



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Mestría en Ciencias

MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ACUÍFEROS DE LA CUENCA DE GUADALUPE, BAJA CALIFORNIA

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Pablo Méndez Cervantes

Dirigido por:

Dr. Carlos Fuentes Ruiz

SINODALES

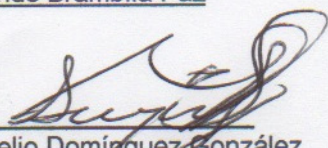
Dr. Carlos Fuentes Ruiz
Presidente

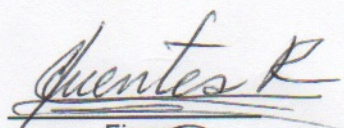
Dr. Carlos Chávez García
Secretario

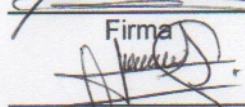
Dr. Enrique González Sosa
Vocal

Dr. Arturo González Casillas
Suplente


Dr. Fernando Brambila Paz
Suplente

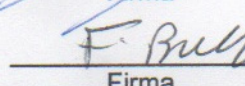

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería

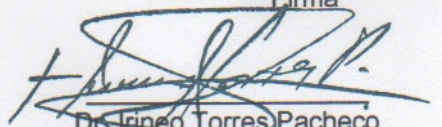

Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre de 2012
México

RESUMEN

El agua subterránea es un recurso de suma importancia para las actividades urbanas, agrícolas e industriales. El desarrollo de la población ha ocasionado una sobreexplotación de los acuíferos; en México la mayor parte del agua extraída del subsuelo proviene de acuíferos sobreexplotados. En el noroeste del país el problema de la sobreexplotación es mayor debido a la baja disponibilidad de agua superficial y las escasas lluvias. Los acuíferos en la cuenca de Guadalupe, Baja California, han presentado un abatimiento gradual en el nivel freático en los últimos años. En el presente trabajo se desarrolla de un modelo hidrogeológico de los acuíferos de valle de Guadalupe, Ojos Negros y Real del Castillo. La modelación se realiza utilizando como datos de entrada la topografía superficial, la geología de la zona, pozos de monitoreo y de extracción, utilizando como condiciones de frontera la recarga, las salidas aguas abajo y la evapotranspiración en el *software* MODFLOW. El modelo es calibrado utilizando datos observados de piezometría. El modelo calibrado y validado con las observaciones simula escenarios futuros a largo plazo. Se observa que la sobreexplotación compromete la integridad de los acuíferos en los próximos veinte años, por lo que se debe pensar en regímenes sustentables de extracción y en la construcción de obras de recarga artificial.

Palabras clave: (MODFLOW, acuíferos libres, pozos de monitoreo, gestión de acuíferos)

SUMMARY

Groundwater is a vital resource for urban, agricultural, and industrial activities. Population growth has caused overexploitation of aquifers. In Mexico, most of the extracted groundwater comes from overexploited aquifers. In the northwest of Mexico, overexploitation problems are high due to low availability of surface water and scarce rainfall. A drawdown in the aquifers of Guadalupe Basin, B.C., has been observed in the past years. This paper focuses on the development of a hydrogeological model of the aquifers of Valle de Guadalupe, Ojos Negros and Real del Castillo. The model has, as input data, the superficial topography and geology of the region, observation and pumping wells. And uses recharge, downstream exits, and evapotranspiration as boundary conditions using MODFLOW software. The model is calibrated using piezometric observations. Calibrated and validated with the observations, the model is used to simulate long term scenarios. The results show that overexploitation compromises the aquifers integrity within the next twenty years. Sustainable pumping regimes and artificial recharge should be considered in future management of the aquifers.

Keywords: (MODFLOW, unconfined aquifers, observation wells, aquifer management)

AGRADECIMIENTOS

A México que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) financió y me permitió realizar esta investigación.

Al Dr. Carlos Fuentes Ruiz, Profesor Investigador de la UAQ, por sus enseñanzas, sus consejos, su amistad y por siempre creer en mi.

Al Dr. Arturo González Casillas, Especialista en Hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por su valiosa aportación sin la cual este trabajo nunca hubiera podido ser realizado.

Al Dr. Enrique González Sosa, Profesor Investigador de la UAQ, por sus comentarios, sugerencias y correcciones que me permitieron mejorar este trabajo.
Al Dr. Carlos Alberto Chávez García, Profesor Investigador de la UAQ, por su valiosa revisión de este trabajo y por ser parte del jurado.

Al Dr. Fernando Brambila Paz, Profesor Investigador de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por su revisión y formar parte del jurado.

Al Dr. Luis Ernesto Lesser Carrillo por sembrar en mi el interés por el tema de los acuíferos.

Al Ing. Alejandro Méndez Lecanda y Norma Elena Cervantes Hesles, mis padres, por todo su apoyo y amor, al Ing. Alejandro Méndez Cervantes, mi hermano, por siempre estar ahí para ayudar y dar consejo, y también a mis hermanos Daniel y María Andrea. Por ustedes soy lo que soy.

Al resto de mi familia cercana, que es muy grande para ponerla en una lista, hacerlo me llevaría varias semanas y haría este documento muy grande para cualquier lector, pero me gustaría mencionar especialmente a Pepelo y Cota por guiarme hacia este proyecto, aguantarme y hacerme saber que yo iba por buen camino.

A Toño Quevedo y Memo Camacho por su amistad y aportaciones al presente trabajo.

A mis amigos y compañeros Ricardo, Pedro, Adda, Daniel, Eladio y Enrique por ser mi segunda familia.

A Juanma, Marilú, Franco, Rebeca, Mauricio, Cuevas, Israel, Noé, Silvestre, Chava, Doris, Denio, Jorge, Juan “brasileiro” y Juan “el suave”, por su amistad y los buenos momentos compartidos.

ÍNDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Hipótesis	4
2 REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 El ciclo hidrológico	5
2.1.1 Evapotranspiración	5
2.1.2 Transporte atmosférico de agua	6
2.1.3 Precipitación	6
2.1.4 Infiltración	7
2.1.5 Escurrimiento	7
2.2 Acuíferos	8
2.3 Ecuaciones de los acuíferos	9
2.3.1 Acuíferos libres	10
2.3.2 Acuíferos confinados	11
2.4 Caracterización hidráulica	12
2.4.1 Extracción por pozos	12
2.4.2 Sistemas acuífero-acuitardo	13
2.5 Caracterización química	14
2.5.1 Transporte de solutos	14
2.6 MODFLOW	15
3 METODOLOGÍA	16
3.1 Descripción de la zona de estudio	16
3.1.1 Ubicación	16
3.1.2 Fisiografía	17
3.1.3 Clima	19

3.1.4	Hidrografía.....	20
3.1.5	Geología.....	21
3.1.6	Hidrogeología	23
3.2	Comparación entre la solución de Boussinesq y la ecuación general de los acuíferos	24
3.2.1	Valles de Ojos Negros y Real del Castillo	25
3.2.2	Valle de Guadalupe	32
3.3	Modelo conceptual integrado	40
3.3.1	Definición espacial.....	41
3.3.2	Condición inicial.....	44
3.3.3	Condiciones de frontera	45
3.3.4	Calibración	49
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1	Comparación entre la solución de Boussinesq y la ecuación general de los acuíferos	51
4.1.1	Valle de Ojos Negros y Real del Castillo	51
4.1.2	Valle de Guadalupe	54
4.1.3	Escenarios simulados.....	56
4.2	Modelo conceptual integrado	77
4.2.1	Definición espacial.....	77
4.2.2	Condiciones iniciales	79
4.2.3	Calibración	79
4.2.4	Resultados de la simulación	86
5	CONCLUSIONES	91
	LITERATURA CITADA.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla:

2.1 Profundidad de extinción para diferentes coberturas y tipos de suelo (Shah, <i>et al</i> , 2007).	6
3.1 Diferentes escenarios en la extracción anual para ambos modelos.....	25
3.2 Recarga en mm por año utilizada en el modelo del acuífero de Ojos Negros. 29	
3.3 Valores regionales de la conductividad hidráulica para el valle de Guadalupe (Campos, 2008).....	35
3.4 Valores de recarga (mm/año) para los acuíferos modelados.....	46
3.5 Valores de evapotranspiración mensuales utilizados en el modelo.	49
3.6 Propiedades iniciales por zona.....	49
4.1 Tasa anual de entradas y salidas (Mm ³).	59
4.2 Tasa anual de entradas y salidas (Mm ³).	72
4.3 Calibración para el modelo integrado.....	81
4.4 Calibración para el modelo de Valle de Guadalupe.	83
4.5 Calibración para el modelo de Ojos Negros/Real del Castillo.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura:

2.1 Ciclo hidrológico global. Los números entre paréntesis indican los flujos en miles de km ³ al año. Modificado de Fitts, 2002.....	5
2.2 Flujos que afectan el agua subterránea. Modificado de Fitts, 2002.	8
3.1 Ubicación de la cuenca de Guadalupe.....	16
3.2 Ubicación de los acuíferos, en negro los límites administrativos y en morado los límites objeto de estudio en el presente trabajo.....	17
3.3 Modelo digital de elevación de la zona en metros sobre el nivel del mar.....	18
3.4 Tipos de clima en la cuenca de Guadalupe (Salgado, 2010).	19
3.5 Principales corrientes que atraviesan los valles de Ojos Negros y Guadalupe.	20
3.6 Geología superficial (Salgado, 2010).	23
3.7 Patrón de fallas y fracturas en la cuenca de Guadalupe (Salgado, 2010).....	24
3.8 Dominio del modelo, donde las celdas en blanco son las de flujo activo y el resto son celdas inactivas frontera del dominio.....	26
3.9 Condiciones iniciales de carga piezométrica en msnm (enero 1983).....	27
3.10 Mapa de conductividad hidráulica en m/s, las celdas inactivas se consideran impermeables.....	28
3.11 Pozos de extracción.....	30
3.12 Fondo del basamento impermeable en metros sobre el nivel del mar.	31
3.13 Elevación superficial, en rojo la máxima (800 msnm) y en morado la mínima (700 msnm).	32
3.14 Dominio de solución del acuífero Valle de Guadalupe.	33
3.15 Condiciones iniciales. Carga hidráulica al 1ero. de febrero de 1984.....	34

3.16 Conductividad hidráulica (m/s) del acuífero Valle de Guadalupe.	36
3.17 Tasa de pérdida por evapotranspiración en mm/año.	38
3.18 Pozos de extracción en el Acuífero del Valle de Guadalupe.	39
3.19 Corte longitudinal en la parte central del acuífero.	39
3.20 Topografía superficial del Acuífero Valle de Guadalupe.	40
3.21 Definición espacial lateral de los acuíferos.	42
3.22 Zonas de diferentes propiedades hidráulicas del acuífero: formaciones impermeables en rojo; en naranja, amarillo y verde formaciones semipermeables; y en azul las zonas de alta permeabilidad.	43
3.23 Puntos con información conocida de la profundidad del basamento impermeable.	44
3.24 Pozos de observación.	45
3.25 Pozos de extracción con los que se cuentan datos de extracción.	47
3.26 Pozos de extracción.	48
3.27 Zonas de propiedades hidráulicas a calibrar.	50
4.1 La carga piezométrica calculada a los 5114 días, 31 de enero de 1997, tomando como estado inicial el correspondiente a 1 de enero de 1983. Se utiliza la solución en tres dimensiones (MODFLOW).	52
4.2 La carga piezométrica calculada a los 5141 días, 28 de febrero de 1997, utilizando la ecuación de Boussinesq (Campos, 2002).	53
4.3 Resultados de la superficie freática obtenidos con MODFLOW, abril de 2005 (254 meses de simulación).	54
4.4 Configuración de la superficie freática en estado transitorio, abril de 2005 (254 meses de simulación) (Campos, 2008).	55
4.5 Dirección de flujo y carga hidráulica (msnm), simulación de 17532 días correspondientes a diciembre de 2030.	56
4.6 Abatimiento en metros desde el inicio de la simulación (enero 1983) hasta diciembre de 2030.	57
4.7 Profundidad del nivel freático en metros en abril de 2010 a) calculada b) observada.	57
4.8 Profundidad del nivel freático en metros en noviembre de 2010 a) calculada b) observada.	58
4.9 Profundidad del nivel freático en metros en abril de 2011 a) calculada b) observada.	58
4.10 Entradas anuales al sistema (Mm ³).	60
4.11 Salidas anuales al sistema (Mm ³).	60
4.12 Entradas y salidas totales anuales al sistema (Mm ³).	61
4.13 Diferencia entre las entradas y las salidas anuales al sistema (Mm ³).	61
4.14 Entradas acumuladas (Mm ³).	62
4.15 Salidas acumuladas (Mm ³).	62
4.16 Entradas y salidas acumuladas totales al sistema (Mm ³).	63
4.17 Diferencia entre las entradas y las salidas acumulada (Mm ³).	63
4.18 Dirección de flujo y carga hidráulica (msnm), calculado al año 2030.	65
4.19 Abatimiento en metros desde el inicio de la simulación (enero 1984) hasta diciembre de 2030.	65
4.20 Profundidad del nivel freático (m) calculada en noviembre de 2008.	66
4.21 Profundidad del nivel freático (m) observada en noviembre de 2008.	66

4.22 Profundidad del nivel freático (m) calculada en marzo de 2009.	67
4.23 Profundidad del nivel freático (m) observada en marzo de 2009.	67
4.24 Profundidad del nivel freático (m) calculada en noviembre de 2009.	68
4.25 Profundidad del nivel freático (m) observada en noviembre de 2009.	68
4.26 Profundidad del nivel freático (m) calculada en abril de 2010.	69
4.27 Profundidad del nivel freático (m) observada en abril de 2010.	69
4.28 Profundidad del nivel freático (m) calculada en noviembre de 2010.	70
4.29 Profundidad del nivel freático (m) observada en noviembre de 2010.	70
4.30 Profundidad del nivel freático (m) calculada en abril de 2011.	71
4.31 Profundidad del nivel freático (m) observada en abril de 2011.	71
4.32 Entradas anuales al sistema (Mm ³).	73
4.33 Salidas anuales al sistema (Mm ³).	73
4.34 Entradas y salidas totales anuales al sistema (Mm ³).	74
4.35 Diferencia entre las entradas y las salidas anuales al sistema (Mm ³).	74
4.36 Entradas acumuladas (Mm ³).	75
4.37 Salidas acumuladas (Mm ³).	75
4.38 Entradas y salidas acumuladas totales al sistema (Mm ³).	76
4.39 Diferencia entre las entradas y las salidas acumulada (Mm ³).	76
4.40 Superficie del basamento impermeable calculada con los puntos de profundidad conocida en msnm.	78
4.41 Modelo tridimensional de la zona de estudio.	78
4.42 Carga inicial en metros sobre el nivel del mar correspondiente a abril de 2010.	79
4.43 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo integrado en abril de 2011.	80
4.44 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo integrado en noviembre de 2010.	81
4.45 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo de Guadalupe en abril de 2011.	82
4.46 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo de Guadalupe en noviembre de 2010.	83
4.47 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo de Ojos Negros en abril de 2011.	84
4.48 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo de Ojos Negros en noviembre de 2010.	85
4.49 Dirección de flujo en abril de 2011.	86
4.50 Resultado de la simulación de 365 días para el acuífero Guadalupe, carga hidráulica en metros sobre el nivel del mar y dirección del flujo.	87
4.51 Resultado de la simulación de 214 días para el acuífero Guadalupe, carga hidráulica en metros sobre el nivel del mar y dirección del flujo.	88
4.52 Resultado de la simulación de 365 días para el sistema Ojos Negros-Real del Castillo, carga hidráulica en metros sobre el nivel del mar y dirección del flujo. ...	89
4.53 Resultado de la simulación de 214 días para el sistema Ojos Negros-Real del Castillo, carga hidráulica en metros sobre el nivel del mar y dirección del flujo. ...	90

1 INTRODUCCIÓN

El agua, el medio en donde se desarrolló la vida como la conocemos, le ha dado forma a la faz de la Tierra, los hombres antiguos lo imaginaban como uno de los elementos que forman todo lo que existe en el universo, es una sustancia con propiedades únicas que han sido el objeto de estudio de científicos de todas las épocas, es un recurso esencial para los ecosistemas y su disponibilidad ha sido clave para el asentamiento y desarrollo de las civilizaciones humanas.

El agua siempre ha sido utilizada en todas las actividades humanas y actualmente debido al incremento de la población, su demanda y consumo han aumentado ocasionando una explotación desmedida de este valioso recurso para satisfacer las necesidades de la sociedad. Desafortunadamente, el manejo de los recursos hídricos no se ha hecho de manera sustentable o previsoría para garantizar el abasto de agua en el futuro.

Debido a su calidad, no toda el agua es apta para el consumo humano, tan solo el 2.5% del agua en el mundo es agua dulce, de la cual 30% (10 millones de km³) es agua subterránea.

En México 37% del agua destinada para consumo es de origen subterránea, lo equivalente a 29.5 miles de millones de m³/año en 2008, de los cuales 58% son extraídos de acuíferos sobreexplotados. Los acuíferos proveen una tercera parte del agua destinada al uso agrícola y un 62.5% del abastecimiento público del país y del año 2001 al 2008 ha aumentado en un 19% el consumo de agua subterránea.

Los acuíferos no actúan simplemente como fuentes de agua, sino también como vasos almacenadores de agua, acueductos y plantas de tratamiento naturales. México se divide en 653 acuíferos, de los cuales 101 son sobreexplotados, 16 presentan intrusión salina y 32 han sido identificados con presencia de suelos salinos y agua salobre.

La sobreexplotación de un acuífero ocurre cuando la tasa de extracción es mayor a la tasa de recarga. La sobreexplotación prolongada puede llevar a un estado de grave deterioro para los acuíferos con consecuencias graves para la economía y la vida de la población dependiente del acuífero.

Baja California se caracteriza por ser una zona con baja precipitación pluvial y altos índices de evaporación, estas condiciones sumadas a la explotación de los acuíferos para el consumo humano y la poca disponibilidad de aguas superficiales, lo hacen un estado con graves problemas de abatimiento en los acuíferos (CONAGUA, 2010).

El Valle de Guadalupe en Baja California es una zona económicamente importante ya que es la zona vinícola más productiva de México y depende completamente del acuífero. La ciudad de Ensenada satisface parcialmente sus necesidades de agua con recursos del acuífero del Valle de Guadalupe. Las principales fuentes de recarga del acuífero del Valle de Guadalupe son la sierra Juárez, el río Guadalupe. Mientras que la recarga del acuífero permanece relativamente constante, las obras activas de aprovechamiento del acuífero han aumentado de 62 en 1967 a 418 en 1998 (Campos, 2008).

La zona presenta una precipitación media anual de 308 mm (Campos, 2008) pero la CONAGUA en el 2009 reporta una precipitación media anual de 350 mm. Se estima que la recarga directa es de entre 6 y 25% de la precipitación (Kretzschmar, 2003).

La explotación del acuífero del Valle de Guadalupe ha sobrepasado su recarga natural, lo que ha provocado una disminución en el nivel freático. Actualmente no hay suficientes estudios hidrogeológicos que permitan una planeación para el manejo sustentable del acuífero de Valle de Guadalupe (Campos, 2008).

La economía del Valle de Guadalupe depende principalmente de la agricultura, principalmente viñedos y en 1999 se producía el 95% del vino de México por empresas establecidas en dicha región, además de la producción vinícola, el Valle de Guadalupe produce una cantidad importante de aceitunas y aceite de oliva, y un factor limitante para el crecimiento económico de la región es la disponibilidad del agua (Espejel *et al.*, 1999), por lo tanto la importancia del acuífero queda implícita, ya que las aguas superficiales en la región son efímeras, ocurriendo solamente en los periodos de precipitación.

Según la CONAGUA, en el 2009 el balance hídrico del acuífero de Valle de Guadalupe corresponde al siguiente: la recarga total media anual es de 23.9 Mm³ al

año, mientras que el volumen anual de agua subterránea concesionado es de 43.36 Mm³ al año, lo que se traduce en un déficit anual de 19.46 Mm³ de agua.

El valle de Ojos Negros es una zona agrícola importante ya que sus productos se comercializan tanto en México como en los Estados Unidos de América, los cuales incluyen alfalfa, cebolla, sandía, avena y vid (Ponce, 2000). En esta zona se encuentran un total aproximado de 2076 ha sembradas y cuyo riego depende de la extracción de agua del acuífero.

De acuerdo con la CONAGUA, en el 2009 el balance hídrico del acuífero Ojos Negros es el siguiente: la recarga total media anual es de 19 Mm³ al año, mientras que el volumen anual de agua subterránea concesionado es de 27.5 Mm³ al año, lo que se traduce en un déficit anual de 8.5 Mm³ de agua.

La modelación hidrogeológica es una herramienta valiosa para comprender la situación actual del acuífero y mejorar el aprovechamiento de los recursos hídricos de la región pensando en la sustentabilidad del mismo, ya que la vida y la economía de los habitantes de esa región están íntimamente ligadas al agua bajo sus pies.

1.1 Objetivos

- Construcción de un modelo hidrogeológico integrado de los acuíferos de la cuenca de Guadalupe ubicada en Ensenada, Baja California.
- Calibración del modelo y caracterización hidráulica regional a partir de observaciones piezométricas.
- Simulación y predicción del movimiento de las aguas subterráneas bajo diferentes escenarios de gestión.

1.2 Hipótesis

La ecuación diferencial general de los acuíferos y los algoritmos informáticos utilizados para resolverla permite conocer y predecir de una manera confiable el comportamiento del nivel freático de los acuíferos.

Los acuíferos de Guadalupe, Real del Castillo y Ojos Negros presentan conexiones hidráulicas significativas entre ellos.

La recarga en los acuíferos ocurre de forma instantánea como una fracción de la precipitación en la superficie superior del acuífero.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es una serie de procesos de movimiento y transporte de agua en cualquiera de sus estados físicos entre la corteza continental, la corteza oceánica y la atmósfera (Bear y Cheng, 2010). Gracias a la radiación solar, el agua cambia de fase continuamente entre los diferentes reservorios que componen el ciclo hidrológico (Fitts, 2002), a continuación se describirán algunos de los procesos que componen el ciclo.

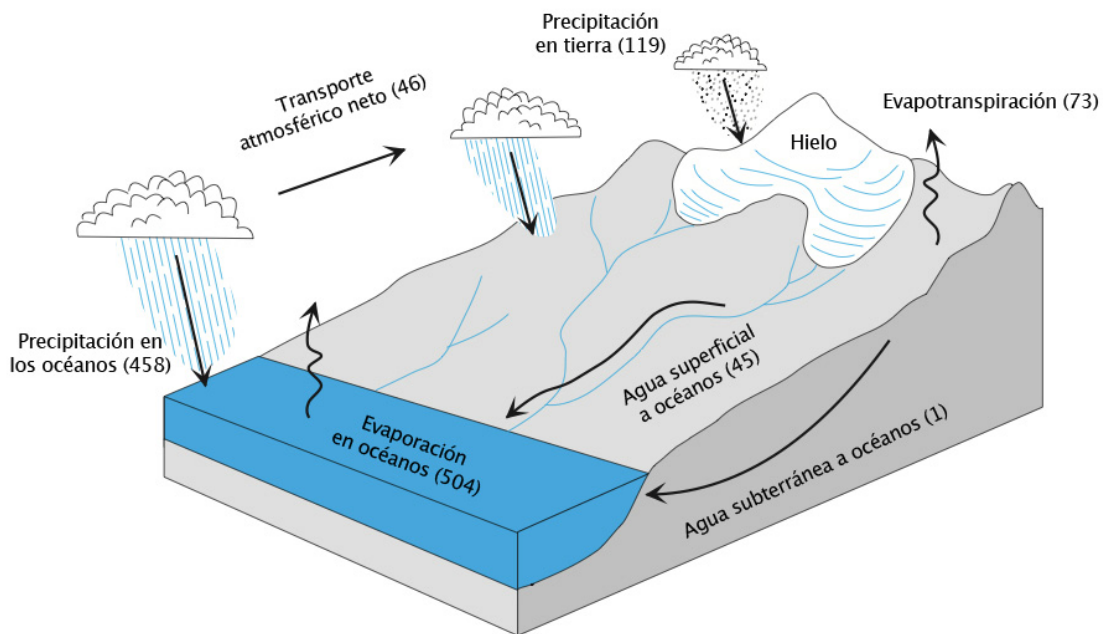


Figura 2.1 Ciclo hidrológico global. Los números entre paréntesis indican los flujos en miles de km^3 al año. Modificado de Fitts, 2002.

2.1.1 Evapotranspiración

La evaporación es el proceso en el cual el agua pasa de estado líquido a gaseoso y la transpiración es la evaporación producto de la actividad biológica, debido a la dificultad en la medición de ambos procesos, se agrupan en la evapotranspiración

(Fitts, 2002). La evapotranspiración en el agua subterránea decae linealmente con los incrementos en la profundidad de la superficie freática hasta llegar a cero, profundidad denominada profundidad de extinción (Shah *et al*, 2007).

Profundidad de extinción (cm)			
Tipo de suelo	Descubierto	Pasto	Bosque
Arena	50	145	250
Arena arcillosa	70	170	270
Franco arenoso	130	230	330
Franco arcillo arenoso	200	300	400
Arcilla arenosa	210	310	410
Franco	265	370	470
Arcilla limosa	335	430	530
Franco arcilloso	405	505	610
Franco limoso	420	515	615
Limo	430	530	630
Franco arcillo limoso	450	550	655
Arcilla	620	715	820

Tabla 2.1 Profundidad de extinción para diferentes coberturas y tipos de suelo (Shah, *et al*, 2007).

2.1.2 Transporte atmosférico de agua

La atmósfera contiene hasta un 1% en volumen de agua en cualquier estado (Poehls y Smith, 2009), el cual se encuentra en constante movimiento y cambio de fase. En general, el flujo de agua atmosférico se mueve de las zonas oceánicas a las zonas continentales, debido a que generalmente la evaporación es mayor que la precipitación en los océanos y en tierra ocurre lo contrario (Fitts, 2002).

2.1.3 Precipitación

La precipitación es la caída de agua en forma sólida o líquida que ocurre cuando la atmósfera se satura de vapor agua. El enfriamiento de la atmósfera o la entrada de

humedad pueden llevar al aire a saturarse. La precipitación que alcanza la superficie terrestre puede ocurrir como lluvia, nieve, granizo, lluvia engelante, escarcha, llovizna y aguanieve. Se le llama virga a la precipitación que se evapora antes de tocar la superficie (Poehls y Smith, 2009).

2.1.4 Infiltración

La infiltración es el movimiento de agua a través de los poros del suelo no saturado, una vez que el agua infiltrada llega a un acuífero se le llama recarga. Cuando la precipitación excede la tasa de infiltración del suelo, se producen encharcamientos, que a su vez solo pueden contener una cantidad determinada de agua que al excederse produce escurrimiento (Fitts, 2002).

2.1.5 Escurrimiento

Es la precipitación que no infiltra inmediatamente y drena a través de la superficie hasta algún cuerpo de agua. El escurrimiento es espacial y temporalmente muy variado ya que depende del abastecimiento (precipitación, deshielo, etc.) y agotamiento (infiltración, evapotranspiración) así como de diversos factores topográficos y de vegetación (Poehls y Smith, 2009).



Figura 2.2 Flujos que afectan el agua subterránea. Modificado de Fitts, 2002.

2.2 Acuíferos

La palabra acuífero proviene del latín *aqua* que significa agua y *fero* que significa llevar, literalmente “que lleva agua”, entonces se define un acuífero como una formación geológica porosa que contiene agua a una saturación completa y permite el movimiento del agua a través de la formación en condiciones ordinarias (Bear y Cheng, 2010).

La CONAGUA define un acuífero como cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectadas entre si, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo.

Se define también un acuitardo (del latín *tardus*, lento) como una formación geológica relativamente poco permeable adyacente a un acuífero la cual no cede agua

fácilmente mediante pozos o manantiales pero puede transportar agua al acuífero.

La clasificación de los acuíferos se da de acuerdo a la configuración de sus capas en acuíferos libres, confinados y semiconfinados. Un acuífero libre es aquel que se encuentra expuesto a la atmósfera a través de los poros del suelo sobre el acuífero, en un acuífero libre donde el movimiento del agua sea principalmente horizontal, la carga hidráulica es igual al espesor del acuífero. Un acuífero confinado es aquel que se encuentra entre dos formaciones impermeables, el espesor de estos acuíferos se mantiene constante aunque su carga hidráulica varíe. Un acuífero semiconfinado es un acuífero confinado en el cual una o ambas formaciones que lo contienen es un acuitardo.

2.3 Ecuaciones de los acuíferos

El flujo de agua en un acuífero se rige por la ley de Darcy de los medios porosos, que establece que el flujo de agua es proporcional al gradiente hidráulico:

$$q = -K\nabla H \quad (2.1)$$

donde q es el flujo volumétrico unitario, $\nabla H = (\partial H/\partial x, \partial H/\partial y, \partial H/\partial z)$ es el gradiente hidráulico, K es la conductividad hidráulica del medio poroso y x, y, z son las coordenadas espaciales.

El principio de conservación de la materia establece que, en la unidad de tiempo, en un espacio dado la diferencia entre la cantidad de materia que entrada y sale es igual al cambio de almacenamiento dentro del mismo. Este principio se traduce en la siguiente forma matemática:

$$-\nabla \cdot (\rho_w q) + \rho_w w = \frac{\partial(\rho_w \theta)}{\partial t} \quad (2.2)$$

donde ρ_w es la densidad del agua, w es un término de fuente o sumidero en el volumen de control, θ es el contenido de humedad en el medio poroso y t es el tiempo.

La introducción de la ley de Darcy (2.1) en la ecuación de continuidad (2.2),

suponiendo que la densidad del agua es constante, conduce a la siguiente ecuación de transferencia:

$$\nabla \cdot (K\nabla H) + w = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.3)$$

Dado que el acuífero es un medio saturado el contenido de humedad es igual a la porosidad ($\theta = \phi$). Se introduce $S_s = \partial \phi / \partial H$, el coeficiente de almacenamiento específico que define el cambio de volumen de agua por unidad de carga hidráulica, para relacionar la masa de agua contenida en los poros con su energía y dejarla en términos de una sola variable dependiente:

$$\nabla \cdot (K\nabla H) + w = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.4)$$

En un medio heterogéneo y anisotrópico, la conductividad hidráulica es un tensor simétrico:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

pero considerando que x, y, z son las direcciones principales se toma la conductividad como $K = (K_x, K_y, K_z)$ haciendo la ecuación 2.4 de la forma siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + w = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.6)$$

Esta expresión es conocida como la ecuación general de los acuíferos.

2.3.1 Acuíferos libres

En los acuíferos libres se toma la conductividad hidráulica promediada en la

vertical $\bar{K}(x, y) = 1/b \int_0^b K(x, y, z) dz$ donde b es el espesor del acuífero. En éstos la carga hidráulica es la posición misma de la superficie libre medida desde un punto de referencia, normalmente el basamento impermeable, $H = b$. Definiendo la transmisibilidad como $T(H) = \bar{K}(x, y)H$, se deriva una ecuación análoga a (2.6) pero en dos dimensiones:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T(H) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T(H) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + W = S \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.7)$$

donde S es la capacidad de almacenamiento y W es el término de fuente o sumidero. La ecuación 2.7 se conoce como la ecuación de Boussinesq de los acuíferos libres.

2.3.2 Acuíferos confinados

En un acuífero confinado, H es la carga piezométrica y b es el espesor del acuífero, al igual que en el libre se supone que el flujo es horizontal, la ecuación se modifica de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{W}{T(x, y)} = \frac{S}{T(x, y)} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.8)$$

donde $T(x, y) = \bar{K}(x, y)b$ y $S = S_s b$.

2.4 Caracterización hidráulica

2.4.1 Extracción por pozos

La ecuación de Theis de la extracción de agua por pozos se deduce utilizando la ecuación general de los acuíferos (2.6) con $W = 0$, transformándola a coordenadas polares ($r = \sqrt{x^2 + y^2}$) y suponiendo un medio homogéneo e isótropo a fin de que los cambios en el ángulo sean despreciables, se expresa de la siguiente forma haciendo $H(x, y, t) = H(r, t)$:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H}{\partial r} \right) = \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.9)$$

Si se sujeta la ecuación a la siguiente condición inicial:

$$H(r, 0) = H_0 \quad (2.10)$$

y a las condiciones de frontera:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left(r \frac{\partial H}{\partial r} \right) = \frac{Q_0}{2\pi r}, t > 0 \quad (2.11)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} H = H_0, t > 0 \quad (2.12)$$

donde Q_0 es el caudal de extracción de un pozo, y se define el abatimiento $s(r, t)$:

$$s(r, t) = H_0 - H(r, t) \quad (2.13)$$

se tiene la siguiente solución analítica:

$$H_0 - H(r, t) = \frac{Q_0}{4\pi T} W_p \left(\frac{Sr^2}{4Tt} \right) \quad (2.14)$$

donde $W_p(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-v}}{v} dv$ es la función de pozo.

Esta solución de abatimiento local permite identificar los parámetros del acuífero S y K , a través de pruebas de bombeo.

No obstante, la identificación de los parámetros del sistema puede estar influenciada por la naturaleza de los acuíferos. Generalmente un acuífero en producción es alimentado por capas que almacenan y le suministran agua.

2.4.2 Sistemas acuífero-acuitardo

Un acuitardo se define como acuífero semipermeable, en otras palabras es una formación en la cual la transferencia de agua es muy lenta en comparación con un acuífero. Este se modela en el término de sumidero como sigue:

$$W = \frac{H_0 - H}{R_a} \quad (2.15)$$

donde H_0 es la carga hidráulica del acuífero superior, la resistencia de la capa semipermeable $R_a = b'/K'$ siendo b' , K' su espesor y conductividad hidráulica respectivamente. Introduciendo W en la ecuación 2.9 se tiene lo siguiente:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H}{\partial r} \right) + \frac{H_0 - H}{\lambda_c^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.16)$$

donde $\lambda_c = \sqrt{R_a T}$, utilizando las condiciones iniciales y de frontera de la ecuación 2.9 se obtiene la siguiente solución analítica para el abatimiento:

$$H_0 - H(r, t) = \frac{Q_0}{2\pi T} W_p \left(\frac{Sr^2}{4Tt}, \frac{r}{\lambda_c} \right) \quad (2.17)$$

donde $W_p(u, p) = \int_u^\infty \frac{e^{-v-p^2/4v}}{v} dv$ es una función modificada de pozo.

Esta solución permite identificar los parámetros fundamentales del acuífero y su acuitardo. Es decir, contando con datos del abatimiento en el tiempo y considerando la información geohidrológica, la capacidad de almacenamiento (S), la conductividad hidráulica (K), la escala que define el sistema acuífero-acuitardo (λ_c), podrán ser identificados.

Adicionalmente al problema hidráulico de los acuíferos, se aportarán elementos para la modelación de las sustancias que transporta el agua en los mismos. Enseguida, de breve manera, se exponen las ecuaciones diferenciales que resultan de los principios de conservación clásicos.

2.5 Caracterización química

2.5.1 Transporte de solutos

El transporte de solutos se deduce del principio de conservación de masa. La ecuación resultante es la siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D_m \nabla C) - \mathbf{v} \cdot \nabla C \quad (2.18)$$

donde C es la concentración de la especie, D_m la difusividad del soluto en el disolvente y \mathbf{v} la velocidad del disolvente. La ecuación así establecida es denominada la ecuación de advección-difusión en tres dimensiones.

En la ecuación 2.18 no se toman en cuenta los efectos de las reacciones químicas y de la adsorción de los solutos en el medio poroso.

2.6 MODFLOW

MODFLOW (*Modular Finite-Difference Groundwater Flow Model*) es un algoritmo público utilizado para simular el flujo de agua subterráneo que permite la modelación de acuíferos libres y confinados en una, dos o tres dimensiones en régimen permanente y transitorio, y es uno de los más ampliamente utilizados, su base es la ecuación 2.6. MODFLOW también sirve de base para la modelación de transporte de solutos por ejemplo MT3D y MOC3D (Winston, 1999) teniendo como base la ecuación 2.18. MODFLOW ha sido ampliamente utilizado en la modelación de acuíferos, poniendo como ejemplo los siguientes trabajos para realizar simulaciones en distintas partes del mundo con resultados razonables:

San Juan y Kolm (1996) caracterizaron y conceptualizaron el sistema hidrológico e hidrogeológico en la región de Jackson Hole, Wyoming, EE.UU., utilizando ARC/INFO y MODFLOW y aseguraron la viabilidad en la utilización de sistemas de información geográficos para el desarrollo de modelos hidrogeológicos; Sophocleus y Perkins (2000) utilizaron MODFLOW para describir las interacciones corriente-acuífero y la extracción por pozos en Kansas, EE.UU.; en Minnesota, EE.UU., se creó un modelo hidrogeológico regional del lago glacial Agassiz (Reeve *et al.*, 2001); Gedeon *et al.* (2007) reportan haber utilizado MODFLOW para crear un modelo de flujo de agua subterránea en un sistema acuífero-acuitardo en el noreste de Bélgica; en Marruecos se ha utilizado para modelar flujo de agua en un acuífero con transporte de contaminantes (Yaouti *et al.*, 2008); en Zimbawe acoplado modelos de lluvia-escurrimiento para obtener el balance hídrico (de Hamer *et al.*, 2008); en la región de Death Valley, Nevada, EE.UU. (Carroll *et al.*, 2009); Yang *et al.* (2009) utilizaron el modelo para determinar el impacto hidrogeológico de la construcción de un túnel subterráneo que desvía las aguas de escorrentía a un reservorio en Taiwan; en la India se utilizó para delimitar zonas de protección en la cuenca de Tirupur (Saravaran *et al.*, 2011); en Dinamarca ha sido parte de la modelación del ciclo hidrológico histórico 1850-2003 para estudiar el impacto de la urbanización y el clima en el agua subterránea permitiendo escenarios en el comportamiento del acuífero de Copenhagen (Jeppensen *et al.*, 2011).

3 METODOLOGÍA

3.1 Descripción de la zona de estudio

3.1.1 Ubicación

La cuenca hidrológica de Guadalupe, se ubica en el noroeste del estado de Baja California a 37 km de la ciudad de Ensenada, entre los paralelos 31°51' y 32°15' de latitud norte, y los meridianos 115°52' y 116°51' de longitud oeste (Beltrán, 2001). La cuenca tiene una superficie de aportación de 2,380.5 km² y se encuentra delimitada al Norte por la cuenca hidrológica Tecate-El Carrizo y Descanso-Los Medanos, al Este por la cuenca hidrológica de la Laguna Salada, al Sur por las cuencas hidrológicas Ensenada-El Gallo y San Carlos, y al Oeste por el Océano Pacífico (SEMARNAT, 2007).



Figura 3.1 Ubicación de la cuenca de Guadalupe

Las acuíferos de valle de Guadalupe, de Real del Castillo y de Ojos Negros se localizan aproximadamente entre las latitudes 32° y 31.80° y las longitudes oeste 116.33° y 116.08° , delimitados administrativamente por la CONAGUA pero para fines de este trabajo se tomará solo la parte de los acuíferos en los valles como se muestra en la Figura 3.2.

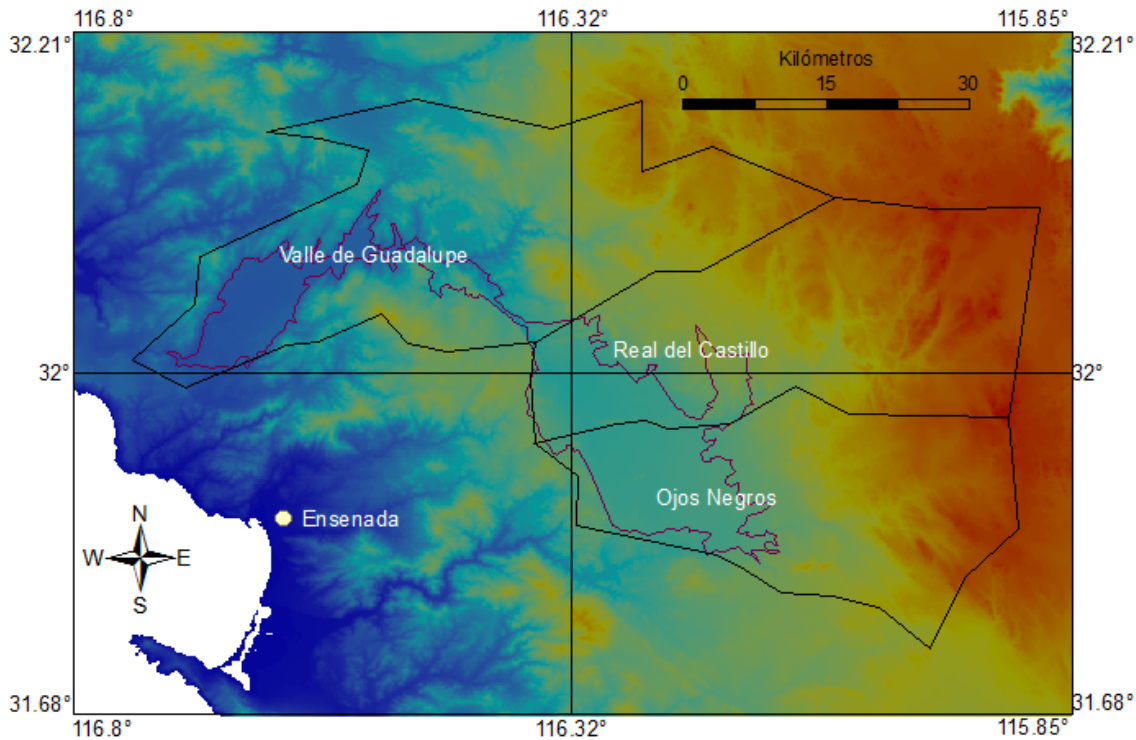


Figura 3.2 Ubicación de los acuíferos, en negro los límites administrativos y en morado los límites objeto de estudio en el presente trabajo.

3.1.2 Fisiografía

El acuífero del Valle de Guadalupe está completamente contenido dentro del área de drenaje del Arroyo Guadalupe. Este acuífero se encuentra localizado en un valle inter montano, que cuenta con una topografía superficial cuyas elevaciones medias están en el rango de 300 a 400 m sobre el nivel del mar (msnm), cuenta con un drenaje superficial predominante del tipo dendrítico con dirección hacia el suroeste principalmente y está rodeado por un sistema montañoso que se eleva hasta los 500 y

700 msnm. Hacia el borde este de la zona de estudio se localiza un sistema de montañas conocido como Sierra Blanca, el cual alcanza hasta 1200 msnm (Beltrán, 2001).

La zona de estudio corresponde a la zona este de una cuenca hidrológica de 1094 km² que nace en la sierra Juárez y drena hacia el océano Pacífico. El valle se encuentra separado en dos zonas por el cerro del Talco, ubicándose Real del Castillo al norte y Ojos Negros al sur.

El relieve topográfico de los valles es prácticamente plano, aunque presenta valores de hasta 650 msnm en el punto más bajo y 800 msnm el punto más alto en el suroeste del valle, en al pie de monte de la Sierra Juárez. En general el terreno tiene una elevación de 700 msnm. Destaca la presencia del Cerro del Talco (5 km de largo y 100 m sobre la superficie del valle).

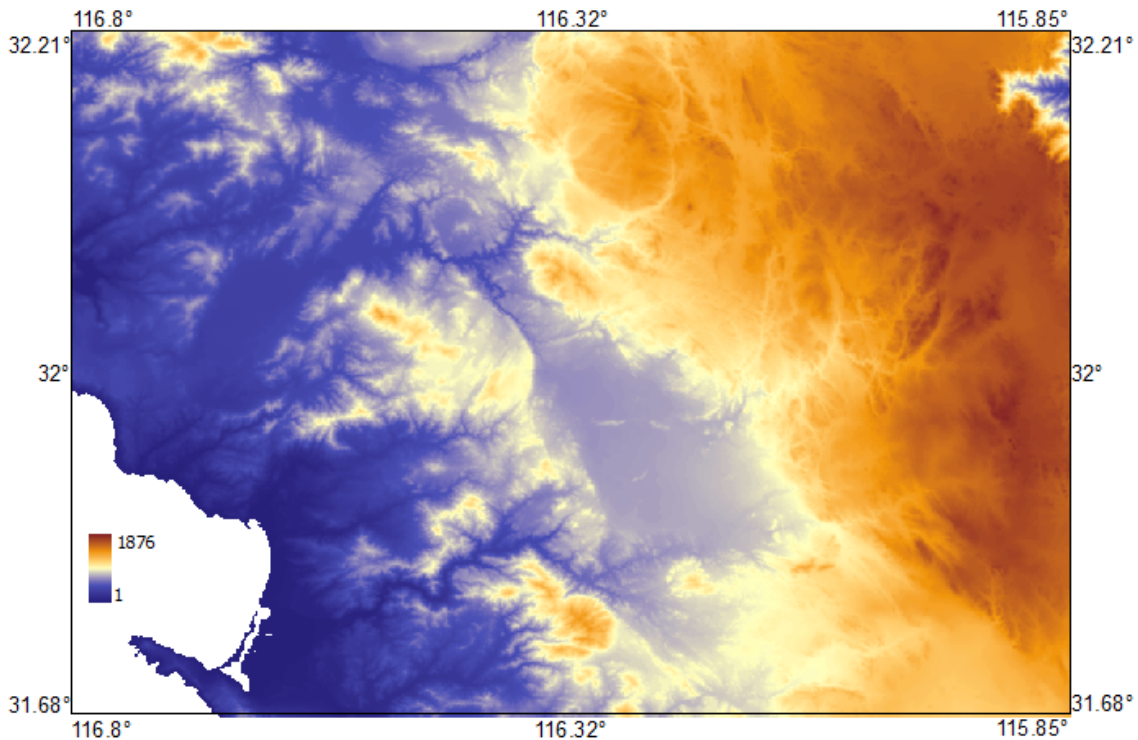


Figura 3.3 Modelo digital de elevación de la zona en metros sobre el nivel del mar.

3.1.3 Clima

El clima en la región es seco templado, subtipo seco mediterráneo, invierno templado y con lluvia, y con veranos cálidos y secos.

En el área de estudio no se sobrepasan los 350 mm de precipitación promedio anual. Las lluvias se presentan principalmente en invierno, siendo enero el mes de mayor precipitación. La precipitación promedio anual es de aproximadamente 270 mm (Salgado, 2010).

La temperatura media anual varía entre 12.9 y 25.5°C. Existen dos temporadas marcadas en la zona de estudio, la fría (invierno) y la cálida (verano); la temperatura promedio mensual más alta se presenta en julio y agosto con un valor entre 24 y 25°C; el promedio mensual más bajo corresponde a enero con un valor que fluctúa de 9 a 12°C.

La evaporación media anual presenta valores mayores en la cuenca alta que incluye los valles de Ojos Negros y Real del Castillo, que van de 1400 mm a 1550 mm. En la cuenca media que integra al Valle de Guadalupe, la evaporación es del orden de 1700 mm.

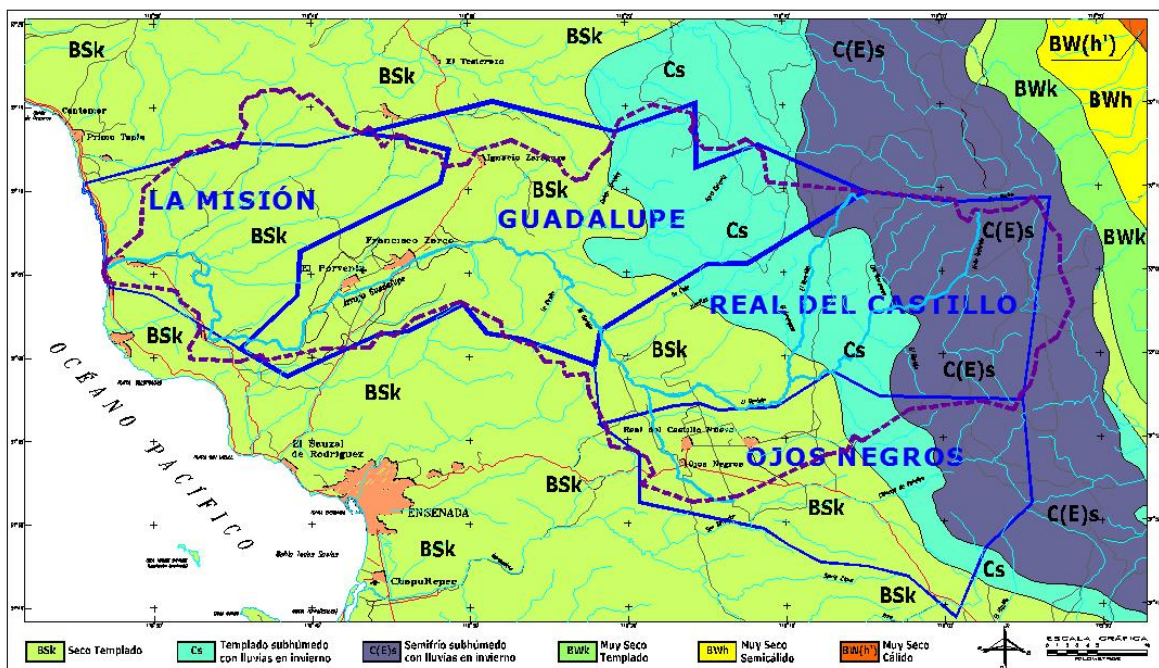


Figura 3.4 Tipos de clima en la cuenca de Guadalupe (Salgado, 2010).

3.1.4 Hidrografía

Los arroyos que constituyen la cuenca de Guadalupe bajan de la Sierra Juárez, desde elevaciones de alrededor de 2000 msnm y de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2007) hay una disponibilidad de agua superficial en la cuenca es de 2.31 Mm³ anuales.

El arroyo Guadalupe es una corriente efímera que recorre 115 km en su cauce principal de este a oeste, es en donde confluyen los escurrimientos superficiales de la cuenca, entre ellos El Barbón (Salgado, 2010) que nace en la vecindad de la laguna Hanson en la sierra Juárez a 1820 msnm y que recorre 38 km a través de los valles de Ojos Negros y Real del Castillo hasta el arroyo Guadalupe (Ponce, 1999).

Al arroyo Guadalupe también se le suman los cauces de los arroyos El Ranchito, Jacalitos, Agua Caliente y Agua Escondida (Salgado, 2010).

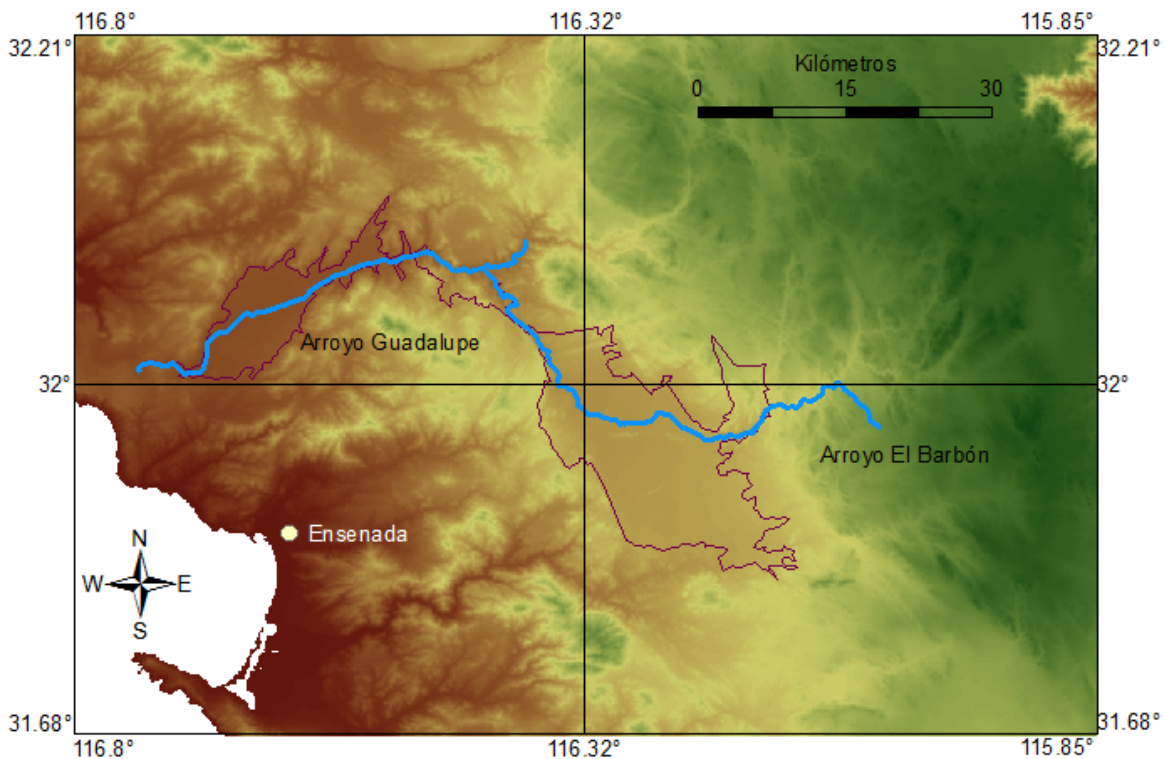


Figura 3.5 Principales corrientes que atraviesan los valles de Ojos Negros y Guadalupe.

3.1.5 Geología

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM), las formaciones geológicas expuestas en la cuenca Guadalupe, el Valle de Guadalupe y su área circundante están representadas por rocas ígneas intrusivas y extrusivas, rocas metamórficas y por depósitos aluviales.

Las rocas ígneas intrusivas son las que afloran con mayor abundancia en la zona de estudio y su vecindad inmediata, están representadas por rocas ígneas cristalinas de origen plutónico, constituidas en orden de su abundancia por granodioritas, granitos, dioritas y gabros.

Las rocas ígneas extrusivas afloran principalmente hacia el oeste de la zona El Porvenir. Estas rocas están constituidas por andesitas y riolitas, tobas andesitas y riolitas, así como por otras rocas ígneas extrusivas no clasificadas.

Las rocas metamórficas, con menor abundancia de afloramiento, están expuestas hacia el este de la zona El Porvenir y se encuentran representadas por esquistos y pizarras.

Los depósitos aluviales integran el acuífero del Valle de Guadalupe y están formados por materiales granulares no consolidados.

Hacia la parte suroeste de la zona El Porvenir, algunos cerros y lomeríos muestran la existencia de conglomerados acomodados a modo de abanicos aluviales medianamente consolidados (Campos, 2008).

El valle Ojos Negros se considera un graben o fosa tectónica, depresión delimitada en ambos lados por fallas. El valle está separado por una serie de colinas (cerro del Talco) formadas por rocas ígneas ultramáficas y metamórficas que corren en dirección este-oeste.

El valle Ojos negros está rodeado por rocas metamórficas prebatolíticas del tipo esquistos y gneis, las cuales están en contacto con rocas batolíticas tales como tonalita, granodiorita, gabro, y hacia el este del valle, andesita del cretácico de la formación Alisitos.

El graben que da lugar al valle Ojos Negros está cubierto por depósitos de aluviación. Al norte de la subcuenca Real de Castillo afloran depósitos fluviales del

cuaternario, formando terrazas constituidas por areniscas que destacan sobre un basamento metamórfico del paleozoico y rocas ígneas como tonalitas, granodioritas, dioritas y gabro. Rocas de basamento afloran en toda la región, en las márgenes y colinas interiores del valle.

Los esquistos forman una cordillera de 100 m de altura y 5 km de longitud en el lado noroeste del valle, la cual es conocida como cerro Portezuelo o del Talco.

El gneis forma una cordillera de 2.5 de largo y 90 m sobre la superficie del valle, ubicada en la parte centro sur y constituye el Cerro Doña Eulalia.

Las rocas ígneas que afloran en el valle son tonalitas, granodioritas, diques y gabro.

La tonalita es la roca intrusiva más abundante, forma algunas montañas pequeñas de aproximadamente 50 m de altura en el extremo centro-sur del valle. La tonalita muestra intemperismo intenso, siendo una de las rocas que mayor cantidad de sedimento aporta a las subcuencas y conforma un frente de montaña a la orilla sureste del valle.

La granodiorita es la segunda unidad ígnea de mayor abundancia, forma parte del escarpe de la falla de Ojos Negros en la región suroeste, conforma también, una cordillera y algunas montañas sobre el borde central-este del valle. El intemperismo de la granodiorita ha producido grandes cantidades de cantos rodados, resistentes y de color claro.

Los diques que se encuentran en el valle son de tres tipos: metariolita, aplita y pegmatita. Las dimensiones de los diques es variable, los más grandes pueden llegar a medir más de 13 m de ancho y 5 km de longitud.

La cuarta unidad ígnea, el gabro, forma tres cuerpos que tienen aproximadamente 250 m de altura y más de 3 km de longitud, en el extremo sureste del valle.

El principal rasgo estructural en el área es la falla de Ojos Negros, la cual es una falla normal casi vertical localizada en el margen oeste del valle. La falla de Ojos Negros forma un escarpe de aproximadamente 350 m de altura. La segunda estructura importante es la falla San Miguel, localizada a lo largo del margen oriental del valle. Las fallas de Ojos Negros y San Miguel delimitan el graben y son responsables de la

depresión topográfica del valle (Campos, 2002).

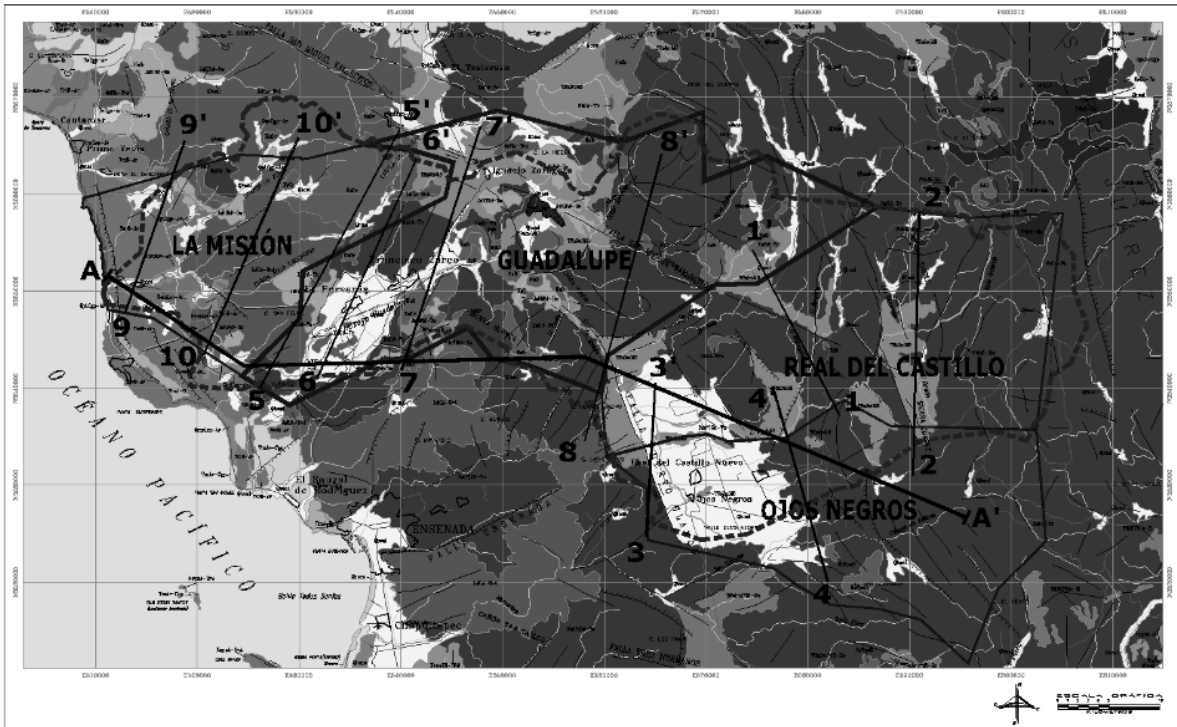


Figura 3.6 Geología superficial (Salgado, 2010).

3.1.6 Hidrogeología

Los acuíferos de Valle de Guadalupe, Real del Castillo y Ojos Negros son resultado de la deposición aluvial sobre valles originados del fallamiento (Figura 3.7). En el Valle de Guadalupe se forman dos depresiones interconectadas, la fosa Calafia y la fosa El Porvenir. Los acuíferos de Ojos Negros y Real del Castillo tienen como frontera entre ellos el Cerro del Talco.

De acuerdo con la CONAGUA (2002) la recarga media anual de los acuíferos de Valle de Guadalupe, Real del Castillo y Ojos Negros es de 23.9, 11.7 y 19 Mm³ respectivamente.

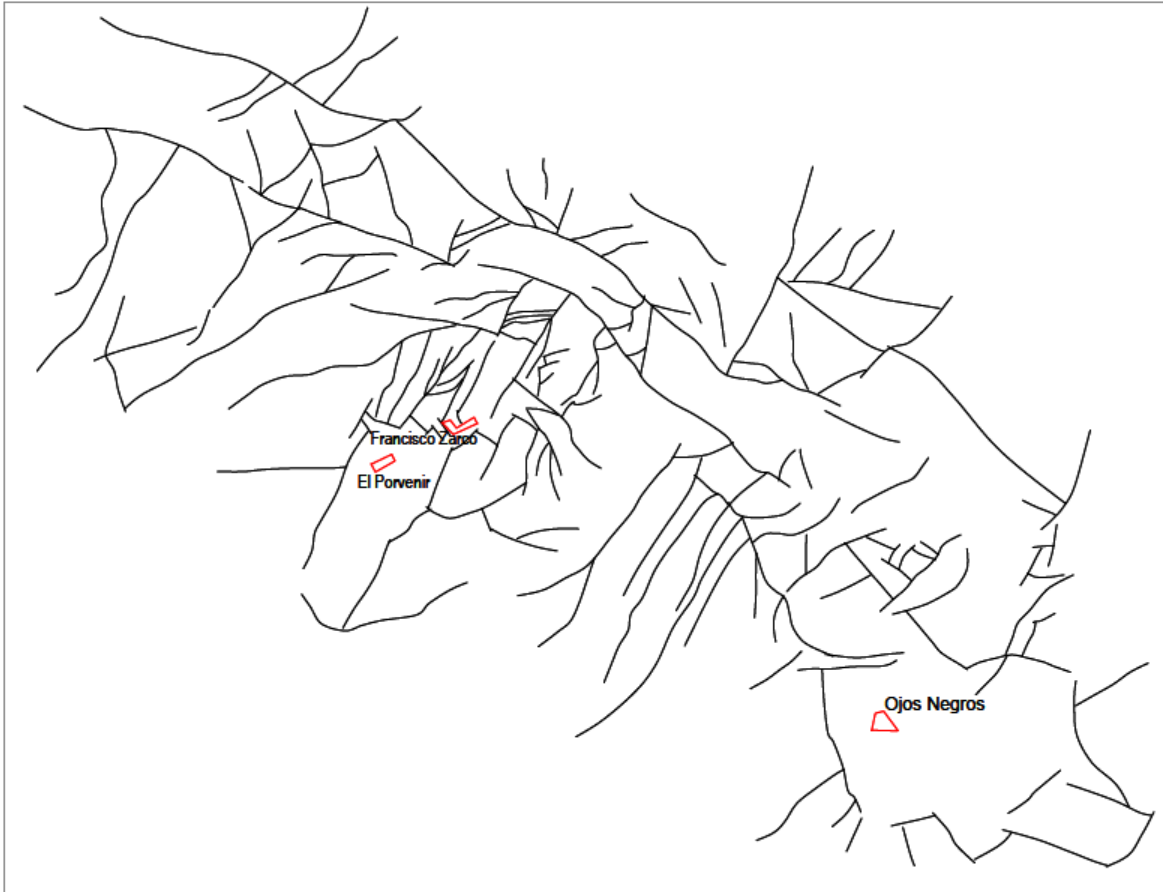


Figura 3.7 Patrón de fallas y fracturas en la cuenca de Guadalupe (Salgado, 2010).

3.2 Comparación entre la solución de Boussinesq y la ecuación general de los acuíferos

Campos (2002, 2008) ha modelado los acuíferos de Ojos Negros y de Valle de Guadalupe utilizando un esquema de diferencias finitas para resolver la ecuación de Boussinesq (2.7). En este trabajo se recrean los modelos de Campos utilizando una versión comercial de MODFLOW denominada Visual MODFLOW v2011.1 y se comparan los resultados obtenidos por ambos modelos para posteriormente simular los escenarios planteados en la Tabla 3.1.

Período	Valle de Guadalupe		Ojos Negros	
	Recarga	Extracción	Recarga	Extracción
	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³
1980-1985	25	24.8	19.3	22.5
1986-1990	22.8	25	21	23
1991-1995	24.8	24.7	22	24.5
1996-2002	23.9	24	19	25
2003-2007	23.5	26	19.5	25
2008-2009	23.9	22	19	25.5
2010-2010	24.7	21	21	26
2011-2013	23.5	24.5	19	26
2014-2017	24	24.8	19.8	26.5
2018-2020	23.8	25	22.5	26.5
2021-2024	25	25.5	19.5	27
2025-2028	23.5	26	20.2	26
2029-2030	25	27	20.2	26

Tabla 3.1 Diferentes escenarios en la extracción anual para ambos modelos.

3.2.1 Valles de Ojos Negros y Real del Castillo

Dominio de simulación

El modelo conceptual de los acuíferos Ojos Negros y Real del Castillo considerado durante este trabajo corresponde al de un acuífero libre de medio heterogéneo, sobre un fondo impermeable de topografía irregular, con flujo horizontal en régimen transitorio. El dominio del modelo tiene en la frontera norte que corresponde a la salida aguas abajo una condición de nivel freático constante de 655 m, las fronteras sur, este y oeste se consideran impermeables. El dominio se dividió en 1147 celdas cuadradas de 500 m de lado conformando un área total de 286.75 km², como se muestra en la Figura 3.8.

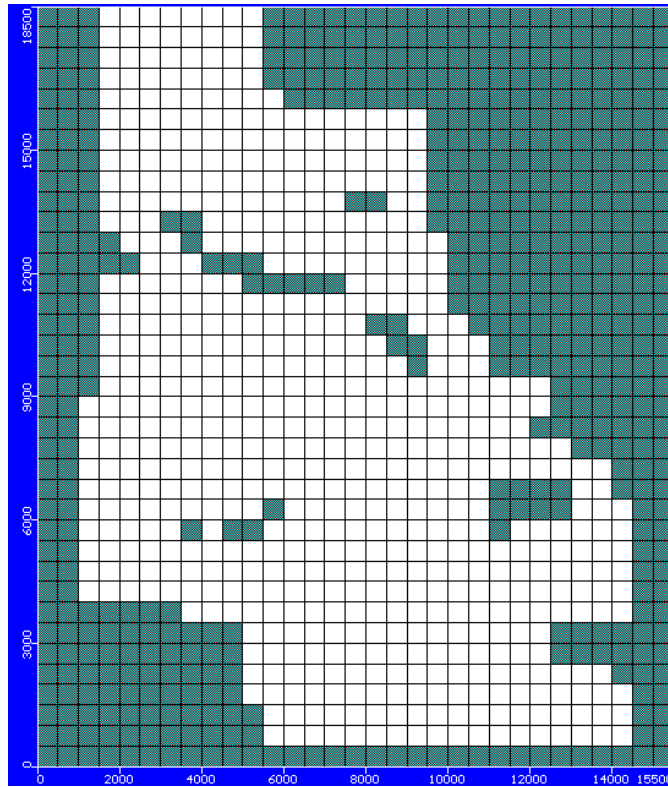


Figura 3.8 Dominio del modelo, donde las celdas en blanco son las de flujo activo y el resto son celdas inactivas frontera del dominio.

Condición inicial

Para las condiciones iniciales en la altura del manto freático se tomó como base una condición de equilibrio del acuífero determinada por Campos (2002) correspondiente a enero de 1983, en la Figura 3.9 se muestran las cargas iniciales.

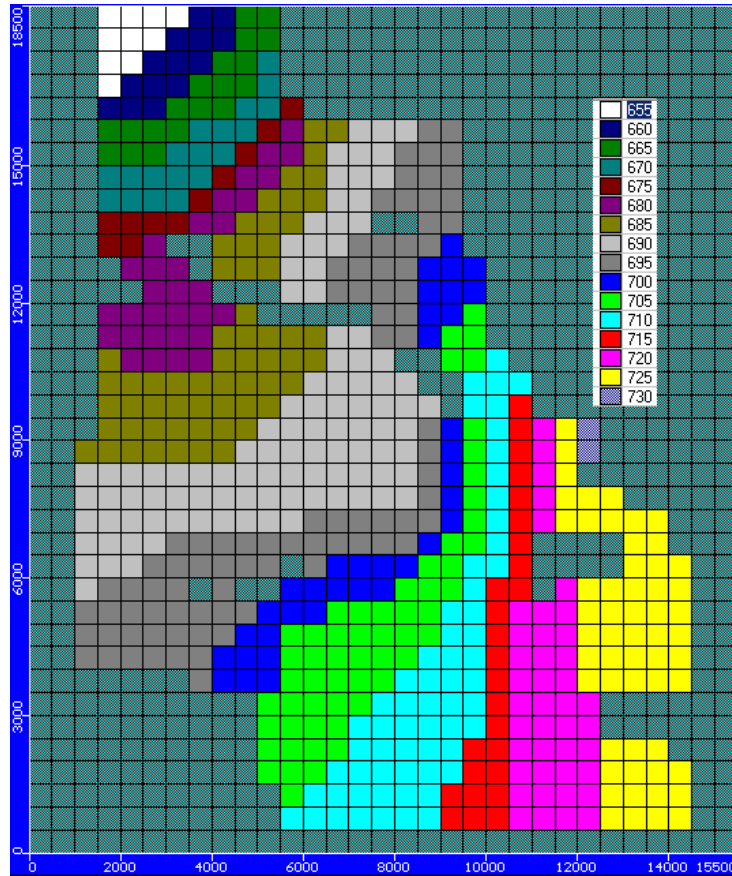


Figura 3.9 Condiciones iniciales de carga piezométrica en msnm (enero 1983).

Capacidad de almacenamiento

De acuerdo con los estudios realizados por Campos (2002) el coeficiente de almacenamiento recomendado para ambos acuíferos es $S=0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y estimando el coeficiente de almacenamiento específico con el espesor promedio del acuífero (110 m) se obtiene un valor $S_s=0.0012 \text{ m}^{-1}$ (se han realizado simulaciones de prueba con diferentes valores variando de 0.0007 hasta 0.0014 con resultados similares).

Conductividad hidráulica

La asignación de los valores de conductividad hidráulica se realiza basada en información tomada de Campos (2002). La Figura 3.10 muestra un mapa con las conductividades hidráulicas del acuífero.

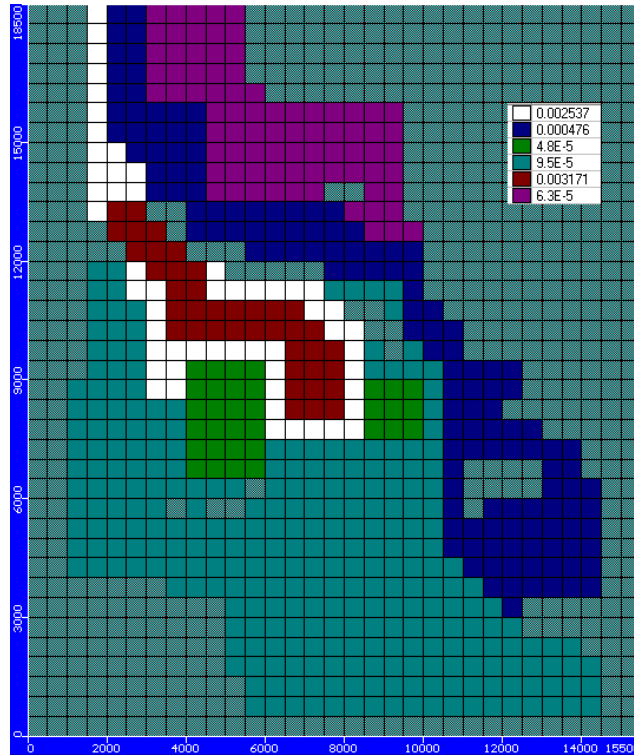


Figura 3.10 Mapa de conductividad hidráulica en m/s, las celdas inactivas se consideran impermeables.

Condiciones de frontera

a) Recarga

La recarga se propone homogénea en todo el dominio de la simulación, con valores mostrados en la Tabla 3.2, para obtener la recarga global planteada en el escenario de simulación para el modelo.

Recarga		
Período	Mm ³	mm/año
1980-1985	19.3	135.069
1986-1990	21	146.966
1991-1995	22	153.965
1996-2002	19	132.969
2003-2007	19.5	136.469
2008-2009	19	132.969
2010-2010	21	146.966
2011-2013	19	132.969
2014-2017	19.8	138.568
2018-2020	22.5	157.464
2021-2024	19.5	136.469
2025-2028	20.2	141.36
2029-2030	20.2	141.36

Tabla 3.2 Recarga en mm por año utilizada en el modelo del acuífero de Ojos Negros.

c) Carga hidráulica constante

Se consideran las fronteras sur, este y oeste del modelo como zonas impermeables y la frontera al norte se considera una condición de carga constante de 655 msnm.

d) Extracción mediante pozos

Se introducen al modelo 108 pozos de extracción y la operación de cada uno, suponiendo un volumen de descarga anual de 21.5 Mm³ para el periodo de 1983-1991 y 47.8 Mm³ para el periodo 1992-2001, lo que corresponde a una extracción de 545.41 m³/día y de 1212.6 m³/día respectivamente.

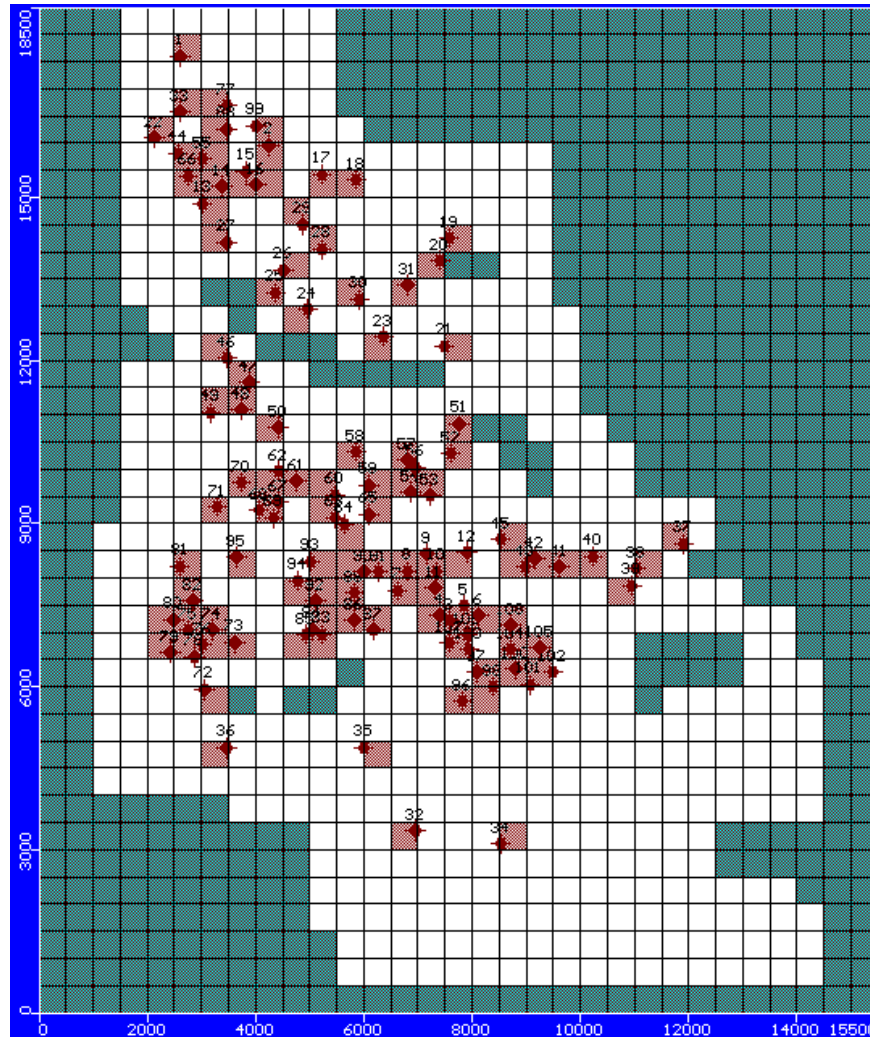


Figura 3.11 Pozos de extracción

Basamento impermeable

De acuerdo con la información recopilada se obtiene la topografía del basamento impermeable (Campos, 2002). La elevación promedio es de 590 msnm (110 m de profundidad respecto a la superficie media del terreno).

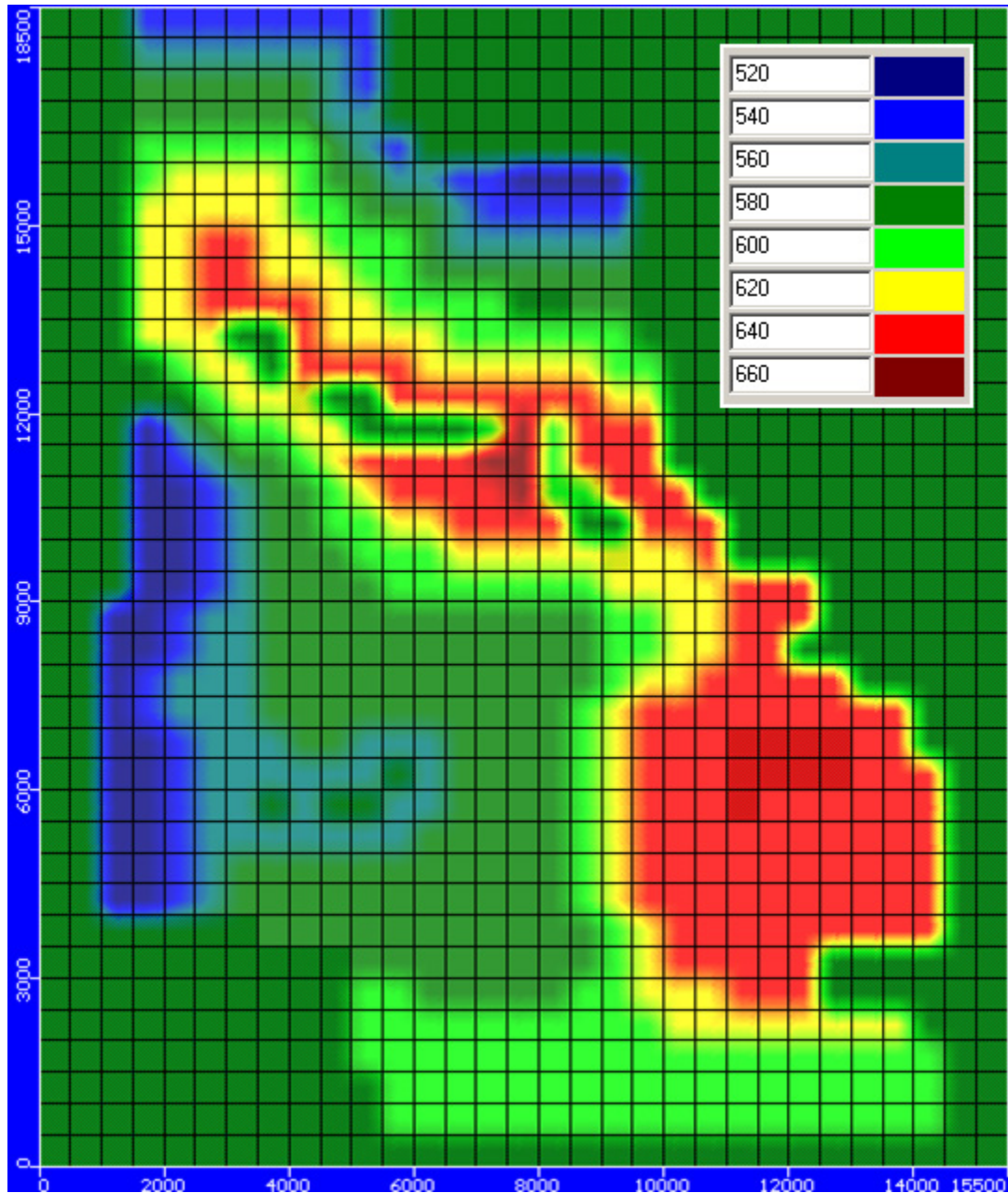


Figura 3.12 Fondo del basamento impermeable en metros sobre el nivel del mar.

Topografía de la superficie

Para la topografía del modelo se utilizan los datos de Campos (2002) a fin de lograr reproducir su modelo de la mejor manera posible.

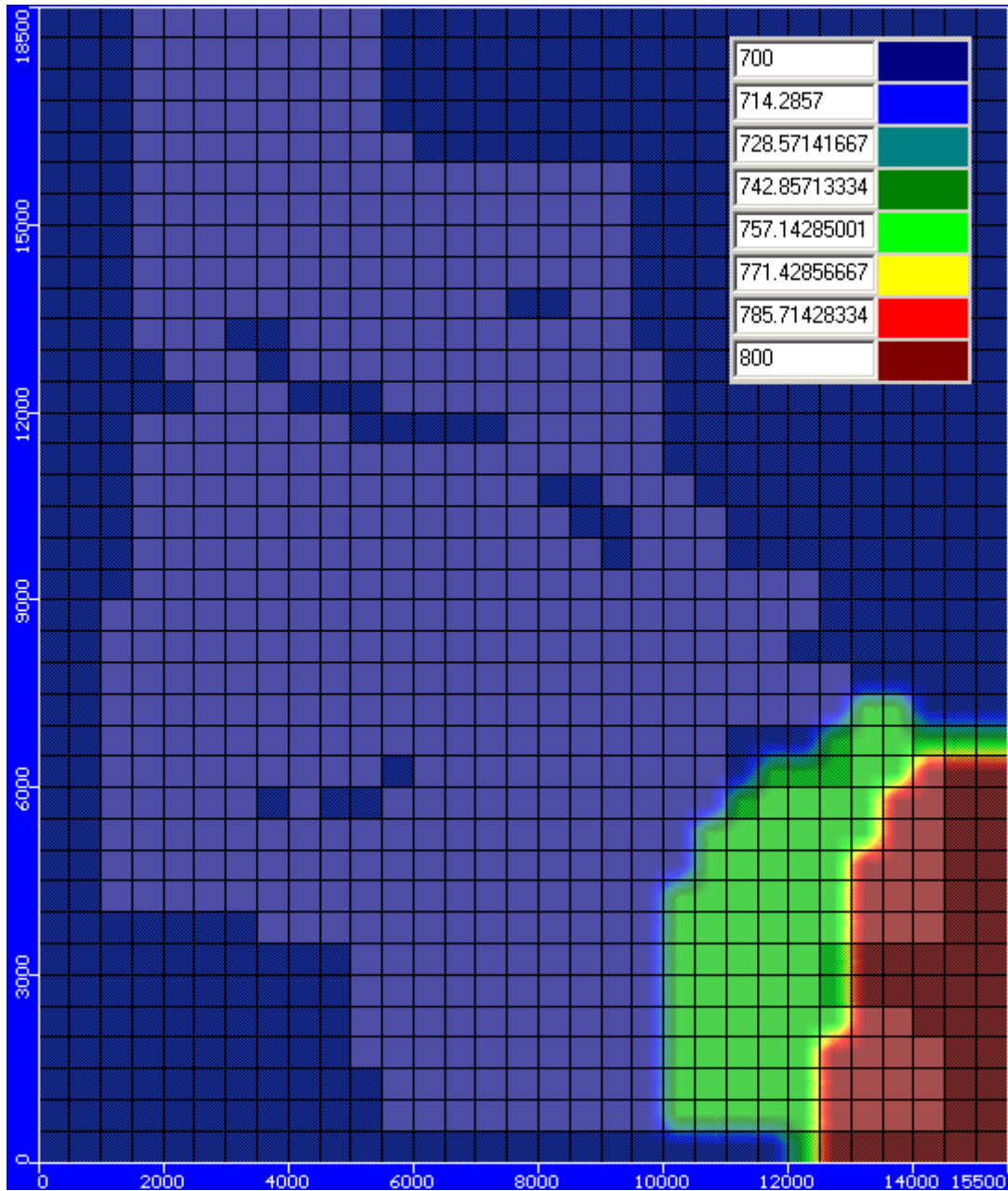


Figura 3.13 Elevación superficial, en rojo la máxima (800 msnm) y en morado la mínima (700 msnm).

3.2.2 Valle de Guadalupe

Dominio de simulación

El dominio es una aproximación del área donde se desarrolla el acuífero del

Valle de Guadalupe; la discretización de la cuadrícula se hace a base de celdas de 500 m de lado. Una rejilla mal diseñada puede causar inestabilidad numérica, y puede conducir a la no convergencia de la solución del modelo, por ello es de suma importancia este punto del desarrollo del modelo, Figura 3.14.

En cuanto a la discretización vertical, el dominio consiste en una sola capa de espesor variable cuya frontera inferior es la topografía del basamento impermeable.

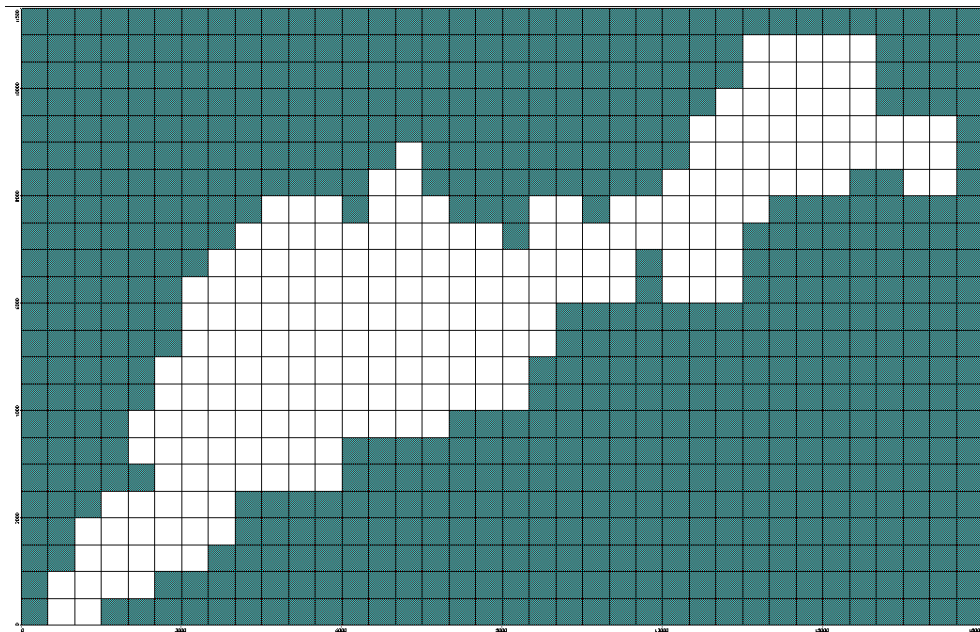


Figura 3.14 Dominio de solución del acuífero Valle de Guadalupe.

Condición inicial

La condición inicial del modelo corresponde al nivel freático reportado para febrero de 1984, fecha en el que el acuífero se encontraba con su capacidad de almacenamiento en equilibrio (Campos, 2008), Figura 3.15.

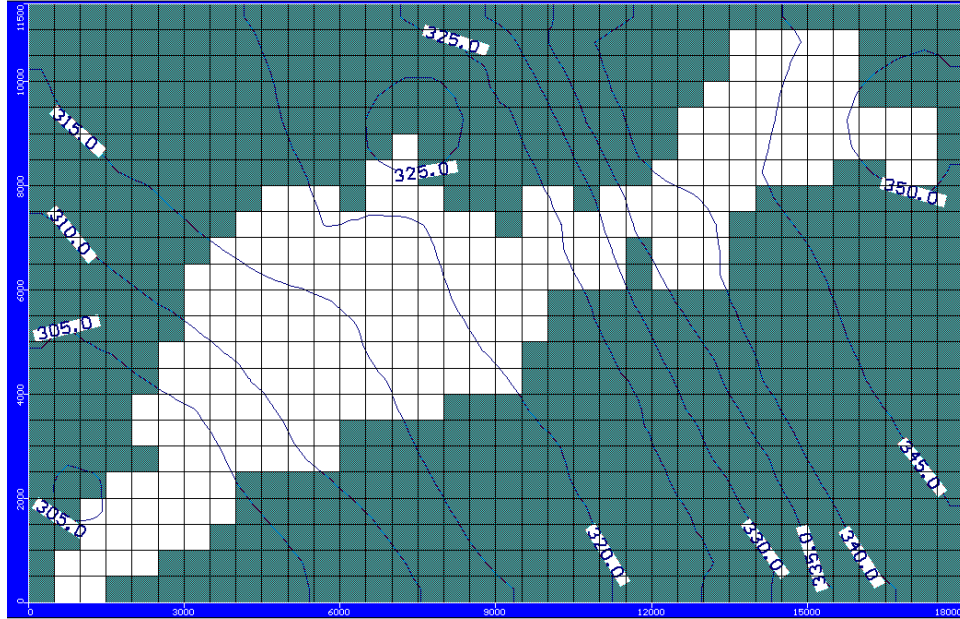


Figura 3.15 Condiciones iniciales. Carga hidráulica al 1ero. de febrero de 1984.

Capacidad de almacenamiento

Tomando en cuenta los materiales que componen el acuífero del Valle de Guadalupe, la capacidad de almacenamiento varía en el intervalo $0.2 \leq S \leq 0.38$, el valor medio de referencia considerado es $S=0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Campos, 2008).

La capacidad de almacenamiento específica (S_s) es tomada como el valor resultante de dividir la capacidad de almacenamiento por la altura media del espesor del acuífero. Considerando un espesor de 200 m se obtiene el intervalo $0.0001 \leq S_s \leq 0.0019$, el valor medio es $S_s=0.001 \text{ m}^{-1}$.

Conductividad hidráulica

Los valores estimados de la conductividad hidráulica para los materiales que componen el acuífero del valle de Guadalupe de acuerdo con Campos (2008) son:

- a) Las rocas ígneas y metamórficas que constituyen las fronteras norte, este y oeste

del acuífero del Valle de Guadalupe se suponen impermeables; por lo tanto, se les asigna una conductividad hidráulica de 0 m/año, y se consideran como celdas inactivas dentro del modelo.

b) Aquellas zonas con baja conductividad hidráulica, en el orden de 1.5×10^4 m/año, representan a los sedimentos con la posible presencia de lentes arcillosos.

c) Se representa con una conductividad hidráulica de 2.5×10^4 m/año a los depósitos aluviales y fluviales constituidos por arenas finas y gruesas que componen gran parte de la zona Calafia.

d) Los depósitos aluviales y fluviales constituidos por limos, arcillas y arenas, que componen parte del acuífero del Valle de Guadalupe se consideran con un valor de la conductividad hidráulica de 2.5×10^4 m/año.

e) Se considera con una conductividad hidráulica del orden de los 1.5×10^4 m/año a los depósitos aluviales y fluviales constituidos por arenas finas, gruesas y gravas que forman el Arroyo Guadalupe.

Zona	Conductividad (m/año)	Conductividad (m/s)
1	1.5×10^4	4.76×10^{-4}
2	2.5×10^4	7.92×10^{-4}
3	3.0×10^4	9.513×10^{-4}
4	4.0×10^4	1.268×10^{-3}

Tabla 3.3 Valores regionales de la conductividad hidráulica para el valle de Guadalupe (Campos, 2008).

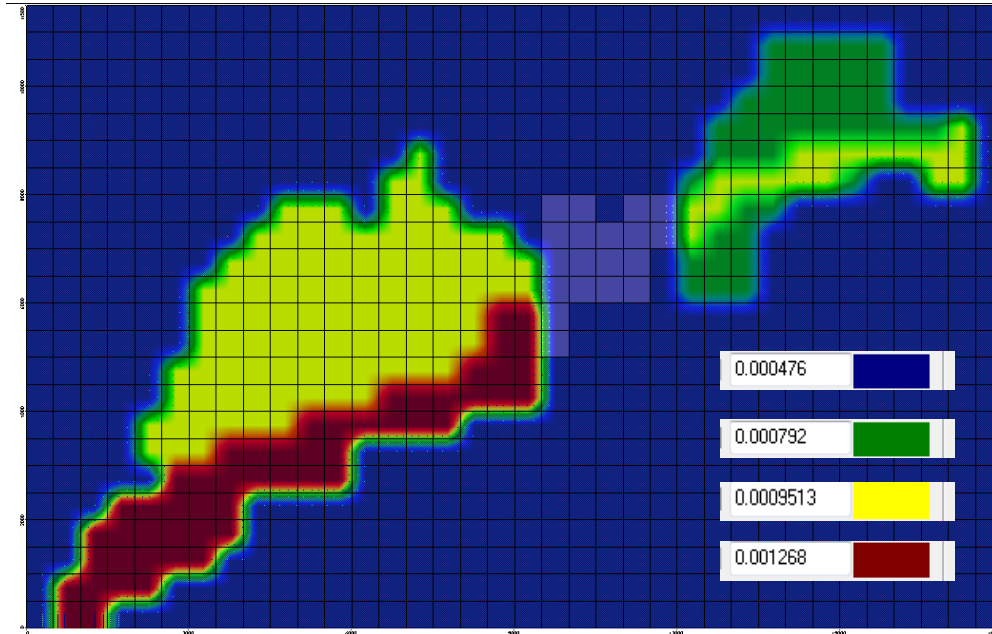


Figura 3.16 Conductividad hidráulica (m/s) del acuífero Valle de Guadalupe.

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera incluyen las cargas constantes y variables, la recarga por ríos, y descarga por drenes, evapotranspiración y caudal base de ríos. También se incluyen datos sobre cargas de origen horizontal que llegan al acuífero.

a) Recargas verticales

La recarga es el volumen de agua infiltrada que llega hasta el nivel freático y pasa a ser parte del sistema de agua subterránea. Para cuantificar la distribución espacial de la recarga, tradicionalmente se asume una recarga espacial uniforme igual a una fracción de la precipitación anual promedio, en este estudio se considera, de acuerdo con Ponce *et al.* (1999) un volumen de infiltración equivalente a 10% de la precipitación anual, estimada en 351.1 mm/año.

b) Recargas horizontales

Se refiere a la contribución de regiones montañosas a la recarga de los acuíferos en cuencas adyacentes y que frecuentemente es la fuente de recarga dominante.

La superficie de escurrimiento que aporta un volumen de recarga del frente de montaña hacia el acuífero del Valle de Guadalupe es de aproximadamente 1790 km² que corresponde a las fronteras norte, este y oeste. De acuerdo con el conocimiento de la ocurrencia y distribución de la recarga natural del acuífero, se supone que la recarga horizontal corresponde a 5% del agua precipitada anualmente, la cual se distribuye en las celdas de frontera.

c) Cargas constantes

De acuerdo con información proporcionada por la CONAGUA, hacia la frontera suroeste de la zona de estudio, las elevaciones del nivel freático no han variado de manera significativa con el transcurso de los años (aproximadamente 2 m en 30 años); por lo tanto, la frontera suroeste se considera de nivel freático constante.

d) Evapotranspiración

Un factor que produce una descarga de agua subterránea en la zona de estudio es la evapotranspiración. Se ha estimado una razón de pérdida por efectos de evapotranspiración de 240 mm/año y 60 mm/año respectivamente, de acuerdo con la información de la vegetación existente predominante, además se considera que los valores anuales estimados para la razón de pérdida por evapotranspiración son constantes, y tienen una distribución mensual equitativa a lo largo del año .

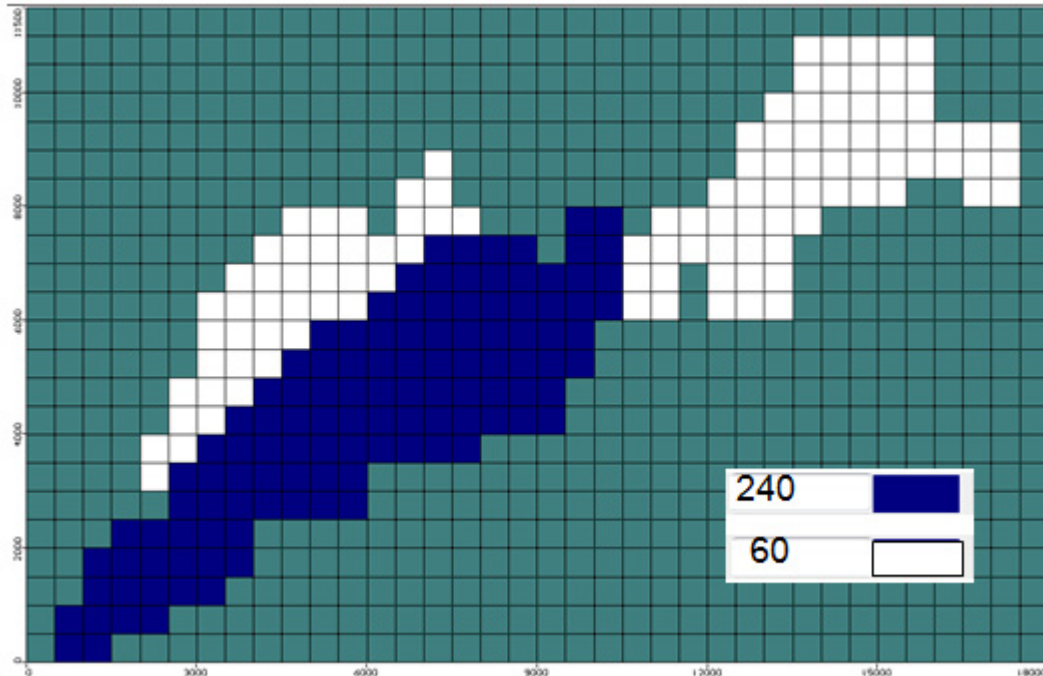


Figura 3.17 Tasa de pérdida por evapotranspiración en mm/año.

e) Extracción mediante pozos

Se distinguen dos tipos de aprovechamientos por el sistema de bombeo, el primero y que consta de mayores volúmenes es el correspondiente a la extracción para riego, servicio doméstico, industrial y pecuario; el segundo tipo, es el que se realiza bajo el control de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE) para satisfacer parcialmente la demanda de agua a la ciudad de Ensenada (Campos, 2008).

Para el presente modelo se utiliza la información de 170 pozos de extracción, los cuales acumulan un volumen de aprovechamiento de $25 \text{ Mm}^3/\text{año}$, y cuya distribución se muestra en la Figura 3.18.

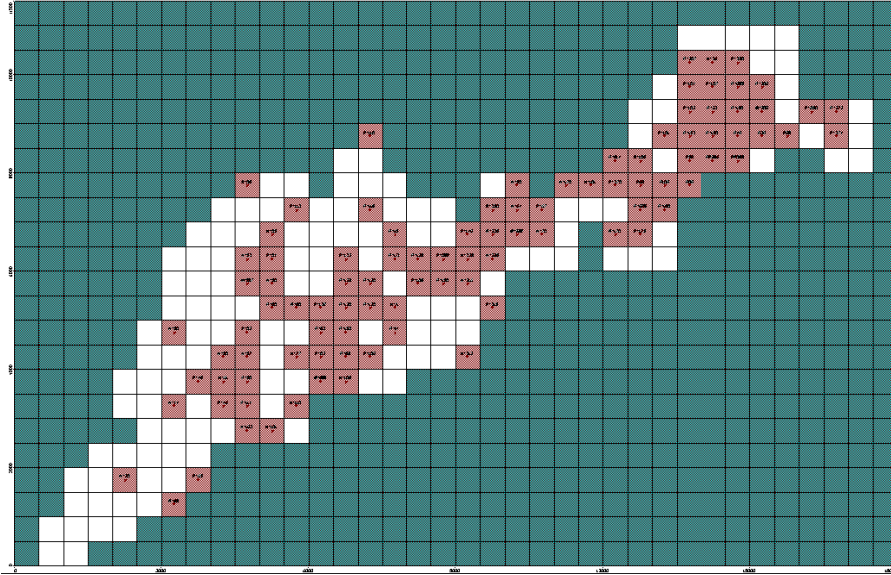


Figura 3.18 Pozos de extracción en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

Basamento impermeable

La ubicación del límite inferior del acuífero, o basamento impermeable, es necesaria para definir el dominio de simulación en la vertical y para estimar el volumen de material con propiedades para almacenar o conducir el agua subterránea.

Con base en la información de Campos (2008) la configuración del basamento está representada por la existencia de sitios con profundidades máximas de hasta 200 m aproximadamente.

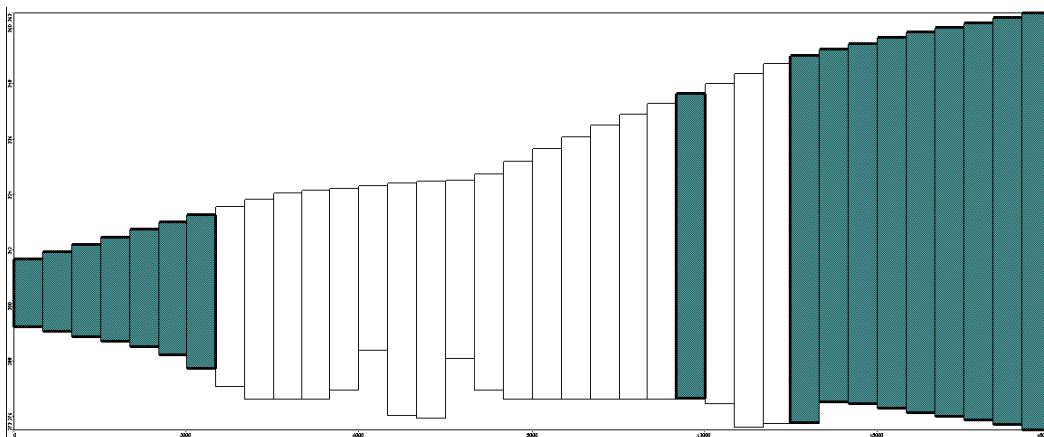


Figura 3.19 Corte longitudinal en la parte central del acuífero.

Topografía de la superficie

Campos (2008) ha modelado la topografía de la superficie partir de las cartas topográficas a escala 1:50,00 reportadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), como se muestra en la Figura 3.20.

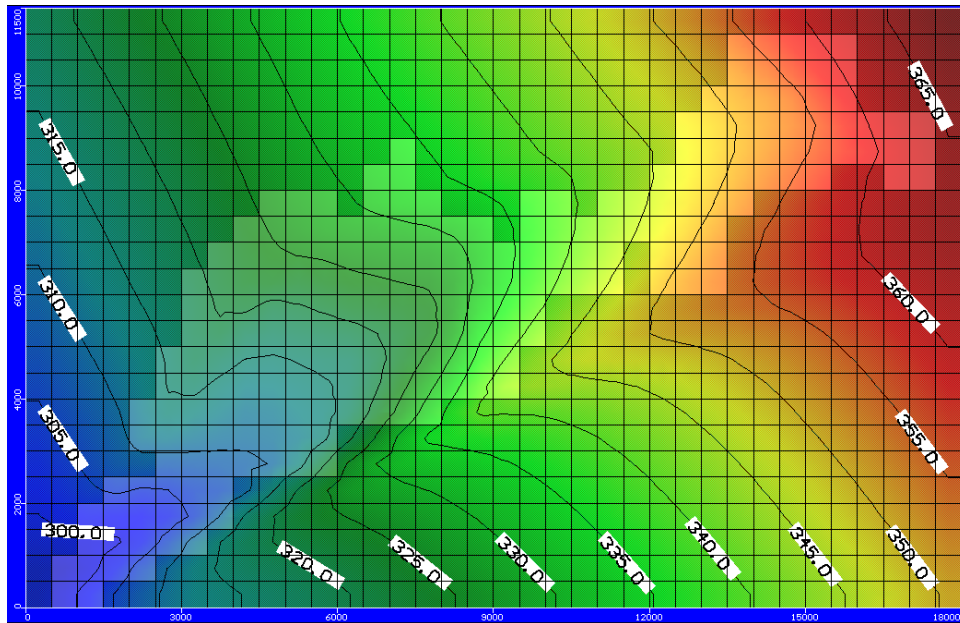


Figura 3.20 Topografía superficial del Acuífero Valle de Guadalupe.

La información hidrogeológica, topográfica y meteorológica recopilada, conforma los insumos de entrada del modelo MODFLOW; después de introducir dicha información se procede con la simulación, que se ejecuta hasta el año de 2005, esto con la finalidad validar los resultados, comparándolos con lo reportado por Campos (2008).

3.3 Modelo conceptual integrado

Se construye un modelo en el cual se integran los acuíferos del Valle de Guadalupe con los de Ojos Negros y Real del Castillo con el fin de observar su comportamiento conjunto, bajo la hipótesis de que existe una conexión hidráulica entre ellos, el modelo se desarrolla utilizando información tratada por sistemas de

información geográfica a fin de hacer el modelo más flexible y actualizable.

Para el desarrollo de este nuevo modelo integrado se utilizó el programa ArcMap versión 9.3 para el tratamiento de datos desde una plataforma de sistemas de información geográfica (SIG).

Para la calibración, análisis de sensibilidad y las simulaciones se utilizó la plataforma comercial basada en MODFLOW, Visual MODFLOW v2011.1.

3.3.1 Definición espacial

Fronteras laterales

Las fronteras laterales se definen tomando en cuenta las zonas geológicas que tienen una permeabilidad considerable, la densidad de los pozos de extracción y observación en la zona del aluvión y la zona de interconexión entre el acuífero Real del Castillo y Guadalupe.

El modelo presenta una superficie de aproximadamente 432 km² y el polígono se muestra en la Figura 3.21.

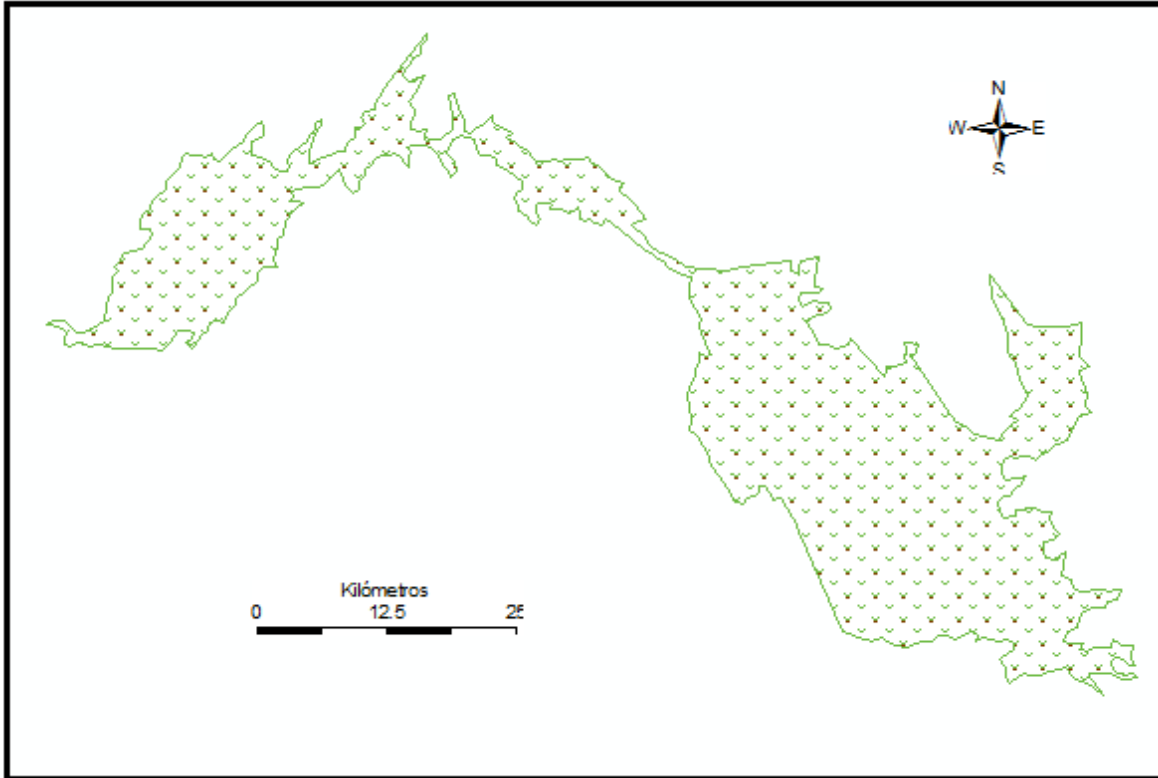


Figura 3.21 Definición espacial lateral de los acuíferos

Frontera superior

La frontera superior se ha tomado de datos del continuo de elevaciones mexicano de la INEGI dentro de las coordenadas 31.68° y 32.21° norte y 115.85° y 116.32° oeste, el cual se recortó y se muestra en la Figura 3.3.

Frontera inferior

La topografía del basamento impermeable se calcula utilizando puntos de profundidad conocida (Figura 3.23) medidos a partir de los cortes transversales en las cartas geológicas del Servicio Geológico Mexicano (2003) e información tomada de Salgado (2010), el valor de los puntos se utiliza para hacer una interpolación en dos dimensiones en ArcMap 9.3 con la herramienta de análisis geostatístico krigado de predicción.

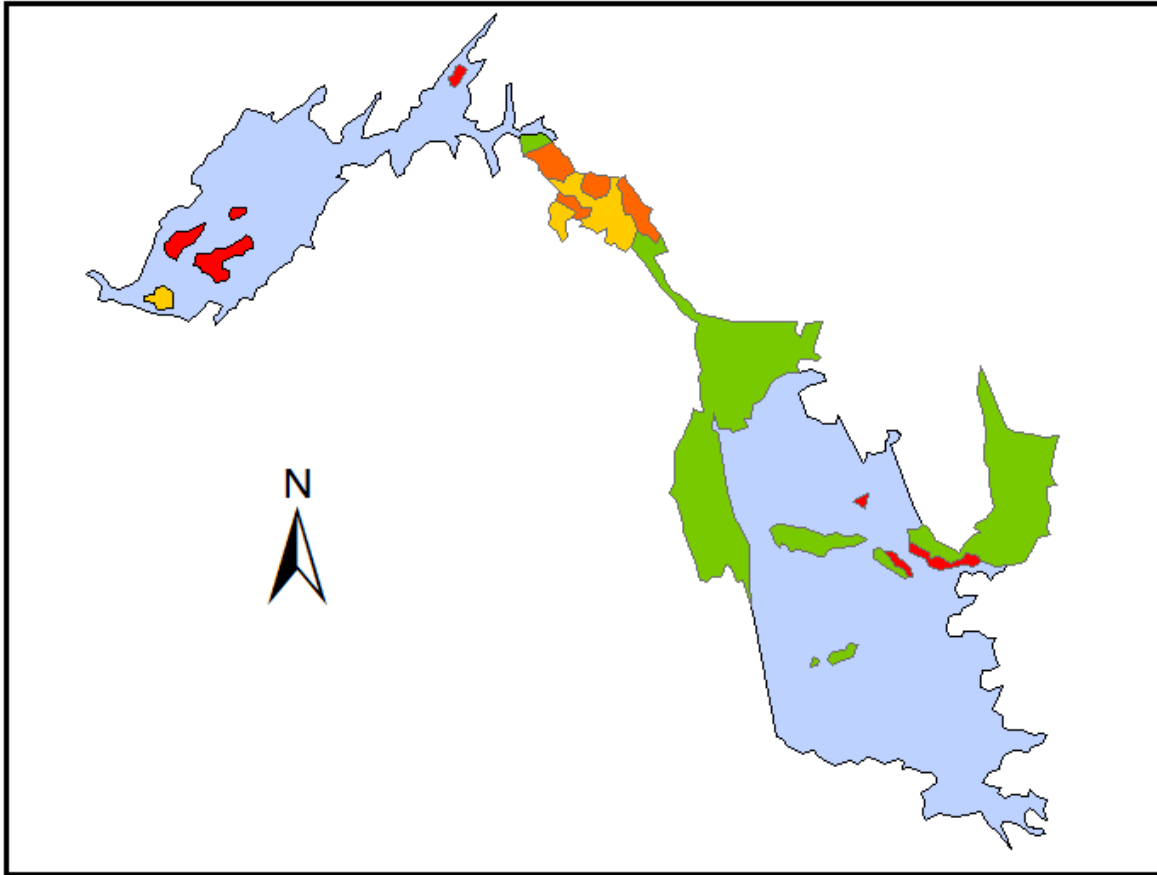


Figura 3.22 Zonas de diferentes propiedades hidráulicas del acuífero: formaciones impermeables en rojo; en naranja, amarillo y verde formaciones semipermeables; y en azul las zonas de alta permeabilidad.

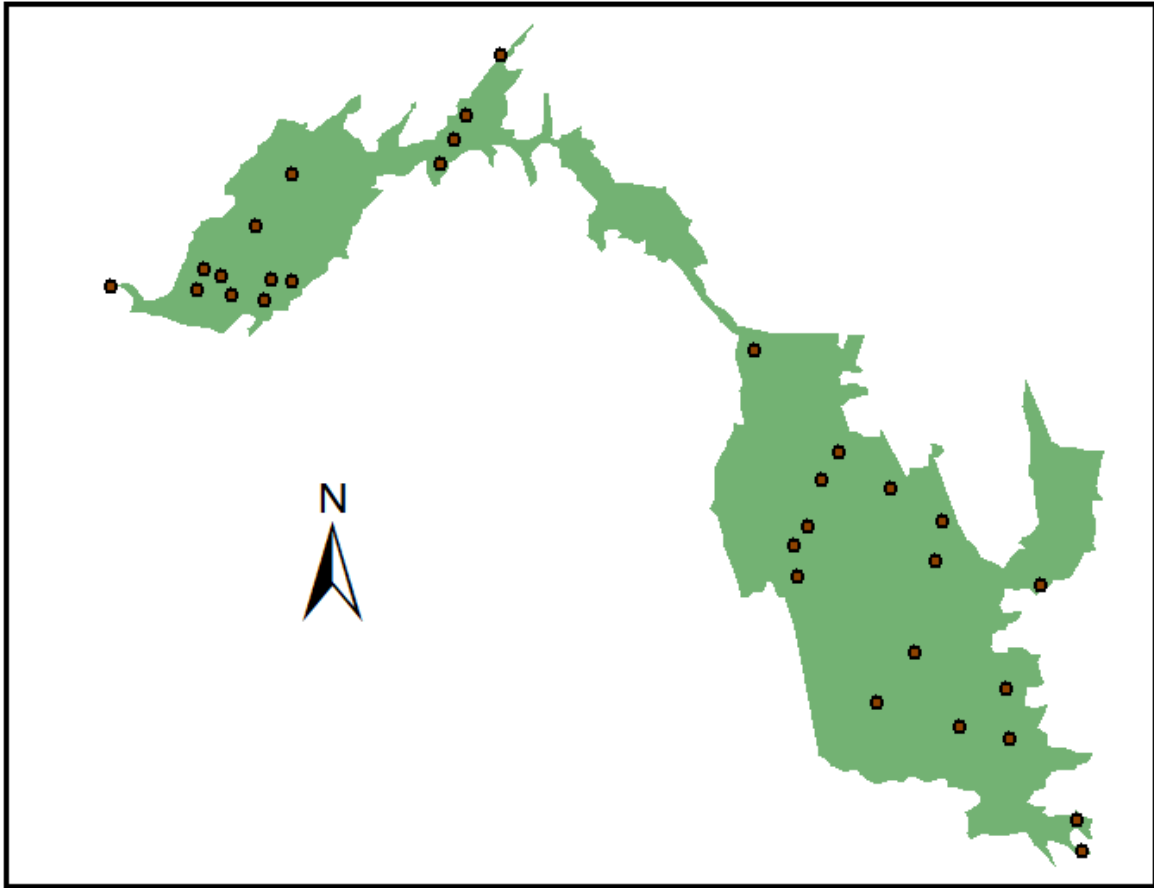


Figura 3.23 Puntos con información conocida de la profundidad del basamento impermeable.

Discretización espacial

El modelo se discretiza de manera homogénea con celdas de 105.6 m de ancho y 90.3 m de alto, se requirieron un total de 45380 celdas para cubrir el área del dominio.

3.3.2 Condicion inicial

La condición inicial de de piezometría se calcula a partir de 112 pozos de observación y está dada para el mes de abril de 2010. La ubicación de cada uno de los pozos se encuentra en la Figura 3.24. El valor de los puntos se utiliza para hacer una interpolación en dos dimensiones en ArcMap 9.3 con la herramienta de análisis

geoestadístico de krigeado de predicción para obtener una superficie que sirve como condición inicial.

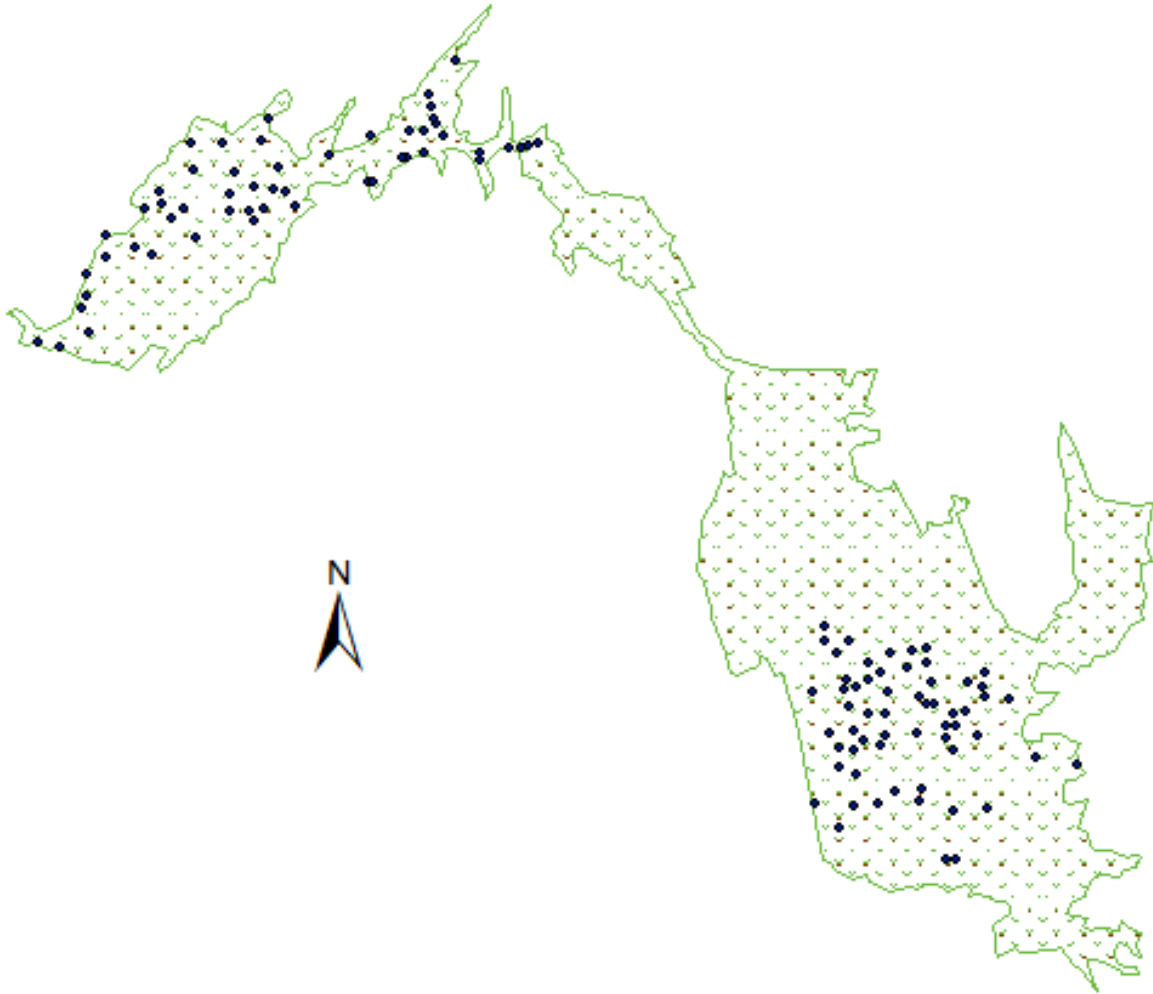


Figura 3.24 Pozos de observación

3.3.3 Condiciones de frontera

Recarga

Se toma la recarga media anual reportada por CONAGUA (2002) y se distribuye de manera mensual en los acuíferos como se muestra en la Tabla 3.4 de acuerdo con

la distribución de la precipitación media a lo largo del año.

	Ojos Negros/Real del Castillo	Valle de Guadalupe
Mayo	118.86	154.98
Junio	33.96	44.28
Julio	16.98	22.14
Agosto	50.94	66.42
Septiembre	50.94	66.42
Octubre	50.94	66.42
Noviembre	50.94	66.42
Diciembre	135.84	177.12
Enero	203.76	265.68
Febrero	339.6	442.8
Marzo	339.6	442.8
Abril	305.64	398.52

Tabla 3.4 Valores de recarga (mm/año) para los acuíferos modelados.

Extracción por pozos

Se toman 338 pozos de extracción distribuidos como se muestra en la Figura 3.25. Se agregan pozos para el acuífero de Real del Castillo distribuidos de manera uniforme debido a que no se cuenta con información sobre las extracciones en esa zona y se descartan los pozos que se encuentran fuera del dominio para obtener una distribución como la mostrada en la Figura 3.26. El caudal extraído por los pozos eliminados se distribuye en los pozos que se encuentran dentro del dominio. La extracción total para cada uno de los acuíferos en el año 2010 es de 20.21 Mm³ para el acuífero de Valle de Guadalupe, de 20.93 Mm³ para el de Ojos Negros y de 10.1 Mm³ para el de Real del Castillo.

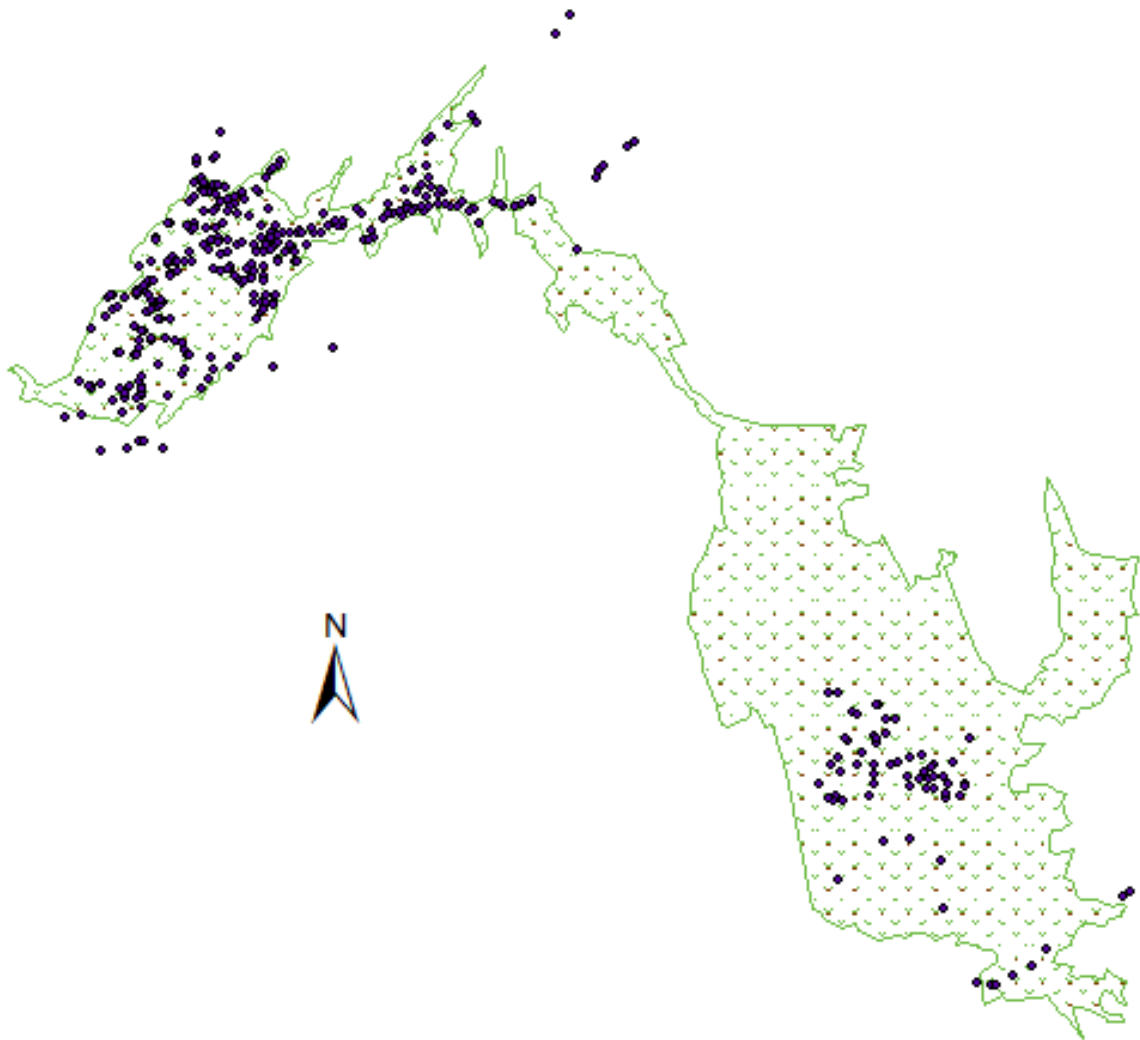


Figura 3.25 Pozos de extracción con los que se cuentan datos de extracción.

	Evapotranspiración (mm/mes)
Mayo	220.5
Junio	273.8
Julio	306.7
Agosto	283.7
Septiembre	237.5
Octubre	179.2
Noviembre	126.3
Diciembre	91.4
Enero	91.9
Febrero	94.1
Marzo	128.7
Abril	177.1

Tabla 3.5 Valores de evapotranspiración mensuales utilizados en el modelo.

3.3.4 Calibración

El modelo se calibra utilizando el módulo PEST (*Nonlinear Parameter Estimation and Predictive Analysis*) incluido en Visual MODFLOW v2011.1 utilizando valores iniciales mostrados en la Tabla 3.6 correspondientes a la zonas establecidas en la Figura 3.27.

Zona	S_s [1/m]	S	K_x [m/s]	K_y [m/s]	K_z [m/s]
1	0.001	0.22	0.000871	0.000871	8.71E-05
2	1.00E-06	0.2	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09
3	1.00E-06	0.2	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-08
4	1.00E-05	0.2	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-07
5	1.00E-05	0.2	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-06
6	1.00E-06	0.09	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-07

Tabla 3.6 Propiedades iniciales por zona.

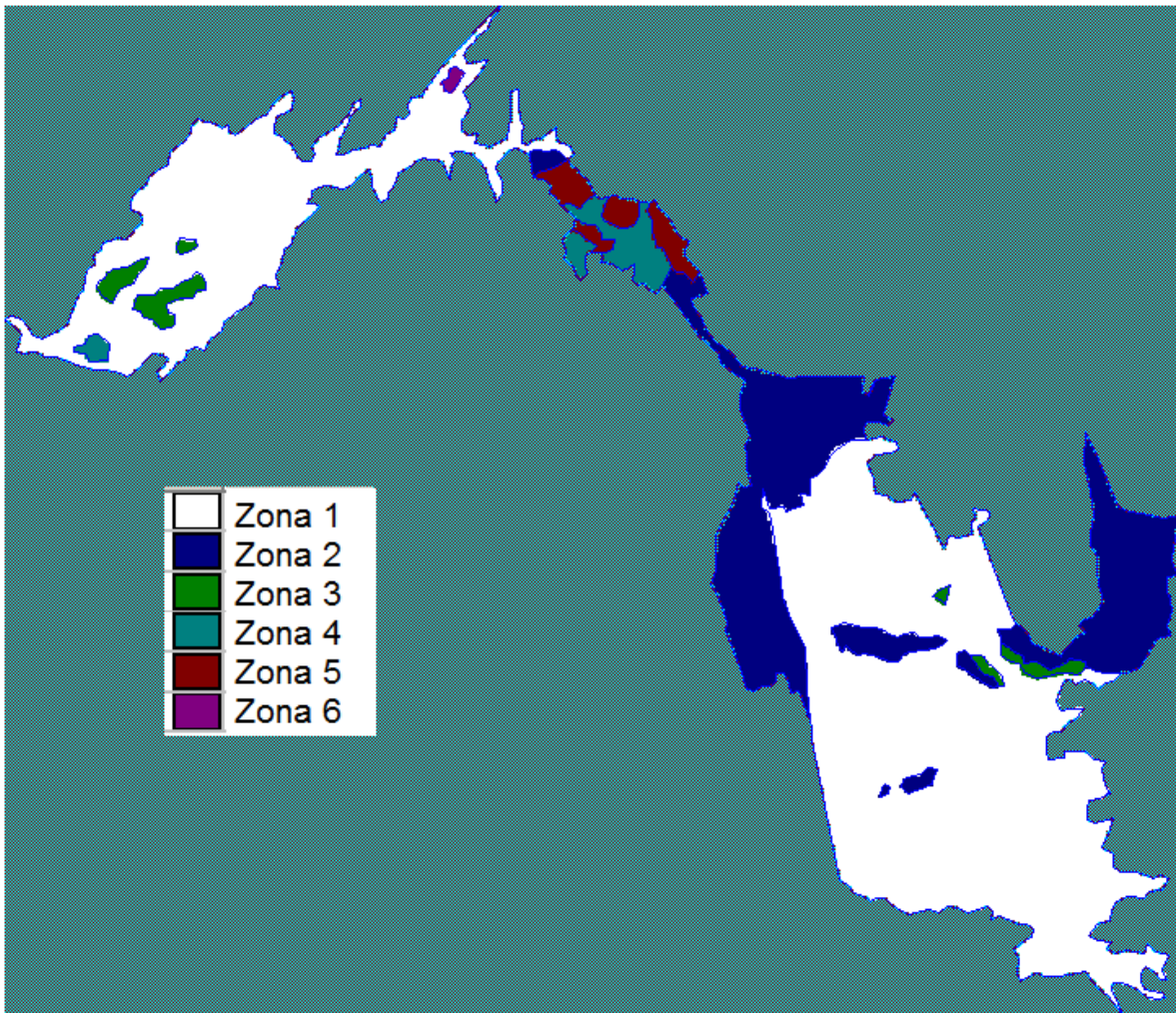


Figura 3.27 Zonas de propiedades hidráulicas a calibrar.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Comparación entre la solución de Boussinesq y la ecuación general de los acuíferos

4.1.1 Valle de Ojos Negros y Real del Castillo

Se realiza una simulación con el modelo descrito anteriormente en un tiempo de 6209 días (1983-2000) en régimen transitorio utilizando MODFLOW 2005 y los resultados se muestran en la Figura 4.1.

Se observan algunas diferencias entre la solución de la ecuación tridimensional, y la solución 2D de Campos (2002) (Figura 4.2), principalmente en la franja cercana a la frontera norte, esto puede ser debido a que las condiciones de frontera en esa zona son de carga constante durante la simulación 3D (655 msnm) y son tomadas de manera gráfica de la solución de Campos (2002); sin embargo la diferencia entre las cargas de los dos modelos no es muy significativa (menor de 10 m). En la franja cercana a la frontera sur se observa una diferencia en las cargas hidráulicas de hasta 10 m. En la zona central que corresponde al valle de Ojos Negros, que es la zona con mayor concentración de pozos de extracción, se observan diferencias en la carga del orden de 2 m y al ser la zona con mayor flujo de agua se puede considerar que la diferencia no es significativa. En general, excepto por la frontera norte, se observa que las curvas de nivel siguen el mismo patrón en los dos modelos (3D y 2D) por lo que se puede decir que el flujo de agua tiene una misma dirección en ambas simulaciones.

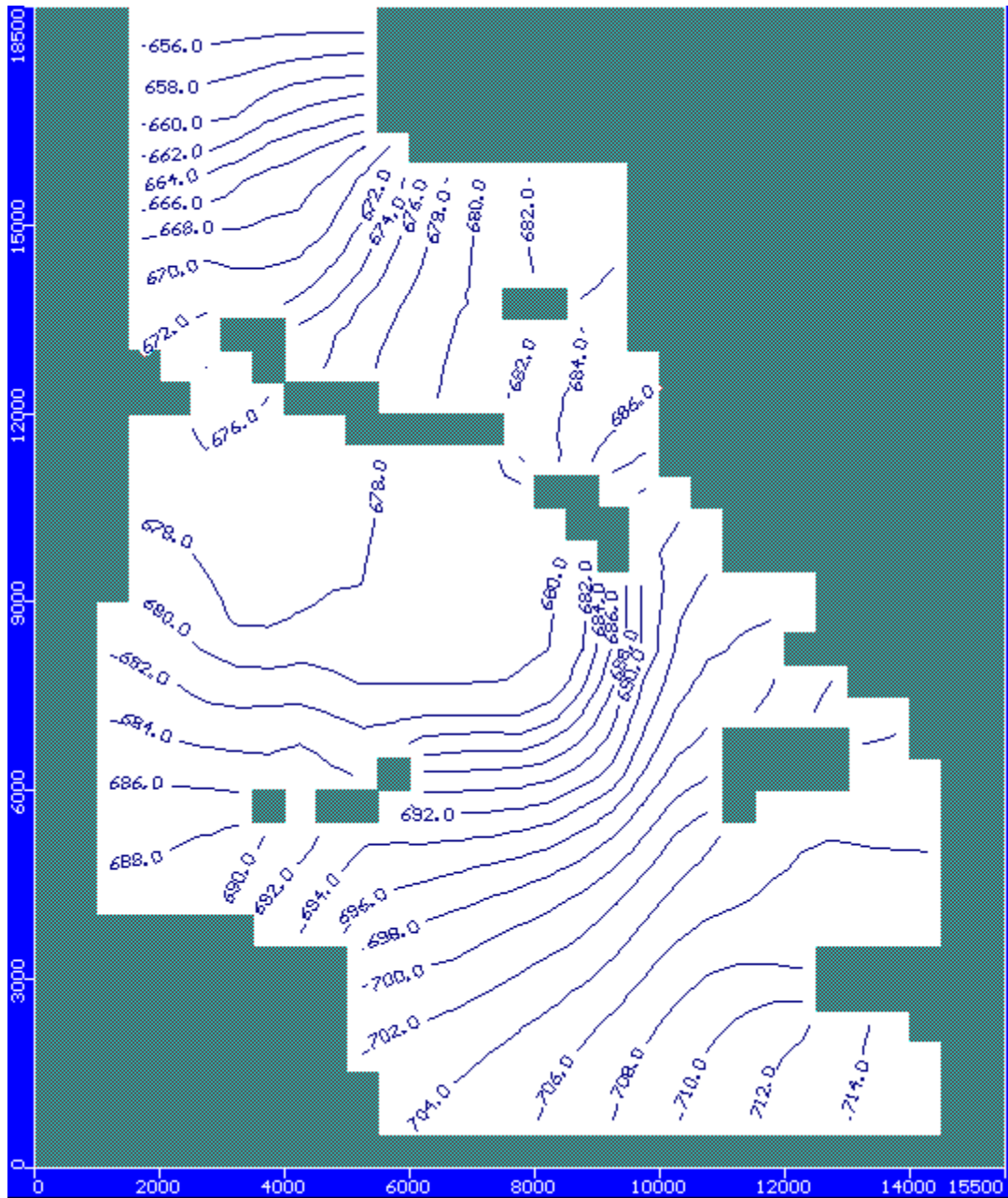


Figura 4.1 La carga piezométrica calculada a los 5114 días, 31 de enero de 1997, tomando como estado inicial el correspondiente a 1 de enero de 1983. Se utiliza la solución en tres dimensiones (MODFLOW).

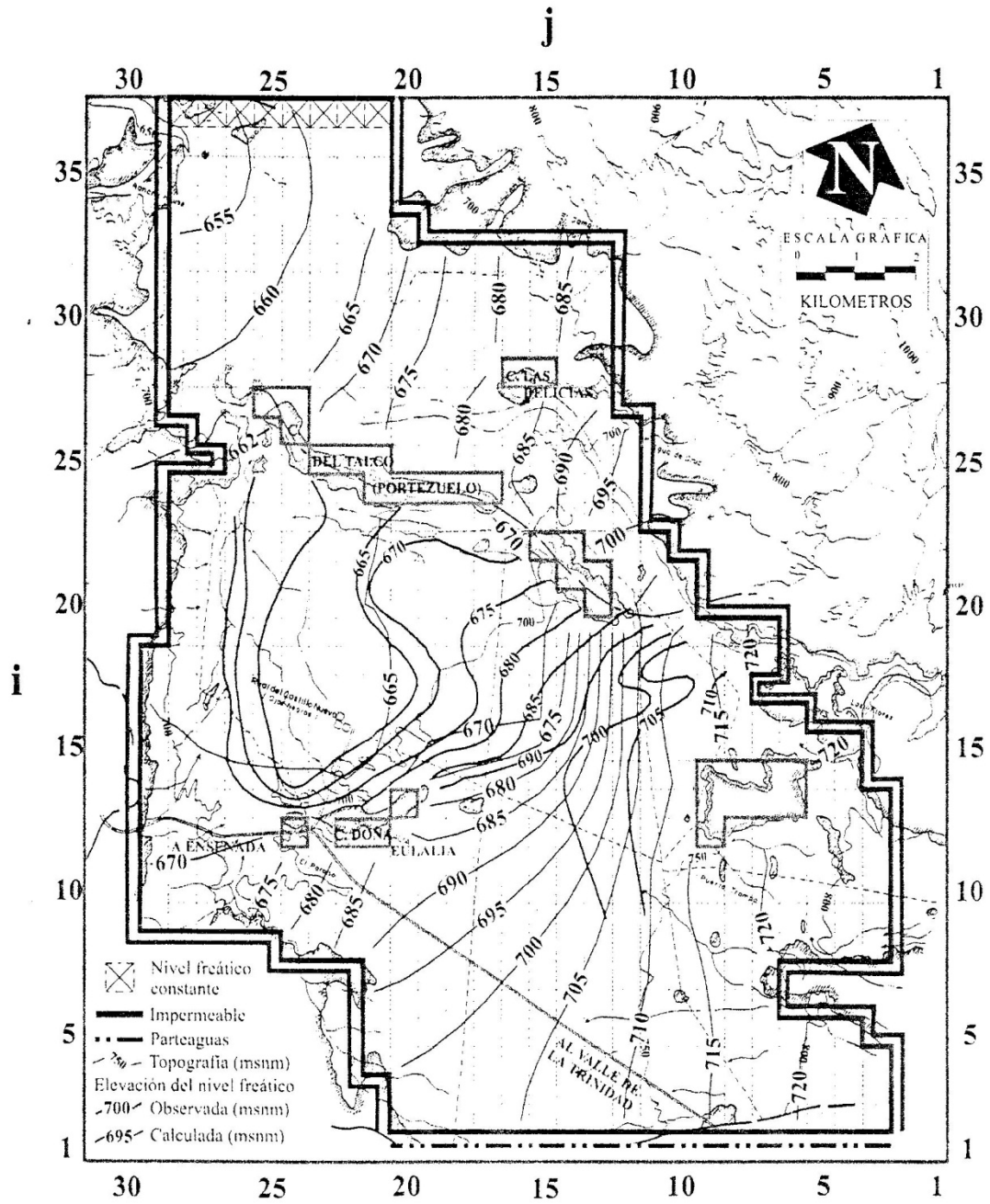


Figura 4.2 La carga piezométrica calculada a los 5141 días, 28 de febrero de 1997, utilizando la ecuación de Boussinesq (Campos, 2002).

4.1.2 Valle de Guadalupe

Los resultados que arroja la simulación en MODFLOW para 21 años y un avance del paso de tiempo de 10 días, son mostrados en la Figura 4.3.

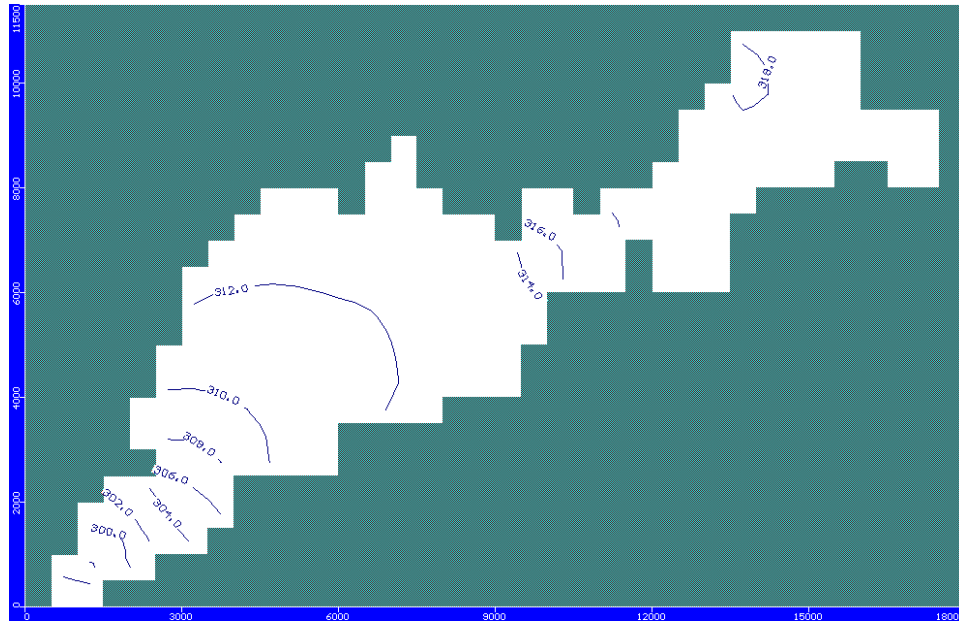


Figura 4.3 Resultados de la superficie freática obtenidos con MODFLOW, abril de 2005 (254 meses de simulación).

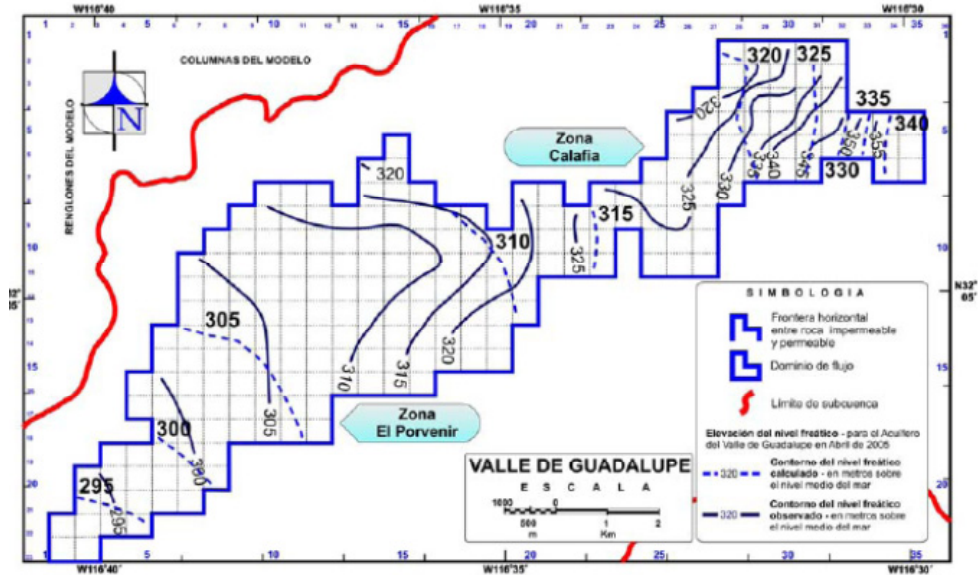


Figura 4.4 Configuración de la superficie freática en estado transitorio, abril de 2005 (254 meses de simulación) (Campos, 2008).

Como puede observarse en los resultados se obtiene una configuración muy similar entre ambos modelos (MODFLOW, Figura 4.3 y Campos, 2008, Figura 4.4).

Por otro lado, a pesar de que el tiempo de simulación es relativamente grande, el rango de cargas se mantiene dentro de un rango razonable, de acuerdo con los antecedentes piezométricos, sin que exista un abatimiento notable o un aumento de los niveles que resultaría incoherente.

MODFLOW puede ser utilizado para plantear distintos escenarios futuros, con un entorno eficiente para introducir y cambiar valores de acuerdo con las diferentes políticas de extracción y evaluar alternativas diferentes de manejo del agua en la región.

4.1.3 Escenarios simulados

Ojos Negros

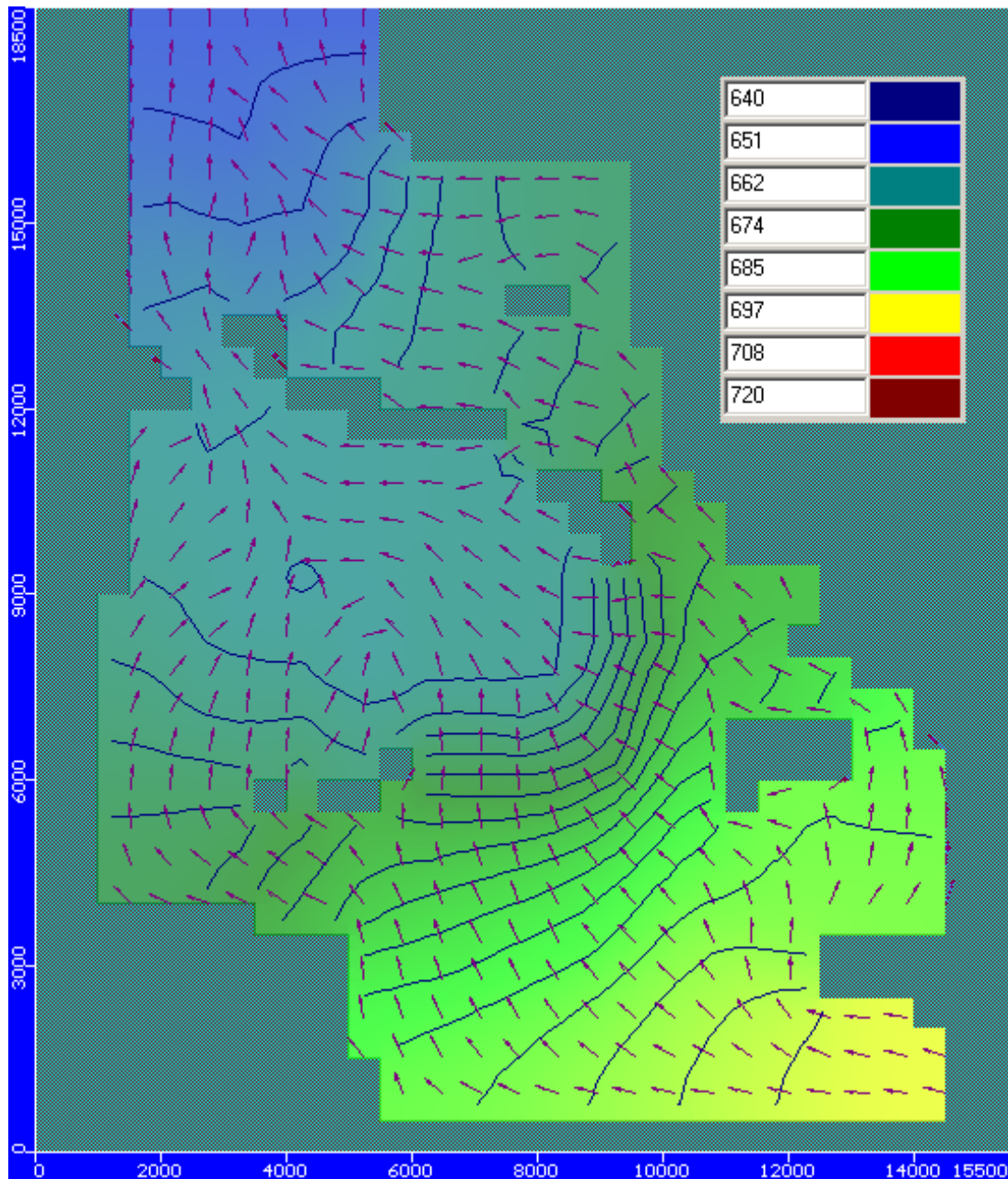


Figura 4.5 Dirección de flujo y carga hidráulica (msnm), simulación de 17532 días correspondientes a diciembre de 2030.

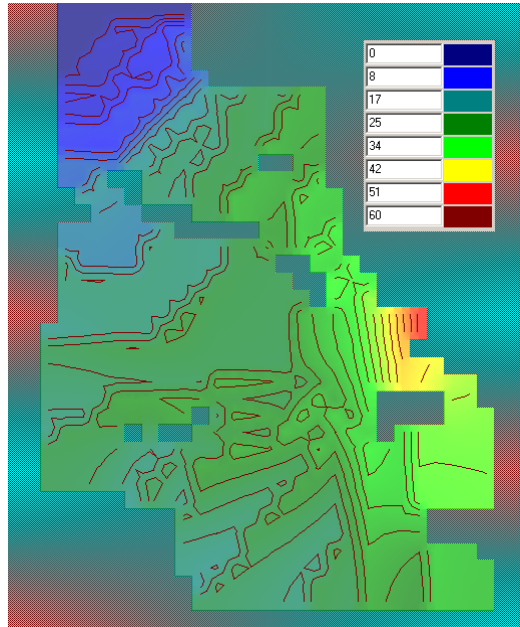


Figura 4.6 Abatimiento en metros desde el inicio de la simulación (enero 1983) hasta diciembre de 2030.

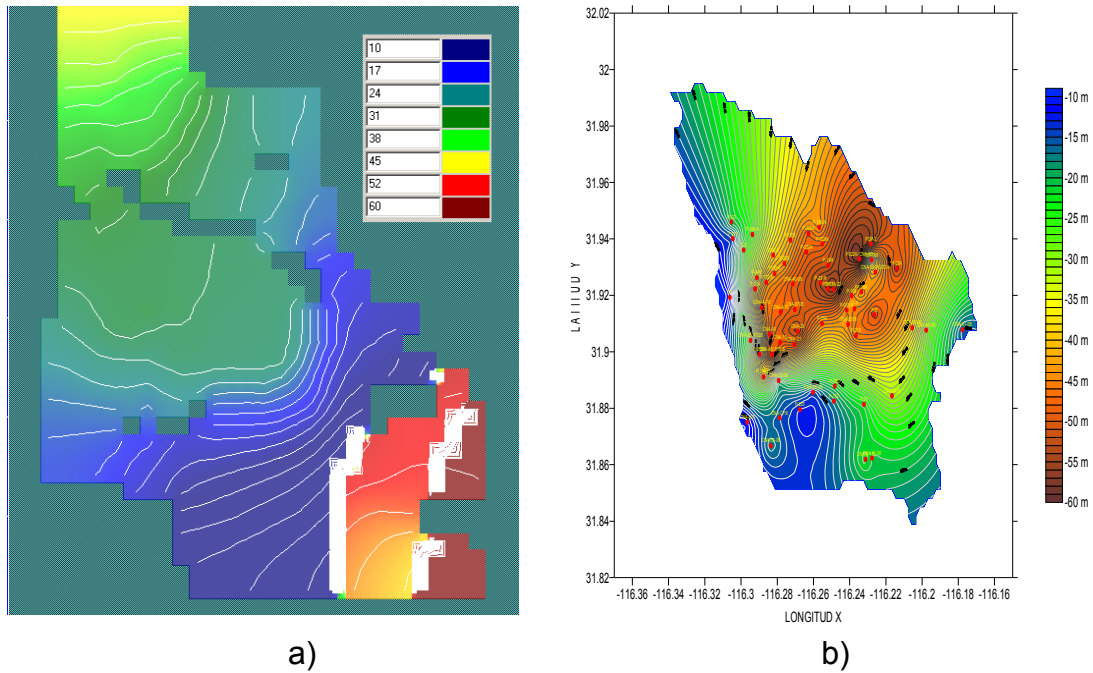
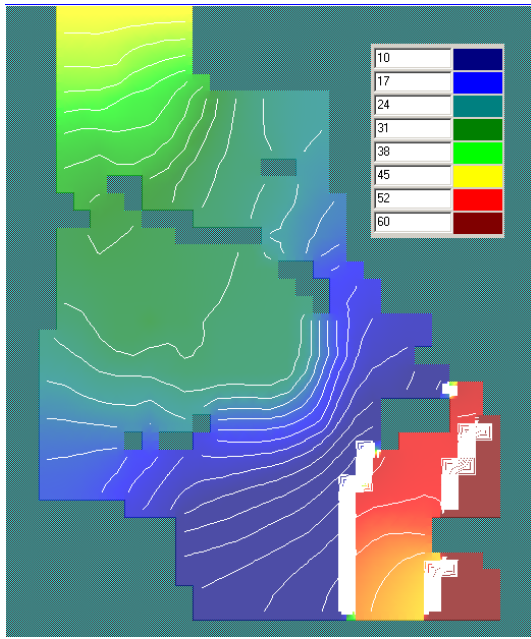
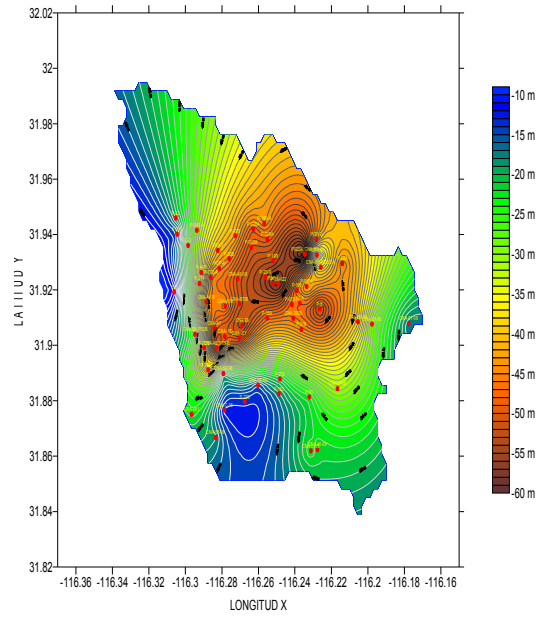


Figura 4.7 Profundidad del nivel freático en metros en abril de 2010 a) calculada b) observada.

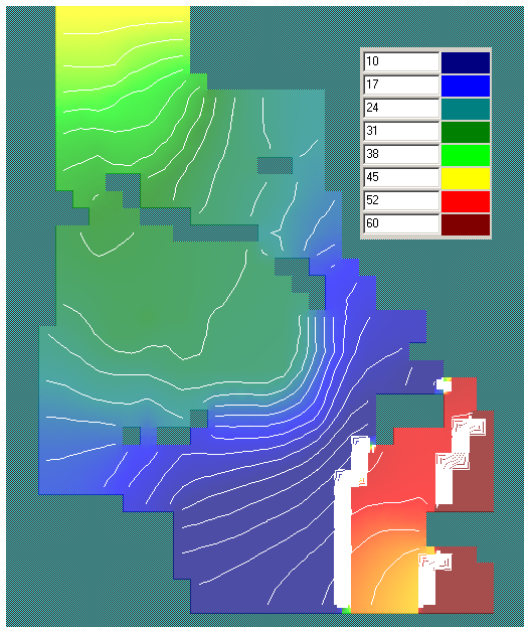


a)

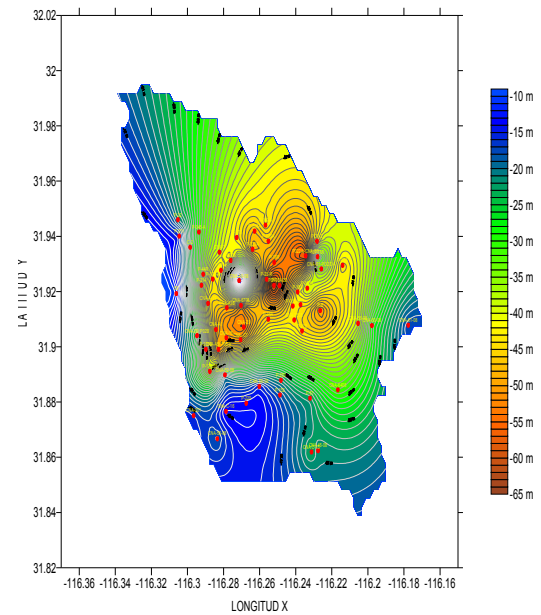


b)

Figura 4.8 Profundidad del nivel freático en metros en noviembre de 2010 a) calculada b) observada.



a)



b)

Figura 4.9 Profundidad del nivel freático en metros en abril de 2011 a) calculada b) observada.

		Tasa [Mm ³ /año]				
Año	Días	Entradas	Salidas		Total salidas	Diferencia
		Recarga	Extracción	Salida aguas abajo		
1983	0	19.30	22.56	22.47	45.04	-25.74
1984	365	19.25	22.50	22.62	45.12	-25.88
1985	731	19.25	22.50	22.27	44.77	-25.52
1986	1096	20.94	23.00	21.79	44.79	-23.85
1987	1461	21.00	23.06	21.29	44.35	-23.35
1988	1826	20.94	23.00	20.65	43.65	-22.70
1989	2192	20.94	23.00	20.07	43.07	-22.13
1990	2557	20.94	23.00	19.51	42.51	-21.57
1991	2922	22.00	24.57	18.97	43.54	-21.54
1992	3287	21.94	24.50	18.36	42.86	-20.92
1993	3653	21.94	24.50	17.83	42.33	-20.39
1994	4018	21.94	24.50	17.33	41.83	-19.89
1995	4383	22.00	24.57	16.90	41.46	-19.46
1996	4748	18.95	25.00	16.18	41.18	-22.23
1997	5114	18.95	25.00	15.62	40.62	-21.67
1998	5479	18.95	25.00	15.10	40.10	-21.16
1999	5844	19.00	25.07	14.65	39.72	-20.72
2000	6209	19.00	25.07	14.18	39.25	-20.25
2001	6575	18.95	25.00	13.70	38.70	-19.75
2002	6940	18.95	25.00	13.69	38.69	-19.75
2003	7305	18.95	25.00	13.26	38.26	-19.31
2004	7670	19.45	25.00	12.87	37.87	-18.43
2005	8036	19.50	25.07	12.52	37.59	-18.09
2006	8401	19.45	25.00	12.11	37.11	-17.66
2007	8766	19.45	25.00	11.74	36.74	-17.29
2008	9131	19.45	25.00	11.39	36.39	-16.94
2009	9497	18.95	25.50	10.98	36.48	-17.53
2010	9862	19.00	25.57	10.64	36.21	-17.21
2010	9967	20.94	26.00	10.54	36.54	-15.60
2010	10181	20.94	26.00	10.37	36.37	-15.43
2011	10227	20.94	26.00	10.33	36.33	-15.39
2011	10332	18.95	26.00	10.19	36.19	-17.24
2012	10592	18.95	26.00	9.91	35.91	-16.96
2013	10958	19.00	26.07	9.58	35.65	-16.65
2014	11323	18.95	26.00	9.22	35.21	-16.27
2015	11688	19.75	26.50	8.90	35.40	-15.65
2016	12053	19.75	26.50	8.59	35.09	-15.34
2017	12419	19.75	26.50	8.28	34.78	-15.04
2018	12784	19.80	26.57	8.01	34.58	-14.78
2019	13149	22.44	26.50	7.86	34.36	-11.92
2020	13514	22.44	26.50	7.66	34.16	-11.72
2021	13880	22.44	26.50	7.45	33.95	-11.51
2022	14245	19.50	27.07	7.07	34.14	-14.64
2023	14610	19.50	27.07	6.76	33.83	-14.33
2024	14975	19.45	27.00	6.46	33.46	-14.01
2025	15341	19.45	27.00	6.19	33.19	-13.74
2026	15706	20.14	26.00	6.03	32.03	-11.89
2027	16071	20.20	26.07	5.86	31.93	-11.73
2028	16436	20.14	26.00	5.65	31.65	-11.51
2029	16802	20.14	26.00	5.46	31.46	-11.32
2030	17167	19.45	26.50	5.20	31.70	-12.26
2030	17532	19.05	26.57	6.76	33.33	-14.28

Tabla 4.1 Tasa anual de entradas y salidas (Mm³).

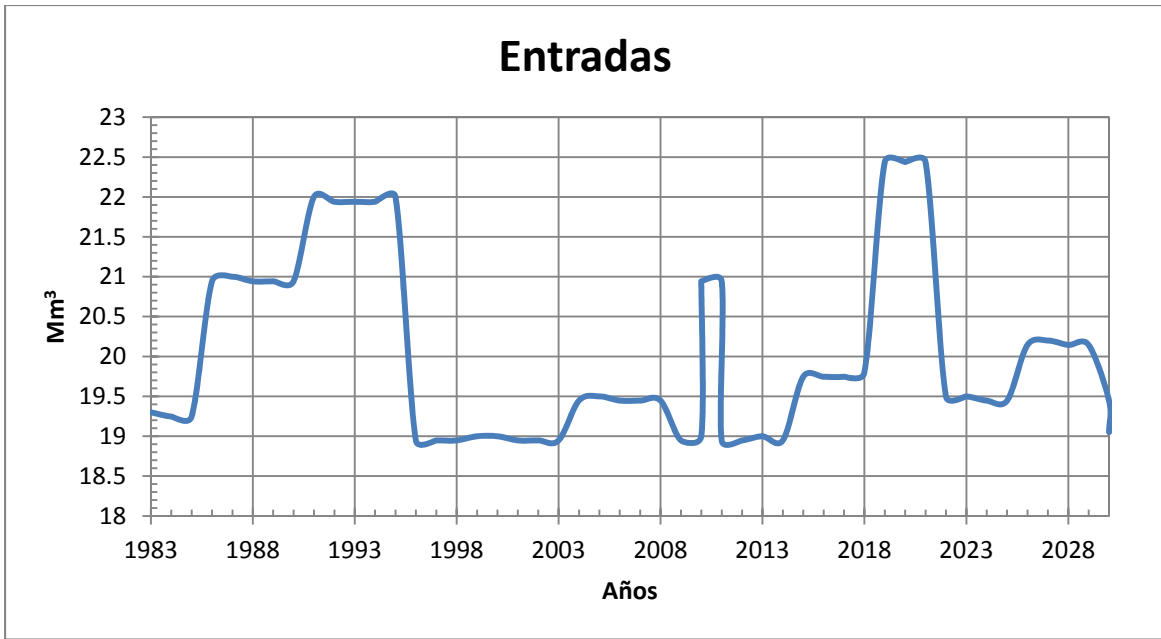


Figura 4.10 Entradas anuales al sistema (Mm³).

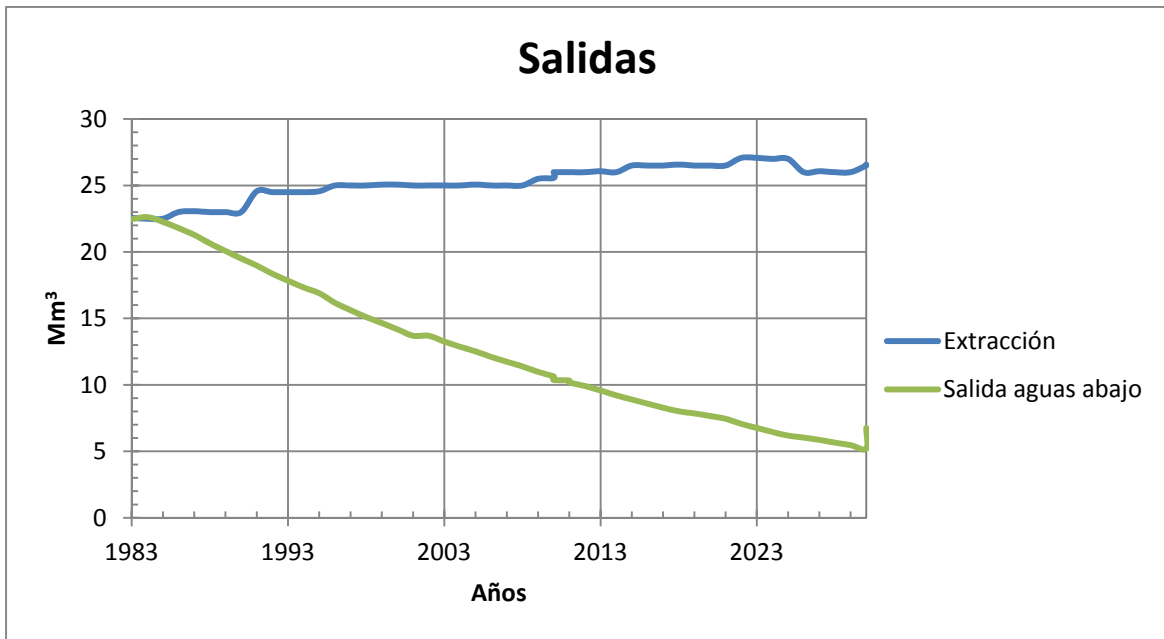


Figura 4.11 Salidas anuales al sistema (Mm³).

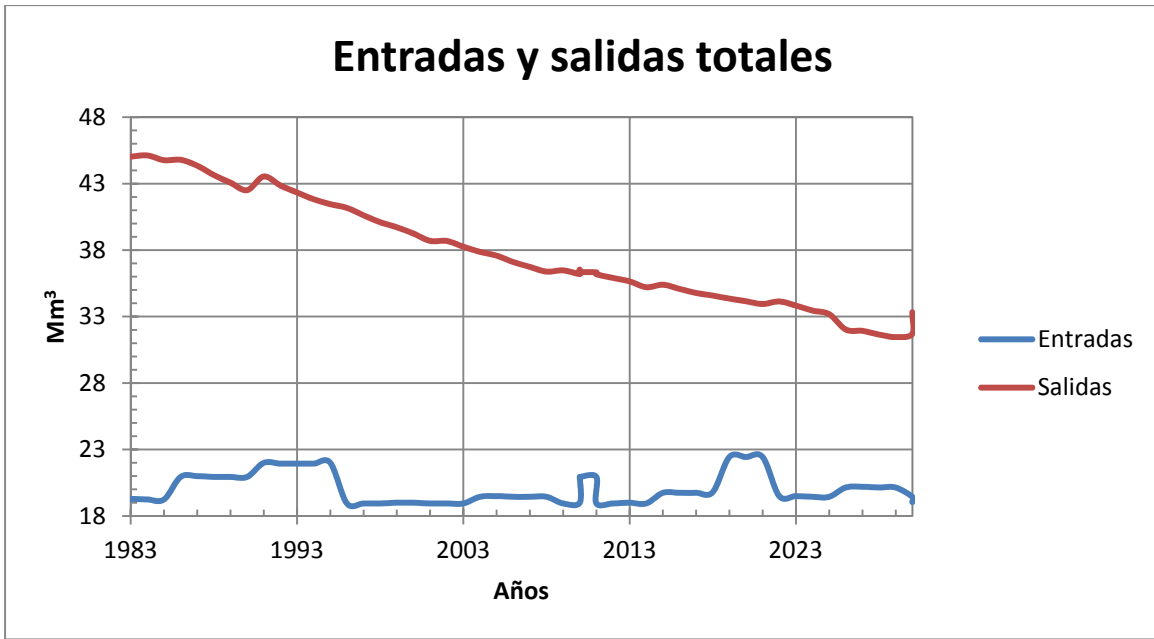


Figura 4.12 Entradas y salidas totales anuales al sistema (Mm³).

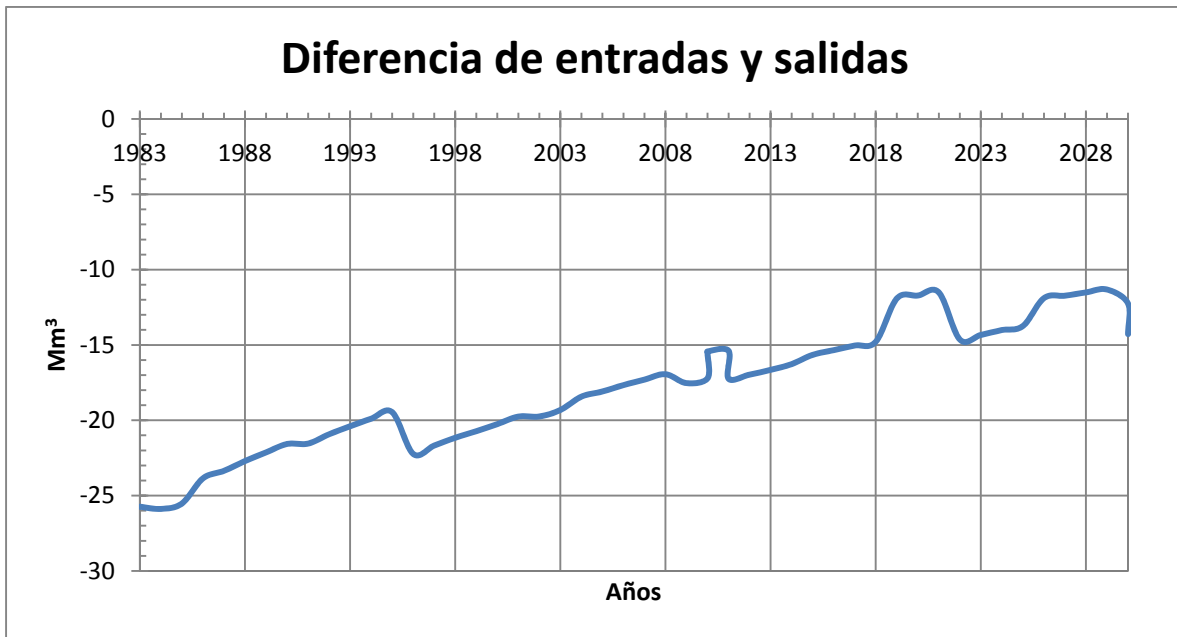


Figura 4.13 Diferencia entre las entradas y las salidas anuales al sistema (Mm³).

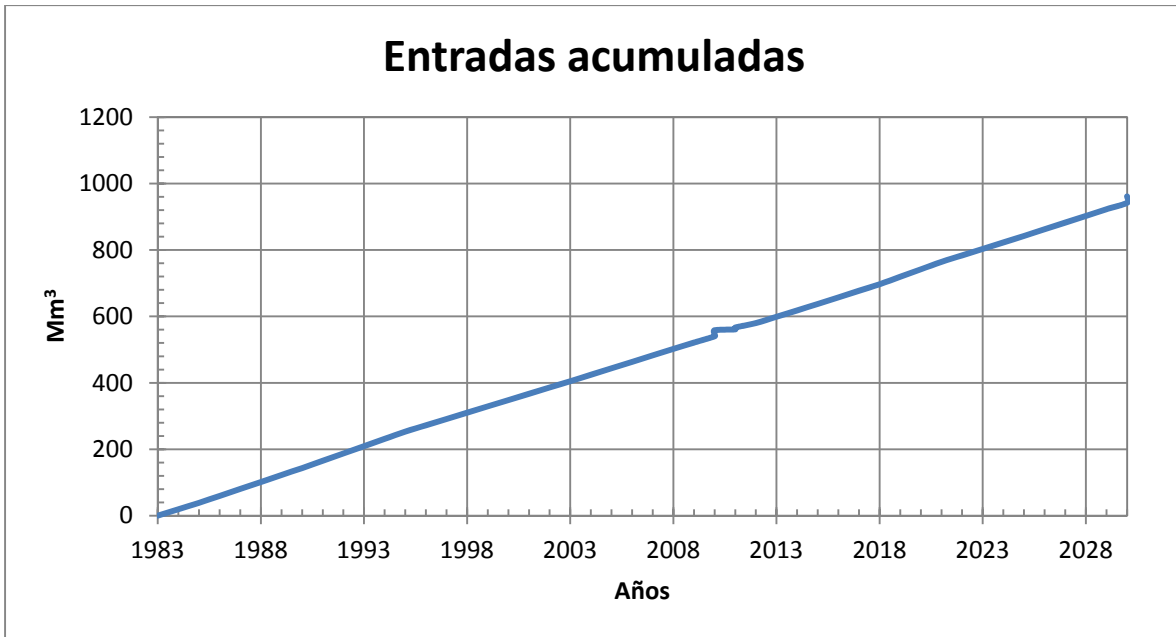


Figura 4.14 Entradas acumuladas (Mm³).

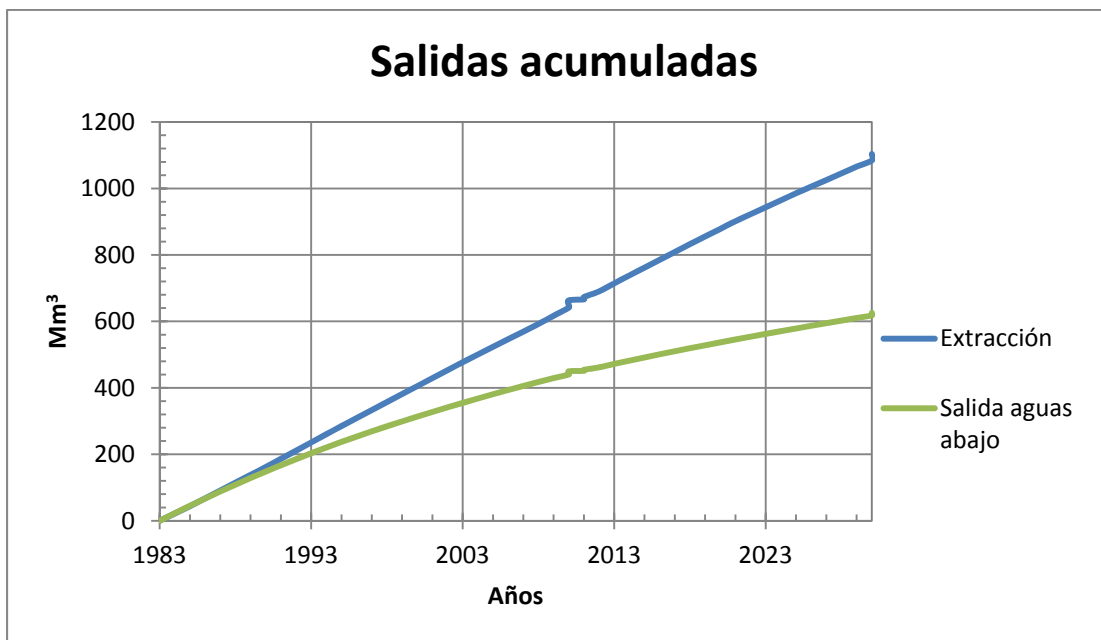


Figura 4.15 Salidas acumuladas (Mm³).

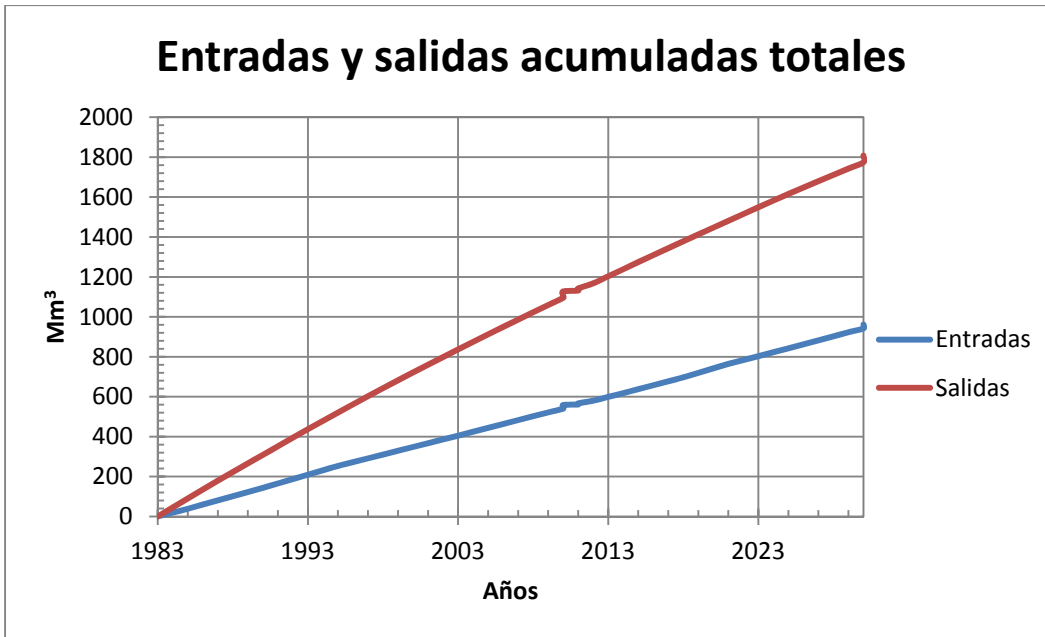


Figura 4.16 Entradas y salidas acumuladas totales al sistema (Mm³).

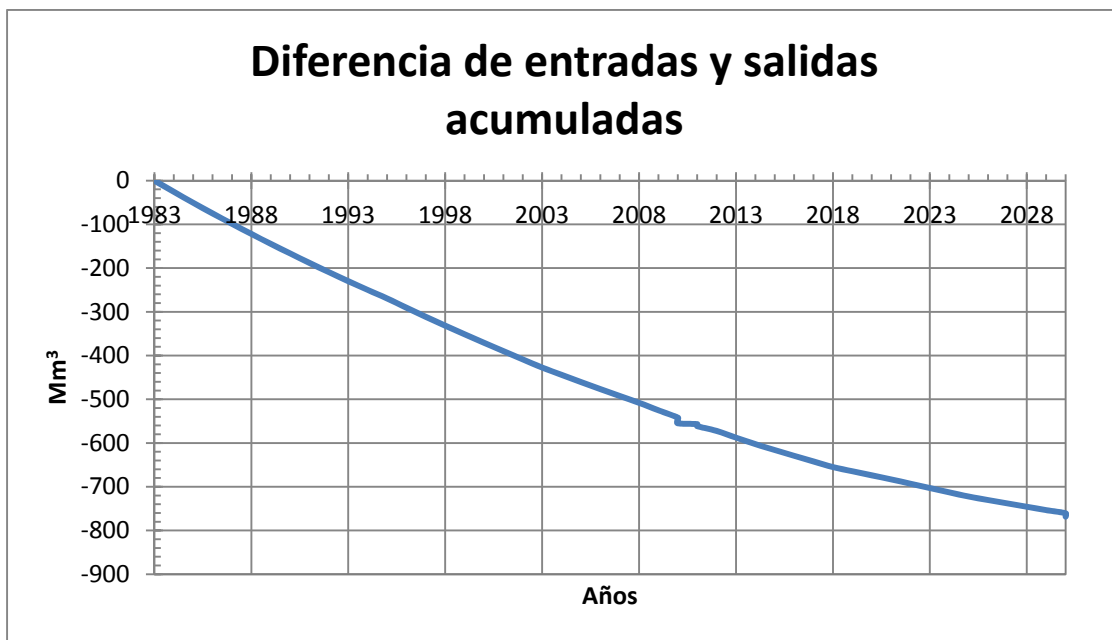


Figura 4.17 Diferencia entre las entradas y las salidas acumulada (Mm³).

En la Figura 4.5 se observa que la dirección de flujo orientada por la gravedad hacia la parte baja de la cuenca cambia a dirigirse hacia las zonas con mayor densidad de pozos.

Los resultados de las simulaciones no pueden ser comparados de manera detallada con las observaciones debido a la falta de referencias geográficas precisas, sin embargo la comparación presentada en las siguientes figuras: Figura 4.7, Figura 4.8 y Figura 4.9 indica una gran similitud entre las profundidades observadas y calculadas de los niveles freáticos. El modelo arroja también información valiosa sobre el volumen de almacenamiento del acuífero y cómo las extracciones globales pueden disminuirlo si no se mantiene el balance entre la recarga natural y la extracción.

El modelo presenta una serie de limitaciones relacionada a la falta de información sobre la situación geohidrológica histórica y actual de los acuíferos tratados en el presente estudio. Para obtener modelos más cercanos a la realidad se deben obtener las características hidrodinámicas del acuífero a partir de un monitoreo de la carga hidráulica del acuífero y una referencia geográfica dentro del modelo para poder relacionar la posición real de un pozo de observación con su posición en el modelo.

El modelo también proporciona información importante sobre el flujo aguas abajo, en la Figura 4.15 se puede observar la salida de agua en el extremo norte del acuífero en donde a lo largo de la simulación salieron alrededor de 600 Mm^3 . Adicionalmente, dicha salida es un indicio de que los acuíferos de Ojos Negros y Real de Castillo pueden estar conectados al acuífero de Valle de Guadalupe en una zona no contemplada en estas simulaciones, lo cual presenta la posibilidad de que el área estudiada en el Valle de Guadalupe reciba aportaciones importantes de agua mediante la salida del acuífero de Real de Castillo.

En la Figura 4.6 se muestra el abatimiento al final de la simulación. Los balances de entrada y salida de agua al sistema se muestran en la Tabla 4.1 y en las figuras: Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17.

Valle de Guadalupe

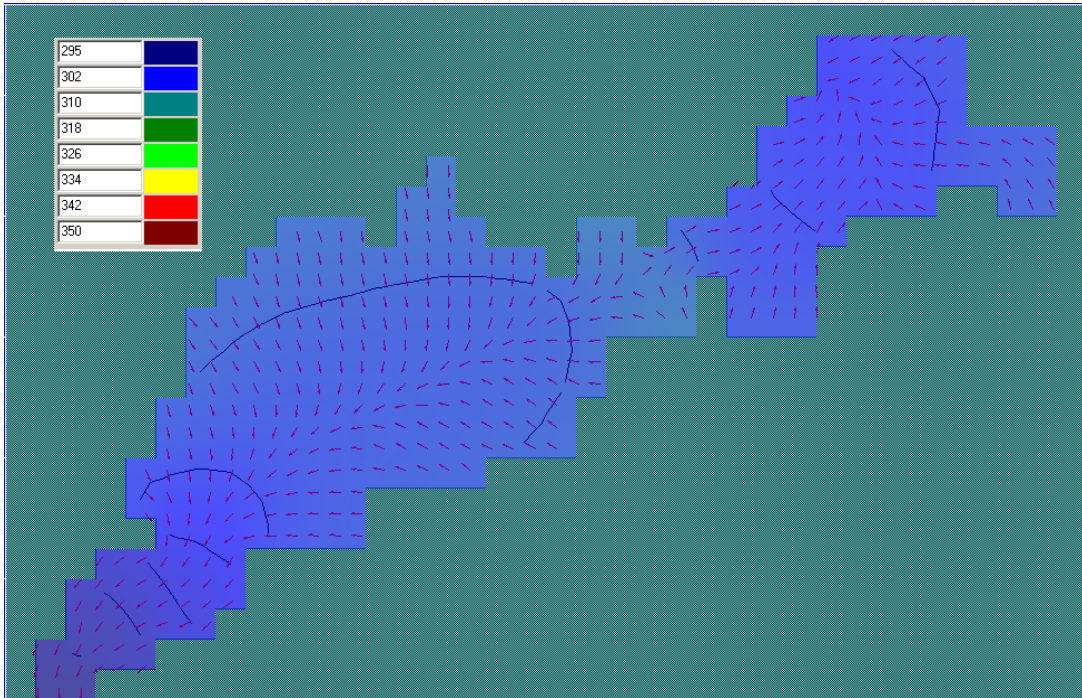


Figura 4.18 Dirección de flujo y carga hidráulica (msnm), calculado al año 2030.

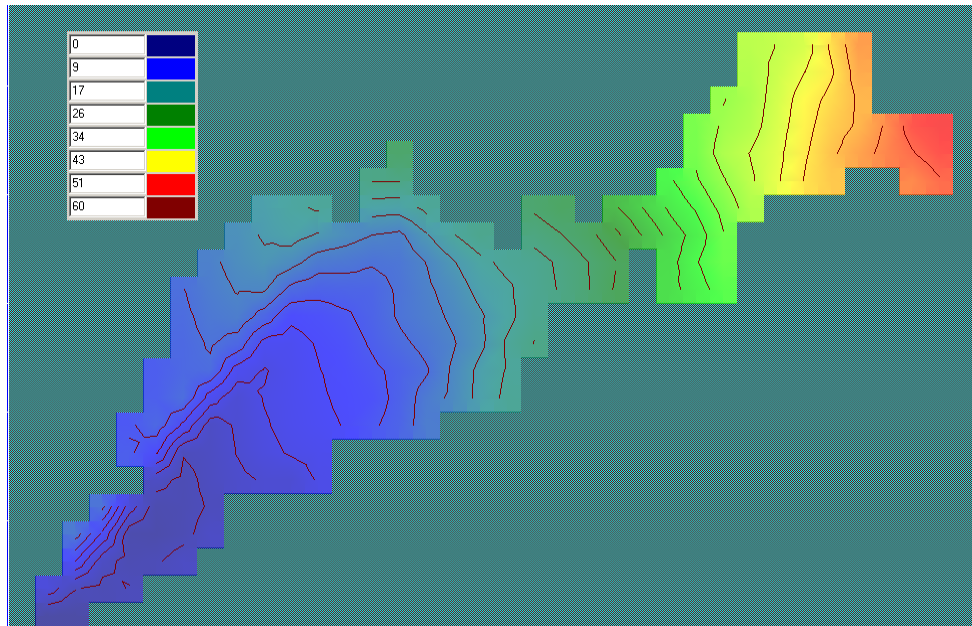


Figura 4.19 Abatimiento en metros desde el inicio de la simulación (enero 1984) hasta diciembre de 2030.

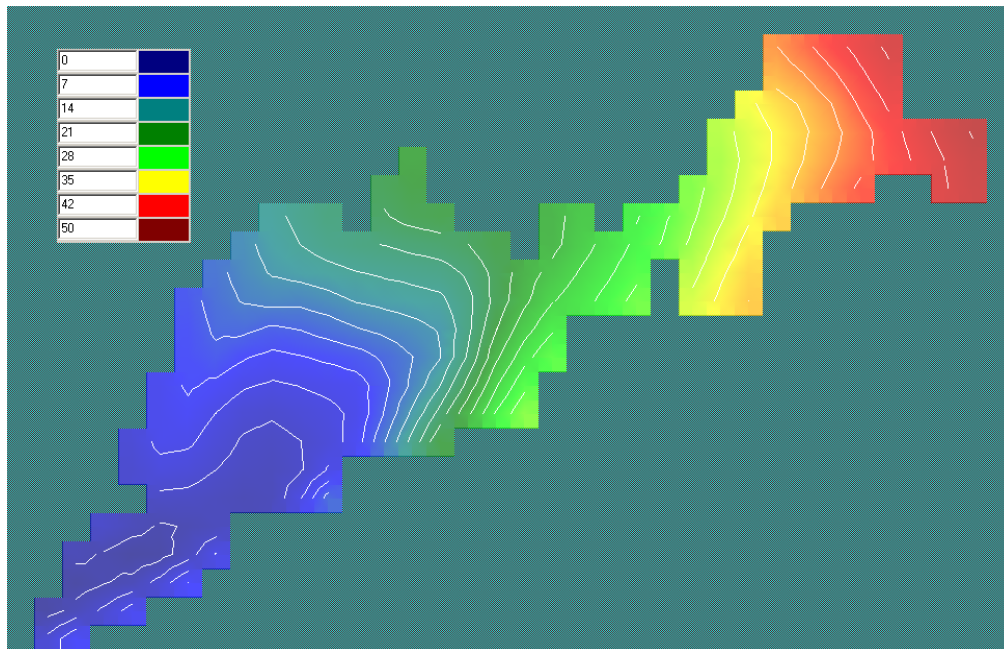


Figura 4.20 Profundidad del nivel freático (m) calculada en noviembre de 2008.

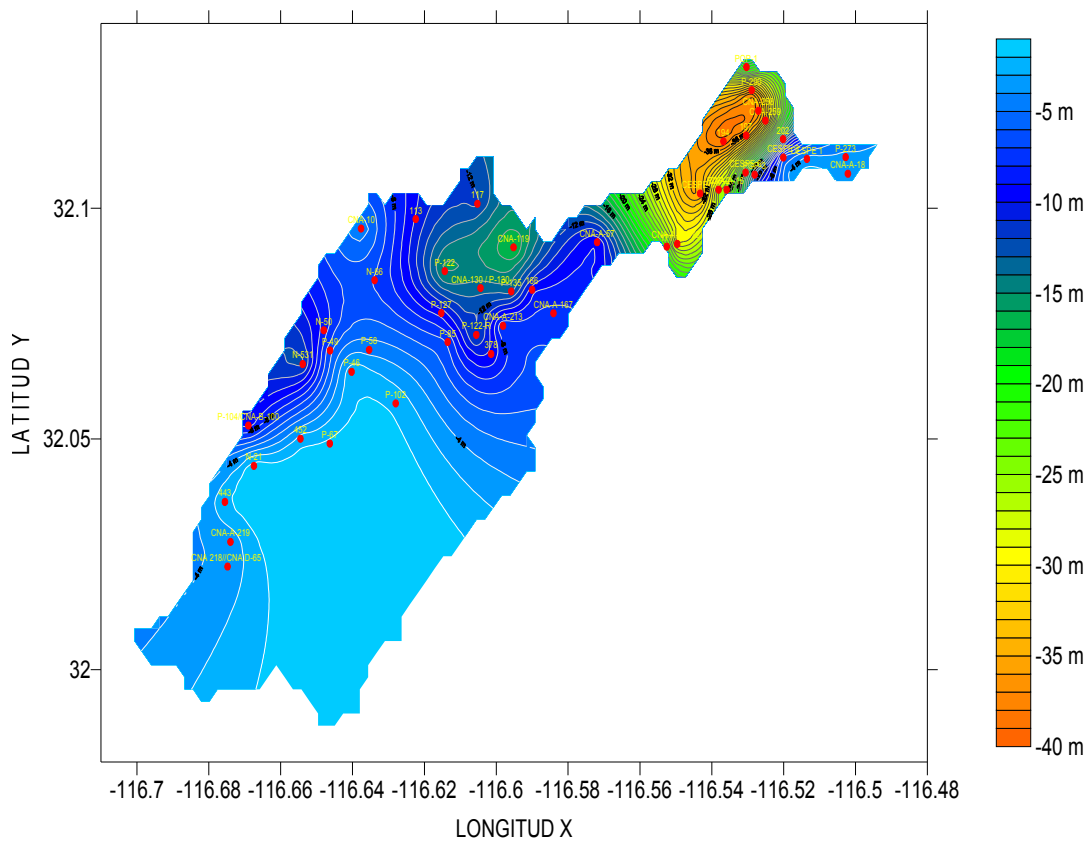


Figura 4.21 Profundidad del nivel freático (m) observada en noviembre de 2008.

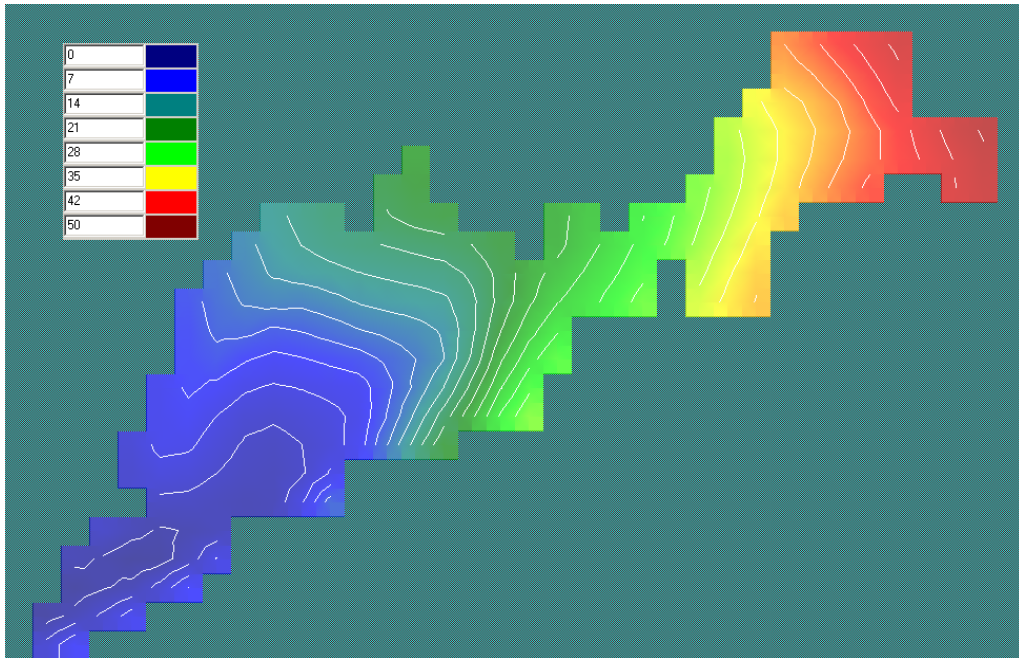


Figura 4.22 Profundidad del nivel freático (m) calculada en marzo de 2009.

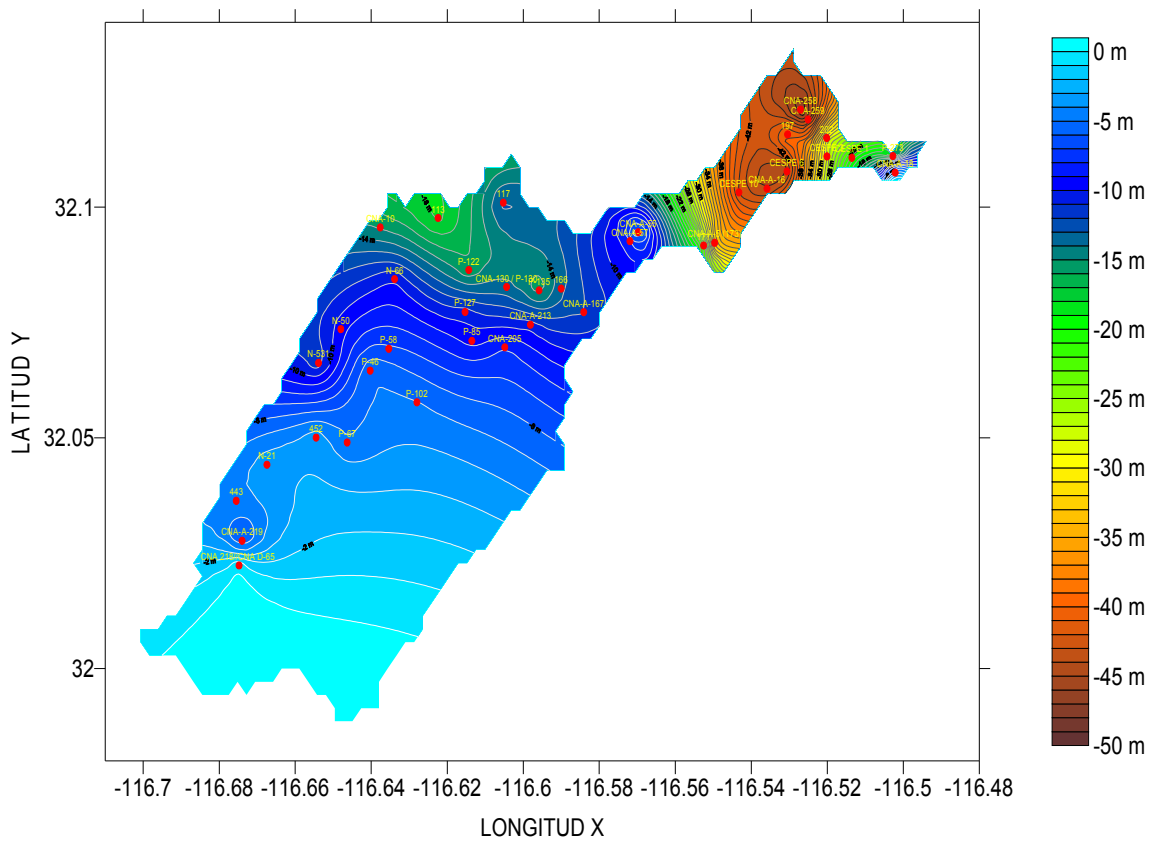


Figura 4.23 Profundidad del nivel freático (m) observada en marzo de 2009.

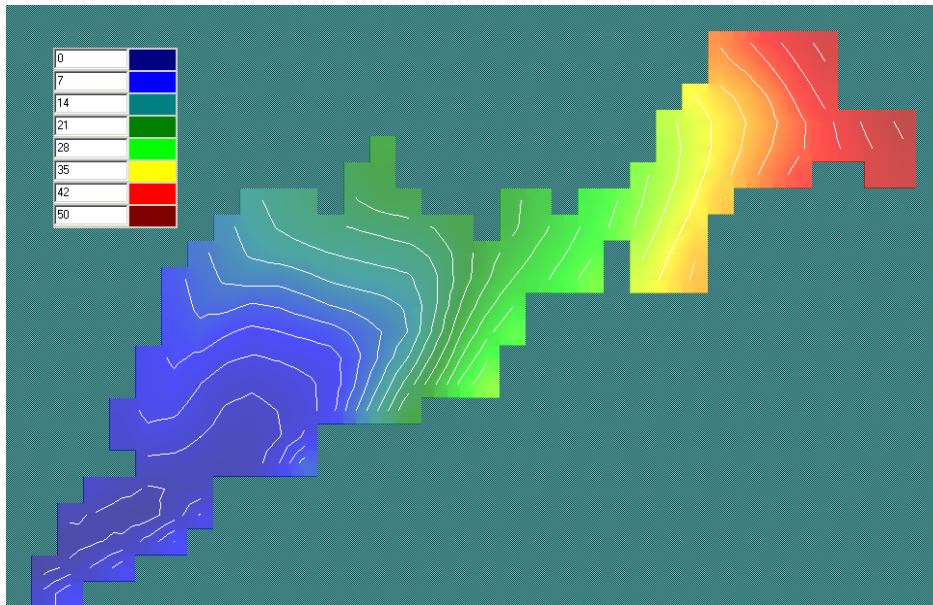


Figura 4.24 Profundidad del nivel freático (m) calculada en noviembre de 2009.

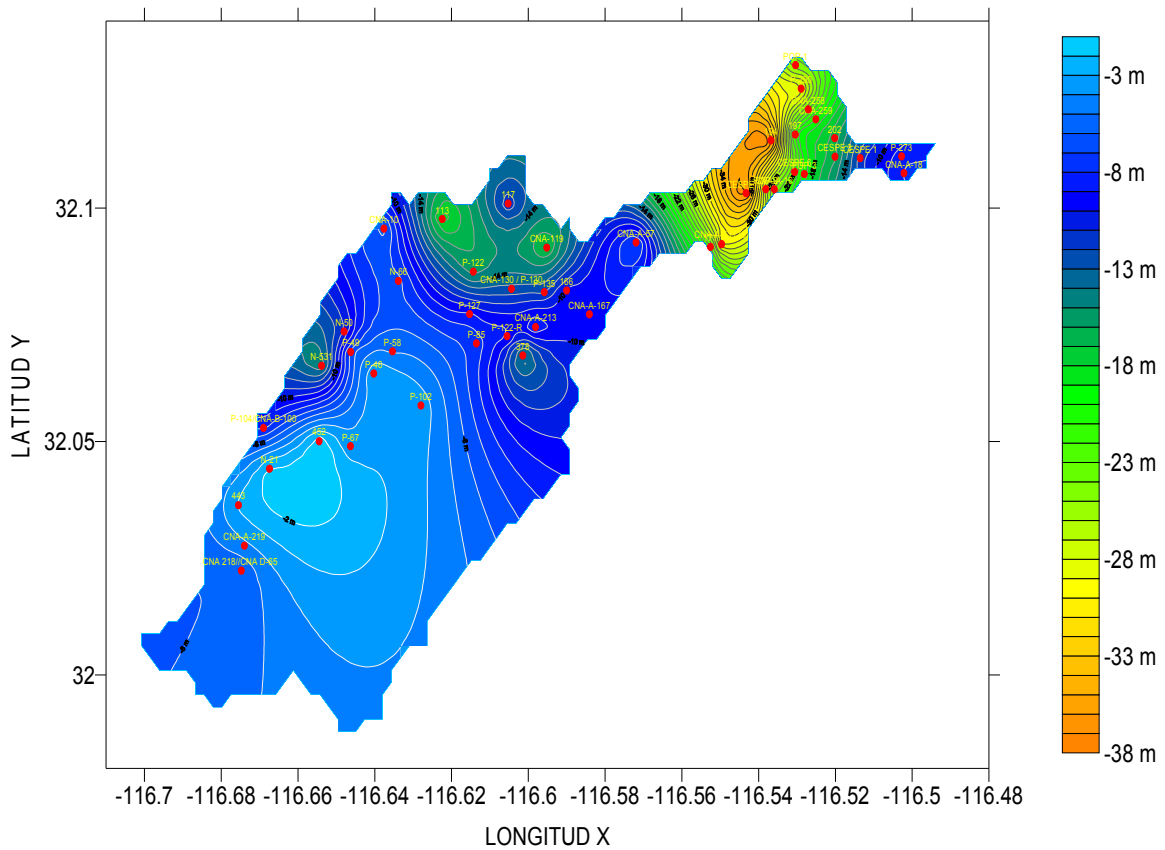


Figura 4.25 Profundidad del nivel freático (m) observada en noviembre de 2009.

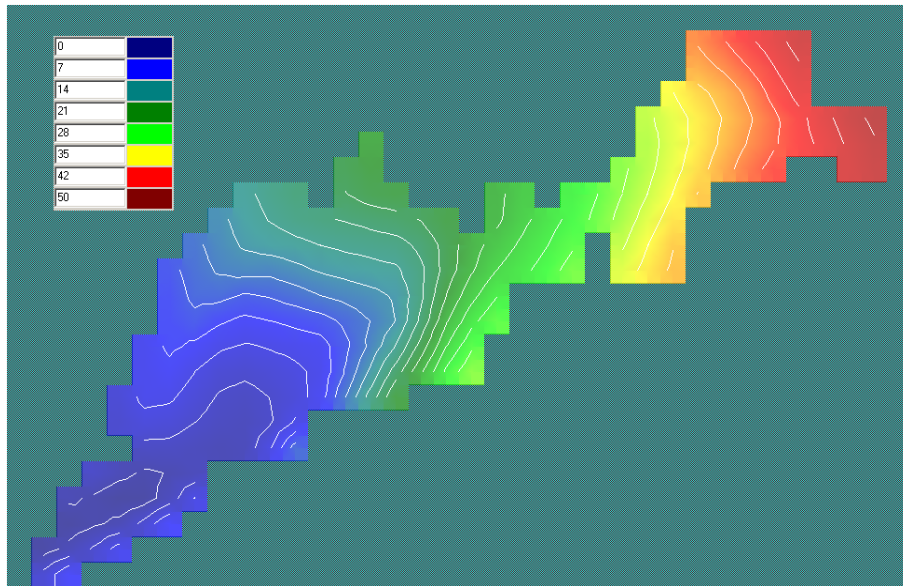


Figura 4.26 Profundidad del nivel freático (m) calculada en abril de 2010.

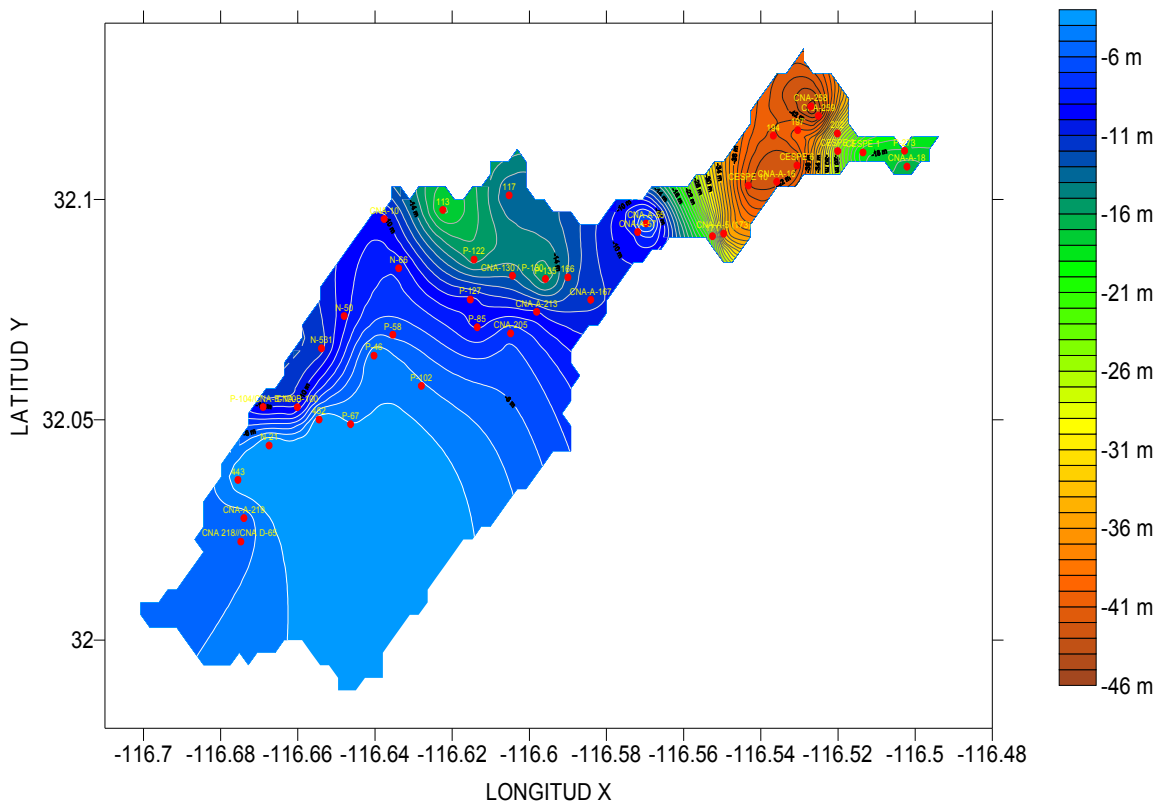


Figura 4.27 Profundidad del nivel freático (m) observada en abril de 2010.

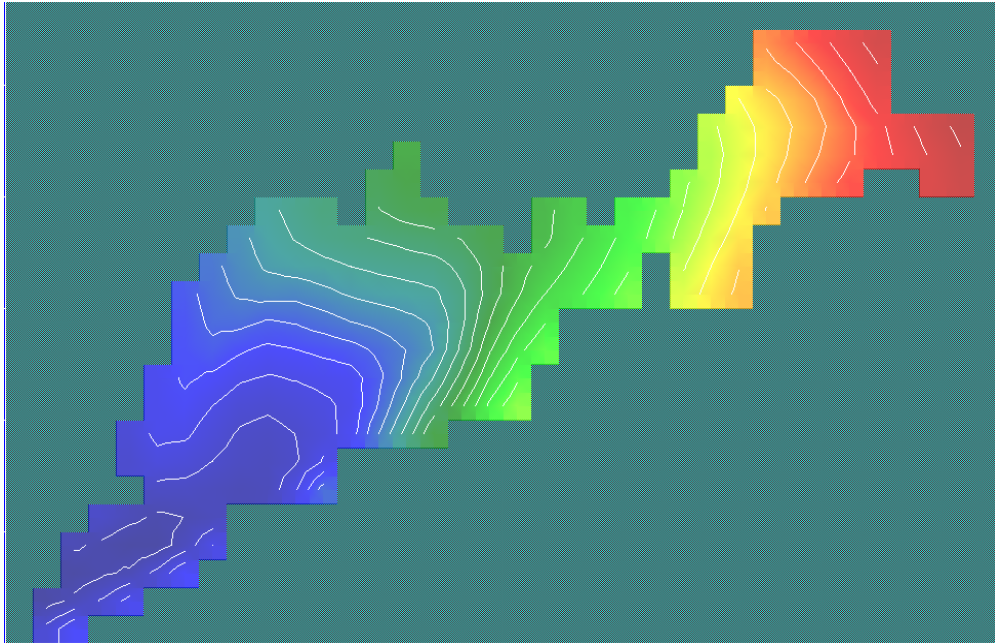


Figura 4.28 Profundidad del nivel freático (m) calculada en noviembre de 2010.

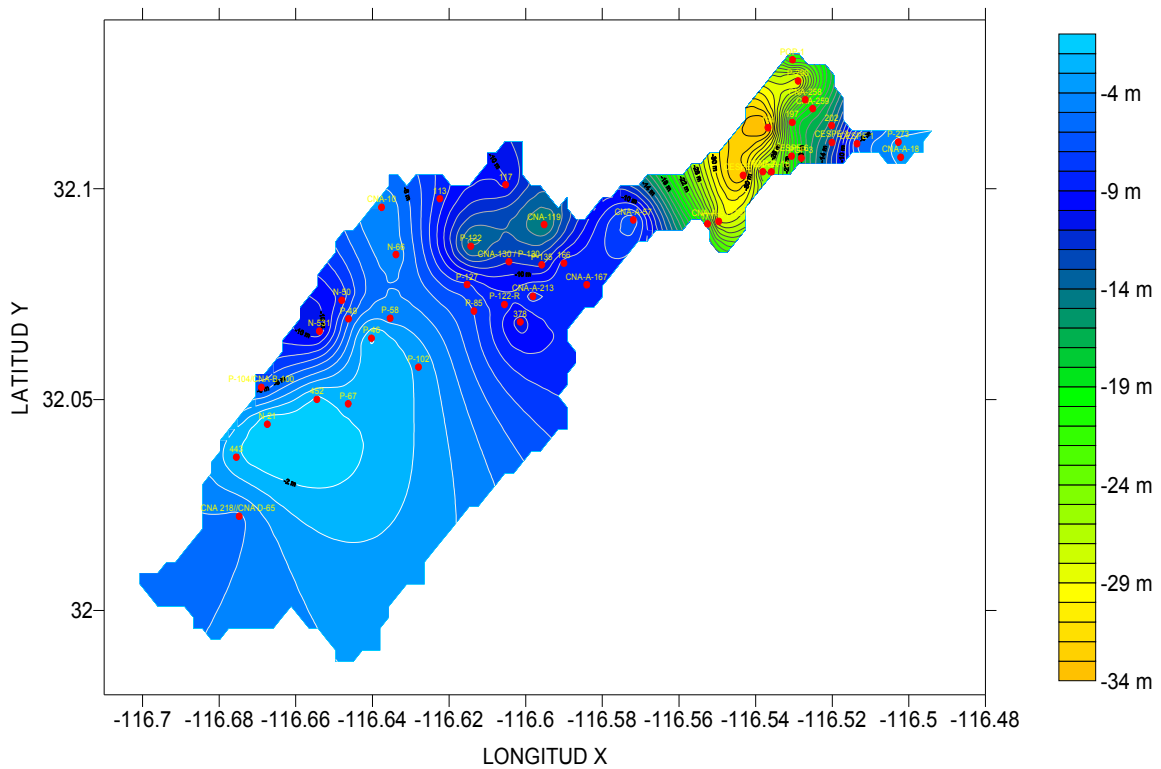


Figura 4.29 Profundidad del nivel freático (m) observada en noviembre de 2010.

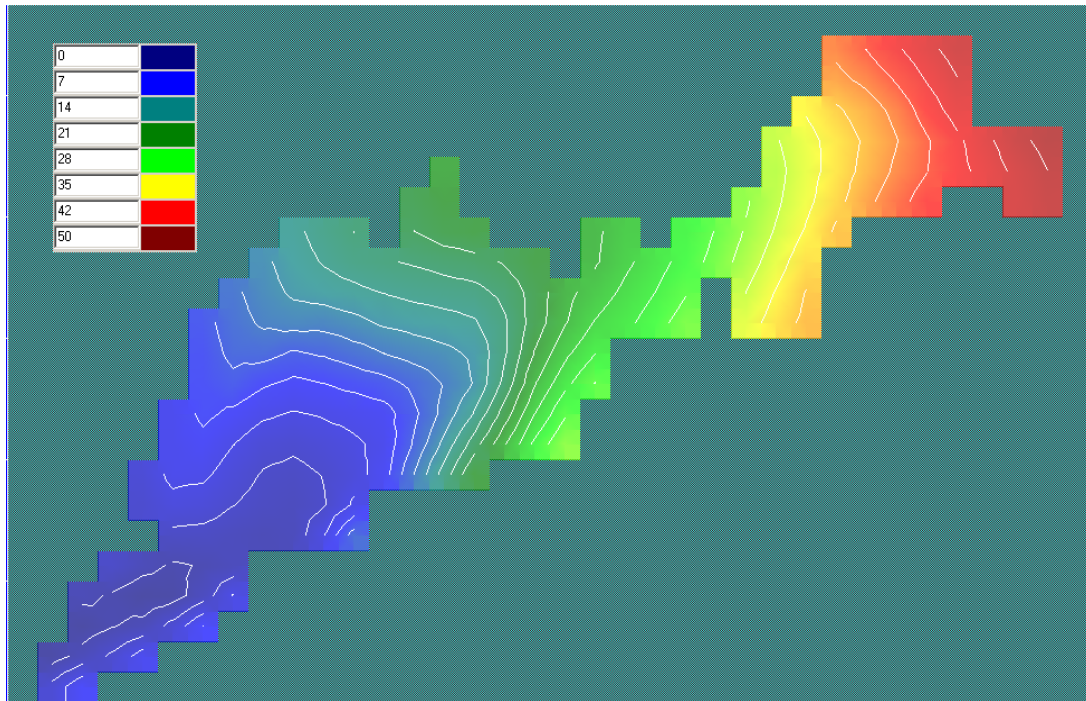


Figura 4.30 Profundidad del nivel freático (m) calculada en abril de 2011.

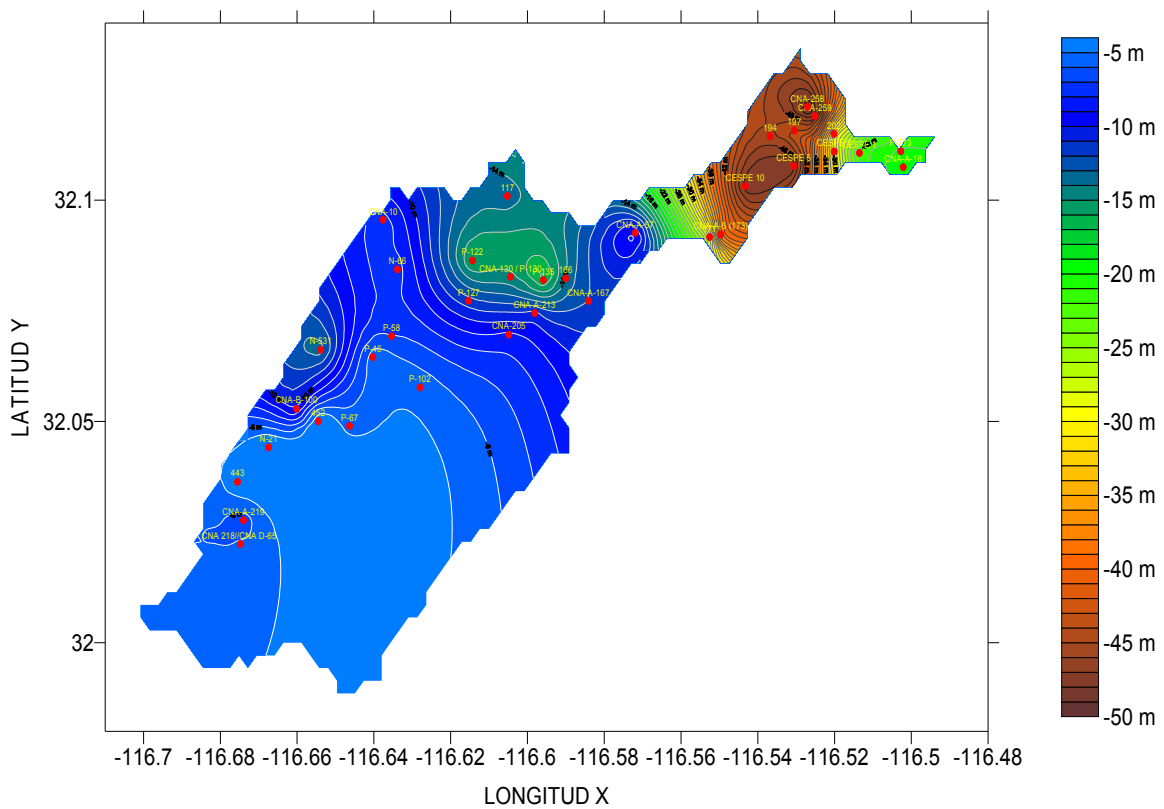


Figura 4.31 Profundidad del nivel freático (m) observada en abril de 2011

		Tasa [Mm ³ /año]					
Año	Días	Entradas	Salidas			Total salidas	Diferencia
		Recarga	Extracción	Salida aguas abajo	Evapotranspiración		
1984	365	23.58	23.65	3.06	2.32	29.02	-5.45
1985	731	23.51	23.65	3.60	2.57	29.82	-6.31
1986	1096	21.38	23.65	3.52	2.56	29.72	-8.34
1987	1461	21.38	23.65	3.45	2.52	29.62	-8.24
1988	1827	21.44	23.65	3.39	2.24	29.28	-7.84
1989	2192	21.38	23.65	3.34	2.03	29.02	-7.64
1990	2557	21.38	23.65	3.29	1.79	28.72	-7.34
1991	2922	23.32	23.65	3.34	1.78	28.76	-5.45
1992	3288	23.38	23.65	3.31	1.73	28.69	-5.30
1993	3653	23.32	23.65	3.27	1.67	28.59	-5.27
1994	4018	23.32	23.65	3.23	1.47	28.35	-5.03
1995	4383	23.32	23.65	3.20	1.30	28.15	-4.84
1996	4749	22.51	23.65	3.14	1.12	27.90	-5.39
1997	5114	22.44	23.65	3.08	1.04	27.77	-5.32
1998	5479	22.44	23.65	3.03	0.86	27.54	-5.09
1999	5844	22.44	23.65	3.00	0.71	27.36	-4.91
2000	6205	22.51	23.65	2.95	0.60	27.20	-4.70
2000	6210	22.51	23.28	2.95	0.60	26.84	-4.33
2001	6575	22.44	23.28	2.93	0.57	26.78	-4.34
2002	6935	22.44	23.28	2.90	0.44	26.62	-4.18
2002	6940	22.44	25.22	2.90	0.43	28.55	-6.11
2003	7305	22.06	25.22	2.73	0.22	28.17	-6.12
2004	7671	22.12	25.22	2.65	0.18	28.05	-5.93
2005	8036	22.06	25.22	2.57	0.11	27.91	-5.85
2006	8401	22.06	25.22	2.51	0.06	27.79	-5.73
2007	8760	22.06	25.22	2.42	0.03	27.67	-5.62
2007	8766	22.06	21.34	2.42	0.03	23.79	-1.74
2008	9085	22.51	21.34	2.61	0.10	24.05	-1.55
2008	9131	22.51	21.34	2.62	0.11	24.07	-1.56
2009	9205	22.44	21.34	2.62	0.11	24.08	-1.63
2009	9450	22.44	21.34	2.63	0.12	24.09	-1.65
2009	9490	22.44	21.34	2.63	0.12	24.09	-1.65
2009	9496	22.44	20.37	2.63	0.12	23.12	-0.68
2010	9611	23.22	20.37	2.69	0.12	23.18	0.04
2010	9815	23.22	20.37	2.73	0.15	23.24	-0.02
2010	9855	23.22	20.37	2.73	0.15	23.25	-0.03
2010	9861	23.22	23.77	2.73	0.15	26.64	-3.42
2011	9966	22.06	23.77	2.61	0.09	26.46	-4.41
2011	10226	22.06	23.77	2.48	0.04	26.29	-4.23
2012	10592	22.12	23.77	2.39	0.00	26.16	-4.04
2013	10950	22.06	23.77	2.31	0.00	26.08	-4.02
2013	10957	22.06	24.06	2.31	0.00	26.37	-4.31
2014	11322	22.60	24.06	2.24	0.00	26.30	-3.69
2015	11687	22.60	24.06	2.17	0.00	26.23	-3.63
2016	12053	22.60	24.06	2.10	0.00	26.16	-3.56
2017	12410	22.54	24.06	2.04	0.00	26.10	-3.56
2017	12418	22.54	24.25	2.04	0.00	26.29	-3.75
2018	12783	22.35	24.25	1.95	0.00	26.20	-3.86
2019	13148	22.41	24.25	1.88	0.00	26.13	-3.72
2020	13505	22.35	24.25	1.81	0.00	26.06	-3.71
2020	13514	22.35	24.74	1.81	0.00	26.54	-4.20
2021	13879	23.51	24.74	1.76	0.00	26.50	-2.99
2022	14244	23.51	24.74	1.71	0.00	26.45	-2.94
2023	14609	23.58	24.74	1.66	0.00	26.40	-2.82
2024	14965	23.51	24.74	1.61	0.00	26.35	-2.84
2024	14975	23.51	25.22	1.61	0.00	26.83	-3.32
2025	15340	22.35	25.22	1.47	0.00	26.70	-4.35
2026	15705	22.41	25.22	1.38	0.00	26.60	-4.19
2027	16070	22.35	25.22	1.30	0.00	26.52	-4.18
2028	16425	22.35	25.22	1.23	0.00	26.45	-4.10
2028	16436	22.35	26.19	1.22	0.00	27.42	-5.07
2029	16801	23.51	26.19	1.14	0.00	27.33	-3.82
2030	17155	23.51	26.19	1.07	0.00	27.27	-3.76
2030	17166	22.34	26.19	1.10	0.00	27.29	-4.95

Tabla 4.2 Tasa anual de entradas y salidas (Mm³).

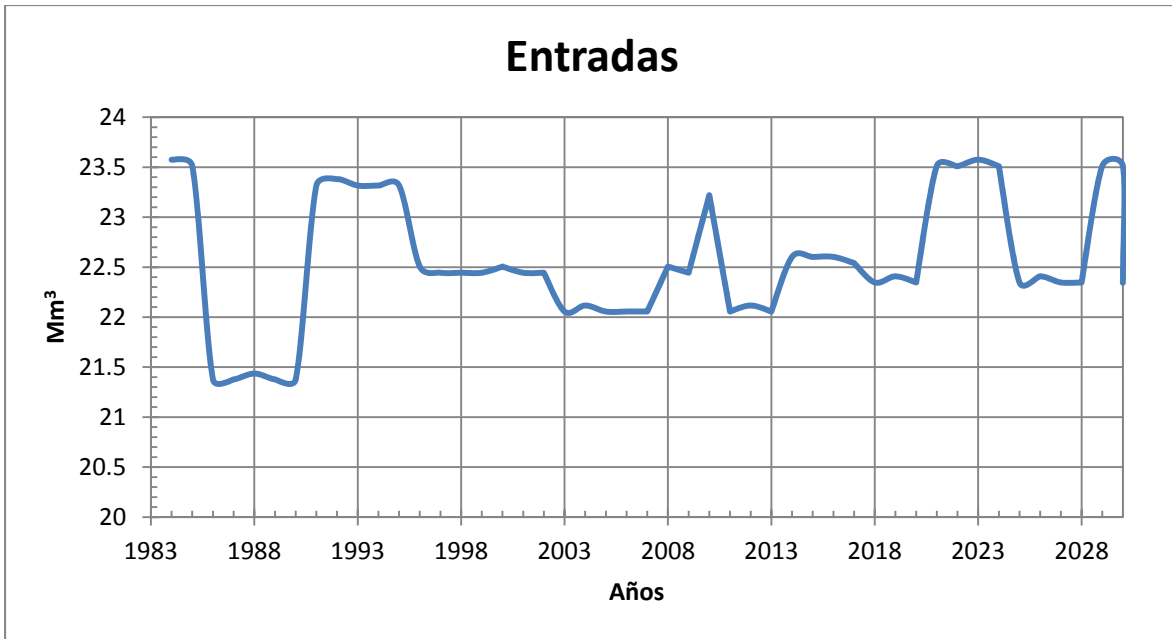


Figura 4.32 Entradas anuales al sistema (Mm³).

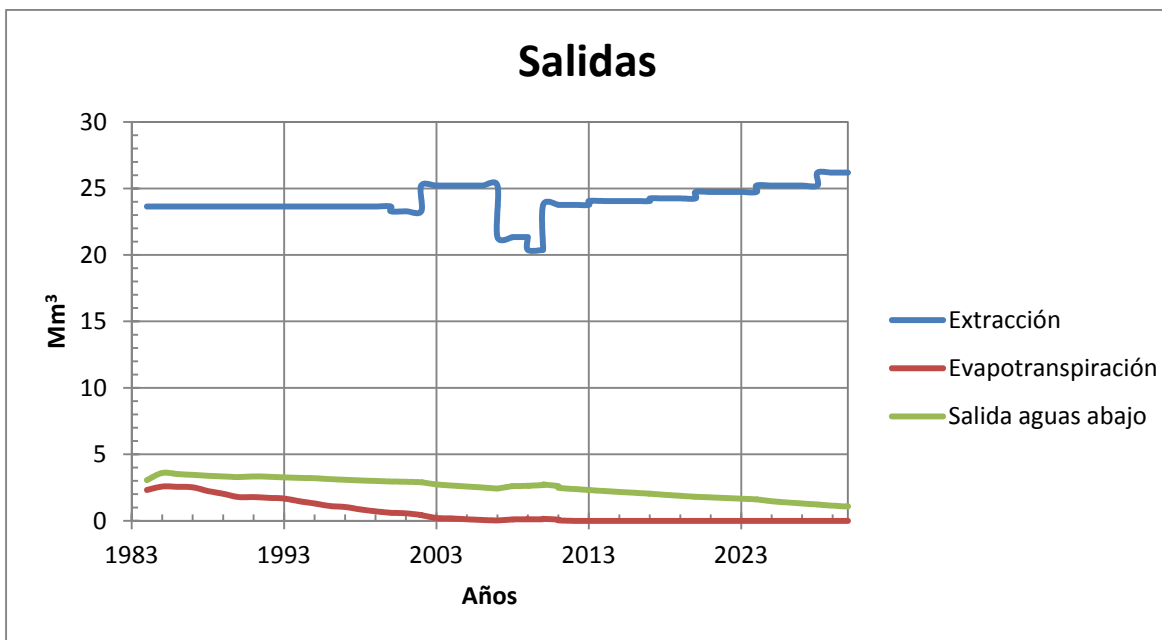


Figura 4.33 Salidas anuales al sistema (Mm³).

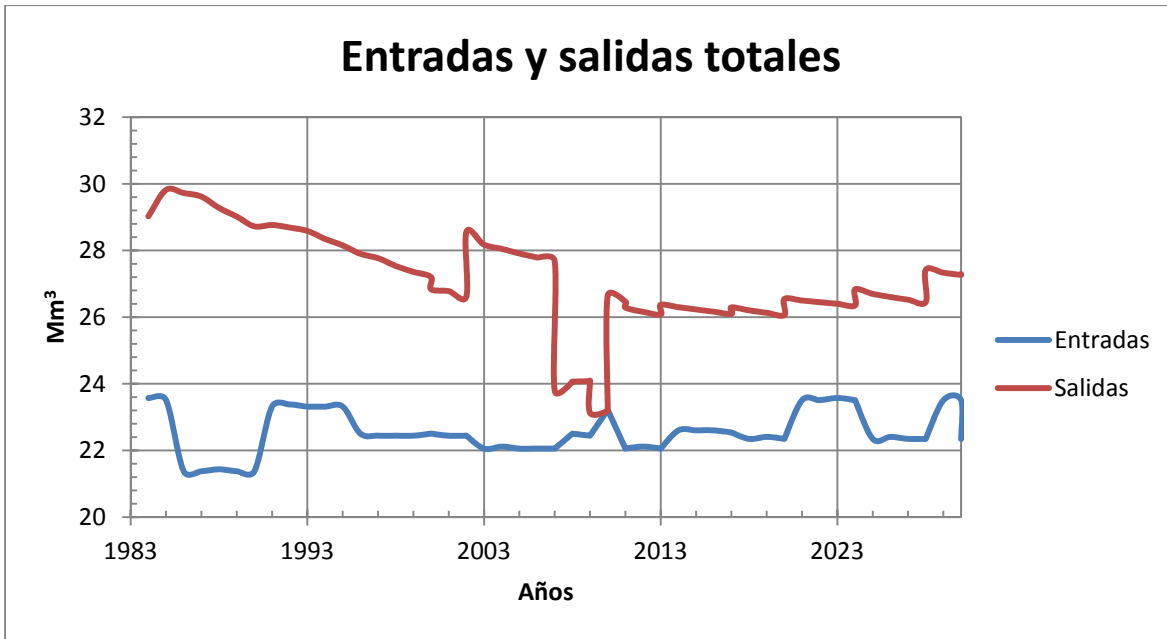


Figura 4.34 Entradas y salidas totales anuales al sistema (Mm³).

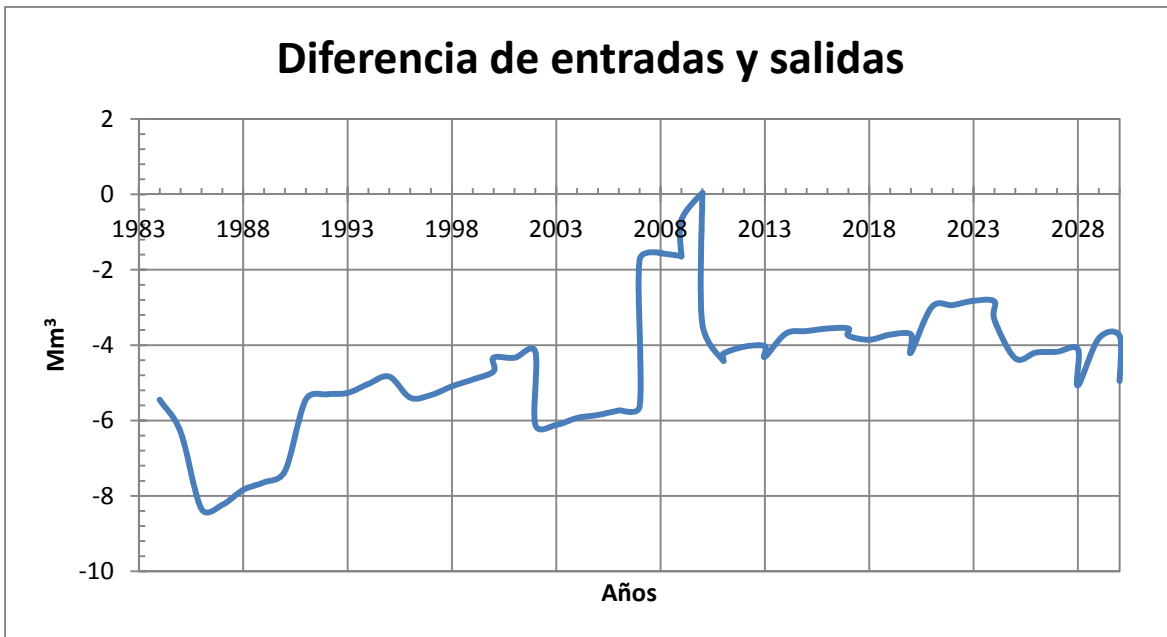


Figura 4.35 Diferencia entre las entradas y las salidas anuales al sistema (Mm³).

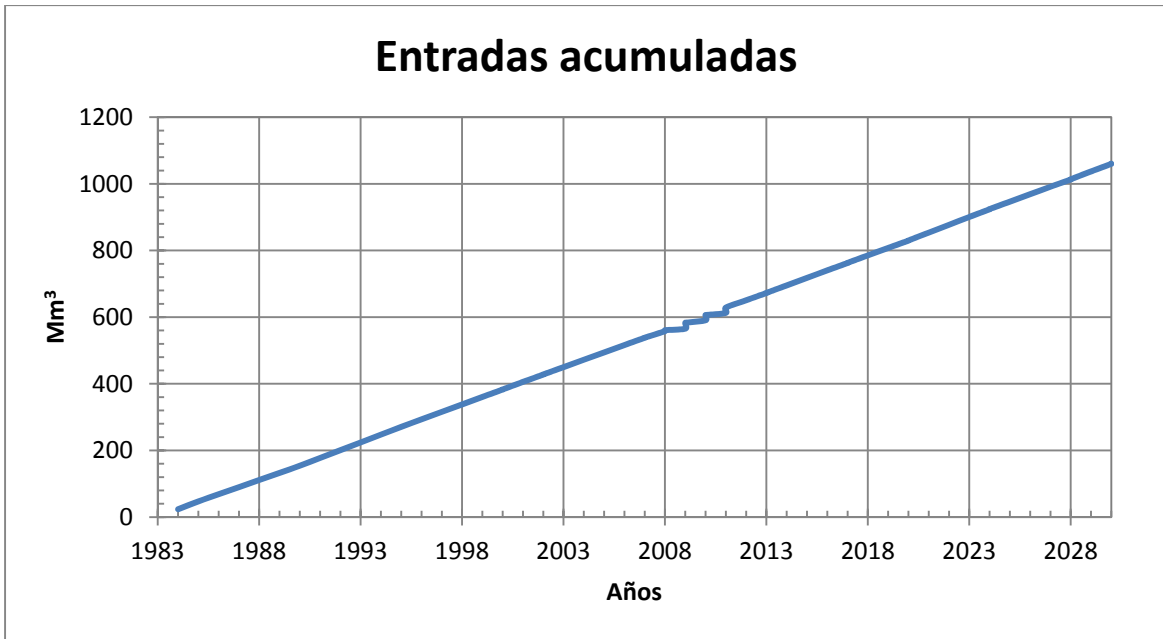


Figura 4.36 Entradas acumuladas (Mm³).

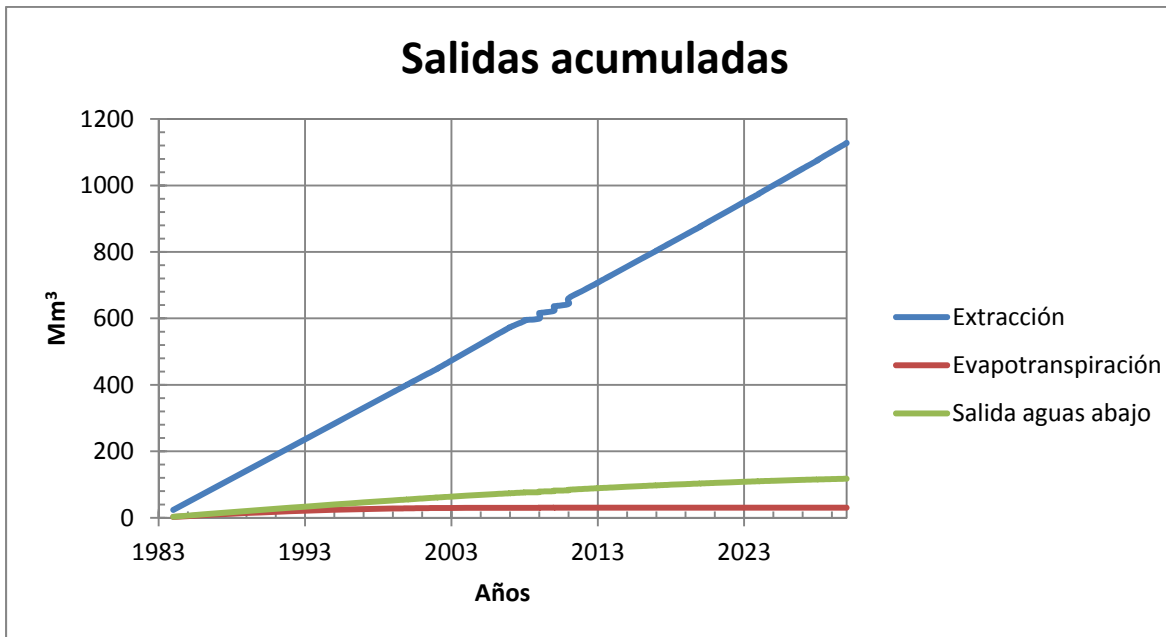


Figura 4.37 Salidas acumuladas (Mm³).

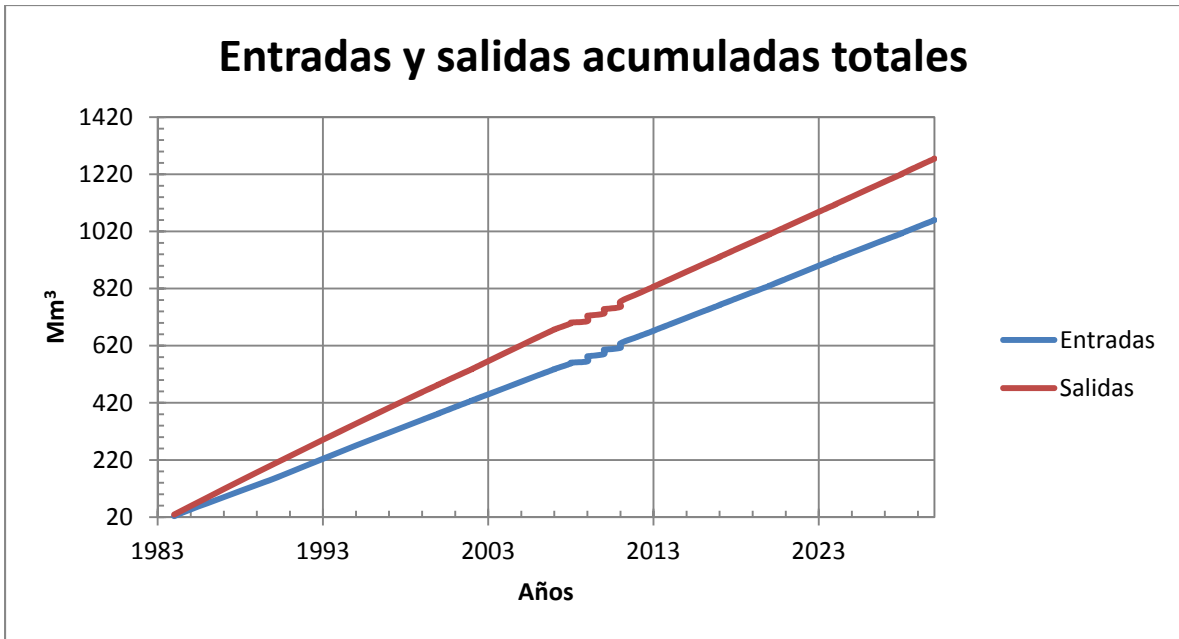


Figura 4.38 Entradas y salidas acumuladas totales al sistema (Mm³).

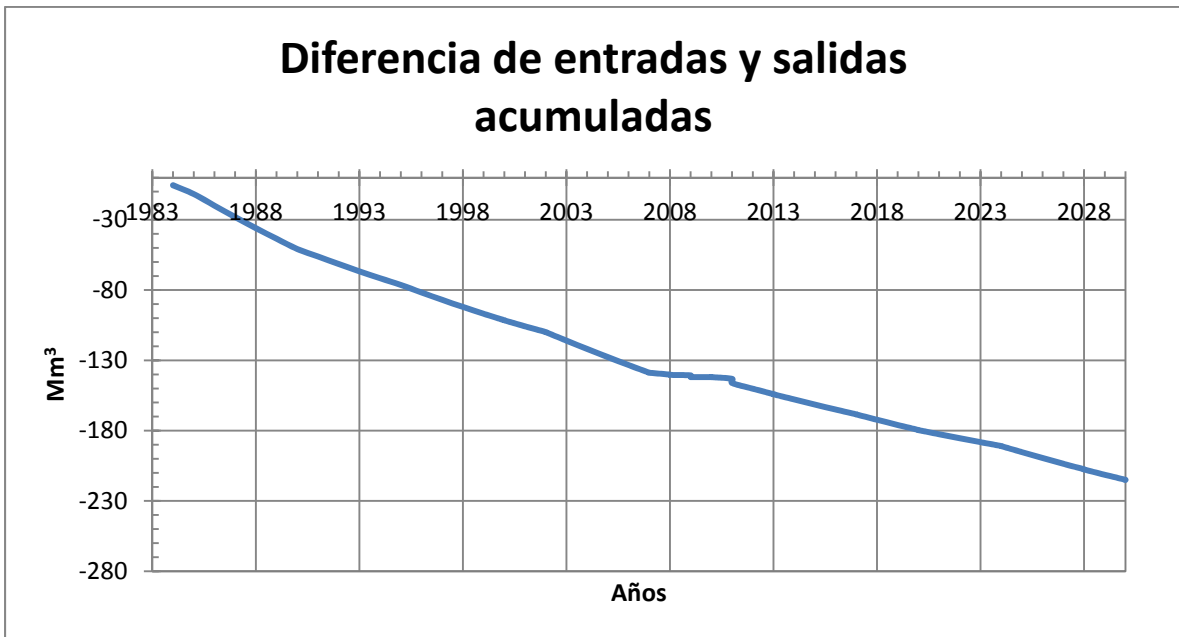


Figura 4.39 Diferencia entre las entradas y las salidas acumulada (Mm³).

En la Figura 4.18 se muestra la carga y la dirección del flujo y en la Figura 4.19 se muestran los valores del abatimiento al término de la simulación.

Al comparar la profundidad del nivel freático calculada con la observada (Figura

4.20, Figura 4.21, Figura 4.22, Figura 4.23, Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27, Figura 4.28, Figura 4.29, Figura 4.30 y Figura 4.31) destacan zonas en el acuífero donde las profundidades son relativamente similares, pero las diferencias entre el mallado del modelo y la forma real del acuífero son significativamente diferentes, así como la ubicación de los pozos, esto se traduce en una pérdida de capacidad para lograr una comparación más detallada y objetiva.

Se puede observar un descenso gradual en los niveles freáticos y para el año 2030 un abatimiento importante, esta sobreexplotación podría afectar negativamente la disponibilidad y abastecimiento de agua para la región (Figura 4.39).

Se nota que la salida de agua del sistema aguas abajo y la salida por evapotranspiración disminuye con el tiempo, la salida aguas abajo es proporcional a la carga del acuífero; y en cuanto a la evapotranspiración, en tanto más profundo se encuentre el acuífero se vuelve menos accesible para las plantas y recibe menor energía solar que logre evaporar el agua contenida en el acuífero.

En la Figura 4.39 se observa un déficit en la disponibilidad de agua desde el inicio de la simulación, el cual acumulado hasta el año 2030 es de alrededor de 215 Mm³.

Las entradas y salidas al acuífero a lo largo de las simulaciones se muestran en las siguientes figuras: Figura 4.32, Figura 4.33, Figura 4.34, Figura 4.35, Figura 4.36, Figura 4.37, Figura 4.38 y Figura 4.39.

4.2 Modelo conceptual integrado

4.2.1 Definición espacial

El resultado de la interpolación sobre los datos de profundidad en los estratos geológicos que componen los acuíferos de Valle de Guadalupe, Ojos Negros y Real del Castillo es congruente con los estudios de Campos (2002, 2008). La definición del basamento de los acuíferos puede ser mejorada con una mayor cantidad de puntos de referencia sobre todo en zonas claves de los acuíferos. La Figura 4.40 muestra un modelo digital elevaciones del basamento impermeable en la región; en la Figura 4.41

se presenta el modelo en tres dimensiones.

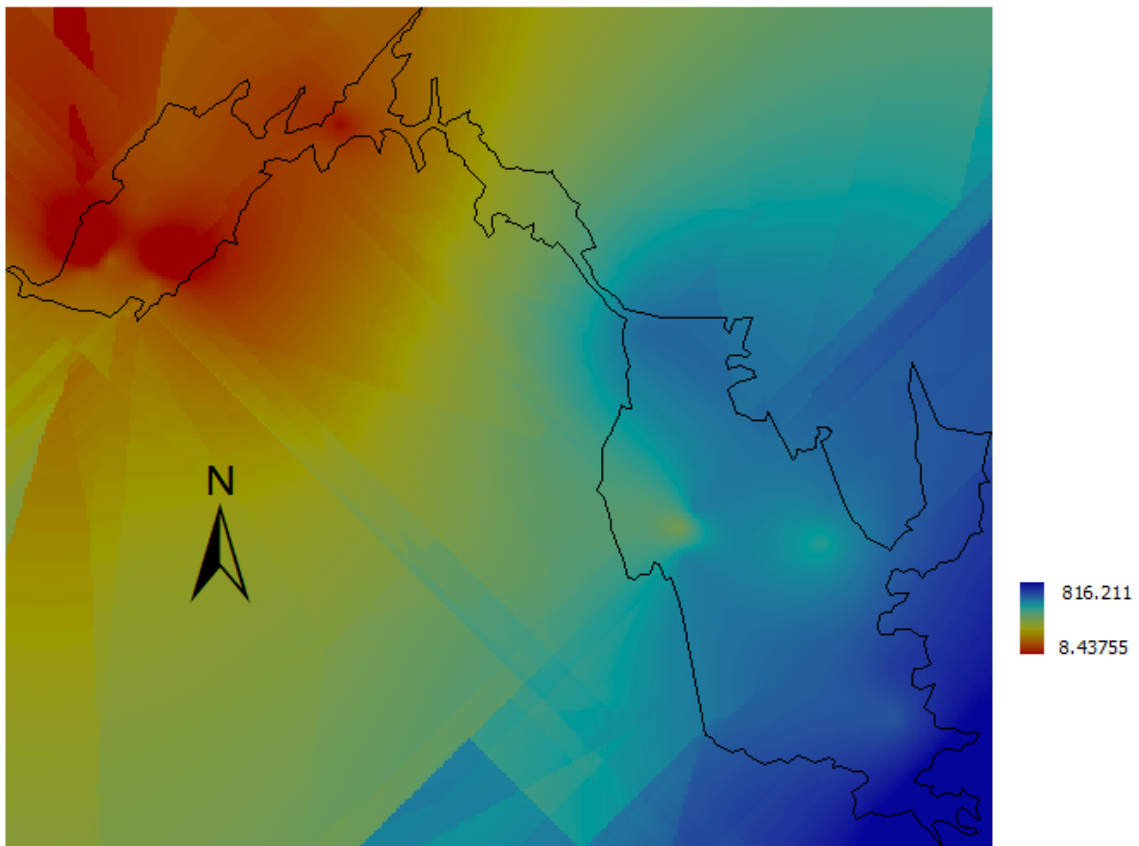


Figura 4.40 Superficie del basamento impermeable calculada con los puntos de profundidad conocida en msnm.

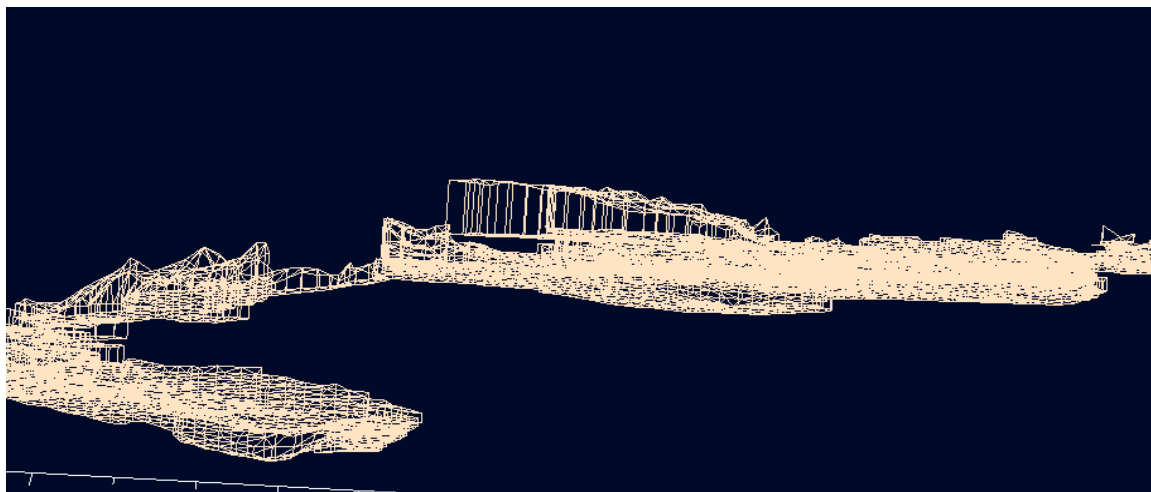


Figura 4.41 Modelo tridimensional de la zona de estudio.

4.2.2 Condiciones iniciales

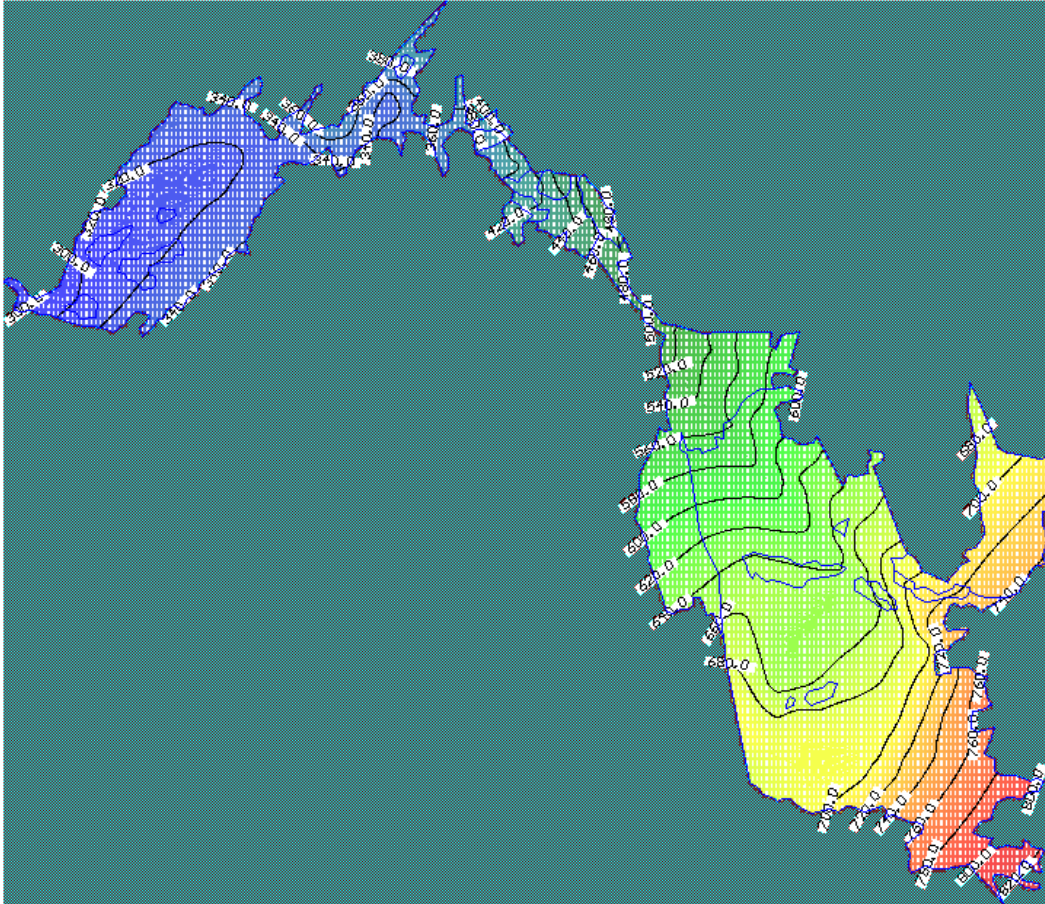


Figura 4.42 Carga inicial en metros sobre el nivel del mar correspondiente a abril de 2010.

Se presentan en la Figura 4.42 las condiciones iniciales en la carga hidráulica para los tres acuíferos.

4.2.3 Calibración

En esta sección se presentan los resultados de la calibración de los parámetros en el modelo integrado y de los modelos de Guadalupe y del sistema Ojos Negros-Real del Castillo (Tabla 4.3, Tabla 4.4 y Tabla 4.5 respectivamente). Se observa en los tres

casos que las formaciones en la zona de interconexión resulta con conductividad y capacidad de almacenamiento muy bajas.

Al comparar las cargas calculadas contra las observadas en cada uno de los modelos, se observa una diferencia media de alrededor de 8 m para el modelo integrado (Figura 4.43 y Figura 4.44), alrededor de 4 m para el modelo de Guadalupe aislado (Figura 4.45 y Figura 4.46) y de alrededor de 10 m para el modelo de Ojos Negros-Real del Castillo (Figura 4.47 y Figura 4.48). Los resultados anteriores podrían mejorar si se tuviera una mayor cantidad de pozos de observación tanto en el espacio como en el tiempo y detallando de una forma más adecuada las condiciones de frontera con estudios de campo.

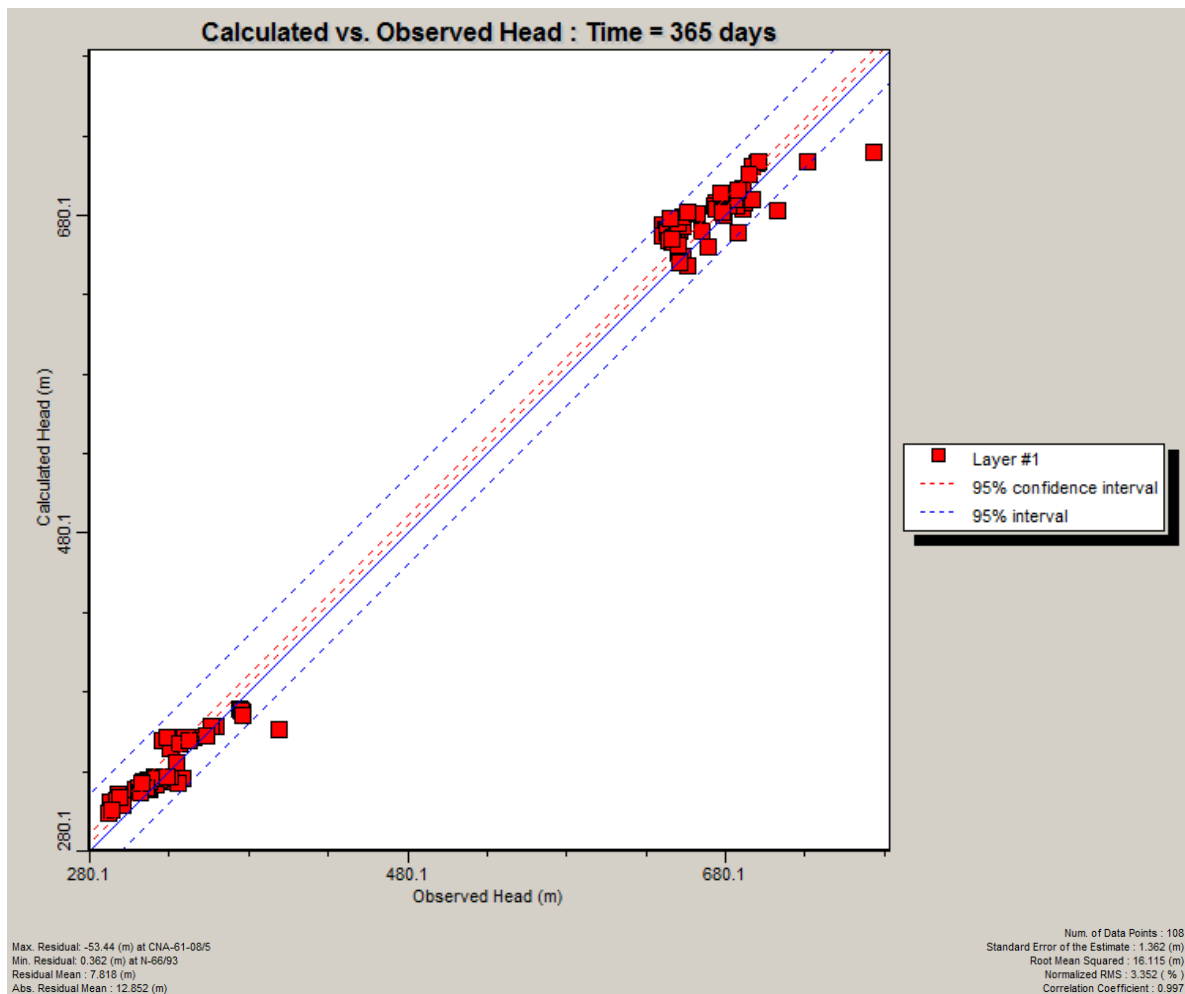


Figura 4.43 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo integrado en abril de 2011.

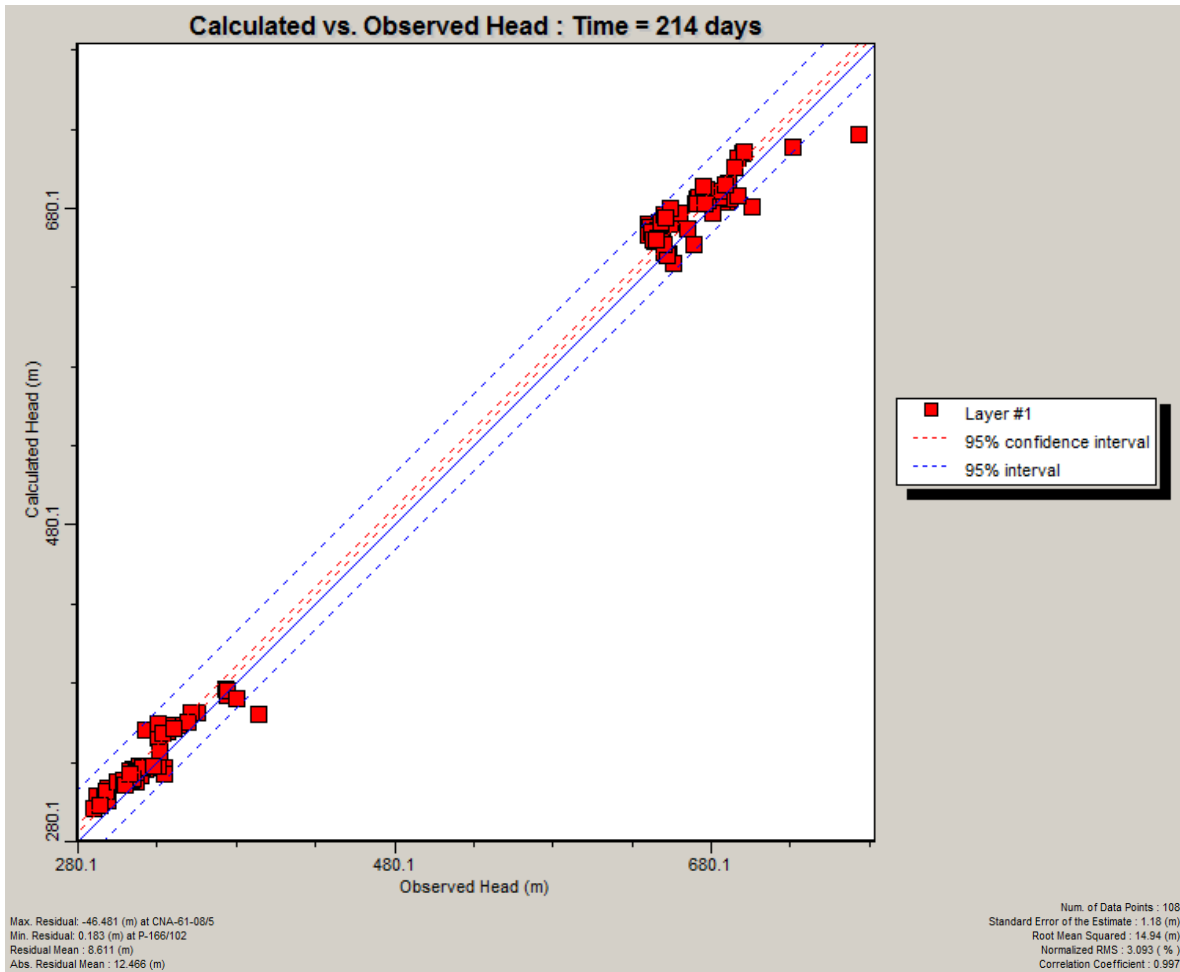


Figura 4.44 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo integrado en noviembre de 2010.

Zona	S_s [1/m]	S	K_x [m/s]	K_y [m/s]	K_z [m/s]
1	1.0152115E-03	0.22	0.000871	0.000871	8.71E-04
2	1.640882E-06	5.138505E-02	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08
3	1.640882E-06	5.138505E-02	1.073868E-07	1.073868E-07	1.00E-08
4	1.640882E-06	5.138505E-02	1.00E-06	1.00E-06	1.073868E-07
5	1.640882E-06	5.138505E-02	1.640882E-07	1.640882E-07	1.640882E-07
6	1.640882E-06	5.138505E-02	1.00E-06	1.00E-06	1.073868E-07

Tabla 4.3 Calibración para el modelo integrado.

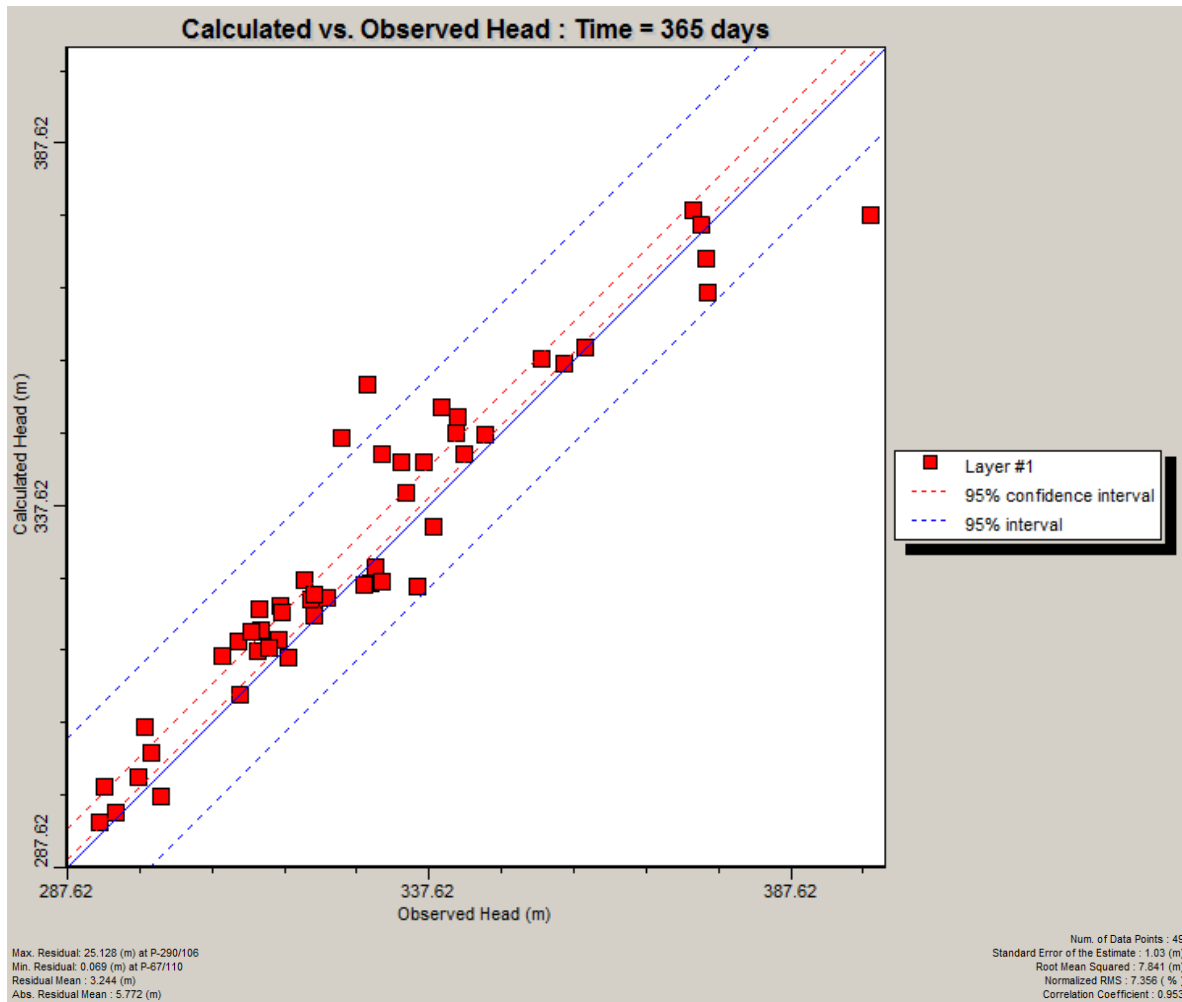


Figura 4.45 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo de Guadalupe en abril de 2011.

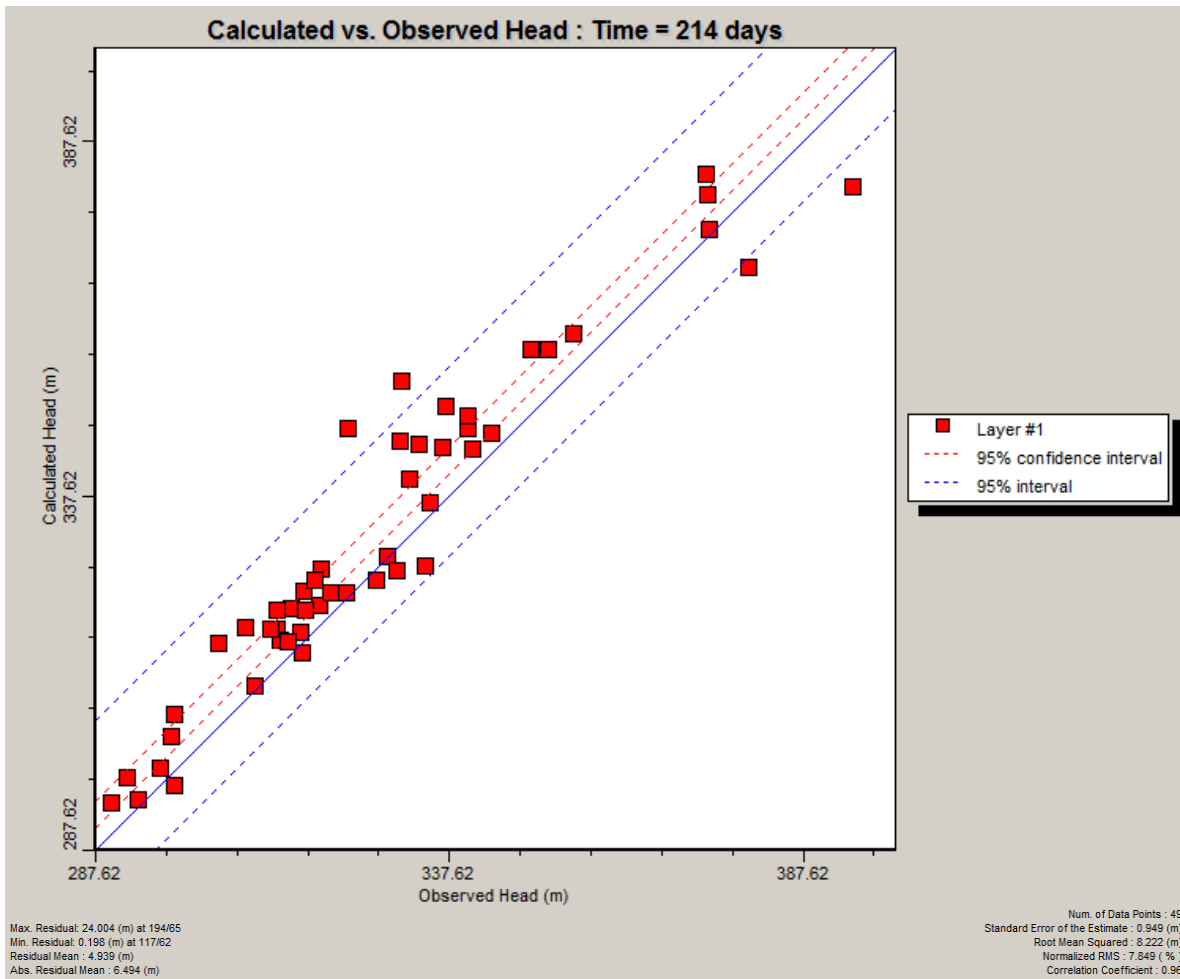


Figura 4.46 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo de Guadalupe en noviembre de 2010.

Zona	S_s [1/m]	S	K_x [m/s]	K_y [m/s]	K_z [m/s]
1	0.01950757	0.22	8.7E-5	8.7E-5	7.331161E-7
2	5.136903E-5	0.125266	1.00E-08	1.00E-08	2.852521E-8
3	5.136903E-5	0.125266	1.00E-07	1.00E-07	2.852521E-8
4	5.136903E-5	0.125266	1.00E-06	1.00E-06	2.852521E-8
5	5.136903E-5	0.125266	5.13E-5	5.13E-5	1.00E-06
6	5.136903E-5	0.125266	1.00E-06	1.00E-06	2.852521E-8

Tabla 4.4 Calibración para el modelo de Valle de Guadalupe.

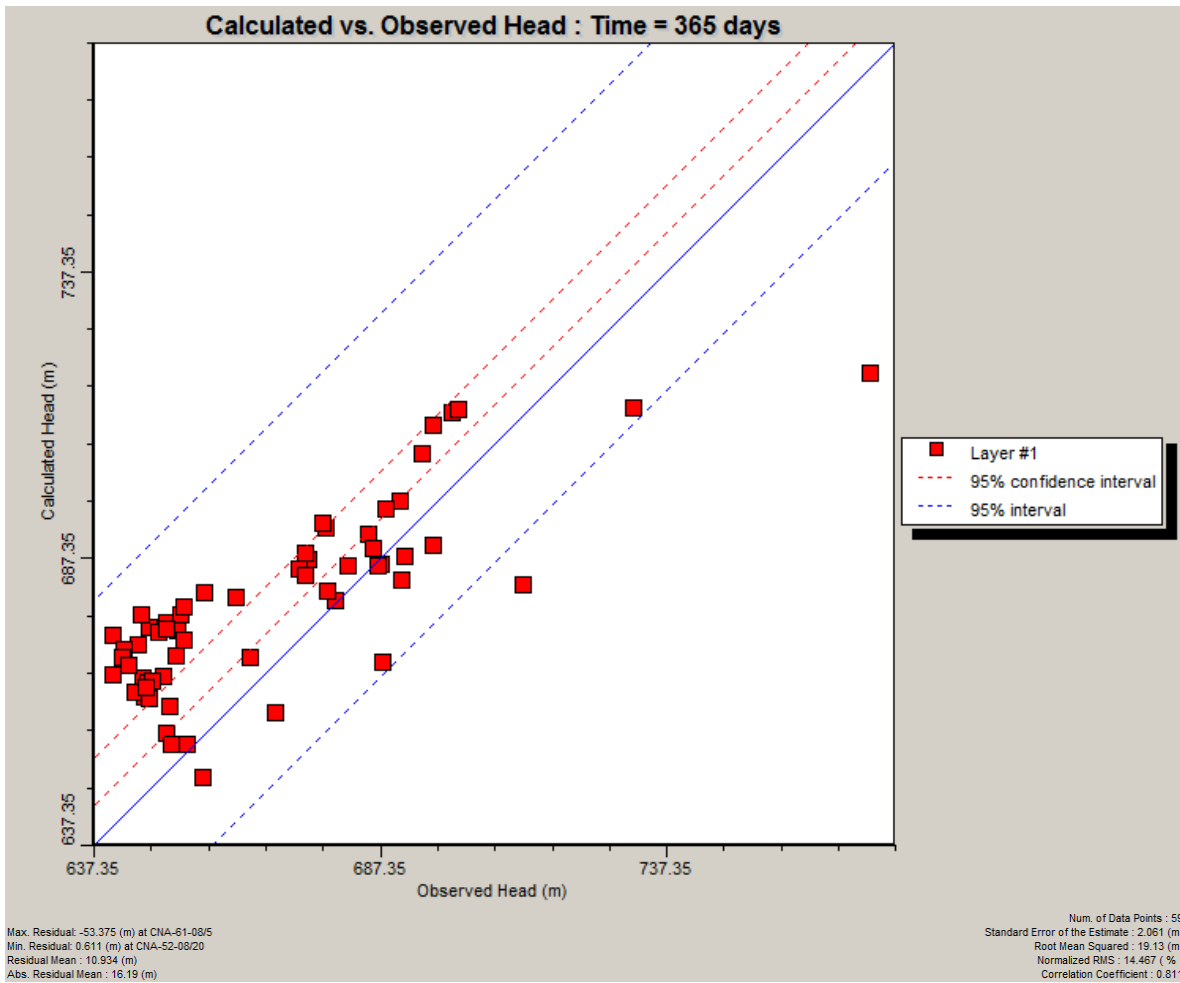


Figura 4.47 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo de Ojos Negros en abril de 2011.

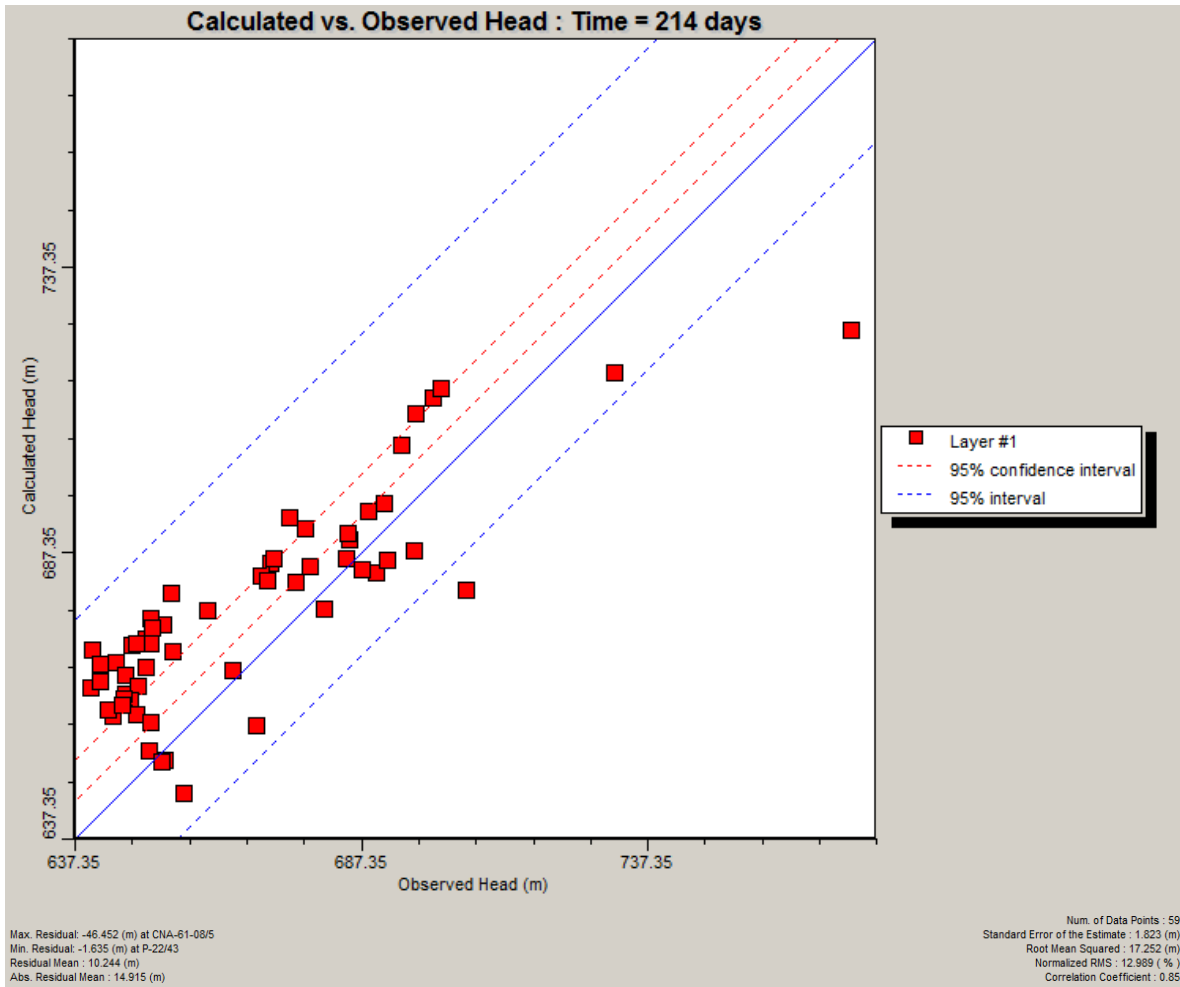


Figura 4.48 Carga observada contra carga calculada en metros para el modelo de Ojos Negros en noviembre de 2010.

Zona	S_s [1/m]	S	K_x [m/s]	K_y [m/s]	K_z [m/s]
1	0.06252116	0.22	0.00087	0.00087	8.7E-5
2	4.559023E-6	0.02701371	1.00E-08	1.00E-08	3.36179E-9
3	4.559023E-6	0.02701371	5.051615E-7	5.051615E-7	1.00E-08
4	4.559023E-6	0.02701371	1.00E-06	1.00E-06	5.051615E-7
5	4.559023E-6	0.02701371	4.559023E-6	4.559023E-6	1.00E-06
6	4.559023E-6	0.02701371	1.00E-06	1.00E-06	5.051615E-7

Tabla 4.5 Calibración para el modelo de Ojos Negros/Real del Castillo.

4.2.4 Resultados de la simulación

En la Figura 4.49 se muestra la dirección del flujo para el modelo integrado en abril de 2011, se puede observar que la zona de interconexión no permite un flujo significativo de agua, la permeabilidad de las formaciones geológicas es muy baja y puede ser descartada para fines de la modelación de los acuíferos de Guadalupe, Ojos Negros y Real del Castillo.

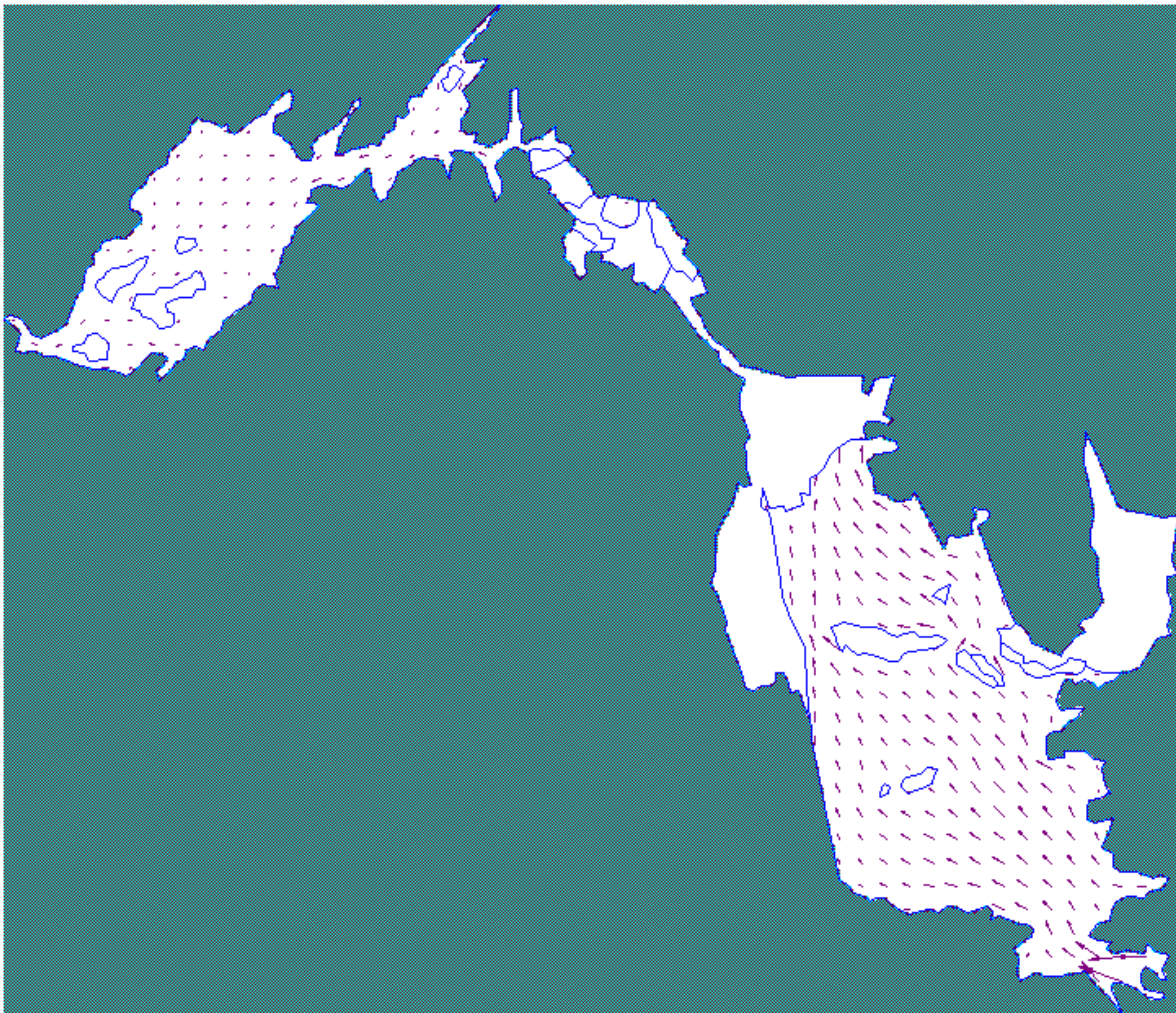


Figura 4.49 Dirección de flujo en abril de 2011.

Debido a que la zona de interconexión no representa una influencia mayor entre la recarga y descarga de los acuíferos, se realizan simulaciones con modelos aislados

de el acuífero del Valle de Guadalupe y el sistema Ojos Negros-Real del Castillo. Para ambos modelos se simula un tiempo de 365 días y los resultados se muestran en las siguiente figuras: Figura 4.50, Figura 4.51, Figura 4.52 y Figura 4.53. Para el Valle de Guadalupe se puede observar que las líneas de flujo se dirigen primariamente hacia las zonas con mayor densidad de pozos y secundariamente hacia las partes bajas del acuífero. En el sistema Ojos Negros-Real del Castillo se aprecia que el flujo evita las formaciones menos permeables en dirección a la parte baja de la zona de Real del Castillo pero es ligeramente desviado hacia la zona norte de Ojos Negros donde hay una alta densidad de pozos de extracción.

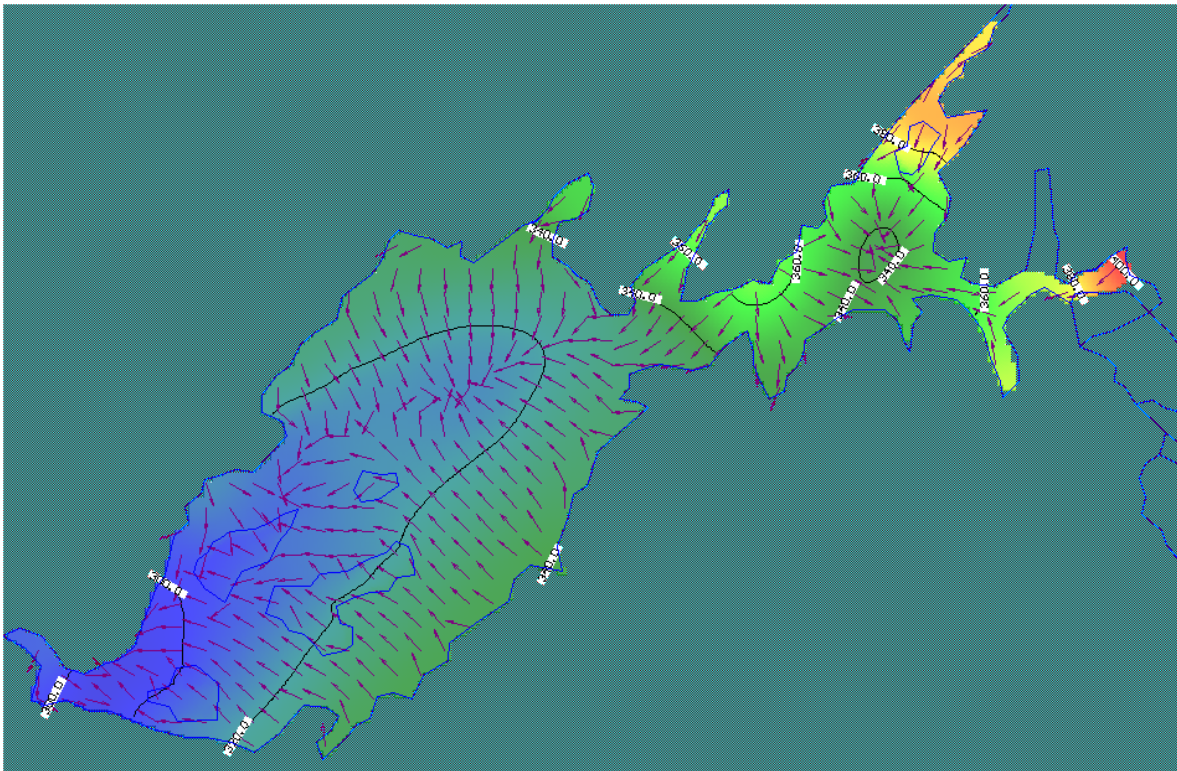


Figura 4.50 Resultado de la simulación de 365 días para el acuífero Guadalupe, carga hidráulica en metros sobre el nivel del mar y dirección del flujo.

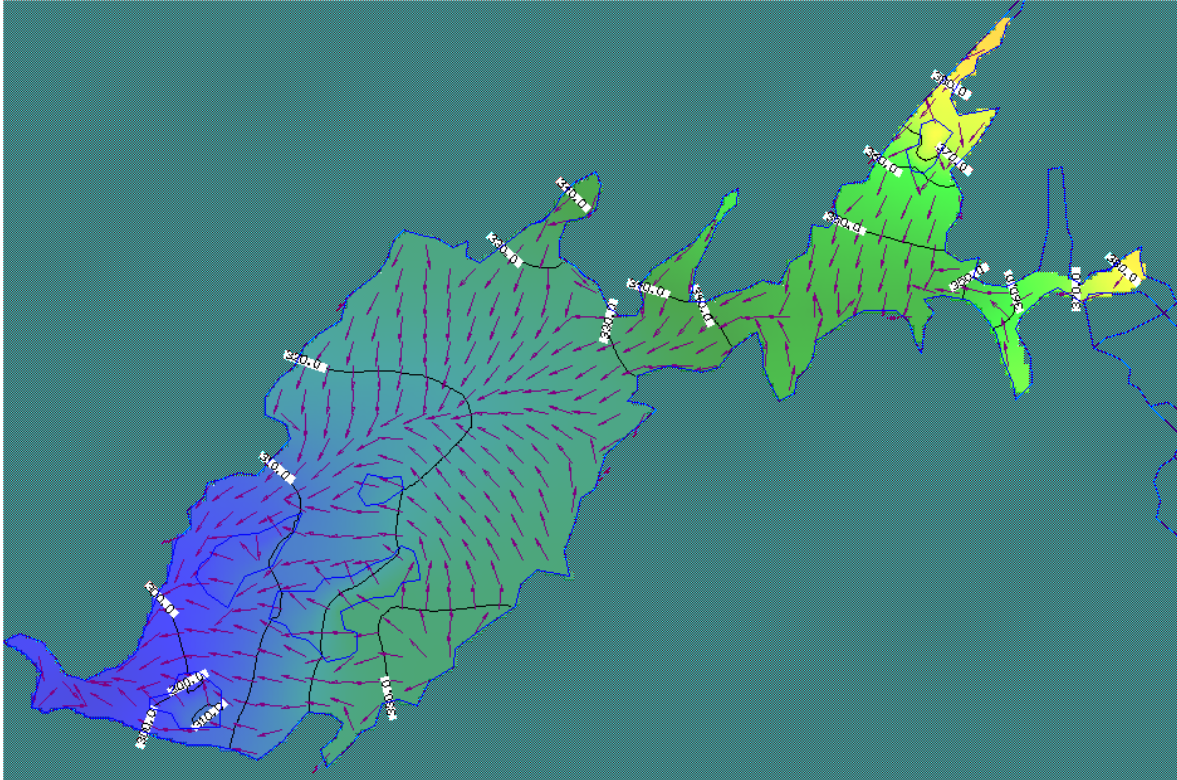


Figura 4.51 Resultado de la simulación de 214 días para el acuífero Guadalupe, carga hidráulica en metros sobre el nivel del mar y dirección del flujo.

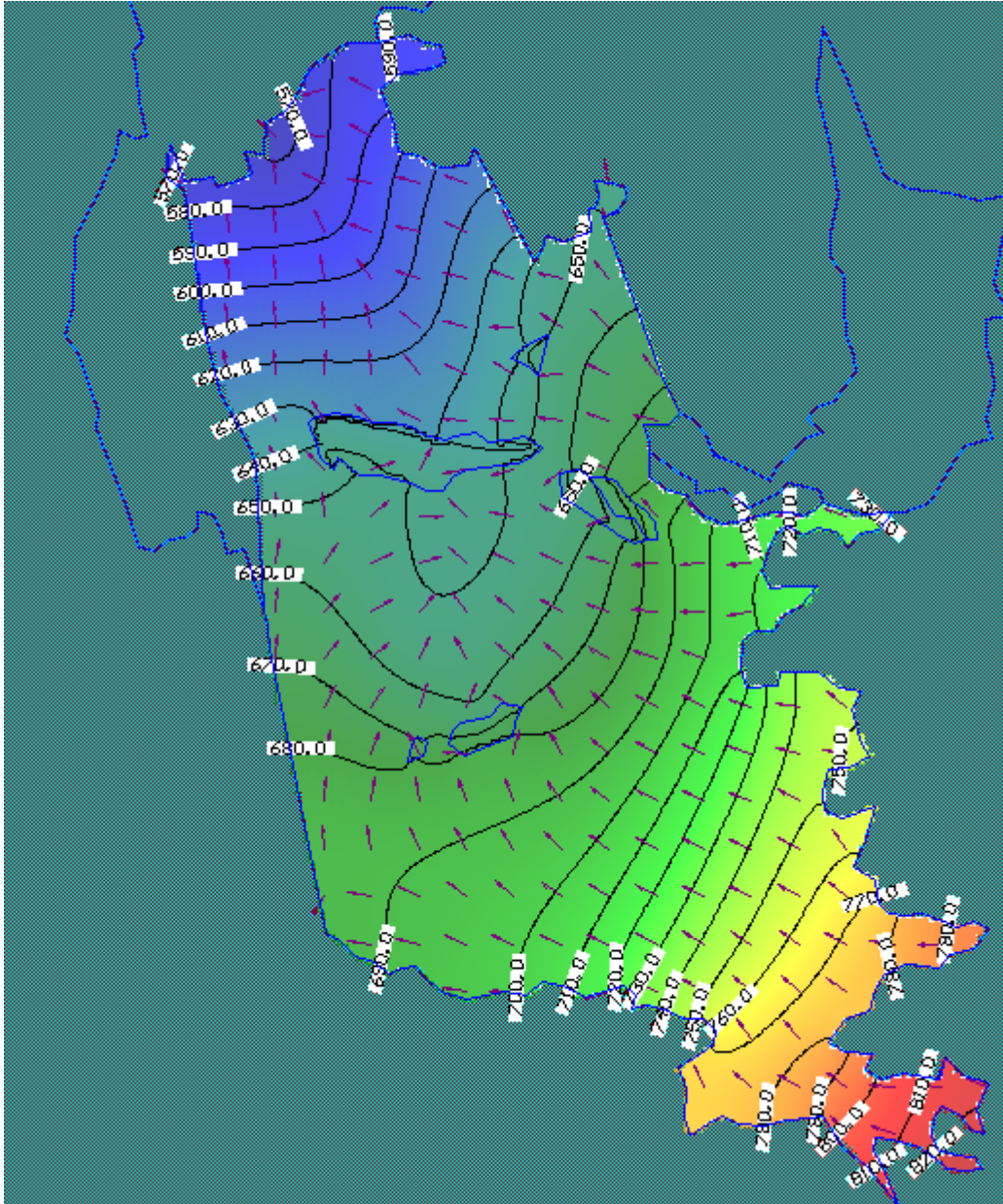


Figura 4.52 Resultado de la simulación de 365 días para el sistema Ojos Negros-Real del Castillo, carga hidráulica en metros sobre el nivel del mar y dirección del flujo.

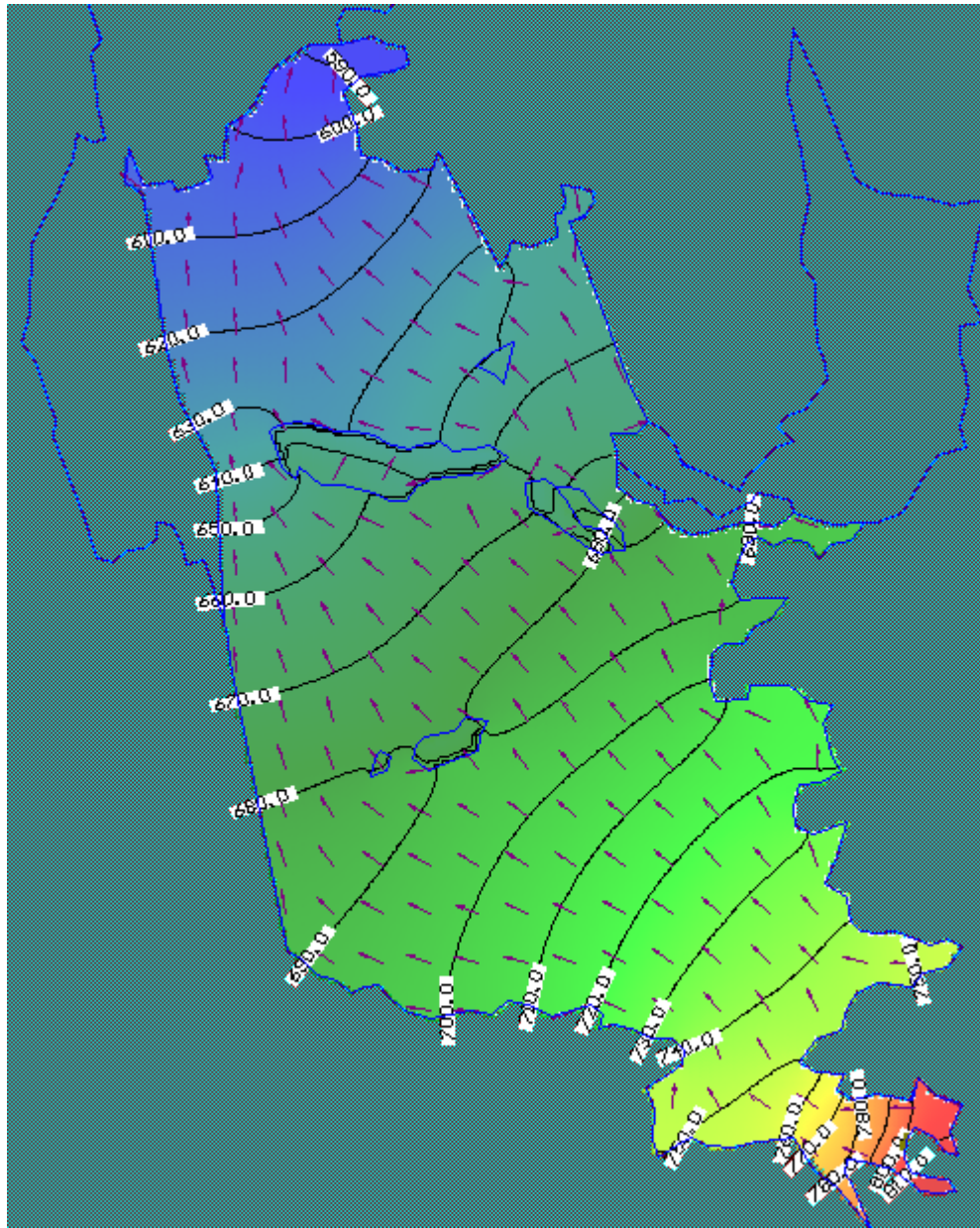


Figura 4.53 Resultado de la simulación de 214 días para el sistema Ojos Negros-Real del Castillo, carga hidráulica en metros sobre el nivel del mar y dirección del flujo.

5 CONCLUSIONES

Las soluciones numéricas de las ecuaciones diferenciales de Boussinesq (2D) y la ecuación general de los acuíferos (3D) presentan resultados similares para el modelo conceptual de los acuíferos de la cuenca de Guadalupe estudiados: Valle de Guadalupe y Ojos Negros-Real del Castillo; el uso de cualquiera de las dos ecuaciones es válido para esta región en el estado actual de conocimiento de los acuíferos. Sin embargo el modelo tridimensional es más versátil en cuanto a que se pueden incorporar más capas de acuíferos si se definen en el perfil.

Los modelos basados en los trabajos de Campos (2002, 2008) utilizados para las simulaciones presentan una serie de limitaciones relacionadas a la falta de información sobre la situación geohidrológica histórica y actual de los acuíferos estudiados. Para obtener modelos más cercanos a la realidad se deberá hacer una mejor caracterización hidrodinámica e hidrogeológica basada en el monitoreo sistemático de la carga hidráulica en el acuífero. Además los modelos carecen de referencias geográficas, lo cual dificulta las mejoras en cuanto a la incorporación de nuevos datos y la comparación con las situaciones reales. Con base en lo anterior, se crearon nuevos modelos georeferenciados donde se puedan utilizar las ubicaciones reales de pozos de observación y de extracción y en donde se pueden interconectar los tres acuíferos y estudiar sus interacciones.

Si bien en el modelo en tres dimensiones pueden hacerse refinamientos de cuadrícula y disminuir el paso del tiempo en la simulación, es de vital importancia continuar con estudios en la zona que brinden información sobre las propiedades geohidrológicas del acuífero de tal manera que la interpolación espacial de parámetros sea más apegada a la realidad, y así evitar simplificaciones y especulaciones. Además es recomendable realizar nuevas calibraciones conforme se vaya actualizando la información del monitoreo propuesto, con la ventaja que se tiene al emplear un modelo interactivo que permite dar de alta la nueva información de manera rápida y sencilla.

Por otro lado, los resultados de la simulación del comportamiento hidrodinámico del acuífero desde el año 2000 al año 2030 alertan sobre una disminución de poco más de 25 metros en algunas zonas del acuífero de Guadalupe. Se debe de pensar en

opciones como la construcción de infraestructura hidráulica que coadyuve al proceso de infiltración y recarga del acuífero, de manera que exista un equilibrio con la creciente demanda del recurso hídrico, que aunado a buenas prácticas y políticas de extracción, logren que su explotación periódica sea sostenible en años venideros.

El escenario propuesto desde el año 2000 hasta el año 2030 para los acuíferos de Ojos Negros y Real del Castillo muestra disminuciones significativas en la carga hidráulica. El abatimiento del nivel freático causaría un impacto negativo en la economía y en la vida de los habitantes de la región, limitando el acceso al vital recurso almacenado en el subsuelo.

Con base en los resultados obtenidos en el presente trabajo, se recomienda ampliar esfuerzos en el monitoreo del nivel freático en zonas estratégicas del acuífero, como son los lugares con mayor concentración de pozos de extracción y las fronteras del acuífero. Así mismo, el control y el monitoreo de obras de extracción permitirá tener un historial de extracción para la realización y calibración de nuevos modelos con mayor precisión, así como el ser capaces de determinar un valor de extracción sustentable para la región y en el caso de que el desarrollo de la región sobrepasara dicha extracción sustentable, el poder diseñar obras de recarga o de reuso de agua para minimizar sus efectos en el acuífero.

Dado que los escenarios planteados en el presente trabajo no presentan condiciones extremas de extracción y recarga se recomienda, a partir de estudios de desarrollo social y tendencias en el incremento poblacional y económico, proponer escenarios en donde la extracción sea proporcional al número de habitantes y al desarrollo de la región, y la recarga se estime a partir de estudios sobre tendencias meteorológicas, y así poder preparar oportunamente soluciones viables a los problemas ligados al abatimiento de los acuíferos de la cuenca de Guadalupe.

En la modelación integrada de los acuíferos se puede observar que la zona de interconexión no transfiere una cantidad significativa de agua entre los acuíferos debido a la baja capacidad de almacenamiento y permeabilidad. En consecuencia, el estudio del acuífero del Valle de Guadalupe puede llevarse a cabo por separado del sistema de acuíferos Ojos Negros-Real del Castillo y las políticas de extracción que puedan plantearse en los últimos acuíferos no causarán una disminución significativa en la

recarga en el acuífero de Valle de Guadalupe.

Debido a que la interconexión entre los acuíferos no es significativa, la modelación puede ser llevada a cabo de manera separada sin los problemas de incertidumbre sobre el estado de la zona de interconexión (propiedades y carga hidráulicas, condiciones de frontera) que no ha sido estudiada a detalle. Se puede utilizar la modelación separada con resultados tan cercanos a las observaciones como los del modelo integrado.

Los modelos hidrogeológicos integrado y aislados (Guadalupe y Ojos Negros-Real del Castillo), arrojan resultados congruentes con las observaciones y tienen la ventaja de ser fácilmente actualizables y modificables con nuevos estudios y pueden servir como una herramienta importante para la gestión de los acuíferos.

La incorporación de sistemas de información geográficos en la modelación de acuíferos resulta en una herramienta valiosa que permite el tratamiento de una gran cantidad de datos en tiempos relativamente cortos y es lo que le da a los modelos en el presente trabajo la versatilidad de ser modificados de una forma rápida y sencilla para su actualización.

El agua es un recurso indispensable no sólo para el desarrollo social y económico sino para la vida misma, por lo que la importancia de su cuidado y su explotación responsable no puede ser menospreciada.

LITERATURA CITADA

- Bear, J., Cheng, A.H.-D., *“Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport”*, Springer, 834 p., (2010).
- Beltrán, L., *“Balance geohidrológico del acuífero BC-07 Valle de Guadalupe, municipio de Ensenada, B.C.”*, Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional en la Península de Baja California, Subgerencia Regional Técnica, 19 p., (2001).
- Bloetscher, F., Muniz, A., Witt G. M., *“Groundwater injection, modeling, risks, and regulations”*, McGraw-Hill, pp. 303-332, (2005).
- Carroll, R.W.H., Pohll, G.M., Hershey, R.L., *“An unconfined groundwater model of the Death Valley Regional Flow System and a comparison to its confined predecessor”*, Journal of Hydrology, 373, pp. 316–328, (2009).
- Campos Gaytán, J.R., *“Actualización del modelo geohidrológico del acuífero del valle de Ojos Negros”*, Tesis de maestría en ciencias, 113 p., (2002).
- Campos Gaytan, J.R., *“Simulación del flujo de agua subterránea en el acuífero del Valle de Guadalupe, Baja California, México”*, Tesis doctoral, 220 p., (2008).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), *“Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Guadalupe, estado de Baja California”*, (2002a).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), *“Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Ojos Negros, estado de Baja California”*, (2002b).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), *“Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Real del Castillo, estado de Baja California”*, (2002c).

- Comisión Nacional del Agua, “*Estadísticas del Agua en México, edición 2010*”, pp. 17-74 y 169-180, (2010).
- de Hamer, W., Love, D., Owen, R., Booij, M.J., Hoekstra, A.Y., “*Potential water supply of a small reservoir and alluvial aquifer system in southern Zimbabwe*”, *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, pp. 633-639, (2008).
- El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D., Kaufmann, O., “*Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco)*”, *Journal of Hydro-environment Research*, 2, pp. 192-209, (2008).
- Espejel, I., Fischer, D.W., Hinojosa, A., García, C., Leyva, C., “*Land-use planning for the Guadalupe Valley, Baja California, Mexico*”, *Landscape and Urban Planning*, 45, pp. 219-213, (1999).
- Fitts, C.R., “*Groundwater Science*”, Academic Press, pp. 4-13, (2002).
- Fuentes, C., “*Hidrología de los medios porosos*”, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, 158 p., (2007).
- Fuentes, C., “*Approche fractale des transferts hydriques dans les sols nonsaturés*”, Tesis doctoral, 267 p., (1992).
- Fuentes, C., Vauclin, M., Parlange, J.-Y., y Haverkamp R., “*A note on the soilwater conductivity of a fractal soil*”, *Transport in Porous Media*, 23, pp. 31-36, (1996).
- Gedeon, M., Wemaere, I., Marivoet, J., “*Regional groundwater model of north-east Belgium*”, *Journal of Hydrology*, 335, pp. 133-139, (2007).
- Jeppesen, J., Christensen, S., Ladekarl, U.L., “*Modelling the historical water cycle of the Copenhagen area 1850–2003*”, *Journal of Hydrology*, 404, pp. 117-129, (2011).

- Kretzschmar, T. "*Diagnóstico geohidrológico para un manejo sustentable del Valle de Guadalupe, Ensenada, México*", Memorias del taller informativo sobre el proyecto "diagnóstico geohidrológico para un manejo sustentable del Valle de Guadalupe", Ensenada, México. Departamento de Geología. CICESE, (2003).
- Poehls, D.J., Smith, G.J., "*Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology*", Academic Press, 517 p., (2009).
- Ponce Campos, V.M., Zúñiga Castillo, W.R., Venegas Cardoso, F.R., Gaona Arredondo, T., García Cueto, R.O., Sepúlveda Betancourt, J.I., G. Arámburo Vizcarra, G., "*Valle de Ojos Negros: Resumen Interdisciplinario. Parte a; Parte b*", San Diego State University, Universidad Autónoma de Baja California, e Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales, y Pecuarias, 42 p., (2000).
- Ponce Campos, V.M., Pandey, R.P., Kumar, S., "*Groundwater Recharge by Channel Infiltration in El Barbon Basin, Baja California, Mexico*", Journal of Hydrology, 214, pp. 1-7, (1999).
- Reeve, A.S., Warzocha, J., Glaser, P.H., Siegel, D.I., "*Regional ground-water flow modeling of the Glacial Lake Agassiz Peatlands, Minnesota*", Journal of Hydrology, 243, pp. 91-100, (2001).
- Salgado Tránsito, J.A., "*El uso de tecnologías de la información en el desarrollo de un plan de manejo sustentable del acuífero del Valle de Guadalupe, B.C.*", Tesis doctoral, 209 p., (2010).
- San Juan, C., Kolm, K.E., "*Conceptualization, characterization and numerical modeling of the Jackson Hole alluvial aquifer using ARC/INFO and MODFLOW*", Engineering Geology, 42, pp. 119-132, (1996).

Saravanan, R., Balamurugan, R., Karthikeyan, M.S., Rajkumar, R., Anuthaman, N.G., Navaneetha Gopalakrishnan, A., “*Groundwater modeling and demarcation of groundwater protection zones for Tirupur Basin: A case study*”, *Journal of Hydro-environment Research*, 5, pp. 197-212, (2011).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), “*Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Tijuana, Descanso-Los Medanos, Guadalupe, Ensenada-El Gallo, San Carlos, Maneadero-Las Animas, Santo Tomás, San Vicente, Los Cochis-El Salado, San Rafael, San Telmo, Santo Domingo, San Quintín, San Simón, El Socorro y El Rosario, mismos que forman parte de la región hidrológica número 1 Baja California Noroeste*”, *Diario Oficial de la Federación*, 59 p., (2007).

Servicio Geológico Mexicano (SGM), “*Carta geológico-minera Ensenada H11-2 Baja California*”, (2003a).

Servicio Geológico Mexicano (SGM), “*Carta geológico-minera Tijuana I11-11 Baja California*”, (2003b).

Shah, N., Nachabe, M., Ross, M., “*Extinction Depth and Evapotranspiration from Ground Water under Selected Land Covers*”, *Ground Water*, 45, pp. 329-338, (2007).

Sophocleous, M., Perkins, S.P., “*Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas*”, *Journal of Hydrology*, 236, pp. 185-201, (2000).

Winston, R.B., “*MODFLOW-related freeware and shareware resources on the internet*”, *Computers & Geosciences*, 25, pp. 377-382, (1999).

Yang, F.R., Lee, C.H., Kung, W.J, Yeh, H.F., “*The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of “Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project” in Taiwan*”, *Engineering Geology*, 103, pp. 39-58, (2009).