

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL, UNIDAD OAXACA**



**Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de
Recursos Naturales (Ingeniería)**

**MODELO DE FLUJO DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA CUENCA ALTO
ATOYAC, OAXACA**

Tesis

Presentada para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

JENSEN MAURICIO BAUTISTA PERDOMO

DIRECTORES DE TESIS

DR. SALVADOR ISIDRO BELMONTE JIMÉNEZ

DR. GUILLERMO DE JESÚS HERNÁNDEZ GARCÍA

SANTA CRUZ XOXOCOTLÁN, OAXACA, MÉXICO, MAYO 2013

RESUMEN

En este estudio se obtuvo un modelo de flujo hidrodinámico del sistema acuífero de la Cuenca Alto Atoyac, Oaxaca; integrando los valles de Etna, Zaachila y Tlacolula, cuya extensión es de 1,575 km², a partir del análisis de las superficies piezométricas en diferentes tiempos. El acuífero es tipo libre, constituido por un medio granular de origen aluvial, ubicado en una estructura tectónica tipo graben, delimitado por las fallas de Oaxaca al este, y Huitzo al poniente; ambas de tipo normal. El análisis piezométrico indica que la dirección de flujo regional de la zona del valle de Etna es norte-sur, y el de Tlacolula este-oeste. Hacia el valle de Zaachila predomina la dirección norte-sur.

Para el modelado computacional se utilizó el software Visual MODFLOW 4.2 que reprodujo en condiciones transitorias la actividad del bombeo a partir del año 1984 hasta el 2009, calibrando con un nRMS de 6.6% considerando como estado inicial 1984. Para los escenarios de simulación se consideró el 2009 como condición inicial, previamente calibrado, obteniendo para este año un nRMS de 8.4%.

Se simularon cinco escenarios para el período 2009-2034: Statu Quo, inercial, efecto del cambio climático, condiciones de equilibrio y reducción de volumen; presentando los tres primeros abatimientos de niveles, y los dos últimos recuperación. El efecto de cambio climático fue el que presentó los mayores abatimientos de los niveles piezométricos, siendo las áreas del valle de Zaachila con 55-60 m, seguida por el valle de Etna con 30 m, y valle de Tlacolula con 10 m. Los escenarios reducción del volumen de extracción y condiciones de equilibrio presentan condiciones favorables de recuperación piezométrica en la región.

El modelo reproduce razonablemente las condiciones naturales del sistema acuífero, por lo que es posible utilizarlo como una alternativa en el manejo del recurso hídrico en esta región.

Palabras claves: Acuífero, modelado computacional, calibración, simulación de escenarios, Oaxaca, Modflow.

ABSTRACT

In this study we obtained a hydrodynamic flow model from the analysis of the pressure surfaces at different times of the aquifer system high Atoyac basin, Oaxaca, integrated by the valleys of Etlá, Tlacolula Zaachila, with a length of 1.575 km². The aquifer is a free type, consisting of a granular medium alluvial, located in a tectonic graben type, defined by the failures of Oaxaca to the east and Huizto to the west, both normal type. Piezometric analysis indicates that the regional flow direction of the Etlá Valley area is north-south, Tlacolula area is east-west and the valley of Zaachila predominant north-south direction.

For computational modeling was used the software of Visual MODFLOW 4.2 that reproduced, in transient conditions, pumping activity from 1984 to 2009, calibrated with 6.6% NRMS and considering as initial state 1984. For the simulation scenarios it was considered the year 2009 as an initial condition previously calibrated with a 8.4% NRMS.

Five scenarios were simulated for the period 2009-2034: Status Quo, inertial, effect of climate change, equilibrium conditions and volume reduction, presenting the first three levels discouragements, and the last two recovery. The effect of climate change is the one with the largest drawdowns of groundwater levels, being the Zaachila Valley areas with 55-60 m, followed by the Etlá Valley with 30 m, and Tlacolula Valley with 10 m. The scenarios reduction of volume extraction and equilibrium conditions show favorable conditions of piezometric recovery in the region.

The model reproduces natural conditions of the aquifer system, so it can be used as an alternative in the management of water resources in this region.

Keywords: Aquifer, computational modeling, calibration, simulation scenarios, Oaxaca, Modflow.

Dedicatoria

A Dios por todas las bendiciones y su infinito amor a mi vida.

A mi madre Martha Susana Perdomo por ser un ejemplo de vida y mi mayor inspiración que me ha guiado por el buen camino, gracias por todo el amor y cariño.

A mi hermana Mariela por ser la bebe que más quiero en el mundo.

A la dulce memoria de mi Tota, quien sería muy feliz de ver mi superación profesional.

A mi familia por todo el apoyo y amor demostrado.

A mis buenos amigos que no hace falta nombrarlos ellos ya lo saben y se dan por aludidos, porque siempre me apoyaron y que de alguna manera contribuyen a mi formación con su consejo, su experiencia y que siempre me han demostrado su cariño.

Cuando llegue de Honduras con el propósito de hacer la maestría pensé que sería un trabajo solitario, ahora que estoy finalizando mi tesis me doy cuenta que no fue así, no me imagine que conocería tantos y muy buenos amigos y que influyeran tanto en mí de manera positiva, mi profunda gratitud para los que siempre tuvieron su mano abierta para estrecharla.

Agradecimientos

*Al **Instituto Politécnico Nacional** por darme la oportunidad de conocer un nuevo mundo y vivir la experiencia de tener una formación de calidad, más allá de las fronteras de mi país.*

*Al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR)**, Unidad Oaxaca por recibirme en su seno y compartir su calidad académica a través de sus miembros.*

*Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por la beca otorgada en mis estudio de posgrado.*

*Al **Programa Institucional de Formación de Investigadores** por la beca otorgada.*

*A los miembros de la comisión revisora y jurado de tesis: **M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres, Dr. Pastor Teodoro Matadamas Ortiz, Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano, Dr. Francisco Castellanos León**, por sus recomendaciones para la realización y mejoramiento de mi tesis.*

*Al **Instituto de Geofísica** de la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)** por haberme dado la oportunidad de poder compartir un año en sus aulas y todo el apoyo otorgado y un agradecimiento muy especial a los Doctores **Oscar Escolero** y **Eric Morales Casique** del **Instituto de Geología** de la UNAM que siempre estuvieron presentes para poder compartir su conocimiento, ayudarme con mi dudas y darme sugerencias para la realización de mi tesis.*

*A mis maestros y tutores **Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez** y **Dr. Guillermo de Jesús Hernández García**, con gran respeto y mi mayor admiración por haberme dado la confianza y tenerme fe y sobretodo la paciencia para la culminación de mi tesis, por su incondicional apoyo, orientación, asesoría y sobre todo por su amistad que siempre fue muy especial.*

Jensen Mauricio Bautista Perdomo

***Es difícil comprender algo cuando no es posible verlo.
En el caso de las aguas subterráneas, su invisibilidad
ha sido unánimemente considerada como la
causa fundamental del desconocimiento que de ellas
existe por buena parte de los ciudadanos en general,
y, en ocasiones, también explica la escasa atención y
deficitaria gestión por parte de las administraciones
públicas y otros gestores y usuarios del agua
(Llamas, 2000)***

Contenido

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.1 Introducción	9
1.2. Planteamiento del problema	10
1.3. Justificación.	12
1.4. Antecedentes	13
1.5. Objetivo	19
General.....	19
Particulares	19
1.6. Hipótesis	19
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	20
2.1. Introducción	20
2.2. Ciclo hidrológico.....	20
2.3. Acuífero	20
2.3.1. Acuífero libre o freático.	21
2.3.2. Acuífero cautivo o confinado.....	21
2.3.3. Superficie piezométrica o carga hidráulica	21
2.2.1. Fases del ciclo hidrológico	22
2.2.1.1. Evaporación	22
2.2.1.2. Precipitación	23
2.2.1.3. Escorrentía superficial	23
2.2.1.4. Infiltración	23
2.2.1.5. Evapotranspiración	23
2.2.1.6. Balance hídrico (ecuación de continuidad)	24
2.4. Parámetros hidrogeológicos	25
2.4.1. Conductividad hidráulica.....	26
2.4.2. Transmisividad.....	26
2.4.3. Capacidad o almacenamiento específico.....	26
2.4.4. Coeficiente de almacenamiento	27

2.5. Ley de Darcy.....	27
2.6. Modelado matemático.....	29
2.6.1. Modelo matemático en MODFLOW (Ecuación de flujo).....	30
2.6.2. Discretización espacial y temporal en MODFLOW.....	32
2.6.3. Ecuaciones por diferencias finitas.....	33
2.6.4. Iteración MODFLOW.....	40
2.6.5. Condiciones iniciales y de frontera para la solución de la ecuación de flujo.....	42
2.6.5.1. Condiciones iniciales.....	42
2.6.5.2. Condiciones de Frontera.....	43
2.6.5.3. Condición de frontera tipo Dirichlet.....	43
2.6.5.4 Condición de frontera tipo Neumann.....	43
2.6.5.5. Condición de frontera tipo Cauchy.....	44
CAPÍTULO 3. MARCO HIDROGEOLOGICO.....	¡Error! Marcador no definido.
3.1. Introducción y descripción del área de estudio.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2. Zona de veda.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.1. Decretos de Veda.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.2. Decretos de reserva o reglamento.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3. Hidrografía.....	¡Error! Marcador no definido.
3.4. Clima.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5. Geología de Valles Centrales.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.1. Provincias Geológicas.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.1.1. Provincia geológica Zapoteca o terreno Oaxaca	¡Error! Marcador no definido.
3.5.1.2. Provincia geológica Cuicateca o terreno Juárez	¡Error! Marcador no definido.
3.5.2. Falla de Oaxaca.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.3. Unidades Estratigráficas.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.3.1. Rocas Metamórficas (Pe) ó Complejo Oaxaqueño .	¡Error! Marcador no definido.
3.5.3.2. Grupo Sabinal (Jss).....	¡Error! Marcador no definido.

3.5.3.3. Grupo Puebla (Ki).....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.3.4. Caliza Teposcolula (Km).....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.3.5. Rocas volcánicas del Terciario (Tige) ¡Error!	Marcador no definido.
3.5.3.6. Suchilquitongo (Tlm).....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.3.7. Aluvión (Qal).....	¡Error! Marcador no definido.
3.6. Geomorfología	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 4. METODOLOGIA.....	¡Error! Marcador no definido.
4.1. Modelo de flujo de aguas subterránea	¡Error! Marcador no definido.
4.1.1. Aplicaciones de los modelos.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2. Modelo Conceptual	¡Error! Marcador no definido.
4.3. Área a modelar del sistema acuífero de los Valles Centrales de Oaxaca	¡Error! Marcador no definido.
4.4. Tipo de acuífero	¡Error! Marcador no definido.
4.5. Delimitación del modelo (celdas activas e inactivas).....	¡Error! Marcador no definido.
4.6. Capas del modelo de flujo.....	¡Error! Marcador no definido.
4.7. Balance hidrogeológico.....	¡Error! Marcador no definido.
4.8. Aspectos hidrogeológicos a modelar.....	¡Error! Marcador no definido.
4.8.1. Ríos	¡Error! Marcador no definido.
4.8.2. Estimación de la Recarga	¡Error! Marcador no definido.
4.8.3. Condiciones de frontera	¡Error! Marcador no definido.
4.8.4. Pozos de extracción	¡Error! Marcador no definido.
4.8.5. Precipitación y Evapotranspiración	¡Error! Marcador no definido.
4.8.6. Conductividad hidráulica.....	¡Error! Marcador no definido.
4.8.7. Carga hidráulica o piezometría	¡Error! Marcador no definido.
4.9. Implementación del modelo de flujo del sistema acuífero Alto Atoyac, Oaxaca	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	¡Error! Marcador no definido.
5.1. Modelo en régimen transitorio.....	¡Error! Marcador no definido.
5.2. Calibración.....	¡Error! Marcador no definido.
5.3. Simulación de escenarios	¡Error! Marcador no definido.
5.3.1. Escenario 1. Statu Quo.....	¡Error! Marcador no definido.

5.3.2. Escenario 2. Condiciones de equilibrio	¡Error! Marcador no definido.
5.3.3. Escenario 3. Inercial	¡Error! Marcador no definido.
5.3.4. Escenario 4. Reducción de volumen.....	¡Error! Marcador no definido.
5.3.5. Escenario 5. Efecto Cambio Climático	¡Error! Marcador no definido.
5.3.6. Análisis de escenarios	¡Error! Marcador no definido.
5.4. Análisis de sensibilidad	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 6. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS ..	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 8. ANEXO.....	¡Error! Marcador no definido.

Índice de Figuras

Figura 1. Ciclo hidrológico. El sol y la gravedad de la tierra son importantes en el movimiento de las masas de agua.	24
Figura 2. Experimento de Darcy.(modificado Freeze, R. A. y Cherry, J. A., 1979).	27
Figura 3. Discretización hipotética de un sistema acuífero (Modificada de McDonald and Harbaugh 1988).	32
Figura 4. Sistema de bloque centrado.....	33
Figura 5. Índice para las seis celdas adyacentes alrededor de la celda i, j, k . (Modificado de McDonal and Harbaugh, 1988).	34
Figura 6. Flujo en la celda i, j, k , a partir de la celda $i, j - 1, k$. (Modificado de McDonald and Harbaugh, 1988).	36
Figura 7. Localización Valles Centrales de Oaxaca, dentro de la línea azul se encuentra ubicado el SACAAO.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 8. Zonas de veda para la extracción de agua subterránea por región hidrológico-administrativa 2011 (mapa tomado de CONAGUA, 2011).	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9. Regiones y cuencas hidrogeológicas de estado de Oaxaca, México (mapa tomado de INEGI, 2010).	¡Error! Marcador no definido.
Figura 10. Climas según clasificación de Köppen para el estado de Oaxaca, México, predominando para Valles Centrales un clima semiárido (Mapa tomado INEGI, 2010).	¡Error! Marcador no definido.
Figura 11. Mapa Geológico que comprende la cuenca alto Atoyac, donde predominan los rellenos aluviales (Mapa tomado del servicio geológico Mexicano y modificado por la Comisión Nacional del Agua).	¡Error! Marcador no definido.
Figura 12. Terrenos estratigráficos de México suroriental, (tomado de Hernández, et al., 2009, modificado por Ortega, et al., 1999).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 13. Columna estratigráfica esquemática de la región Valles Centrales de Oaxaca, límite de los terrenos Zapoteco y Cuicatéco.....	¡Error! Marcador no definido.

Figura 14. Ubicación de las secciones geológicas, Valles Centrales de Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 15. Secciones Geológicas para el Valle de Etla (E_1-E_1' , E_2-E_2' y E_3-E_3'), Valles Centrales de Oaxaca.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16. Secciones Geológicas para el Valle de Tlacolula (T_1-T_1' , T_2-T_2' y T_3-T_3'), Valles Centrales de Oaxaca.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 17. Secciones Geológicas para el Valle de Zaachila (Z_1-Z_1' , Z_2-Z_2' , Z_3-Z_3' y Z_4-Z_4'), Valles Centrales de Oaxaca.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18. Delimitación del Sistema acuífero Valles Centrales de Oaxaca.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19. Área de celdas activas e inactivas, Valles Centrales de Oaxaca. ...	¡Error! Marcador no definido.
Figura 20. Sistema tridimensional de dos capas geológicas Qal (Aluvión) y basamento que integran el sistema acuífero de Valles Centrales Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 21. Distribución de recarga (mm/año) en los Valles Centrales de Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 22. Localización de 319 pozos de bombeo, con una extracción de 149.69 Mm^3 /año.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 23. Distribución mensual promedio de precipitación y evapotranspiración de los años 1981-2010, con base en veinte estaciones climatológicas ubicadas en los Valles Centrales de Oaxaca.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 24. Modelo de ajuste para acuífero libre en pozo de observación, metodo de solución Neuman, 1974.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 25. Modelo de ajuste para acuífero libre en pozo de observación y de bombeo, metodo de solución Tartakovsky-Neuman, 2007.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 26. Correlación lineal entre T y Q_e con base en 15 pruebas de bombeo.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 27. Semivariograma experimental de K (mostrando el número de pares) y modelo teórico ajustado.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 28. Mapa de conductividad hidráulica de los Valles Centrales de Oaxaca (m/día).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 29. Calibración final y balance hidrológico en régimen transitorio, para el año 2009. Visual MODFLOW.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 30. Modelo de flujo, piezometría para el año 1985.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 31. Modelo de flujo, piezometría para el año 2009.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 32. Relación y calibración entre la carga hidráulica observada y la calculada para el año 1985.	¡Error! Marcador no definido.

Figura 33. Relación y calibración entre la carga hidráulica observada y la calculada para el año 2009.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 34. Elevaciones de niveles piezométricos para el año 2034. Escenario 1- Statu Quo.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 35. Elevaciones de niveles piezométricos para el año 2034. Escenario 2- Condiciones de equilibrio.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 36. Elevaciones de niveles piezométricos para el año 2034. Escenario 3- Inercial.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 37. Elevaciones de niveles piezométricos para el año 2034. Escenario 4- Reducción de volumen.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 38. Elevaciones de niveles piezométricos para el año 2034. Escenario 5- Efecto cambio climático.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 39. Ubicación de secciones y poblados principales de los Valles Centrales de Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 40. Sección A-A' Comparación de niveles piezométricos, para cada caso de estudio. Valle de Etlá, Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 41. Sección B-B' Comparación de niveles piezométricos, para cada caso de estudio. Valle de Zaachila, Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 42. Sección C-C' Comparación de niveles piezométricos, para cada caso de estudio. Valle de Tlacolula, Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 43. Sección A-A' Comparación abatimiento y recuperación, para cada caso de estudio. Valle de Etlá, Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 44. Sección B-B' Comparación abatimiento y recuperación, para cada caso de estudio. Valle de Zaachila, Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 45. Sección C-C' Comparación abatimiento y recuperación, para cada caso de estudio. Valle de Tlacolula, Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 46. Análisis de sensibilidad para carga hidráulicas calibradas para el año 2009, parámetros a comparar R_v (recarga vertical) K (conductividad hidráulica y S_y (coeficiente de almacenamiento).	¡Error! Marcador no definido.
Figura 47. Interfaz de visual MODFLOW 4.2 para la de entrada de información de pozos de extracción.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 48. Distribucion y ubicación de 15 pozos con pruebas de bombeo usadas en el calculo de T, para el año 2004, Valles Centrales de Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 49. Distribución y ubicación de 49 pozos con datos de caudal, niveles estáticos y dinámicos, usados para la determinación de Q_e para el año 2004, Valles Centrales de Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.

Índice de tablas

Tabla 1. Balance de agua subterránea para el acuífero de Valles Centrales de Oaxaca.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2. Reinterpretación de pruebas de bombeo....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3. Valores estimados de K para Valles Centrales de Oaxaca.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4. Balance de agua subterránea en Condiciones de equilibrio.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5. Población de Valles Centrales estimada 2010-2034..	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 6. Extracción de agua para consumo humano proyectada 2034.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7. Balance de aguas subterránea para el escenario 4...	¡Error! Marcador no definido.

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

El aumento de la población incrementa la demanda de los recursos hídricos, en consecuencia “la escasez de agua dulce y su contaminación ocupan respectivamente el segundo y tercer lugar del problema ambiental mundial” (PNUMA, 1999).

En la Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible (Conferencia Internacional sobre el agua y el medio ambiente, CIAMA, 1992) se señaló que la escasez y el alto consumo del agua dulce ponen en peligro el desarrollo sostenible, la seguridad alimentaria, el desarrollo industrial, la salud y el bienestar humano.

En la actualidad el estudio del agua subterránea ha tomado gran relevancia, ya que es un recurso vital que coadyuva a mejorar la calidad de vida de la población y es fundamental para el desarrollo de cualquier población, sin embargo las fuentes superficiales como ríos y lagos, así como los acuíferos están siendo contaminados y sobreexplotados con el alto riesgo de convertirse en recursos no renovables y no aptos para uso humano.

La ciudad de Oaxaca de Juárez y municipios conurbados que están ubicados en la cuenca Alto Atoyac, no escapan a esta problemática. La demanda para uso público urbano, agrícola, pecuario e industrial es de 193.1 Mm³ por año, de la cual, el 63% (121.8Mm³) se extraen del acuífero y el resto (71.3 Mm³) corresponde a aprovechamientos de aguas superficiales (Comité Técnico de Aguas Subterráneas COTAS, 2013) provocando una sobreexplotación del recurso lo que ha venido a reducir su cantidad y ha favorecido el deterioro de su calidad debido a la presencia de fuentes de contaminación como las aguas residuales que son vertidas en los cauces de los ríos Atoyac y Salado.

Es decir, se extrae agua del acuífero pero poco o nada se hace para recargarlo y en general abordar acciones que permitan conservarlo y aprovecharlo de manera racional. Para poder administrar el vital líquido se requiere conocer sobre su hidrodinámica y una manera de hacerlo es a través de la modelación matemática computacional.

En este trabajo se determinó el modelo del flujo del agua subterránea, realizando un modelado computacional del sistema acuífero de la cuenca Alto Atoyac (SACAAO), usando el método de diferencias finitas para la discretización. Se usó el programa de modelación Visual MODFLOW 4.2 para el manejo y el procesado de datos para entender y comprender la hidrodinámica del sistema acuífero y estimar su respuesta ante diferentes escenarios de operación como extracciones, recargas, incremento de población y cambio climático.

Los modelos de flujo a nivel mundial constituyen una herramienta muy valiosa y útil para la gestión y administración del recurso agua, en particular será una herramienta de gran importancia en la gestión y administración del recurso hídrico en la región de los Valles Centrales de Oaxaca, ya que la extracción de agua subterránea y las pocas acciones de recarga para revertir este proceso son la principal causa del agotamiento de la misma.

1.2. Planteamiento del problema

El sistema acuífero Alto Atoyac, Oaxaca (SACAAO); es la principal fuente de abastecimiento a la ciudad de Oaxaca de Juárez y municipios conurbados que se encuentran ubicados en esta subcuenca. La extracción del agua del acuífero es a través de pozos “profundos”, generalmente de menos de 80 m de profundidad, la mayoría de estos están ubicados sobre las márgenes de los ríos Atoyac y Salado, estando muchos de ellos contaminados debido a la presencia de aguas residuales vertidas en los ríos antes mencionados. Es decir, la cantidad y calidad del agua que abastece a los habitantes de esta subcuenca también denominada desde el

punto de vista geográfico Valles Centrales de Oaxaca, se está deteriorando alarmantemente. Ante esta problemática, el Gobierno del Estado de Oaxaca ha iniciado el proyecto “presa Paso Ancho”, que se ubica 100 kilómetros al sur de la ciudad de Oaxaca, entre los municipios de San Vicente Coatlán, Villa Sola de Vega y Yogana, para abastecer de agua a más de 500 mil habitantes de esta ciudad y los 22 municipios conurbados durante los próximos 40 años. Esta presa tendrá una capacidad para 60 millones de metros cúbicos de agua y será abastecida por un acueducto de 104 kilómetros de longitud (<http://www.noticiasnet.mx/portal/oaxaca/general/infraestructura/128885-inician-obras-presa-paso-ancho>).

Sin embargo, en la subcuenca Alto Atoyac (Valles Centrales de Oaxaca) es posible rescatar el sistema acuífero proponiendo diversas acciones como recarga artificial con agua de lluvia, evitar el cambio de uso de suelo, y administrar racionalmente el recurso hídrico entre otras; y la tecnología que permite dar respuesta a estas propuestas es la modelación computacional, ya que permite manejar eficazmente situaciones complejas y tratar al sistema acuífero de manera integral.

En este marco, y para optimizar el aprovechamiento de las aguas subterráneas que se encuentran en el SACAAO, se requiere conocer la dirección preferencial del flujo subterráneo, variaciones de los niveles piezométricos, propiedades hidrogeológicas, geométricas, y de un estado inicial de la piezometría. Al sistema se le aplicará una serie de acciones, de las que se quiere conocer su reacción, y se obtiene como resultado los escenarios que alcanzaría el sistema acuífero en periodos distintos de tiempo.

Por lo anterior, es importante la creación del modelo de flujo ya que son modelos típicos, basado en la física, que permite simular y analizar las reglas funcionales de las aguas subterráneas y superficiales en condiciones complejas, aunque se precisa del apoyo de datos y parámetros de acuerdo a la realidad. Estos modelos

son instrumentos eficaces para abordar problemas ambientales y de disponibilidad y manejo del recurso hídrico (Shi, et al, 2012; Ranganathan y Palanisami, 2004).

1.3. Justificación.

El conocimiento del ciclo hídrico es la base de la ciencia del agua y de su desarrollo tecnológico, el agua cumple muchas funciones en materia de medio ambiente, ecología, economía, sociedad y cultura, etc. Se necesita entender y conocer el ciclo hídrico para utilizarlo de una manera científica y racional, ya que cuando se administran de un manera científica y planeada es de beneficio para promover la sostenibilidad del recurso hídrico (Liu, et al., 2012), los modelos permite manejar eficazmente situaciones complejas, permite la evaluación de enfoques alternativos para el desarrollo y la gestión del agua subterránea y tratar al sistema acuífero de una manera integral (Ayenew, et al., 2008).

En la actualidad el tema del agua subterránea es prioritario de tal manera que se considera en México como de seguridad nacional. El problema se está agravando con el aumento de la demografía, la deforestación y el crecimiento acelerado de las ciudades, el aumento de las necesidades de agua en la agricultura, la industria y los hogares; esto está propiciando que se incremente la escasez del agua a nivel mundial. En los campos, científico, técnico, socioeconómico, administrativo y legal, ya se está produciendo una clara toma de conciencia de su importancia, ya que el agua es un recurso natural no renovable.

El volumen del agua subterránea es mucho más importante que la masa de agua retenida en lagos o ríos, ya que de 100% del agua total del planeta solo un 3% es agua dulce y este pequeño porcentaje se encuentra subdividido en las capas de hielo y glaciares (68.7%), en el agua subterránea (30.1%) y el otro 0.9% es el agua superficial, y es por esta razón, que la necesidad de la gestión científica del agua subterránea y la conservación a nivel de cuenca ha ganado tanta importancia (USGS, 2011).

Con la creación del modelo del SACAAO, será posible proponer alternativas para la administración racional del recurso agua debido a que se podrá observar el comportamiento del acuífero de manera sistémica y no como un elemento aislado y las repercusiones que traería la explotación intensiva del agua subterránea lo que se reflejaría en los niveles de la piezometría.

La piezometría utilizada en el modelado permitirá gestionar los puntos de perforación más adecuados para la extracción del agua subterránea y conocer las propiedades geohidrológicas que rigen el SACAAO, así como la relación entre ellas permitiendo la conservación y aprovechamiento del recurso. Se podrá estimar las zonas susceptibles a la explotación y sobreexplotación, así como zonas con alto riesgo a la contaminación.

Las ciudades que se encuentran sobre el SACAAO tienen una orientación económica principalmente a la industria del turismo, es de suma importancia abastecer agua en calidad y cantidad adecuada para satisfacer la demanda que genera esta industria, y que depende en gran medida de este recurso subterráneo.

1.4. Antecedentes

A nivel mundial la problemática en materia de agua es abordada bajo distintos enfoques, pudiendo ser investigación, científica, tecnológica, social, entre otras.

Prickett y Lonquist (1971), en los años del 60 y 70 realizaron simulaciones electrónicas, se realizaba una maqueta del acuífero en la que unas resistencias y condensadores simulaban respectivamente las distintas permeabilidades y coeficientes de almacenamiento. El flujo eléctrico hacia el papel del agua y el potencial eléctrico equivalía al potencial hidráulico. La solución era muy laboriosa y bastante limitada.

El Idrysy, et al. (2006), realizaron en la planicie de Trifa, un modelo hidrogeológico con los software MODFLOW y WetSpas, estableciendo las cantidades que se necesitan para satisfacer las necesidades de riego y con esto predecir la sostenibilidad de los recursos de agua subterránea en la planicie de Trifa y evaluar las posibles acciones de gestión.

En el modelo transitorio indica que el tiempo de respuesta del acuífero es aproximadamente de un año hidrológico, lo cual permite el desarrollo de estrategias de gestión dentro del horizonte de tiempo.

Calderón, et al. (2007), realizaron modelos numéricos en régimen permanente y transitorio, para conocer el sistema de flujo de aguas subterráneas, utilizando el software MODFLOW Visual.

Los resultados del modelo indican que el bombeo induce un descenso en el flujo base, agotando la descarga del río. En este proceso llega a ser crítico durante periodos secos cuando el riego aumenta.

Knowles, et al. (2007), trabajaron en la calibración del modelo de flujo de agua subterránea en la subregión del acuífero Port Willanga, en Australia; utilizaron una técnica de modelación inversa, basada en minimización funcional.

Con este método propuesto generaron las estimaciones de transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento y recarga en toda la subregión.

Usando niveles piezométricos se estiman los parámetros de transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento y recarga, usando la técnica propuesta para la inversión de datos, esta técnica propuesta consiste en convertir la ecuación de flujo de agua subterránea inestable (ecuación tipo cilindro) en un problema tipo elíptico y reducir al mínimo la resultante funcional, y los resultados demuestran una buena relación entre la medición y el modelo.

Barazzuoli, et al. (2008), hicieron un modelado en 3D del acuífero sur en Tuscany, Italia, trabajando con el método de elemento finito para la discretización, utilizando el software Feflow. El modelado permitió establecer que la intrusión del agua de

mar se realizó durante la temporada de riego, que se produce en el sector de la Osa Albegna, así como a lo largo del río en que se alimenta el acuífero. Para esto se evaluaron los efectos en términos de balance de agua y la evolución de la carga hidráulica.

Xiu-yuan, et al. (2009), plantea una nueva metodología, para realizar un modelo numérico requiere mucha información de entrada, pero es posible modelar sin que se conozcan algunos parámetros como las condiciones de frontera porque a veces los cambios dependen de pocos parámetros. En este caso se requirió conductividad hidráulica en el acuífero y las superficies piezométricas. Los resultados sugieren que la metodología propuesta puede proporcionar una correcta representación del sistema hidrogeológico a gran escala.

Rojas, et al. (2008), realizó un estudio en el acuífero de la Pampa de Tamarugal, una fuente importante de agua en el norte de Chile. Desarrollan un modelo para el periodo 1983-2004, con cinco diferentes escenarios de operaciones para evaluar la respuesta a diferentes situaciones de bombeo. Los resultados indican que con las tasas de descarga actuales las presiones de agua subterránea continuarán en descenso.

Gaur, et al. (2011), realizaron en la subcuenca del Río Banganga, India, un estudio haciendo uso de modelos numéricos y un SIG, para modelar el flujo del agua subterránea utilizando el MODFLOW. Se elaboraron distintos tipos de mapas temáticos tales como: geológicos, geomorfológicos, de suelos, drenaje, factor de pendiente y usos de suelo para identificar las zonas que pudieran contener agua subterránea. Los mapas elaborados se superpusieron sobre la zona de estudio para validar los resultados del modelado, y con evidencia de pozos perforados se validaron los resultados.

Wu, et al. (2011), propusieron un modelo de agua subterránea en 3D, para la zona de Wadi Kafrein, Jordania. La idea básica de este trabajo fue desarrollar y aplicar una metodología con el fin de hacer frente a una situación típica cuando se trabaja

con agua subterránea; que es la escasez de datos, con información de calidad de pozos y datos de lluvia, pudieron crear un modelo en 3D. El método propuesto les permitió trabajar en una rejilla de elementos finitos utilizando pocos datos logrando una precisión aceptable.

Baalousha, (2012), estudió la interacción entre el río y el acuífero de la cuenca Ruataniwha, Nueva Zelanda, el modelo cubre el periodo 1990-2010, encontrando que la pérdida de almacenamiento de agua en los últimos 20 años es de más de 66 millones de m³, esta cantidad es baja comparándola con el balance hídrico, sin embargo esta cantidad para la extracción es muy importante.

Alwathaf y El Mansouri (2012) en la cuenca de Sana'a, ubicada en Yemen, con el uso del software FEFLOW realizaron un modelo de flujo para aguas subterráneas, bajo condiciones transitorias para el periodo de 1972-2006, .y presentando tres escenarios para el periodo 2006-2020, el primero representando el estado del 2006 sin introducir ninguna medida de manejo, el segundo basado en un máximo consumo doméstico, agrícola e industrial del recurso agua, y el tercero simula un incremento en la recarga y se maximiza la sustentabilidad.

Lachaal, et al. (2012), propone el acoplamiento de MODFLOW 2000 y herramientas SIG en el acuífero Zéramdine-Béni Hassen Miocene, implementó un modelo de aguas subterráneas en 3-D para el sistema de flujo, el modelo fue calibrado para los años 1980-2007, y en los resultados se muestra que la mayor sensibilidad a los cambios están en los parámetros de infiltración y conductividad hidráulica, y propone un plan de rescate para la gestión del acuífero en regiones áridas y semiáridas.

Nguyen, et al. (2013), en el sistema de flujo de aguas subterráneas de la isla Tay en el suroeste de Vietnam, se realizó un modelo en 3-D usando MODFLOW. Con los resultados de la simulación se muestra que el sistema de flujo es afectado por los cambios estacionales en los niveles de agua del río Mekong, también que en

temporada seca uno de los principales factores es el de bombeo con una tasa de 83,600 m³ por día.

A continuación se mencionan algunas investigaciones realizadas en el acuífero de Valles Centrales de Oaxaca:

Tacsa, 1984 (Técnicos Asesores y Constructores, S.A.), realizó estudios geohidrológicos preliminares de los valles de Etlá, Tlacolula y Zimatlán, con el objetivo de conocer y delimitar las condiciones geohidrológicas de cada valle, determinar el régimen de explotación y cuantificar la disponibilidad del agua subterránea.

Asignaron la unidad hidrogeológica aluvión como la más importante para fines de explotación, manifestando hacia la porción central del Valle de Zimatlán una profundidad de 10 a 100 m, adelgazándose hacia los bordes estimando un espesor saturado de 15 a 100 m.

Flores, et al. (2001), realizaron una investigación enfocada a la caracterización geofísica del acuífero del Valle de Etlá, estimando la geometría de la cuenca, mediante modelos de 2.5 D, obtenidos a partir de datos de gravimetría. Estos estudios indican que el Valle de Etlá es un graben de gran pendiente acotado por las fallas de Etlá y Oaxaca. Por otra parte las mediciones electromagnéticas mostraron que la zona vadosa tiene un grosor de 20 m hacia el centro del valle, y el grosor sedimentario de 73.0 m.

Belmonte, et al. (2003) realizaron un estudio que permitió determinar la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea de la porción central del acuífero del Valle de Etlá, Oaxaca, México, mediante 30 sondeos eléctricos verticales de corriente directa y 216 de inducción electromagnética (bobinas EM-34), usando el método SINTACS. Los resultados obtenidos indican que el acuífero del Valle de Etlá, es sensible a las cargas contaminantes potenciales, por lo que se considera

como un acuífero altamente vulnerable a ser contaminado por fuentes superficiales.

Belmonte, et al. (2005), estudiaron el acuífero del Valle de Zaachila indicando que es vulnerable a la contaminación superficial y que el parámetro más sensible es la profundidad del nivel freático, debido a que en algunas partes, estos niveles son someros, seguido en importancia por la topografía, tipo de suelo, impacto en la zona vadosa, litología del acuífero, recarga neta y conductividad hidráulica. La vulnerabilidad fue evaluada por algunos métodos, tales como: AVI, GOD y DRASTIC.

Flores, et al. (2008), diseñaron un modelo geohidrológico evolutivo 3D a corto plazo para los años 2001, 2005 y 2015, de acuífero somero del Valle de Etlá, Oaxaca, basado en los parámetros disponibles de geología, geofísica, geoquímica e hidrogeología. Las simulaciones numéricas obtenidas indicaron, que si el actual régimen de extracción se mantenía, el abatimiento de la piezometría podría ser mayor en la parte SE del área de estudio. Por otra parte la contaminación por fertilizantes y por las fugas de drenaje es favorecida por la dirección del flujo imperante en el acuífero (vaciándose en el río Atoyac). De acuerdo a las simulaciones numéricas, existe una posibilidad de remediación de este proceso, reubicando los pozos situados en la ciudad de Oaxaca en las zonas de recarga.

De la Rosa (2010), realizó un diseño de una red óptima de monitoreo piezométrica para el sistema acuífero de Valles Centrales de Oaxaca, Considerando una base de datos de 332 pozos, se creó una red de monitoreo del acuífero, constituida por 112 pozos.

1.5. Objetivo

General

Obtener un modelo de flujo del sistema acuífero de la cuenca “Alto Atoyac Oaxaca”, para conocer su hidrodinámica y proponer alternativas de un manejo racional del recurso agua.

Particulares

- ✓ Determinar propiedades hidrogeológicas (transmisividad, porosidad, conductividad hidráulica, piezometría) del sistema acuífero de la cuenca Alto Atoyac, Oaxaca.
- ✓ Determinar propiedades geométricas del acuífero a partir de métodos indirectos (geofísica), para alimentar al modelo computacional.
- ✓ Obtener la calibración del modelo de flujo del SACAAO.
- ✓ Implementación del modelo computacional, y determinar las áreas más propensas a la explotación.
- ✓ Determinar modelos de flujo del SACAAO ante diferentes escenarios de operación, para establecer la relación entre la extracción subterránea y los niveles piezométricos.

1.6. Hipótesis

Si las variaciones de almacenamiento y disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca Alto Atoyac, Oaxaca han ido disminuyendo debido a la falta de estrategias de un manejo racional del acuífero, entonces el modelado matemático permitirá conocer la hidrodinámica del flujo subterráneo ante diferentes escenarios de operación, con lo que se propondrán alternativas de aprovechamiento sustentable.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. Introducción

La ciencia encargada del estudio del agua subterránea es la hidrogeología, siendo esta un campo interdisciplinario, la UNESCO (1965), adoptó la siguiente definición de hidrogeología: “es la ciencia que trata de las aguas terrestres, de su manera de aparecer, de su circulación y distribución en el globo, de sus propiedades físicas y químicas y sus interacciones con el medio físico y biológico, sin olvidar las reacciones a la acción del hombre” (Custodio y Llamas, 2001).

Se definen los conceptos básicos en hidrogeología, para comprender las bases teóricas del estudio.

2.2. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el que describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra. El agua puede cambiar su estado entre líquido, gaseoso y sólido en varias etapas del ciclo, y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años. El concepto de ciclo se basa en el permanente movimiento o transferencia de las masas de agua, tanto de un punto del planeta a otro, como entre sus diferentes estados (Figura 1).

2.3. Acuífero

En hidrogeología subterránea se denomina acuífero al estrato o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciable para satisfacer sus necesidades (Custodio y Llamas, 1983).

Los acuíferos se dividen en dos grandes grupos: acuífero libre y acuíferos confinados.

2.3.1. Acuífero libre o freático.

Son aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire y por lo tanto, a presión atmosférica, en este tipo de acuífero al perforar pozos que los atraviesen total o parcialmente la superficie obtenida por los niveles del agua de cada pozo forma una superficie real. (Custodio y Llamas, 2001).

2.3.2. Acuífero cautivo o confinado.

El agua en estos acuíferos está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene saturándola totalmente. Por ello durante la perforación de pozos en acuíferos de este tipo al atravesar el techo del mismo se observa un ascenso rápido del nivel del agua hasta estabilizarse en una determinada posición. (Custodio y Llamas, 2001).

2.3.3. Superficie piezométrica o carga hidráulica

El comportamiento del nivel freático de un acuífero depende de las condiciones de presión que se ejerzan sobre el acuífero.

A la elevación que alcanza el agua en un punto del acuífero se le conoce como nivel freático. A la superficie creada por los niveles freáticos en todo el acuífero se le conoce como superficie piezométrica ó piezometría. En acuíferos confinados la superficie piezométrica está por arriba del límite superior del acuífero debido a que

la presión en todo el acuífero es mayor que la presión atmosférica, mientras que en acuíferos libres la superficie piezométrica coincide con el límite superior del acuífero, el cual se encuentra a la presión atmosférica.

En un sistema estático la carga hidráulica tiene el mismo valor en todos sus puntos y en un sistema dinámico el movimiento será de los puntos de mayor carga hidráulica a puntos de menor carga hidráulica.

Las fluctuaciones de la superficie piezométrica en el tiempo permiten estudiar la variación de las reservas y la alimentación de los acuíferos, además su observación y control son importantes para la conservación de los recursos hidráulicos subterráneos (Castany, 1975).

2.2.1. Fases del ciclo hidrológico

El ciclo comienza por el movimiento del agua en sus diversos estados físicos: es evaporada por los océanos y se mueve a través de la atmósfera. El ciclo hidrológico es el encargado de la distribución y del reusó del agua, cuyos motores son la acción del sol y la gravedad terrestre.

2.2.1.1. Evaporación

La evaporación, es el proceso físico por el cual, el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, en el suelo y en las capas cercanas a la superficie ha estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera.

La evaporación se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercanas a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua producido por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor.

2.2.1.2. Precipitación

Cuando por condensación las partículas de agua que forman las nubes alcanzan un tamaño superior a 0,1 mm comienza a formarse gotas que caen por gravedad dando lugar a las precipitaciones (en forma de lluvia, granizo o nieve).

2.2.1.3. Escorrentía superficial

La escorrentía superficial se define conceptualmente cuando el valor de la precipitación sobrepasa la capacidad de infiltración de un determinado suelo, y parte del agua o su totalidad permanece en la superficie del suelo.

La precipitación al alcanzar el suelo, puede infiltrarse en suelos permeables que poseen una capacidad finita de absorber agua. Cuando el suelo está seco la capacidad de infiltración es alta y a medida que el suelo se humedece esa capacidad decrece hasta alcanzar un valor más o menos constante, o de equilibrio (Fetter, 1994).

2.2.1.4. Infiltración

Una parte de la precipitación llega a la superficie del suelo y si es porosa, el agua penetra en el suelo a través de la infiltración (Fetter, 1994). La porción que alcanza el nivel freático se denomina recarga (Price, 2011).

2.2.1.5. Evapotranspiración

La evapotranspiración es la conjunción de dos procesos; la evaporación y la transpiración. La transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas transfieren agua a la atmósfera, toman agua del suelo a través de sus raíces una pequeña parte es para su nutrición y el resto lo transpiran, como es difícil medir ambos procesos por separado y además en la mayor parte de los casos lo que

interesa es la cantidad total de agua que se pierde a la atmósfera se calculan conjuntamente bajo el concepto mixto de evapotranspiración. El término evapotranspiración real es utilizado para describir la cantidad de evapotranspiración que ocurre bajo condiciones de campo (Fetter, 1994, UNESCO, 2006).



Figura 1. Ciclo hidrológico. El sol y la gravedad de la tierra son importantes en el movimiento de las masas de agua.

2.2.1.6. Balance hídrico (ecuación de continuidad)

El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de continuidad. Ésta establece que para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada.

La ecuación del balance hídrico para cualquier zona o cuenca natural (tal como la cuenca de un río) o cualquier masa de agua, indica los valores relativos de

entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua (Sokolov y Chapman, 1974).

Por tanto, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, vendrá representado por la siguiente ecuación:

$$P + Q_{SE} + Q_{TE} + E - Q_{SS} - Q_{TS} - \Delta S - V = 0 \quad 1$$

Dónde:

P precipitación

Q_{SE} caudal superficial entrante

Q_{TE} caudal subterráneo entrante

E evapotranspiración real

Q_{SE} caudal superficial saliente

Q_{TE} caudal subterráneo saliente

ΔS variación del almacenamiento (final-inicial)

V error de cierre

Las entradas (recargas) así como las salidas (descargas) de agua en el acuífero se presentan de diferentes formas. La recarga puede darse por flujo subterráneo horizontal y por flujo vertical; la descarga puede tener lugar como flujo horizontal, aflorando como manantiales y/o escurrimiento hacia cuerpos de agua superficial como ríos o lagos, por bombeo y por evapotranspiración en acuíferos freáticos con niveles someros.

2.4. Parámetros hidrogeológicos

Estas características o parámetros permiten definir o predecir el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a determinadas acciones exteriores. Se definen a continuación una serie de parámetros fundamentales para caracterizar los acuíferos. Estas características definen las posibilidades de explotación que ofrecen los acuíferos.

2.4.1. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica se define como el caudal que pasa por una sección unidad del acuífero bajo un gradiente también unidad a una temperatura fija o determinada (Custodio y Llamas, 2001).

Los factores que determinan la permeabilidad pueden ser intrínsecos y extrínsecos. Los primeros son los propios del acuífero y depende del tamaño de los poros, la mayor permeabilidad si las condiciones se mantienen corresponderá a las partículas de mayor diámetro, los segundos son los que dependen del fluido y son fundamentalmente su viscosidad y su peso específico.

2.4.2. Transmisividad

El concepto de transmisividad fue introducido por Theis en 1935, y se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, por unidad de ancho, que puede ser transmitida horizontalmente a través del espesor saturado de un acuífero con un gradiente hidráulico igual a uno (unitario)

2.4.3. Capacidad o almacenamiento específico

El almacenamiento específico S_s es el volumen de agua capaz de liberar el acuífero como resultado del descenso (o ascenso) del nivel piezométrico.

2.4.4. Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento S está definido por el volumen de agua desplazado por una columna del acuífero de superficie unitaria (1 cm^2) cuando la superficie freática desciende un valor unitario (1 cm). En los acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad eficaz, es decir, al volumen de agua gravificada extraído de una unidad de acuífero saturado. En los acuíferos confinados se manifiestan los fenómenos mecánicos de compresión del terreno o de la propia agua.

2.5. Ley de Darcy

La Ley de Darcy (Darcy, 1856) describe, de forma empírica el flujo de agua a través de medios porosos, fue desarrollada a partir de una diversa serie de experimentos ejemplificados en la figura 2:

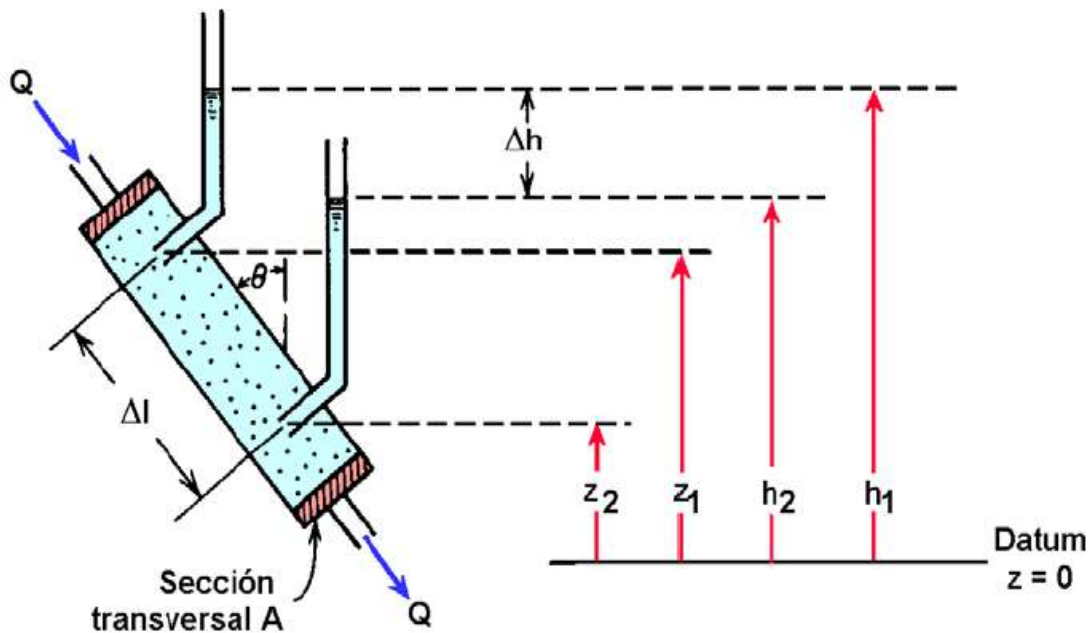


Figura 2. Experimento de Darcy.(modificado Freeze, R. A. y Cherry, J. A., 1979).

Algunas de las formas matemáticas de expresar la Ley de Darcy, de acuerdo con el experimento, es la siguiente:

$$v = \frac{Q}{A} \quad 2$$

Dónde:

v es la descarga específica (L/T),

Q el caudal de entrada y salida del cilindro (L^3/T)

A el área del cilindro (L^2)

La Ley de Darcy muestra que v es directamente proporcional a la diferencia de nivel entre la entrada y la salida del cilindro (Δh) cuando la longitud del mismo es constante (Δl) e inversamente proporcional a su longitud (Δl) mientras (Δh) se mantiene constante. Se puede expresar como:

$$\text{Velocidad de Darcy } \vec{v} = -K \frac{dh}{dl} \quad \text{Velocidad de Darcy } \vec{V} = \vec{v}/n$$

Dónde:

dh es la variación de la carga hidráulica o del nivel piezómetro

$K(L/T)$ es una constante de proporcionalidad. Es una característica del medio y del tipo de fluido que circula a través de él, y que recibe el nombre de conductividad hidráulica.

Con las ecuaciones anteriores, la Ley de Darcy también puede escribirse como:

$$Q = -K \frac{dh}{dl} A \quad 3$$

2.6. Modelado matemático

Con el modelado matemático las ecuaciones matemáticas que describen los procesos de flujo y transporte subterráneo se pueden determinar a partir del principio fundamental de conservación de la masa de un fluido o de un soluto Martínez-Alfaro, et al. (2006) establecen que este principio (o ecuación de continuidad) se puede combinar con una expresión matemática (Ley de Darcy) para obtener una ecuación de tipo diferencial que describa el flujo y el transporte.

MODFLOW (Modular three-dimensional finite-difference groundwater model) es un software de uso comercial desarrollado por McDonald y Harbaugh, pertenecientes al U.S. Geological Survey (1988). Es capaz de simular el flujo de estado estacionario o transitorio en una, dos y tres dimensiones. Se basa en el método de diferencias finitas, un método que conduce a una aproximación numérica que permite una descripción y solución de problemas complejos de flujo de aguas subterráneas.

Para subdividir horizontalmente la región de interés en un número de celdas rectangulares, se superpone sobre el área de estudio una rejilla rectangular. Las capas se utilizan para subdividir verticalmente las propiedades hidrológicas. El flujo subterráneo se realiza como un balance hídrico diferenciado para cada celda del modelo y la carga hidráulica se resuelve en el centro de cada nodo del modelo. MODFLOW permite asignar los flujos a los pozos, la recarga de agua superficial, ríos, drenajes, barreras de flujo, sumideros.

Cuando esta conceptualizado el modelo MODFLOW permite simular el flujo del agua subterránea con una convergencia rápida, y una solución casi exacta para la mayoría de los sistemas (McDonald and Harbaugh 1988; Waterloo Hydrogeologic, 2006; Gao, 2011).

Este programa computacional permite la modelación de un sistema acuífero en tres dimensiones simulando el flujo en las capas acuíferas que pueden ser

confinadas o no confinadas o una combinación de ambas. Las presiones externas de flujo en pozos, recarga, evapotranspiración conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento para cualquier capa, y como en todo modelo numérico el objetivo de la modelación de un sistema subterráneo es la obtención de los siguientes parámetros:

- ✓ Evolución de los niveles en el agua subterránea $h(x,y,z,t)$
- ✓ Velocidades de flujo en el entorno definido como zona de interés, $v(x,y,z,t)$.

MODFLOW cuenta con tres módulos distintos que son:

- ✓ Input: que es el modelo destinado a introducir datos: tales como geometría del modelo conductividades, recarga, pozos de observación y de bombeo, etc. Este módulo tiene celdas (filas y columnas) y estratos verticales (capas), en las celdas se define si será activa o inactiva permeable o impermeable, respectivamente.
La discretización es realizada como “periodos de estrés” que son los incrementos sucesivos de tiempo
- ✓ Run: este módulo es para ejecutar el modelo y tiene las opciones de elegir las distintas estimaciones de carga inicial, permite elegir distintos métodos numéricos de resolución y ajustar los criterios de cálculo y convergencia.
- ✓ Output: Este módulo permite la visualización de los resultados de simulación como series de tiempo, niveles piezométricos y de niveles freáticos para los distintos periodos de estrés

2.6.1. Modelo matemático en MODFLOW (Ecuación de flujo)

MODFLOW se ha utilizado en todo el mundo debido a su fácil accesibilidad, facilidad de uso y versatilidad (Kashaigili, et al., 2003; Rejani, et al., 2008). MODFLOW resuelve una forma tridimensional de la ecuación de flujo subterráneo

de un medio poroso heterogéneo y anisotrópico se representa por medio de la siguiente ecuación diferencial parcial (Harbaugh, 2005)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W(x, y, z) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4$$

Dónde:

h = Carga hidráulica.

t = Tiempo

K_x, K_y, K_z = Son componentes del tensor de conductividad hidráulica en las direcciones de los ejes de las coordenadas

S_s = Coeficiente de almacenamiento específico.

W = Es un término general de fuentes o sumideros y define los de entrada o salida al sistema en unidades de volumen por unidades de tiempo.

Esta ecuación tiene solución, sujeta a las condiciones límites de Dirichlet, donde se conoce el valor de la variable h como la carga hidráulica inicial, es decir que $h_i(x, y, z, t) = h_i(x, y, z, 0)$ es determinada por el nivel freático del acuífero (Anderson, M. y Woessner, W., 1992).

En la ecuación de flujo se hacen las siguientes consideraciones:

- ❖ El medio poroso está completamente saturado
- ❖ El flujo del agua se describe por la ley de Darcy
- ❖ El medio poroso es compresible
- ❖ La porosidad y la permeabilidad son funciones espaciales

2.6.2. Discretización espacial y temporal en MODFLOW.

En MODFLOW un sistema acuífero es representado por medio de un arreglo de bloques llamados celdas, cuyas ubicaciones se describen en términos de renglones, columnas y capas. Figura.3. tiene un arreglo i, j, k que coincide con el sistema de coordenadas x, y, z .

El arreglo i, j, k , representa en el modelo i renglones, j columnas y k capas cuya intersección de dichas celdas tridimensionales tienen propiedades hidráulicas constantes por lo que cada valor asignado es uniformemente distribuido.

Cada columna tiene un ancho Δr , cada renglón un ancho Δc y cada capa un espesor Δv . Un ejemplo de esto sería la celda (3,5,2) tiene un volumen $\Delta c_3 \cdot \Delta r_5 \cdot \Delta k_2$

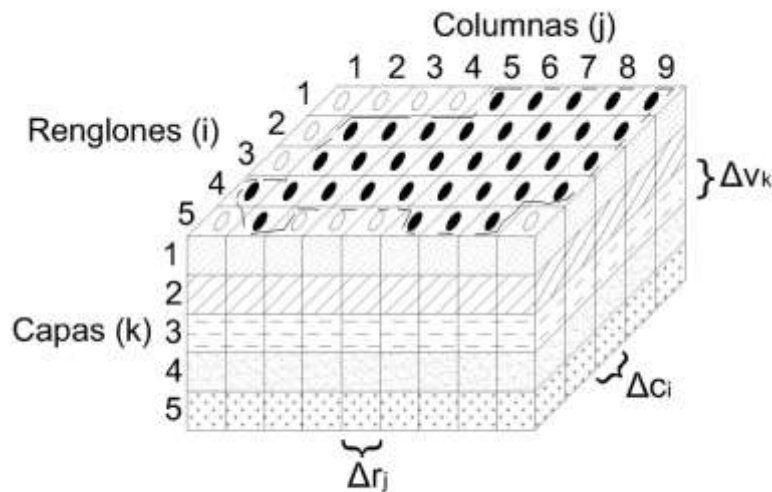


Figura 3. Discretización hipotética de un sistema acuífero (Modificada de McDonald and Harbaugh 1988).

Dentro de cada celda hay un punto llamado “nodo” en el cual se calcula la carga (h) y se ubica en el centro de la celda.

Existen dos convenciones para definir la configuración de celdas respecto a la ubicación de los nodos; estas son las formulaciones de “bloque centrado” y de “punto centrado”, Modflow utiliza la primera de estas configuraciones. Figura 4

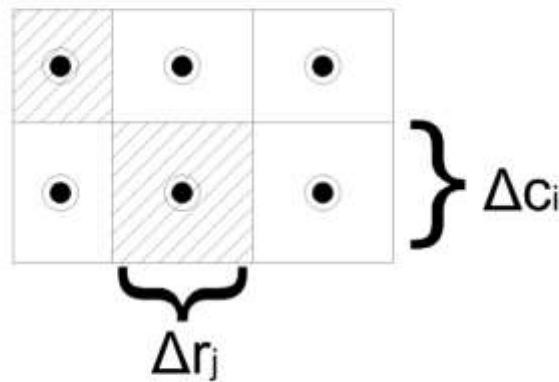


Figura 4. Sistema de bloque centrado.

2.6.3. Ecuaciones por diferencias finitas

Este método consiste en una aproximación de las derivadas parciales por expresiones algebraicas con los valores de la variable dependiente en un limitado número de puntos seleccionados.

Como resultado de la aproximación, la ecuación diferencial parcial que describe el problema es reemplazada por un número finito de ecuaciones algebraicas, en términos de los valores de la variable dependiente en puntos seleccionados.

De acuerdo con la ecuación de continuidad, expresando el balance de flujo en una celda la suma de todos los flujos de entrada y salida a cada celda debe ser igual a la razón de cambio en el almacenamiento de esa misma celda (Harbaugh, 2005; Todd, 1980):

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad 5$$

Dónde:

Q_i = Tasas de flujo entrando y/o saliendo de la celda [L^3T^{-1}]

S_s = Almacenamiento específico por unidad de volumen, por cambio de la carga piezométrica [L^3]

ΔV = Volumen de la celda [L^3]

Δh = Cambio de la carga piezométrica [L]

Δt = Intervalo de tiempo [T]

Se usa la notación que las entradas y el aumento del almacenamiento son positivos. Las salidas y la disminución del almacenamiento son negativas.

Las seis celdas adyacentes a la celda i, j, k son (figura 5):

$$\begin{array}{l} i - 1, j, k ; \quad i + 1, j, k ; \\ i, j - 1, k ; \quad i, j + 1, k ; \\ i, j, k - 1 ; \quad i, j, k + 1. \end{array}$$

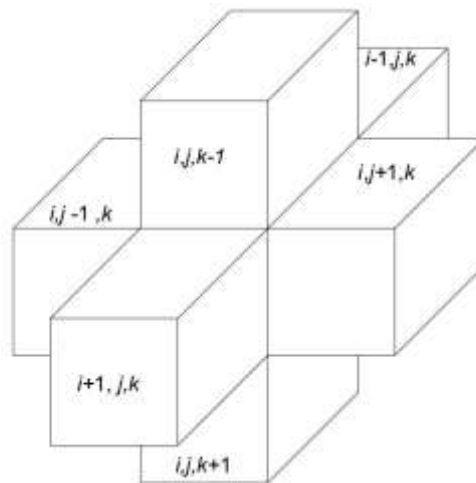


Figura 5. Índice para las seis celdas adyacentes alrededor de la celda i, j, k . (Modificado de McDonal and Harbaugh, 1988).

Para las celdas adyacentes el cálculo de los caudales de entrada a la celda i, j, k y en base con la ley de Darcy, se expresan de la siguiente manera (figura 6):

$$\text{De } i, j-1, k \quad q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}} \quad 6$$

$$\text{De } i, j+1, k \quad q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j+1/2}} \quad 7$$

$$\text{De } i+1, j, k \quad q_{i+1/2,j,k} = KC_{i+\frac{1}{2},j,k} \Delta r_i \Delta v_k \frac{h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta c_{i+1/2}} \quad 8$$

$$\text{De } i-1, j, k \quad q_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \Delta r_i \Delta v_k \frac{h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta c_{i-1/2}} \quad 9$$

$$\text{De } i, j, k+1 \quad q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \Delta r_i \Delta c_i \frac{h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}}{\Delta v_{i+1/2}} \quad 10$$

$$\text{De } i, j, k-1 \quad q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \Delta r_i \Delta c_i \frac{h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}}{\Delta v_{i-1/2}} \quad 11$$

Dónde:

$KR_{i,j-1/2,k}$ = Conductividad hidráulica a lo largo de i entre los dos nodos. El índice - 1/2 representa el espacio entre los dos nodos.

$h_{i,j,k}$ = Carga hidráulica en el nodo i, j, k [L]

$q_{i,j-1/2,k}$ = Descarga volumétrica entre las caras i, j, k e $i, j-1, k, j$. [$L^3 T^{-1}$]

$\Delta c_i \Delta v_k$ = Área de la cara de la celda normal a la dirección de flujo [L^2]

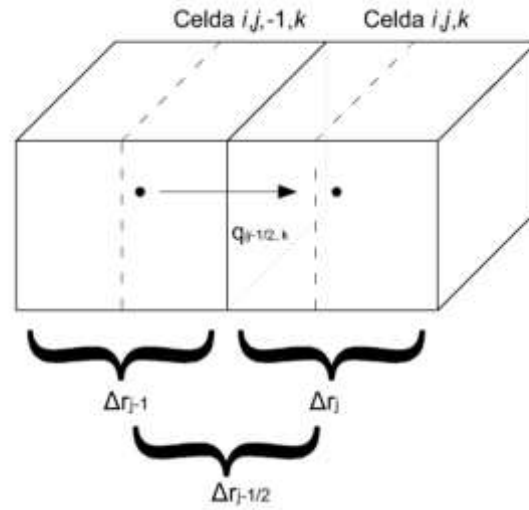


Figura 6. Flujo en la celda i, j, k , a partir de la celda $i, j - 1, k$. (Modificado de McDonald and Harbaugh, 1988).

El producto entre la conductividad hidráulica por el área, dividida entre la separación de nodos es llamado conductancia.

$$CR_{i,j-1/2,k} = \frac{KR_{i,j-1/2,k}\Delta c_i\Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} [L^2T^{-1}] \quad 12$$

Cuando se sustituye la ecuación 12 de conductancia en las ecuaciones (6) a (11) se obtiene:

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad 13$$

$$q_{i,j+1/2,k} = CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \quad 14$$

$$q_{i,-1/2,j,k} = CC_{i,-1/2,j,k}(h_{i,-1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad 15$$

$$q_{i,+1/2,j,k} = CC_{i,+1/2,j,k}(h_{i,+1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad 16$$

$$q_{i,j,k-1/2} = CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \quad 17$$

$$q_{i,j,k+1/2} = CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \quad 18$$

Los caudales (13) a (18) son las entradas para la celda i,j,k de las 6 celdas adyacentes dentro del sistema acuífero.

Las entradas a la celda i,j,k , provenientes de otras fuentes se pueden hacer depender de la carga piezométrica de la celdas en la cual son recibidas. La expresión general:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n}h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} [L^3T^{-1}] \quad 19$$

Dónde:

$a_{i,j,k,n}$ es el flujo de la fuente n

$p_{i,j,k,n}h_{i,j,k} [L^2T^{-1}]$ Es una constante

$q_{i,j,k,n} [L^3T^{-1}]$ Es una constante

Cuando una celda recibe un caudal de un pozo recarga ($n=1$) se puede considerar:

a) que es independiente de la carga $h_{i,j,k,1}$ de la celda i,j,k

b) que depende de una carga.

$$\text{Para el caso a)} \quad p_{i,j,k,1} = 0 \therefore a_{i,j,k,1} = q_{i,j,k,1} \quad 20$$

$$\text{Para el caso b)} \quad a_{i,j,k,1} = p_{i,j,k,1}h_{i,j,k} + q_{i,j,k,1} \quad 21$$

Si una celda está recibiendo un caudal de la filtración de un río, ($n=2$), este caudal depende de la carga $h_{i,j,k,1}$ de la celda y en su caso de la diferencia de cargas.

$$Q = \frac{KRIV (R_{i,j,k} - h_{i,j,k})}{D} \quad 22$$

Para la conductividad hidráulica se usa $KRIV_{i,j,k,2}$ como conductividad hidráulica de la formación sobre la celda i, j, k y su conductancia resulta:

$$CRIV_{i,j,k,2} = \frac{KRIV_{i,j,k,2}}{D} \quad 23$$

Por lo que $a_{i,j,k,2} = CRIV(R_{i,j,k} - h_{i,j,k})$, ó

$$\begin{aligned} a_{i,j,k,2} \\ = -CRIV_{i,j,k,2}h_{i,j,k} + CRIV_{i,j,k,2}R_{i,j,k} \end{aligned} \quad 24$$

Con la ecuación 24 se deduce que:

$$p_{i,j,k,2} = -CRIV_{i,j,k,2} \quad 25$$

$$q_{i,j,k,2} = CRIV_{i,j,k,2}R_{i,j,k} \quad 26$$

Considerando todas las fuentes externas, se tiene ecuación 27:

$$\sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad 27$$

O bien con las definiciones ecuación 28

$$P_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} \ ; \ Q_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad 28$$

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad 29$$

Tomando en cuenta todos los flujos de entrada entre la celda i,j,k y las 6 celdas vecinas, así como flujo desde fuentes (o sumideros) externos el balance de flujo es

$$\begin{aligned} & q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} \\ & + QS_{i,j,k} \\ & = SS_{i,j,k}(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \end{aligned} \quad 30$$

La aproximación en diferencias finitas para la derivada de la carga se define según muestra la ecuación (31):

$$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \cong \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t^{m-1}} \quad 31$$

Donde

$h_{i,j,k}^m$ = Carga hidráulica evaluada en el tiempo en el que se está realizando el cálculo t_m

$h_{i,j,k}^{m-1}$ = Carga hidráulica ya conocida (condición inicial) en el tiempo t_{m-1} anterior a t_m .

Esta aproximación es hacia atrás, ya que el valor de $h_{i,j,k}^m$ depende del correspondiente $h_{i,j,k}^{m-1}$ anterior en el tiempo t . Considerando lo expuesto anteriormente la ecuación (31) queda expresada de la siguiente manera.

$$\begin{aligned}
& CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\
& + CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\
& + CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \\
& + P_{i,j,k}h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} \\
& = SS_{i,j,k}(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t^{m-1}}
\end{aligned} \tag{32}$$

Con la ecuación formula (32) se desconocen las 7 cargas en el tiempo t_m , que son las incógnitas del sistema para la celda i,j,k . Entonces por lo tanto los coeficientes se conocen, así como. $h_{i,j,k}^m$ y $\Delta t = t_m - t_{m-1}$.

La solución se puede obtener en forma simultánea, pues cada celda i,j,k tiene 6 celdas adyacentes, que también están representando por 7 ecuaciones con 7 incógnitas. Cada celda tiene en promedio una incógnita por lo que para n celdas se tienen n ecuaciones y este sistema tiene solución.

2.6.4. Iteración MODFLOW

MODFLOW utiliza métodos iterativos para obtener la solución del sistema de ecuaciones en diferencias finitas para cada paso de tiempo. Este tipo de métodos parte de una solución de prueba para calcular una solución interna, que resuelve la ecuación con una diferencia y este proceso lo realiza en cada nodo lo cual se le denomina iteración.

En cada solución interna en el centro del nodo se reemplaza en la solución nueva de prueba para obtener otra solución interna y así sucesivamente. Este proceso

de iteración se continúa hasta que la solución interna es prácticamente la misma solución de prueba, lo cual se alcanza cuando la diferencia de soluciones es menor que cierto valor establecido previamente en forma arbitraria, lo que se denomina criterio de cierre. Este procedimiento se utiliza para cada incremento de tiempo.

Por esta razón $h_{i,j,k}^{m,0}$ representa la solución inicial de prueba en el nodo i,j,k y $h_{i,j,k}^{m,1}$ la cual es usada como la solución de prueba en la iteración 2. Reagrupando la ecuación 32

$$\begin{aligned}
& CV_{i,j,k-1/2} h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-1/2,j,k} h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-1/2,k} h_{i,j-1,k}^m \\
& + (-CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} - CR_{i,j-1/2,k} - CR_{i,j+1/2,k} \\
& - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k}) h_{i,j,k}^m \\
& + CR_{i,j+1/2,k} h_{i,j+1,k}^m + CC_{i+1/2,j,k} h_{i+1,j,k}^m + CV_{i,j,k+1/2} h_{i,j,k+1}^m \\
& = RHS_{i,j,k}
\end{aligned} \tag{33}$$

Dónde:

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SC1_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}} \tag{34}$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - \frac{SC1_{i,j,k} h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \tag{35}$$

$$SC1_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \tag{36}$$

La ecuación (33) constituye un sistema de ecuaciones simultáneas que puede ser escrita en forma matricial (ecuación 37):

$$[M] \cdot \{h\} = \{q\} \tag{37}$$

Cuando se conocen las condiciones de frontera, la distribución de cargas iniciales, los parámetros hidráulicos y las cargas externas sobre el acuífero, es posible predecir las distribuciones de carga en tiempos sucesivos. Una ecuación de la forma matricial (37) puede ser definida para cada celda definida activa, en cada paso de tiempo de la simulación. Para el primer paso de tiempo las condiciones iniciales de carga corresponden al término $h_{i,j,k}^m$ con esto se logra calcular las cargas h^m para la celda i,j,k y las celdas que están alrededor. Las cargas calculadas corresponderán a las cargas iniciales en el siguiente paso de tiempo

2.6.5. Condiciones iniciales y de frontera para la solución de la ecuación de flujo

Las ecuaciones diferenciales parciales definidas en un dominio espacio-tiempo R tienen un número infinito de soluciones. Para obtener una solución particular es necesario agregar condiciones iniciales y condiciones de frontera. Si las soluciones existen serán únicas para una ecuación dada.

2.6.5.1. Condiciones iniciales

La condición inicial es el estado del potencial hidráulico a partir del cual se produce una evolución del sistema. Es el estado estacionario donde el acuífero está en equilibrio y no se tiene influencia de la operación de los pozos que se van a simular. En otros casos se puede considerar la existencia previa de pozos y simular la instalación de nuevos pozos.

Para determinar la solución particular de una ecuación diferencial se deben especificar los valores de la función incógnita para algún tiempo inicial t_0 en el dominio R o en su frontera ∂R . En la ecuación de flujo la función incógnita representa la carga hidráulica.

2.6.5.2. Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera deben definir los límites del acuífero. Hay tres tipos básicos de condiciones de frontera tipo Neumann, tipo Cauchy y tipo Dirichlet (Anderson, 1992).

En el dominio R puede intercambiar con su entorno, a través de la frontera ∂R (o en parte de esta), masa, energía y momento. De acuerdo a las condiciones de frontera pueden ser parcial o totalmente cerrada a cualquier intercambio.

Cuando existen condiciones de fronteras estas son para expresar matemáticamente la relación del dominio R con el entorno y deben obtenerse de las interpretaciones de las condiciones físicas del área en estudio.

2.6.5.3. Condición de frontera tipo Dirichlet

Esta condición establece que el nivel del agua subterránea sea el especificado a lo largo de la frontera. En este caso ésta se prescribe *a priori* y ya no es una incógnita. Visto de otro modo, si nuestra ecuación de flujo debe ser satisfecha en todos los puntos dentro del dominio R del acuífero entonces en la frontera de R el nivel del agua h , debe satisfacer la condición:

$$h(x, y, z, t) = f \quad 38$$

2.6.5.4 Condición de frontera tipo Neumann

Para la condición de frontera tipo Neumann se prefijan los valores de la derivada normal de la función sobre la frontera. Cuando esta condición es aplicada a un nodo de una frontera impermeable, el nivel es una incógnita y la ecuación para

ese nodo debe reflejar la condición de no flujo en la frontera. Esto quiere decir que debe satisfacer la condición:

$$Q_n = -T \frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad 39$$

2.6.5.5. Condición de frontera tipo Cauchy

La condición de frontera tipo Cauchy es una generalización de las dos condiciones de frontera de Dirichlet y de Neumann, debido a que esta las lleva implícitas. Esto quiere decir que para las ecuaciones diferenciales parciales, la condición de Cauchy impone valores específicos a la solución de una ecuación diferencial que se toma en una frontera del dominio y en la derivada normal a la frontera. Este tipo de condición también se conoce como condición de frontera mixta porque relaciona las cargas de la frontera con el flujo.