



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

CUANTIFICACIÓN DEL APORTE HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA GUADALUPE A LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS DEL VALLE DE GUADALUPE Y OJOS NEGROS, B.C.

HANIEL CORDERO GONZÁLEZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

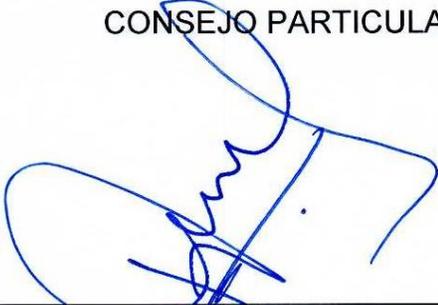
2014

La presente tesis titulada: **Cuantificación del aporte hidrogeológico de la Cuenca Guadalupe a la recarga de los acuíferos del Valle de Guadalupe y Ojos Negros, B.C.**, realizada por el alumno: **Haniel Cordero González**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. ARTURO GALVIS SPINOLA

ASESOR



DRA. TERESA MARCELA HERNÁNDEZ MENDOZA

ASESOR



DR. AGUSTÍN RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Agosto de 2014

CUANTIFICACIÓN DEL APORTE HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA
GUADALUPE A LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS DEL VALLE DE GUADALUPE
Y OJOS NEGROS, B.C.

Haniel Cordero González, MC.
Colegio de Postgraduados, 2014

RESUMEN

Los modelos hidrológicos aportan elementos técnicos para el diseño de estrategias de operación y administración de los recursos hidráulicos de una cuenca, siendo estos de origen superficial o subterráneo. Las estimaciones de la recarga del agua subterránea constituyen la entrada para la mayoría de metodologías utilizadas para evaluación y manejo del recurso. El desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) ha permitido algunos métodos analíticos. Se determinó la utilización de tres modelos en el estudio; el modelo tridimensional para un sistema de acuífero por capas, con código de diferencias finitas MODFLOW, seguido por SWAT, que es un modelo hidrológico de agua superficial. Así como, el balance de aguas subterráneas con el procedimiento definido por la Norma oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. Se utilizó el enfoque de múltiples unidades de respuesta hidrológica (HRU), el periodo simulado fue el año 2010. Resultando una tasa de recarga promedio de 11.87 mm año⁻¹ para toda la cuenca. Se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9824 entre el modelo MODFLOW y el modelo SWAT. De las zonas agrícolas a las zonas de bosque, se disminuye el escurrimiento superficial y se incrementa la recarga de agua subterránea.

Palabras clave: Agua subterránea, MODFLOW, Sistemas de Información Geográfica (SIG), SWAT, Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).

QUANTIFICATION OF THE HYDROGEOLOGICAL CONTRIBUTION OF RIVER
BASIN GUADALUPE TO GROUNDWATER RECHARGE OF THE VALLEY OF
GUADALUPE AND OJOS NEGROS, B.C.

Haniel Cordero González, MC.
Colegio de Postgraduados, 2014

ABSTRACT

The hydrologic models contribute to technical elements for the design of operation strategies and administration of the hydraulic resources of a river basin, being these of superficial or underground origin. The estimations of the recharge of groundwater constitute the entrance for the majority of methodologies used for evaluation and handling of the resource. The development of the GIS has allowed some analytical methods. The use of three models in the study was determined; the three-dimensional model for a groundwater system by layers, with code of finite differences MODFLOW, followed by SWAT, that is a hydrologic superficial water model. As well as, the underground water balance with the procedure defined by official Norm Mexican NOM-011-CNA-2000. The approach of multiple hydrologic response unit (HRU) was used, the simulated period was year 2010. Being a recharge rate of 11,87 mm year⁻¹ for all the river basin. A 0,9824 between model SWAT and MODFLOW coefficient was obtained of determination (R^2). Of the agricultural zones to the zones of forest, the superficial draining is diminished and the groundwater recharge is increased.

Key words: Groundwater, MODFLOW, Geographic Information Systems (GIS), SWAT, Hydrologic Response Units (HRU).

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES

Eldad González Camacho (Q.E.P.D.)

Neftalí Cordero de la Cruz

A MI TÍA

Dalila González Camacho (Q.E.P.D.)

A MI FAMILIA

En especial a mi compañera de vida Sibia Hernández Tabanico

A mi pequeño hijo Haniel Cordero Hernández, por la alegría que trajo a mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados, en especial al Postgrado de Hidrociencias, por los conocimientos y habilidades adquiridos para mi formación profesional.

Hago extensivo mi agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado una beca para la realización de mis estudios de Maestría y las facilidades brindabas.

Al Dr. Arturo Galvis Spinola, por todas las enseñanzas vertidas en mí, por la asesoría, revisión en la elaboración y culminación del presente trabajo de investigación.

A la Dra. Teresa Marcela Hernández Mendoza, por la asesoría y revisión en la elaboración del presente trabajo de investigación.

Al Dr. Agustín Rodríguez González, por el apoyo brindado durante la realización de mis estudios de maestría, a quien agradezco su disponibilidad y confianza brindada.

Al Dr. Enrique Mejía Sáenz, por el apoyo brindado en la realización de mis estudios de maestría, a quien agradezco la confianza y el apoyo brindado para mi crecimiento profesional.

A Esteban, Jesús Antonio, Jonathan, Rusbelth Guzmán por todos aquellos momentos gratos y que con el paso de los años conservamos la amistad.

A mis compañeros Liliana Terrazas, Cristóbal, Nancy, María del Rayo, José Luis, Arturo y Miguel Rincón, Samuel Montesinos, Laura Sánchez, Teresa Sánchez, Daniel Alvarado, Omar Moreno, David.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE CUADROS.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. HIPÓTESIS.....	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1. LEGISLACIÓN DEL AGUA E INSTITUCIONES RESPONSABLES DE SU MANEJO	4
4.1.1. Títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua.....	5
4.1.2. Zonas de veda	7
4.1.3. Publicación de las disponibilidades medias anuales de agua.....	7
4.2. GENERALIDADES DE LA RECARGA	10
4.2.1. Métodos para determinar la recarga en acuíferos	11
4.2.2. Tipos de recarga.....	13
4.3. CUANTIFICACIÓN DE LOS RECURSOS DE UN ACUÍFERO	14
4.3.1. Modelación Computacional.....	15
4.3.2. Tipo de aplicaciones de los modelos	16

4.4. SOFTWARE Y MODELOS, MÉTODOS PARA ESTIMAR LA RECARGA DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	17
4.5. MODFLOW, MODFLOW-2000	34
4.6. EL MODELO DE SIMULACIÓN SWAT	36
4.6.1. Desarrollo del modelo integrado de SWAT-MODFLOW	39
4.7. MÉTODO PARA DETERMINAR LA RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA, SEGÚN LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CNA-2000.....	41
A. Balance de aguas subterráneas	42
B. Cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica	42
C. Descarga total	43
D. Extracción.....	43
E. Recarga total media anual.....	43
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	44
5.1. MATERIALES	44
5.1.1. Recopilación de información.....	44
5.2. METODOS	46
5.2.1. Caracterización fisiográfica de la cuenca de captación	48
5.2.2. Determinación de uso del suelo en la cuenca	52
5.2.3. Definición de los tipos de suelos.....	54

5.2.4.	Definición de la pendiente.....	56
5.2.5.	Determinación de las Unidades de Respuesta Hidrológica	57
5.2.6.	Modelado por capa del sistema acuífero	58
5.2.6.1.	Condiciones iniciales y condiciones de frontera.....	59
5.2.6.2.	Aplicación del modelo	61
5.2.6.3.	Interface del modelo MODFLOW para estadísticas por HRU	61
5.2.7.	Balance de aguas subterráneas	62
5.2.7.1.	Entradas.....	63
A.	Recarga vertical.....	64
B.	Entrada por flujo subterráneo horizontal	64
C.	Recarga inducida.....	65
5.2.7.2.	Salidas	65
A.	Bombeo	65
5.2.7.3.	Solución a la ecuación de balance.....	66
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
6.1.	CON EL MODELO SWAT.....	67
6.2.	CON EL MODELO MODFLOW	69
6.3.	CON LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CONAGUA-2000	71
6.4.	VOLUMEN DE RECARGA EN LOS ACUÍFEROS.....	73

6.5. LIMITACIONES, INCERTIDUMBRES DE PARÁMETRO, Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	80
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
8. LITERATURA CITADA	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Balance de aguas subterránea.....	9
Figura 4.2 Diagrama esquemático de modelo combinado del agua superficial y del agua subterránea.	41
Figura 5.1 Modelo digital de elevaciones obtenido del INEGI.	45
Figura 5.2 Delimitación preliminar de la zona de estudio.	45
Figura 5.3 Diagrama del proceso de cálculo de la recarga de agua subterránea con SWAT.....	48
Figura 5.4 Identificación de la red hidrológica de la cuenca.	49
Figura 5.5 Desembocadura al mar como el punto de salida de la cuenca.	50
Figura 5.6 Parteaguas de la cuenca.....	50
Figura 5.7 Microcuencas ubicadas en el área de estudio.	51
Figura 5.8 Número de orden de la cuenca.	52
Figura 5.9 Uso del suelo en el área de estudio.	53
Figura 5.10 Tipos de suelos en el área de estudio.....	55
Figura 5.11 Clasificación por pendientes.....	56
Figura 5.12 Mapa de distribución de HRUs en la cuenca.....	57
Figura 5.13 Diagrama del proceso de cálculo de la recarga de agua subterránea con MODFLOW.....	58
Figura 5.14 Discretización del modelo de agua subterránea.....	59
Figura 6.1 Mapa de recarga estimada con SWAT para la zona estudiada en el año 2010.	69

Figura 6.2 Mapa de recarga estimada con MODFLOW para la zona estudiada en el año 2010.	71
Figura 6.3 Comparación del volumen de recarga entre la NOM-011-CONAGUA-2000 y el modelo SWAT.....	79
Figura 6.4 Comparación del volumen de recarga entre MODFLOW y el modelo SWAT.....	80

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1 Comparación de métodos para estimación de recarga de agua subterránea.	18
Cuadro 4.2 Modelos revisados para la selección.	23
Cuadro 5.1 Clases de uso de suelo en la cuenca Guadalupe.	53
Cuadro 5.2 Tipos de Suelos en la cuenca Guadalupe.	55
Cuadro 5.3 Clases de pendientes definidas para la cuenca.	57
Cuadro 5.4 Componentes para la solución de la ecuación de balance.	66
Cuadro 6.1 Superficies determinadas con el SIG, de los acuíferos en estudio.	68
Cuadro 6.2 Resumen del Balance de aguas subterráneas.	73
Cuadro 6.3 Volúmenes estimados por acuífero, con los modelos utilizados, metros cúbicos	73
Cuadro 6.4 Volúmenes estimados por HRU, con los modelos utilizados.	74

1. INTRODUCCIÓN

La manipulación y utilización inadecuada de los recursos naturales por el hombre tanto en el pasado como en la actualidad está produciendo consecuencias en el medio ambiente. Está aceptado mundialmente que la destrucción indiscriminada de los bosques y la degradación de las tierras tiene respuestas inmediatas en la pérdida de la productividad y consecuencias económicas y sociales.

El Valle de Guadalupe es uno de los valles más significativos de Baja California, dado que es la región productora de vinos más importante en México. En la región, la explotación del recurso hidráulico subterráneo rebasa su capacidad renovable, en consecuencia se ha provocado el abatimiento del nivel freático en tres de los cuatro acuíferos que se integran en la cuenca hidrológica del arroyo Guadalupe, por consiguiente se ha disminuido el volumen de agua disponible, y se ha dado origen a la profundización en la construcción de los nuevos aprovechamientos hidráulicos. La importancia de conocer con mayor precisión el funcionamiento del sistema hidrológico de la Cuenca mediante modelos hidrológicos, radica en que éstos últimos pueden aportar elementos técnicos de utilidad para el diseño de nuevas estrategias de operación, las cuales tienen como finalidad realizar una administración adecuada de los recursos hidráulicos de la Cuenca.

Las estimaciones de la recarga del agua subterránea constituyen la entrada fundamental para la mayoría de metodologías utilizadas para evaluación y manejo de recursos del agua subterránea. La mayoría de metodologías para cuantificar la recarga, ya sea, la recarga directa o indirecta sobre un área limitada (escala puntual o de una pequeña cuenca) y por cortos períodos de tiempo; los resultados de estos métodos pueden utilizarse en una escala regional para la gerencia del agua subterránea, utilizando un método secundario para extrapolación de resultados sobre áreas amplias y de tiempo. El desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) ha permitido algunos métodos analíticos, tales como el balance de agua del suelo, adaptado para el cómputo de la recarga del agua subterránea en cualquier escala espacial, incluyendo la escala regional. Los métodos requieren, sin embargo, la entrada de los conjuntos de datos espaciales grandes y diversos que pueden no estar disponibles para la región o el período de interés.

Existen tres tipos básicos de modelos que han sido utilizados (físicos, analógicos y matemáticos), siendo los modelos matemáticos o digitales más utilizados en la actualidad, que utilizan métodos numéricos para resolver la ecuación diferencial del movimiento del agua subterránea, teniendo como ventaja éstos modelos su flexibilidad, dado que un mismo programa de computación puede servir para una gran cantidad de modelos de diferentes sistemas de acuíferos.

2. OBJETIVO

Estimación de la recarga de agua subterránea mediante modelos computacionales y técnicas de sistemas de información geográfica y ecuaciones numéricas utilizando como caso de estudio los acuíferos de Ojos Negros y Guadalupe.

3. HIPÓTESIS

El uso de diferentes metodologías o modelos computacionales para estimar la recarga de agua subterránea, provee resultados diversos que al ser analizados para una región en específico pueden ser utilizados de manera confiable.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. LEGISLACIÓN DEL AGUA E INSTITUCIONES RESPONSABLES DE SU MANEJO

El marco jurídico para el uso de las aguas nacionales está constituido por el conjunto de leyes, reglamentos, decretos, acuerdos, convenios y otras figuras jurídicas asociadas. Es el sustento para definir y considerar, entre otros aspectos, el esquema de planeación del desarrollo y los instrumentos complementarios, así como una base para la toma de decisiones en sus diferentes ámbitos.

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) establece que la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales se realizará mediante concesión o asignación otorgada por el Ejecutivo Federal a través de la CONAGUA por medio de los Organismos de Cuenca, o directamente por ésta cuando así le competa, de acuerdo con las reglas y condiciones que dispone la LAN y su reglamento. De manera similar, para las descargas de aguas residuales, es necesario contar con un permiso de descargas expedido por la CONAGUA.

Los títulos de concesión, asignación y permisos de descarga se inscriben en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), el cual se puso en marcha a partir de 1992, con la expedición de la LAN.

De acuerdo con los trabajos realizados por la CONAGUA, el INEGI y el INE, se han identificado 1,471 cuencas hidrográficas en el país, las cuales, para fines de publicación de la disponibilidad de aguas superficiales, se han agrupado y/o subdividido en cuencas hidrológicas. Al 31 de diciembre del 2009 se tenían publicadas las disponibilidades de 722 cuencas hidrológicas, conforme a la norma NOM-011-CONAGUA-2000, en tanto que para el 31 de diciembre de 2010 se habían añadido otras 9 cuencas.

En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos, conforme a lo publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de Diciembre de 2001, de acuerdo con las coordenadas de las poligonales simplificadas del DOF del 13 de agosto del 2007, 3 de enero del 2008 y 28 de agosto del 2009.

4.1.1. Títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua

A Diciembre de 2007, se contaba con 354,238 títulos de aguas nacionales inscritos en el REPDA, que corresponden a un volumen concesionado de 78,950 millones de metros cúbicos (Mm³) de usos consuntivos y 161,239 Mm³ de usos no consuntivos (hidroeléctricas).

Por otro lado, al 2009, en el acuífero 0207 Guadalupe, el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección de Administración del Agua (CONAGUA, 2009) registra 590 obras. De acuerdo con el REPDA (2009), el volumen

concesionado para extracción de agua subterránea en el acuífero de Guadalupe asciende a 44.2151 Mm³, incluyendo todos los usos. Aproximadamente un 58% del agua extraída del acuífero en dicho valle está destinado al uso agrícola. El segundo usuario en volumen de importancia, de acuerdo con dicho registro, es el servicio público-urbano con 17% del total. El resto de las actividades utilizan aproximadamente el 25% del agua concesionada.

El balance REPDA tiene como objetivo estimar la disponibilidad del agua subterránea en un acuífero determinado. Para este fin se aplica el procedimiento indicado en la Norma oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000.

A continuación se mencionan las leyes y reglamentos que están relacionados al uso de las aguas en México:

- La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, artículos 27, 28 y 115
- La Ley de Aguas Nacionales (LAN), la cual es una ley reglamentaria del artículo 27 constitucional en materia de aguas nacionales
- El Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales
- La Ley Federal de Derechos (LFD)
- La Ley de Contribuciones de Mejoras por Obras Públicas Federales de Infraestructura Hidráulica (LCMOPFIH)
- Ley de Ingresos de la Federación (LIF)

- Las leyes estatales en materia de agua promulgadas en las entidades federativas
- La Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

4.1.2. Zonas de veda

Con el fin de revertir la sobreexplotación de los acuíferos y cuencas del país, el Gobierno Federal ha emitido vedas que prohíben o restringen las extracciones de agua en diversas zonas. A nivel nacional, en el caso de las aguas subterráneas, se tienen 145 zonas de veda vigentes, publicadas entre 1948 y 2007. Para el caso de las aguas superficiales, las vedas existentes son de los años 1929 a 1975.

4.1.3. Publicación de las disponibilidades medias anuales de agua

La Ley de Aguas Nacionales establece que para otorgar los títulos de concesión o asignación se tomará en cuenta la disponibilidad media anual de agua de la cuenca hidrológica o acuífero en el que se vaya a realizar el aprovechamiento. La CONAGUA tiene la obligación de publicar las disponibilidades, para lo cual se creó la norma NOM-011-CNA-2000 “Conservación del Recurso Agua – Que establece las especificaciones y el Método para Determinar la Disponibilidad Media Anual de las Aguas Nacionales”, en la cual se indica la metodología para hacerlo.

Al 31 de diciembre de 2007, se habían publicado en el Diario Oficial de la Federación las disponibilidades de 252 unidades hidrogeológicas o acuíferos de los cuales se extrae el 75% del agua subterránea del país, y de 480 cuencas hidrológicas. Además, entre el 1° de enero y el 30 de junio de 2008, se publicó la disponibilidad media de 30 acuíferos y de 113 cuencas adicionales, por lo cual el número total de acuíferos y cuencas de los cuales se ha publicado su disponibilidad media anual, al mes de junio de 2008, asciende a 282 y 593 respectivamente.

La disponibilidad media anual para el acuífero 0207 Guadalupe, fue publicada en el Diario Oficial del 28 de agosto de 2009. En este caso específico, la disponibilidad resulta en 0.00 Mm³, indicándose un déficit de 20.3151 Mm³. Este volumen se estima siguiendo la metodología para calcular la disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrológica o acuífero según la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000. La recarga total media anual, la que corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, se reportó en 23.9 Mm³ mientras que la descarga natural comprometida, conformada por las salidas directas al mar y la evapotranspiración, se ha estimado en 0.00 Mm³ (CONAGUA, 2002; 2009; DOF, 2009). Por lo tanto, la diferencia entre estos dos valores o rendimiento permanente del acuífero de 0207 Guadalupe es de 44.2151 Mm³.

La recarga total media anual corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. En Guadalupe, este volumen ha sido estimado en 23.9 Mm³ anuales. Mientras tanto, la descarga natural comprometida comprende los

volúmenes de agua procedente de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, así como el flujo subterráneo que debe ser sostenido para no afectar a las unidades hidrológicas adyacentes. En el acuífero de Guadalupe la descarga natural comprometida se considera prácticamente nula. Por su parte, el volumen concesionado, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua al 30 de Septiembre de 2008 es de 44.2151 Mm³/año. El balance hídrico utilizando el volumen concesionado y mostrando la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero de Guadalupe se observa en la Figura 4.1. De acuerdo con la metodología indicada en la Norma Oficial, la cifra de 0.00 Mm³/año indica que no existe volumen disponible para nuevas concesiones en el acuífero de Guadalupe.

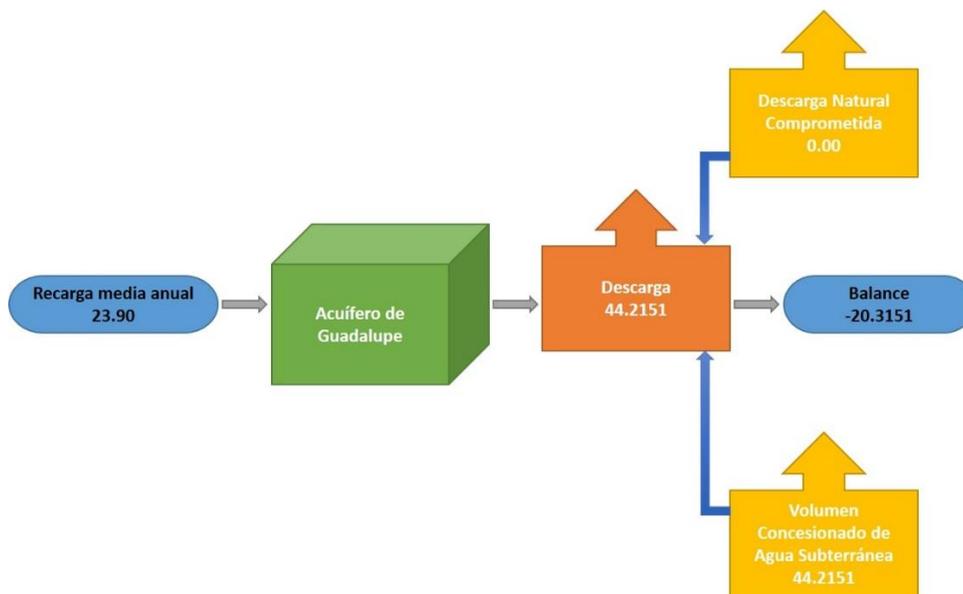


Figura 4.1 Balance de aguas subterránea.

4.2. GENERALIDADES DE LA RECARGA

Se denomina acuífero a una masa de agua existente en el interior de la corteza terrestre debida a la existencia de una formación geológica que es capaz de almacenar y transmitir el agua en cantidades significativas. Los acuíferos pueden ser libres o confinados. Los acuíferos confinados están limitados en su parte superior por un estrato impermeable y pueden llegar a estar en presión dando lugar a los pozos artesianos cuando el estrato superior impermeable es perforado. Los acuíferos libres no tienen ninguna capa impermeable que lo limite, de modo que el nivel freático aumenta o disminuye en función de la lluvia que almacene.

El agua de los acuíferos está contenida en los poros, por ello cuando se extrae agua de un acuífero se produce un fenómeno de disminución de volumen, denominado subsidencia y que es el causante del lento hundimiento de áreas de la superficie terrestre.

Desde el punto de vista de la hidrología, el fenómeno más importante relacionado con los acuíferos es la recarga y descarga de los mismos. La recarga natural de los acuíferos procede básicamente del agua de lluvia que a través del terreno pasa por infiltración a los acuíferos. Esta recarga es muy variable y es la que geológicamente ha originado la existencia de los acuíferos.

Por otra parte la recarga natural tiene el límite de la capacidad de almacenamiento del acuífero de forma que en un momento determinado el agua que llega al acuífero no puede ser ya almacenada y pasa a otra área, superficie terrestre, río, lago, mar o incluso otro acuífero. La salida natural de un acuífero a la superficie terrestre en un punto localizado se denomina manantial. Estos se localizan en una discontinuidad del estrato impermeable, ladera, cauce de río, falla o diaclasa, dando origen a manantiales cuyo nombre recoge la situación: manantiales de ladera, de falla, de diaclasa, etc.

La descarga de un acuífero a un río es un fenómeno habitual como también es normal el contrario, la recarga de un acuífero por un río. Existiendo una relación acuífero-río muy importante en la cual el sentido del flujo depende básicamente de los niveles de agua en el río y en el acuífero así como de la geomorfología de la zona.

4.2.1. Métodos para determinar la recarga en acuíferos

La recarga puede determinarse por varios métodos, y se clasifican en 5 grupos:

- **Medidas directas.**- La recarga se mide directamente mediante la construcción de lisímetros. Un lisímetro es un bloque de suelo dotado de dispositivos que permiten medir el flujo que drena hasta el acuífero.

- Balance hídrico.- Se determinan los flujos de entrada y de salida de un sistema, y la recarga al acuífero constituye el residuo de la ecuación de balance; hacen parte de este grupo los balances de humedad del suelo, de agua en canales, el método de fluctuaciones del nivel freático, y el que iguala la descarga a la recarga.
- Trazadores. Su principal uso es determinar fuentes de recarga y zonas de descarga aunque se utilizan para cuantificar la recarga a través de un balance de masa del trazador.
- Aproximaciones de Darcy.- Se encuentran valores de cabezas hidráulicas a partir de las ecuaciones de flujo de Richards y Boussinesq y luego se determina la velocidad de filtración. Si se asumen condiciones estables la recarga se determina directamente de la ecuación de Darcy.
- Empíricos.- Consiste en el desarrollo de ecuaciones empíricas que relacionan la recarga con alguna variable como la precipitación. La última parte trata la recarga en áreas urbanas.

4.2.2. Tipos de recarga

La recarga a un acuífero puede darse naturalmente debido a la precipitación, a las aguas superficiales, es decir, a través de ríos y lagos, o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; pero también puede darse de manera artificial producto de actividades como la irrigación, fugas de redes de abastecimiento o por infiltraciones de embalses y depósitos (Balek, 1988; Custodio, 1997; Simmers, 1990; Lerner, 1990; Samper, 1997).

Lerner (1990) propone una clasificación similar pero un poco más completa sobre las fuentes de recarga:

- Recarga directa o recarga difusa, proveniente del agua lluvia.
- Recarga concentrada o indirecta, producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros.
- Flujos laterales, procedentes de otros acuíferos.
- Retorno de riegos, excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución.

- Recarga Urbana, producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado.

Es importante saber que muchas de las técnicas existentes para determinación de la recarga no cuantifican el valor real sino que estiman la recarga potencial, este término fue introducido por Rushton en 1988 y se refiere al agua que se infiltra pero que puede o no alcanzar el nivel freático (Scanlon *et al.*, 2002; Rushton, 1988).

4.3. CUANTIFICACIÓN DE LOS RECURSOS DE UN ACUÍFERO

La investigación de la interacción del agua superficial y del agua subterránea es crítica para determinar los efectos de las mejores prácticas de manejo en el sistema entero de los recursos hídricos. Un sistema de modelado ideal debe poder simular los impactos de los cambios de uso de suelo en la hidrología y la calidad del agua de las áreas superficiales y subsuperficiales, aunque la selección de un enfoque apropiado para considerar la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea depende de las suposiciones aceptables y de los datos disponibles, requeridos para las simulaciones (Cho *et al.*, 2009).

Carrera (2006) menciona que, los SIG han sido ligados a diversos modelos de simulación en diversas áreas de investigación, de uso general para el modelado de agua superficial y agua subterránea.

4.3.1. Modelación Computacional

Existen tres tipos básicos de modelos que han sido utilizados en geohidrología: físicos, analógicos y matemáticos.

Los modelos físicos están hechos del mismo material que el sistema natural. Pueden construirse modelos empleando circuitos eléctricos o el flujo de un líquido viscoso para simular acuíferos reales o ideales, estos son los llamados modelos analógicos, puesto que su funcionamiento es análogo al del acuífero verdadero; típicamente se utilizan para modelar el flujo en dos dimensiones, pudiendo ser tanto horizontales como verticales. Las desventajas de los modelos físicos y analógicos no son flexibles, sin embargo bajo ciertas condiciones un modelo eléctrico puede ser más exacto que uno matemático.

Los modelos más utilizados en la actualidad son los matemáticos o digitales, que utilizan métodos numéricos para resolver la ecuación diferencial del movimiento del agua subterránea. Una gran ventaja de estos modelos es su flexibilidad, dado que un mismo programa de computación puede servir para una gran cantidad de modelos de diferentes sistemas de acuíferos.

4.3.2. Tipo de aplicaciones de los modelos

La mayoría de los esfuerzos de la modelación de aguas subterráneas están destinados a predecir las consecuencias de una acción propuesta. Hay, sin embargo, otros dos usos importantes.

Los modelos pueden ser utilizados en un sentido interpretativo para conocer mejor los parámetros que controlan la dinámica en un sitio específico o como un marco para la organización y montaje de la base de los datos de campo, y la formulación de ideas sobre la dinámica del sistema. En este contexto, los modelos son utilizados, por ejemplo, para ayudar a establecer la posición y las características de los límites del acuífero y evaluar la cantidad del agua dentro del sistema y el importe de la recarga del acuífero.

Los modelos también pueden utilizarse para estudiar los procesos geológicos en la configuración genérica. Los estudios con modelos genéricos también pueden ser útiles en la formulación de directrices regionales aptas o no aptas para alguna acción propuesta.

Tipos de aplicaciones del modelo:

- Predictivo: se utiliza para predecir el futuro; requiere de la calibración.

- Interpretativo: se utiliza como marco para el estudio de la dinámica del sistema y/o la organización de los datos de campo; no necesariamente se requiere de la calibración.
- Genérico: se utiliza para analizar el flujo en un sistema hidrogeológico hipotético, puede ser útil para establecer directrices reguladoras para una región específica, no necesariamente requiere de calibración.

4.4. SOFTWARE Y MODELOS, MÉTODOS PARA ESTIMAR LA RECARGA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Se ha definido la recarga como el proceso de la adición de agua a la zona saturada. Porque es casi imposible la medición directa, la recarga es estimada generalmente por medios indirectos. La exactitud de las estimaciones indirectas es generalmente difícil de determinar, así que una recomendación común es que la recarga se debe estimar por el uso de métodos múltiples y de los resultados comparados.

El Cuadro 4.1 proporciona una referencia rápida o una guía, para seleccionar los métodos apropiados para estimar la recarga de agua subterránea, que tienen aplicabilidad general en E.U., según el United States Geological Survey, (USGS) por sus siglas en Inglés.

Cuadro 4.1 Comparación de métodos para estimación de recarga de agua subterránea.

Método	Categoría	Programa	Autor	Fecha	Título
Base Flow	Streamflow	BFI	Wahl, K.L. and Wahl, T.L.	1988	A computer program for determining an index to base flow
Regression	Regionalization	GLSNet	Tasker, G.D., and Stedinger, J.R., 1989, An operational GLS model for hydrologic regression: Journal of Hydrology, v. 111, p. 361-375.	1989	Tasker, G.D., and Stedinger, J.R., 1989, An operational GLS model for hydrologic regression: Journal of Hydrology, v. 111, p. 361-375.
GW Models	Groundwater	MODFE	Torak, L.J.	1993	A MODular Finite-Element model (MODFE) for areal and axisymmetric ground-water-flow problems
New Jersey	Water Budget	DGS99-2	Charles, E.G.	1993	A method for evaluating ground-water recharge areas in New Jersey
Base Flow	Streamflow	PART	Rutledge, A.T.	1993	Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records
HELP3	Water Budget	HELP	Schroeder, P.R., Aziz, N.M., Lloyd, C.M., and Zappi, P.A.	1994	The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model, user's guide for version 3
Base Flow	Streamflow	HYSEP	Sloto, R.A., and Crouse, M.Y.	1996	HYSEP: a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis
Watershed Models	Streamflow	HSPF	Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jr., Donigian, A.S., Jr., and Johanson, R.C.	1997	Hydrological Simulation Program--Fortran. User's manual for version 11
Recession-	Streamflow	RORA	Rutledge, A.T.	1998	Computer programs for

Método	Categoría	Programa	Autor	Fecha	Título
Curve Displacement					describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow data – update
UZ Models	Unsaturated Zone	VS2D	Hsieh, P.A., Wingle, William, and Healy, R.W.	2000	VS2DI--A graphical software package for simulating fluid flow and solute or energy transport in variably saturated porous media
Watershed Models	Streamflow	PRMS	Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G., 1983, Precipitation-Runoff Modeling System: User's Manual: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 83-4238, 207 p.	2000	Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G., 1983, Precipitation-Runoff Modeling System: User's Manual: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 83-4238, 207 p.
Recession- Curve Displacement	Streamflow	PULSE	Rutledge, A.T.	2002	User guide for the PULSE program:
GW Models	Groundwater	SUTRA	Voss, C. I., and Provost, A.M.,	2002	SUTRA, A model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport
Watershed Models	Streamflow	SWAT	Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R.	2005	Soil and water assessment tool -- theoretical development
Base Flow	Streamflow	WHAT	K.J. Lim, B.A. Engel, Z. Tang, J. Choi, K. Kim, S. Muthukrishnan, and D. Tripathy	2005	Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool, WHAT
GW Models	Groundwater	MODFLOW	Harbaugh, A.W.	2005	A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model

Los investigadores han intentado desarrollar métodos más simples para estimar la recarga del agua subterránea, con algunas variables de entrada que son relativamente fáciles de obtener para la mayoría de las regiones. La primera aproximación determina la recarga del agua subterránea, usando uno o más de los métodos existentes, para las áreas y los periodos de tiempo para los cuales los datos están ya disponibles o se pueden obtener con el monitoreo. Las aproximaciones que estiman la recarga con algunas variables del clima o de cuenca se pueden desarrollar y utilizar para estimar la recarga en las áreas o periodos de tiempo para los cuales la falta de datos imposibilita un análisis más cuidadoso de la recarga (Izuka *et al.*, 2010).

Los estudios y revistas que comparan las múltiples investigaciones para la estimación de la recarga indican que diferentes métodos pueden dar resultados substancialmente diversos. Porque se dificulta determinar la confiabilidad de un solo método de recarga, el uso de métodos múltiples, es práctico, se considera benéfico (Scanlon *et al.*, 2002; Delin y Risser, 2007).

En los últimos años se han desarrollado numerosos estudios con el objetivo de estimar la recarga, que debido a los avances científicos y tecnológicos en países desarrollados es posible su empleo, para esta investigación, se revisaron estudios de modelos existentes principalmente entre los años 2007 a 2013, y para facilitar su análisis se desglosaron diferentes aspectos de los modelos, como son: 1) clasificación de los modelos en función de sus objetivos, 2) comparación del modelo

conceptual utilizado para desarrollar cada uno de los modelos numéricos, 3) los resultados que se han obtenido con los modelos, 4) la zona de aplicación. En el Cuadro 4.2 se presenta un resumen de la literatura revisada para la selección de los modelos a utilizar en la presente investigación.

Las estimaciones de la recarga de agua subterránea, su variabilidad espacial y temporal, son entradas esenciales a los modelos de flujo de agua subterránea, que se utilizan para probar la disponibilidad del agua subterránea bajo diversas condiciones de manejo y de clima (Mair *et al.*, 2013).

La recarga de agua subterránea puede estimarse usando una variedad de técnicas, incluyendo el balance de agua en el suelo, métodos de escurrimiento de agua superficial, métodos de zona no saturada y los métodos de zona saturada (Scanlon *et al.*, 2002).

Pisinaras *et al.* (2010), citan que, debido a la complejidad de los procesos hidrológicos, los modelos de parámetros distribuidos basados en la hidrología y los SIG constituyen una combinación poderosa para la evaluación de la cantidad y calidad del agua. Hay varias razones que refuerzan la combinación de los modelos antes mencionados con el SIG para la gestión de los recursos hídricos, la más importante de las cuales son: la automatización de los datos de entrada y de salida en el pre y post-procesamiento de desarrollo del modelo, como así, la capacidad de desarrollo de herramientas de post-procesamiento interactivos que tengan la

posibilidad de facilitar la comprensión del funcionamiento del sistema hidrológico; y del continuo incremento de la disponibilidad y cantidad de datos, dando la oportunidad de investigar importantes variables hidrológicas.

Cuadro 4.2 Modelos revisados para la selección.

Autor/Cita	Modelo	Valor/ Calificación/ Resultados	Zona	Año
M.A Sophocleous, J.K Koelliker, R.S Govindaraju, T Birdie, S.R Ramireddygari, S.P Perkins, Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas, Journal of Hydrology, Volume 214, Issues 1–4, January 1999, Pages 179-196	SWATMOD (SWAT-MODFLOW)	SWAT calculates a uniform value of recharge in each subbasin, although variation in depth to the water table within a particular subbasin would imply variable net recharge within that subbasin also. The recharge specified to MODFLOW cells within a subbasin was, therefore, modified to account for such variations in the depth to the water table	Semiárido	1999
Marios Sophocleous, Samuel P Perkins, Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas, Journal of Hydrology, Volume 236, Issues 3–4, 30 September 2000, Pages 185-201	SHE, SWAT, MODFLOW	These applications demonstrate the practicality and versatility of this relatively simple and conceptually clear approach, making public acceptance of the integrated watershed modeling system much easier.	Semiárido	2000
A. Facchi, B. Ortuani, D. Maggi, C. Gandolfi, Coupled SVAT–groundwater model for water resources simulation in irrigated alluvial plains, Environmental Modelling & Software, Volume 19, Issue 11, November 2004, Pages 1053-1063.	MODFLOW-SVAT	The layer depth varies during the simulation as a result of the groundwater level fluctuations computed by the aquifer model.	Mediterránea	2004

Autor/Cita	Modelo	Valor/ Calificación/ Resultados	Zona	Año
<p>Jacek Scibek, Diana M. Allen, Alex J. Cannon, Paul H. Whitfield, Groundwater–surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model, Journal of Hydrology, Volume 333, Issues 2–4, 15 February 2007, Pages 165-181</p>	MODFLOW	<p>The river-aquifer interaction has a maximum flow rate between 11% and 20% of river flow during spring freshet – on average, the river contributes about 15% of its spring freshet flow into aquifer storage, and within 30 to 60 days most of that water is released back to the river as baseflow. Storage rates are less than 50% of inter-zonal</p>	Húmeda	2007
<p>Lucinda Mileham, Richard Taylor, Julian Thompson, Martin Todd, Callist Tindimugaya, Impact of rainfall distribution on the parameterisation of a soil-moisture balance model of groundwater recharge in equatorial Africa, Journal of Hydrology, Volume 359, Issues 1–2, 15 September 2008, Pages 46-58.</p>	Soil-moisture balance model (SMBM)	<p>The SMBM is relatively sensitive to these changes (e.g. 2% change in runoff coefficient produces a 12% change in modelled runoff). As a result, hydrological models driven by gridded precipitation remain largely empirical. The study clearly highlights the dependence of the calibration of hydrological models on the spatial and temporal representation of precipitation.</p>	Trópico Húmedo	2008
<p>Woonsup Choi, Brian M. Deal, Assessing hydrological impact of potential land use change through hydrological and land use change modeling for the Kishwaukee River basin (USA), Journal of Environmental Management, Volume 88, Issue 4, September 2008, Pages 1119-1130</p>	HSPF	Funcionó Bien	Húmeda	2008

Autor/Cita	Modelo	Valor/ Calificación/ Resultados	Zona	Año
C. Dages, M. Voltz, P. Ackerer, Parameterization and evaluation of a three-dimensional modelling approach to water table recharge from seepage losses in a ditch, Journal of Hydrology, Volume 348, Issues 3–4, 15 January 2008, Pages 350-362.	SWMS_3D	The results obtained show that a threedimensional Richards' equation-based approach could satisfactorily simulate groundwater recharge by seepage losses from ditches in case of induced surface ponding experiment. R ² (between 0.94 and 0.98)	Árida	2008
F. El Yaouti, A. El Mandour, D. Khattach, O. Kaufmann, Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco), Journal of Hydro-environment Research, Volume 2, Issue 3, 12 December 2008, Pages 192-209.	MODFLOW	The simulation results show that the fluctuations of hydraulic heads are dependent on seasonal variation in recharge from natural infiltration of precipitation and irrigation. R ² = 0.97	Mediterránea	2008
Leticia B. Rodriguez, Pablo A. Cello, Carlos A. Vionnet, David Goodrich, Fully conservative coupling of HEC-RAS with MODFLOW to simulate stream–aquifer interactions in a drainage basin, Journal of Hydrology, Volume 353, Issues 1–2, 20 May 2008, Pages 129-142	HEC-RAS / MODFLOW	In this work HEC-RAS and MODFLOW have been iteratively coupled in an effort to improve the representation of hydraulic profiles in drain channels within a regional groundwater flow system. With the aid of a simple analytical solution, it was established that the proposed scheme is numerically convergent and mass conserving.	Semiárido	2008

Autor/Cita	Modelo	Valor/ Calificación/ Resultados	Zona	Año
Anna-Kaisa Ronkanen, Bjørn Kløve, Hydraulics and flow modelling of water treatment wetlands constructed on peatlands in Northern Finland, Water Research, Volume 42, Issue 14, August 2008, Pages 3826-3836	MODFLOW	$R^2 = 0.95 - 0.99$	Polar	2008
Nam Won Kim, Il Moon Chung, Yoo Seung Won, Jeffrey G. Arnold, Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model, Journal of Hydrology, Volume 356, Issues 1–2, 1 July 2008, Pages 1-16	SWATMOD (SWAT-MODFLOW)	The application demonstrates that an integrated SWAT–MODFLOW is capable of simulating a spatio-temporal distribution of groundwater recharge rates, aquifer evapotranspiration and groundwater levels. It also enables an interaction between the saturated aquifer. $R^2 = 0.95$	Húmeda	2008
C. Dages, M. Voltz, A. Bsaibes, L. Prévot, O. Huttel, X. Louchart, F. Garnier, S. Negro, Estimating the role of a ditch network in groundwater recharge in a Mediterranean catchment using a water balance approach, Journal of Hydrology, Volume 375, Issues 3–4, 15 September 2009, Pages 498-512.	Ecuación de Balance de Agua	Rango alto de incertidumbre	Mediterránea	2009
J. Jiménez-Martínez, T.H. Skaggs, M.Th. van Genuchten, L. Candela, A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas, Journal of Hydrology, Volume 367, Issues 1–2, 30 March 2009, Pages 138-149,	HYDRUS-1D	$R^2 = 0.90$	Semiárido	2009

Autor/Cita	Modelo	Valor/ Calificación/ Resultados	Zona	Año
Rosemary W.H. Carroll, Greg M. Pohll, Ronald L. Hershey, An unconfined groundwater model of the Death Valley Regional Flow System and a comparison to its confined predecessor, Journal of Hydrology, Volume 373, Issues 3–4, 15 July 2009, Pages 316-328	MODFLOW-SURFACT	The unconfined SURFACT model represents an evolution of the USGS model toward greater conceptual accuracy and improved stability. The unconfined model uses calibrated values put forth by the USGS and does an equal, if not better, job in model assessment than its confined predecessor. In essence, the unconfined approach helps validate the estimates of these calibrated parameters.	Árida	2009
Katerina Spanoudaki, Anastasios I. Stamou, Aikaterini Nanou-Giannarou, Development and verification of a 3-D integrated surface water–groundwater model, Journal of Hydrology, Volume 375, Issues 3–4, 15 September 2009, Pages 410-427	(IRENE) FLOW-3DL	The model closely reproduces the results of the analytical solutions and can therefore be used for analysing and predicting surface water–groundwater interactions in real-world cases.	---	2009
Qi Zhang, Lijiao Li, Development and application of an integrated surface runoff and groundwater flow model for a catchment of Lake Taihu watershed, China, Quaternary International, Volume 208, Issues 1–2, 15 October 2009, Pages 102-108	MODFLOW-2005	The model indicated that for Xitiaoxi catchment, a percentage of 37.4% of rainfall transferred to surface overland flow, and a percentage of 16% infiltrated as groundwater recharge, of which 81% returns to rivers as base flow and the rest is lost to the system via evapotranspiration	Trópico Húmedo	2009

Autor/Cita	Modelo	Valor/ Calificación/ Resultados	Zona	Año
Scot K. Izuka, Delwyn S. Oki, John A. Engott, Simple method for estimating groundwater recharge on tropical islands, Journal of Hydrology, Volume 387, Issues 1–2, 7 June 2010, Pages 81-89.	The GIS-based soil water-budget	Equations that produced the smallest root-meansquare error (RMSE)	Trópico	2010
M. Mastrocicco, N. Colombani, E. Salemi, G. Castaldelli, Numerical assessment of effective evapotranspiration from maize plots to estimate groundwater recharge in lowlands, Agricultural Water Management, Volume 97, Issue 9, September 2010, Pages 1389-1398.	HYDRUS-1D	Comparison between the absolute residual mean (ARM) and the root-mean squared error (RMSE) obtained from models implemented with different PET formulas and different water stress response functions.	Húmeda	2010
Ismail Chenini, Abdallah Ben Mammou, Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling, Computers & Geosciences, Volume 36, Issue 6, June 2010, Pages 801-817	ARCVIEW-MODFLOW-2001	Funcionó	Árida	2010
Vassilios Pisinaras, Christos Petalas, Georgios D. Gikas, Alexandra Gemitzi, Vassilios A. Tsihrintzis, Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Desalination, Volume 250, Issue 1, 1 January 2010, Pages 274-286.	SWAT2005	The SWAT model application, supported by GIS technology, proved to be a very flexible and reliable tool for water decision-making, especially under the need for harmonization with the Water Framework Directive	Mediterránea	2010

Autor/Cita	Modelo	Valor/ Calificación/ Resultados	Zona	Año
J. Cho, S. Mostaghimi, M.S. Kang, Development and application of a modeling approach for surface water and groundwater interaction, Agricultural Water Management, Volume 97, Issue 1, January 2010, Pages 123-130	DANSAT-MODFLOW	The proposed linked approach will be useful for evaluating the impacts of agricultural BMPs on the entire SW–GW system by providing spatial distribution and temporal changes in groundwater table elevation and enhancing the reliability of calibrated parameter sets.	--	2010
MENKING, K.M. , SYED, K.H. , ANDERSON, R.Y. , SHAFIKE, N.G. and ARNOLD, J.G.(2003) 'Model estimates of runoff in the closed, semiarid Estancia basin, central New Mexico, USA / Estimations par simulation de l'écoulement dans le bassin endoréique semi-aride d'Estancia, Nouveau Mexique central, états-Unis', Hydrological Sciences Journal, 48: 6, 953 — 970	SWATMOD (SWAT-MODFLOW)	Variación de 30 % con respecto a los valores observados	Semiárido	2010
Ajay Singh, Estimating long-term regional groundwater recharge for the evaluation of potential solution alternatives to waterlogging and salinisation, Journal of Hydrology, Volume 406, Issues 3–4, 6 September 2011, Pages 245-255.	The hydrological budget model	$R^2 = 0.988$	Semiárido	2011

Autor/Cita	Modelo	Valor/ Calificación/ Resultados	Zona	Año
Jarkko Okkonen, Bjørn Kløve, A sequential modelling approach to assess groundwater-surface water resources in a snow dominated region of Finland, Journal of Hydrology, Volume 411, Issues 1-2, 6 December 2011, Pages 91-107.	MODFLOW	R ² = 0.89	Polar	2011
Song Yanxun, Fang Yuan, Qian Hui, Zhang Xuedi, Research and Application of Groundwater Numerical Simulation-A Case Study in Balasu Water Source, Procedia Environmental Sciences, Volume 8, 2011, Pages 146-152	Visual MODFLOW	The calibration and validation results of the numerical model indicate that the model can reflect the actual hydrogeological conditions, and can be applied in predicting the future groundwater flow conditions.	--	2011
H. Zhang, K.M. Hiscock, Modelling the effect of forest cover in mitigating nitrate contamination of groundwater: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands, UK, Journal of Hydrology, Volume 399, Issues 3-4, 18 March 2011, Pages 212-225	MODFLOW	The groundwater modelling framework was capable of predicting groundwater recharge and groundwater nitrate concentrations for different land-use scenarios. Six land-use scenarios were developed, comprising different agricultural practices and land conversions	Húmeda	2011

Autor/Cita	Modelo	Valor/ Calificación/ Resultados	Zona	Año
<p>Marco Natkhin, Jörg Steidl, Ottfried Dietrich, Ralf Dannowski, Gunnar Lischeid, Differentiating between climate effects and forest growth dynamics effects on decreasing groundwater recharge in a lowland region in Northeast Germany, Journal of Hydrology, Volumes 448–449, 2 July 2012, Pages 245-254.</p>	WaSiM-ETH	<p>The model-based analysis showed that the average groundwater recharge under forest areas decreased from 1958 to 2007, with a trend of 2.3 mm/yr². The most important effect was changing climatic boundary conditions, which made up 53% of the decrease. Declining precipitation is identified as the main factor. Changes in tree age distribution caused 18% of the decrease, and the change of ground vegetation under pines (<i>Pinus sylvestris</i>) accounts for 29%.</p>	Húmeda	2012
<p>M. Kuznetsov, A. Yakirevich, Y.A. Pachepsky, S. Sorek, N. Weisbrod, Quasi 3D modeling of water flow in vadose zone and groundwater, Journal of Hydrology, Volumes 450–451, 11 July 2012, Pages 140-149.</p>	QUASI-3D y FULL-3D	<p>El error de equilibrio total era menos de 0.01% en todas las simulaciones. $R^2 = 0.90$ comparado entre los dos modelos</p>	Semiárido	2012
<p>S.H. Rasmussen, M.B. Butts, S.M. Lerer, J.C. Refsgaard, Parameterisation and scaling of the land surface model for use in a coupled climate-hydrological model, Journal of Hydrology, Volumes 426–427, 21 March 2012, Pages 63-78.</p>	SVAT-MIKE SHE	$R^2 = 0.85$	Semiárido	2012

Autor/Cita	Modelo	Valor/ Calificación/ Resultados	Zona	Año
<p>Xu Xu, Guanhua Huang, Hongbin Zhan, Zhongyi Qu, Quanzhong Huang, Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas, Journal of Hydrology, Volumes 412–413, 4 January 2012, Pages 170-181.</p>	SWAP and MODFLOW-2000	<p>Results showed that the simulated water table elevations matched well with the observed ones except at the early period during which they were slightly higher than the observed ones, probably due to neglecting lateral diffusion in the unsaturated zone. The simulation results validated the applicability of the developed MODFLOW with SWAP package for practical regional groundwater modeling. $R^2 = 0.9297$</p>	Árida	2012
<p>Yan Zhu, Liangsheng Shi, Lin Lin, Jinzhong Yang, Ming Ye, A fully coupled numerical modeling for regional unsaturated–saturated water flow, Journal of Hydrology, Volume 475, 19 December 2012, Pages 188-203</p>	Water balance analysis method	<p>The model is applied to a practical irrigation district to estimate the water flow with complex boundary conditions and varying topography after being validated as an accurate model</p>	--	2012
<p>J. Krishnaswamy, M. Bonell, B. Venkatesh, B. K. Purandara, K.N. Rakesh, Sh. Lele, M.C. Kiran, V. Reddy, Sh. Badiger, The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: Support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis”, Journal of Hydrology, Volume 498, 19 August 2013, Pages 191-209.</p>	SWIM v2.0	<p>Groundwater recharge is the most temporally stable under natural forest</p>	Trópico Húmedo	2013

Autor/Cita	Modelo	Valor/ Calificación/ Resultados	Zona	Año
<p>Barret L. Kurylyk, Kerry T.B. MacQuarrie, The uncertainty associated with estimating future groundwater recharge: A summary of recent research and an example from a small unconfined aquifer in a northern humid-continental climate, Journal of Hydrology, Volume 492, 7 June 2013, Pages 244-253.</p>	HELP3	<p>The uncertainty in the projected annual average recharge for the present study (range = 6% to +58%, uncertainty = 64%) is larger than the uncertainty in recharge simulated</p>	Húmeda	2013
<p>Alan Mair, Benjamin Hagedorn, Suzanne Tillery, Aly I. El-Kadi, Stephen Westenbroek, Kyoochul Ha, Gi-Won Koh, Temporal and spatial variability of groundwater recharge on Jeju Island, Korea, Journal of Hydrology, Volume 501, 25 September 2013, Pages 213-226.</p>	The Soil Water Balance (SWB)	Recarga de 9 - 39% de la Precipitación	Húmeda	2013

4.5. MODFLOW, MODFLOW-2000

MODFLOW Modelo de agua subterránea de diferencia finita tridimensional. MODFLOW-2000 simula el flujo estable y no estable de un sistema de flujo irregular formado, en el cual las capas acuíferas pueden ser confinadas, no confinadas, o una combinación de confinado y no confinado.

Las presiones externas del flujo, como el flujo de pozos, recarga regional, evapotranspiración, flujo de drenes, y el flujo a través del cauce, pueden ser simulados. Las conductividades hidráulicas o transmisividades para cualquier capa pueden diferenciarse espacialmente y ser anisotrópicos (restringiendo las direcciones principales alineadas con los ejes de la malla), y el coeficiente de almacenamiento puede ser heterogéneo. Las cargas específicas y fronteras de flujo específicas pueden ser simuladas como carga de flujo dependiente a través de la frontera externa del modelo que permite al agua ser suministrada a un bloque de frontera en el área modelada con un gasto proporcional a la carga de corriente diferenciada entre "una fuente" de agua fuera del área modelada y el bloque de frontera. Además de simular el flujo de agua subterránea, el alcance de MODFLOW se ha ampliado para incorporar capacidades para la simulación de los sistemas de aguas superficiales y subterráneas, transporte de solutos, intrusión salina en zonas costeras, la compactación y hundimiento del sistema acuífero, estimación de parámetros y manejo de agua subterránea.

El modulo para estimar la recarga se utiliza para simular un flujo especifico distribuido sobre la capa superior del modelo y en unidades específicas de longitud/tiempo. Dentro de MODFLOW, estas tasas son multiplicadas por el área horizontal de las celdas a las cuales se aplican para calcular las tasas volumétricas de flujo.

El programa MODFLOW resuelve una forma tridimensional de la ecuación de flujo de agua subterránea:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4.1$$

Donde:

x, y, z los ejes coordenados, paralelos a lo largo de los ejes de la conductividad hidráulica;

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} , son los valores de conductividad hidráulica en el sentido de los ejes coordenados;

h carga hidráulica;

W flujo volumétrico por unidad de volumen de las fuentes y (o) sumideros de agua;

S_s almacenamiento específico de los acuíferos, y

T tiempo.

S_s se toma como un escalar implícitamente requiere de compresibilidad del esqueleto que se isotrópica. En MODFLOW, la ecuación se aproxima con diferencias finitas.

4.6. EL MODELO DE SIMULACIÓN SWAT

SWAT es el acrónimo para Soil and Water Assessment Tool, que es un modelo digital hidrológico, desarrollado por el Dr. Jeff Arnold, para el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Americanos (ARS-USDA), para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en los escurrimientos, los sedimentos y los agroquímicos en grandes áreas como las cuencas hidrológicas, con suelos diversos, condiciones variantes de usos y manejo del suelo, y en grandes periodos de tiempo (Neitsch *et al.*, 2001a).

El Modelo SWAT ha probado ser una efectiva herramienta para la evaluación de fuentes de agua y los problemas de contaminación difusa para un amplio rango de escalas y condiciones ambientales a través del mundo (Gassman, 2005).

Este paquete de cómputo considera varios aspectos relacionados al manejo del suelo y agua, tales como el balance hidrológico, la calidad de agua y su efecto en el suelo y la pérdida de suelo causada por erosión hídrica.

Para su aplicación, el modelo se integra al software ArcGis, empleado por excelencia para la elaboración y manipulación de sistemas de información geográfica.

El modelo está físicamente fundamentado, describiendo las relaciones entre las variables de entrada y de salida, por lo que requiere información específica de clima, propiedades de suelo, topografía, vegetación y prácticas de conservación de los suelos en la cuenca, entre otros.

Los procesos físicos asociados con el flujo del agua, el arrastre de sedimentos, el crecimiento de los cultivos, el ciclo de los nutrientes, etc., se modelan directamente por el SWAT usando estos datos de entrada.

Algunas ventajas y beneficios de este modelo son:

- Se pueden modelar el funcionamiento de cuencas sin datos de escurrimientos;
- Se puede cuantificar el impacto relativo de variables como por ejemplo, los cambios en las prácticas de conservación, del clima, la vegetación, etc., en la calidad del agua de una cuenca;
- El fácil uso de datos de entrada disponible. Puede emplearse para estudiar procesos especializados como el transporte de bacterias, con un mínimo de datos, que generalmente están disponibles en las entidades de gobierno;

- Es muy eficiente en la realización de los cálculos ya que la simulación con el modelo, para cuencas muy grandes o una amplia variedad de estrategias de manejo de la misma se hace en poco tiempo y sin excesivos requerimientos de memoria, tiempo y dinero; y
- Permite a sus usuarios el estudio de impactos de largo plazo. Muchos de los problemas comunes manejados por sus usuarios, involucra el crecimiento gradual de contaminantes en cuerpos de agua, por ejemplo, en cuyo estudio se requieren contar y manejar datos que abarcan varias décadas.

SWAT es un modelo continuo de tiempo, es decir, que no modela detalles, sino fenómenos complejos y de largo plazo, por lo que es muy adecuado para el estudio de los fenómenos que dependen de datos climáticos históricos, como lo es la erosión de los suelos, los escurrimientos superficiales, los cambios de cobertura de los suelos, la recarga de acuíferos, etc.

SWAT es un modelo amplio que requiere una diversidad de información en orden para funcionar. Muchas de las entradas se utilizan para simular las características especiales que no son comunes en todas las cuencas.

SWAT simula dos acuíferos en cada subcuenca. El acuífero somero es un acuífero no confinado que contribuye al flujo en el canal principal o corriente de la subcuenca. El acuífero profundo es un acuífero confinado. El agua que entra al acuífero profundo

se asume que contribuye al flujo del cauce en algún punto de salida dentro de la cuenca.

El uso integrado de SWAT-MODFLOW, permite la simulación de una distribución espacio-temporal de las tasas de recarga del agua subterránea, de la evapotranspiración del acuífero y de los niveles de agua subterránea. También permite una interacción entre el acuífero saturado y los cauces. Esta interacción desempeña un papel importante en la descarga de agua subterránea en la cuenca, especialmente durante el período de menor flujo (Won *et al.*, 2008).

4.6.1. Desarrollo del modelo integrado de SWAT-MODFLOW

MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) es conocido y ampliamente utilizado como módulo tridimensional para un sistema de acuífero por capas, con un código de diferencias finitas. MODFLOW se basa físicamente puesto que combina la ley de Darcy y el balance de masa para flujo subsuperficial. MODFLOW propicia una representación de un número de condiciones del acuífero, incluyendo confinado, no confinado, libre, acuitardo y una variedad de condiciones entre confinados y no confinados.

Pueden ser simuladas las condiciones de estado estacionario y transitorio. La opción para desactivación de regiones dentro del dominio permite que el modelado diseñe sistemas complejos irregulares fácilmente. El modelo puede explicar todas las

condiciones de límite comunes, encontradas generalmente en la práctica. Esto incluye correcciones del nivel piezométrico, flujos variables o constantes, recarga y descarga del agua subterránea, extracciones puntuales y drenaje. Varios procesos interactivos superficiales y subsuperficiales tales como evapotranspiración e interacciones del río y el acuífero, las cuales tienen una adecuada simulación (Sophocleous *et al.*, 1997).

Won *et al.* (2008), citan que, el modelo SWAT es particularmente limitado en términos de la distribución del flujo de agua subterránea, debido a su naturaleza agrupada. Inversamente, MODFLOW tiene dificultad en el procesamiento de la distribución de recarga del agua subterránea, que es una entrada importante para el modelado del agua subterránea. Por lo tanto, sosteniendo las ventajas de los dos modelos, es posible que los componentes hidrológicos sean razonablemente cuantificados. Si la recarga de agua subterránea basada en un HRU, se utiliza para los datos de entrada en MODFLOW, y el flujo de agua subterránea entre el acuífero y la corriente, se procesa e intercambia para SWAT, entonces las características espaciales y temporales de la cuenca estarán correctamente reflejadas. Un diagrama esquemático de esto se demuestra en la Figura 4.2

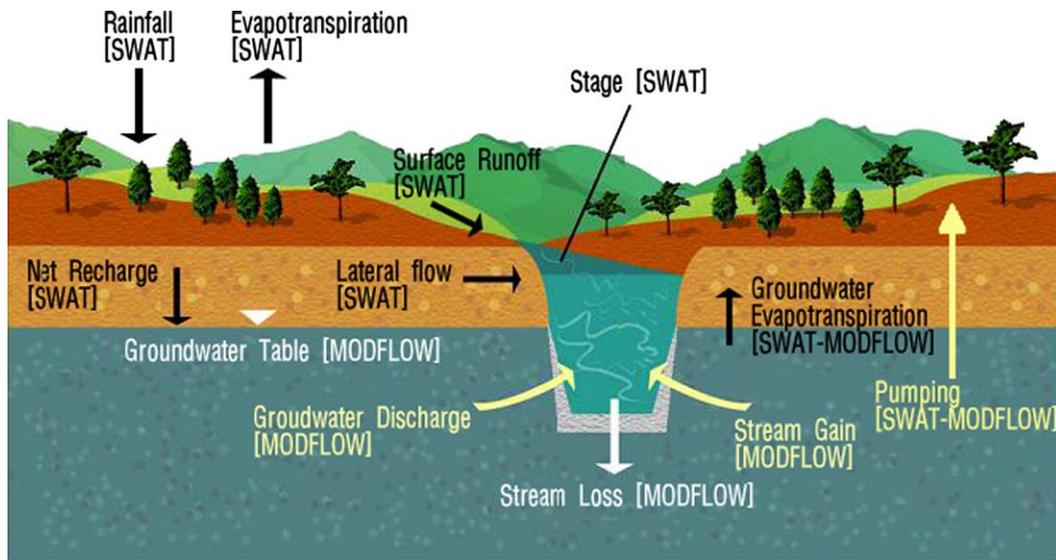


Figura 4.2 Diagrama esquemático de modelo combinado del agua superficial y del agua subterránea.

4.7. MÉTODO PARA DETERMINAR LA RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA, SEGÚN LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CNA-2000

El balance REPDA tiene como objetivo estimar la disponibilidad del agua subterránea en un acuífero determinado. Para este fin se aplica el procedimiento indicado en la Norma oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que establece la siguiente expresión 4.2:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Disponibilidad Media Anual} \\ \text{de agua subterránea en una} \\ \text{unidad hidrogeológica} \end{array} \right] = \left(\begin{array}{l} \text{Recarga total} \\ \text{media anual} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Descarga natural} \\ \text{comprometida} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Volumen anual de agua} \\ \text{subterránea concesionado} \\ \text{e inscrito en el REPDA} \end{array} \right) \quad 4.2$$

A. Balance de aguas subterráneas

La recarga total que recibe un acuífero o unidad hidrogeológica en un intervalo de tiempo dado, se determina por medio del balance de agua subterránea, que en su forma más simple está representado por la siguiente expresión 4.3:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Recarga total} \\ \text{(Suma de entradas)} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio de almacenamiento} \\ \text{de la unidad hidrogeológica} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Descarga total} \\ \text{(Suma de Salidas)} \end{array} \right) \quad \mathbf{4.3}$$

Para deducir una recarga media representativa, se planteará el balance a un intervalo de tiempo de varios años en que se disponga de los datos básicos para cuantificar sus términos y que incluya tanto años secos como años lluviosos. En su defecto, el balance se planteará para un intervalo mínimo de un año.

B. Cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica

El cambio de almacenamiento en el intervalo de tiempo considerado en el balance, se determina a partir de la evolución de los niveles del agua subterránea correspondientes al mismo intervalo y de valores representativos del coeficiente de almacenamiento del acuífero. El valor de este coeficiente se determina a partir de pruebas de bombeo y/o con base en consideraciones relativas al tipo y litología del acuífero en estudio.

C. Descarga total

La descarga total de una unidad hidrogeológica en el intervalo de tiempo considerado en el balance, se calcula como la suma de los volúmenes descargados en forma natural y de los extraídos de la misma por medio de captaciones, durante el mismo intervalo.

D. Extracción

La extracción de agua subterránea en los intervalos de tiempo considerados en el balance se determina a partir de las lecturas registradas en los medidores instalados en las descargas de los pozos o, a falta de ellos, con base en los métodos indirectos caudal y tiempo de bombeo, consumo de energía eléctrica, población servida y dotación, índices de consumo, superficies y láminas de riego que sean aplicables según el uso del agua.

E. Recarga total media anual

La recarga total media anual se obtendrá dividiendo la recarga total deducida del balance, entre el número de años del intervalo de tiempo utilizado para plantearlo.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. MATERIALES

5.1.1. Recopilación de información

Se obtuvo de la página de internet del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) la información del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del área de estudio, con resolución de 30 m; la cual se optó por descargar la que comprende al estado de Baja California en formato *.bil, la cual fue proyectada al sistema UTM, con DATUM WGS84, y específica para la ZONA 11 NORTE, que se muestra en la Figura 5.1. La cual se convirtió al formato *.img, para su procesamiento en el Software Comercial ArcGIS 10.1, y su integración al modelo SWAT 2012 versión compatible para ArcGIS.



Figura 5.1 Modelo digital de elevaciones obtenido del INEGI.

Se realizó una máscara, la cual es uno de los requisitos del programa, donde comprende la información del MDE respectiva al área de estudio, para poder realizar la delimitación del parteaguas de la cuenca, la que se representa en la Figura 5.2



Figura 5.2 Delimitación preliminar de la zona de estudio.

Se adquirió del INEGI, el Conjunto de Datos Edafológico Vectorial Escala 1:250,000 Serie II del año 2006.

Se adquirió del INEGI, el Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1:250 000, Serie V del año 2012.

La información climática se obtuvo del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) el cual, fue determinado durante el período de 31 años de 1979 a 2009 en enero de 2010. El CFSR fue diseñado y ejecutado como un sistema global, de alta resolución, del sistema acoplado de la atmósfera océano superficie terrestre y mar congelado para proporcionar la mejor estimación del estado de éstos durante este período. El CFSR actual será ampliado como producto operacional, en tiempo real en el futuro.

Se utilizó el Conjunto de datos vectoriales. Carta geológica, escala 1:250,000 de la serie I, 1980

5.2. METODOS

En la fase previa se ha realizado la revisión de literatura científica sobre los modelos existentes para la estimación de la recarga de agua subterránea y la aplicación de este tipo de estudios en diversos casos en el ámbito internacional.

De estos se determinó la utilización de tres modelos o programas que presentaron mayor inclusión, en el estudio para la estimación de la recarga de agua subterránea; resultando el modelo tridimensional para un sistema de acuífero por capas, con código de diferencias finitas MODFLOW el de mayor utilización, seguido por SWAT, que es un modelo hidrológico de agua superficial. Así como, el balance de aguas subterráneas con el procedimiento definido por la Norma oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000.

Para la estimación de la recarga de agua subterránea mediante el modelo SWAT y parcialmente para generación de variables de entrada del modelo MODFLOW, la información recabada se procesó siguiendo el procedimiento referido en el diagrama esquemático mostrado en la Figura 5.3.

Para la comparación de los resultados de los diferentes modelos se definió la creación de Unidades de Respuesta Hidrológica, del tipo múltiple HRUs. Estas unidades se definen en base a los usos de suelo y vegetación, tipos de suelos, pendiente dentro de cada una de las subcuencas donde se ubican las HRUs y que se utilizan para estimación del volumen de recarga por acuífero.

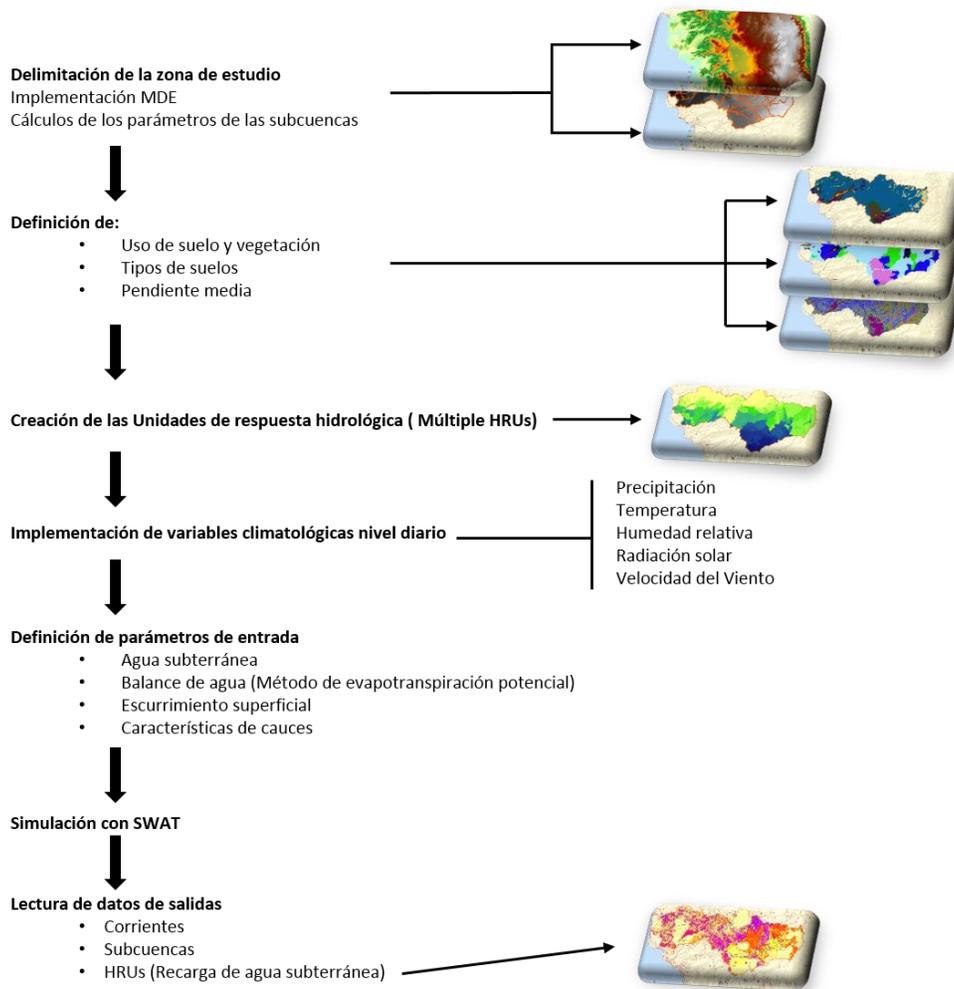


Figura 5.3 Diagrama del proceso de cálculo de la recarga de agua subterránea con SWAT.

5.2.1. Caracterización fisiográfica de la cuenca de captación

Se empleó el material cartográfico adquirido en el INEGI y empleando el componente SWAT del software comercial ArcGIS 10.1, se identificó y delimitó la cuenca del Arroyo Guadalupe, así como el cauce principal y sus tributarios, el área media de aporte se definió en 5,000 ha, del análisis preliminar del MDE, para realizar la

identificación del flujo y dirección de las corrientes de la cuenca hidrología, la corriente principal resulto de 158 km de longitud, el procedimiento se presenta en la Figura 5.4.

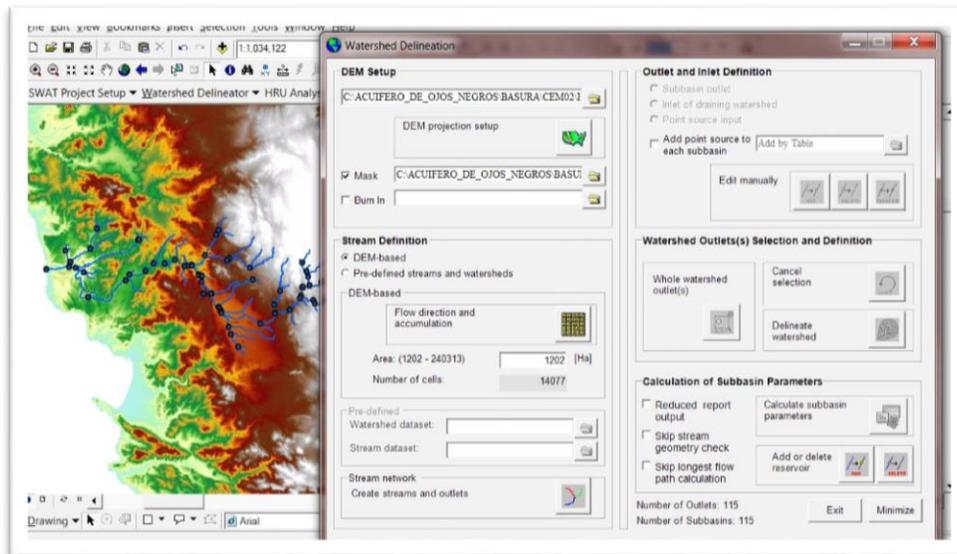


Figura 5.4 Identificación de la red hidrológica de la cuenca.

La caracterización de la cuenca se hizo empleando la información del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) obtenido del INEGI, mediante su implementación al modelo SWAT, y se definió la desembocadura al mar como el punto de salida de la cuenca, en la Figura 5.5, se presenta el punto de salida considerado.

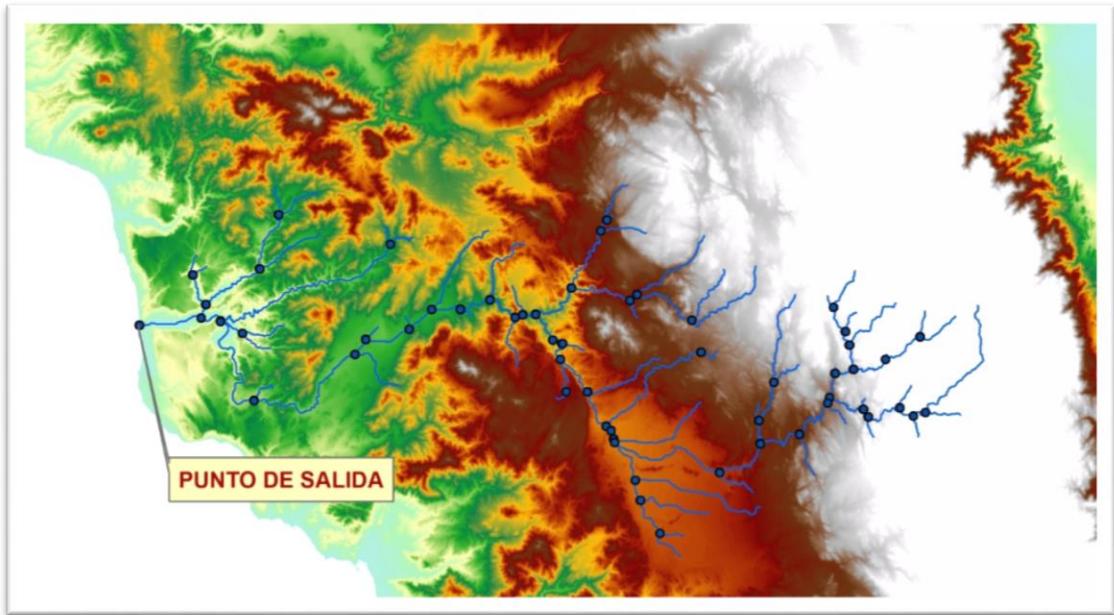


Figura 5.5 Desembocadura al mar como el punto de salida de la cuenca.

El SWAT generó la delimitación del parteaguas, el cual se presenta en la Figura 5.6.

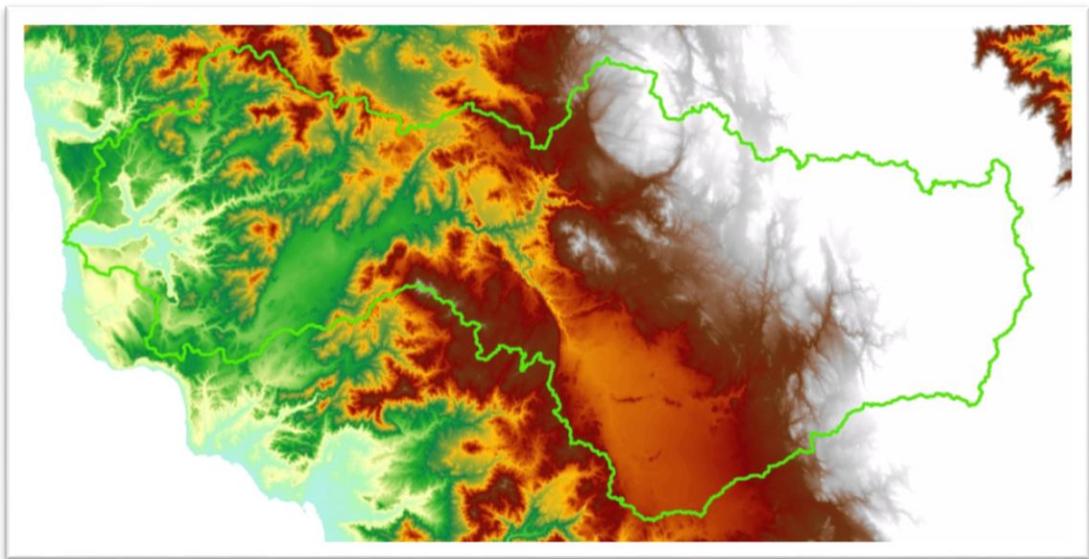


Figura 5.6 Parteaguas de la cuenca.

Siendo la delimitación de la cuenca una de las entradas al modelo SWAT, se prosiguió con la distribución en el espacio de las condiciones topográficas e hidrológicas de la cuenca estudiada; se generaron subcuencas, para lo cual, se partió del MDE y de la delimitación de la cuenca de estudio; con esta información, se obtuvieron 27 subcuencas.

El área de drenaje del Arroyo Guadalupe, medido desde el origen de sus escurrimientos en la Sierra Juárez hasta su desembocadura al mar, es de 2,400 km². Con elevación media de la cuenca de 891.25 msnm. Las características antes mencionadas se presentan en la Figura 5.7.



Figura 5.7 Microcuencas ubicadas en el área de estudio.

El número de orden de la cuenca es de orden 4, lo anterior se obtuvo mediante la extensión HIDROLOGY de las herramientas integradas al ArcGIS, con la aplicación del comando Stream Order. Los números de orden se presentan en la Figura 5.8.

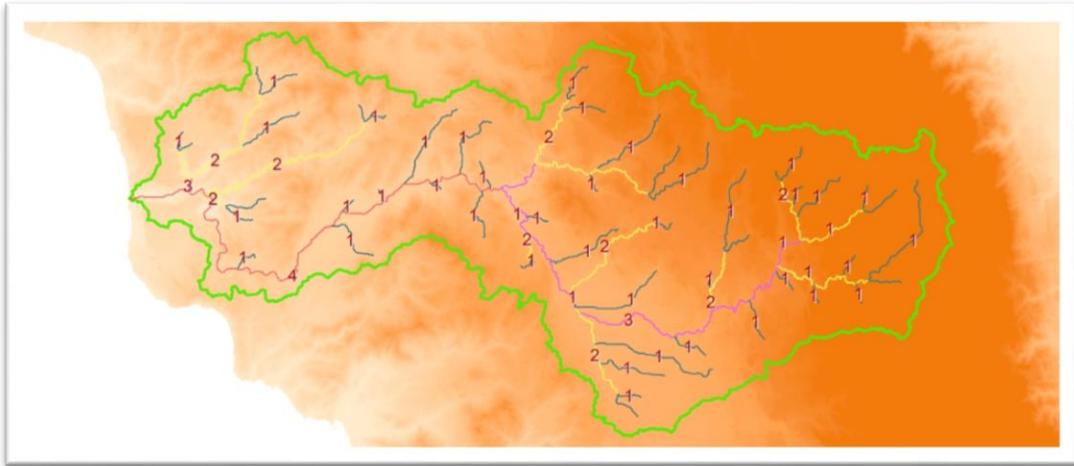


Figura 5.8 Número de orden de la cuenca.

5.2.2. Determinación de uso del suelo en la cuenca

La determinación del uso del suelo se hizo empleando el Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1:250 000, Serie V del año 2012 adquiridas con el INEGI. Resultado de este trabajo se identificaron 11 clases de uso del suelo para la cuenca en estudio, que se presentan en la Figura 5.9.

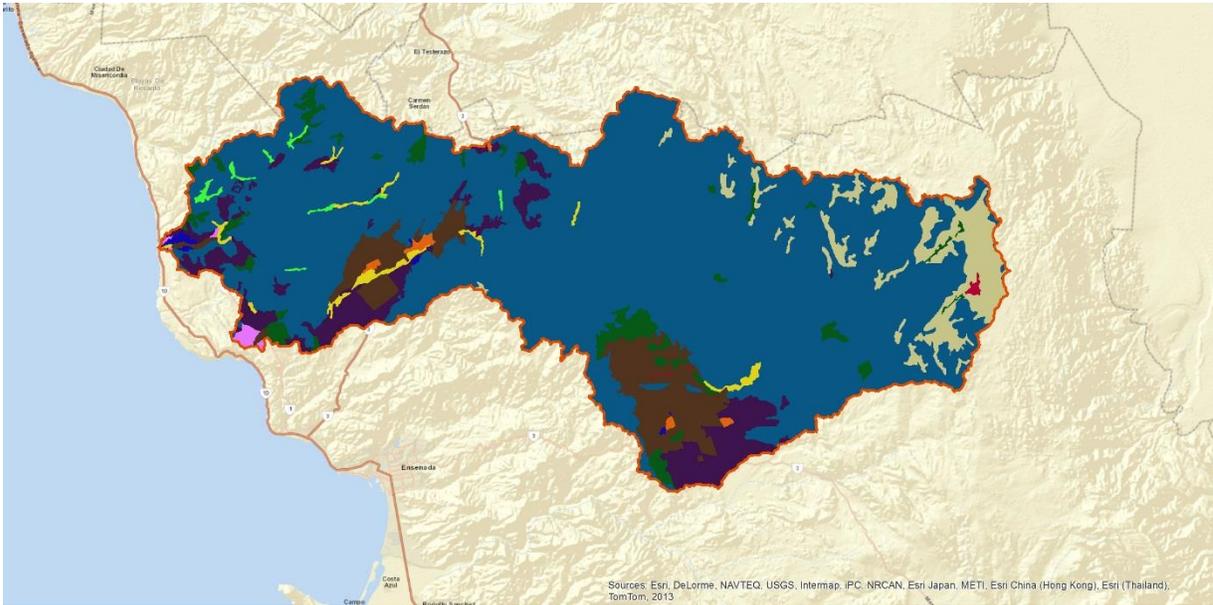


Figura 5.9 Uso del suelo en el área de estudio.

En el Cuadro 5.1 se muestran las 11 clases de uso de suelos identificados, las superficies y el porcentaje de ocupación de cada uso del suelo encontrado; sobresale el hecho de que las coberturas que mayor porcentaje presentan son Chaparral (ML) con 75.50 % correspondiente a 181,448.28 ha, Agricultura de riego permanente (RP) con 6.73 % y una superficie de 16,179.15 ha, Agricultura de temporal anual (TA) con 6.98 % correspondiente a 16,774.83 ha. También debe remarcarse que la condición de cobertura de Bosque de Pino (BP) se presenta con un 5.27 % equivalentes a 12,675.51 ha.

Cuadro 5.1 Clases de uso de suelo en la cuenca Guadalupe.

Clase	Descripción	Programa	Área (ha)	Porcentaje (%)
AH	ASENTAMIENTOS HUMANOS	URHD	505.6784	0.21
BP	BOSQUE DE PINO	FRSE	12,675.5179	5.27
BQ	BOSQUE DE ENCINO	FRSD	893.6042	0.37
H2O	CUERPO DE AGUA	WATR	264.9645	0.11

Clase	Descripción	Programa	Área (ha)	Porcentaje (%)
ML	CHAPARRAL	SWRN	181,448.2847	75.50
MRC	MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO	RNGB	684.2285	0.28
PI	PASTIZAL INDUCIDO	PAST	8,016.3943	3.34
RP	AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE	AGRC	16,179.1468	6.73
TA	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	AGRR	16,774.8260	6.98
VG	VEGETACIÓN DE GALERÍA	WETN	2,112.2021	0.88
ZU	ZONA URBANA	URBN	758.6884	0.32

5.2.3. Definición de los tipos de suelos

La determinación de los tipos de suelos se hizo empleando el Conjunto de Datos Edafológico Vectorial Escala 1:250,000 Serie II del año 2006, la cual, contiene información actualizada de los diferentes grupos suelos que existen en el territorio mexicano obtenida durante el período 2002-2006, utilizando para la clasificación de los suelos el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (por sus siglas en inglés World Reference Base for Soil Resources WRB), reporte número 84, publicado por la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo (SICS), Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos (ISRIC) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), adaptado por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, para las condiciones de ambientales de México. Los tipos de suelos encontrados en la cuenca se presentan en la Figura 5.10.

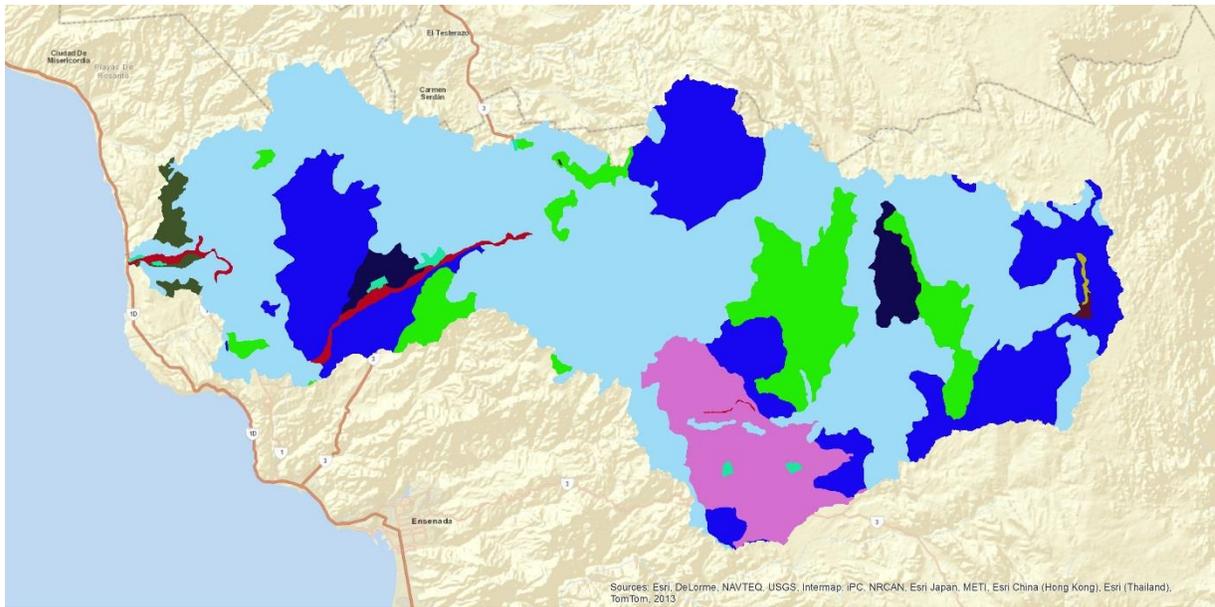


Figura 5.10 Tipos de suelos en el área de estudio.

Estos tipos de suelos se definieron para ser empleados en la simulación de la recarga de agua subterránea con el modelo SWAT, se incluyen en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.2 Tipos de Suelos en la cuenca Guadalupe.

Clase	Área (ha)	Por ciento (%)
ARENOSOL	205.7894	0.09
CAMBISOL	5,482.1959	2.28
FLUVISOL	2,045.6834	0.85
LEPTOSOL	134,507.4629	55.97
PHAEZEM	23,255.9971	9.68
PLANOSOL	18,512.8500	7.70
REGOSOL	53,006.4862	22.06
URBAN LAND	798.8216	0.33
VERTISOL	2,278.3706	0.95
WATER	219.8787	0.09

5.2.4. Definición de la pendiente

Se realizó la definición de la pendiente en base a 5 clases. Con respecto a la pendiente su magnitud impacta de manera inversamente proporcional en la recarga de agua subterránea calculada con ella. El Uso del modelo SWAT facilitó la obtención de este parámetro. Las áreas definidas a nivel cuenca para el modelo se presentan en la Figura 5.11.

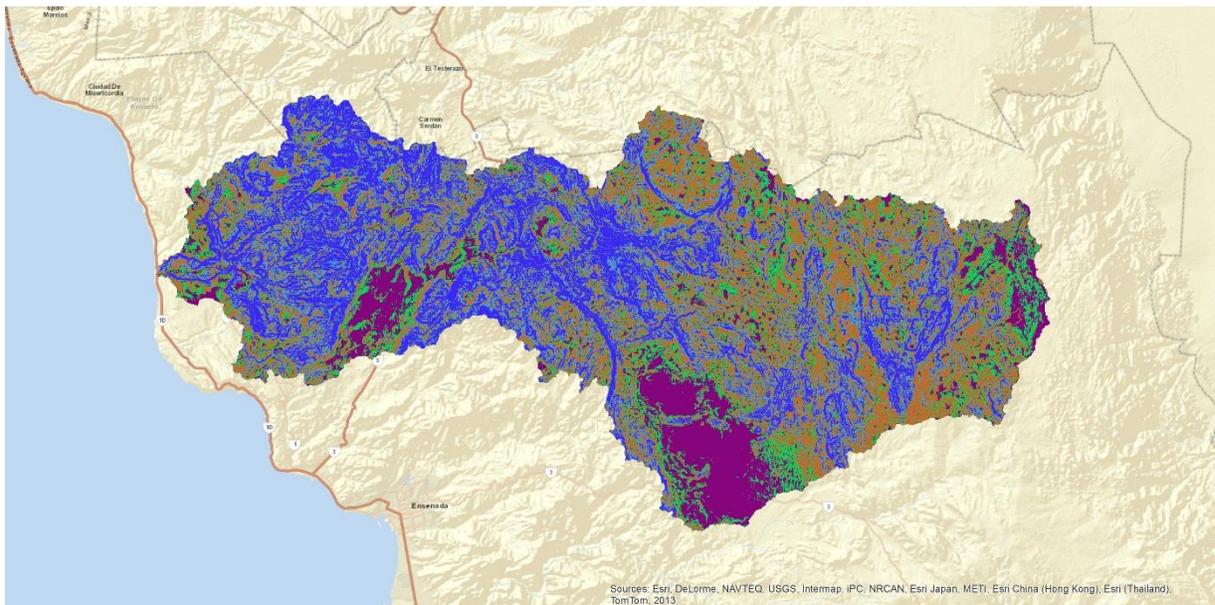


Figura 5.11 Clasificación por pendientes.

La clase de 5 a 15 por ciento de pendiente, se destaca en la cuenca presentando una ocupación de 30.01 % con una superficie equivalente a 72,108.01 ha. El área superficial de los acuíferos de interés se encuentra ubicada en la clase de 0 a 2 por ciento de pendiente. Las clases definidas se presentan en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3 Clases de pendientes definidas para la cuenca.

Clase (%)	Área (ha)	Por ciento (%)
0-2	31,252.75	13.00
2-5	35,912.13	14.94
5-15	72,108.01	30.01
15-25	42,160.36	17.54
> 25	58,880.28	24.50

5.2.5. Determinación de las Unidades de Respuesta Hidrológica

Estas unidades se definieron en base a los usos de suelo y vegetación, tipos de suelos, pendiente dentro de cada una de las subcuencas, se generaron 1,170 HRUs para toda la cuenca, de estos 345 HRUs son correspondientes a los acuíferos. Las unidades para toda la cuenca se presentan en la Figura 5.12, en estas se definen los resultados de tasa de recarga y evapotranspiración entre otras variables.

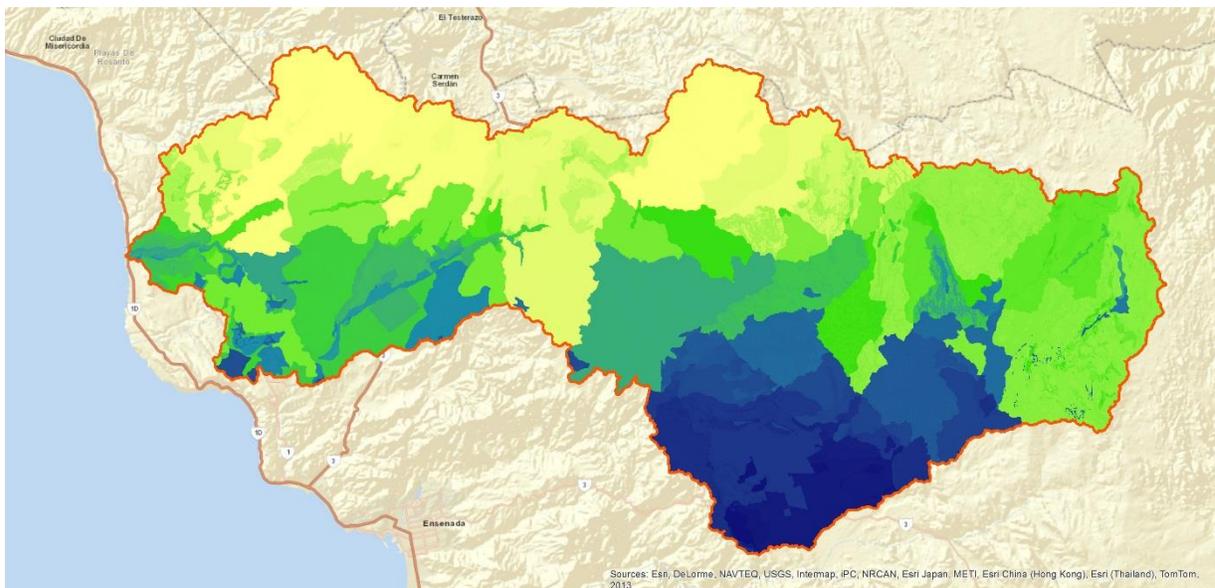


Figura 5.12 Mapa de distribución de HRUs en la cuenca.

5.2.6. Modelado por capa del sistema acuífero

Para la estimación de la recarga de agua subterránea mediante el modelo MODFLOW, de los datos obtenidos del modelo SWAT se seleccionaron las variables de entrada al modelo MODFLOW, la que debidamente se procesó siguiendo el procedimiento referido en el diagrama esquemático mostrado en la Figura 5.13; estos datos se implementaron en el programa Visual MODFLOW 4.2.

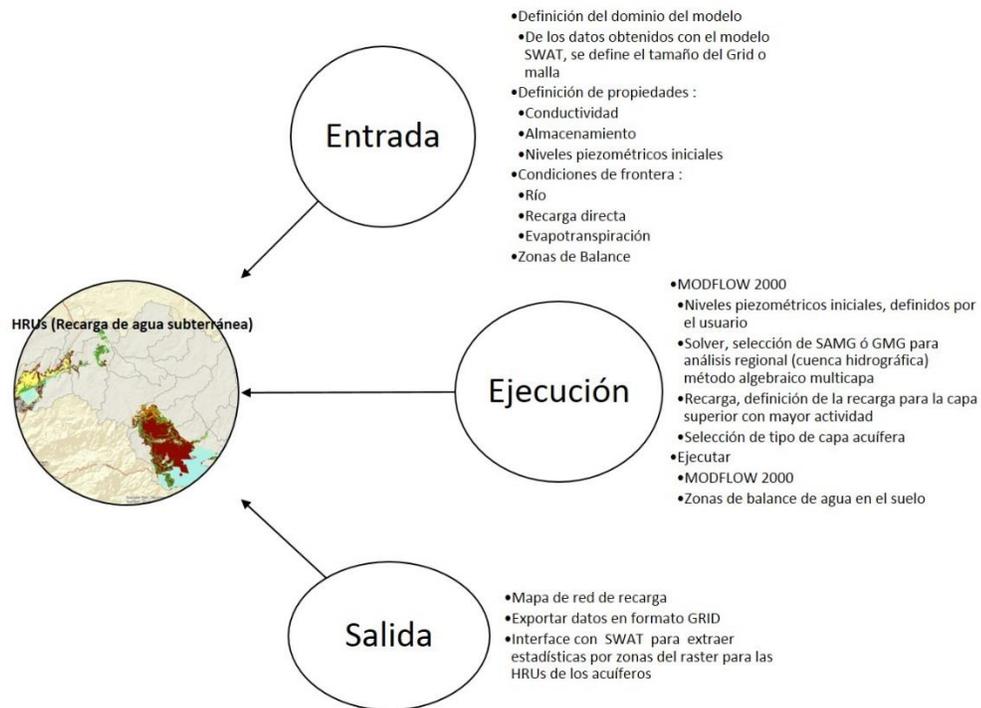


Figura 5.13 Diagrama del proceso de cálculo de la recarga de agua subterránea con MODFLOW.

Para la modelación del área de estudio, con base en los requisitos de datos de entrada de MODFLOW, se requiere una discretización con una malla vista en planta como la descrita en la Figura 5.14. Esta incluye el mapa base, se incluyen

referencias geográficas en forma de coordenadas UTM. La topografía para la zona se obtuvo de las elevaciones del MDE de INEGI, con un total de 489 columnas, 290 renglones y una capa acuífera. El modelo cubre la totalidad de la cuenca hidrológica, incluyendo los acuíferos de interés.

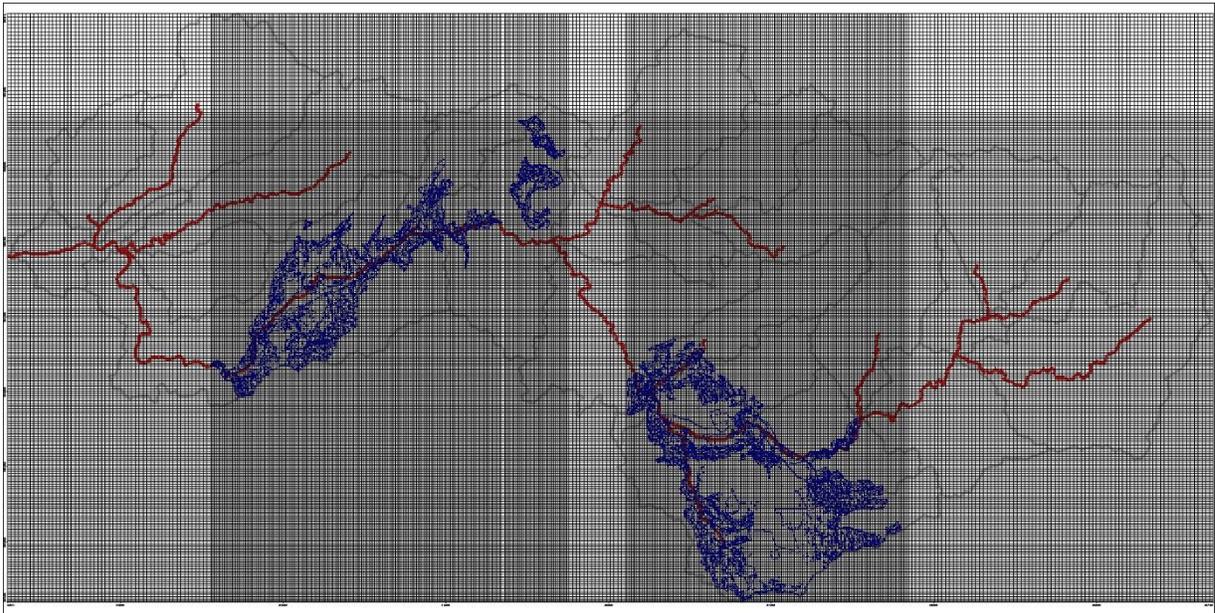


Figura 5.14 Discretización del modelo de agua subterránea.

5.2.6.1. Condiciones iniciales y condiciones de frontera

Las condiciones iniciales consideradas son iguales a las del modelo SWAT establecidas a 10 metros de profundidad para los niveles piezométricos, de los acuíferos de interés. Las condiciones de frontera definidas para el modelo, son las correspondientes a los resultados obtenidos con el modelo SWAT para la recarga directa y la evapotranspiración, los cuales se obtuvieron a nivel de HRU y se

integraron al modelo, cabe resaltar que estas condiciones fueron aplicadas en la parte superior de la capa definida para el modelo. Otra condición importante incluida en el modelo es la de ríos o corrientes, las cuales, se definieron con un espesor de al menos 20 m, esto para simular la interacción del flujo lateral y el de corriente. El flujo entre una corriente y el flujo de agua subterránea pueden tener relación y su magnitud está dada por la siguiente ecuación 5.1:

$$Q_{RIV} = \frac{KLW}{M} (H_{RIV} - h_{i,j,k}) \quad 5.1$$

Donde:

Q_{RIV} : flujo entre la corriente y el acuífero

K : conductividad hidráulica

L : longitud de la corriente

W : ancho de la corriente

M : espesor de la cama de la corriente

H_{RIV} : carga en la corriente

$h_{i,j,k}$: carga en el nodo que subyace a la corriente

Para definición de las propiedades de conductividad y almacenamiento se utilizaron los datos de geología superficial de INEGI, así como, los resultados de proyectos realizados en la zona para obtener los parámetros hidráulicos. Se definieron 3 zonas de balance correspondiente a los acuíferos de interés, permitiendo la reacción de estas zonas a las condiciones de recarga establecida y los parámetros hidráulicos de las corrientes o ríos.

5.2.6.2. Aplicación del modelo

Para la ejecución del modelo se utilizó el modelo MODFLOW 2000, utilizando los niveles piezométricos iniciales previamente establecidos, se empleó el solucionador SAMG, utilizado para análisis regional y que para nuestro caso de estudio se utilizó a nivel cuenca hidrológica, para un periodo anual, específicamente para el año 2010. La recarga se definió para la capa superior de mayor actividad. Los parámetros de cálculo y salida de resultados fueron seleccionados para el modelo MODFLOW 2000 y el modelo de Zonas de Balance de agua en el suelo.

5.2.6.3. Interface del modelo MODFLOW para estadísticas por HRU

Con los resultados obtenidos con el modelo MODFLOW 2000 y el modelo de Zonas de Balance, se generó un mapa de red de recarga, con la tasa de recarga anual para cada una de las celdas de la malla definida dentro del modelo; estos datos fueron exportados en formato GRID y vinculados a la interface de ArcGIS para extraer las estadísticas por zonas del raster, definidas por los límites de las HRUs correspondientes a los acuíferos.

5.2.7. Balance de aguas subterráneas

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa, es presentada en la expresión 5.2:

$$\text{Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de almacenamiento} \quad \mathbf{5.2}$$

Aplicando esta ecuación al estudio de los acuíferos, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero, lo anterior se presenta en la ecuación 5.3:

$$\text{Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento} \quad \mathbf{5.3}$$

Para este caso particular, se optó por considerar la recarga vertical como incógnita de la ecuación de balance. De esta manera la ecuación de balance propuesta es la expresión 5.4:

$$R_v + E_h + R_i - B = \pm \Delta V(S)$$

5.4

Donde:

R_v: Recarga vertical

E_h: Entrada por flujo subterráneo horizontal

R_i: Recarga inducida

B: Bombeo

ΔV(S): Cambio de almacenamiento

5.2.7.1. Entradas

La recarga total que recibe un acuífero está constituida por la recarga natural y la recarga incidental o inducida que se origina por la infiltración del agua que se destina a las actividades agrícolas, principalmente, ya que es esta región no existen centros de población tan importantes, que estén ocasionando fugas considerables en las redes de abastecimiento de agua potable o del drenaje.

De acuerdo con el modelo conceptual definido para los acuíferos de la Cuenca del Arroyo Guadalupe, las entradas están integradas por la recarga vertical (R_v) que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos, y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola constituye otra fuente de recarga al acuífero. Este volumen se integra en la componente de recarga inducida (R_i).

A. Recarga vertical

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance, expresión 5.4. De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la ecuación 5.5:

$$R_v = B - \Delta V(S) - E_h - R_i \quad 5.5$$

B. Entrada por flujo subterráneo horizontal

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático y de los valores de conductividad hidráulica obtenidos de la interpretación de las pruebas de bombeo efectuadas en pozos distribuidos en la zona, datos obtenidos de los documentos de Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea de los acuíferos de estudio (CONAGUA, 2009; DOF, 2009).

C. Recarga inducida

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen de agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego. Cabe aclarar que lleva implícito una disminución de la recarga debido a procesos de evapotranspiración.

5.2.7.2. Salidas

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. Para los acuíferos las descargas están representadas por el bombeo (B).

A. Bombeo

La extracción de agua subterránea se determinó basándose en la información obtenida durante el recorrido de campo para cuantificar las superficies de riego, tipo de cultivo, tiempo de operación de la obra, registro hidrométrico subterráneo y aplicación de lámina de riego para cada cultivo; así mismo, se obtuvo información relativa a características constructivas de cada pozo activo ubicado dentro del área de análisis.

5.2.7.3. Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración por lluvia (Rv), por lo que despejando este término de la ecuación definida se tiene los valores correspondientes para cada acuífero, en el Cuadro 5.4 se presenta un resumen de los componentes para la solución de la ecuación.

Cuadro 5.4 Componentes para la solución de la ecuación de balance.

	Ip	Eh	Rv	Sh	Evt	B	CVA
Acuífero	Infiltración por lluvia	Entradas Horizontales	Recarga Vertical	Salidas Horizontales	Evapotranspiración	Bombeo	Cambio de Almacenamiento
	Mm³	Mm³	Mm³	Mm³	Mm³	Mm³	Mm³
(0207) GUADALUPE	2.88	0.80	22.362	0.509	3.43	19.93	2.174
(0208) OJOS NEGROS	0.000	12.20	6.800	0.380		25.14	6.520
(0248) REAL DEL CASTILLO	2.429	7.147	4.300	0.550	2.123	8.506	0.488

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. CON EL MODELO SWAT

Para la simulación con el modelo SWAT, la topografía disponible, uso de suelo y vegetación, los tipos de suelos y datos meteorológicos fueron agregados. Esto implicó la creación de la red hidrológica, el parteaguas de la cuenca y las subcuencas. Se utilizó el enfoque de múltiples unidades de respuesta hidrológica (HRU) y la cuenca fue discretizada en 1,170 HRUs. Todos los procesos hidrológicos dominantes dentro de la cuenca fueron simulados en suficientes detalle. El periodo de tiempo utilizado para la simulación en SWAT fue anual.

El periodo simulado fue el correspondiente al año 2010, las variables climatológicas fueron las comprendidas a nivel diario desde el 1 de enero de 2009 hasta el 31 de diciembre de 2010, para precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. Los datos del año 2009 se utilizaron para proporcionar un estado de equilibrio en el balance de agua en el suelo.

El promedio anual de precipitación en la cuenca fue de 311.6 mm, con una lámina de escurrimiento superficial de 27.96 mm y un flujo lateral de 33.82 mm. Así como, una recarga promedio de 11.87 mm para toda la cuenca, con evapotranspiración de 221.20 mm y percolación de 13.16 mm.

Las superficies de los acuíferos hidrogeológicos se definieron en base a las HRUs ubicados dentro de los límites geológicos, correspondiente a 345 de los HRUs determinados previamente a nivel cuenca hidrológica, en el Cuadro 6.1 se presentan las superficies correspondientes a cada uno de los acuíferos en estudio, incluyendo al acuífero de Real del Castillo debido a que la geología superficial presenta una conexión con el acuífero de Ojos Negros. El nivel piezométrico se definió a 10 metros de profundidad, no se consideraron retornos de riego, el acuífero somero se consideró a 1 metro de profundidad.

Cuadro 6.1 Superficies determinadas con el SIG, de los acuíferos en estudio.

Clave de acuífero	Total (ha)
(0207) GUADALUPE	12,224.03
(0208) OJOS NEGROS	14,227.04
(0248) REAL DEL CASTILLO	6,777.65
Total general	33,228.72

Para este modelo resulta importante el proceso de la evapotranspiración aunado a que el área de estudio se encuentra en una zona mediterránea, principalmente en las zonas de cultivo, debido a que zonas con valores elevados de evapotranspiración presentan tasas de recarga pequeñas o iguales a cero. Se utilizó el método de Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración por ser este uno de los métodos recomendados por FAO.

La creación de las unidades de repuesta hidrológica, brinda la facilidad de mapeo de las tasas de recarga, para la cuenca de estudio los valores obtenidos se presentaron

en un rango de 0.0 mm/año a 283.1 mm/año. En la Figura 6.1 se presenta el mapa de recarga estimada para el año 2010.

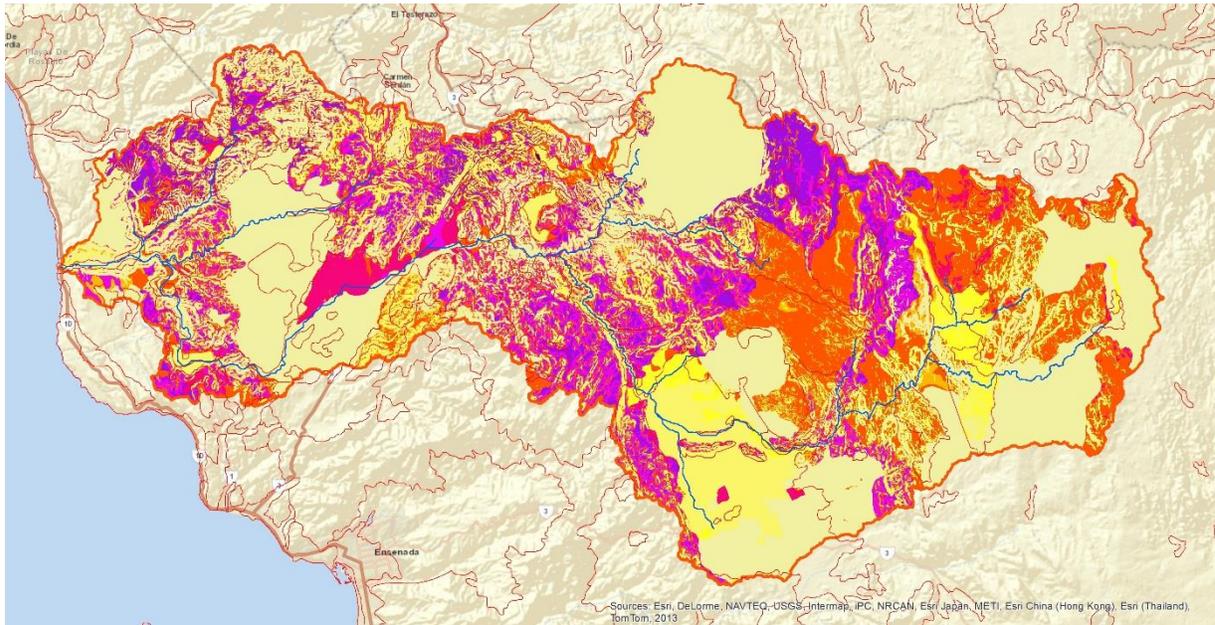


Figura 6.1 Mapa de recarga estimada con SWAT para la zona estudiada en el año 2010.

6.2. CON EL MODELO MODFLOW

Claramente hay un alto nivel de variabilidad en las características hidrogeológicas en la región. Esta variabilidad es extremadamente difícil de caracterización y de representación en el modelo. Una malla uniforme de 150 m por 150 m fue utilizada en Visual MODFLOW, para la definición dentro del dominio del modelo.

Como resultado de las condiciones hidrológicas previamente descritas, los acuíferos dentro de la cuenca se modelaron como un sistema de una sola capa de la zona

saturada, como acuífero no confinado. No se consideró el movimiento del agua en el acuífero profundo. Además, la estratigrafía detallada de los acuíferos es compleja, y no se estableció ninguna capa estratigráfica distinta dentro del acuífero geológico. Pues el área modelada es grande comparada al espesor saturado de los acuíferos.

Las condiciones de límite consideradas fueron la recarga directa, la evapotranspiración y las corrientes principales entre acuíferos. Éstos consideran el hecho de que el sistema de agua subterránea en la cuenca no es un sistema cerrado por el parteaguas. La recarga directa fue aplicada a la capa activa superior del modelo, usando los resultados espacialmente distribuidos, obtenidos de la modelación con SWAT, representados espacialmente mediante los HRU obtenidos para el modelado del agua superficial. Para cada acuífero el volumen de recarga fue estimado basado en las condiciones de límites de los acuíferos, definidos por los HRUs, sumado a estos los volúmenes de recarga por la interacción del flujo lateral y el de corriente.

Se definieron 3 zonas de balance correspondiente a los acuíferos de interés, permitiendo la reacción de estas zonas a las condiciones de recarga establecida y los parámetros hidráulicos de las corrientes o ríos.

En la Figura 6.2 se presenta el mapa de recarga estimada para el año 2010. Los valores obtenidos se presentaron en un rango de -361.2 mm/año a 285.9 mm/año.

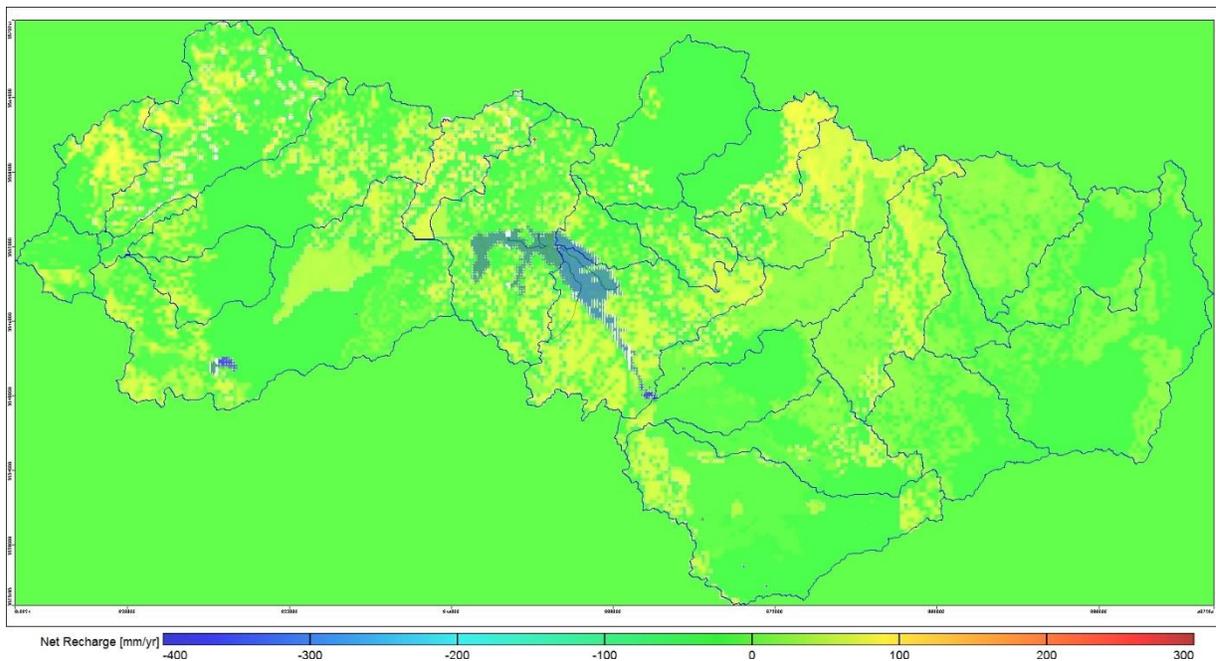


Figura 6.2 Mapa de recarga estimada con MODFLOW para la zona estudiada en el año 2010.

6.3. CON LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CONAGUA-2000

Las entradas por flujo horizontal provienen principalmente de la infiltración de agua precipitada en las zonas de mayor elevación. A su vez, las salidas por flujo horizontal están constituidas por volúmenes de agua que abandonan el acuífero de manera natural, ya sea para integrarse al sistema superficial (manantiales) o para continuar el ciclo pasando a formar parte de otros acuíferos o descargar al mar.

Dentro del funcionamiento real de los acuíferos, la variación en la precipitación induce una variación en la recarga vertical y horizontal del acuífero. De forma natural la recarga al acuífero depende de varios factores, entre los que se pueden mencionar: el estado de saturación del suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del

terreno, la composición y textura del suelo, la frecuencia de la precipitación, entre otros. En este trabajo se consideraron los volúmenes infiltrados al acuífero, estimados de las variaciones en el almacenamiento.

El volumen de recarga vertical se obtuvo a partir de la ecuación de balance una vez resueltos los parámetros de recarga y cambio en el volumen almacenado. Con dicho método se obtuvo un volumen de 22.3 Mm³/año para los acuíferos (0207) Guadalupe, 6.8 Mm³/año para (0208) Ojos Negros y 4.3 Mm³/año correspondiente al acuífero (0248) Real del Castillo.

La descarga de los acuíferos está constituida por tres elementos: salidas subterráneas horizontales, descarga por efectos de la evapotranspiración y descargas por bombeo principalmente para uso público-urbano y agrícola.

Para los cálculos de volumen la lámina de evapotranspiración se aplica a una determinada superficie. Este volumen debe ser corregido por un factor que incluya todos los parámetros que afectan al proceso evaluado.

A continuación en el Cuadro 6.2 se presentan los resultados del balance de aguas subterráneas estimado para los acuíferos en estudio, los valores de R en mm fueron los incorporados al modelo de SIG para cada HRU. Las superficies consideradas para la integración de las tasas de recarga a las HRU son las presentadas anteriormente en el Cuadro 6.1.

Cuadro 6.2 Resumen del Balance de aguas subterráneas.

R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DEFICIT	R
Mm ³	mm					
23.9	0.0	44.21512	19.9	0	-20.31512	195.51
19.0	0.0	27.508107	25.5	0	-8.508107	133.54
11.7	0.6	10.107675	9.00	0.972325	0.000000	172.62

6.4. VOLUMEN DE RECARGA EN LOS ACUÍFEROS

En el Cuadro 6.3 se presentan los volúmenes obtenidos de recarga para los acuíferos en estudio, obtenidos con la NOM-011-CONAGUA-2000, MODFLOW y SWAT. Estos valores se obtuvieron en base a multiplicar las superficies delimitadas por las HRUs y las tasas de recargas anuales.

Cuadro 6.3 Volúmenes estimados por acuífero, con los modelos utilizados, metros cúbicos

CLAVE DE ACUIFERO	VOL. NORMA m ³	VOL. VISUAL MODFLOW m ³	VOL. SWAT m ³
ACUÍFERO (0207) GUADALUPE	23,900,000	3,442,357	2,399,354
ACUÍFERO (0208) OJOS NEGROS	19,000,000	1,222,662	1,080,449
ACUÍFERO (0248) REAL DEL CASTILLO	11,700,000	1,230,638	1,060,079
Total general	54,600,000	5,895,658	4,539,883

Los primeros valores de los volúmenes de recarga fueron ajustados debido a que presentaban variaciones significativas entre modelos, principalmente el modelo SWAT, presentaba volúmenes de cero. En este sentido la norma oficial presenta valores altos debido a que hace una distribución uniforme de las tasas de recarga en los HRUs considerados para estimar el volumen de recarga. En el Cuadro 6.4 se presentan los resultados obtenidos con los modelos para su posterior comparación.

Cuadro 6.4 Volúmenes estimados por HRU, con los modelos utilizados.

Consecutivo	Nombre DE HRU	NORMA m ³	VISUAL MODFLOW m ³	SWAT m ³
1	933	442	0	0
2	937	33	0	0
3	870	574	118	1
4	1142	10,365	1,900	3
5	902	491	6	4
6	720	119	0	10
7	694	1,002	282	11
8	249	279	57	12
9	1129	674	125	16
10	682	462	73	18
11	696	1,775	4	20
12	971	1,179	105	20
13	711	787	77	31
14	935	91	0	39
15	702	104	0	41
16	1078	3,096	601	47
17	882	220	0	48
18	703	135	0	51
19	946	710	112	54
20	245	301	0	61
21	713	325	35	65
22	881	334	90	70
23	809	167	0	72
24	701	264	0	79
25	901	191	91	83
26	949	419	31	90
27	938	208	0	91
28	880	464	45	91
29	916	46,213	4,071	91
30	683	2,843	246	92
31	936	586	232	100
32	899	240	73	103
33	1071	9,876	255	104
34	248	576	47	116
35	884	18,165	470	117
36	1058	564	92	122
37	908	718	73	141
38	173	41,951	7,527	146
39	872	350	0	153
40	1118	610	0	170
41	706	497	0	185
42	898	943	195	190
43	1121	1,808	110	193
44	816	7,937	498	202
45	1060	1,011	253	212
46	710	1,642	162	216
47	246	1,574	413	227

Consecutivo	Nombre DE HRU	NORMA m ³	VISUAL MODFLOW m ³	SWAT m ³
48	910	1,053	119	228
49	798	835	0	249
50	797	835	112	254
51	948	1,220	110	257
52	947	1,363	141	258
53	775	15,763	1,143	263
54	1077	884	0	277
55	909	1,349	204	284
56	1059	3,738	288	288
57	873	1,520	280	305
58	892	10,794	1,575	305
59	893	1,032	355	317
60	1046	747	153	326
61	871	786	184	337
62	788	1,503	91	410
63	822	15,927	1,057	419
64	894	1,474	507	419
65	175	977	407	447
66	776	11,939	1,034	453
67	929	17,394	1,619	467
68	900	1,249	184	491
69	819	18,912	1,450	497
70	695	3,506	836	515
71	1057	3,040	217	570
72	939	1,487	598	584
73	707	1,600	394	587
74	1119	2,169	244	588
75	712	3,120	395	603
76	1047	73,978	9,840	603
77	963	23,437	1,574	618
78	240	1,795	78	671
79	934	13,119	1,491	702
80	1120	2,907	492	713
81	247	3,945	57	766
82	705	5,204	987	771
83	958	4,864	1,190	774
84	919	2,309	0	781
85	1130	3,918	710	812
86	955	2,443	827	827
87	1079	2,801	182	856
88	697	9,846	778	1,008
89	810	7,012	2,206	1,024
90	762	2,337	673	1,030
91	895	16,362	1,695	1,060
92	1108	33,511	2,861	1,061
93	896	19,605	6,330	1,077
94	874	2,775	921	1,092
95	817	7,513	1,039	1,099

Consecutivo	Nombre DE HRU	NORMA m ³	VISUAL MODFLOW m ³	SWAT m ³
96	1135	36,720	1,848	1,161
97	1050	2,985	769	1,276
98	931	20,932	1,941	1,301
99	286	79,709	2,574	1,323
100	1076	10,761	2,320	1,449
101	1115	122,488	32,344	1,542
102	243	4,535	1,785	1,662
103	698	12,187	2,252	1,681
104	972	12,977	3,427	1,794
105	1067	18,622	1,022	1,831
106	1117	3,522	929	1,988
107	773	56,681	4,630	2,014
108	709	6,047	1,345	2,037
109	956	6,792	2,328	2,249
110	787	7,680	1,138	2,304
111	174	5,228	1,599	2,340
112	815	18,532	2,152	2,430
113	205	9,679	3,145	2,520
114	932	39,652	2,727	2,575
115	1166	10,377	2,123	2,691
116	270	22,917	1,560	2,786
117	1100	8,099	1,639	2,927
118	1131	7,480	1,252	3,273
119	897	55,277	17,847	3,421
120	957	12,804	3,872	3,875
121	818	25,877	3,056	3,881
122	299	31,089	8,402	4,213
123	969	14,446	4,627	4,528
124	888	13,595	4,379	4,599
125	241	27,648	4,580	4,826
126	242	17,384	3,213	5,844
127	1082	110,400	8,521	5,863
128	772	82,850	10,080	6,224
129	920	19,070	4,788	6,313
130	1116	11,694	3,982	6,466
131	1146	36,393	8,561	6,500
132	177	30,249	9,879	6,610
133	1048	36,114	7,604	7,182
134	885	47,205	2,139	7,295
135	1068	65,004	6,475	7,397
136	917	49,227	8,564	7,450
137	201	48,395	10,357	7,753
138	1128	18,391	2,458	7,893
139	298	26,035	2,544	7,913
140	1132	20,185	3,651	7,971
141	771	41,184	2,401	8,168
142	207	79,547	15,665	8,282
143	1075	29,923	7,647	8,374

Consecutivo	Nombre DE HRU	NORMA m ³	VISUAL MODFLOW m ³	SWAT m ³
144	1107	67,752	7,233	8,500
145	1106	79,803	7,159	8,746
146	1133	72,641	5,838	9,163
147	1169	25,088	7,843	9,285
148	1137	71,615	8,929	10,823
149	973	39,393	12,965	11,117
150	823	60,208	11,386	11,321
151	176	28,131	10,132	11,587
152	1136	80,168	8,900	11,727
153	1049	30,083	6,765	11,767
154	970	39,255	13,056	12,039
155	887	36,590	9,769	12,126
156	976	238,395	13,880	12,491
157	891	107,286	46,202	12,585
158	297	43,090	9,007	12,875
159	203	51,903	16,387	13,231
160	751	121,979	21,614	14,279
161	1101	98,707	14,651	15,265
162	770	84,268	8,715	16,327
163	284	456,392	15,804	16,401
164	1109	127,738	11,634	16,554
165	300	61,572	3,118	16,923
166	285	549,065	18,204	21,382
167	1114	83,606	23,663	21,652
168	280	296,093	20,077	21,738
169	204	93,149	26,639	21,801
170	1081	376,398	26,676	23,344
171	1143	57,762	21,813	23,377
172	786	76,797	18,482	24,753
173	890	223,265	96,147	25,284
174	930	250,015	31,446	25,547
175	283	667,995	26,421	25,593
176	889	253,408	94,637	25,598
177	918	84,707	20,644	25,727
178	282	140,302	26,241	27,823
179	267	114,275	29,634	28,029
180	1104	97,790	16,934	31,204
181	769	182,667	22,615	32,128
182	962	318,152	31,604	32,234
183	1151	480,410	42,227	32,782
184	1113	65,810	21,142	33,385
185	977	576,772	31,058	35,824
186	1069	317,953	31,822	37,301
187	821	155,932	40,133	39,144
188	886	133,726	19,362	40,477
189	927	373,059	42,775	43,764
190	1144	114,069	36,623	45,232
191	268	207,352	63,136	55,156

Consecutivo	Nombre DE HRU	NORMA m ³	VISUAL MODFLOW m ³	SWAT m ³
192	1145	159,887	49,645	58,519
193	748	216,630	58,463	58,648
194	740	267,895	69,578	59,984
195	961	532,105	55,916	60,437
196	926	542,586	56,728	61,678
197	279	326,066	47,684	63,158
198	200	186,484	74,471	63,951
199	199	228,016	78,796	71,654
200	749	299,787	69,043	73,413
201	960	628,787	67,114	73,753
202	747	295,475	74,670	78,351
203	269	290,996	92,268	78,784
204	198	283,650	112,804	95,446
205	281	597,902	64,036	104,928
206	1147	1,358,441	121,962	108,412
207	1167	275,627	94,912	109,998
208	1083	1,975,888	127,886	128,413
209	820	536,747	147,913	144,544
210	978	2,607,600	170,854	169,468
211	742	1,019,053	300,975	276,513
212	1149	6,732,542	563,255	564,118
213	739	2,525,801	785,508	721,956
Total general		32,204,350	4,743,856	4,539,883

En la Figura 6.3 se muestra la gráfica del comparativo de los resultados del volumen de recarga obtenidos mediante la norma oficial NOM-011-CONAGUA-2000 y para el modelo MODFLOW, los cuales resultaron con poca correlación. Del análisis de la regresión lineal se puede observar que la pendiente de la recta es 0.1086 y el coeficiente de determinación de $R^2 = 0.6411$, indicándonos que la estimación realizada con el modelo basado en la NOM-011-CONAGUA-2000 sobreestimó los volúmenes de recarga de los diferentes acuíferos.

Lo que hace pensar que es debido a las discrepancias encontradas en las superficies con que se determinan los parámetros de la ecuación de balance en la NOM-011-

CONAGUA-2000, independientemente de las superficies empleadas en el modelo de SIG.

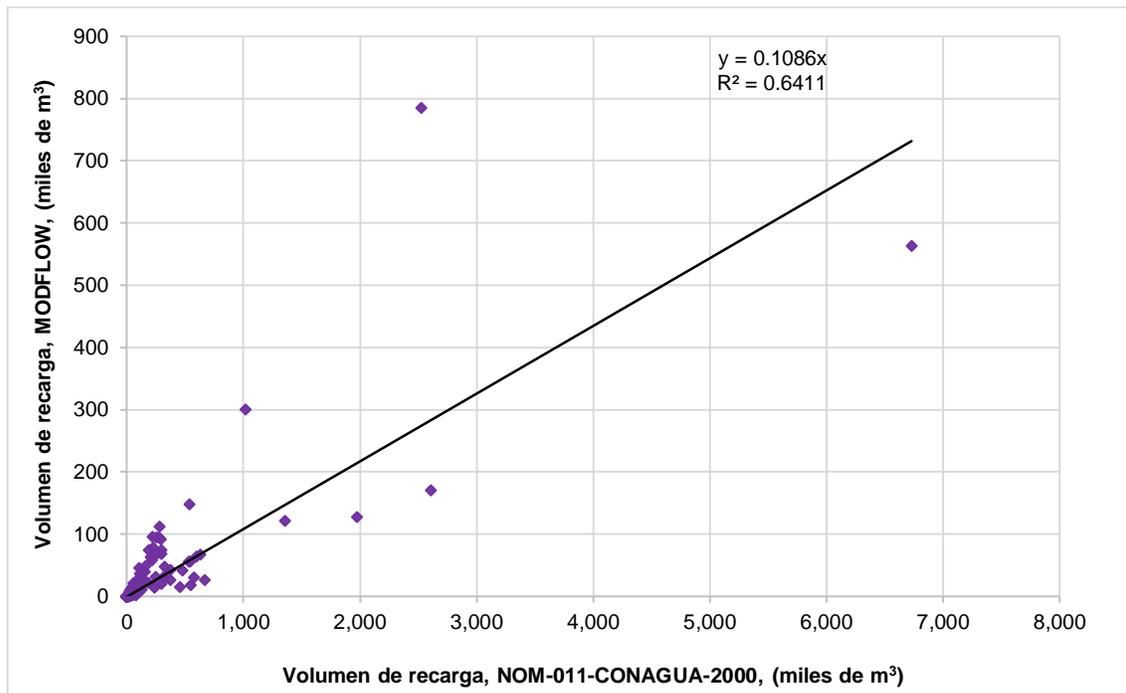


Figura 6.3 Comparación del volumen de recarga entre la NOM-011-CONAGUA-2000 y el modelo SWAT.

Hay un buen coeficiente de determinación $R^2 = 0.9824$ entre los resultados obtenidos con el modelo MODFLOW y con el modelo SWAT, pues éstos datos presentan un comportamiento similar en lo general para el periodo analizado con ambos, esto se muestra en la gráfica de la Figura 6.4. Al parecer el modelo SWAT subestima los volúmenes de recarga, esto se considera adecuado debido a que el modelo MODFLOW tiene de origen parámetros de resultados obtenidos del modelo SWAT, por lo que MODFLOW integra la interacción entre agua superficial y agua subterránea.

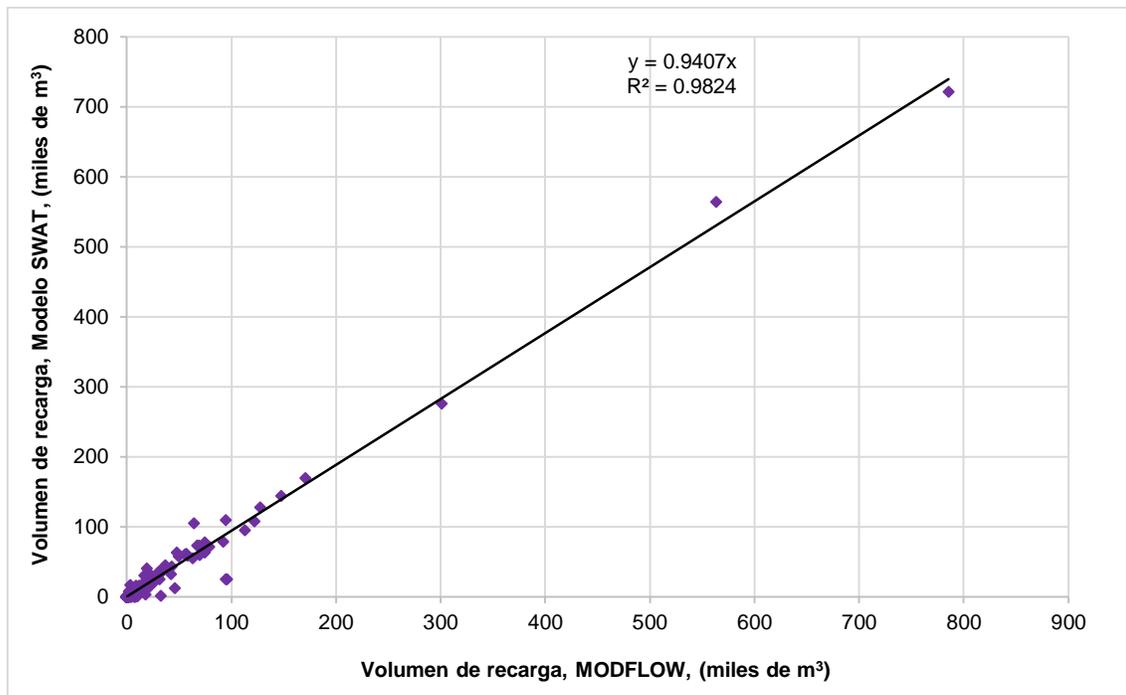


Figura 6.4 Comparación del volumen de recarga entre MODFLOW y el modelo SWAT.

6.5. LIMITACIONES, INCERTIDUMBRES DE PARÁMETRO, Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los resultados de la simulación de SWAT, indican que un suelo con una mayor capacidad de retención de agua, daría lugar a menos escurrimiento y a menos recarga. Entre los suelos principales en el la cuenca, el Leptosol tiene la capacidad más pequeña de retención de agua y por lo tanto la mayor recarga, llevando a cabo el resto de los factores iguales. El SWAT es absolutamente sensible a las características de almacenamiento de agua en el suelo, para el análisis de la recarga en un periodo anual, se requiere de datos climatológicos de cuando menos un año anterior, al periodo de interés, para la estabilización del modelo.

De las zonas agrícolas a las zonas de bosque, se disminuye el escurrimiento superficial y se incrementa la recarga de agua subterránea (Krishnaswamy *et al.*, 2013).

En el caso de la estimación de la recarga de agua subterránea resulta importante la definición de diferentes rangos de pendientes, ya que es parte fundamental para la creación de las múltiples HRU, lo que nos permite generar una diversidad de áreas de interacción del agua superficial y el agua subterránea.

Para Visual MODFLOW, resulta sensible a los valores piezométricos iniciales, valores grandes o elevados, propician valores negativos o de cero para el valor de recarga. De igual manera, la definición de manera precisa de las zonas de almacenamiento dentro del acuífero o los acuíferos de estudio, deben de representarse íntegramente, para la obtención de valores de recarga.

El tamaño de las celdas que definen la malla o el dominio del modelo deben de ser congruentes con los pixeles o tamaño de las celdas de entrada, debido a la compatibilidad de estos valores el modelo automáticamente realiza una discriminación o generaliza las variables de entrada, lo que conlleva a disminuir los resultados en los sitios o puntos de interés, esto principalmente repercute en las condiciones de frontera representadas en el modelo, condiciones similares reportados por (Yanxun *et al.*, 2011). Cabe mencionar que para el presente trabajo

de investigación, las fronteras definidas por los HRUs presentaban afectaciones por lo antes mencionado.

Los resultados obtenidos con cada uno de los tres modelos representan una estimación conservadora de la recarga natural. Los valores altos de recarga reportados con la metodología de la norma oficial, se deben a condiciones adicionales consideradas, como el retorno de riego agrícola, diferencias en las superficies de infiltración y evapotranspiración.

En este estudio las técnicas de SIG y el modelado numérico hidrogeológico son presentados como una aplicación computacional de utilidad en hidrogeología. También presenta una herramienta en la manipulación de datos georreferenciados para mejorar el manejo del agua subterránea. Así como la posibilidad del mapeo de la recarga de agua subterránea.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso combinado de las herramientas de Sistema de Información Geográfica hace posible la integración ágil y más confiable, de información espacial y temporal de todos los factores involucrados en la estimación de la recarga de acuíferos, haciendo posible además su inclusión y exposición en un plano de manera versátil.

El método de elementos finitos ofrece mayor flexibilidad en el ajuste del dominio de modelación, fronteras internas y la discretización espacial, que el método estándar de diferencias finitas; sin embargo, un simulador como MODFLOW, que está basado en una discretización por diferencias finitas, tiene consideradas muchas opciones que en la práctica son útiles y que le dan muchas posibilidades al usuario para modelar. La elección del simulador a ocupar debe hacerla el usuario en función del tamaño del modelo de la zona de interés.

En el modelo diseñado la malla que se ha ocupado ha sido homogénea. Se recomienda utilizar una discretización variable, con mayores refinamientos de la malla en zonas que lo requieran.

La mayor dificultad en la vinculación de un modelo de agua superficial con un modelo de agua subterránea, es derivada de las diferencias en escalas espaciales y temporales. Si los modelos presentan escalas espaciales diferentes, los valores de recarga de agua superficial pueden ser agrupadas o divididas en la discretización de

las celdas del modelo de agua subterránea, lo que puede impactar en la estimación de los volúmenes recargados a los acuíferos. Es importante considerar el mismo tamaño de malla utilizado en el modelo de agua superficial, para evitar ineficiencias en los modelados del agua superficial y agua subterránea.

8. LITERATURA CITADA

Balek, J., 1988. Groundwater recharge concepts. Estimation of Natural Groundwater Recharge. Boston, Ed. Reidel, NATO ASI Series, p. 3–9.

Carrera, H.J. J., Gaskin, S.J., 2006. The groundwater modeling tool for GRASS (GMTG): Open source groundwater flow modeling, Computers & Geosciences, Volume 32, Issue 3, Pages 339-351.

Cho, J., Mostaghimi, S., Kang, M.S. 2009. Development and application of a modeling approach for surface water and groundwater interaction. Department of Biological Systems Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24060, USA.

Custodio, E., 1997. Recarga a los acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, p. 19-39.

Delin, G.N., Risser, D.W., 2007. Ground-water recharge in humid areas of the United States – a summary of ground-water resources program studies, 2003–06. USGS Fact Sheet FS-2007-3007, 4 p.

Environmental Modeling Center/National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. 2010. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Monthly Products, January 1979 to December 2010. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.2/>. Accessed§ dd mmm yyyy.

Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G. 2005. SWAT Peer-Reviewed Literature: A Review. 3rd International SWAT Conferencie. Swiss Federal Institute for Environmental Sciencie and Tecnology.ETH, Switzerland.

Harbaugh, A.W. MODFLOW–2005. The U.S. Geological Survey Modular Ground–Water Model—the Ground–Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A16, 2005, variously p.

Izuka, S.K., Oki, D.S., Engott, J.A., 2010. Simple method for estimating groundwater recharge on tropical islands, Journal of Hydrology, Volume 387, Issues 1–2, Pages 81-89.

Krishnaswamy, J., Bonell, M., Venkatesh, B., Purandara, B.K., Rakesh, K.N., Lele, Sh., Kiran, M.C., Reddy, V., Badiger, Sh. 2013. The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use

and reforestation: Support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis”. *Journal of Hydrology*, Volume 498, Pages 191-209.

Lerner, D.N., 1990. Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. *Techniques*, Hannover, Ed. R. van Acken GmbH, p. 99-229.

Mair, A., Hagedorn, B., Tillery, S., El-Kadi, A. I., Westenbroek, S., Ha, K., Koh, G., 2013. Temporal and spatial variability of groundwater recharge on Jeju Island, Korea. *Journal of Hydrology*, Volume 501, Pages 213-226.

McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *US Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations Report Book 6*, Chapter A1, p. 528.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. y Williams, J.R. 2001a. Soil and Water Assessment Tools, Theoretical Documentation, version 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory of Agricultural Research Service and Blackland Research Center of Texas Agricultural Experiment Station. Texas, USA.

Pisinaras, V., Petalas, C., Gikas, G.D., Gemitzi, A., Tsihrintzis, V.A., 2010. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil

and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination*, Volume 250, Issue 1, Pages 274-286.

Rushton, K., 1988. Numerical and conceptual models for recharge estimation in arid and semi-arid zones. *Estimation of Natural Groundwater Recharge*. Ed. Reidel, Boston, NATO ASI Series, 1988. p. 223-237.

Samper, F.J., 1997. Evaluación de la recarga a partir de modelos numéricos de flujo en acuíferos. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, p. 153-182.

Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10, 18–39.

Simmers, I., 1990. Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. *Aridity. Groundwater recharge and water resources management*, Hannover, Ed. R. van Acken GmbH, 1990. p. 1-20.

Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. S.L. Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams Grassland, Soil and Water Research Laboratory – Agricultural Research Service Blackland Research Center – Texas AgriLife Research. September 2011. Texas Water Resources

Institute Technical Report No. 406 Texas A&M University System. College Station, Texas 77843-2118.

Sophocleous, M.S., Perkins, S.P., Stadnyk, N.G., Kaushal, R.S., 1997. Lower Republican Stream–Aquifer Project, Final Report, Kansas Geological Survey Open File Report 97-8, 1930 Constant Avenue, University of Kansas, Lawrence, KS 66047-3726.

Won, K.N., Moon, C.I., Seung W.Y., Arnold, J.G. 2008. Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. Korea Institute of Construction Technology, 2311 Daehwa-dong, Ilsan-gu, Goyang-si, Gyunggi-do 412-712, Republic of Korea. USDA-ARS, 808 East Blackland Road, Temple, TX 76502, United States.

Yanxun, S., Yuan, F., Hui, Q., Xuedi, Z. 2011. Research and Application of Groundwater Numerical Simulation-A Case Study in Balasu Water Source. Procedia Environmental Sciences, Volume 8, Pages 146-152.