/04/2015.

DOFI (2018). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Villa Victoria-Valle de Bravo (1505). Estado de México. 04/01/2018

DOFm (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Actopan-Santiago de Anaya (1313). Estado de Hidalgo. 20/04/2015

DOFn (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Ajacuba (1311). Estado de Hidalgo. 20/04/2015

DOFo (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Chapatongo-Alfajayucan (1309). Estado de Hidalgo. 20/04/2015

DOFp (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero El Astillero (1309). Estado de Hidalgo. 20/04/2015

DOFq (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Huichapan-Tecozautla (1307). Estado de Hidalgo. 20/04/2015

DOFr (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Ixmiquilpan (1312). Estado de Hidalgo. 20/04/2015

DOFs (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Tepeji del Río (1316). Estado de Hidalgo. 20/04/2015

DOFt (2018). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Valle de Cadereyta (2206). Estado de Querétaro. 4/01/2018

DOFu (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Valle del Mezquital (1310). Estado de Hidalgo. 20/04/2015

Escolero Fuentes O.A., Martínez S.E., Kralisch S., Perevochtchikova María (2009). Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático. Instituto de Geología. Centro Virtual de Cambio Climático Ciudad de México.

Escolero Fuentes O. (2004). Aplicación de los modelos de simulación para la gestión del agua subterránea. Capítulo de libro. En: Jacobo-Saborio (ed). La gestión del agua en México: los retos para el desarrollo sustentable.UAM. México.

Gidahatari (2016). Manual de Modelamiento Numérico con MODFLOW.

Lesser-Carrillo L., Lesser-Illades J.M, Arellano-Islas S., González-Posadas D. (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero Valle del Mezquital, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. V.28.No.3. p.323-336

Valencia J.C. (2004). La planeación hidráulica en México. Capítulo de libro. En: Jacobo-Saborio (ed). *La gestión del agua en México: los retos para el desarrollo sustentable*. UAM. México.

Velázquez Aguirre.L. y Ordaz Ayala A. (1993). Provincias Hidrogeológicas de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. V. 52. P.15-33.

Anderson, M. P., Woessner, W. W. (1992) *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport.

Bloomfield, K. (1975) A late-Quaternary monogenetic volcano field in central Mexico. *Geologische Rundschau*, volumen 64, p. 476-497.

Comisión Nacional del Agua (2018a) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Cd. De México (0901), Distrito Federal. Subdirección general Técnica, Gerencia de Aguas subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos, 4 de enero.

Comisión Nacional del Agua (2018b) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Chalco-Amecameca (1506), Estado de México. Subdirección general Técnica, Gerencia de Aguas subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos, 4 de enero.

Comisión Nacional del Agua (2018c) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México. Subdirección general Técnica, Gerencia de Aguas subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos, 4 de enero.

Comisión Nacional del Agua (2018d) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca (1508), Estado de México. Subdirección general Técnica, Gerencia de Aguas subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos, 4 de enero.

Departamento del Distrito Federal (1984) Actividades geohidrológicas en el Valle de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica volumen I, II, III. Elaborado por Lesser y Asociados S. A., México, DF.

De Cserna, Z.; M. De la Fuente-Duch; M. Palacios-Nieto; L. Triay; L. Mitre-Salazar; R. Mota-Palomino (1988) Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. Boletín del Instituto de Geología, UNAM, número 104.

Demant, A. (1978) Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. Revista Instituto de Geología, UNAM, volumen 2, p. 172-187.

Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica DGCOH (1994). Registros litológicos, diseño constructivo, niveles y gastos de pozos productores. DGCOH, México, DF.

Escolero, O., Martínez, S.E., Kralisch, S., Perevochtchikova, M. Delgado-Campo, J. (2009) Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático: Informe final. Centro Virtual de Cambio Climático.

Fries, C. Jr. (1960) Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México. Boletín del Instituto de Geología, UNAM, número 60, p. 236.

Fries, Jr. (1962) Resumen de la geología de la hoja Pachuca, estados de Hidalgo y México. Hoja Pachuca 14Q-c (11). Esc. 1:100000. Instituto de Geología, UNAM, México, DF.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L. (2005) Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas Selectos de la Geología Mexicana Tomo LVII, número 3, p. 227-283.

Harbaugh, A.W. (2005) MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.

Herrera-Revilla, I. y A. Cortés Silva (1989) El sistema acuífero de la Cuenca de México. Ingeniería Hidráulica en México. Nota técnica, Instituto de Geofísica, UNAM.

Lesser y Asociados (1992) Hidrología subterránea en el Valle de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Secretaría General de Obras. DDF. Ingeniería Hidráulica en México, enero-abril.

Lesser y Asociados S. A. (1997) Balance de agua subterránea del acuífero de la Ciudad de México.

Lesser y Asociados S. A. (2000) Estudio de mediciones en la red de pozos piloto para la parte sur de la cuenca del Valle de México y actualización de balance hidrogeológico. Sinopsis de la piezometría del Valle de México año 2000. Departamento del Distrito Federal, Contrato número 0-07-CO-04-1-0328, 51 p.

López-Ramos, E. (1979) Geología de México. Tomo II, 2da edición.

Marsal, Raul J., Mazari, M. (1959) El Subsuelo de la Ciudad de México. Primer Panamericano, Congreso de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 614 p. (2d ed., is bilingual in Spanish and English.)

Martin Del Pozo, A. L. (1982) Monogenetic vulcanism in sierra Chichinautzin, Mexico. Bulletin of Volcanology, volumen 45, número 1, p. 9-24.

Mooser, R.; Montiel, A.; Zúñiga, A. (1996) Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía tectónica regional y aspectos geotérmicos [New geological map for the Basins of Mexico, Toluca and Puebla]. Comisión Federal de Electricidad, Mexico City.

Ortega-Guerrero, A. (1989) Las condiciones de frontera hidráulicas naturales en la Cuenca de México, usando modelado matemático. Geofísica Internacional, volumen 82, número 2, p. 283-295.

Ortega-Guerrero, A. y R. N. Farvolden (1989) Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the basin of Mexico. Journal of Hydrology, volumen 110, p. 271-294.

Ramos-Leal, J. A.; C. Noyola Medrano; F. O. Tapia Silva (2010) Aquifer vulnerability and groundwater quality in mega cities: case of the Mexico Basin. Environmental Earth Sciences, volumen 61, p. 1309-1320.

Santoyo-Villa E.; Ovando, E.; Mooser, F.; León-Plata, E. (2005) Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México. TGC Ingeniería.

Schlaepfer, J. C. (1968) Resumen de la geología de la Hoja México, Distrito Federal y estados de México y Morelos. Hoja México 14Q-h (5). Esc. 1:100000. Instituto de Geología, UNAM, México, DF.

Sergestrom, K. (1961) Geología del SW del estado de Hidalgo y del NE del Estado de México. Bol Asoc. Mex. Geol. Petrol, volumen XIII, números 3 y 4.

Vargas, C.y Ortega-Guerrero, A. (2004) Fracture hydraulic conductivity in the Mexico city clayey aquitard: Field piezometer rising-head test. Hydrogeology Journal, volumen 12, p. 336-344.

Vázquez Sánchez, E. y Jaimes Palomera, R. (1989) Geología de la Cuenca de México. Revista de la Unión Geofísica Mexicana, Instituto de Geofísica, UNAM, volumen 28, número 2, p. 133-190.

Vázquez-Sánchez, E. (1995) Modelo conceptual hidrogeológico y características hidráulicas del acuífero en explotación en la parte meridional de la Cuenca de México. Tesis de maestría, Posgrado en Geofísica, UNAM.

Winston, R.B. (2009) ModelMuse—A graphical user interface for MODFLOW–2005 and PHAST: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A29, 52 p., available only online at <http://pubs.usgs.gov/tm/tm6A29>.