



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTADES DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

**PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN
CIENCIAS AMBIENTALES**

**ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE
DE LOS SISTEMAS DE FLUJO
EN EL ACUÍFERO DE RIOVERDE, S.L.P.**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

ING. HERMANN ROCHA ESCALANTE

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

COMITÉ TUTELAR:

DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

DR. HILARIO CHARCAS SALAZAR

**ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE
DE LOS SISTEMAS DE FLUJO
EN EL ACUÍFERO DE RIOVERDE, S.L.P.**

ING. HERMANN ROCHA ESCALANTE

PROYECTO REALIZADO EN:

**ÁREA DE CIENCIAS DE LA TIERRA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

CON FINANCIAMIENTO DE:

**CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)
BECA-TESIS
CONVENIO NO. 201377**

PERIODO:

AGOSTO DEL 2006 - JULIO DEL 2008

**LA MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES ESTA INLUIDO EN
EL PADRON NACIONAL DE POSGRADOS DEL CONACYT.**

A Dios.

*A mis padres, José Manuel Rocha Alcaraz y
María de los Ángeles Escalante Talamante.*

*A mis hermanos:
José Manuel y Eduardo.*

*A mi abuelita:
María Alcaraz González (†).*

A Claudia

Agradecimientos

A mis padres, José Manuel Rocha Alcaraz y María de los Ángeles Escalante Talamante, por el regalo de la vida, por su amor infinito, por su apoyo, confianza y paciencia para la realización de este trabajo. Este logro también es de ustedes.

Al Dr. Javier Castro Larragoitia, por recibirme como su alumno, brindarme la confianza y la oportunidad para trabajar con él; además, por dirigir de excelente forma el proceso de esta investigación y conllevarla a buen fin.

Al Dr. Antonio Cardona Benavides por su excelente asesoría y respaldo durante todo el proceso de trabajo. Por introducirme de una manera sencilla y muy enriquecedora al mundo de la Hidrogeología. Además, le agradezco el haberme brindado la confianza y oportunidad de participar en distintos proyectos a su cargo, actividades que me permitieron ampliar mis conocimientos.

Dr. Hilario Charcas Salazar, por el apoyo e importantes aportes hechos al estudio, por su entera disposición para la realización de este trabajo.

Al M.I. Arturo Dufour Candelaria por el apoyo y enseñanzas académicas y personales que recibí de él en todo momento, y a quien debo mis inicios en el aprendizaje de la modelación de aguas subterráneas.

Mi entero agradecimiento a las personas mencionadas anteriormente, ya que además de ayudarme en mi formación académica, lo hicieron en mi crecimiento como persona. Se que con ustedes he estado en las mejores manos.

Al Ing. Ricardo Garza Blanc y al Ing. Fernando Ruíz de la Conagua (DLSLP), de quienes siempre recibí su entero respaldo y apoyo en la proporción de información oficial sobre los aspectos técnicos del acuífero de Rioverde. Además de su interés y entusiasmo por la conformación del modelo matemático realizado.

Al Consejo Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) de Rioverde, por el apoyo recibido referente a la información proporcionada a través del Ing. Valentín Torres.

Al Ing. Jorge Aceves, Jefe del Laboratorio LADISIG del Área de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la UASLP, por la asesoría brindada con el tratamiento de Sistemas de Información Geográfica para la obtención de diversos datos importantes para el modelo matemático del acuífero.

Al Profesor M.H. Refugio Ballín por su interés y apoyo para el desarrollo de este trabajo, además de actuar como enlace con el COTAS de Rioverde.

A Sandra Cantú Bustamante de Schlumberger Water Services Company, quien me facilitó información para enriquecer el trabajo de tesis así como canalizarme con Soporte Técnico de la compañía para aclarar mis dudas y a quienes también agradezco su disposición.

Al Personal Académico y Administrativo del PMPCA, quienes ayudaron y fueron parte importante en mi formación de posgrado en todo momento, a través de todas las actividades académicas durante mi estancia en la maestría.

Al personal de Ciencias de la Tierra de la UASLP, por permitirme ser parte de su espacio y brindarme su apoyo, en especial a la M.C. Leticia Padilla y al M.C. Guillermo Alvarado.

Al Sr. Rodolfo Martínez, la Sra. Estela Rodríguez y su hija Estela, por brindarme su entero apoyo, confianza y consejos durante los últimos meses de mi estancia en San Luis Potosí.

A mis amigos (as) y compañeros (as) Elias Núñez, Arturo Pérez, Jessica Mireles, Melva Herrera, Mariana Márquez, Ángeles Ortiz, Luis Rodríguez, Yei Rentería, Patricia Muñiz, Emma Torres, Cindy Guizar y Cynthia Zapata, por brindarme su amistad y apoyo en todo momento.

A Marco Mendoza e Isela Bonilla, por su amistad de hace años y por el apoyo y respaldo brindado durante estos últimos 6 meses.

En especial a Claudia Martínez por el apoyo incondicional en todo momento, por convertirse y ser parte importante en mi vida a través de los últimos meses en los cuales hemos atravesado juntos diversas aventuras: Gracias Clau.

Índice

Tema	Página
1. Introducción.	1
1.1. Importancia del Agua Subterránea a Nivel Mundial.	2
1.2. Aspectos Relevantes del Agua Subterránea en México.	3
1.3. Área de Estudio: Rioverde, S.L.P.	4
1.3.1. Localización.	4
1.3.2. Clima.	6
1.3.3. Hidrología Superficial.	6
1.3.4. Aspectos Particulares del Acuífero.	6
1.3.5. Usos del Agua Subterránea.	7
1.3.6. Aspectos Socioeconómicos.	8
1.4. Planteamiento del Problema.	8
1.5. Justificación.	9
1.6. Objetivo General.	11
1.6.1. Objetivos Particulares.	11
1.7. Metodología.	12
2. Estado del Arte.	14
2.1. Introducción.	15
2.2. Reseña Histórica de la Evolución de la Agricultura de la Región.	16
2.3. Estudios Previos sobre Modelación de Aguas Subterráneas.	17
2.4. Gestión de las Aguas Subterráneas.	30
2.4.1. Gestión del Acuífero de Rioverde, S.L.P.	34
3. Área de Estudio.	36
3.1. Introducción.	37
3.2. Localización.	37
3.3. Geología.	40
3.3.1. Topografía y Fisiografía.	40
3.3.2. Geología General.	40

Tema	Página
3.3.3. Estratigrafía.	41
3.3.3.1. Cretácico.	42
3.3.3.2. Terciario.	42
3.3.3.3. Terciario Neógeno.	43
3.3.3.4. Cuaternario.	43
3.3.4. Estructura Geológica.	44
3.3.5. Suelos.	45
3.4. Clima.	46
3.4.1. Precipitación Media Anual.	49
3.4.2. Temperatura Media Anual.	49
3.5. Escurrimiento Medio Anual.	51
3.6. Evapotranspiración Real Media Anual.	53
3.7. Infiltración.	55
3.8. Hidrografía.	56
3.8.1. Río Verde, Manantial de la Media Luna y Manantial Los Peroles.	58
3.9. Vegetación.	58
3.10. Evapotranspiración Real - Zona Norte.	59
3.11. Hidrogeología.	59
3.11.1. Estudios Geofísicos.	59
3.11.2. Unidades Hidrogeológicas.	60
3.11.3. Censo de Aprovechamientos.	61
3.11.3.1. Hidrometría de las Captaciones.	62
3.11.4. Manantial de la Media Luna y Manantial Los Peroles.	62
3.11.5. Retornos Agrícolas.	62
3.11.6. Elevaciones del Nivel Estático.	64
3.11.7. Pozos de Observación.	65
3.12. Balance de Aguas Subterráneas.	65
4. Implementación y Calibración del Modelo.	69
4.1. Implementación del Modelo.	70
4.1.1. Introducción.	70
4.1.2. Geometría del Sistema.	70

Tema	Página
4.1.3. Definición de los Sistemas de Flujo.	71
4.1.4. Balance de Aguas Subterráneas.	71
4.1.5. Diseño.	73
4.1.5.1. Discretización Espacial.	77
4.1.5.2. Discretización Temporal.	78
4.1.5.3. Conductividades y Coeficientes de Almacenamiento.	80
4.1.5.4. Régimen de Bombeo.	82
4.1.5.5. Pozos de Observación.	82
4.1.5.6. Río Verde.	86
4.1.5.7. Manantiales de La Media Luna y Los Peroles.	87
4.1.5.8. Entradas de Flujo Subterráneas.	89
4.1.5.9. Recargas.	89
4.1.5.10. Evapotranspiración.	90
4.1.5.11. Cargas Iniciales.	91
4.2. Calibración.	97
4.2.1. Introducción.	97
4.2.2. Calibración del Modelo.	97
4.2.2.1. Estado Transitorio.	97
4.2.3. Análisis de Sensibilidad.	111
5. Fase Experimental: Modelación de Escenarios.	115
5.1. Simulación de Escenarios Futuros.	116
5.1.1. Condiciones Actuales (2006) “E-1”.	117
5.1.2. E-1 + Apertura de Nuevos Pozos por Menonitas “E-2”.	117
5.1.3. Ahorro de Agua con Base en una Nueva Concesión Propuesta “E-3”.	118
6. Resultados.	120
6.1. Resultados.	121
6.1.1. Condiciones Actuales (2006) “E-1”.	121
6.1.2. E-1 + Apertura de Nuevos Pozos por Menonitas “E-2”.	121
6.1.3. Ahorro de Agua con Base en una Nueva Concesión Propuesta “E-3”.	121

Tema	Página
6.2. Análisis de los Resultados.	126
6.2.1. Condiciones Actuales (2006) “E-1”.	126
6.2.2. E-1 + Apertura de Nuevos Pozos por Menonitas “E-2”.	127
6.2.3. Ahorro de Agua con Base en una Nueva Concesión Propuesta “E-3”.	128
7. Conclusiones.	130
7.1. Conclusiones Generales.	131
7.2. Estrategias para el Aprovechamiento Sustentable de los Sistemas de Flujo del Acuífero de Rioverde, S.L.P. Mejora de la Calidad de la Información.	133
7.3. Estrategias para el Aprovechamiento Sustentable de los Sistemas de Flujo del Acuífero de Rioverde, S.L.P. Escenarios Futuros.	135
Referencias.	140

Anexos.

Discos compactos incluidos:

- **Disco 01:**

Anexo 1. Regiones de Aportación y Ecurrimientos Anuales.

Anexo 2. Censo de Pozos (Simplificado de Conagua, 2007).

Anexo 3. Caudales Iniciales y Modificados Empleados en el Proceso de Calibración.

Anexo 4. Niveles Estáticos y Pozos de Observación.

Anexo 5. Censo de Pozos de la Colonia Menonita.

Anexo 6. Régimen de Bombeo para el Escenario E-3.

Anexo 7. Versión Electrónica de la Tesis.

- **Disco 02:**

Anexo 8. Modelo Matemático del Acuífero de Rioverde.

Anexo 9. Escenarios Futuros Realizados (E-1, E-2 y E-3).

Índice de Tablas.

Tema	Página
Tabla 1.1. Volúmenes de Almacenamiento de Agua.	2
Tabla 2.1. Regiones Hidrológico-Administrativas.	32
Tabla 2.2. Acuíferos en el Estado de San Luis Potosí.	33
Tabla 3.1. Coordenadas de los Vértices del Acuífero de Rioverde.	38
Tabla 3.2. Estaciones Climatológicas en el Acuífero de Rioverde.	48
Tabla 3.3. Áreas Totales y Efectivas de los Polígonos de Thiessen.	48
Tabla 3.4. Precipitación Media Anual en la Región del Acuífero (1980-2004).	49
Tabla 3.5. Temperatura Media Anual en le Región del Acuífero (1971-2000).	51
Tabla 3.6. Cálculo de Ecurrimientos (1966-2004).	53
Tabla 3.7. Cálculo de la Evapotranspiración (1966-2004).	54
Tabla 4.1. Propiedades Hidráulicas Iniciales de los Medios Geológicos.	81
Tabla 4.2. Parámetros Asignados al Río Verde.	86
Tabla 4.3. Balance de Masa para el Sistema Resultante del Calibrado Automático.	107
Tabla 4.4. Balance de Masa para el Sistema Calibrado Final.	108
Tabla 4.5. Propiedades Hidráulicas de los Medios Geológicos (Sistema Calibrado).	110
Tabla 6.1. Balance de Masa de los Escenarios Proyectados al Año 2020.	122

Índice de Figuras.

Tema	Página
Figura 1.1. Ubicación de la Zona de Estudio.	5
Figura 3.1. Acuífero Administrativo de Rioverde.	39
Figura 3.2. Mapa Geológico (Modificado de UASLP, 2004).	47
Figura 3.3. Polígonos de Thiessen.	51
Figura 3.4. División de las Regiones del Acuífero Administrativo (Conagua, 2007).	52
Figura 3.5. Ubicación de los Pozos de Bombeo (Conagua, 2007).	63
Figura 3.6. Diagrama del Balance de Aguas Subterráneas para el Acuífero de Rioverde.	68
Figura 4.1. Diagrama del Balance de Aguas Subterráneas para el Acuífero de Rioverde.	72
Figura 4.2. Representación de un Sistema de 3 X 3 Celdas.	74
Figura 4.3. Discretización Espacial del Modelo (Vista en Planta).	79
Figura 4.4. Discretización Espacial del Modelo. Vista en Perfil (Renglón (a), columna (b)).	80
Figura 4.5. Distribución de los Medios Geológicos en la capa Superior (Capa 1).	83
Figura 4.6. Distribución de los Medios Geológicos en la capa Intermedia (Capa 2).	84
Figura 4.7. Distribución de los Medios Geológicos en la capa Inferior (Capa 3).	85
Figura 4.8. Esquema de los Parámetros del Río Verde.	87
Figura 4.9. Representación del Río Verde.	88
Figura 4.10. Propuesta de Zonas con Influencia de Flujo Subterráneo en los Límites de la Zona de Modelación.	92
Figura 4.11. Áreas de Recarga por Precipitación.	93
Figura 4.12. Áreas de Irrigación.	94
Figura 4.13. Esquema Final de Zonas de Recarga.	95
Figura 4.14. Evapotranspiración Zona Norte (Propuesto con Base en Conagua, 2007).	96
Figura 4.15. Cargas Observadas vs. Cargas Calculadas (1980).	99
Figura 4.16. Cargas Observadas vs. Cargas Calculadas (1986).	100
Figura 4.17. Cargas Observadas vs. Cargas Calculadas (1996).	101
Figura 4.18. Cargas Observadas vs. Cargas Calculadas (2006).	102
Figura 4.19. Cargas Observadas vs. Cargas Calculadas (1980).	103
Figura 4.20. Cargas Observadas vs. Cargas Calculadas (1986).	104
Figura 4.21. Cargas Observadas vs. Cargas Calculadas (1996).	105
Figura 4.22. Cargas Observadas vs. Cargas Calculadas (2006).	106
Figura 4.23. Análisis de Sensibilidad (Conductividades).	112
Figura 4.24. Análisis de Sensibilidad (Almacenamiento y Recarga).	113
Figura 6.1. Curvas de Abatimiento del Escenario Futuro E-1.	123
Figura 6.2. Curvas de Abatimiento del Escenario Futuro E-2.	124
Figura 6.3. Curvas de Abatimiento del Escenario Futuro E-3.	125

Capítulo 1

Introducción

Hermann Rocha Escalante

1. Introducción.

1.1. Importancia del Agua Subterránea a Nivel Mundial.

Las aguas subterráneas han sido desde tiempos remotos una fuente importante de abastecimiento de las necesidades de agua del hombre, ya sea mediante el uso y captación de manantiales (incluyendo los ríos receptores de sus aguas) o accediendo de forma directa al nivel saturado mediante pozos (Custodio, 1995).

De manera asombrosa y aún siendo un recurso abundantemente utilizado, el origen y los procesos de las aguas subterráneas son apenas conocidos y vulnerables a bastantes malentendidos, lo cual radica en la posición física de la misma (debajo de la superficie del terreno), por lo cual no puede ser vista (Moore *et al.*, 2005).

Price (2003), en su explicación del balance del agua en el mundo, esto es, el volumen que entra en cualquiera de los almacenamientos (océanos, atmósfera, suelos) es igual al volumen de salida, presenta rangos aproximados de las cantidades de agua existente en el planeta (tabla 1.1):

Almacén	Volumen de Agua (millones de km³)
Océanos (incluye hielo en mares).	1370.0000
Agua atmosférica.	0.0130
Plantas y animales.	0.0007
Ríos, lagos y pantanos.	0.1300
Hielo (sobre superficie terrestre).	30.0000
Suelos y zona no saturada.	0.0650
Agua subterránea (dulce, accesible).	4.0000
Agua subterránea (salina, inaccesible).	50.0000
Total	1454.2087

Tabla 1.1. Volúmenes de Almacenamiento de Agua.

Existen aproximadamente 1 450 millones de km^3 de agua en el planeta, de la cual solo aproximadamente un 0.30% (esto sin considerar el agua de los océanos, el agua subterránea salina e inaccesible, así como el agua contenida en el hielo marino y terrestre) puede el ser humano en algún momento disponer. Ahora bien, si se considera como 100% esta cantidad de agua, argumentando que es la que está en condiciones aptas para aprovechamiento, se puede deducir que el agua subterránea dulce y accesible representa el 95% del total de agua apta para consumo humano.

Por tal motivo, es inevitable no darse cuenta de la importante magnitud que tiene el agua subterránea, ya que como pobladores del planeta, dependemos de ella para utilizarla en las distintas actividades de nuestra vida cotidiana, inclusive con un constante incremento en su demanda.

Con el continuo desarrollo de la sociedad y los avances de la ciencia, el hombre utiliza cada vez más los recursos hídricos, propiciando efectos negativos como el agotamiento y la contaminación; mismo que motiva el interés y preocupación de los gobiernos, organizaciones sociales e individuos por la conservación y protección del agua (Batista, 2001).

1.2. Aspectos Relevantes del Agua Subterránea en México.

Los recursos hídricos en México, están constituidos por las masas oceánicas, las aguas superficiales (arroyos, ríos, lagos, lagunas) y los almacenamientos subterráneos. La distribución de los anteriores y las actividades que con base en ellos realiza el hombre, no mantienen una relación directa entre sí, ya que ha ocurrido que las zonas de menos disponibilidad de agua son aquellas que tienen un concentrado crecimiento demográfico y económico, con una fuerte infraestructura productiva y social (Conagua, 2006).

Anualmente, la precipitación media del país es de $1,515.48 \text{ km}^3$ aproximadamente; de los cuales se estima que el 72% se evapotranspira, el 23% forma parte del escurrimiento medio superficial interno y el 5% recarga los acuíferos (76.98 km^3) (Conagua, 2006). Como se

mencionó anteriormente la importancia del agua subterránea queda de manifiesto por el volumen utilizado.

El país está dividido administrativamente en 653 acuíferos, de los cuales 104 están actualmente sujetos a una extracción intensiva, 17 tienen intrusión de agua marina y otros 17 están expuestos a fenómenos de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres. El volumen de agua concesionado es de 27.74 km³ al año, de los cuales se extraen 27.55 km³, lo que representa aproximadamente el 36% de la recarga media anual (76.98 km³) (Conagua, 2006).

La extracción intensiva de agua subterránea se ha incrementado a partir de la década de 1970, teniendo que en 1975 el total de acuíferos en régimen de explotación intensiva sumaban 32, cifra que ha llegado a 104 en la actualidad. De estos 104 acuíferos se extrae casi el 60% del agua subterránea destinada a todos los usos (Conagua, 2006). Es importante mencionar que el término “sobreexplotación” es solo un término de índole administrativo que indica que en un determinado acuífero, la cantidad de agua extraída es superior a la recarga estimada, calculada mediante la NOM-011-CNA-2000, por lo que se considera más apropiado utilizar el término: aprovechamiento intensivo o extracción intensiva.

Ahora bien, en el país, más del 75% del recurso hídrico destinado a uso urbano procede del subsuelo, inclusive en algunas regiones llega a ser el 100%. De forma similar el 75% del agua utilizada en procesos industriales procede del mismo origen, así como más del 30% del agua utilizada para riego (Conagua, 2006). Estas estadísticas señalan claramente la dependencia vital de las actividades y consumo de los habitantes del país con respecto a las aguas subterráneas.

1.3. Área de Estudio: Rioverde, S.L.P.

1.3.1. Localización.

La zona de estudio (figura 1.1), que incluye el acuífero administrativo de Rioverde, se encuentra en la Zona Media del Estado de San Luis Potosí, ubicada dentro de los

municipios de Rioverde y Ciudad Fernández principalmente, cuyos principales centros poblacionales (del mismo nombre, respectivamente) se localizan aproximadamente a 130 km al oriente de la capital del Estado. A su vez, el acuífero administrativo abarca pequeñas áreas de otros municipios como Cerritos, Villa Juárez, Cd. del Maíz y Santa María del Río. Las coordenadas geográficas de la ciudad de Rioverde son: 21° 55' 22" latitud norte y 99° 59' 38" longitud oeste, con una elevación de 987 msnm (Ballín-Cortés *et al.*, 2004). El municipio de Ciudad Fernández se encuentra adyacente a la Ciudad de Rioverde, por lo que sus coordenadas de ubicación son semejantes.



Figura 1.1. Ubicación de la Zona de Estudio.

Fuente: INEGI, 2005.

 Acuífero de Rioverde.

1.3.2. Clima.

En la región predomina un clima seco con temperaturas elevadas en primavera y verano, alcanzando los 40 °C; así mismo, durante el invierno la región soporta temperaturas muy frías cercanas a los 0 °C, teniendo una temperatura promedio de 21.40 °C considerando el periodo 1971-2000 (Servicio Meteorológico Nacional, 2008). El régimen de lluvias es característico del verano, llegándose a presentar escasas lluvias en invierno, con un rango de precipitación anual entre 400 y 700 mm (Ballín-Cortés *et al.*, 2004).

1.3.3. Hidrología Superficial.

La región de Rioverde queda comprendida dentro de la cuenca del Río Pánuco perteneciente a la vertiente del Golfo de México. La cuenca está constituida por una topografía muy variada, con zonas de planicie en sus orígenes y zonas accidentadas aguas abajo hasta su confluencia con el Río Santa María. La cuenca del Río Pánuco inicia al oriente de la ciudad de San Luis Potosí a 35 km de la misma, a una elevación de 2,600 msnm; su curso general es este-sureste, ligeramente paralelo al Río Santa María, con el que confluye por su margen izquierdo, a una elevación de 1,250 msnm.

La corriente principal que drena el área de estudio se denomina Río Verde, que tiene una longitud de 186 km; se considera con régimen intermitente hasta Ciudad Fernández, donde, debido a la descarga del manantial Ojo de Agua de Solano se convierte en perenne (Ballín *et al.*, 2004).

1.3.4. Aspectos Particulares del Acuífero.

La zona de Rioverde presenta una amplia diversidad de características hidrogeológicas que favorecen el aprovechamiento de las aguas subterráneas (Charcas y Olivares, 2002); el acuífero de la región es de tipo libre y heterogéneo constituido por los siguientes medios geológicos (Ballín *et al.*, 2004):

- Medio poroso.
- Medio fracturado.

- Medio cárstico.

De acuerdo con la información disponible, aproximadamente el 95% de la extracción de agua subterránea es extraída del sistema de flujo regional que circula preferentemente por el medio cárstico, mientras que el 5% restante proviene del sistema de flujo intermedio, asociado con los medios granular y fracturado en la región centro occidente del acuífero.

Las estadísticas del año 2007 muestran que el acuífero es aprovechado mediante 548 pozos mediante bombas y motores de distintos tipos y capacidades. La mayor parte de los aprovechamientos están localizados en la zona de El Refugio y son utilizados para riego (Conagua, 2007).

Con base en la clasificación de acuíferos establecida por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), la unidad hidrogeológica de Rioverde con clave 2415, cuenta con una recarga media anual de 84.50 millones de m^3 , de los cuales existe una descarga natural comprometida de 1.27 millones de m^3 . El volumen concesionado de este sistema asciende a los 79.05 millones de m^3 anualmente de los cuales se extraen 75.37 millones de m^3 , esto es, aproximadamente el 89% de la recarga media anual y el 95% del volumen concesionado (Conagua, 2005).

1.3.5. Usos del Agua Subterránea.

El principal uso que se le da al agua subterránea en esta zona es la agricultura, la cual es de gran importancia para la economía de la región. El medio granular tiene baja potencialidad, presentando agua de mala calidad en algunas zonas, mientras que el medio cárstico genera manantiales caudalosos, destacando el de la Media Luna (Charcas y Olivares, 2002).

La agricultura es practicada tanto de riego como de temporal; la agricultura de riego ocupa un área aproximada de 38,451 has (incluyendo riego con agua subterránea y superficial), distribuidas en los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández, destacando el cultivo de cítricos, alfalfa y cultivos en los que es posible producir dos cosechas por año logrando

buenos resultados. Por su parte, la agricultura de temporal ocupa una superficie variable en virtud del temporal, cultivándose básicamente maíz y frijol (Ballín, 2003).

1.3.6. Aspectos Socioeconómicos.

De acuerdo con el Censo General de Población y Vivienda del 2005 realizado por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), la población total del municipio de Rioverde, S.L.P. es de 85,945 habitantes, y en Cd. Fernández, S.L.P. es de 41,042 habitantes. Con relación a la población total del Estado, la población de estos dos municipios representa el 5.60% (Conagua, 2007).

La región, cuenta con servicios de educación básica, nivel medio superior y capacitación para el trabajo.

Las principales actividades económicas en el Municipio de Rioverde son la agricultura (maíz, frijol, sorgo, chile, cacahuete, naranja y alfalfa), la ganadería, la silvicultura, la minería (extracción de fluorita), la industria manufacturera, el comercio y los servicios; en Cd. Fernández, tales actividades son la agricultura (garbanzo, frijol, maíz, sorgo, girasol, jitomate, naranjo, nogal, mandarina, alfalfa, chile, cacahuete y hortalizas), la ganadería y la silvicultura (Conagua, 2007).

1.4. Planteamiento del Problema.

Como se ha podido apreciar, desde el punto de vista administrativo, la disponibilidad de aguas subterráneas en los sistemas de flujo del acuífero de Rioverde expresa un balance positivo; esto es, el volumen extraído del acuífero no sobrepasa la recarga media anual oficialmente estimada por la Conagua. Sin embargo, el aprovechamiento que se hace actualmente tiene una intensidad bastante considerable, pues las cifras oficiales indican que se extrae el 88% del volumen con respecto a la recarga y el 94% del volumen concesionado.

En un lapso aproximado de 30 años, la superficie agrícola de la región irrigada con agua subterránea tuvo un incremento significativo, lo cual ha generado competencia que ha repercutido en el incremento en la profundidad de los pozos. Debido al impacto de un elevado número de pozos profundos en toda la región, los cuales representan un 96% del total, los niveles de agua en los pozos presentan un abatimiento general en toda la zona, pues en 1966, en el 63% del total de pozos las profundidades oscilaban en una profundidad menor a 20 m, mientras que solo el 17% de los mismos tenían una profundidad mayor a 40 m. Para el año 2000, el 92% del total de los pozos tenía una profundidad mayor a 40 m. También el abatimiento del nivel estático evolucionó de manera importante, abatiéndose en promedio 10 m durante el periodo 1981-2000 (Ballín *et al.*, 2004).

Otro aspecto importante a considerar es la deficiente administración del agua subterránea que se tiene en la región, ya que por ejemplo, algunos productores que tienen concesión para la extracción de agua, no pagan derecho alguno por su aprovechamiento, independientemente de la cantidad de extracción, aunado a una falta de administración del agua de acuerdo a cada cultivo, es decir, utilizar las técnicas de irrigación y las cantidades de agua necesaria a cada cultivo, evitando el desperdicio del líquido (Ballín *et al.*, 2004).

Ahora bien, con las cifras actuales antes mencionadas y considerando la tendencia en el incremento de la demanda de agua por distintas actividades, así como la deficiente administración, se corre el riesgo de ocasionar alteraciones negativas en los sistemas de flujo del acuífero, poniendo en peligro la disponibilidad del recurso.

1.5. Justificación.

Con base en el panorama anterior, ha sido posible presentar el nivel de importancia que tienen las aguas subterráneas para el consumo y desarrollo de las actividades del ser humano. Durante los últimos años, los incidentes ocurridos tanto en abatimiento como en la contaminación de las aguas subterráneas han captado la atención de los sectores público, científico y político, lo cual ha provocado un auge en la investigación acerca de los fenómenos de comportamiento para su comprensión y posterior cuidado y mantenimiento, cuyos resultados actualmente se han plasmado mediante la creación de programas

gubernamentales con el objetivo de asignar responsabilidades para la protección de las aguas subterráneas.

Este fue el punto clave que motivó la realización del presente estudio. Técnica y numéricamente (como se mostró anteriormente), el acuífero de Rioverde presenta características de aprovechamiento intensivo, por lo que existió la necesidad de realizar esta investigación con la cual se pretendió simular el comportamiento de los sistemas de flujo del acuífero mediante la creación de distintos escenarios futuros de aprovechamiento a través de la implementación de un modelo matemático. Para esto, se hizo imprescindible la utilización de la información histórica registrada en los últimos años, con la finalidad de comprender el comportamiento de las variables que rigen su funcionamiento, y como consecuencia, con fundamentos sólidos, generar una serie de estrategias de manejo que permitan realizar el aprovechamiento sustentable del recurso sin poner en riesgo la capacidad de regeneración del sistema para ofrecer agua en óptimas condiciones de cantidad y calidad.

La evaluación de la cantidad de agua subterránea en un acuífero susceptible a ser captada, es un problema que genera gran controversia en la hidrología; aún así, es imprescindible realizar el diagnóstico aunque sea de modo aproximado para realizar un aprovechamiento racional (Batista, 2001).

Aquí radica la importancia de los modelos computacionales de flujo de agua subterránea, los cuales están conformados por una serie de ecuaciones matemáticas derivadas de propiedades hidrológicas e hidrogeológicas, características que se combinan para simular el movimiento de aguas en un medio geológico (saturado o no saturado). Tales modelos, son herramientas muy utilizadas y de gran potencial en la actualidad, con un gran reconocimiento para situaciones variadas como: soporte de litigaciones, conformación y adecuación de fuentes, diseño de sistemas para contención de contaminantes, ubicación estratégica de pozos de bombeo, entre otras (Getchell, 1996).

Es importante recalcar que un modelo numérico de un medio geológico, representa una herramienta con fundamentos sólidos para la toma de decisiones, mediante las que se establecen estrategias futuras para el aprovechamiento de las aguas subterráneas con una perspectiva de sustentabilidad. Fundamentos que se basan en el análisis del comportamiento histórico del mismo, con base en el estudio de sus diversas características, y que además es susceptible de mejorarse y enriquecerse a través del tiempo con la información que se genera continuamente.

1.6. Objetivo General.

Establecer propuestas de manejo (estrategias) para el desarrollo y aprovechamiento sustentable del agua de los sistemas de flujo en el Acuífero de Rioverde, S.L.P., mediante el estudio y comprensión de las variables que rigen su comportamiento.

1.6.1. Objetivos Particulares.

Para lograr el objetivo general se establecieron cuatro objetivos particulares, los cuales son:

- Generar una base de datos con información geológica, hidrológica e hidrogeológica del sitio y elaborar el modelo conceptual de los sistemas de flujo del acuífero.
- Implementar y calibrar el modelo numérico de los sistemas de flujo.
- Simular los diferentes escenarios de extracción, para poder predecir las condiciones futuras (cargas hidráulicas) particulares a cada caso.
- Integrar las estrategias de manejo para el desarrollo y aprovechamiento sustentable de los sistemas de flujo en el Acuífero de Rioverde, S.L.P.

1.7. Metodología.

El procedimiento desarrollado para el logro de los objetivos particulares, y como consecuencia del objetivo general del estudio, consistió de los siguientes pasos:

- Identificación de las publicaciones más relevantes relacionadas con estudios previos de análisis hidrogeológicos, con el objetivo de identificar experiencias previas en la implementación de modelos hidrogeológicos.
- Identificación, análisis y clasificación de la información relevante para la comprensión de las condiciones hidrogeológicas del sitio; información con base en la cual, se definieron las variables incluidas en el modelo numérico.
- Elaboración del modelo conceptual (representación gráfica del sistema de flujo del agua subterránea) mediante la definición de las unidades hidroestratigráficas, la preparación de una evaluación cuantitativa del agua y la definición de los sistemas de flujo, además de la integración de la información para conformar el marco físico y el marco hidrogeológico.
- Generación de la base de datos utilizada como plataforma del modelo numérico. La base de datos comprendió información como: características geológicas e hidrogeológicas del acuífero, posición geográfica de los pozos, caudales de extracción, abatimientos, evolución de las cargas hidráulicas, profundidades a nivel estático, recarga por precipitación, retornos agrícolas y evapotranspiración.
- Implementación del modelo numérico para simular los sistemas de flujo del agua subterránea en 3 dimensiones.
- Realización de la calibración del modelo numérico a través de la retroalimentación del modelo conceptual inicial mediante el uso de registros históricos.

- Desarrollo de diversos escenarios mediante la definición de propuestas planteadas para el manejo sustentable del agua en el acuífero que permitieran comprender con alto grado de confiabilidad el comportamiento de los sistemas de flujo del acuífero de Rioverde, S.L.P., ante cada caso en particular.
- Realización del análisis y discusión de los resultados obtenidos mediante los escenarios realizados a partir de las propuestas de desarrollo.
- Establecimiento de las conclusiones.
- Integración de las propuestas de manejo sustentable del agua de los sistemas de flujo en el acuífero de Rioverde, S.L.P, con base en las conclusiones establecidas.

Capítulo 2

Estado del Arte

Hermann Rocha Escalante

2. Estado del Arte.

2.1. Introducción.

La aplicación de las tecnologías en la modelación matemática de acuíferos contribuye y favorece a mejorar el conocimiento de la disponibilidad y del comportamiento de los recursos hídricos del subsuelo, con base en el cual se pueden desarrollar políticas y estrategias racionales de administración que garanticen su desarrollo sustentable. Una seria reflexión sobre los modelos de flujo de agua subterránea actuales conducen a considerar dos etapas de trabajo: primero, verificar las hipótesis formuladas en el estudio hidrogeológico tradicional, y segundo, responder a la necesidad de predecir las consecuencias que se producirán en los acuíferos ante una serie de alternativas de aprovechamiento (Ricardo y Hernández, 2004).

En este capítulo se expone la situación actual ante el problema estudiado en esta investigación, haciendo énfasis en tres puntos principales. En el primero, se presenta una breve reseña histórica acerca de la evolución de la agricultura de la región, pues es la actividad que repercute en mayor medida en el aprovechamiento de las aguas subterráneas; en el segundo punto, se muestran una secuencia de investigaciones realizadas que tienen similitud con el desarrollo de éste estudio, esto es, modelación de flujo de aguas subterráneas; por último, se mencionan los distintos medios de regulación para el aprovechamiento de las aguas subterráneas que se aplican en el país.

Debe destacarse que la reseña que se presenta está basada en una investigación bibliográfica, en la que se recopiló información derivada de diversas investigaciones sobre la historia de la región así como sobre modelación de sistemas de flujo de aguas subterráneas realizadas por distintos investigadores.

En lo que se refiere a los medios de regulación del aprovechamiento de las aguas subterráneas, se destaca la información que presenta la Conagua para la gestión del recurso en el país, además de las estrategias utilizadas por los organismos de gestión que se encargan de regular el aprovechamiento del agua en el acuífero de Rioverde, S.L.P.

2.2. Reseña Histórica de la Evolución de la Agricultura de la Región.

La zona de estudio tiene una importante actividad agrícola, lo cual repercute notablemente en el aprovechamiento del agua subterránea y se manifiesta en una fuerte presión sobre los recursos debido a su uso ineficiente (Charcas, 2002). En la actualidad, la superficie de riego comprende un área aproximada de 38,451 Has de las cuales 23,963 Has son irrigadas con agua extraída de pozos y 14,488 Has con agua del manantial de la Media Luna.

El proceso histórico de la conformación agrícola de la región ha dependido de diversas condicionantes (socioeconómicas, de sistemas de producción) a través de las diferentes épocas, mismas que han marcado su evolución.

Como es conocido, la región de estudio está situada dentro de Mesoamérica en los límites con Aridoamérica, por lo cual, las comunidades del territorio de Rioverde entre los años 250 al 1000, estaban étnicamente mas relacionados con grupos mesoamericanos que con nómadas. Con lo anterior se infiere que es muy probable que la economía de dichas comunidades se basara en la combinación de actividades como la producción de cosechas (con sistemas de riego en las proximidades de los manantiales y el Río Verde), la recolección y la caza (Charcas, 2002).

Durante la época de la conquista y la colonia (1492-1810) la cultura de los pueblos de la región era de cazadores-recolectores. Para 1645, mediante la política de composición de tierras se consolidó la propiedad con autorizaciones de sembrar sin limitación alguna. Con ello, se comenzaron a cercar agostaderos, desecar humedales, además de realizar aperturas de acequias para llevar el agua del manantial de la Media Luna hasta los campos de cultivo. Por tanto, la agricultura comenzó a adquirir mayor importancia que la ganadería y se inician los cultivos de maíz, frijol, chile, cebada y garbanzo mediante la utilización de técnicas introducidas por los españoles (Charcas, 2002).

En el primer siglo de la época independiente (1810-1917) los principales cultivos eran la caña de azúcar, maíz, chile, frijol y garbanzo, además de una amplia variedad de árboles

frutales. Por medio del Ferrocarril Central Mexicano, la región de Rioverde quedó comunicada con el resto del país (1902); como consecuencia, la agricultura experimentó un cambio favorable al colocar diversos productos en el mercado nacional como en el internacional (Charcas, 2002).

En la época de la reforma agraria se inició con el primer reparto de parcelas ejidales en el año de 1923 y en 1934 se empezó con el reparto agrario. El maíz continuó siendo el principal cultivo.

Posteriormente, en la década de los setenta se incrementó la superficie de algunos cultivos como el chile serrano, el jitomate, el algodón y la naranja, mientras que la caña de azúcar comenzó a disminuir gradualmente (prácticamente ha desaparecido en la actualidad). En éstos años se impulsaron las organizaciones de sociedades de crédito (Charcas, 2002).

En los últimos años ha habido un incremento en la superficie de cultivo de cítricos y alfalfa, mientras que existen fuertes problemas de sanidad y comercialización en cultivos como chile, jitomate, tomate y calabacita.

2.3. Estudios Previos sobre Modelación de Aguas Subterráneas.

De la necesidad de predecir el comportamiento de los niveles del agua subterránea de un caso en particular, con base en parámetros de extracción, surge la intervención de los modelos de agua subterránea. Dichos modelos permiten estimar impactos por acciones ejercidas en los diferentes puntos del sistema. Estas representaciones simplificadas de fenómenos de suma complejidad, incorporan las influencias más importantes de acuerdo con el objetivo de estudio, a las cuales se da solución por medio de ecuaciones que describen el fenómeno en particular (Obregón *et al.*, 2006).

En general, los modelos de aguas subterráneas son de reciente concepción y hablar de su historia es apenas posible. Los primeros modelos de simulación fueron analógicos y aparecieron durante el primer cuarto del siglo XX; estaban constituidos principalmente de arena y fluido viscoso cuya finalidad era meramente de estudios de laboratorio,

continuando con esa misma tendencia hacia la primera mitad de ese siglo. A partir de la década de 1950, pero especialmente en la década de los 60's, comienza un apresurado desarrollo, basado principalmente en las capas de capacidades y resistencias (con la utilización de componentes y aparatos electrónicos) y el uso de computadoras con mayor potencia y técnicas de cálculo eficaces (Custodio y Llamas, 1996).

En la actualidad la evolución es muy rápida y se hace difícil predecir los logros futuros, pues la modelación de aguas subterráneas está situada en una fase juvenil, en donde el avance tiene mayor velocidad en las técnicas de modelación que en las técnicas hidrológicas para obtener información y concepciones sobre sistemas de acuíferos (Custodio y Llamas, 1996).

El desarrollo de los modelos de flujo de aguas subterráneas está basado en las ecuaciones que gobiernan su movimiento tridimensional, que ocurre bajo la influencia de gradientes de elevación y presión. Para la implementación de estos modelos, existe la necesidad de contar con registros históricos y actuales de los diversos parámetros que están involucrados en este fenómeno, que permitan conocer las características del comportamiento del flujo de las aguas subterráneas.

Ahora bien, los distintos tipos de modelos (analíticos, matemáticos y analógicos) se diferencian por la forma en que describen el problema así como el método para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento del flujo del agua subterránea. Los modelos analíticos dan solución exacta a las ecuaciones diferenciales; sin embargo solo ha sido aplicada para casos particulares y relativamente simples. Por su parte, los modelos matemáticos emplean métodos numéricos para la solución de las ecuaciones diferenciales, siendo el más común el método de diferencias finitas. Por último, los modelos analógicos resuelven las ecuaciones diferenciales de forma indirecta; esto es, el método utiliza un fenómeno físico que tenga una ecuación diferencial del mismo tipo que la del acuífero, obteniendo valores de solución a través de factores de escala (Ministerio de Obras Públicas, 1972).

A continuación, se presentan algunos estudios de casos realizados alrededor del mundo en los cuales se ha hecho uso de herramientas de modelación para proponer soluciones a distintos problemas relacionados con las aguas subterráneas.

Guvanasen y Wade (2000), desarrollaron la simulación de modelos computacionales del sistema de flujo de agua subterránea regional e intrusión de agua salina en Hernando Country, Florida, para determinar los impactos de los escenarios en el manejo del recurso. Para ello realizaron una descripción del sitio, el desarrollo del modelo y su calibración así como la inclusión de los factores que limitan el desarrollo de los recursos de agua subterránea en el área.

La cuenca de Naivasha, Kenya, ha tenido recientemente un intenso desarrollo agrícola, lo cual ha provocado el aumento en el consumo de agua, afectando los niveles de la misma y con ello las direcciones de flujo. Ramírez (2000) construyó y calibró un modelo numérico para realizar los cálculos de balance hidráulico. Las dimensiones de la malla fueron establecidas con dimensiones de 1 km x 1 km, resultando 42 renglones y 39 columnas con un total de 1368 celdas. La calibración fue completada por una serie de parámetros, límites, periodos de extracción que producen las cargas y flujos observados. Finalmente, concluyó que existe una gran variabilidad de algunas características hidráulicas en toda la cuenca y que es necesario un mejor conocimiento de los parámetros hidrogeológicos de la misma.

La Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (2001) comenzó en el año de 1998 una serie de estudios de los acuíferos de ese Estado, cuyo objetivo fue actualizar y generar información que contribuya a una mejor planeación de la gestión del agua subterránea. Dichos estudios contemplaron la modelación de flujo de aguas subterráneas utilizando el sistema de cómputo Visual MODFLOW. En cada uno de los proyectos realizaron actividades como son la generación de bases de datos, diseño de los modelos (mallas, condiciones iniciales y de frontera, parámetros hidráulicos) así como la respectiva calibración y predicción de escenarios (aunque los estudios no iban más allá de una predicción a 10 años) en los que únicamente definían los niveles de abatimiento para el periodo establecido.

Los acuíferos para los cuales realizaron los trabajos antes mencionados corresponden a los siguientes: Valle de Acambaro, Valle de Apaseos, Valle de Celaya, Valle de Ciénega Prieta - Moroleón, Valle de Cuitzeo, Valle de Irapuato - Valle de Santiago - Huanimaro, Valle de Jaral de Berrios, Valle de La Cueva, Valle de Laguna Seca, Valle de León, Pénjamo - Abasolo, Río Laja - San Felipe, Valle del Río Turbio, Valle de Salvatierra y Valle de Silao - Romita.

El posible impacto del cambio climático debido al calentamiento global en un acuífero libre altamente permeable ubicado al noreste de E.U.A. fue analizado por Kirshen (2002), quien realizó el modelo numérico de agua subterránea con base en una aproximación de diferencias finitas, el cual calibró, verificó y usó para los impactos significantes y secos escenarios del cambio climático. Se asumieron permanentes tanto el uso de suelo como las condiciones de bombeo como hasta en ese momento estaban. Mediante los resultados, este investigador fue capaz de obtener que, ante los escenarios de cambio climático, prácticamente es apenas perceptible disminución en la recarga y una elevación anual del agua subterránea, produciendo una variedad de impactos en los humedales y bajo flujo. Los impactos son más severos mediante algunos escenarios de sequía. La respuesta política propuesta se hizo presente con el objetivo particular de limitar la expansión del abatimiento del agua incrementando la cantidad presente de recarga.

Tokgos *et al.*, (2002), utilizaron en conjunto optimización de técnicas y modelado de flujo de agua subterránea para determinar el diseño óptimo de un sistema de desecación para una excavación tipo fosa (con 3,000 m de longitud) para ser abierto bajo los niveles de agua subterránea en el Distrito Industrial Organizado Aksaray en Aksaray, Turquía. Para ello simulaban cuatro sistemas distintos mediante diferencias finitas (utilizando información como: características hidráulicas de la zona, niveles de agua, cantidades de recarga y descarga), escogiendo el que cumpliera con características como finalización del tiempo de construcción, número de pozos de bombeo, cantidad de bombeo así como eficiencia y aplicabilidad del sistema a la práctica.

Smith y Nield (2003), realizaron una cuantificación de la descarga submarina de agua subterránea en Cockburn Sound Western Australia mediante la aplicación de un modelo de flujo, estimando el balance de agua del acuífero. El modelo fue implementado en el programa Visual MODFLOW definiendo características como geometría, malla de diferencias finitas, condiciones de frontera, pozos de bombeo, elevaciones de las capas y distribuciones espaciales de conductividad hidráulica y recarga. La malla de diferencias finitas consiste de 26,596 celdas de 100 m x 100 m. Sin embargo, los autores mencionan que su trabajo es aún rudimentario mas sirve como base para ser mejorado con mayor información y de mejor calidad para el desarrollo de posteriores investigaciones.

La Sociedad Geológica Americana (2003) presentó un modelo conceptual de flujo de agua subterránea de Wasatch Range y Book Cliffs, que describe los regímenes de flujo de la misma, activo e inactivo. El modelo está basado en un análisis de interacciones entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas someras y profundas.

En Estonia, Vallner (2003) realizó un modelo hidrogeológico utilizando el programa Visual MODFLOW que cubre toda el área del país mencionado, los bordos de la zona costera, el Lago Peipsi y los límites distritales con la Federación Rusa y Latvia, sumando un total de 88 032 km². el modelo cuenta con 13 capas que incluye los acuíferos principales, acuitardos, aguas superficiales así como las partes impermeables más bajas del basamento cristalino. En dicho modelo pueden simularse la distribución tridimensional de las cargas de agua, direcciones de flujo, velocidades, cantidades, además de características de transporte. El autor pretende que su modelo sea considerado como una poderosa y factible herramienta para avanzadas investigaciones hidrogeológicas.

Jaworska-Szulc (2004), realizó una investigación cuyo objetivo principal fue evaluar el efecto de la alteración de la complejidad del modelo en la representación del sistema de flujo de agua subterránea del acuífero Gdansk en Polonia, utilizando el programa MODFLOW. El autor menciona que la modelación es un problema bastante complejo y difícil, el cual progresa dependiendo de la colección de información misma que debe estar

perfectamente subordinada por los requerimientos matemáticos del modelo. Además menciona que es importante evaluar la credibilidad de toda la información.

La cuenca del Río San Pedro, localizada al sureste de Arizona, E.U.A., ha sido estudiada intensamente en los últimos 20 años; tiempo durante el cual han sido propuestos modelos para la simulación del régimen de flujo del agua subterránea. McPhee y Yeh (2004) adaptaron un modelo desarrollado Goode y Maddock (2002). Dicho modelo esta aplicado en MODFLOW el cual es utilizado para simular escenarios de extracción bajo regímenes de flujo estacionario y transitorio. El sistema cuenta con una estructura de 4 capas con 171 renglones y 90 columnas representando al sistema real. El modelo fue calibrado en estado estacionario con información anterior al año 1960; y en estado transitorio utilizando un periodo de información de 1940 a 1997. En un estudio realizado en 1997 por Goode y Maddock se identificaron 3,470 pozos con un rango de bombeo individual que oscilaba de 0 a 2,761 m³/día. El objetivo de los autores del estudio es contar con una herramienta que contribuya al manejo sustentable del sistema hidrogeológico.

Para estudiar la influencia de la metodología de la calibración en las predicciones, Saiers *et al.*, (2004), construyeron un modelo numérico de agua subterránea de flujo transitorio y transporte de solutos para el acuífero de Biscayne en Florida. La calibración del modelo la llevaron a cabo mediante 3 diferentes combinaciones de información de un periodo de recolección de 193 días: 1. solo cargas hidráulicas; 2. cargas hidráulicas y descarga de agua subterránea al canal; y 3. las dos anteriores junto con la concentración de cloruros. Utilizaron cada uno de los tres modelos calibrados para predecir las cargas hidráulicas y la descarga de agua subterránea al canal durante un periodo de 182 días. Los tres modelos predijeron las cargas hidráulicas igualmente bien durante el periodo de evaluación con un 95% de precisión de los valores simulados con respecto a los medidos. Aunque solo el modelo calibrado en cargas hidráulicas tiene valores de parámetros perceptiblemente diferentes que los otros dos modelos, las predicciones de descarga durante el periodo de evaluación dependieron de la metodología de calibración; los modelos simulados con bancos múltiples simulaban la descarga de manera mas precisa que el modelo solamente calibrado con cargas hidráulicas (79% y 49% de precisión respectivamente). Finalmente

mencionan aspectos importantes como la realización de una post-calibración para la determinación de diversos tipos de parámetros y mencionan que modelos relativamente sencillos pueden predecir con razonable exactitud el flujo transitorio en un acuífero complejo.

Con el objetivo de determinar las producciones seguras y sustentables para el acuífero Sady Complex en la cuenca del Río Ergene al noroeste de Turquía, Ökten y Yazicigil (2005), desarrollaron un modelo numérico de agua subterránea utilizando diferencias finitas para simular los flujos constantes y transitorios. Las dimensiones de la malla fueron de 1,000 m x 1,000 m y el modelo fue calibrado en dos pasos: para el flujo constante se utilizaron los niveles observados en enero de 1970, mientras que para el flujo transitorio se utilizaron los niveles observados de enero de 1970 a diciembre del 2000. Posteriormente se llevó a cabo el desarrollo de escenarios de bombeo para predecir los cambios en el sistema del acuífero para una serie de diferentes condiciones (8 escenarios en flujo transitorio) en un periodo de 30 años (2001-2030). Finalmente, pudieron determinar que las condiciones actuales de bombeo (hasta ese momento) demuestran que los valores de producción segura y sustentable están excedidos.

Vásquez (2005), realizó una evaluación del potencial hidrogeológico del acuífero La Bomba en la cuenca del Río Banano, Limón, Costa Rica. Para ello, utilizó el programa Visual MODFLOW 4.0. Dicho acuífero constituye la principal fuente de agua subterránea de agua potable para la ciudad de Limón, la cual cuenta con una población cercana a los 65 000 habitantes, y del cual se extraen 200 l/s (en promedio) a través de 8 pozos. Luego de evaluar el potencial, el autor llegó a la conclusión que actualmente solo se utiliza el 15% de la capacidad del acuífero ya que se podrían extraer hasta 1,200 l/s, y según la simulación la mejor zona para nuevas captaciones es en la zona este a donde se ubica la zona de pozos actuales.

La compañía Schlumberger Water Services (2006) desarrolló y aplicó un modelo de flujo de aguas subterráneas para la evaluación de escenarios de extracción de agregados y el impacto potencial que dicha actividad podría provocar en los sistemas de flujo a los

alrededores de una cantera localizada en Acton, Notario al noroeste del área metropolitana de Toronto, Canadá. Para ello, la compañía desarrolló y calibró un modelo de flujo de aguas subterráneas que refleja las condiciones hidrogeológicas del sitio en el sistema de cómputo Visual MODFLOW. Finalmente, pudieron predecir con los escenarios, abatimientos menores de 0.5 m dentro de 1 km alrededor de la cantera y con ello obtener una herramienta (modelo) que permita la evaluación del flujo de aguas subterráneas cerca de la cantera.

El agua subterránea de los acuíferos Damman y Umm Er Raghuma en Arabia Saudita, abastecen más del 85% del total de demanda de agua. En las últimas 3 décadas, los acuíferos han sido sujetos a un intensivo bombeo con un incremento importante de extracción, lo cual se ha dejado observar en impactos negativos como la baja de los niveles de agua. Para el estudio del comportamiento de los mismos, Abderrahman *et al.* (2007) desarrollaron un modelo de flujo en Visual MODFLOW para predecir la respuesta del acuífero en términos de declinación de los niveles de agua bajo diferentes esquemas de bombeo de los dos acuíferos durante los siguientes 30 años. Para ello, asignaron condiciones de frontera, propiedades hidráulicas y realizaron la calibración tanto en flujo constante (utilizando información de 1967) como transitorio (con un periodo de simulación de 13,870 días: 38 años entre 1967 y 2006). El modelo constó de 65 renglones y 44 columnas, con dimensiones de 2 km x 2 km fuera de la mayor zona de bombeo y de 1 km x 1 km dentro de la mayor zona de bombeo. Con dicho modelo, han podido implementar distintas políticas para el manejo y conservación del agua de la región.

Gedeon *et al.*, (2007), realizaron un modelo regional de agua subterránea en el noreste de Bélgica. Desde 1975 se estudia la posibilidad para disponer de desperdicios radioactivos de alto nivel en la formación Boom Clay en Mol, Bélgica. Para ello, los autores realizaron un modelo utilizando el código de MODFLOW 2000 para realizar una actualización de los estudios previos y obtener mejoras en el entendimiento del flujo regional, mejorar la calibración de los parámetros hidráulicos de la formación Boom Clay y los acuíferos adyacentes con la finalidad de aplicar la nueva información del sitio y simular el comportamiento transitorio de los acuíferos. Para la simulación, emplearon dos casos: uno

hipotético, esto es, el funcionamiento natural del acuífero (sin bombeo) y un segundo, en el cual se asume la continuidad del bombeo actual (hasta ese momento).

El estado alarmante en que se encuentra el acuífero del valle de Querétaro, debido a que la extracción del agua subterránea ha provocado un acelerado descenso en los niveles de la misma, el gobierno de ese Estado propuso la alternativa de sustituir una cantidad significativa del agua subterránea del agua utilizada en la ciudad de Querétaro con agua del Río Extóraz ubicado a 100 km. de la ciudad, mediante la construcción de una presa. Por lo anterior, Herrera *et al.*, (2007) evaluaron el impacto de tal estrategia sobre los niveles de agua subterránea utilizando un modelo numérico de la dinámica de flujo subterráneo y el impacto que tendría la construcción de la presa en los abatimientos del agua subterránea; con base en sus resultados, propusieron un programa de monitoreo de los niveles del agua subterránea para evaluar el comportamiento del acuífero durante la operación de la presa. Para el modelo numérico de flujo utilizaron el simulador Princeton Transport Code (PTC), el cual resuelve ecuaciones diferenciales parciales que describen el flujo y el transporte de contaminantes. PTC utiliza el método de elemento finito (en la horizontal) y diferencias finitas (en la vertical) para la discretización de ecuaciones. Definieron una malla triangular que en las zonas con mayor densidad de pozos es más refinada. La malla consta de 6,676 nodos y 13,066 elementos y el modelo es bidimensional. Para la calibración, utilizaron 4 periodos de simulación entre 1985 y 1999. El modelo se corrió en estado transitorio con una condición inicial basada en datos de carga hidráulica de 1985. Se utilizaron fronteras de carga asignada y sin flujo.

La asignación de parámetros como: extracción por bombeo, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y recarga vertical, fueron tomados de estudios previos así como de información proporcionada por algunos organismos de abastecimiento de agua de la región. La información mencionada comprendió el periodo 1985-1999.

En la calibración del modelo se realizaron ajustes en los parámetros de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento.

Las predicciones del modelo consideraron un periodo de 27 años (2003-2030) dentro de consideraciones previstas por la CEAQ que es el organismo encargado de abastecimiento de agua en Querétaro. Para estas predicciones establecieron 4 posibles escenarios que contemplan las siguientes situaciones:

En el escenario 1, el volumen de extracción se mantiene constante, esto es, igual a las condiciones del año 2003. En el escenario 2, el volumen de extracción corresponde a la demanda considerada por la CEAQ menos el volumen generado por las fuentes alternas y por el reuso del agua. Con la presa Extóraz aportando 626 l/s en el 2009, 625 l/s más en el 2011 y 625 l/s más en el 2012. El escenario 3, el volumen de extracción corresponde a la demanda considerada por la CEAQ menos el volumen generado por las fuentes alternas y por el reuso del agua. Con la presa Extóraz aportando 1250 l/s en el 2009, 625 l/s más en el 2013 y 625 l/s más en el 2017. En el escenario 4, el volumen de extracción corresponde al considerado en el escenario 3 menos el volumen considerado por fuentes alternas y reuso del agua y sin el volumen de agua aportado por la presa.

Finalmente, llegaron a la conclusión que el modelo permite simular únicamente en forma aproximada el comportamiento del acuífero del valle Querétaro-Obrajuelo, ya que se desconoce la componente de los flujos verticales. Aun así, el modelo reproduce en forma adecuada las tendencias históricas de la piezometría en la mayoría de los pozos y por tanto, resulta útil para predecir los abatimientos promedio en el acuífero para diferentes políticas de extracción. En cuanto a los escenarios, pudieron establecer que existe una diferencia aproximada de 50 metros de abatimiento en los niveles del agua entre el escenario 4 (que no considera las aportaciones de la presa) y los escenarios 1, 2 y 3 (que si consideran las aportaciones de la presa), lo cual permite ver los beneficios que aporta la presa al acuífero.

Rojas (2007), desarrolló y calibró un modelo de flujo de agua subterránea en el acuífero La Pampa del Tamarugal (norte de Chile) para el periodo 1983-2004. Dicho modelo reprodujo las observaciones del campo de flujo y las componentes del balance de agua razonablemente bien. Se definieron 5 escenarios para evaluar la respuesta a diferentes situaciones de bombeo, mismos que muestran que las cargas de agua subterránea

continuarán decreciendo con las presentes (hasta ese momento) cantidades de bombeo descargadas. Para explicar las variaciones en los resultados del modelo debido a las incertidumbres en las cantidades promedio de recarga, se simularon recargas generadas de forma aleatoria con diferentes niveles de incertidumbre mismas que se hicieron sensibles en ciertas áreas, lo cual (menciona el autor), podría explicar comportamientos inusuales en las cargas de agua subterránea observadas en esas áreas.

Schlumberger Water Services (2007) llevó a cabo una investigación hidrogeológica en una futura cantera de agregados localizada en las colinas occidentales de la Sierra Nevada al norte de California, con la finalidad de conocer si existe disponibilidad de agua para los procesos mineros. El equipo, construyó y detalló un modelo geológico en 3 dimensiones como almacén para la simulación del flujo de las aguas subterráneas del lugar. El trabajo realizado por la compañía integró estrategias operacionales, técnicas y medioambientales para desarrollar una actividad minera óptima; y con la información proporcionada por la caracterización de los componentes hidrológicos se podrán predecir condiciones futuras del agua a través de la simulación de los sistemas de flujo.

Debido al clima árido de los Emiratos Árabes Unidos (EAU), se han presentado varios desafíos para mantener la sustentabilidad en el suministro de agua en sus diversos usos. Este país, tiene una de las capacidades más bajas en el mundo de recurso de agua debido a condiciones como: bajas tasas de precipitación, alta evaporación, ningún recurso fiable de aguas superficiales y un alto consumo per cápita; lo cual ha creado un desequilibrio en el suministro de agua y a su vez ha exigido y aumentado tendencias de distintas formas de obtener el recurso, recurriendo a actividades como la desalinización, recarga de acuíferos, reuso de agua y programas estrictos de conservación.

La compañía Schlumberger Water Services (2007) recomendó a Mubadala Development Company la adopción de un sitio de un acuífero de almacenamiento y recuperación. Para ello se hizo una recopilación de información hidrológica y geológica con lo cual conformaron una base de datos y posteriormente desarrollaron modelos hidrogeológicos tridimensionales. Finalmente, establecieron una viabilidad del proyecto con una eficiencia

del sistema final de un 88% (pudiendo almacenar aproximadamente 4 mil millones de galones), con lo que el gobierno del país ha adoptado el concepto de almacenamiento y recuperación en acuíferos como una solución estratégica para el almacenamiento de agua.

La fracción de lluvia que es anualmente recargada al agua subterránea está en función de varios factores como son las cantidades transitorias de precipitación, factores meteorológicos y geológicos, lo cual la hace muy difícil de estimar. En este estudio, Weiss y Gvirtzman (2007) utilizaron grandes registros (de 20 a 30 años) de precipitación y descarga para reconstruir el carácter transitorio de la recarga anual. Con dicha información calibraron el modelo numérico de flujo de agua subterránea, realizado en MODFLOW, para cuatro acuíferos cársticos (separados y posicionados) en Judea y Samaria, Israel.

Dentro de la modelación de agua subterránea también existen estudios de investigadores quienes se dedican a experimentar con los instrumentos de modelado, es decir, realizan manipulaciones de tipo numérico, geométrico (por ejemplo la manipulación de mallas de diferencias finitas o elementos finitos según sea el caso, definiciones de fronteras...) o de parámetros hidrogeológicos característicos que les permitan realizar los cálculos de manera que puedan obtener resultados más precisos y confiables, o inclusive solo por el hecho de facilitar el trabajo de cálculo matemático, hasta llegar a los casos en que se utilizan programas de cómputo no especializados en el modelado hidrogeológico.

El diseño de algoritmos para resolver los problemas de modelación de las aguas subterráneas beneficia para el mejor entendimiento de la naturaleza funcional de éstas (Ahlfeld, 2004).

Scanlon *et al.* (2003), realizaron un estudio con el propósito de evaluar diferentes aproximaciones equivalentes de medios porosos (masa y distribución) para la simulación del flujo regional de agua subterránea en un acuífero cárstico y evaluar la adecuación de esas aproximaciones. Dos modelos fueron aplicados al acuífero Barton Springs Edwards en Texas, E.U.A. Los autores mencionan que varias aproximaciones pueden ser utilizadas para simular el flujo de aguas subterráneas en sistemas cársticos, incluyendo el parámetro de

distribución medio poroso equivalente, parámetros de suelo y aproximaciones dobles de porosidad, así como fracturas discretas o conductos. Emplearon información de un periodo de 10 años (1989-1998), resultando ambos modelos bastante aproximados en la simulación de la descarga del manantial.

En el trabajo desarrollado por Mane *et al.* (2007), quienes desarrollaron una interfase entre un sistema de información geográfica (SIG) y MODFLOW que permite el fácil manejo de la gran cantidad de información necesaria para el modelado hidrogeológico y su introducción para su uso posterior en el sistema de modelado.

Un ejemplo en el cual se realizó un estudio de modelado hidrogeológico sin emplear un programa de cómputo especializado es el realizado por Ramírez (2007), quien aplicó y analizó un modelo numérico desarrollado en Microsoft Excel como una alternativa para conocer la dinámica de flujo del agua subterránea en la cuenca del Río Birrís en Cartago, Costa Rica. El investigador definió un modelo conceptual a partir de información como unidades geológicas e hidrogeológicas, litología, afloramiento de manantiales y drenajes superficiales de la zona. Para la solución se aplicaron diferencias finitas para resolver la ecuación de Laplace y además se hizo una comparación con un modelo estadístico para demostrar las ventajas del modelo numérico sobre el estadístico cuando se realiza un modelado de aguas subterráneas.

De acuerdo con un estudio realizado por McPhee y Yeh (2008), se pueden reducir los esfuerzos computacionales en la solución del manejo de problemas hidrogeológicos. Para dicho trabajo, remplazaron un modelo de flujo de agua subterránea manejado por una ecuación diferencial parcial con un simple modelo manejado con una simple ecuación diferencial, alcanzando la reducción con funciones empíricas ortogonales. Comparando sus resultados, obtuvieron que el análisis preliminar muestra variaciones en las cargas, buena aproximación en el flujo y con cierto grado en la sensibilidad de las cargas con respecto al bombeo. Entre las ventajas, los investigadores mencionan que es simple y fácil de resolver y que en muchas instancias cuanta con características dominantes del modelo original. En vista de tantas incertidumbres, la aproximación de una reducción del modelo puede ser

suficiente para propósitos de planeación; sin embargo, los investigadores hacen énfasis en que no se debe descartar la necesidad de modelos complejos cuando los detalles de análisis lo requieran.

Rühaak *et al.* (2008), aplicaron un método de transformación de coordenadas para las mallas ortogonales utilizadas en la modelación de agua subterránea, las cuales por su misma forma ocasionan que las mallas sean demasiado grandes o pequeñas y por lo tanto tienen un grado de imprecisión notable en determinados casos.

Una parte importante de las investigaciones sobre modelado hidrogeológico se enfocan a estudios de comportamiento de transporte de contaminantes o de algún tipo de elemento químico a través de los flujos de agua subterránea. En esta investigación no se abordó ese aspecto por lo cual no se muestra un panorama acerca de las investigaciones en ese ámbito.

En general, las aplicaciones de los modelos de aguas subterráneas ha sido representar y simular su comportamiento ante diferentes alternativas de aprovechamiento con base en lo cual se pueda elegir la opción más conveniente. La utilización de modelos para la simulación de acuíferos ha venido en aumento y se aplican a temáticas como estudios de drenajes agrícolas, redes de filtración en presas, movimiento de contaminantes, entre otros; y poco a poco se han ido consolidando como una fuerte herramienta de gestión.

2.4. Gestión de las Aguas Subterráneas.

El agua es un recurso esencial para la vida (elemento fundamental para los ecosistemas y requisito para la sustentabilidad ambiental), además de ser soporte del desarrollo económico y social de cualquier país. La desigualdad de su distribución natural en cualquier ámbito (mundial o regional), esta representada por la abundancia, la escasez e inclusive la inexistencia dependiendo de la región geográfica. A su vez, su disponibilidad depende de la dinámica del ciclo hidrológico, en el cual los procesos que lo componen (precipitación, evaporación, transpiración, escurrimiento) dependen del clima, las características del suelo, la vegetación y la ubicación geográfica (INEGI, 2008).

Es muy común que la gestión de los recursos hídricos no esté regida con criterios técnicos y científicos, a pesar de que se cuenta con una gran cantidad de conocimientos existentes (Vargas, 2004). Como consecuencia, existen repercusiones por el planteamiento de estrategias de aprovechamiento inadecuadas.

En México, la Conagua es el órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo que tiene como misión *“administrar y preservar las aguas nacionales y sus bienes inherentes para lograr su uso sustentable, con la corresponsabilidad de los tres órdenes de gobierno y la sociedad en general”* (Conagua, 2007).

La Ley de Aguas Nacionales establece que la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, solo podrá ser realizada mediante concesión o asignación otorgada por el Ejecutivo Federal a través de la Conagua por medio de los Organismos de Cuenca (o directamente por la Conagua cuando así le compete), de acuerdo con las disposiciones de la ley (Conagua, 2007).

El país está sectorizado en 13 Regiones Hidrológico-Administrativas las cuales se muestran en la tabla 2.1 incluyendo las concesiones y/o asignaciones de aguas subterráneas existentes en cada una de ellas.

La Ley de Aguas Nacionales establece que para otorgar los títulos de concesión y/o asignación, se tomará en cuenta la disponibilidad media anual de agua de la cuenca hidrológica o acuífero del que se pretenda realizar el aprovechamiento. Para ello, la Conagua está obligada a publicar las disponibilidades basándose en las metodologías y especificaciones que establece la norma NOM-011-CNA-2000 (Conservación del Recurso Agua).

Regiones Hidrológico-Administrativas		
Región		Concesiones y/o Asignaciones Aguas Subterráneas
I	Península de Baja California	9,508
II	Noroeste	18,592
III	Pacífico Norte	12,502
IV	Balsas	12,103
V	Pacífico Sur	15,918
VI	Río Bravo	36,026
VII	Cuencas Centrales del Norte	26,429
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	43,815
IX	Golfo Norte	12,383
X	Golfo Centro	16,236
XI	Frontera Sur	7,328
XII	Península de Yucatán	20,377
XIII	Aguas del Valle de México	2,125
Total		233,342

Tabla 2.1. Regiones Hidrológico-Administrativas.

Fuente: Conagua, 2007.

Existen vedas que prohíben o restringen la extracción de agua subterránea en diversas zonas específicas, por motivos de interés o utilidad públicos. En dichas zonas, los interesados en utilizar las aguas nacionales, solo pueden hacerlo mediante un título de concesión otorgado por la Autoridad. Para el caso de las aguas subterráneas, se tienen 145 zonas de veda vigentes las cuales fueron publicadas entre los años 1943 y 1988 (Conagua, 2007). Dependiendo de las condiciones del sitio le corresponde uno de los tipos de veda en específico. Dichos tipos son los siguientes (Conagua, 2006):

- **Veda Tipo I:** Zonas donde no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir o agotar los mantos acuíferos.
- **Veda Tipo II:** Zonas donde la capacidad de los mantos acuíferos solo permiten extracciones para uso doméstico.

- **Veda Tipo III:** Zonas donde la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para uso doméstico, industrial, de riego y otros.

Desde el punto de vista de administración del agua, la Conagua ha definido que en el Estado de San Luis Potosí existen 19 acuíferos, los cuales, de acuerdo con la ecuación de balance hídrico calculado para cada uno de ellos, se encuentran en estado subexplotado (I), en equilibrio (II) y sobreexplotado (III). A continuación se muestra una lista de los acuíferos con la información referente a su estado (respecto al balance hídrico) y si esta inmerso en zona de veda, ya sea completamente o parte de su área (tabla 2.2).

Acuíferos Administrativos en el Estado de San Luis Potosí			
Clave Conagua	Nombre	Estado	Veda
2401	Vanegas - Catorce	III	Si
2402	El Barril - Los Hernández	III	Si
2403	Salinas de Hidalgo	II	Si
2404	Santo Domingo	I	Si
2405	Ahualulco	II	Si
2406	Villa de Arriaga	I	No
2407	Cedral - Matehuala	III	Si
2408	Villa de Arista	III	Si
2409	Villa Hidalgo	I	Si
2410	Buenavista	I	No
2411	San Luis Potosí	III	Si
2412	Jaral de Berrios - Villa de Reyes	III	Si
2413	Matehuala - Huizache	*	No
2414	Cerritos - Villa Juárez	I	No
2415	Rioverde	III	Si
2416	San Nicolás Tolentino	I	No
2417	Santa María del Río	*	Si
2418	Huasteca Potosina	*	Si
2419	Tamuín	*	Si

Tabla 2.2. Acuíferos en el Estado de San Luis Potosí.

* Información no disponible

Fuente: INEGI, 2000.

Existen diversos organismos en el país que funcionan como mecanismos de participación. En tales organismos intervienen distintas dependencias y representantes de usuarios del agua, que se encargan de promover mediante distintas estrategias el aprovechamiento sustentable del agua.

Uno de estos organismos son los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS), que se crearon con el fin de lograr el aprovechamiento sustentable del agua en los acuíferos del país. Los COTAS se encargan de administrar los acuíferos por medio de estrategias que plantean de acuerdo a la situación específica que tratan.

2.4.1. Gestión del Acuífero de Rioverde, S.L.P.

El COTAS de Rioverde, al igual que cualquier otro del país, es un organismo conformado por usuarios del agua subterránea de distintos sectores, cuyo objetivo es coadyuvar en la elaboración y ejecución de programas que permitan la estabilización, recuperación y preservación del acuífero. El COTAS de Rioverde, está demarcado por la región contemplada por el acuífero administrativo del mismo nombre, está conformado por diversos usuarios como agricultores, industriales, organismos operadores, entre otros.

Dentro de sus funciones se incluye la de colaborar con la autoridad competente en la aplicación de la Ley de Aguas Nacionales, participar con propuestas de reglamentación y manejo del acuífero, promover la concurrencia de diversos recursos, diseño y promoción de programas educativos e informativos acerca de la importancia de las aguas subterráneas, atención de problemas específicos relacionado con el aprovechamiento de las aguas subterráneas (Conagua, 2007).

Dentro de las actividades que se están llevando a cabo recientemente y que están encaminadas por el COTAS de Rioverde se encuentran las pruebas de recarga inducida, la instalación de medidores además de proyectos de tecnificación en los sistemas de riego.

Respecto a las pruebas de recarga inducida, se han enfocado para la zona comprendida por El Refugio, El Jabalí, San Diego y La Loma. Tales actividades se llevaron a cabo durante el

año 2007, en donde utilizaron pozos inactivos que no han sido clausurados, a los cuales se les indujo agua de la Presa San Diego; han obtenido resultados satisfactorios, y están definiendo en forma un proyecto de recarga permanente.

Con el programa de instalación de medidores pretenden conocer de forma más precisa las cantidades de extracción y poder establecer medidas de control.

Capítulo 3

Área de Estudio

Hermann Rocha Escalante

3. Área de Estudio.

3.1 Introducción.

En el presente capítulo se muestran los aspectos físicos, los componentes geológicos, hidrogeológicos además del comportamiento histórico de los fenómenos meteorológicos de la zona de estudio. Con esta información, el presente capítulo fue estructurado de tal forma que cada una de las partes formara una pieza de un rompecabezas, que sirvió de base para el armado del modelo del acuífero que se presenta en el capítulo 4.

3.2. Localización.

Territorialmente, el acuífero administrativo de Rioverde (figura 3.1) abarca una superficie de 2,909.10 km², y se encuentra ubicado dentro del cuadrante localizado en las coordenadas UTM: 370000–425000 longitud oeste y 2485000–2495000 latitud norte; mismo que está delimitado por la poligonal cuyos vértices (en coordenadas geográficas) se presentan en la tabla 3.1.

Debido a que la mayor parte de la unidad hidrogeológica se encuentra dentro de los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández, la descripción del medio se realizó de forma particular con base en las características propias a dichos lugares.

Vértice	Longitud Oeste			Latitud Norte		
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos
1	100	5	20.4	22	31	40.8
2	99	59	49.2	22	26	9.6
3	99	55	37.2	22	26	6.0
4	99	54	10.8	22	18	7.2
5	99	49	19.2	22	15	28.8
6	99	47	13.2	22	11	20.4
7	99	50	56.4	22	10	48.0
8	99	44	31.2	21	58	30.0
9	99	46	22.8	21	47	24.0
10	99	55	4.8	21	44	42.0
11	100	1	48.8	21	38	9.6
12	100	10	33.6	21	46	8.4
13	100	7	51.6	21	48	21.6
14	100	13	1.2	22	3	28.8
15	100	7	4.8	22	10	48.0
16	100	8	52.8	22	30	0.0
1	100	5	20.4	22	31	40.8

Tabla 3.1. Coordenadas de los Vértices del Acuífero de Rioverde.

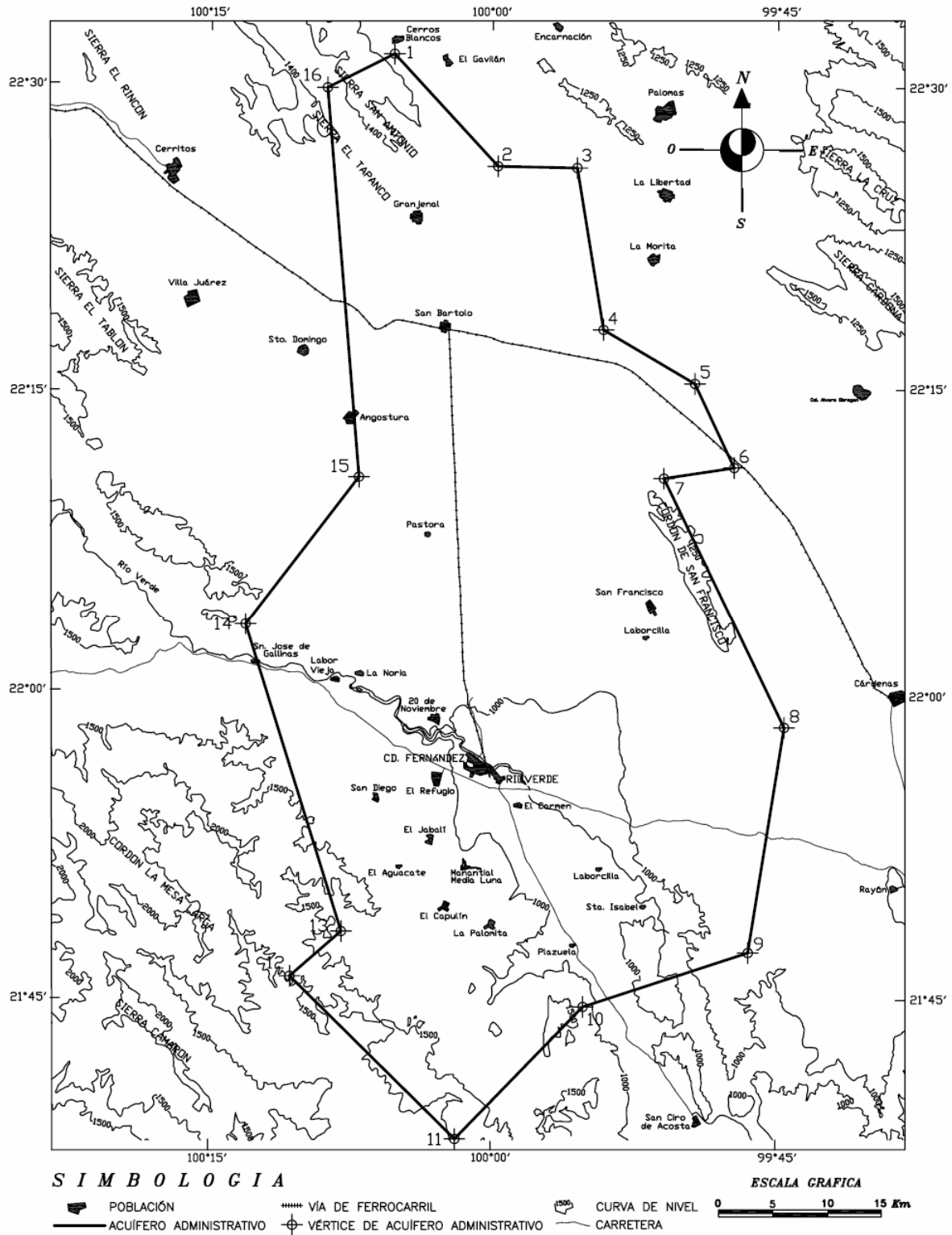


Figura 3.1. Acuífero Administrativo de Rioverde.

3.3. Geología.

3.3.1. Topografía y Fisiografía.

La región de Rioverde se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental. Esta Provincia ocupa parte de los Estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Querétaro, Tamaulipas, Hidalgo, Puebla y Veracruz. Sus montañas están conformadas por rocas sedimentarias de origen marino, calizas y lutitas, principalmente de la Era Mesozoica. La elevación promedio de la planicie es de 1,100 msnm, mientras que las sierras alcanzan elevaciones de 2,400 msnm (Conagua, 2007).

3.3.2. Geología General.

La cuenca del Río Verde se encuentra conformada por rocas sedimentarias e ígneas, incluyendo rocas sedimentarias de origen continental. Las rocas sedimentarias están constituidas por depósitos de edades del Cretácico al Reciente, que conforman las sierras altas que rodean la cuenca y las sierras bajas situadas en los márgenes de la planicie. En el aspecto estructural, forman plegamientos normales anticlinales normales y recumbentes, con buzamiento franco hacia el sureste (Alvarado, 1973).

Las rocas ígneas de la región están representadas por derrames de composición riolítica y basáltica, además de depósitos tobáceos de escasa extensión. En su mayoría, las lavas riolíticas, afloran en la zona suroeste de la cuenca donde cubren parcialmente a las rocas calizas de la Formación El Doctor. Los basaltos se encuentran distribuidos en las regiones nororiente y sur, con mayor extensión en esta última (Cardona, 1993).

Las características litológicas y estructurales de las rocas que cubren el Estado de San Luis Potosí, indican que existió actividad en diferentes eventos geológicos de tipo orogénico, aunados con actividad volcánica que dio origen a un relieve estructural, mismo que con el tiempo ha sido modificado por diferentes agentes como el fracturamiento, el movimiento de masas y el agua en sus diversos procesos de alteración (Ballín, 2003).

La Sierra Madre Oriental presenta una configuración actual que refleja parte de su historia geológica, su composición litológica y actividades de procesos erosivos. Los complicados perfiles del relieve están influenciados por el tipo de roca, a su respuesta ante agentes erosivos y los esfuerzos deformantes. A lo largo de todo el frente oriental de la Provincia, el relieve se torna escabroso y escarpado, reflejando las características de competencia de las calizas e incompetencia de las lutitas ante esfuerzos de deformación que dieron lugar a esas estructuras (Proyescos, 1972).

Los depósitos sedimentarios continentales se encuentran ampliamente distribuidos en la región, formando los valles y planicies que conforman el relleno de la cuenca del Río Verde. Dentro de tales depósitos se pueden distinguir los de origen mecánico o clásticos de ambiente lacustre y fluviales como las gravas, arenas, limos y arcillas; y los de tipo químico como las calizas lacustres, caliches, travertinos y tierras silíceas (Montañez, 1992).

3.3.3. Estratigrafía.

La columna estratigráfica del área de estudio está constituida por rocas sedimentarias del Cretácico Inferior representado por la Formación Guaxcamá del Barremiano-Aptiano, El Abra del Albiano-Santoniano, El Cretácico Superior por la Formación Tamasopo del Turoniano-Santoniano y la Formación Cárdenas del Campaniano-Maestrichtiano. El Oligoceno está representado por rocas volcánicas de composición predominantemente ácida como la unidad de riolita-dacita, toba riolítica, ignimbrita-riolita y el final del Oligoceno consiste de derrames de andesita y basalto conformando la unidad denominada Terciario Volcánico (Tv). Del Mioceno Superior al Plioceno, afloran unidades terrígenas continentales compuestas por conglomerado polimíctico y arenisca, y sobreyaciendo a éstas se tienen arena y limo. En el Cuaternario se tienen los depósitos de basalto, conglomerado polimíctico y por último se presentan los depósitos del aluvión en los arroyos, compuestos principalmente por grava y arena (UASLP, 2004).

3.3.3.1. Cretácico.

Formación Guaxcamá (Ki-y, Neocomiando-Aptiano). Es la secuencia evaporítica que se encuentra en la porción central de la Plataforma de Valles-San Luis Potosí. Consiste de los sedimentos más antiguos que afloran en el área. Está constituida de yesos y anhidritas bien estratificadas en capas de 5 cm a 50 cm de espesor. Se estima que tiene un espesor de 300 m.

Formación El Abra (Km-cz, Albiano-Cenomaniano). Esta formación está constituida por una secuencia de calizas de color gris-oscuro. Su espesor se estima en más de 1,500 m. Está expuesta en la porción centro y sur occidental del área de estudio; en gran parte de las sierras El Tablón y La Noria. Le sobreyace la Formación Tamasopo.

Formación Tamasopo (Ks-cz, Turoniano-Senoniano Inferior). Esta formación está constituida de calizas con microfósiles de color gris claro, de estratificación media (80 cm) con vetillas de calcita que no presentan direcciones preferenciales. Su espesor es variable, considerándose de 300 m a 400 m. Dentro del área de estudio se encuentra expuesta en la porción norte y nororiente; y en menor proporción en la parte sureste. La Formación Tamasopo descansa concordantemente sobre la Formación el Abra subyaciendo de igual forma con la Formación Cárdenas.

Formación Cárdenas (Ks-lu, Campaniano-Maestrichtiano). Esta formación está constituida por rocas arcillo-calcáreas que se encuentran aflorando en las cercanías de la estación del ferrocarril Cárdenas, S.L.P. Es una secuencia de lutitas de color gris a café amarillento; su espesor va de 80 m a 100 m. En el área de estudio está expuesta en la porción sur-oriental, en el Cordón de San Francisco y en menor proporción en la parte noroeste de la zona. Esta formación cubre a sedimentos de la unidad Tamasopo y subyace a depósitos recientes y a derrames ígneos.

3.3.3.2. Terciario.

Terciario Volcánico (Tv). En esta denominación se agrupan las emisiones ígneas félsicas y máficas del Terciario Superior representados por riolitas y basaltos con sus

correspondientes depósitos tobáceos de reducida extensión horizontal. Los afloramientos riolíticos se encuentran en su mayoría en la zona suroeste de la cuenca. Por su parte, las rocas basálticas se encuentran distribuidas en la región noreste y sur del área en la subcuenca de San Ciro, formando el cierre hidrográfico de la misma; además, existen pequeños afloramientos en la parte norte en forma de lomas y cerros aislados.

Rocas Intrusivas. Intrusivo Palo Verde (Tpv). Es una roca de color gris a café claro. No se conoce con exactitud su edad; sin embargo, puede abarcar gran parte del Oligoceno cortando a casi todo el paquete de rocas volcánicas extrusivas (Tv) presentes en la zona, aflorando únicamente en la porción suroeste del área.

3.3.3.3. Terciario Neógeno.

Conglomerado Polimíctico (Tcgp). Son depósitos producto de la erosión de las diferentes unidades que conforman las sierras cercanas a cada afloramiento y varían según el tipo de roca que predomina en la localidad, su composición consiste de fragmentos de caliza y una baja proporción de rocas volcánicas. El tamaño está comprendido desde arenas, gravas y bloques de un metro, se tiene como cementante una matriz arcillo-arenosa. Se calcula que puede tener un espesor entre 15 m y 100 m. Este conglomerado se encuentra expuesto en la porción sur-oriental y nor-occidental de la comunidad de El Jabalí; las mejores expresiones se tienen en los poblados de La Loma, San Diego y al norte de San Isidro de Vigas. Esta unidad se encuentra sobreyaciendo al paquete de rocas volcánicas del terciario y a su vez está cubierta por depósitos de basaltos, conglomerados y depósitos aluviales más recientes.

3.3.3.4. Cuaternario.

Basalto (Qb). A la unidad se le asigna provisionalmente una edad Cuaternario, pero podrían ser de edad Terciario y asociarse a un proceso de extensión. Esta unidad se encuentra expuesta en la porción nor-oriental y sur-oriental del área como en la Mesa Alta, así como en la parte centro occidental. Se localiza un afloramiento en el límite oriental de la zona, sobre la carretera Rioverde-Valles, que consiste de basaltos de estructura vesicular. Al oeste de la comunidad La Gavia, el afloramiento de basalto es de color pardo oscuro con

tonalidades. Otro afloramiento de basalto está localizado al noroeste de la comunidad El Progreso.

Conglomerado Polimíctico (Qcgp). Como unidades sedimentarias continentales representativas del Cuaternario, se presentan conglomerados y aluvión. Es común que se presenten los conglomerados como un material formado por fragmentos constituidos de rocas sedimentarias que varían en tamaño desde unos cuantos centímetros hasta un metro. Su forma es desde redondeada hasta subredondeada, el cementante es arcillo-arenoso mal consolidado sobreyaciendo discordantemente a las rocas más antiguas del Cretácico. Está expuesto en su mayoría al Norte y Oriente de la zona, encontrándose afloramientos pequeños al Sur y Este del área. El afloramiento de conglomerado polimíctico mal clasificado, que es el más grande en cuanto a extensión, pues se extiende desde la carretera Rioverde-Valles hasta el sureste de la comunidad de San Francisco, consiste de fragmentos de caliza, basalto y arenisca.

Aluvión (Qal). El aluvión está formado por arcillas y se encuentra en los cauces de los ríos y arroyos como producto de la erosión a la que se encuentran sometidas las rocas y sedimentos del área. Su distribución es amplia en la porción central de la región.

3.3.4. Estructura Geológica.

La estructura geológica puede reconstruirse a través de las rocas sedimentarias marinas del Cretácico que forman las partes altas de la cuenca y que a su vez encuentran su correspondencia con los fenómenos de plegamiento registrados en la secuencia.

Posterior a los eventos de plegamiento regional, hacia el final del Cretácico, los fenómenos denudatorios en las tierras emergidas, propiciaron el relleno de la cuenca hasta su configuración actual. Después de la intensa erosión registrada, inició el derramamiento de las emisiones basálticas que prácticamente establecieron el cierre superficial de la cuenca por el sur, tal como se registra en la actualidad. Finalmente el predominio de depósitos de caliche en la cuenca, se deben a la incidencia de medios climáticos de extrema aridez.

3.3.5. Suelos.

De forma específica, en la zona del Valle los suelos provienen de rocas sedimentarias con modos de formación aluvial, lacustre e *in-situ*, variando en espesor dentro de un rango de 15 cm a 150 cm, mismos que están limitados por un estrato calichoso de color blanquecino. Los suelos presentan en horizontes superficiales colores gris-claro a café-grisáceo o negro-cafesáceo, mientras que en horizontes profundos gris-cafesáceo a naranja-opaco. Las texturas dominantes varían de franco-arenosas a franco-arcillosas y arcillosas. En la margen izquierda del Río Verde, los suelos presentan texturas arenosas en la orilla del río, mientras que a mayores distancias del cauce las texturas son arcillosas y poco profundas. De esta forma, con base en la textura existen una gran variedad de suelos, desde franco-arenosos hasta arcillosos-montmorilloníticos. Debido al modo de formación y origen, existen zonas con problemas de manto freático somero y algunas otras presentan problemas de salinidad.

En la región, se identifican tres series de suelos (los cuales se describen a continuación) denominados como: Rioverde, Florida y Ciénega:

Serie Rioverde. Consisten en suelos aluviales medianamente profundos, con texturas de franco-arcillosas a arcillo-limosas y color negro-cafesáceo. Topográficamente es sensiblemente plano, lo que ocasiona una variación de eficiente a medianamente eficiente en el drenaje superficial; mientras que en el drenaje interno varía de eficiente a poco eficiente. Estos suelos se encuentran sobre un estrato arcilloso abundante en carbonatos y sulfatos.

Serie Florida. Son suelos de origen sedimentario, escasamente intemperizados; presentan una topografía inclinada, con modo de formación aluvial *in-situ*; son poco profundos y presentan color café-grisáceo en los horizontes superficiales; su textura es arcillosa con una regular cantidad de limos y se encuentran sobre un estrato calichoso de color blanquecino.

Serie Ciénega. Estos suelos presentan la característica de estar ubicados en las partes bajas de las depresiones formadas por la topografía ondulada, sin embargo, la pendiente general

es prácticamente plana; los suelos son de origen sedimentario con un modo de formación lacustre. En su mayoría, presentan manto freático somero y un drenaje deficiente tanto interno como superficial; la coloración superficial es negra en húmedo y café-grisácea en seco.

En la figura 3.2 se muestra el mapa geológico de la región.

3.4. Clima.

El clima de la región está catalogado dentro del clima seco estepario (**BShwg**), que según la clasificación de climas de García (1974) se traduce de la siguiente manera: **B**, representa un clima seco; **S**, indica una vegetación de tipo estepario; **h**, constituye un régimen caliente, con una temperatura media anual mayor a los 18 °C; **w**, indica lluvias predominantes durante el verano; y **g**, que la temperatura media máxima se presenta con anterioridad al solsticio de verano.

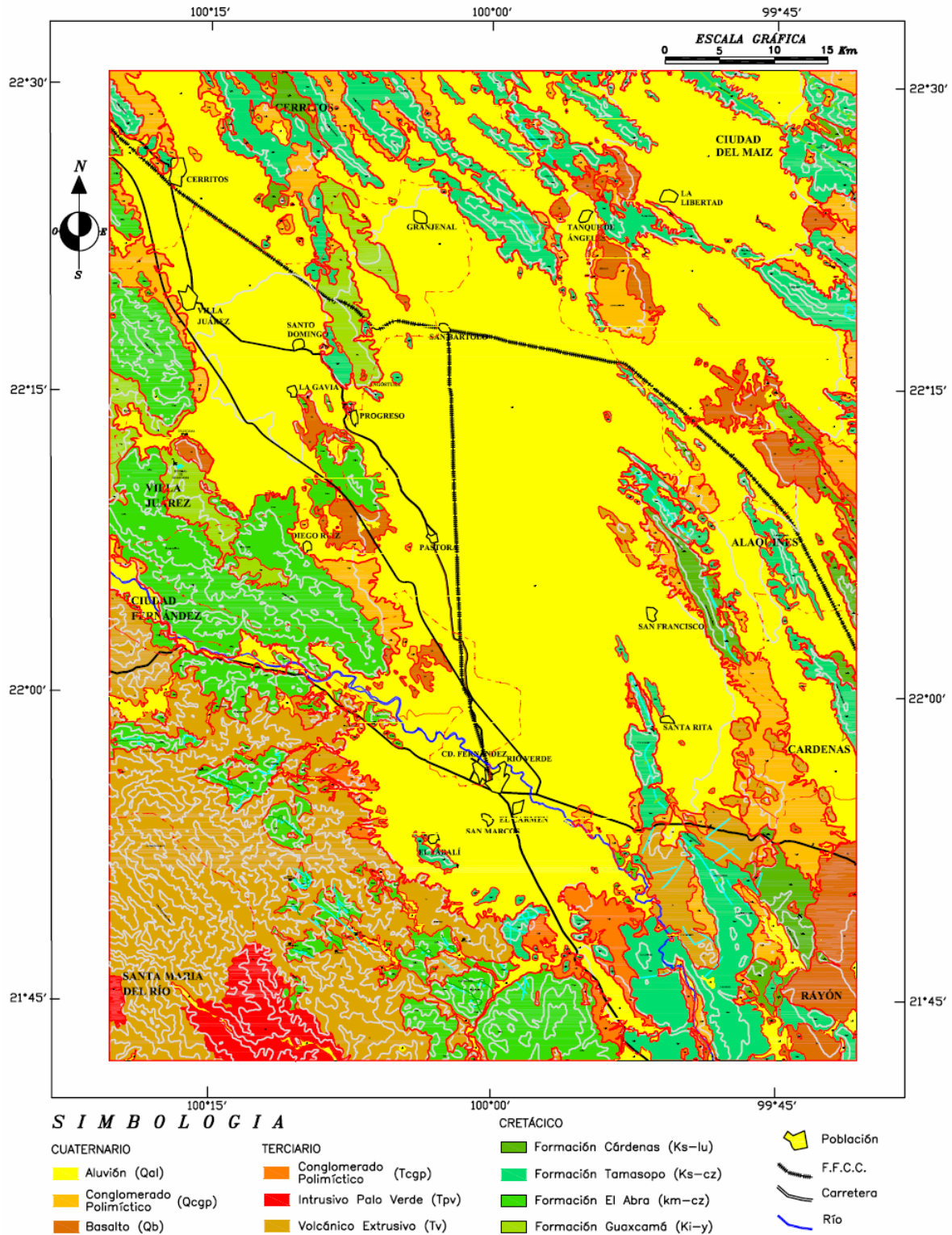


Figura 3.2. Mapa Geol6gico (Modificado de UASLP, 2004).

Para los análisis de Precipitación y Temperatura se utilizó el método de los Polígonos de Thiessen, contemplando la información de 7 estaciones climatológicas cuyos datos fueron obtenidos de Conagua (2007). A continuación se muestra la tabla 3.2 con la información correspondiente a las estaciones consideradas para el análisis, así como los polígonos de Thiessen propuestos con base en las mismas y empleadas para los distintos cálculos (figura 3.3). En la tabla 3.3 se presentan las áreas de los polígonos así como del área de influencia (área efectiva) de cada estación dentro de los límites del acuífero administrativo.

Estaciones Climatológicas		
Estación	Longitud Oeste	Latitud Norte
La Libertad	412513	2478312
Paso de San Antonio	357563	2435541
Pastora	390680	2447454
Pedro Montoya	416184	2394165
Rayón	433867	2416220
Río Verde	397756	2425266
Villa Juárez	369205	2469760

Tabla 3.2. Estaciones Climatológicas en el Acuífero de Rioverde.

Fuente: Campos (1993).

Estación Climatológica	Área Total del Polígono (km²)	Área Efectiva en el Acuífero (km²)
La Libertad	461.88	374.83
Paso de San Antonio	994.13	5.62
Pastora	1112.78	878.87
Pedro Montoya	882.09	162.69
Rayón	840.86	130.76
Río Verde	1245.26	1183.71
Villa Juárez	1237.63	172.62
Suma	6774.63	2909.10

Tabla 3.3. Áreas Totales y Efectivas de los Polígonos de Thiessen.

3.4.1. Precipitación Media Anual.

Con base en la información presentada por la Conagua (2007), correspondiente a la precipitación en la región de Rioverde y con base en los polígonos de Thiessen propuestos, se realizó el cálculo de la precipitación media en el acuífero administrativo para el periodo de 1980-2004, obteniendo un valor de 480.21 mm (tabla 3.4).

Estación Climatológica	Área Total (km ²)	Área Efectiva Acuífero (AEA) (km ²)	Precipitación Media Anual (PMA) (mm)	AEA x PMA
La Libertad	461.88	374.83	551.31	206647.53
Paso de San Antonio	994.13	5.62	626.40	3520.37
Pastora	1112.78	878.87	415.93	365548.40
Pedro Montoya	882.09	162.69	478.85	77904.11
Rayón	840.86	130.76	602.63	78799.90
Río Verde	1245.26	1183.71	475.58	562948.80
Villa Juárez	1237.63	172.62	588.60	101604.13
Suma	6774.63	2909.10		1396973.23
			Precipitación Media en Acuífero (mm)	480.21

Tabla 3.4. Precipitación Media Anual en la Región del Acuífero (1980-2004).

3.4.2. Temperatura Media Anual.

La temperatura promedio de la región es de 21.40 °C para el periodo 1971-2000, de acuerdo con los reportes del Servicio Meteorológico Nacional (2008).

Dicha temperatura fue obtenida aplicando el método de Polígonos de Thiessen (como en el caso de la precipitación), con base en la temperatura anual promedio (de los años mencionados) de las estaciones climatológicas de la región (tabla 3.5).

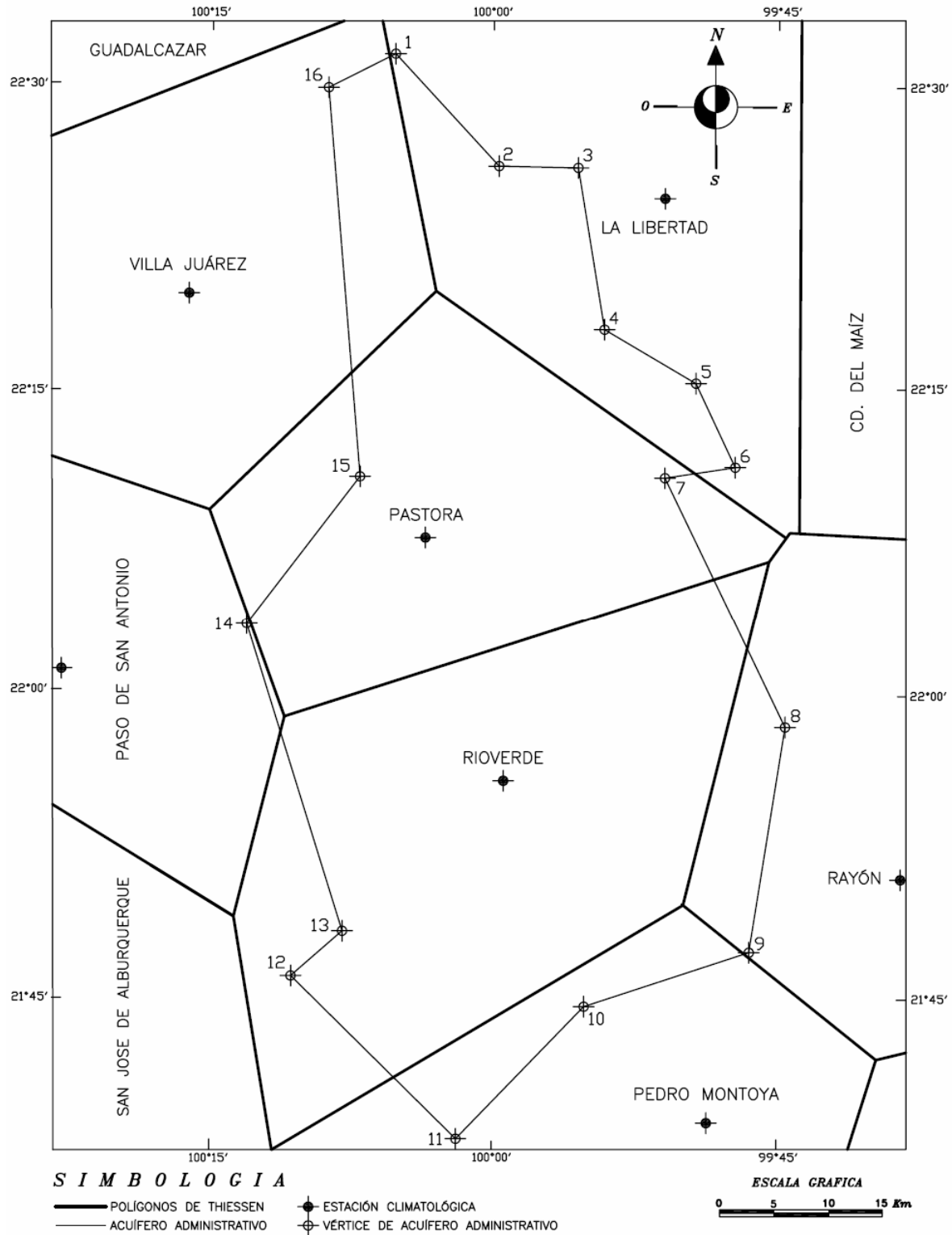


Figura 3.3. Polígonos de Thiessen.

La obtención de la temperatura promedio fue muy importante para cálculos posteriores como la evapotranspiración.

Estación Climatológica	Área Total (km ²)	Área Efectiva Acuífero (AEA) (km ²)	Temperatura Promedio (T) (1971-2000) °C	AEA x T
La Libertad	461.88	374.83	20.70	7758.98
Paso de San Antonio	994.13	5.62	20.90	117.46
Pastora	1112.78	878.87	21.00	18456.27
Pedro Montoya	882.09	162.69	22.30	3627.99
Rayón	840.86	130.76	21.40	2798.26
Río Verde	1245.26	1183.71	22.10	26159.99
Villa Juárez	1237.63	172.62	19.40	3348.83
Suma	6774.63	2909.10		62267.78
			Temperatura Promedio (°C)	21.40

Tabla 3.5. Temperatura Media Anual en la Región del Acuífero (1971-2000)

3.5. Escurrimiento Medio Anual.

Debido a la diversidad de características de comportamiento de drenaje superficial, en las diferentes zonas dentro de la extensión hidrogeológica de Rioverde, la poligonal del acuífero administrativo fue dividida en 14 regiones de aportación (figura 3.4).

La metodología que empleó la Conagua para el cálculo de los escurrimientos en cada una de las regiones (tabla 3.6) está basada en las experiencias referentes a la evaluación de tipos de suelos, coberturas y usos del mismo aplicadas por la United States Soil Conservation Service (USSCS). Dicho procedimiento es empleado en México y esta contemplado en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000.

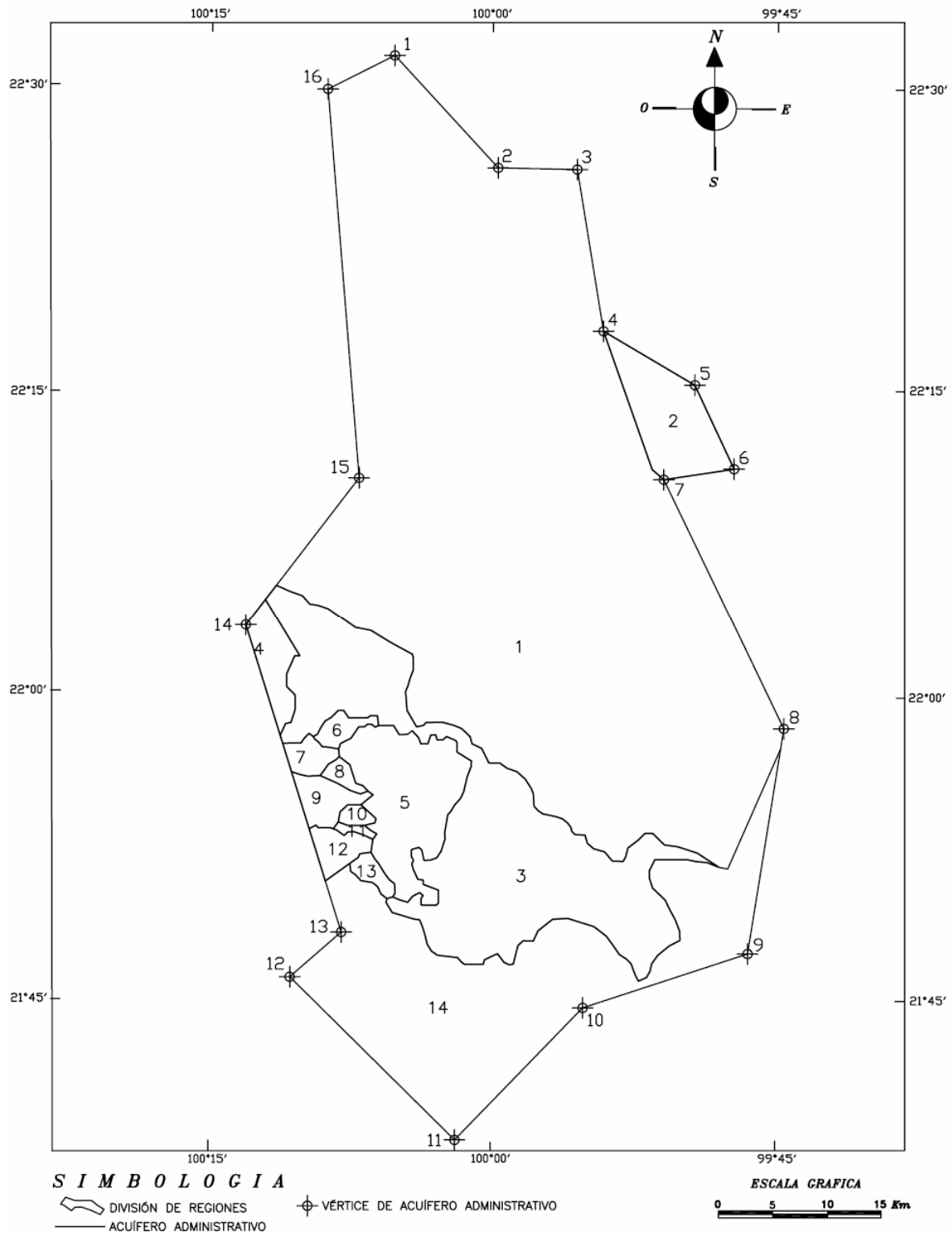


Figura 3.4. División de las Regiones del Acuífero Administrativo (Conagua, 2007).

Región	Área (km ²)	Hp (mm)	Volumen Precipitación (hm ³)	Ce (%)	Escorrimento (hm ³)
1	1812.71	468.06	848.45	10.25	86.97
2	48.91	420.80	20.58	9.23	1.90
3	320.16	501.18	160.46	10.96	17.59
4	53.34	455.19	24.30	10.51	2.55
5	84.90	517.46	43.93	9.80	4.31
6	9.22	517.46	4.77	9.60	0.46
7	16.13	517.46	8.35	11.74	0.98
8	4.91	517.46	2.54	10.82	0.27
9	30.28	517.46	15.67	9.04	1.42
10	3.89	517.46	2.01	10.01	0.20
11	2.18	517.46	1.13	10.58	0.12
12	23.34	517.46	12.08	9.18	1.11
13	6.35	517.46	3.29	11.50	0.38
14	492.78	363.03	178.89	13.90	24.87
Total	2909.10		1326.45		143.11

Tabla 3.6. Cálculo de Escorrimentos (1966-2004).

Hp = Precipitación media.

Ce = Coeficiente de escurrimiento.

Fuente: Conagua (2007).

Mediante el cálculo anterior, se tiene que para el periodo 1966-2004, existió una precipitación media anual de 1,326.45 hm³/año y un escurrimiento de 143.11 hm³/año.

3.6. Evapotranspiración Real Media Anual.

La estimación de la evapotranspiración fue obtenida utilizando la Fórmula de Coutagne, método que contempla la temperatura media anual y la precipitación anual (datos con mayor confiabilidad de medición en cualquier estación climatológica). Dicha fórmula es la siguiente:

$$\text{ETR} = \text{P} - \text{X P}^2$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración Real en m/año.

P = Precipitación en m/año.

$$X = 1 / (0.80 + 0.14 t)$$

t = Temperatura Media Anual en °C.

Es importante mencionar que la fórmula de Coutagne solo es válida para valores de P (m/año) comprendidos entre $1 / (8 X)$ y $1 / (2 X)$. En la tabla 3.7 se muestra el cálculo de la evapotranspiración:

Región	Área (km ²)	Hp (m)	Temperatura t (°C)	X	ETR (m)	ETR (hm ³)
1	1812.71	0.47	21.40	0.2634	0.41	743.84
2	48.91	0.42	21.40	0.2634	0.37	18.30
3	320.16	0.50	21.40	0.2634	0.44	139.27
4	53.34	0.46	21.40	0.2634	0.40	21.38
5	84.90	0.52	21.40	0.2634	0.45	37.94
6	9.22	0.52	21.40	0.2634	0.45	4.12
7	16.13	0.52	21.40	0.2634	0.45	7.21
8	4.91	0.52	21.40	0.2634	0.45	2.19
9	30.28	0.52	21.40	0.2634	0.45	13.53
10	3.89	0.52	21.40	0.2634	0.45	1.74
11	2.18	0.52	21.40	0.2634	0.45	0.97
12	23.34	0.52	21.40	0.2634	0.45	10.43
13	6.35	0.52	21.40	0.2634	0.45	2.84
14	492.78	0.36	21.40	0.2634	0.33	161.78
Total	2909.10					1165.56

1/(8X) =	0.47
1/(2X) =	1.90

Tabla 3.7. Cálculo de la Evapotranspiración (1966-2004).

Hp = Precipitación media.

ETR = Evapotranspiración.

Por lo tanto, mediante el cálculo presentado en la tabla 3.7 se pudo obtener que durante el periodo 1966-2004 la evapotranspiración media anual fue de 1,165.56 hm³/año.

Como se habrá podido notar, y de acuerdo con la fórmula de Coutagne, las regiones 2, 4 y 14 no aplican de forma congruente con el cálculo debido a que el valor de la precipitación no está dentro del rango considerado por el procedimiento. Sin embargo, esto no tiene consecuencias negativas respecto a los valores obtenidos, pues en general, el propósito de este procesamiento de información es tener una idea de las cantidades de agua que se evapotranspira dentro de la ecuación de balance de las aguas subterráneas del sistema.

3.7. Infiltración.

Para el cálculo de la infiltración (en el periodo 1966-2004), se aplicó la ecuación de balance:

$$\text{Infiltración} = \text{Precipitación} - \text{Esguerrimiento} - \text{Evapotranspiración}$$

Donde:

$$\text{Infiltración (hm}^3\text{/año)} = 1326.45 \text{ hm}^3\text{/año} - 143.11 \text{ hm}^3\text{/año} - 1165.56 \text{ hm}^3\text{/año}$$

$$\text{Infiltración} = 17.78 \text{ hm}^3\text{/año}$$

Nota. En el Anexo 1, se muestra la descripción de cada una de las regiones establecidas por Conagua (2007) además de los esguerrimientos correspondientes a cada región para el periodo 1966-2004.

3.8. Hidrografía.

El acuífero de Rioverde se localiza dentro de la subcuenca del Río Verde, la cual a su vez, queda comprendida dentro de la Región Hidrológica 26 denominada por la Conagua como Cuenca del Río Pánuco.

La corriente principal que drena el área de estudio se denomina Río Verde, que tiene una longitud de 186 km; se considera con régimen intermitente hasta Ciudad Fernández, donde, debido a la descarga del manantial Ojo de Agua de Solano se convierte en perenne (Ballín *et al.*, 2004). El Río Verde, nace a 35 km al oriente de la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., a una elevación aproximada de 2,600 msnm, en la cordillera que divide la Cuenca del Pánuco de la Región Hidrológica 37 (El Salado). Su curso general es este-sureste, sensiblemente paralelo al del Río Santa María, con el cual converge por la margen izquierda a una elevación de 1,250 msnm.

La poligonal del acuífero se localiza dentro de una cuenca de aportación al Río Verde, la cual se ubica dentro de las estaciones hidrométricas de Nogal Oscuro y Vigas. El parteaguas es muy claro en prácticamente todo el perímetro, el valle se localiza al centro de la cuenca y está rodeado por elevaciones de mayor magnitud que le dan ese confinamiento.

Los principales cauces aportadores del Río Verde son los siguientes:

Río Santa Catarina. Este río nace a 7 km al oriente sur-oriente del municipio Villa de Zaragoza, S.L.P., a una elevación de 2,300 msnm, bajo el nombre de Arroyo Puerto del Jacal y tiene un rumbo sur-oriente. Cambia bruscamente a un desarrollo sinuoso, con rumbo noreste y recibe aportaciones por el margen derecho del arroyo Santa Catarina, de ahí el nombre; aguas abajo y por el mismo margen, descargan los arroyos Cañada Grande y del Hacha. Finalmente, este río confluye con el Río Verde por su margen derecho a una elevación de 1,050 msnm, aproximadamente.

Río Caracol. Tiene rumbo oriente; colinda con la cuenca del Río Bagres y el Valle del Río Verde. Nace con el nombre de Arroyo Soyatal a 24 km al poniente sur-poniente de

Rioverde; recibe por el margen izquierdo al Arroyo Álamo, cambiando su nombre al de Río Caracol, confluyendo con el Río Verde al margen derecho de este a 9 km al norte de Pedro Montoya S.L.P., a una elevación aproximada de 850 msnm. Aguas arriba (3 km aproximadamente) de su confluencia con el Río Verde, el Río Caracol recibe varios escurrimientos por la margen derecha provenientes de la zona de Pedro Montoya, S.L.P., región constituida por un valle de aproximadamente 120 km² de extensión, drenaje poco definido y en el que se localizan las lagunas de Patos, Quelital y San Ciro.

Arroyo Rayón. Nace a una elevación de 1,500 msnm a 7 km al norponiente de Cárdenas, S.L.P., con rumbo general sur. Cruza varias planicies en la región de Rayón, S.L.P., y converge al Río Verde por su margen izquierdo a una elevación de 570 msnm.

Otros aportadores en la zona: El Refugio-Cd. Fernández. En esta zona, en la cual existe una gran concentración de pozos, sobresalen varios afluentes intermitentes de magnitud mediana y que representan una fuente de recarga en las regiones de abatimiento. Las corrientes de mayor importancia son los arroyos: Morales, Grande, El Sauz y San Rafael. Todas las corrientes mencionadas anteriormente, nacen a elevaciones alrededor de los 2,000 msnm en el sureste, sobre la serranía que sirve de frontera al valle. En general, el recorrido de las corrientes de los arroyos Morales y Grande es de sureste a norponiente, dirigiéndose de la zona serrana hacia el Río Verde, cruzando prácticamente de forma perpendicular la carretera San Luis Potosí-Rioverde. Por su lado, las corrientes de los arroyos El Sauz y San Rafael, tienen una trayectoria sureste-surponiente, mismas que descargan en la Laguna El jabalí.

En la parte norte del valle, solo existen escurrimientos efímeros, mismos que difícilmente aportan al Río Verde, ya que tanto la evapotranspiración y una parte mínima en recarga subterránea juegan un papel importante con respecto a la precipitación en esta región del valle dadas las condiciones climatológicas y de permeabilidad.

3.8.1. Río Verde, Manantial de la Media Luna y Manantial Los Peroles.

En el acuífero, se cuenta con registros hidrométricos del Río Verde y el Manantial de la Media Luna, con lo cual ha sido posible conocer los regímenes de escurrimiento del río principal de la cuenca, así como del manantial.

Las estaciones hidrométricas Nogal Oscuro y Vigas, prácticamente coinciden con los límites occidental y oriental del acuífero administrativo respectivamente. El escurrimiento aforado en la estación Nogal Oscuro (entrada del Río Verde a la región del acuífero) reporta un promedio anual de 65 hm^3 , mientras que la estación Vigas reporta un promedio anual de 189.90 hm^3 ; ambos promedios considerando el periodo 1980-2004 (Conagua, 2007). Lo anterior significa que existen aportaciones importantes en el tramo Nogal Oscuro-Vigas como resultado de escurrimientos propios de la cuenca, retornos agrícolas y aportaciones del acuífero.

Con respecto al caudal que aporta el Manantial de la Media Luna, se estima que el flujo base del mismo radica en los $135 \text{ hm}^3/\text{año}$; para el Manantial Los Peroles se estima un caudal de $15.77 \text{ hm}^3/\text{año}$. Ambos caudales son utilizados para la irrigación de 14,488 has de cultivo.

3.9. Vegetación.

La vegetación natural esta constituida por mezquites, cactus, huizaches, gobernadoras, pitayos y zacates. Grandes áreas, especialmente en la parte este de la cuenca se encuentra prácticamente sin vegetación. En la zona descubierta, el suelo seco está cubierto por pasto pequeño solo por algunos meses durante y después del periodo de lluvias. Por otra parte, los tradicionales mezquites cada vez han sido mayormente remplazados por la intensiva agricultura puesto que los suelos son ricos en humus además de ser profundos, características que los hacen bastante fértiles (Planer, 1999).

3.10. Evapotranspiración Real - Zona Norte.

En la zona norte del acuífero, esto es, la región de la margen izquierda del Río Verde, existen zonas con niveles someros de agua subterránea, las cuales pueden representar una salida potencial por evapotranspiración. De acuerdo con estudios de Conagua, (2007), se estimó para el año de 1980 una evapotranspiración real de 145.89 hm^3 y para el año 2006 de 5.72 hm^3 ; para ello utilizaron la información obtenida del evapotranspirómetro de la estación climatológica Río Verde y la información piezométrica de los años mencionados. Tomaron como evapotranspiración real un 75% de la evapotranspiración potencial calculada para la zona. Finalmente obtuvieron un valor de $75.81 \text{ hm}^3/\text{año}$ mediante el promedio de los valores calculados para los años 1980 y 2006.

3.11. Hidrogeología.

3.11.1. Estudios Geofísicos.

El objetivo de las prospecciones geofísicas es la identificación de estructuras geológicas en el subsuelo, así como, en lo posible, determinar sus dimensiones y propiedades físicas. Con base en las características físicas de las rocas, han sido desarrollados métodos geofísicos para detectarlas, siendo una de éstas la resistividad: característica propia de las rocas para impedir el paso de la corriente eléctrica. El método es denominado “resistividad eléctrica”, mismo que permite identificar los materiales geológicos del subsuelo mediante mediciones eléctricas tomadas en la superficie del terreno o dentro de pozos (Conagua, 2007).

Con la finalidad de establecer el modelo conceptual del acuífero de Rioverde, se empleó la información publicada en diferentes proyectos a través de los cuales se han inferido los perfiles y la conformación de las estructuras del subsuelo así como algunas de las características particulares en cada uno de los medios geológicos estudiados. Dicha información está comprendida por estudios geofísicos realizados HIDROTEC (1972), las secciones geofísicas reportadas en el trabajo recepcional de Alvarado (1973) y los estudios realizados por la Conagua (2007).

3.11.2. Unidades Hidrogeológicas.

Con el objetivo de clasificar en forma cualitativa las características de las formaciones geológicas presentes en el acuífero de Rioverde, se presentan las siguientes especificaciones de las unidades, con base en su permeabilidad (Conagua, 2007):

Formación Guaxcamá. Esta unidad es la de mayor antigüedad y está constituida por una alternancia de capas de caliza y yeso; tentativamente se les califica como impermeables a pesar de la presencia de yesos, pues se presupone que debido a su antigüedad, la presión litostática generada por la columna suprayacente, favorece la disminución del grado de solubilidad de los yesos. Sin embargo, en algunas regiones como en la zona norte del área (Cerritos-Villa Juárez), existen algunos manantiales de limitado caudal en los que el agua subterránea circula por esta unidad.

Formación El Abra. De forma general, esta unidad tiene un comportamiento permeable, confirmado por la existencia de manantiales que aportan un caudal considerable. Su amplia distribución, propicia zonas de captación favorecidas por conductos de disolución en las calizas.

Formación Cárdenas. Por sus características litológicas, esta unidad, definida por lutitas e intercalaciones de margas y areniscas funcionan como confinantes superiores de los cuerpos de calizas de las Formación El Abra, y como fronteras laterales de los rellenos de la cuenca, se consideran impermeables.

Terciario Volcánico. Esta unidad forma cuenta con una baja permeabilidad y se le puede asignar condición de permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Aluvión. Cuenta con una amplia caracterización litológica en la margen izquierda del Río Verde, están compuestas de tobas silíceas porosas, arcillas, clásticos de caliza y caliche, yesos conglomerados y travertinos. En general, este medio de características granulares se le considera de baja permeabilidad. Los depósitos en la margen derecha del río, se consideran permeables pues se tiene registrado un predominio de arenas gruesas y gravas.

3.11.3. Censo de Aprovechamientos.

De acuerdo con Conagua (2007), el censo de aprovechamientos es de 560 pozos destinados a los siguientes usos: 435 para uso agrícola, 29 para uso doméstico, 26 para uso público urbano, 17 para otros usos (recreativo, agrícola y doméstico, pecuario) y 53 sin identificación del tipo de uso (sin embargo se puede inferir que algunos de ellos son de uso agrícola pues reportan cantidades de agua destinadas a diversos cultivos).

Del censo mencionado se tiene que 62 pozos se encuentran inactivos, mientras que otros 112 de ellos no cuentan con información básica para ser aplicada en este estudio, por lo que actualmente el acuífero cuenta con 386 pozos que tienen actividad (de acuerdo con el censo en mención) y cuentan con la información mínima necesaria. La región El Refugio-San Diego concentra el mayor número de aprovechamientos. En la figura 3.5 se presenta la ubicación de los pozos de bombeo.

Aún cuando la región El Refugio-Cd. Fernández es donde se concentra la mayoría de los pozos, fueron contemplados dentro del censo, pozos de la zona norte del acuífero, abarcando las localidades de San Bartolo, La Pastora, La Noria, La Reforma, Ojo de Agua de Solano y 20 de Noviembre.

Es importante mencionar que de acuerdo con los cálculos presentados por Conagua (2007) en el censo de aprovechamientos, ellos ajustan los $75.37 \text{ hm}^3/\text{año}$ de extracción a los 386 pozos activos. Con este censo, la superficie irrigada asciende a las 6,000 has, sin embargo, de acuerdo con las áreas irrigadas presentadas por Charcas (2002), la superficie irrigada con agua de pozos asciende aproximadamente a las 23,963 has (dato utilizado en el modelo).

Entre las características reportadas en tal estudio, se encuentran las siguientes:

- Profundidades al nivel estático que oscilan entre 2.85 m. (mínimo) y 53.34 m. (máximo).
- Caudales aforados de 2 lps a 80 lps.
- Aproximadamente 170 pozos cuentan con medidor totalizador de flujo.

Nota. En el Anexo 2 se muestra el censo de pozos (simplificado) realizado por la Conagua (2007); dicho censo cuenta con la siguiente información: número de pozo (asignado para este trabajo), coordenadas UTM, altitud (obtenida en el modelo en el sistema de cómputo utilizado), caudal, tipo de aprovechamiento, condición actual, uso, volumen anual de agua descargado.

3.11.3.1. Hidrometría de las Captaciones.

Con base en el volumen total anual de agua extraída, se propuso la cantidad de días de bombeo, el cual se presenta en el Anexo 3.

3.11.4. Manantial de la Media Luna y Manantial Los Peroles.

Para el manantial de la Media Luna, Conagua (2007) reporta un caudal de 135 hm³/año, mientras que para el Manantial Los Peroles, el caudal se estima en 15.77 hm³/año. Con ambos caudales se irriga un área aproximada de 14,488 has (Charcas, 2002).

3.11.5. Retornos Agrícolas.

El proceso de infiltración es un desarrollo bastante complejo, que involucra un gran número de factores que influyen en tal fenómeno; entre dichos factores destacan la textura del suelo, el contenido de humedad inicial, el contenido de humedad de saturación, la cobertura vegetal, el uso del suelo, el volumen aire atrapado, la compactación, la temperatura (cambios y diferencias), la cantidad de precipitación o volúmenes de riego (Mijares, 2005).

Existe una gran variedad de métodos para realizar cálculos de infiltración; sin embargo, para la zona de estudio, no existe suficiente información que permita establecer de forma justificada porcentajes de infiltración de acuerdo a las características particulares en cada zona de la región.

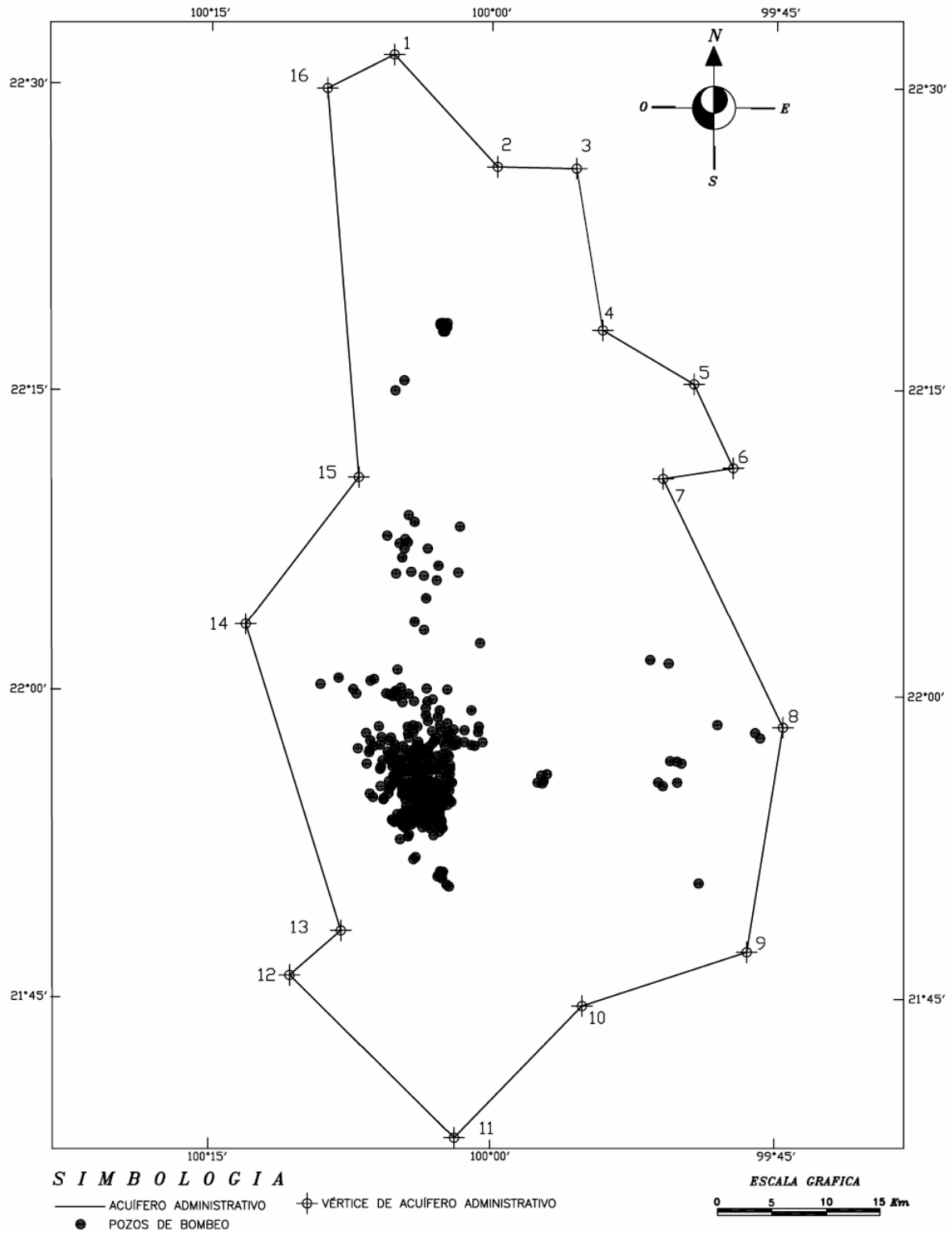


Figura 3.5. Ubicación de los Pozos de Bombeo (Conagua, 2007).

Por tanto, con base en los caudales extraídos y destinados a la irrigación de cultivos, y tomando en cuenta las prácticas de irrigación que se desarrollan en la región, se optó por proponer un 10% del total del volumen como retorno de riego. Lo anterior se traduce de la siguiente manera: de los 75.37 hm³/año que se extraen de los pozos para irrigar 23,963 has, se considera un retorno agrícola de 7.54 hm³/año (para la misma superficie). De la misma forma con el agua obtenida del Manantial de la Media Luna y Los Peroles (135 hm³/año y 15.77 hm³/año, para irrigar 14,488 has), se considera un retorno agrícola de 15.08 hm³/año para la superficie irrigada correspondiente.

3.11.6. Elevaciones del Nivel Estático.

Para la obtención de los niveles estáticos, se utilizó la siguiente información disponible previamente conjuntada (facilitadas por la Conagua-DLSLP):

- Elevaciones al nivel estático para el año 2006.
- Curvas de evolución del nivel estático 1980-2006.
- Curvas de evolución del nivel estático 1986-2006.
- Curvas de evolución del nivel estático 1996-2006.

El procedimiento consistió en obtener el valor correspondiente a la elevación del nivel estático del año 2006 para cada uno de los 386 pozos, lo cual se hizo utilizando un Sistema de Información Geográfica.

Posteriormente se utilizó el mismo procedimiento para obtener en cada uno de los pozos la evolución del nivel estático con respecto al 2006, para los años 1980, 1986 y 1996. Finalmente, mediante una suma o resta (dependiendo el caso de cada pozo), se obtuvieron las elevaciones del nivel estático para cada uno de los años mencionados. En el Anexo 4, se presentan los pozos con su correspondiente nivel estático en los años considerados en el estudio.

3.11.7. Pozos de Observación.

Los pozos de observación, son estructuras de aprovechamiento o experimentales en las que se puede medir el nivel del agua, entre otros parámetros (Ortiz, 1996).

Teórica y prácticamente deberían ser usados como pozos de observación, aquellos en los que se han hecho mediciones en campo de manera periódica. Desafortunadamente, para este estudio, no se logró clasificar la información de tal tipo. Es decir, se cuenta con mediciones de niveles en distintos años, sin embargo, existe una gran disparidad en los diferentes estudios, lo cual hace muy difícil la identificación de los aprovechamientos debido a que un mismo pozo puede tener diferente clave y coordenadas en dos o más estudios distintos, lo cual crea demasiada incertidumbre con respecto a las mediciones.

Como consecuencia de lo anterior, utilizando la base de datos generada en la obtención de los niveles estáticos para cada pozo en los años considerados en el estudio, se optó por elegir una serie de pozos de observación. Durante el proceso, se trató de utilizar como pozos de observación la mayor parte de los pozos de bombeo, con el objetivo de lograr la calibración óptima de acuerdo a la información con que se cuenta, conociendo en su totalidad el comportamiento del modelo ante las diferentes situaciones de extracción.

Por lo tanto, se utilizaron un total de 328 pozos de observación. 322 de ellos para los periodos de calibración 1980-1986, 1986-1996; y 6 pozos más (328 en total) para el periodo de calibración 1996-2006.

En el Anexo 4 se presentan los pozos de observación utilizados para el proceso de calibración.

3.12. Balance de Aguas Subterráneas.

En relación con la información conjuntada y mostrada anteriormente se ha propuesto el siguiente esquema de balance para el acuífero de Rioverde.

El balance de agua subterránea comprende el registro de las entradas, salidas y cambio en el almacenamiento, modificaciones que suceden en el volumen específico del acuífero. Los componentes que son necesarios conocer en el área para la definición del balance incluyen cambios en el almacenamiento, bombeo, caudal base, recargas, evapotranspiración, entradas y salidas de corrientes subterráneas, entre otras.

Comúnmente, el procedimiento utilizado para plantear la ecuación de balance consiste en determinar la recarga natural de agua subterránea con base en parámetros previos y a partir de la diferencia entre entradas y salidas. Dicha ecuación se justifica inicialmente bajo la condición de continuidad que establece:

$$\mathbf{Entradas = Salidas}$$

Donde, de forma general se queda determinado que:

Entradas = Precipitación.

Salidas = Ecurrimiento, Evapotranspiración, Infiltración.

Por lo tanto:

$$\mathbf{Precipitación = Ecurrimiento + Evapotranspiración + Infiltración}$$

Aplicando la ecuación de balance con respecto al acuífero de Rioverde se tiene que:

$$\mathbf{Infiltración + Retorno Agrícola = ETR Zona Norte + Bombeo + Flujo Base + E/S Subterráneas}$$

Donde:

Infiltración = Recarga Natural.

ETR Zona Norte = Evapotranspiración Real Zona Norte.

E/S Subterráneas = Flujo Subterráneo de Entradas y/o Salidas de la zona de interés.

Entradas (Precipitación) = Infiltración, Retorno Agrícola, E/S Subterráneas (-).

Salidas (Escorrentamiento, Evapotranspiración, Infiltración) = ETR Zona Norte, Bombeo, Flujo Base, E/S Subterráneas (+).

Con base en las cantidades calculadas y presentadas anteriormente para cada uno de los parámetros de la ecuación de balance, se tiene que:

Cantidades en: **hm³/año**

$$17.78 + (7.54 + 15.08) = 75.85 + 75.37 + (97.32 + 135.00 + 15.77) + \text{E/S Subterráneas}$$

$$\text{E/S Subterráneas} = 17.78 + (7.54 + 15.08) - 75.85 - 75.37 - (97.32 + 135.00 + 15.77)$$

$$\text{E/S Subterráneas} = - 358.91$$

Por lo tanto, se puede concluir que:

$$\text{Entradas Subterráneas} = - 358.91 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Con lo anterior, se tiene que de acuerdo con la ecuación de balance existe un déficit de $- 358.91 \text{ hm}^3/\text{año}$. El signo negativo indica, por lo tanto, que existen entradas adicionales a las que se consideran como ingreso de agua al sistema. Es importante mencionar que la cantidad de agua calculada, representa una idea general (más no una cantidad exacta) de las magnitudes de agua que están entrando al acuífero en forma de flujo subterráneo, como parte de la interacción con sistemas de acuíferos adyacentes en el sistema de flujo regional.

En la figura 3.6 se presenta el esquema con el balance de aguas subterráneas completo para el acuífero de Rioverde.

Nota. En el capítulo 4, se presentan las zonas que se consideraron tanto de recarga por infiltración, como por entradas de agua del régimen de flujo regional, así como el criterio utilizado.

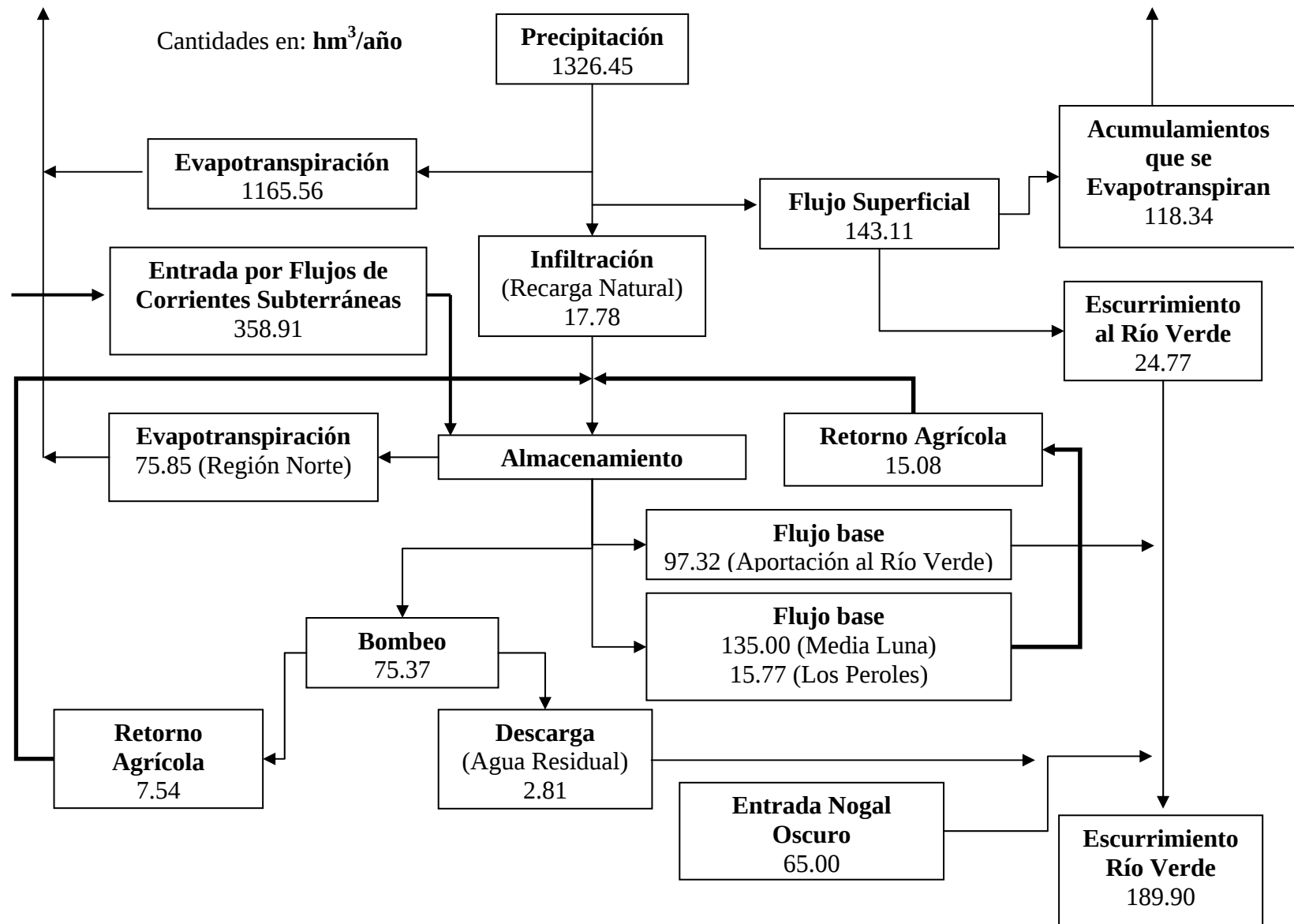


Figura 3.6. Diagrama del Balance de Aguas Subterráneas para el Acuífero de Rioverde.

Capítulo 4

Implementación y Calibración del Modelo

Hermann Rocha Escalante.

4. Implementación y Calibración del Modelo.

4.1. Implementación del Modelo.

4.1.1. Introducción.

Los sistemas de flujo subterráneo constituyen un elemento de suma complejidad, los cuales tienen sus leyes particulares de funcionamiento que están regidas de acuerdo a una gran gama de características específicas del medio geológico por el que se desplazan. Están comprendidos de un conjunto de componentes físicos, geométricos, acciones exteriores al sistema y leyes de funcionamiento. Dichos elementos, pueden ser expresados matemáticamente por una serie de parámetros y variables (Ministerio de Obras Públicas, 1972).

El primer paso en la planeación, implementación y proceso de un modelo de simulación de flujo de aguas subterráneas, es la elaboración del modelo conceptual del funcionamiento del sistema. El modelo conceptual de los sistemas de flujo de agua subterránea tiene como objetivo simplificar y organizar la información disponible. Para realizar la simulación del sistema, se tiene que partir de los componentes físicos, geométricos y de un estado inicial, mismos que son explicados a continuación.

4.1.2. Geometría del Sistema.

En la zona del acuífero de Rioverde, S.L.P., los componentes geológicos del subsuelo, señalan que es posible distinguir un acuífero libre heterogéneo en donde el agua subterránea se desplaza a través de tres medios: poroso, fracturado y cárstico. Para la definición de los espesores de cada uno de los medios, se utilizaron las secciones geofísicas presentadas por Alvarado (1973), Hidrotec (1972) y las secciones geofísicas de Conagua (2007).

La discretización del dominio de flujo se elaboró mediante una retícula a cada 2,500 m (a lo largo y ancho del acuífero administrativo) obteniendo con la utilización de un Sistema de Información Geográfica, los valores del nivel del terreno para cada vértice de la retícula. Posteriormente, con base en los estudios geofísicos antes mencionados, se asignaron los

valores correspondientes a los espesores de cada medio, prolongando algunos de ellos hacia los límites de la poligonal del acuífero, obteniendo de esta forma los espesores para cada medio en toda el área delimitada por la poligonal del acuífero administrativo. Con respecto a la base del sistema, se delimitó a una altitud de 500 msnm, debido a que se carecía de información que presentara datos más específicos.

4.1.3. Definición de los Sistemas de Flujo.

La información piezométrica disponible señala que existen varias componentes de flujo de la dirección de las aguas subterráneas en el plano horizontal, originándose en las partes de mayor altitud, esto es, en las zonas montañosas de la cuenca, en las partes sur y suroeste (principalmente), además de la región sureste, confluyendo hacia la zona del valle; muestra de ello son los caudales que presentan los manantiales (como el de La Media Luna y los Peroles con $135 \text{ hm}^3/\text{año}$ $15.77 \text{ hm}^3/\text{año}$ respectivamente) así como el flujo base que escurre a través del Río Verde, cuyo caudal se estima alrededor de $97 \text{ hm}^3/\text{año}$.

La principal característica del agua subterránea del sistema regional es su salinidad elevada (superior a los $2,500 \text{ mg/l}$) y que es de tipo sulfatada-cálcica. A través de su trayectoria, el agua subterránea del sistema de flujo regional, se origina y circula preferentemente por el medio cárstico, pero de acuerdo con la distribución de cargas hidráulicas puede pasar por el medio poroso en algunas partes de la planicie (Ballín *et al.*, 2004).

Otro sistema de flujo identificado en el acuífero está representado por el de tipo intermedio, que se desplaza principalmente por el medio poroso y en menor grado por el medio fracturado. La principal característica de este sistema, es su rendimiento, calificado como de medio a bajo, con agua subterránea de baja salinidad (menor a $1,000 \text{ mg/l}$) y de tipo bicarbonatada-cálcica (Ballín *et al.*, 2004).

4.1.4. Balance de Aguas Subterráneas.

Tal como se presentó en el capítulo anterior, el balance de aguas del sistema quedó contemplado de la siguiente manera (figura 4.1.):

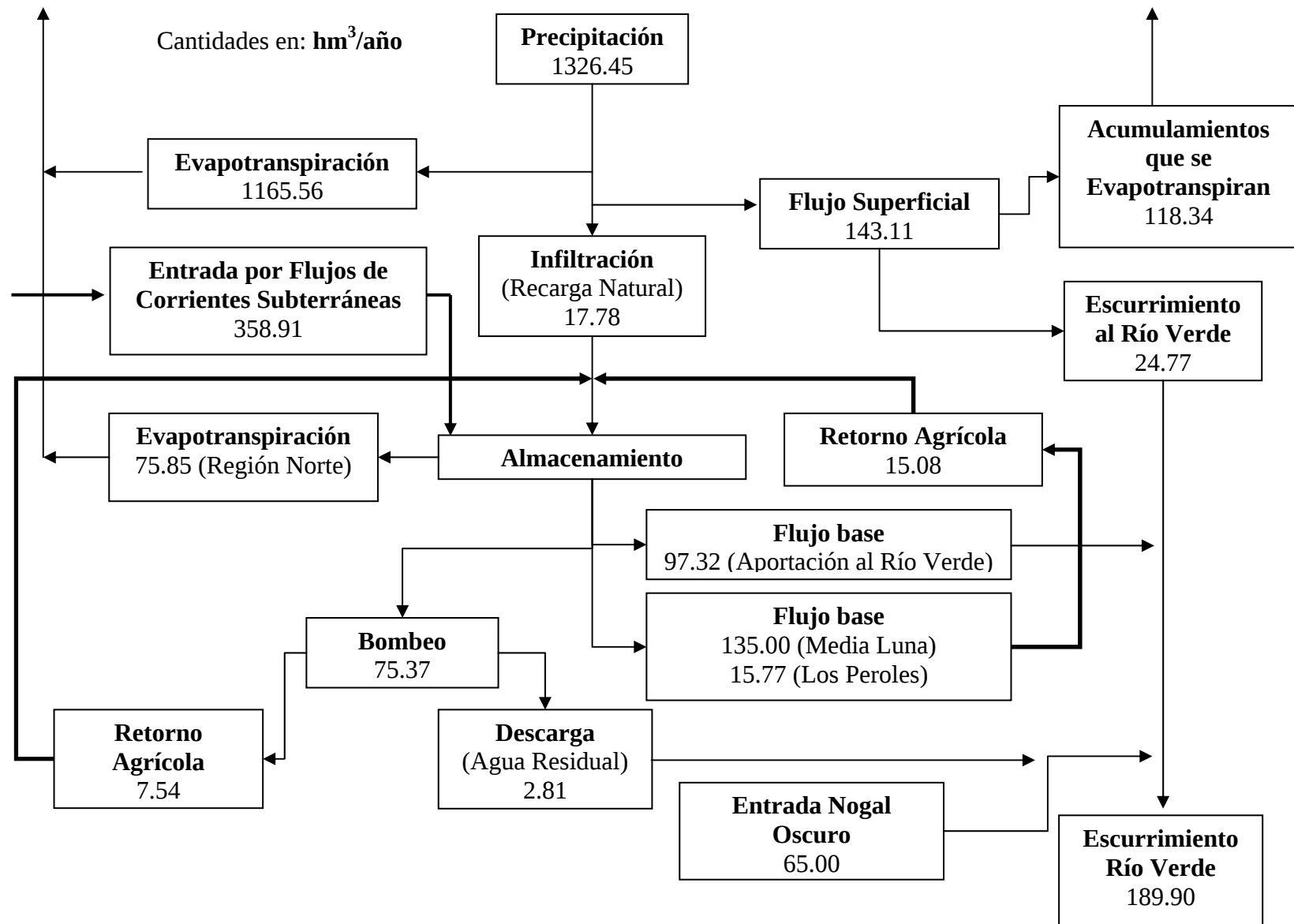


Figura 4.1. Diagrama del Balance de Aguas Subterráneas para el Acuífero de Rioverde.

4.1.5. Diseño.

La definición de un modelo matemático que describa los sistemas de flujo en el sistema del acuífero de Rioverde, es y será de gran importancia en la evaluación de alternativas de aprovechamiento a futuro con una perspectiva de sustentabilidad.

El modelo matemático utilizado para analizar el flujo de agua subterránea en el acuífero de Rioverde, es la ecuación tridimensional de flujo saturado en un medio poroso, la cual se expresa de la siguiente manera:

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

En donde: **K**, representa la conductividad hidráulica en las direcciones horizontal (x,y) y vertical (z); **h** es la carga hidráulica; **W** es el flujo volumétrico por unidad de volumen; **Ss** es el coeficiente de almacenamiento específico del medio y **t** el tiempo.

La ecuación anterior ha sido resuelta mediante el método de diferencias finitas, mismo que consiste en aproximar las derivadas que están integradas en un problema de ecuaciones diferenciales ordinarias de forma que se reduzcan a resolver un sistema de ecuaciones lineales.

En el esquema de la figura 4.2 se representa un acuífero de 3 x 3 celdas con una carga constante **h₀** y donde de la celda **C** se extrae una cantidad “**x**” de agua (**Q**); con ello se muestra en forma general el funcionamiento del sistema de diferencias finitas.

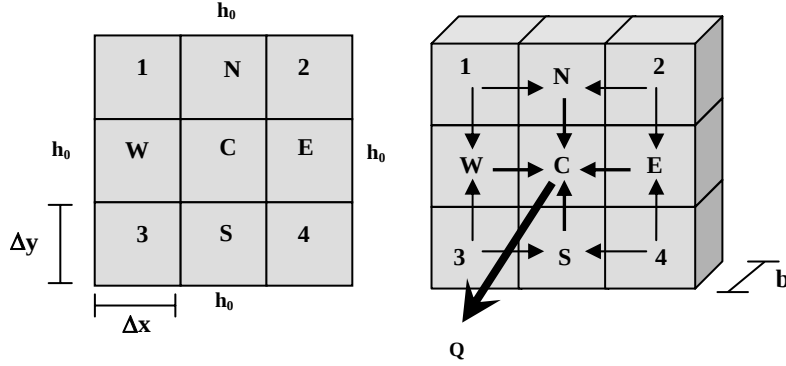


Figura 4.2. Representación de un Sistema de 3 x 3 Celdas.

De esta forma, mediante la Ley de Darcy, que describe el movimiento de una partícula líquida a través de medios porosos ($Q = K \cdot i \cdot A$), se puede establecer que por continuidad:

Gasto que Entra – Gasto que Sale = Cambio en el Almacenamiento

Por lo tanto, se puede establecer que para el **nodo C**:

$$Q_{wc} + Q_{ec} + Q_{nc} + Q_{sc} = S_s \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) \Delta x \Delta y b$$

Tomando en cuenta que:

$$Q = K \cdot i \cdot A$$

$$i = \frac{\partial h}{\partial L}$$

entonces,

$$K_x \frac{h_w - h_c}{\Delta x} \Delta y \cdot b + K_x \frac{h_e - h_c}{\Delta x} \Delta y \cdot b + K_y \frac{h_n - h_c}{\Delta y} \Delta x \cdot b + K_y \frac{h_s - h_c}{\Delta y} \Delta x \cdot b = S_s \frac{h_c^{j+1} - h_c^j}{\Delta t} \Delta x \cdot \Delta y \cdot b$$

j = Instante inicial.

$$\mathbf{j+1} = t + \Delta t$$

Considerando:

$$K_x = K_y$$

$$K \cdot b = T$$

$$S_s \cdot b = S$$

tenemos:

$$T \frac{h_w - h_c}{\Delta x} \Delta y + T \frac{h_E - h_c}{\Delta x} \Delta y + T \frac{h_N - h_c}{\Delta y} \Delta x + T \frac{h_s - h_c}{\Delta y} \Delta x = S \frac{h_c^{j+1} - h_c^j}{\Delta t} \Delta x \cdot \Delta y$$

Dividiendo por $\Delta x \cdot \Delta y$:

$$T \frac{h_w - h_c}{\Delta x^2} + T \frac{h_E - h_c}{\Delta x^2} + T \frac{h_N - h_c}{\Delta y^2} + T \frac{h_s - h_c}{\Delta y^2} = S \frac{h_c^{j+1} - h_c^j}{\Delta t}$$

Multiplicando por $\frac{\Delta t}{S}$ y haciendo $\Delta x = \Delta y$:

$$\frac{T \cdot \Delta t}{S \cdot \Delta x^2} (h_w - h_c) + \frac{T \cdot \Delta t}{S \cdot \Delta x^2} (h_E - h_c) + \frac{T \cdot \Delta t}{S \cdot \Delta y^2} (h_N - h_c) + \frac{T \cdot \Delta t}{S \cdot \Delta y^2} (h_s - h_c) = h_c^{j+1} - h_c^j$$

Recordando que $\Delta x = \Delta y$ y llamando al $\frac{T \cdot \Delta t}{S \cdot \Delta x^2} = \lambda$

$$\lambda(h_w - h_c) + \lambda(h_E - h_c) + \lambda(h_N - h_c) + \lambda(h_s - h_c) = h_c^{j+1} - h_c^j$$

Para el instante **j**:

$$\lambda h_w^j - \lambda h_c^j + \lambda h_E^j - \lambda h_c^j + \lambda h_N^j - \lambda h_c^j + \lambda h_s^j - \lambda h_c^j = h_c^{j+1} - h_c^j$$

$$\lambda h_w^j + \lambda h_E^j + \lambda h_N^j + \lambda h_s^j - 4\lambda h_c^j = h_c^{j+1} - h_c^j$$

$$\lambda h_w^j + \lambda h_E^j + \lambda h_N^j + \lambda h_s^j - h_c^j(1 - 4\lambda) = h_c^{j+1}$$

Obteniendo de manera similar la ecuación de cada nodo tenemos:

Nodo 1.

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_N^j + \lambda h_W^j + h_1^j(1 - 6\lambda) = h_1^{j+1}$$

Nodo N.

$$\lambda h_1^j + \lambda h_2^j + 2\lambda h_0^j + \lambda h_C^j + h_N^j(1 - 5\lambda) = h_N^{j+1}$$

Nodo 2.

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_N^j + \lambda h_E^j + h_2^j(1 - 6\lambda) = h_2^{j+1}$$

Nodo W.

$$2\lambda h_0^j + \lambda h_C^j + \lambda h_1^j + \lambda h_3^j + h_W^j(1 - 5\lambda) = h_W^{j+1}$$

Nodo E.

$$2\lambda h_0^j + \lambda h_C^j + \lambda h_2^j + \lambda h_4^j + h_E^j(1 - 5\lambda) = h_E^{j+1}$$

Nodo 3.

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_N^j + \lambda h_W^j + h_3^j(1 - 6\lambda) = h_3^{j+1}$$

Nodo S.

$$\lambda h_3^j + \lambda h_4^j + 2\lambda h_0^j + \lambda h_C^j + h_S^j(1 - 5\lambda) = h_S^{j+1}$$

Nodo 4.

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_S^j + \lambda h_E^j + h_4^j(1 - 6\lambda) = h_4^{j+1}$$

Hermann Rocha Escalante.

Por consiguiente, la matriz queda:

$$\begin{matrix}
 h_1 & h_N & h_2 & h_W & h_C & h_E & h_3 & h_S & h_4 \\
 \begin{bmatrix}
 1-6\lambda & \lambda & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \lambda & 1-5\lambda & \lambda & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \lambda & 1-6\lambda & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\
 \lambda & 0 & 0 & 1-5\lambda & \lambda & 0 & \lambda & 0 & 0 \\
 0 & \lambda & 0 & \lambda & 1-4\lambda & \lambda & 0 & \lambda & 0 \\
 0 & 0 & \lambda & 0 & \lambda & 1-5\lambda & 0 & 0 & \lambda \\
 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 1-6\lambda & \lambda & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & \lambda & 1-5\lambda & \lambda \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & \lambda & 1-6\lambda
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 h_1^j \\
 h_N^j \\
 h_2^j \\
 h_W^j \\
 h_C^j \\
 h_E^j \\
 h_3^j \\
 h_S^j \\
 h_4^j
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 h_1^{j+1} - 4\lambda h_0^j \\
 h_N^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\
 h_2^{j+1} - 4\lambda h_0^j \\
 h_W^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\
 h_C^{j+1} \\
 h_E^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\
 h_3^{j+1} - 4\lambda h_0^j \\
 h_S^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\
 h_4^{j+1} - 4\lambda h_0^j
 \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

Esta serie de ecuaciones esta programada y es resuelta mediante un programa de cómputo denominado MODFLOW. La versión comercial de este programa se denomina Visual Modflow y fue utilizada para la modelación de los sistemas de flujo en el acuífero de Rioverde.

4.1.5.1. Discretización Espacial.

La discretización espacial del área en planta (horizontal), se realizó mediante un arreglo de celdas rectangulares definidas con base en un número de filas y columnas entre los límites del área de interés. Los límites utilizados para el modelo del acuífero de Rioverde son los siguientes (en coordenadas UTM):

$X_1, Y_1 = 368908, 2387142$ ----- (Límite Inferior-Izquierdo).

$X_2, Y_1 = 428908, 2387142$ ----- (Límite Inferior-Derecho).

$X_1, Y_2 = 368908, 2497142$ ----- (Límite Superior-Izquierdo).

$X_2, Y_2 = 428908, 2497142$ ----- (Límite Superior-Derecho).

Capítulo 4. Implementación y Calibración del Modelo.

Inicialmente, el modelo fue discretizado en 24 columnas y 44 renglones, con dimensiones de 2,500 m x 2,500 m **(a)**. Sin embargo, debido a la distribución de parámetros posteriormente agregados como, la geología, los pozos de bombeo y observación, la recarga por precipitación, las corrientes subterráneas, la evapotranspiración y el Río Verde, se fue modificando la malla, obteniendo celdas con dimensiones de 833.33 m x 2,500 m **(b)** y 833.33 m x 833.33 m **(c)** (figura 4.3).

Respecto a la discretización vertical, el modelo hidrogeológico está representado por tres capas, que están integradas por los distintos medios geológicos (figura 4.4). Los espesores de cada una de las capas fueron asignadas con base en los estudios geofísicos disponibles.

De acuerdo con las características geológicas, en algunas partes las celdas fueron consideradas como inactivas, representado de esta forma las fronteras de no flujo.

4.1.5.2. Discretización Temporal.

El rango de tiempo seleccionado para realizar la calibración fue de 26 años, en régimen de flujo transitorio, considerando los años mencionados, del 1 de enero de 1980 al 31 de diciembre de 2005. El procedimiento se realizó en tres fases ya que la información disponible encaminó el proceso de esa forma.

Para el proceso de calibración, realizado con base en la comparación entre cargas observadas con respecto a las cargas calculadas, se establecieron 3 periodos de observación en los años 1986, 1996 y 2006, considerando como fecha del dato observado el 1 de Enero de cada uno de los años mencionados.

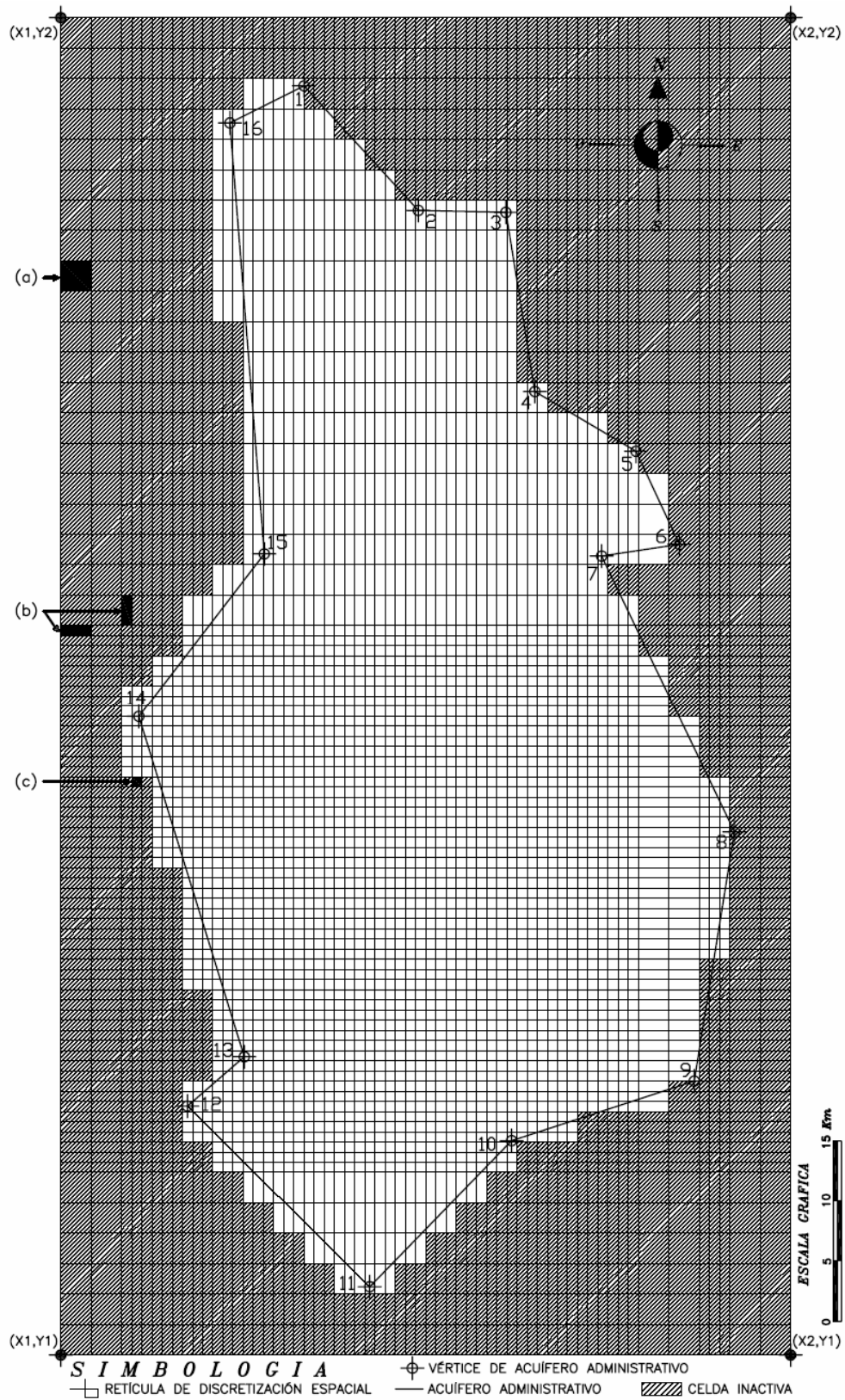
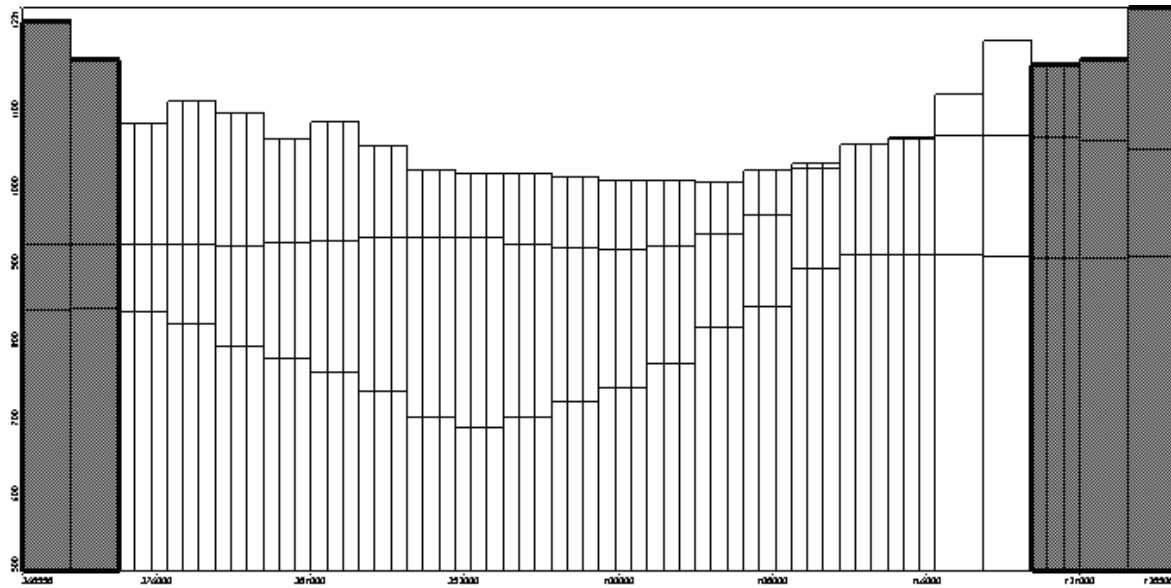
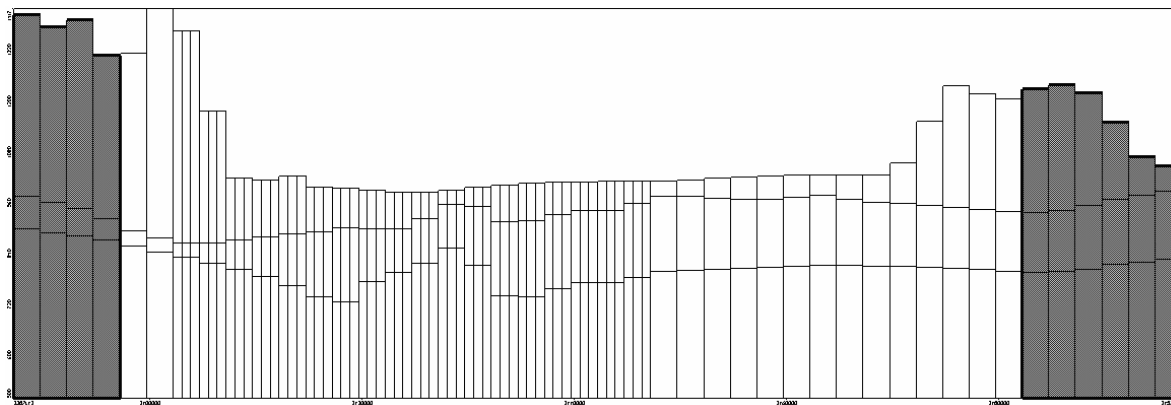


Figura 4.3. Discretización Espacial del Modelo (Vista en Planta).



(a)



(b)

Figura 4.4. Discretización Espacial del Modelo. Vistas en Perfil (Renglón (a), Columna (b)).

4.1.5.3. Conductividades y Coeficientes de Almacenamiento.

Las propiedades hidráulicas iniciales (tabla 4.1) asignadas en el proceso de calibración, corresponden a conductividad (K) tanto horizontal como vertical, el coeficiente de almacenamiento específico (S_s), rendimiento específico (S_y), porosidad efectiva y porosidad total. Cada uno de los tipos de roca y suelo por el cual están comprendidos los

Capítulo 4. Implementación y Calibración del Modelo.

medios se presentan en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 respectivamente, los cuales están basados en el plano geológico de la figura 3.2.

En el caso del aluvión en las capas superior e intermedia inicialmente se les asignaron valores de **conductividad hidráulica** con relación a algunas pruebas de bombeo presentadas en la tesis de Planer-Friedrich (1999). Respecto a los demás medios, conformados por las calizas, la roca volcánica, y el basalto, se les asignaron valores de conductividad hidráulica consultados en distintas bibliografías, de la misma forma se hizo para los parámetros con relación al **almacenamiento**, tomando en cuenta que en el caso del coeficiente de almacenamiento específico (Ss) se asignó un valor considerado dentro del rango de acuíferos de flujo libre.

	Conductividad			
Zona	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	
1	2.000E-06	2.000E-06	4.000E-08	
2	4.000E-05	4.000E-05	8.000E-07	
3	8.000E-07	8.000E-07	4.000E-05	
4	1.000E-06	1.000E-06	5.600E-08	
5	4.000E-06	4.000E-06	8.000E-08	
6	5.814E-05	5.814E-05	2.907E-03	
7	1.000E-06	1.000E-06	2.000E-08	
8	6.000E-05	6.000E-05	1.200E-06	
	Almacenamiento			
Zona	Ss (1/m)	Sy	Porosidad Efectiva	Porosidad Total
1	1.0E-04	0.200	0.200	0.20
2	1.0E-04	0.140	0.140	0.40
3	1.0E-04	0.200	0.200	0.35
4	1.0E-04	0.200	0.200	0.20
5	1.0E-04	0.140	0.140	0.40
6	1.0E-04	0.075	0.075	0.40
7	1.0E-04	0.200	0.200	0.20
8	1.0E-04	0.140	0.140	0.40

Tabla 4.1. Propiedades Hidráulicas Iniciales de los Medios Geológicos.

Descripción de las zonas de la tabla 4.1:

1. Aluvión (Capa 1).
2. Calizas (Capa 1).
3. Basaltos (Capa 1).
4. Aluvión (Capa 2).
5. Calizas (Capa 2).
6. Roca Volcánica (Capa 2).
7. Aluvión (Capa 3).
8. Calizas (Capa 3).

4.1.5.4. Régimen de Bombeo.

El régimen de bombeo de cada pozo se estructuró con base en el total de agua extraída al año y el gasto instantáneo reportado en el censo, obteniendo así, la cantidad de días al año de bombeo. Con base en la cantidad de días de bombeo se tomó la decisión de especificar si el pozo trabajaba la mitad del año (en este caso 183 días) o el año completo, mediante el ajuste del gasto diario, obteniendo finalmente el agua extraída por cada pozo según el censo disponible.

Nota. En el Anexo 3 se presenta el esquema inicial de bombeo establecido y utilizado para el proceso de calibración.

4.1.5.5. Pozos de Observación.

Con el propósito de realizar el proceso de calibración mediante el uso de pozos de observación comparando los niveles observados con los calculados por el sistema, se seleccionaron 328 pozos (aproximadamente el 85% del total), distribuidos a lo largo y ancho de las zonas de bombeo y se les asignó los valores de carga hidráulica correspondientes a los años 1986, 1996 y 2006. En el Anexo 4, se presentan los pozos de observación con sus respectivos valores de elevación del nivel estático en los años considerados.

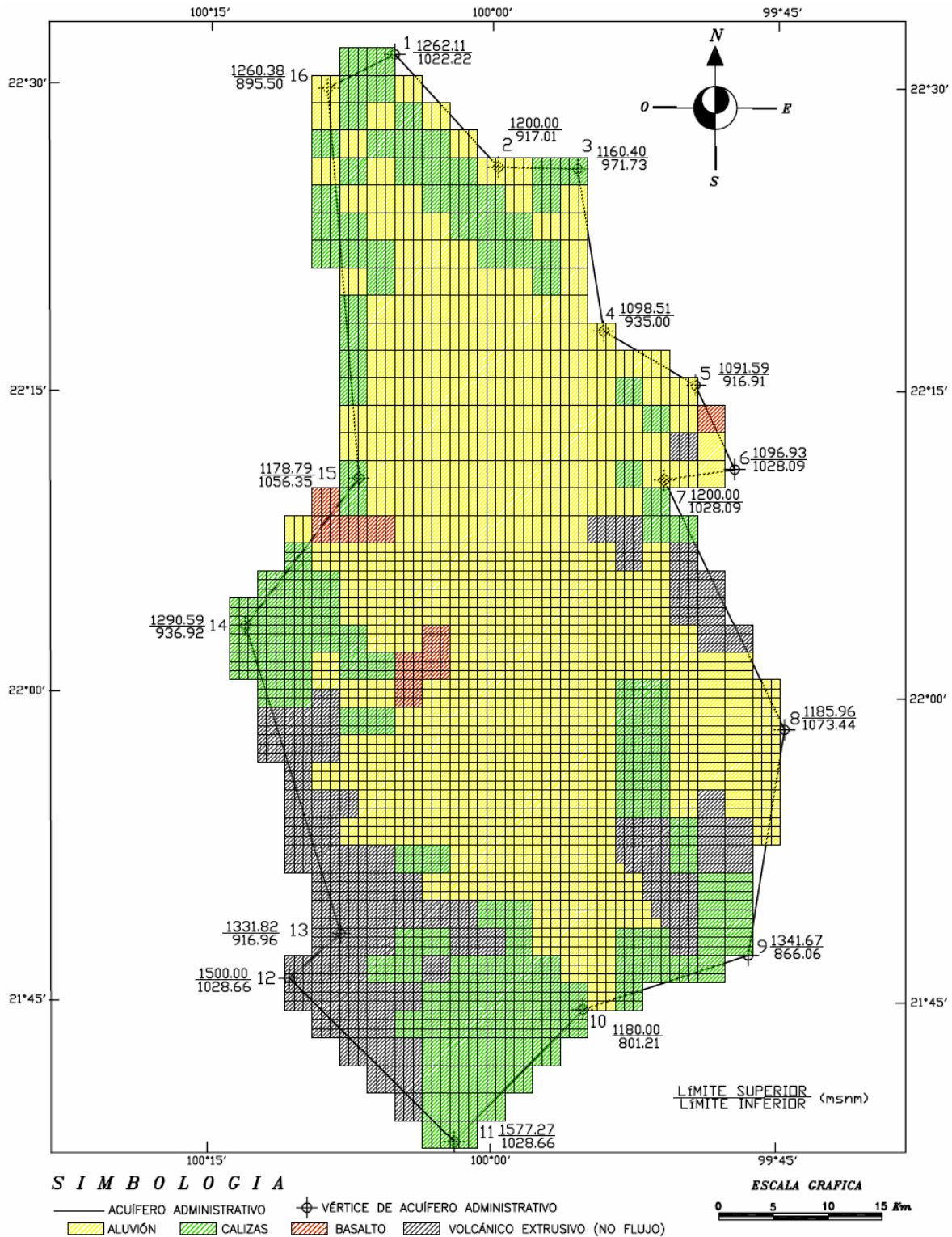


Figura 4.5. Distribución de los Medios Geológicos en la Capa Superior (Capa 1).

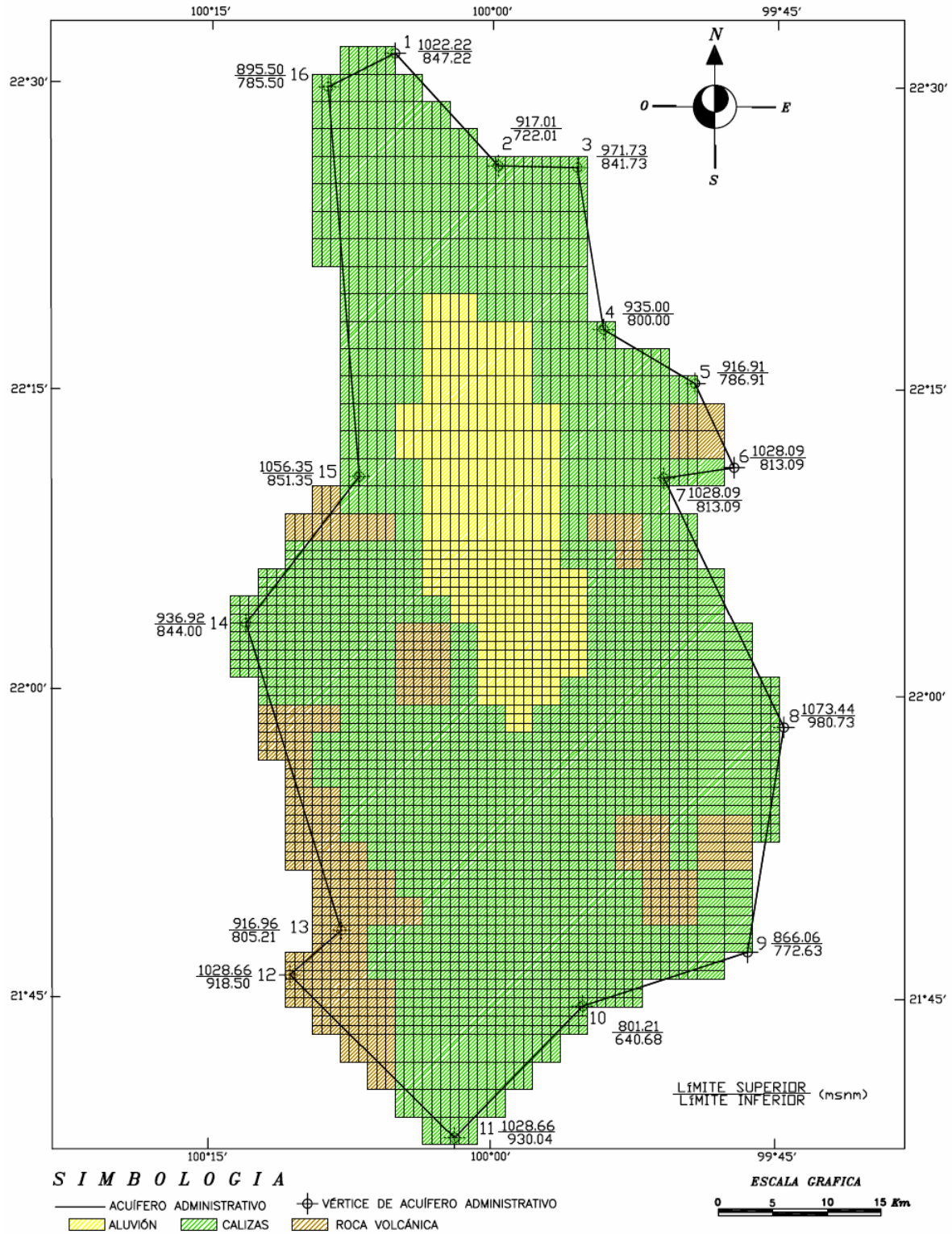


Figura 4.6. Distribución de los Medios Geológicos en la Capa Intermedia (Capa 2).

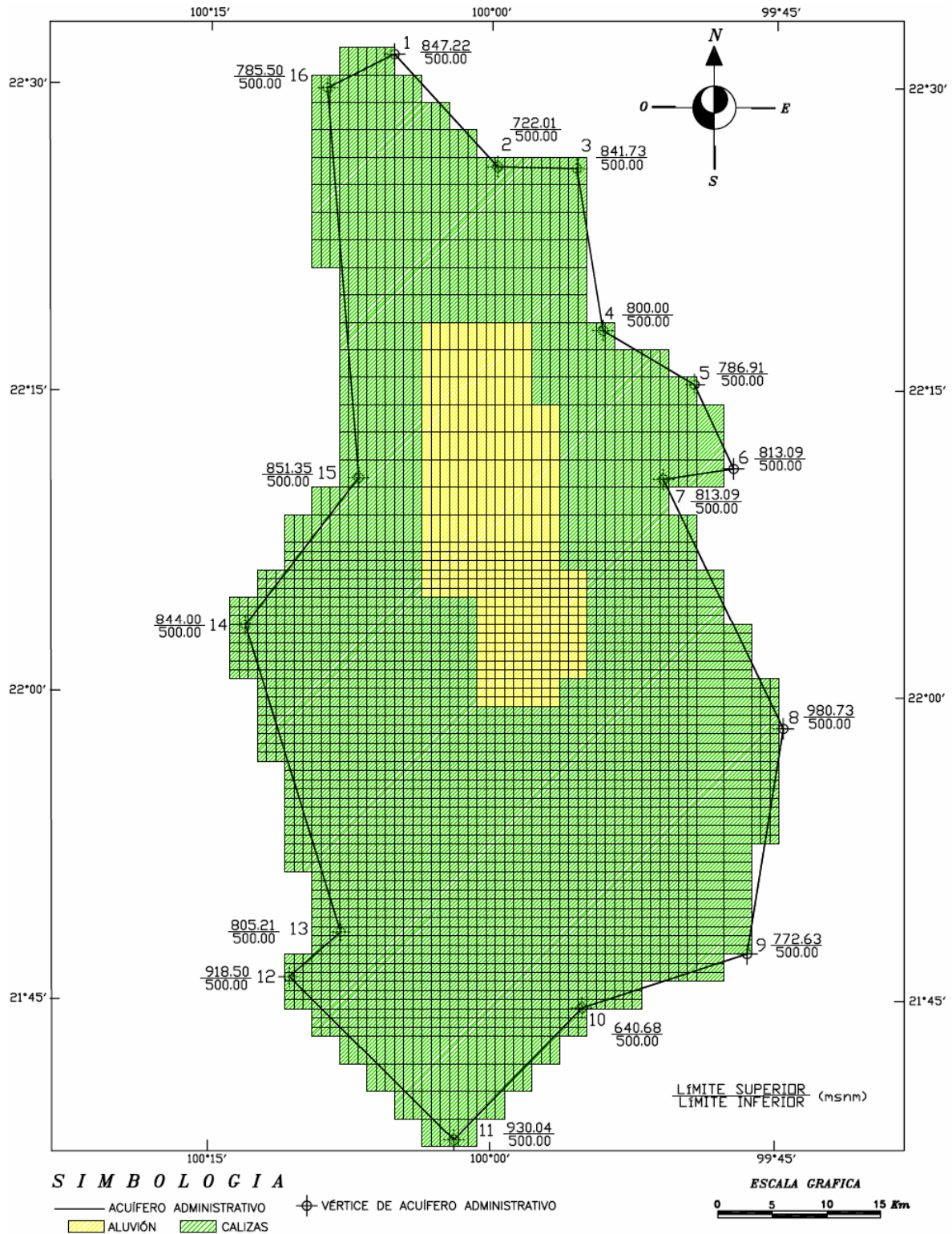


Figura 4.7. Distribución de los Medios Geológicos en la Capa Inferior (Capa 3).

4.1.5.6. Río Verde.

Dentro del programa de cómputo utilizado, la condición de “Río” se utiliza para simular la influencia de un cuerpo de agua superficial con respecto del flujo de agua subterránea (solo lo hace a través de la base del río). Los parámetros de esta condición fueron asignados realizando varias pruebas hasta obtener los valores que en el balance de masa se acercaran a las cantidades del escurrimiento mostrado en el balance de aguas subterráneas.

Es importante mencionar que para el escurrimiento total del Río Verde, se le restaron los 65 hm³/año que se registran en la estación Nogal Oscuro, así como los 24.77 hm³/año producto del escurrimiento por precipitación y los 2.81 hm³/año como resultado de las descargas de agua residual al río, lo anterior porque no existen condiciones que permitan simular dentro del programa tales escurrimientos. Es decir, solo se consideró como escurrimiento, la cantidad derivada como flujo base, cantidad que asciende a 97.32 hm³/año.

Los parámetros asignados al sistema para obtener un valor cercano a tal escurrimiento se muestran en la tabla 4.2. En la figura 4.8 se muestra el esquema que define los parámetros y en la figura 4.9 la representación del Río Verde en el sistema modelado.

Start Point		Nivel del Terreno (msnm) = 1081.20				
Start Time (Day)	Stop Time (Day)	River Stage (m)	Riverbed Bottom (m)	Riverbed Thickness (m)	Riverbed Kz (m/s)	River Width (m)
0	9490	1075.30	1075.20	0.10	7.3E-08	40.00
End Point		Nivel del Terreno (msnm) = 998.30				
Start Time (Day)	Stop Time (Day)	River Stage (m)	Riverbed Bottom (m)	Riverbed Thickness (m)	Riverbed Kz (m/s)	River Width (m)
0	9490	997.00	992.30	0.10	7.3E-08	40.00

Tabla 4.2. Parámetros Asignados al Río Verde.

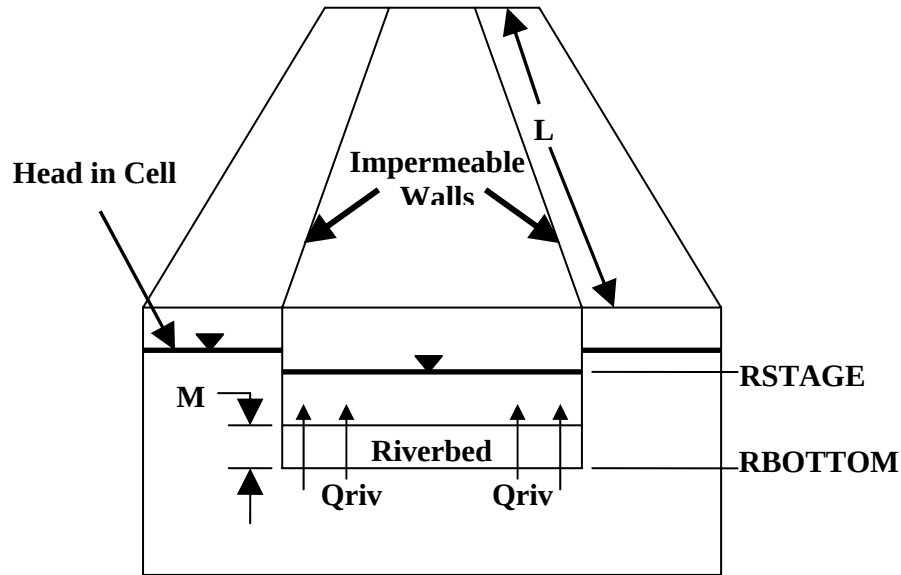


Figura 4.8. Esquema de los Parámetros del Río Verde.

4.1.5.7. Manantiales de la Media Luna y Los Peroles.

Conagua (2007) señala la importante aportación de agua que realiza el manantial de la Media Luna (alrededor de $135 \text{ hm}^3/\text{año}$). En este caso, el manantial fue simulado mediante un pozo de bombeo ubicado en las coordenadas UTM $x = 394373.9 \text{ m}$ y $y = 2417558 \text{ m}$ a una altitud de $1,001.05 \text{ m}$. La rejilla de captación, se propuso con una longitud de 445 m y está ubicada entre las altitudes 555 m y $1,000 \text{ m}$. El esquema de bombeo para el periodo de calibración constó de 26 años ($9,490$ días) y se propuso con un gasto $369,863 \text{ m}^3/\text{día}$, con actividad de bombeo durante los 365 días del año, con lo cual se obtiene el caudal aportado por el manantial ($135 \text{ hm}^3/\text{año}$).

Para el caudal de Los Peroles se tiene registrado un caudal de 500 lps (Conagua, comunicación directa, 2008). Al igual que el Manantial de la Media Luna, el manantial fue simulado mediante un pozo de bombeo ubicado en las coordenadas UTM $x = 407330 \text{ m}$ y $y = 2453672 \text{ m}$ a una altitud de $1,026.13 \text{ m}$. La rejilla de captación, se propuso con una longitud de 471 m y está ubicada entre las altitudes 555 m y 1026 m . El esquema de bombeo para el periodo de calibración constó de 26 años ($9,490$ días) y se propuso con un gasto de $43,200 \text{ m}^3/\text{día}$, con actividad de bombeo durante los 365 días del año, con lo cual se obtiene el caudal aportado por el manantial ($15.77 \text{ hm}^3/\text{año}$).

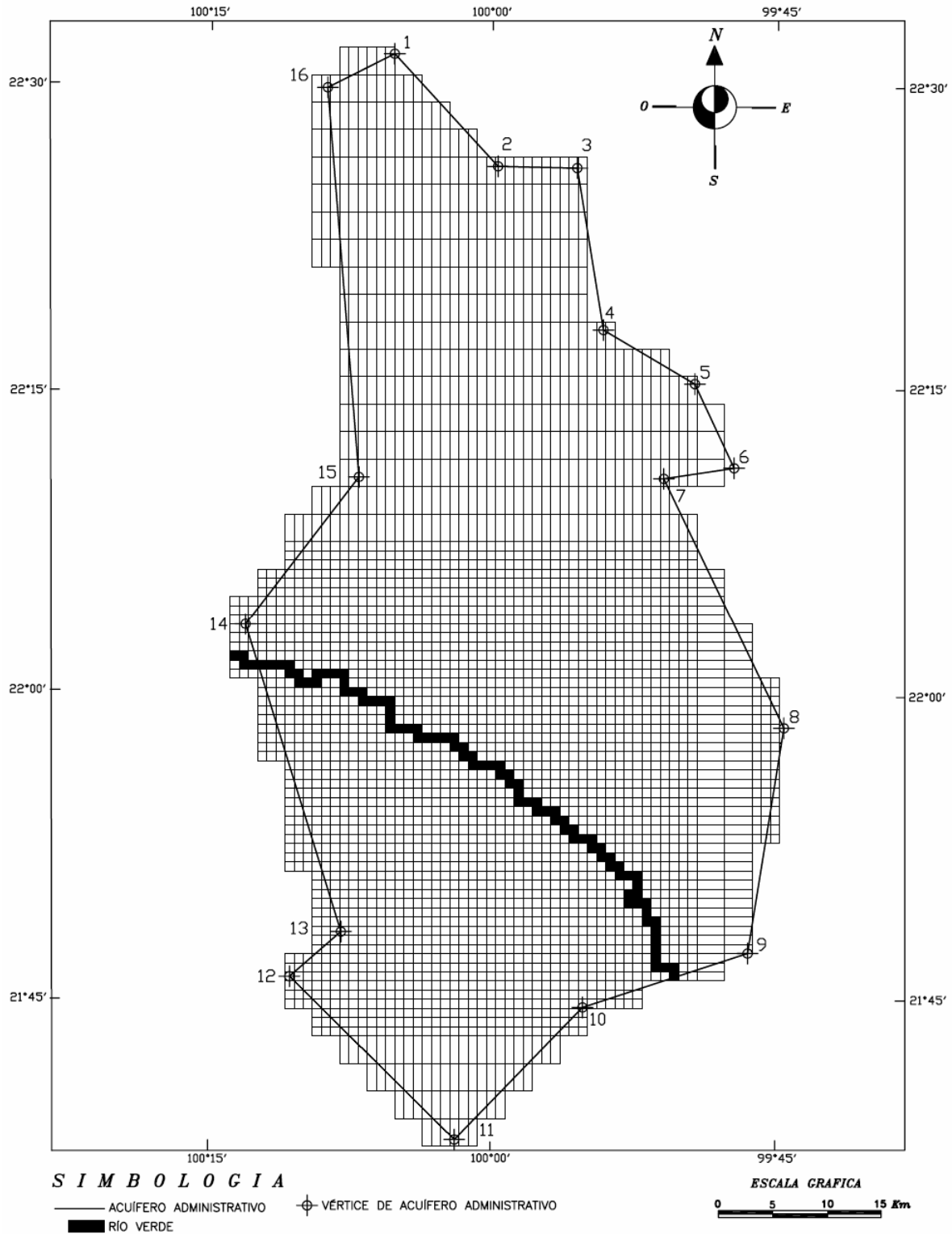


Figura 4.9. Representación del Río Verde.

4.1.5.8. Entradas de Flujo Subterráneas.

De acuerdo con el balance planteado en el capítulo 3, se infiere que existen importantes entradas de flujo de agua subterránea. Por tal razón, se propusieron cuatro zonas (en la capa inferior) mediante el comando denominado General Head (GHB), cuya función específica consiste en simular flujo subterráneo en los límites de la zona de modelación.

Para obtener un valor cercano a $359 \text{ hm}^3/\text{año}$, se realizaron varias pruebas (acierto/error) mediante la asignación de diferentes valores de “carga”. Finalmente con el esquema propuesto de su ubicación y los valores asignados de 1,200 m (a y b) y 1,150 m (c y d) (figura 4.10), se obtuvo un valor considerable con relación al buscado (haciendo la comparación en el balance de masa). Es importante mencionar que la ubicación de las cargas se asignó con base en gráficas de salinidad (UASLP, 2004) del agua así como las cargas potenciométricas.

4.1.5.9. Recargas.

Para la recarga por infiltración (figura 4.11) como resultado de la precipitación, se definió un solo valor de recarga, el cual se distribuyó en el área considerada como tal, y la cual está definida con base en gráficas de salinidad (UASLP, 2004). Con un valor de infiltración de $17.78 \text{ hm}^3/\text{año}$ y un área de recarga de 229.17 km^2 , se calculó una recarga promedio de 77.58 mm/año (Dicho valor está representado por la Zona de Recarga # 2, en el modelo de flujo).

Además del valor de recarga anterior, se tienen los valores de recarga como resultado de los retornos agrícolas (figura 4.12). En las zonas de riego con agua de pozo se calculó un valor de recarga de 31.47 mm/año ($7.54 \text{ hm}^3/\text{año}$ en un área de 239.58 km^2) el cual está representado por la Zona de Recarga # 4. En cuanto a las zonas irrigadas con agua proveniente de los manantiales de la Media Luna y Los Peroles se obtuvo un valor de recarga de 104.40 mm/año ($15.08 \text{ hm}^3/\text{año}$ en un área de 144.44 km^2) y el cual está representado por la Zona de recarga # 3.

Ahora bien, existen regiones en donde se combinan la infiltración proveniente de la precipitación ya sea con áreas irrigadas con el agua de pozo o con agua de los manantiales. En las cuales se sumó el valor de recarga para forman una nueva zona.

La combinación de la recarga por infiltración derivada de la precipitación y las zonas irrigadas con agua de pozo está asignada por la Zona de Recarga # 5 y tiene un valor de recarga de 109.05 mm/año. Por su parte en relación de la combinación de recarga por infiltración derivada de la precipitación y las áreas irrigadas con agua de los manantiales, tienen asignada la Zona de Recarga # 6 y tiene un valor de 181.98 mm/año. En la figura 4.13 se presenta el esquema final de las zonas de recarga.

Es importante mencionar que los esquemas de recarga por precipitación y retornos agrícolas se mantuvieron constantes durante todos los años considerados.

4.1.5.10. Evapotranspiración.

El sistema de cómputo utilizado puede simular los efectos de evapotranspiración a través de la expulsión del agua de la zona saturada del suelo. Para ello el sistema requiere de un caudal de evapotranspiración (que se asigna en mm/año), y una profundidad de extinción, que es la distancia a partir de la superficie terrestre a la cual la evapotranspiración se considera nula. Además, se requiere la asignación del tiempo inicial y final del efecto modelado. El sistema empleado, asume distintas restricciones con base en a evapotranspiración como:

- Cuando el nivel del agua está por encima del nivel de la superficie terrestre, es decir), por encima de la capa 1, se presenta la evapotranspiración máxima especificada por el usuario.

Capítulo 4. Implementación y Calibración del Modelo.

- Cuando el nivel del agua se encuentra por debajo del nivel de extinción, la evapotranspiración es nula.
- Entre los límites antes mencionados, el valor de la evapotranspiración varía de forma lineal.

De acuerdo con la información recabada, solo se cuenta con un valor de evapotranspiración para la zona norte del acuífero, es decir, para la margen izquierda del Río Verde y cuyo esquema propuesto se presenta en la figura 4.14. Dicho valor oscila alrededor de 75 hm³/año (Conagua, 2007). Para asignar este valor dentro del modelo, se realizaron varias corridas del sistema, hasta lograr el valor que se acercase al registrado en la bibliografía, el cual fue de 1,270.32 mm/año a una profundidad de extinción de 10 m.

4.1.5.11. Cargas Iniciales.

Los valores de **cargas iniciales** para el proceso de calibración correspondieron a los valores del nivel estático del año 1980. Fueron asignadas con base en las elevaciones del nivel estático obtenidas en pozos y posteriormente por medio de una función del sistema de cómputo se hizo una interpolación tipo *Krigging* para obtener una configuración en toda el área del acuífero.

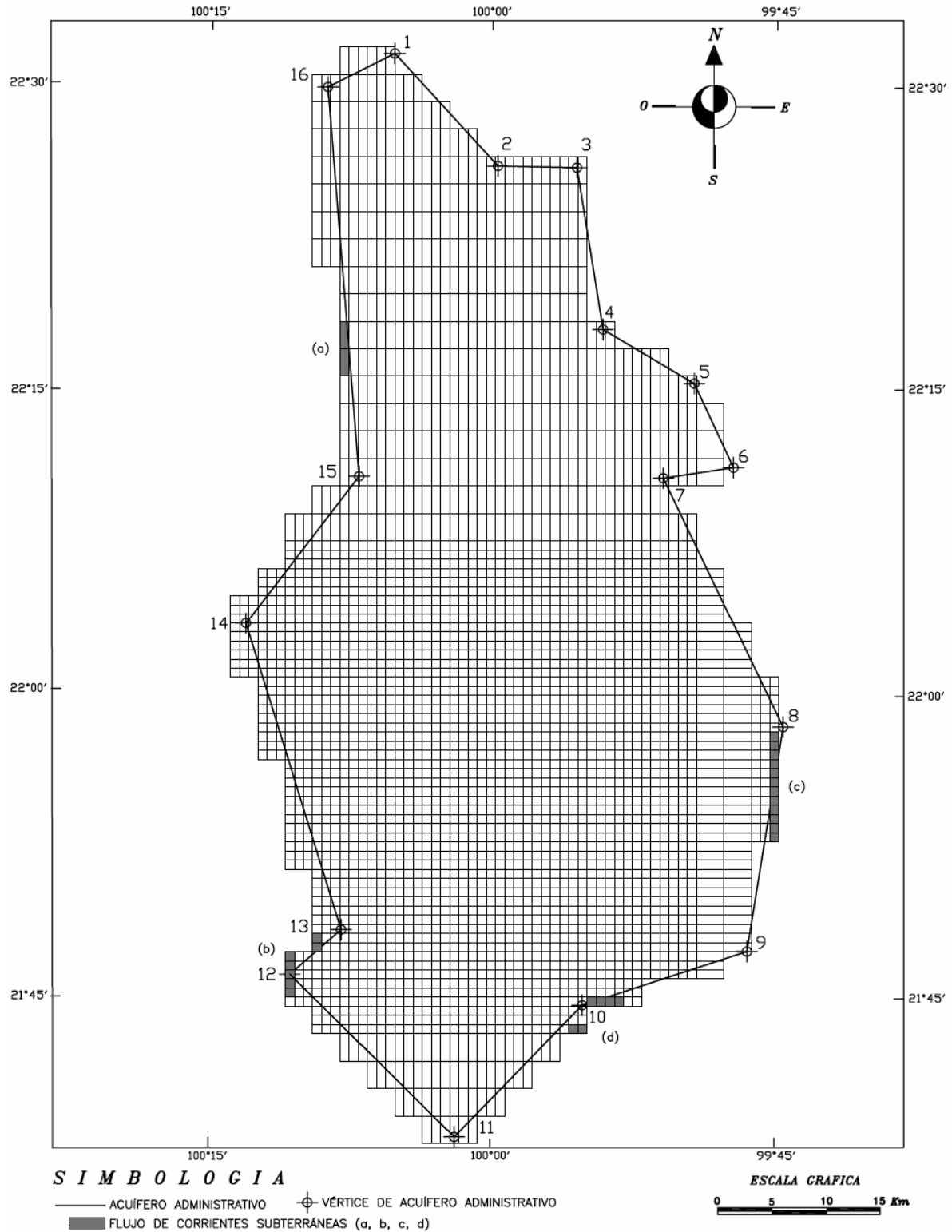


Figura 4.10. Propuesta de Zonas con Influencia de Flujo Subterráneo en los Límites de la Zona de Modelación.

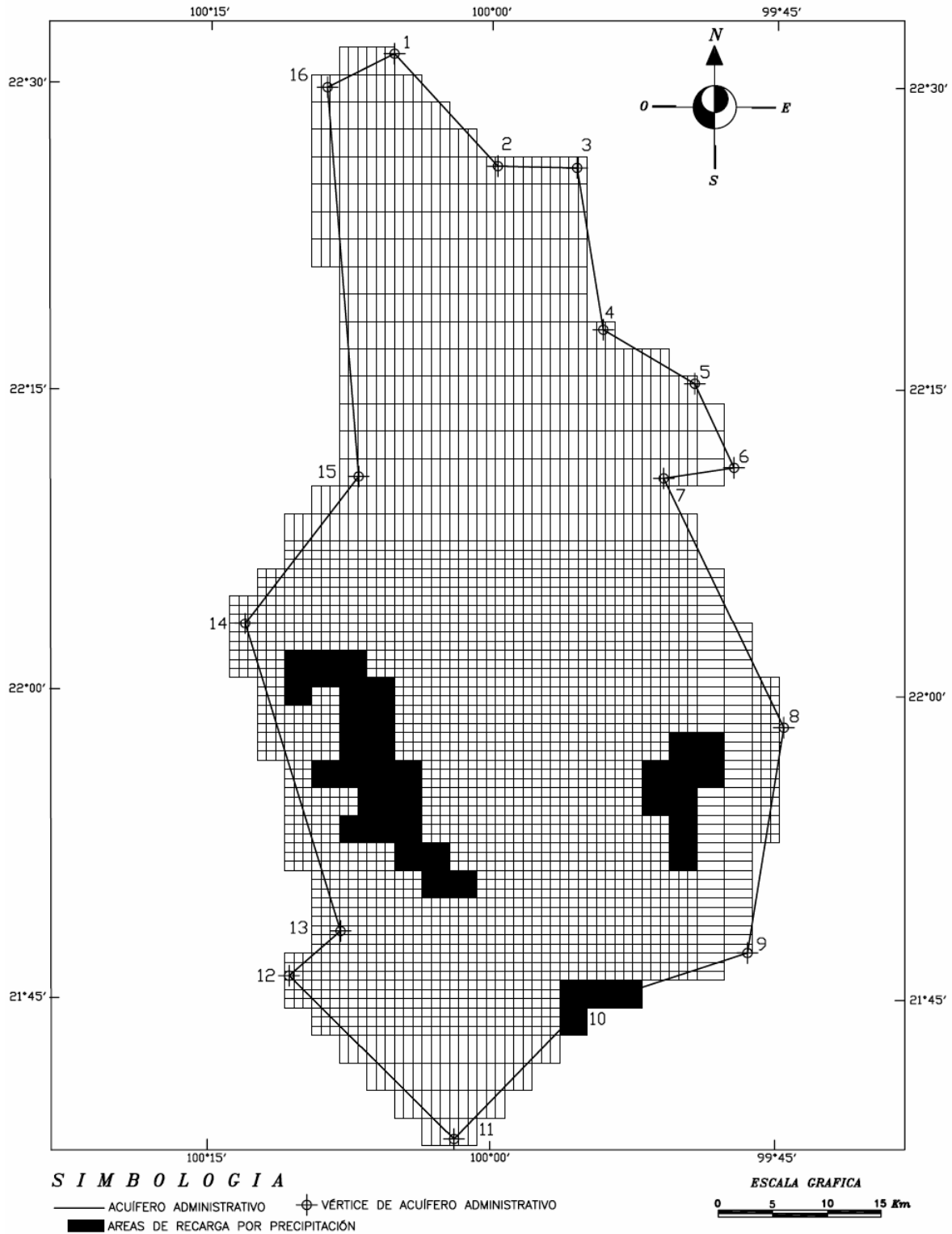


Figura 4.11. Áreas de Recarga por Precipitación.

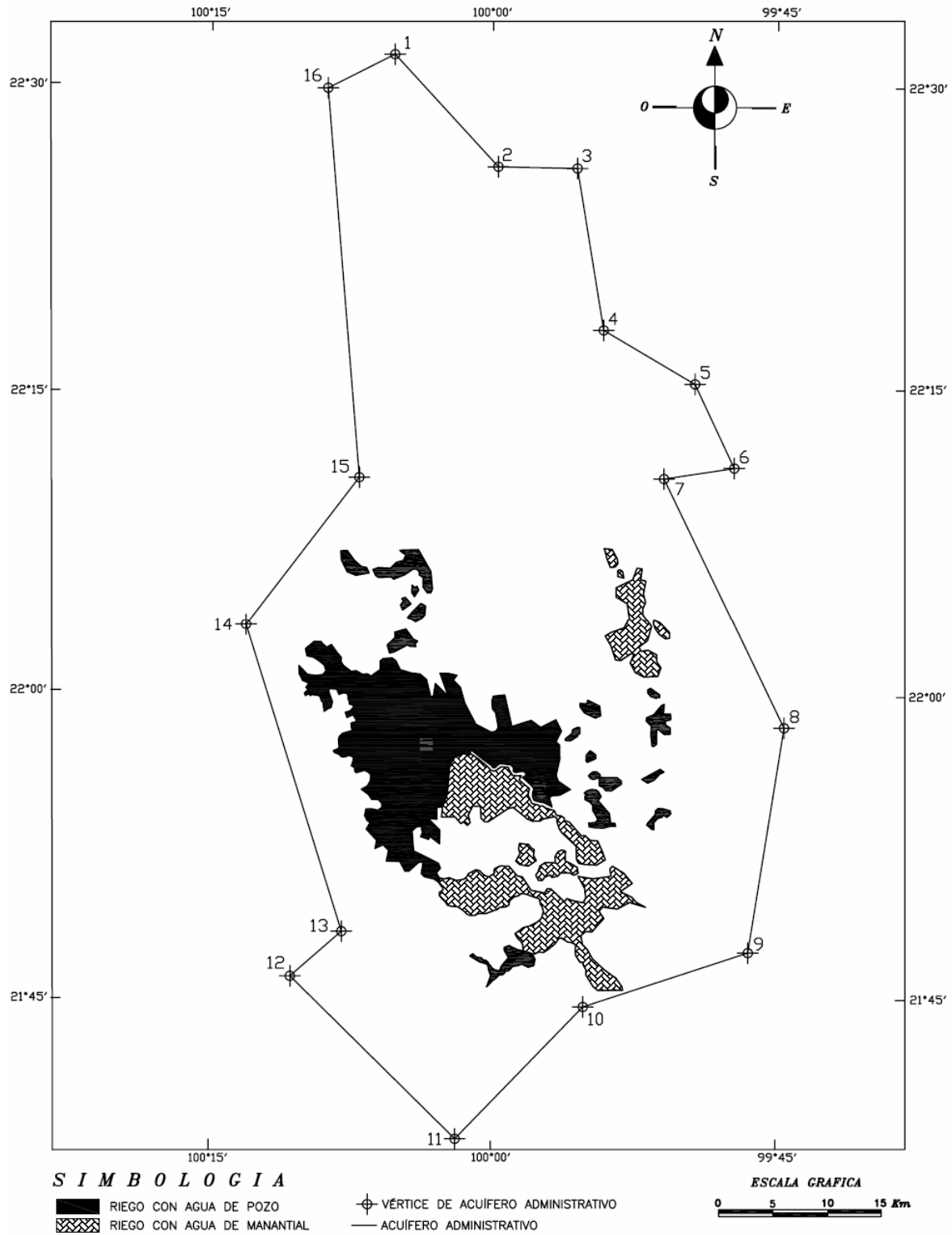


Figura 4.12. Áreas de Irrigación.

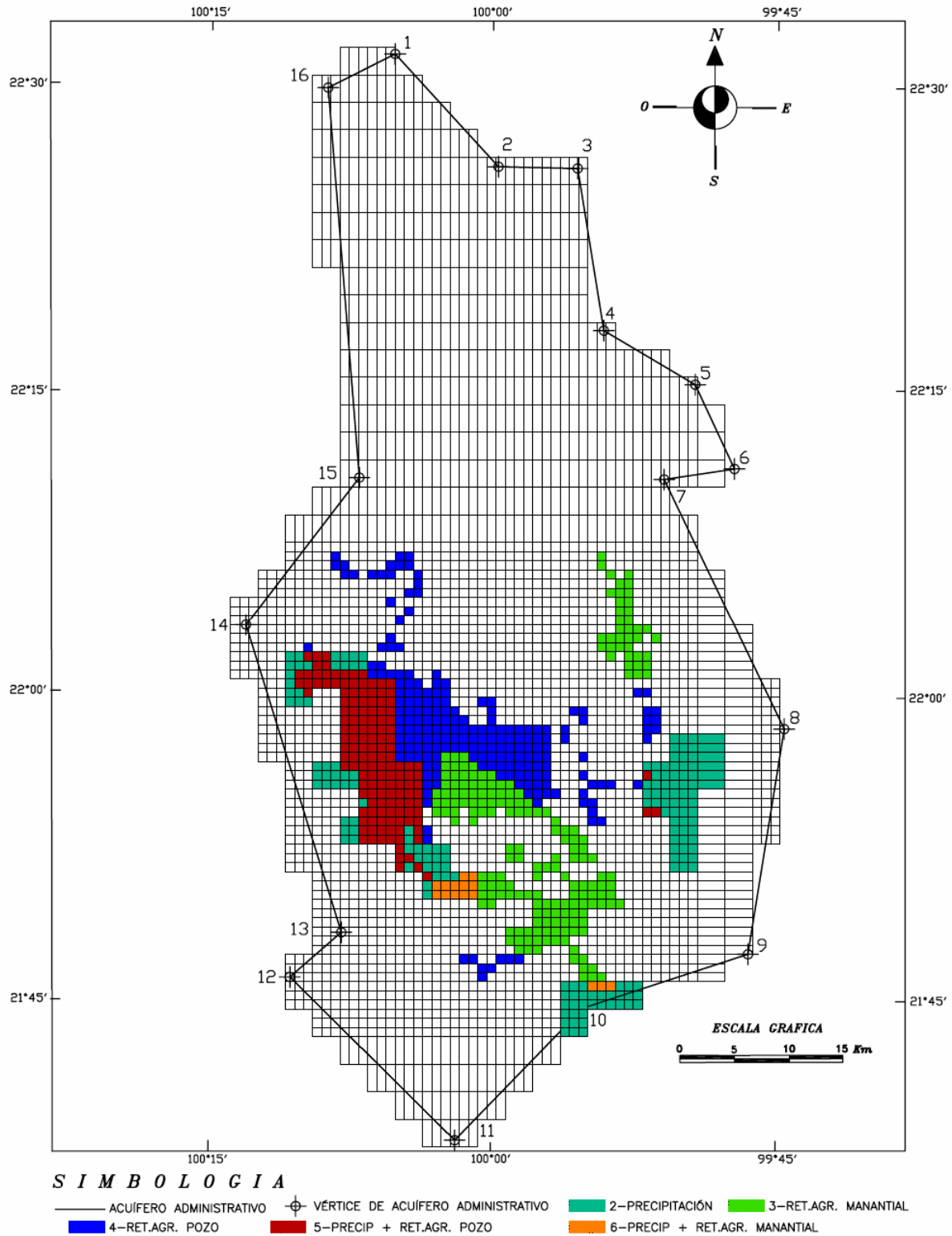


Figura 4.13. Esquema Final de Zonas de Recarga.

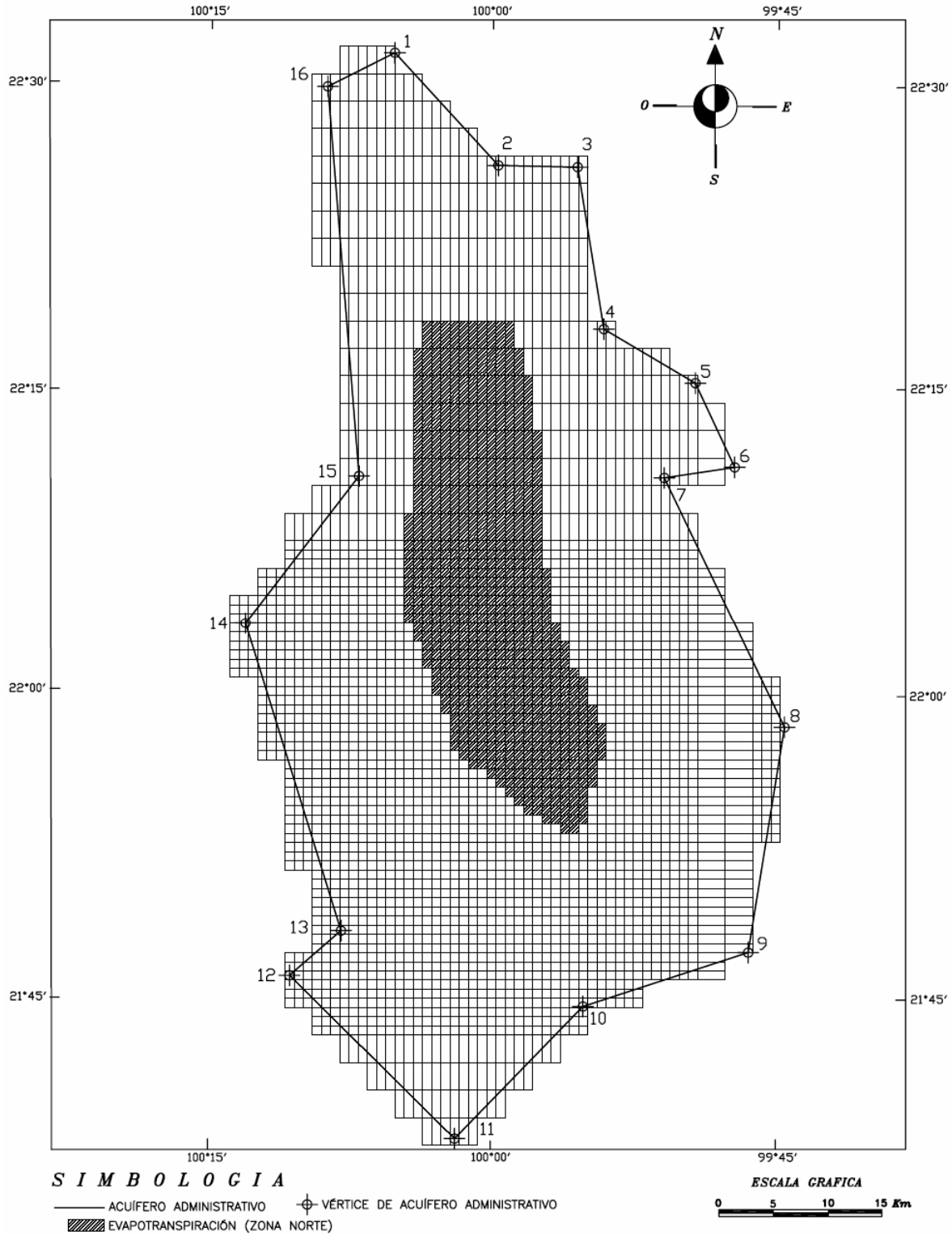


Figura 4.14. Evapotranspiración Zona Norte (Propuesto con Base en Conagua, 2007).

4.2. Calibración.

4.2.1. Introducción.

El objetivo de esta etapa fue definir el arreglo matemático que representara de la manera más conveniente el comportamiento del acuífero con base en los registros históricos, intentando reproducir de manera integral, el comportamiento histórico de los fenómenos que suceden en el acuífero.

El proceso de calibración de un modelo de flujo de aguas subterráneas tiene por objetivo demostrar que el sistema es capaz de reproducir de manera aproximada las cargas hidráulicas y flujo subterráneo a partir del registro histórico. Dicho proceso es realizado mediante la búsqueda de una serie de parámetros que definan de manera aproximada el funcionamiento del acuífero dentro de un rango de error preestablecido.

Partiendo de una situación histórica conocida, se tendrán como resultado diversas situaciones particulares del sistema que pueden ser comparadas con registros históricos, lo cual servirá para conocer la confiabilidad del modelo creado. Un modelo de flujo de aguas subterráneas es más representativo del sistema real cuando es capaz de reproducir, con la mayor proximidad, fielmente su funcionamiento, esto es, cuando es capaz de reproducir los estados del sistema, y las acciones sobre el con base en las leyes que los relacionan. Es importante mencionar, que la calidad de la modelación, está en función del ajuste de la descripción matemática en conjunto con la eficiencia del método matemático utilizado.

4.2.2. Calibración del Modelo.

4.2.2.1. Estado Transitorio.

Con base en los niveles estáticos obtenidos para el año de 1980 y en las curvas de evolución, se inició un estado de bombeo transitorio durante un periodo de 9,490 días (26 años), con las características de bombeo, evapotranspiración, recargas, entradas de flujo del sistema regional, así como las interacciones del flujo de agua subterránea con el Río Verde ya mencionadas.

Capítulo 4. Implementación y Calibración del Modelo.

En primera instancia se optó por utilizar la calibración automática con la que cuenta el programa, y a través de la cual, se pudieron obtener los resultados que se presentan en las gráficas de las figuras 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18 (para cada uno de los años considerados en la calibración). Sin embargo, como se puede observar en ellas, la calibración fue bastante deficiente. A través de estos resultados fue posible observar en la visualización en planta del modelo, que gran parte de los pozos mal calibrados, se localizaban entre pozos que tenían una calibración aceptable. Esto conllevó a pensar que probablemente los caudales utilizados de manera uniforme durante todo el proceso de calibración, no eran una realidad. Por tal motivo se optó por continuar la calibración de manera manual.

El procedimiento de calibración manual estuvo sujeto a modificaciones de prueba y error, realizando ajustes en la cantidad de los caudales (principalmente) de algunos pozos seleccionados. En algunos casos, se tuvieron que modificar ligeramente algunos de los parámetros referentes a las recargas de entrada por flujo regional y las características del Río Verde para obtener de manera aproximada los caudales obtenidos en el balance. En el Anexo 3 se presentan los caudales utilizados para el proceso de calibración, los cuales, en algunos casos fueron modificados con respecto a la propuesta inicial.

A continuación, se muestran las gráficas de calibración registradas con base en los datos observados en comparación con los calculados por el sistema para los distintos años (1980, 1986, 1996, 2006, figuras 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22, respectivamente). Con éstas gráficas se consideró como terminada la calibración.

Otra consideración importante dentro del proceso de calibración fue el balance de masa, es decir, el balance de las cantidades de agua manejadas durante cada uno de los años considerados en la calibración. Es importante mencionar que los balances de masa estimados de acuerdo con la información recabada, así como los obtenidos mediante el proceso de calibración, representan estimaciones que dan una idea de las cantidades manejadas dentro del sistema; sin embargo, no representan cantidades exactas. En la tabla 4.3 se muestra el balance mencionado con el sistema calibrado automáticamente y en la tabla 4.4 el balance para el sistema calibrado final.

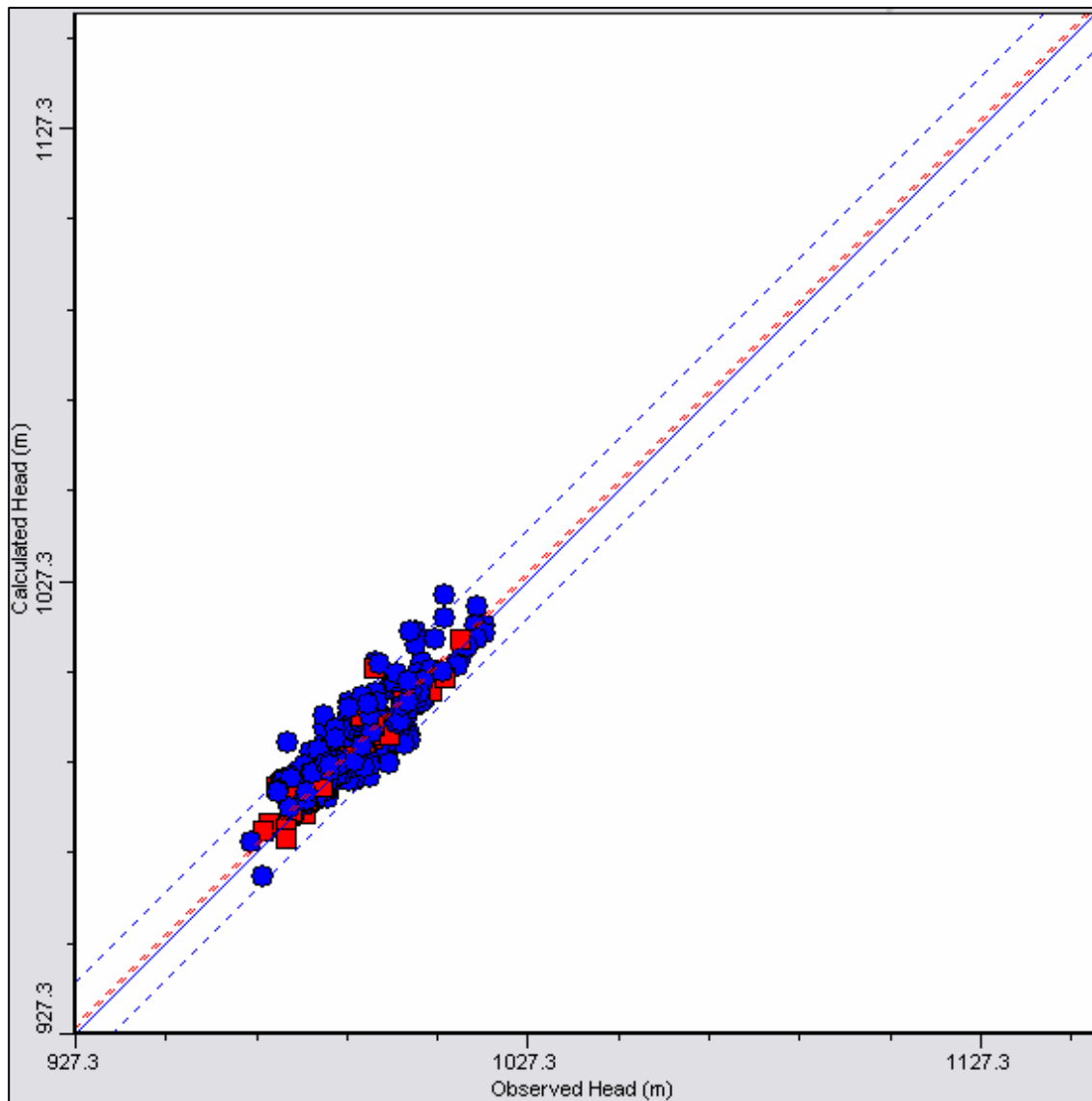


Figura 4.15. Cargas Observadas Vs. Cargas Calculadas (1980).

Número de Pozos: 322.

Error Estándar de la Estimación: 0.32 m.

- NE del Pozo en Capa 2.
- NE del Pozo en Capa 3.
- Intervalo de confianza del 95% con respecto a los pozos considerados.
- Intervalo de confianza del 95% del sistema completo (para ello debe cubrir la línea diagonal azul que representa la calibración perfecta).

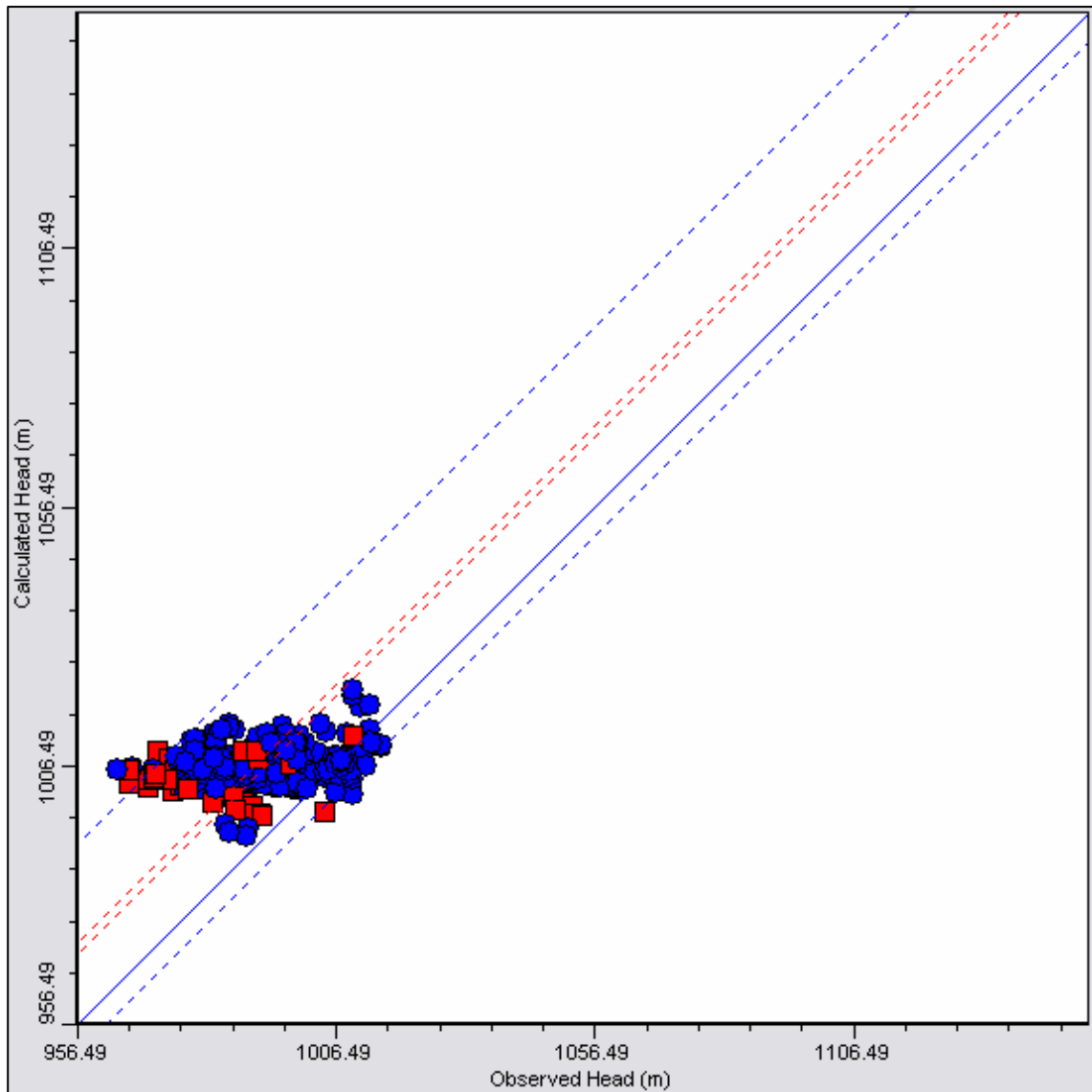


Figura 4.16. Cargas Observadas Vs. Cargas Calculadas (1986).

Número de Pozos: 322.

Error Estándar de la Estimación: 0.57 m.

■ NE del Pozo en Capa 2.

● NE del Pozo en Capa 3.

--- Intervalo de confianza del 95% con respecto a los pozos considerados.

--- Intervalo de confianza del 95% del sistema completo (para ello debe cubrir la línea diagonal azul que representa la calibración perfecta).

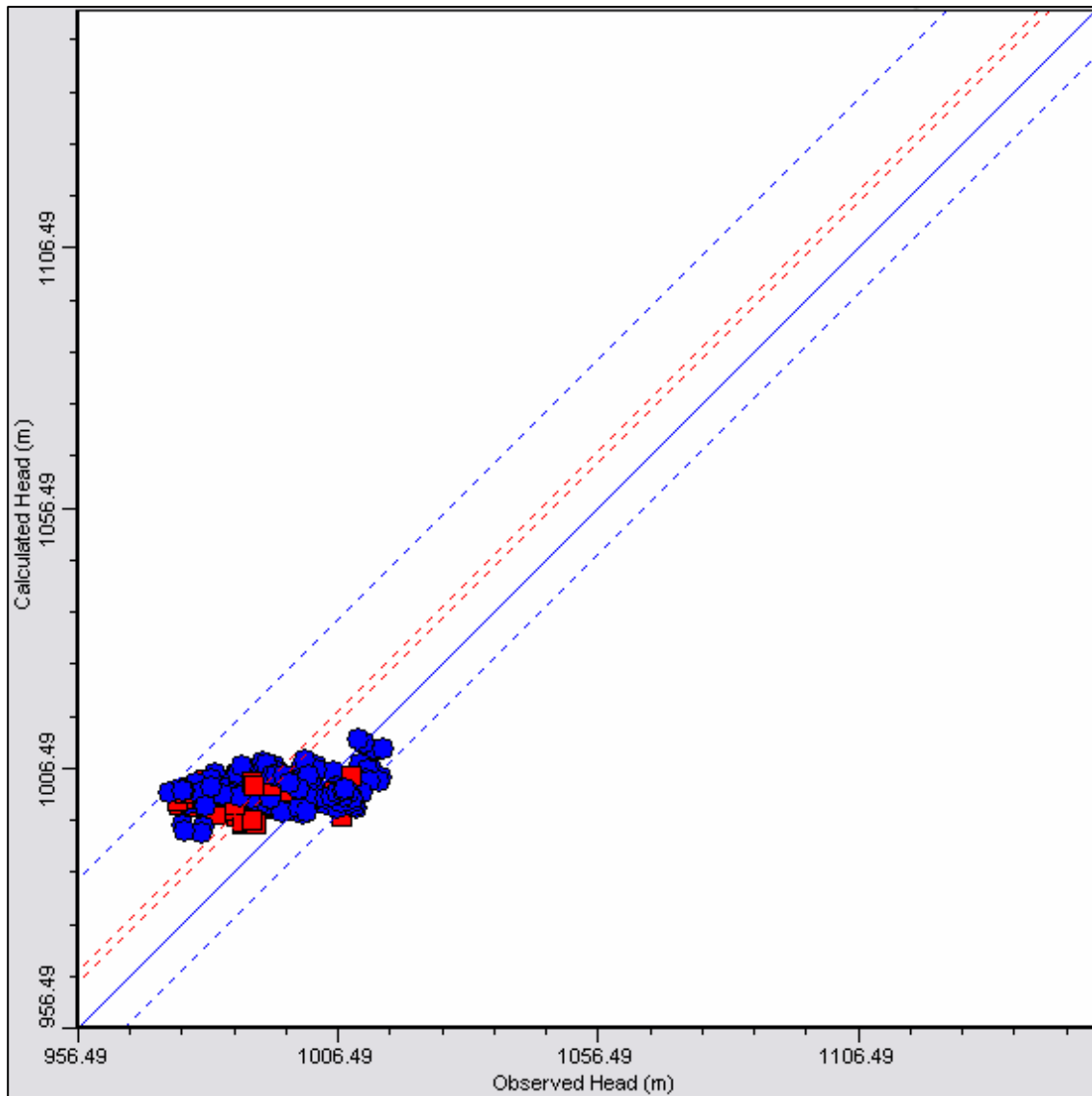


Figura 4.17. Cargas Observadas Vs. Cargas Calculadas (1996).

Número de Pozos: 322.

Error Estándar de la Estimación: 0.53 m.

■ NE del Pozo en Capa 2.

● NE del Pozo en Capa 3.

- - - Intervalo de confianza del 95% con respecto a los pozos considerados.

- - - Intervalo de confianza del 95% del sistema completo (para ello debe cubrir la línea diagonal azul que representa la calibración perfecta).

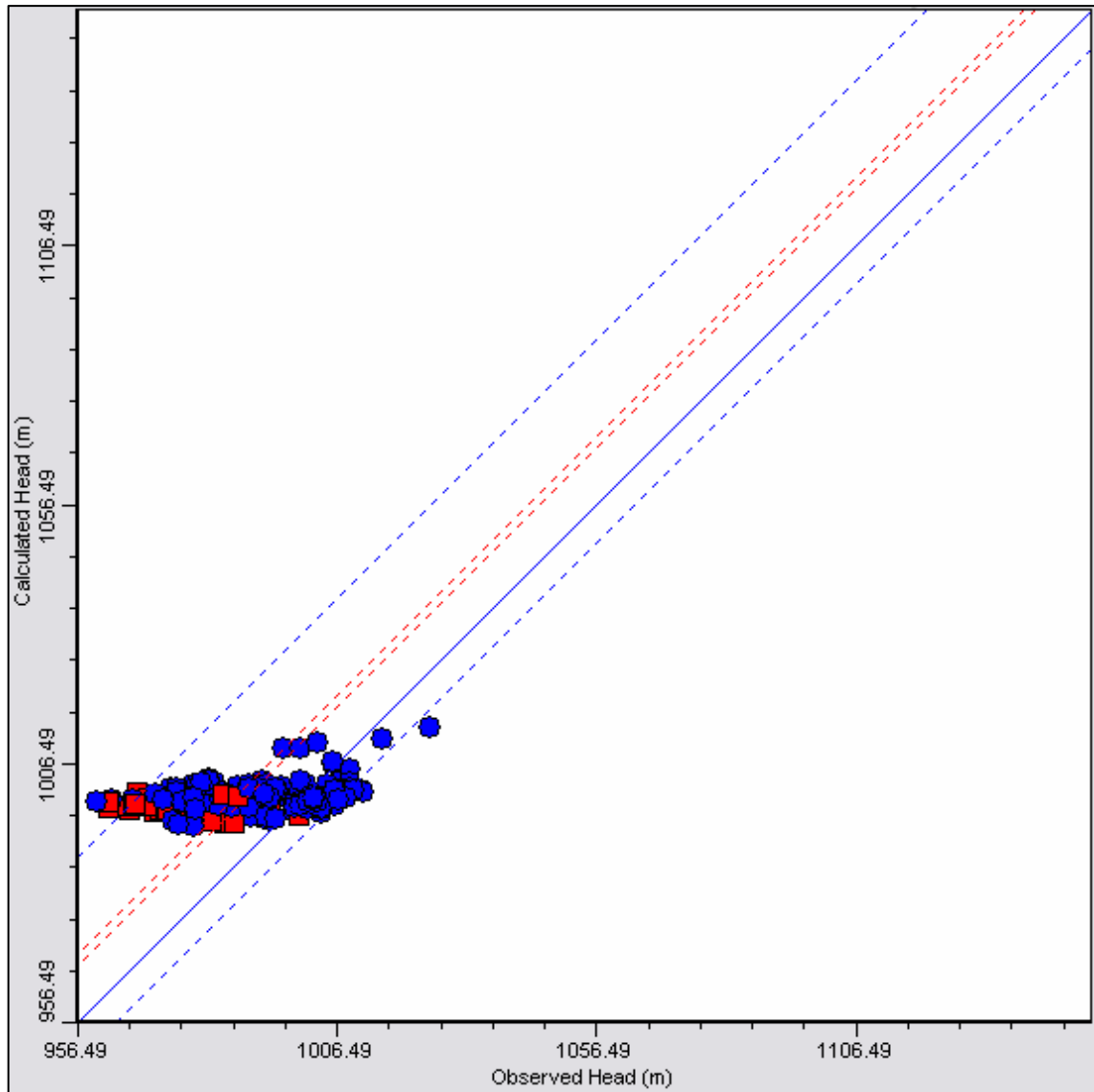


Figura 4.18. Cargas Observadas Vs. Cargas Calculadas (2006).

Número de Pozos: 328.

Error Estándar de la Estimación: 0.55 m.

■ NE del Pozo en Capa 2.

● NE del Pozo en Capa 3.

--- Intervalo de confianza del 95% con respecto a los pozos considerados.

--- Intervalo de confianza del 95% del sistema completo (para ello debe cubrir la línea diagonal azul que representa la calibración perfecta).

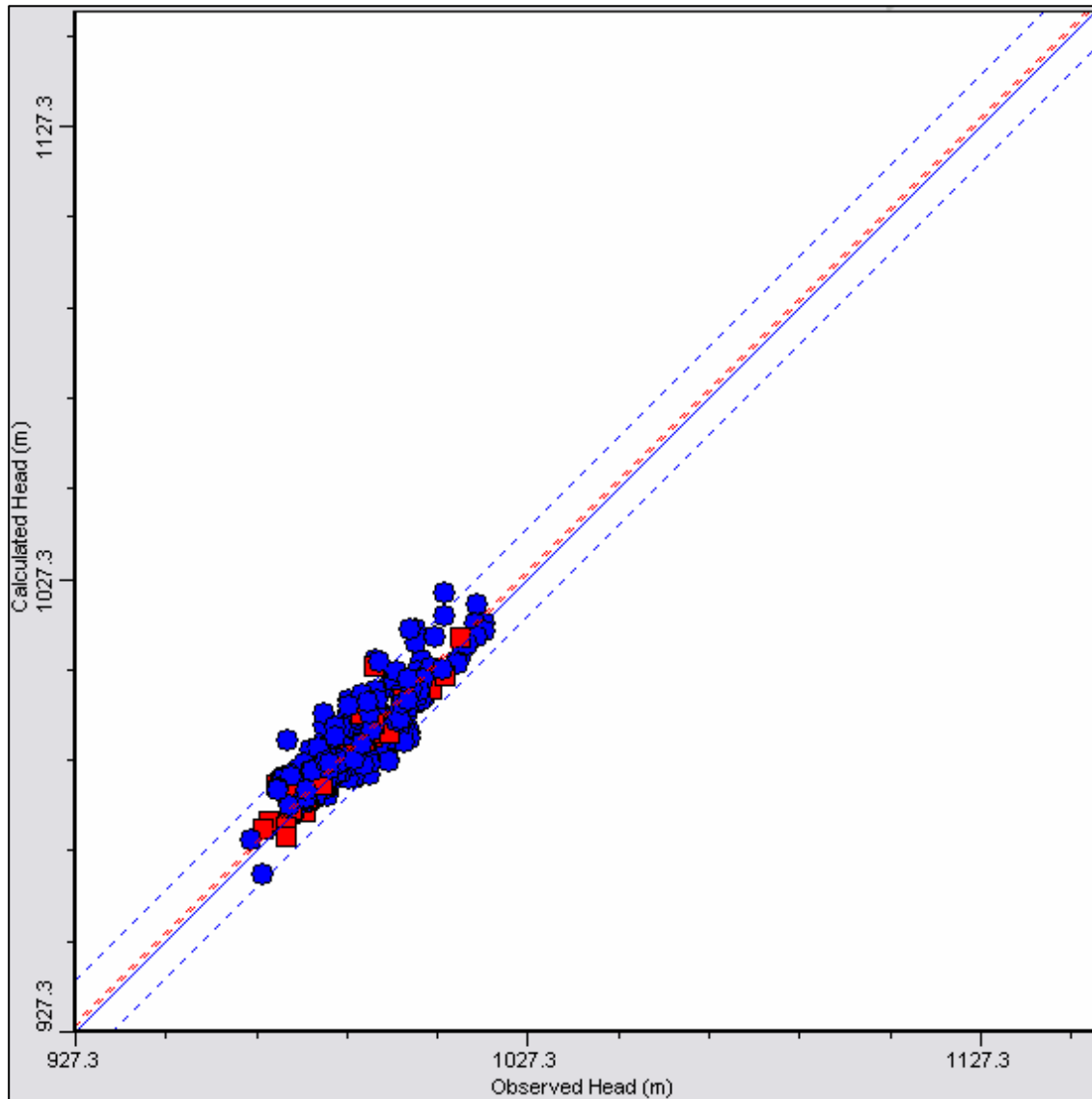


Figura 4.19. Cargas Observadas Vs. Cargas Calculadas (1980).

Número de Pozos: 322.

Error Estándar de la Estimación: 0.27 m.

- NE del Pozo en Capa 2.
- NE del Pozo en Capa 3.
- Intervalo de confianza del 95% con respecto a los pozos considerados.
- Intervalo de confianza del 95% del sistema completo (para ello debe cubrir la línea diagonal azul que representa la calibración perfecta).

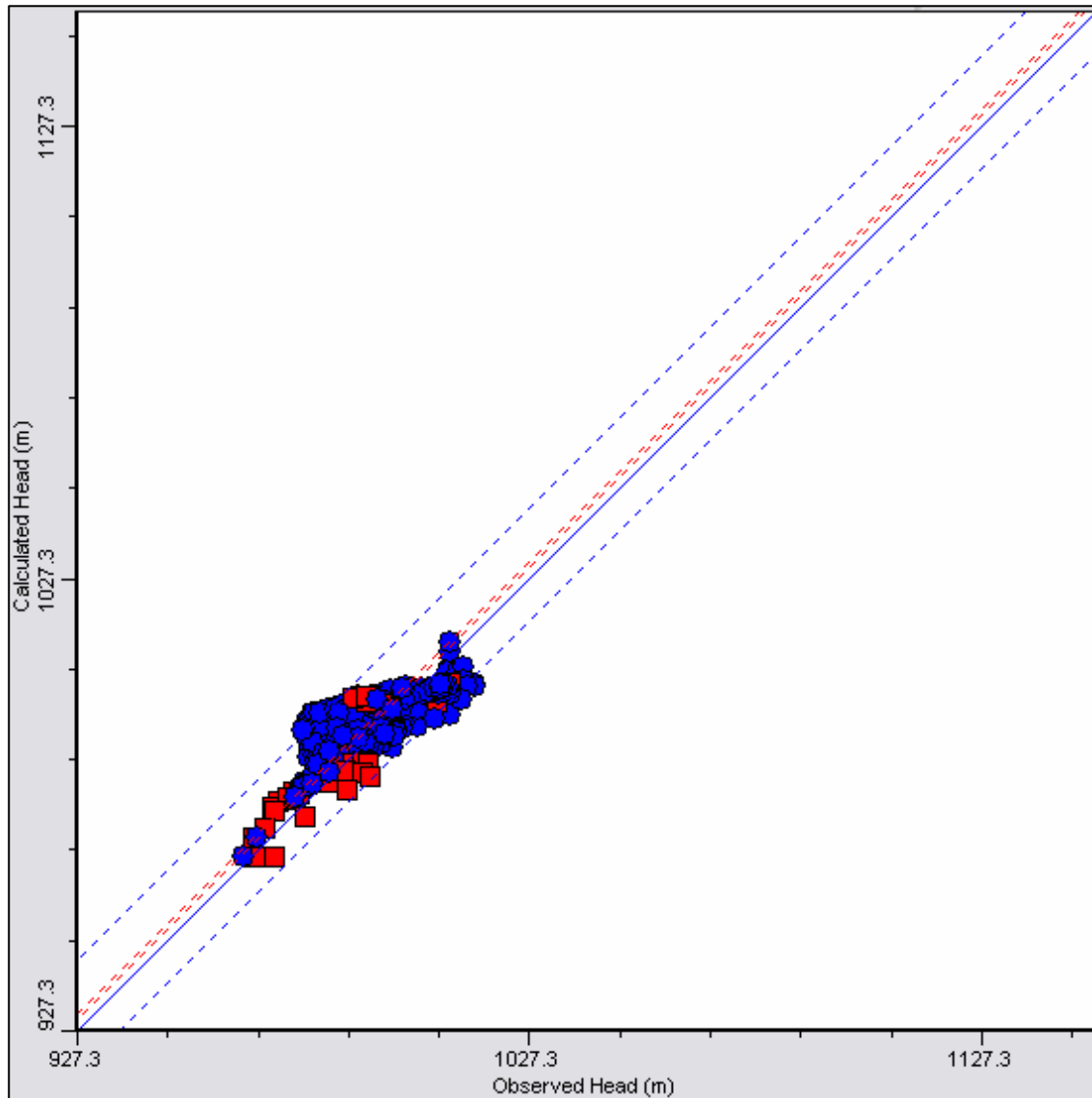


Figura 4.20. Cargas Observadas Vs. Cargas Calculadas (1986).

Número de Pozos: 322.

Error Estándar de la Estimación: 0.36 m.

- NE del Pozo en Capa 2.
- NE del Pozo en Capa 3.
- Intervalo de confianza del 95% con respecto a los pozos considerados.
- Intervalo de confianza del 95% del sistema completo (para ello debe cubrir la línea diagonal azul que representa la calibración perfecta).

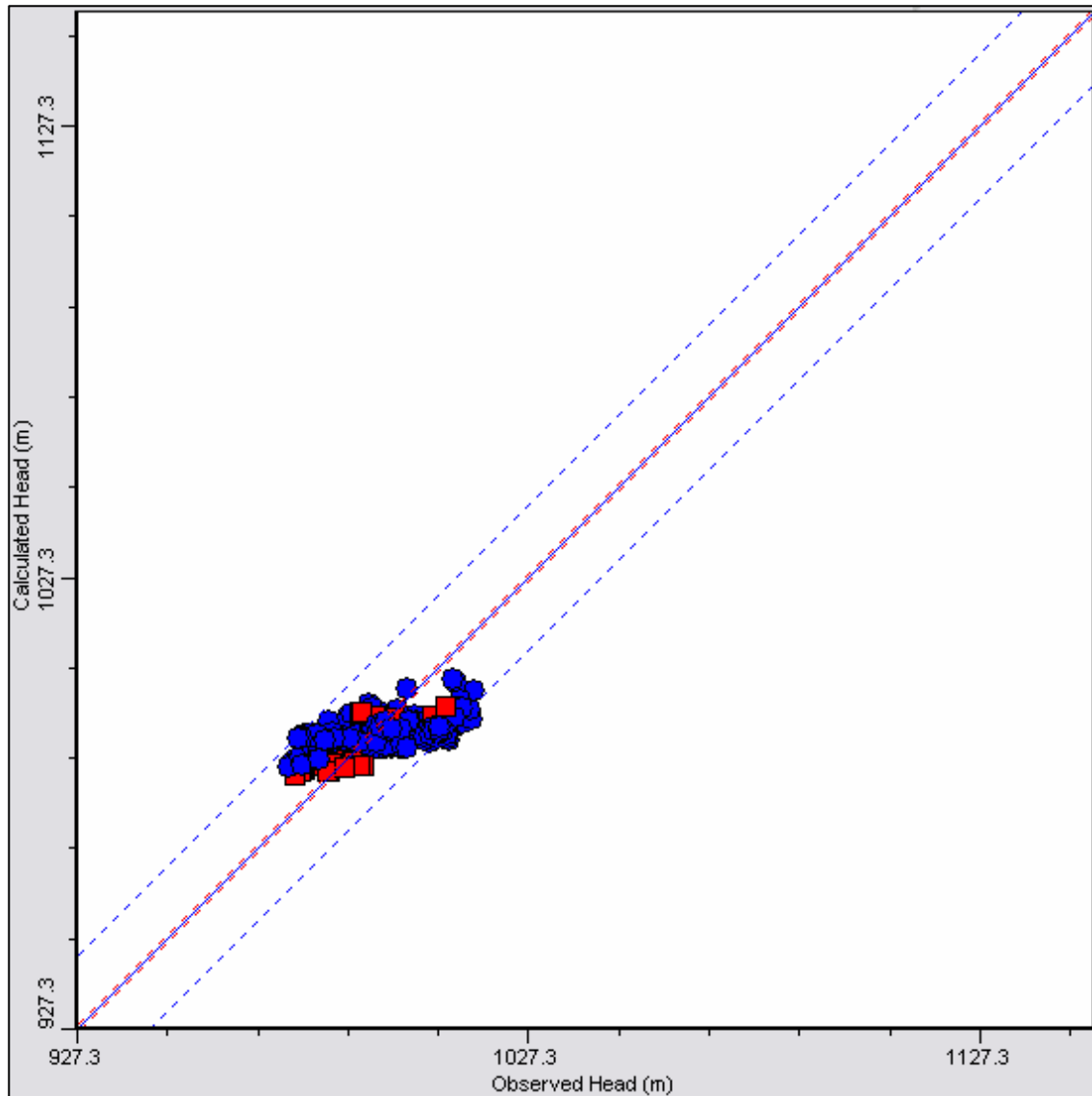


Figura 4.21. Cargas Observadas Vs. Cargas Calculadas (1996).

Número de Pozos: 322.

Error Estándar de la Estimación: 0.46 m.

- NE del Pozo en Capa 2.
- NE del Pozo en Capa 3.
- Intervalo de confianza del 95% con respecto a los pozos considerados.
- Intervalo de confianza del 95% del sistema completo (para ello debe cubrir la línea diagonal azul que representa la calibración perfecta).

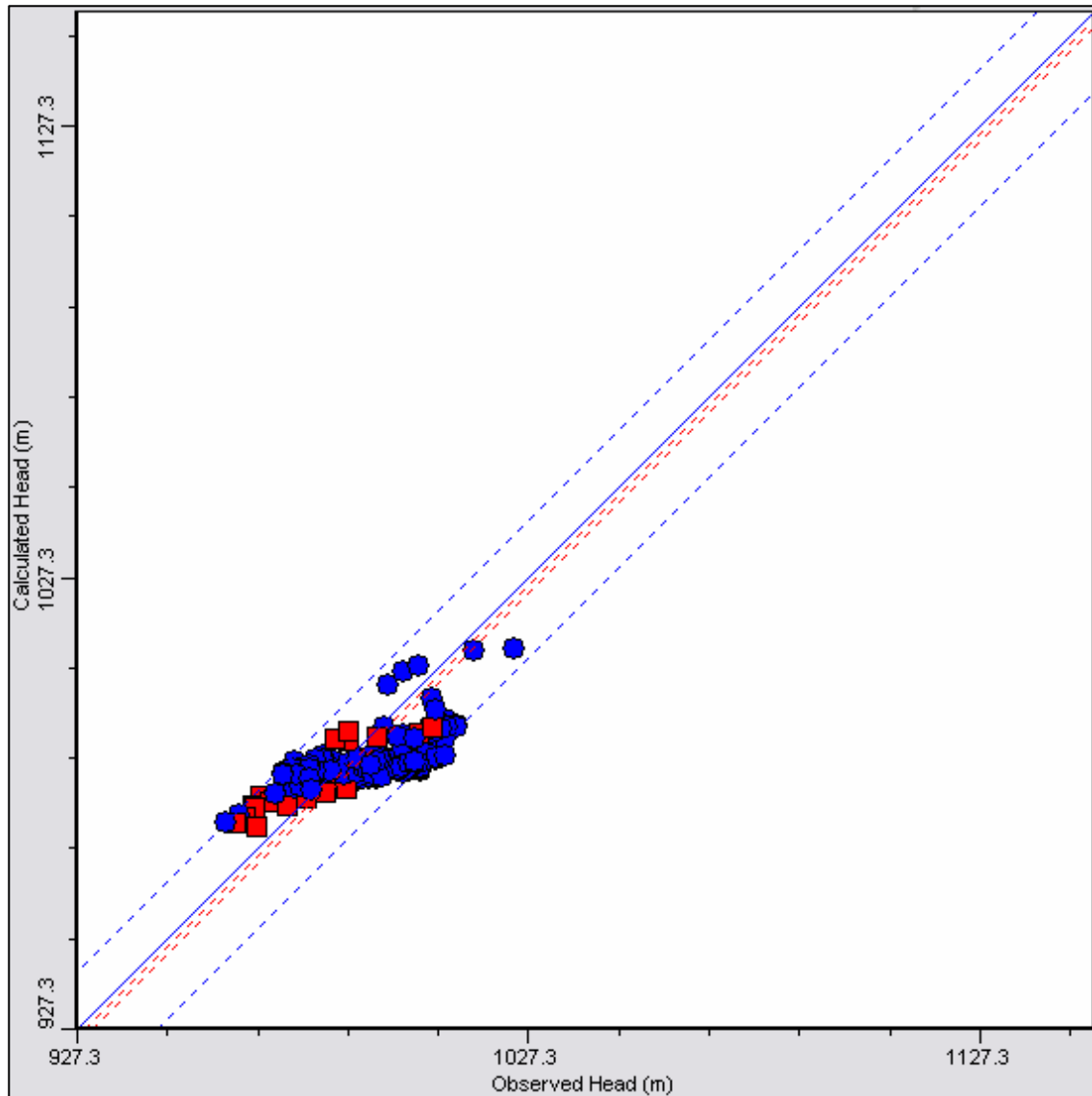


Figura 4.22. Cargas Observadas Vs. Cargas Calculadas (2006).

Número de Pozos: 328.

Error Estándar de la Estimación: 0.43 m.

- NE del Pozo en Capa 2.
- NE del Pozo en Capa 3.
- Intervalo de confianza del 95% con respecto a los pozos considerados.
- Intervalo de confianza del 95% del sistema completo (para ello debe cubrir la línea diagonal azul que representa la calibración perfecta).

Capítulo 4. Implementación y Calibración del Modelo.

En la tabla 4.3 se presenta el balance de masa (para el sistema calibrado automáticamente), con las cantidades de agua estimadas en el balance y las calculadas en el sistema así como el porcentaje que representa el cálculo del sistema de cómputo en relación con el balance estimado con base en la información recabada.

Año	Concepto	Balance	Calculado en VMF	VMF / Balance
		hm ³	hm ³	%
1986	Bombeo.	1356.84	1118.41	82
	Escurrimiento del río.	583.92	712.62	122
	Evapotranspiración.	455.10	606.84	133
	Entrada de Agua (flujo subterráneo).	2153.46	1495.14	69
	Recarga.	242.40	242.52	100
1996	Bombeo.	3618.24	2927.87	81
	Escurrimiento del río.	1557.12	1653.41	106
	Evapotranspiración.	1213.60	1789.09	147
	Entrada de Agua (flujo subterráneo).	5742.56	3862.78	67
	Recarga.	646.40	646.73	100
2006	Bombeo.	5879.64	4724.00	80
	Escurrimiento del río.	2530.32	2491.95	98
	Evapotranspiración.	1972.10	3028.52	154
	Entrada de Agua (flujo subterráneo).	9331.66	6181.89	66
	Recarga.	1050.40	1050.94	100

Tabla 4.3. Balance de Masa para el Sistema Resultante del Calibrado Automático.

Nota. Los caudales aportados por los manantiales de la Media Luna y Los Peroles están considerados dentro del Bombeo.

Nota. Todas las cantidades están dadas con base en el año 1980.

En la tabla 4.4 se presenta el balance de masa para el sistema calibrado final, esto es, el sistema calibrado de manera manual con base en el calibrado automáticamente. En dicha tabla, se presentan las cantidades de agua estimadas en el balance y las calculadas en el

Capítulo 4. Implementación y Calibración del Modelo.

sistema, así como el porcentaje que representa el cálculo del sistema de cómputo en relación con el balance estimado. Es importante mencionar que se presenta la información con las cantidades que representan el bombeo modificado, mismo que resultó como parte de la calibración realizada de forma manual.

Año	Concepto	Balance	Calculado en VMF	VMF / Balance
		hm ³	hm ³	%
1986	Bombeo.	1356.84	3147.94	232
	Bombeo Modificado.*	3205.54	3147.94	98
	Escorrentamiento del río.	583.92	724.92	124
	Evapotranspiración.	455.10	495.53	109
	Entrada de Agua (flujo subterráneo).	2153.46	1478.88	69
	Recarga.	242.40	242.52	100
1996	Bombeo.	3618.24	6492.67	179
	Bombeo Modificado.*	6574.66	6492.67	99
	Escorrentamiento del río.	1557.12	1690.80	109
	Evapotranspiración.	1213.60	1303.62	107
	Entrada de Agua (flujo subterráneo).	5742.56	3832.47	67
	Recarga.	646.40	646.73	100
2006	Bombeo.	5879.64	10219.45	174
	Bombeo Modificado.*	10338.42	10219.45	99
	Escorrentamiento del río.	2530.32	2542.45	100
	Evapotranspiración.	1972.10	2048.78	104
	Entrada de Agua (flujo subterráneo).	9331.66	6151.27	66
	Recarga.	1050.40	1050.94	100

Tabla 4.4. Balance de Masa para el Sistema Calibrado Final.

* Bombeo resultante del proceso de calibración en el que se incrementaron los caudales de distintos pozos.

Nota. Los caudales aportados por los manantiales de la Media Luna y Los Peroles están considerados dentro del Bombeo.

Nota. Todas las cantidades están dadas con base en el año 1980.

Capítulo 4. Implementación y Calibración del Modelo.

De acuerdo con el cálculo en el balance para poder llegar a la calibración del sistema, se tuvo un incremento de $308.12 \text{ hm}^3/\text{año}$ en el bombeo para el periodo de 1980-1986. Para el periodo 1986-1996, de acuerdo con el balance calculado y la modificación del bombeo, hubo un incremento de $110.77 \text{ hm}^3/\text{año}$. En el último periodo de calibración (1996-2006), el incremento hecho en el bombeo establecido en el balance fue de $150.24 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Con base en el párrafo anterior tenemos que de acuerdo con el modelo, la extracción por bombeo para el periodo 1980-1986 fue de $383.49 \text{ hm}^3/\text{año}$; para el periodo 1986-1996 fue de $186.14 \text{ hm}^3/\text{año}$; y de $225.61 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el periodo de 1996-2006. En las conclusiones generales se presentan una serie de observaciones con relación a las cantidades presentadas anteriormente, en las cuales, se realiza una reflexión y se trata de inferir la razón o razones que conllevan a la obtención de las mismas.

El sistema calibrado quedó finalmente con los siguientes valores hidráulicos para cada uno de los medios geológicos (tabla 4.5):

	Conductividad			
Zona	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	
1	3.065859E-04	4.622245E-04	5.363909E-06	
2	5.013850E-06	1.099623E-06	7.446109E-06	
3	5.838394E-06	1.099623E-06	9.358302E-06	
4	8.422234E-05	1.099623E-06	7.982710E-06	
5	3.713098E-05	1.099623E-06	8.408538E-06	
6	9.884556E-05	1.099623E-06	1.125124E-04	
7	7.719815E-05	1.423206E-07	5.353944E-06	
8	1.052867E-04	1.423206E-07	1.705463E-05	
	Almacenamiento			
Zona	Ss (1/m)	Sy	Porosidad Efectiva	Porosidad Total
1	5.422010E-03	0.163863	0.200	0.20
2	3.053518E-03	0.214610	0.140	0.40
3	1.373570E-05	0.284613	0.200	0.35
4	2.210357E-04	0.200000	0.200	0.20
5	1.561928E-05	0.211750	0.140	0.40
6	7.474659E-04	0.277840	0.075	0.40
7	5.777273E-05	0.200000	0.200	0.20
8	1.144927E-04	0.296482	0.140	0.40

Tabla 4.5. Propiedades Hidráulicas de los Medios Geológicos (Sistema Calibrado).

Descripción de las zonas de la tabla 4.1:

1. Aluvión (Capa 1).
2. Calizas (Capa 1).
3. Basaltos (Capa 1).
4. Aluvión (Capa 2).
5. Calizas (Capa 2).
6. Roca Volcánica (Capa 2).
7. Aluvión (Capa 3).
8. Calizas (Capa 3).

4.2.3. Análisis de Sensibilidad.

Una vez calibrado el modelo para los periodos de bombeo comprendidos entre los años 1980-1986, 1986-1996 y 1996-2006 en estado transitorio, se efectuaron distintas simulaciones para determinar la sensibilidad del modelo, con lo que fue posible medir la susceptibilidad del comportamiento del sistema ante cambios en parámetros como la conductividad hidráulica, los coeficientes de almacenamiento (S_s y S_y) y la recarga. Los cambios se realizaron de manera independiente para cada uno de estos parámetros, afectando cada una de las capas dentro de las cuales están comprendidos los distintos medios geológicos del modelo. Se afectó de manera particular e independiente cada una de las capas y de forma general el modelo completo.

El método que se utilizó, consistió en realizar modificaciones al valor final que resultó como producto de la calibración para cada uno de los parámetros y comparar la carga hidráulica resultante (de la modificación) con respecto a la calibrada.

En la comparación, se utilizaron las matrices de cargas hidráulicas calibradas y las resultantes de la modificación del parámetro en cuestión. Los parámetros de conductividad hidráulica se modificaron en 10%, 30% y 50%, al igual que para los coeficientes de almacenamiento y la recarga.

La proporción del cambio en las cargas hidráulicas como resultado de las modificaciones en los parámetros, se utilizó como un índice de la sensibilidad del modelo con respecto a cada parámetro. El método utilizado comprendió el cálculo de la desviación estándar que resulta de las diferencias entre las cargas hidráulicas que aporta el modelo calibrado y los resultados de la simulación obtenidos con respecto a la modificación de los parámetros en cuestión.

En las figuras 4.23 y 4.24 se presentan las gráficas resultantes del análisis de sensibilidad.

Análisis de Sensibilidad

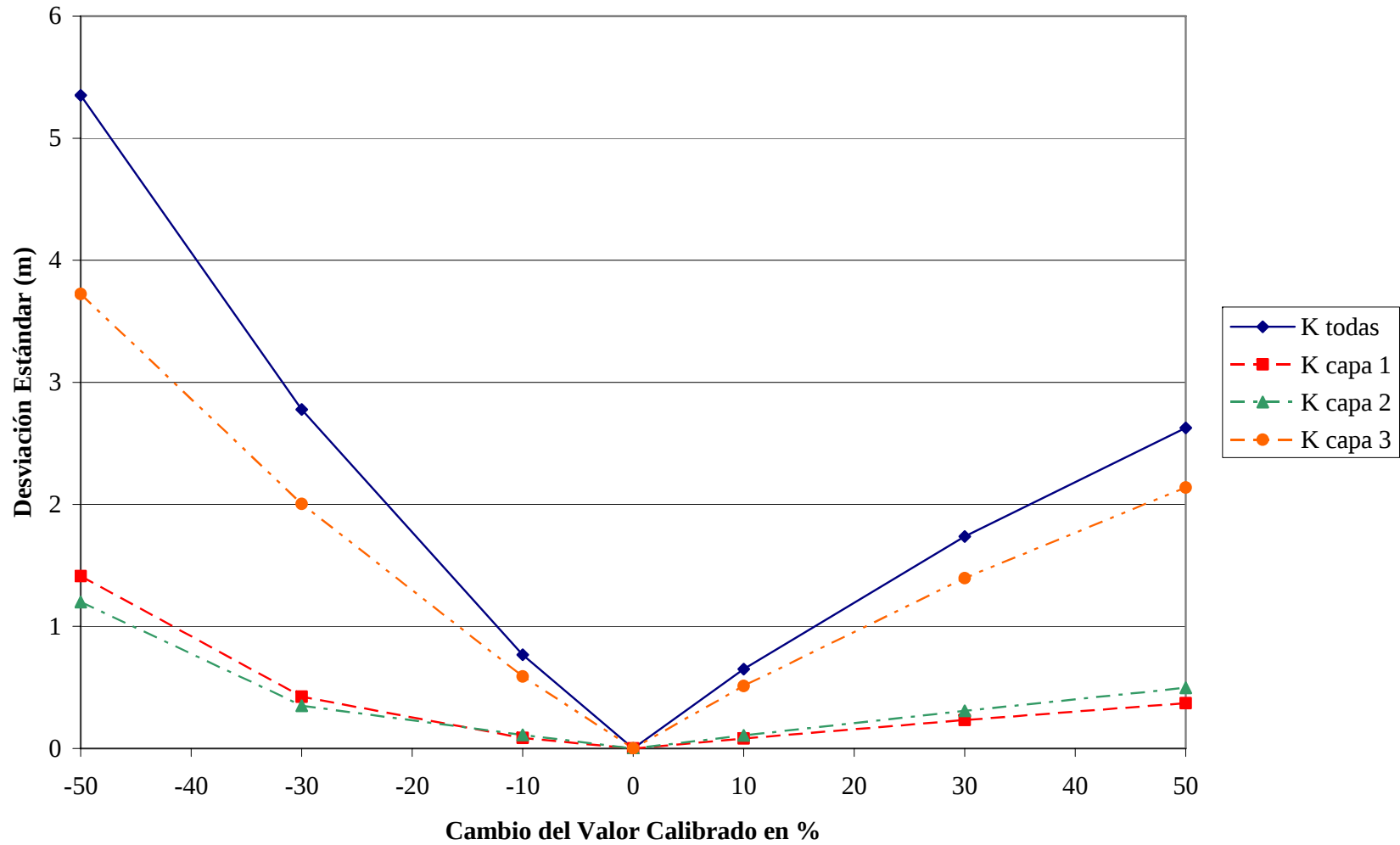


Figura 4.23. Análisis de Sensibilidad (Conductividades).

Análisis de Sensibilidad

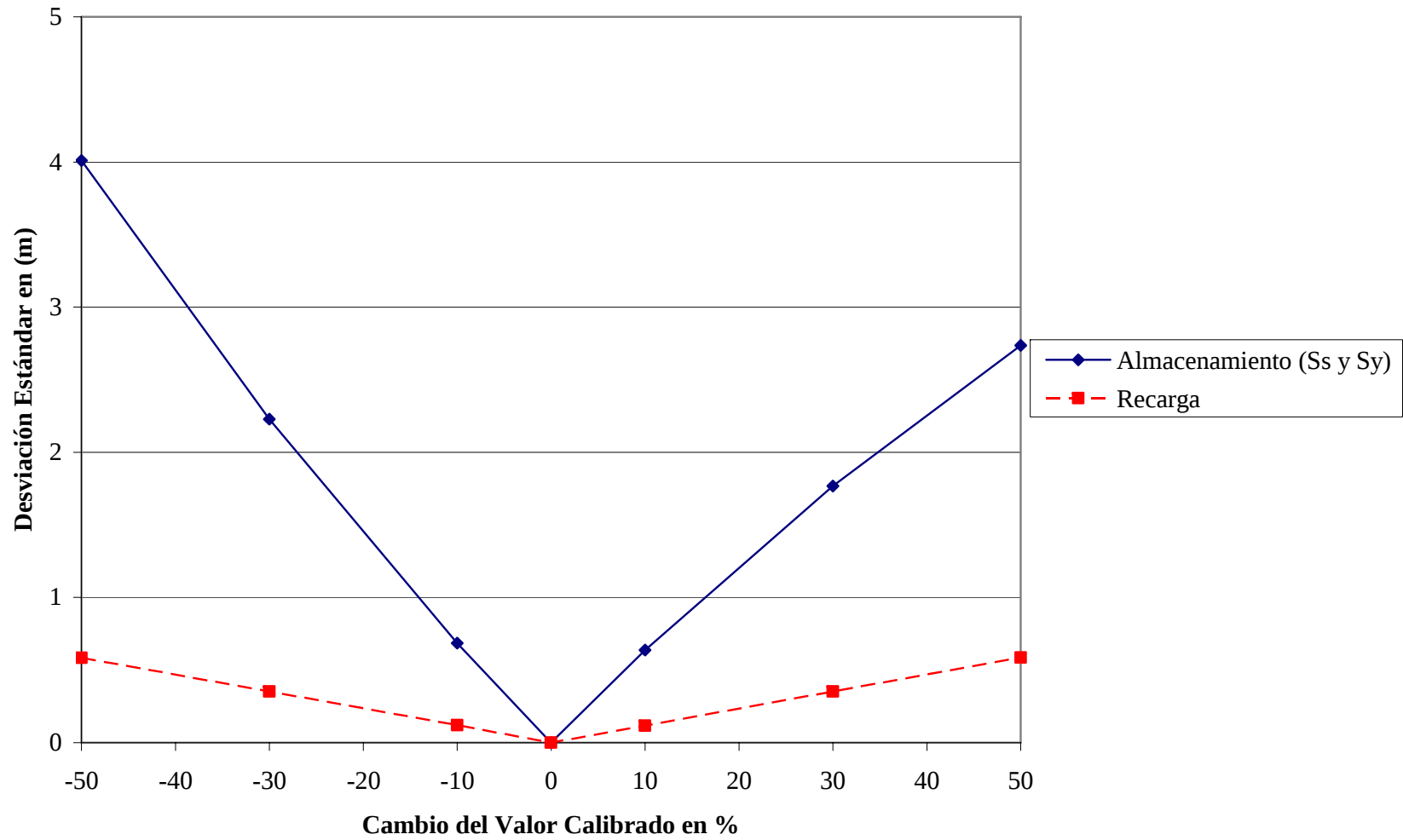


Figura 4.24. Análisis de Sensibilidad (Almacenamiento y Recarga).

Capítulo 4. Implementación y Calibración del Modelo.

De acuerdo con los resultados señalados en las gráficas de las figuras 4.23 y 4.24, la capa 3 (inferior), muestra una sensibilidad más marcada respecto a las otras dos (aún cuando en la capa 2 se encuentran la mayoría de los pozos); esto puede deberse a que dicha capa es la principal aportadora de agua en el acuífero, además del cambio de almacenamiento que puede existir en el paso de agua de la capa 1 a la 2.

Los valores respectivos al almacenamiento (S_s y S_y) también influyen dentro de la sensibilidad del sistema; en el caso de la recarga, ésta es un tanto más uniforme en su comportamiento y mínima, lo cual puede deberse a que matemáticamente y con relación a todo el sistema, representa valores muy pequeños.

En todos los factores modificados, fue importante observar la variabilidad en las cargas hidráulicas obtenidas. Dichas alteraciones resultantes, demuestran que el sistema es susceptible de cambios ante distintos parámetros y permite establecer un alto nivel de confianza en cuanto al sano funcionamiento del modelo en general.

Capítulo 5

Fase Experimental: Modelación de Escenarios

Hermann Rocha Escalante.

5. Fase Experimental: Modelación de Escenarios.

5.1. Simulación de Escenarios Futuros.

Dados los conjuntos de elementos que conformaron el modelo de flujo de aguas subterráneas del acuífero así como el proceso de calibración, surge la necesidad, de conocer la respuesta del acuífero ante posibles escenarios de aprovechamiento futuro.

Normalmente, cuando es posible establecer resultados expresados en forma matemática se acostumbra a obtener valores óptimos (ya sea máximos o mínimos) de acuerdo con la función o funciones analizadas. Sin embargo, en el caso de la modelación de aguas subterráneas no es así, ya que en este tipo de análisis no es posible la obtención de valores óptimos. Lo más común es realizar simulaciones en el sistema donde se plasmen distintas alternativas de aprovechamiento y posteriormente elegir la más factible de acuerdo con las metas buscadas.

Mediante la simulación de escenarios futuros dentro de la modelación de aguas subterráneas, el interés radica en conocer el comportamiento del sistema ante distintas alternativas posibles de aprovechamiento para conocer la factibilidad de las mismas, con las cuales se pueda sustentar, con bases sólidas, la toma de decisiones para establecer los métodos de gestión adecuados de acuerdo a los objetivos buscados.

En el transcurso de esta investigación, se desarrollaron 3 escenarios de aprovechamiento con los cuales se pretendió predecir el estado del acuífero de Rioverde S.L.P. al año 2020; esto es, 14 años hacia el futuro tomando en cuenta que la información disponible más actualizada con que se cuenta es al año 2006 (además de ser el año final considerado en el proceso de calibración). Se consideró un lapso de 14 años, tomando en cuenta que el periodo de calibración fue de 26 (1980-2006); regularmente, el periodo utilizado para la calibración, es el número máximo de años que teóricamente pueden ser proyectados a futuro en la simulación de aguas subterráneas para la obtención de resultados congruentes.

Los escenarios planteados fueron denominados de la siguiente manera:

- Condiciones Actuales (2006) ----- E-1.
- E-1 + Apertura de Nuevos Pozos por Menonitas ----- E-2.
- Ahorro de Agua con Base en una Nueva Concesión Propuesta ----- E-3.

Cabe mencionar que el desarrollo de los escenarios E-2 y E-3 contemplan situaciones que son muy probables que se presenten en un futuro cercano. Las situaciones que se plantean en dichos escenarios, están basadas en un contexto que esta sucediendo actualmente en el acuífero de Rioverde como parte de las problemáticas actuales que trata la Dirección Local de la Conagua en San Luis Potosí y que fueron comentadas vía comunicación directa.

A continuación se explican los detalles particulares con respecto al planteamiento de cada uno de los escenarios futuros que se simularon.

5.1.1. Condiciones Actuales (2006) “E-1”.

El desarrollo de los sistemas de flujo de este escenario, consistió en realizar la predicción al año 2020 manteniendo ante las condiciones actuales de aprovechamiento. Para ello, se utilizó el modelo tal cual resultó del proceso de calibración y tomando en cuenta como cargas iniciales los niveles estáticos del año 1980, así como el esquema de bombeo, representado por 386 pozos con un caudal de extracción total de 150.24 hm³/año, con periodos de bombeo de 183 y 365 días.

5.1.2. E-1 + Apertura de Nuevos Pozos por Menonitas “E-2”.

Como se mencionó al final del apartado 5.1, este escenario está planeado con base a un hecho que ya existe en la región, que consiste en la instalación de una colonia por un grupo Menonita que habita en la zona ubicada aproximadamente a la mitad entre los poblados de Pastora y San Francisco.

Con base en la información obtenida mediante comunicación directa con Conagua (2008), se logró conocer que dicho grupo ha realizado la construcción de 46 pozos (Anexo 5) y que

pretenden solicitar una concesión para el aprovechamiento de agua subterránea de 30 hm³/año.

El desarrollo de simulación del presente escenario se planteó con base en las condiciones de extracción del año 2006 y el incremento que ocasionaría el aprovechamiento que pretende el grupo Menonita en caso que les sea otorgada la concesión mencionada.

El modelo quedó conformado entonces por las condiciones del escenario E-1, más el incremento de los 46 pozos construidos por el grupo Menonita, a los cuales se les asignó de manera uniforme e individual, un caudal de extracción de 1786.78 m³/día durante los 365 días de año (considerando que este tipo de grupos mantienen actividades todo el año). Con ello se obtiene finalmente el caudal que pretenden solicitar a concesión (30 hm³/año). Las cargas iniciales fueron con base en los niveles estáticos del año 1980.

Debido a que se desconocen las características de construcción de los pozos, éstos se propusieron en el modelo con una profundidad de 150 m, contando con una rejilla de 130 m.

5.1.3. Ahorro de Agua con Base en una Nueva Concesión Propuesta “E-3”.

Como se determinó durante el proceso de calibración, las cantidades de agua subterránea extraídas, sobrepasan la establecida por Conagua como concesión para el acuífero de Rioverde. Esto es sin duda, un hecho real, como consecuencia de la deficiente vigilancia que se tiene con respecto a este ámbito.

Como se presentó en el apartado 2.4.1 referente a la gestión del acuífero, uno de los objetivos más recientes es la instalación de medidores en cada uno de los pozos, con el fin de obtener una aproximación más cercana a los gastos extraídos así como cuidar que se cumplan los caudales concesionados.

Como parte de las pláticas reunión que se llevaron a cabo con la Conagua para estructurar los escenarios, resultó que una de las estrategias que se están planteando, consiste en

Capítulo 5. Fase Experimental: Modelación de Escenarios.

ampliar la concesión actual hasta un determinado límite, y que como consecuencia gran parte de los usuarios que exceden su concesión entren en regla. Esta estrategia se esta planteando con base en el conocimiento que tienen acerca del exceso de extracciones; con tal proyección pretenden un incremento de la concesión pero a la vez el establecimiento de una rigurosa vigilancia para el cuidado en el cumplimiento de la nueva concesión.

Con base en lo anterior y ante el desconocimiento de los parámetros a utilizar (por parte de Conagua) para la regulación y establecimiento de la nueva concesión, se optó por proponer un caudal de extracción de $170 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Para este escenario se tomaron en cuenta los pozos construidos por la colonia Menonita, sin embargo, no se hizo cambio alguno en el caudal propuesto en E-2 para cada uno de los 46 pozos que conforman esta región. El ajuste se hizo en los 386 pozos registrados en el censo de Conagua (2007), adaptándolos de tal forma que su extracción total fuera de $140 \text{ hm}^3/\text{año}$; dicho ajuste se hizo de manera uniforme en todos los pozos de bombeo debido al desconocimiento que se tiene acerca de los pozos a través de los cuales se exceden las cantidades permitidas. El ajuste fue de una disminución del 38% con respecto al régimen de bombeo establecido en el periodo de calibración 1996-2006. Así, con la suma de caudales de los 386 pozos del censo (Conagua, 2007) más los 46 pozos del grupo Menonita se obtiene el total de la nueva concesión propuesta ($170 \text{ hm}^3/\text{año}$). En el Anexo 6, se muestra el régimen de bombeo para el presente escenario. Las cargas iniciales fueron asignadas con base en los niveles estáticos del año 2006.

Capítulo 6

Resultados

Hermann Rocha Escalante

6. Resultados.

6.1. Resultados.

A continuación se presentan los resultados para cada uno de los escenarios futuros modelados con un periodo de 14 años (2006-2020):

6.1.1. Condiciones Actuales (2006) “E-1”.

En la figura 6.1, se presentan los abatimientos con respecto al escenario E-1 y en la tabla 6.1, el balance de masa resultante de la simulación, así como su respectiva comparación en relación con los valores teóricos planteados en el balance del sistema presentado en el capítulo 3, excepto en el caso del bombeo cuyo régimen cambió de acuerdo con la calibración, y fue utilizado como condición actual (2006) para la proyección del escenario futuro.

6.1.2. E-1 + Apertura de Nuevos Pozos por Menonitas “E-2”.

En la figura 6.2, se presentan los abatimientos con respecto al escenario E-2 y en la tabla 6.1, el balance de masa resultante de la simulación, así como su respectiva comparación en relación con los valores teóricos planteados en el balance del sistema presentado en el capítulo 3, excepto en el caso del bombeo cuyo régimen cambió de acuerdo con la calibración, y fue utilizado como condición actual (2006) para la proyección del escenario futuro, además de la suma de los caudales de extracción por la colonia Menonita.

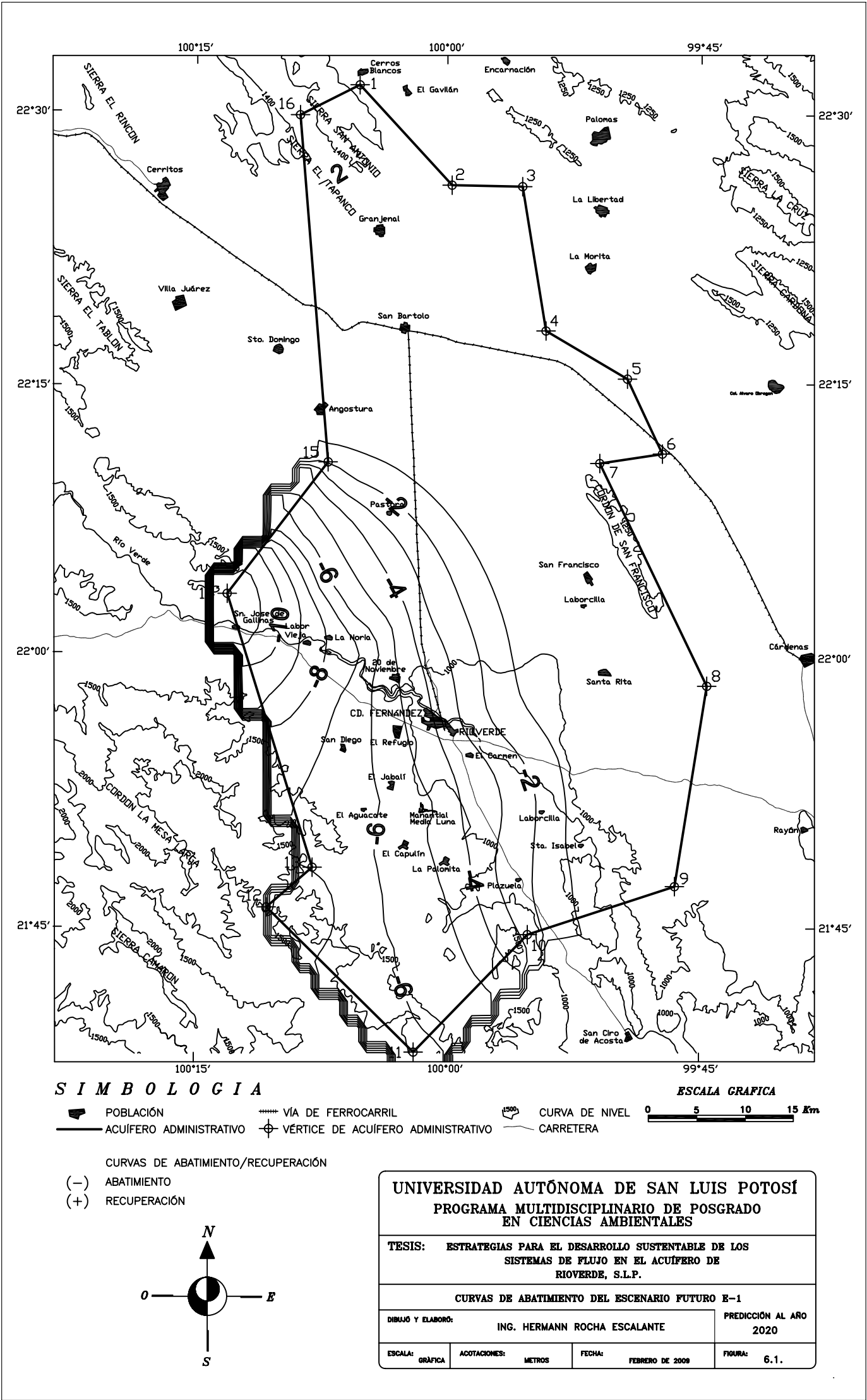
6.1.3. Ahorro de Agua con Base en una Nueva Concesión Propuesta “E-3”.

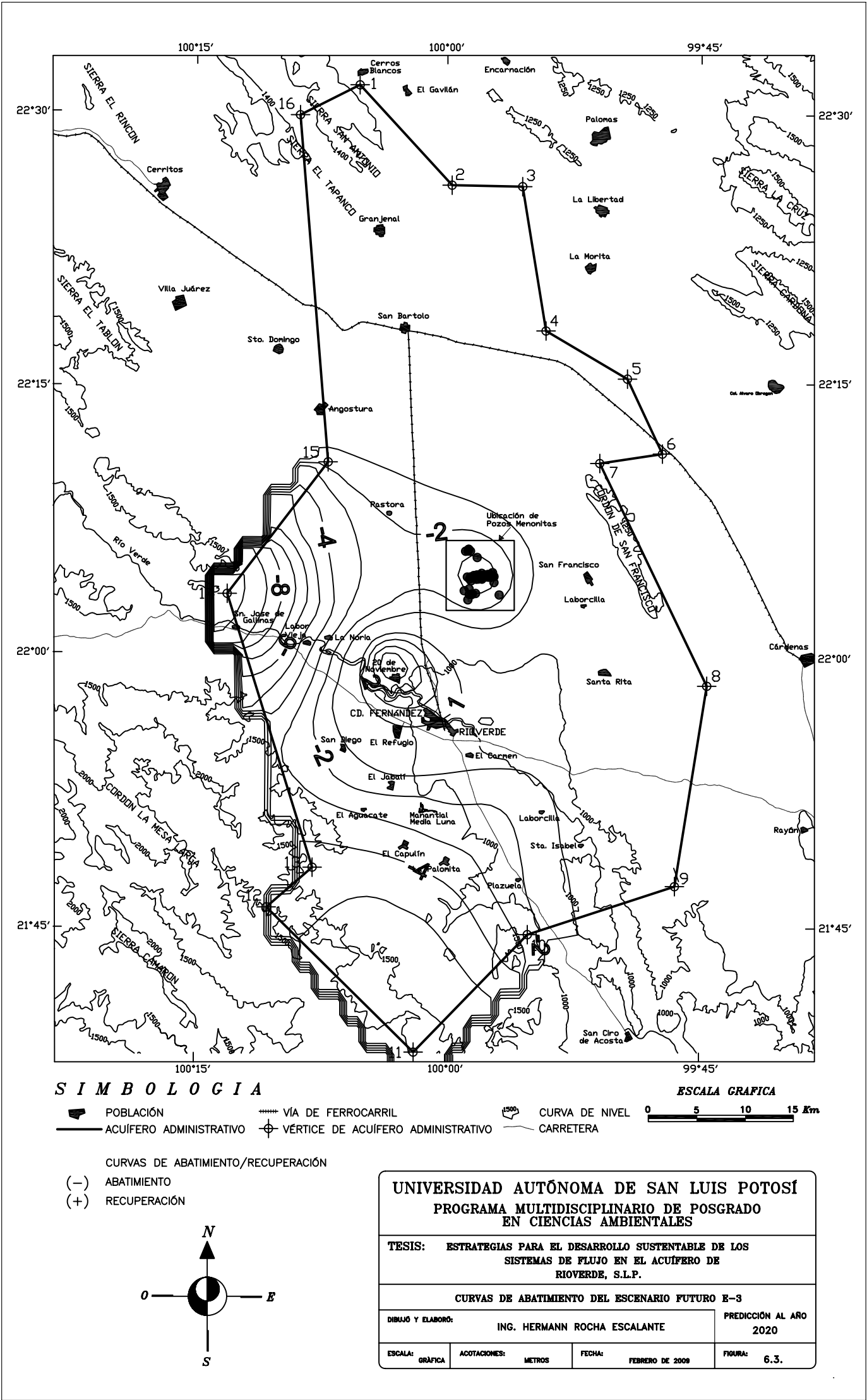
En la figura 6.3, se presentan los abatimientos con respecto al escenario E-3 y en la tabla 6.1, el balance de masa resultante de la simulación, así como su respectiva comparación en relación con los valores teóricos planteados en el balance del sistema presentado en el capítulo 3, excepto en el bombeo cuyo caudal anual quedó establecido en $170 \text{ hm}^3/\text{año}$ debido a la nueva concesión propuesta.

Escenario	Concepto	Balance hm ³	Calculado en VMF hm ³	VMF / Balance %
E-1	Bombeo.	5269.32	5213.20	99
	Escurrimiento del río.	1362.48	1183.63	87
	Evapotranspiración.	1061.90	903.81	85
	Entrada de Agua (flujo subterráneo).	5024.74	3240.46	64
	Recarga.	565.60	565.89	100
E-2	Bombeo.	5689.32	5633.17	99
	Escurrimiento del río.	1362.48	1186.99	87
	Evapotranspiración.	1061.90	872.31	82
	Entrada de Agua (flujo subterráneo).	5024.74	3241.49	65
	Recarga.	565.60	565.89	100
E-3	Bombeo.	4490.78	4454.82	99
	Escurrimiento del río.	1362.48	1186.84	87
	Evapotranspiración.	1061.90	1034.13	97
	Entrada de Agua (flujo subterráneo).	5024.74	3238.17	64
	Recarga.	565.60	565.89	100

Tabla 6.1. Balance de Masa de los Escenarios Proyectados al Año 2020.

Nota. Los caudales de los manantiales de la Media Luna y Los Peroles están incluidos dentro del bombeo.





6.2. Análisis de los Resultados.

Fueron tres los escenarios planteados para establecer una predicción de 14 años (2006-2020) de los abatimientos de agua en el acuífero. El análisis de cada uno de los planteamientos, sugiere que pueden ser factibles; sin embargo, es muy difícil mantener un control con las herramientas de administración utilizadas actualmente.

Con el desarrollo de los escenarios futuros se pretendió mostrar, además del objetivo final del presente estudio, que es la predicción de las condiciones futuras ante situaciones específicas (en este caso regímenes de bombeo), que es posible plasmar cualquier idea de aprovechamiento o situación en un modelo de simulación y conocer los efectos que podría provocar; convirtiéndose dicho modelo en una importante herramienta para la gestión de las aguas subterráneas.

A continuación se presentan el análisis de cada uno de los escenarios:

6.2.1. Condiciones Actuales (2006) “E-1”.

Este planteamiento sugiere un esquema de aprovechamiento constante (con base en las condiciones de extracción del año 2006) durante un lapso de 14 años. Es un escenario factible, sin embargo, es bien sabido que las necesidades de una sociedad aumentan día con día, lo cual, como consecuencia, repercute en el aumento de consumo de agua, aún más tratándose de una región con una intensa actividad agrícola.

Los resultados de este sistema de aprovechamiento, presentan que aún manteniendo constante las cantidades aprovechadas, existirán zonas donde los niveles no evolucionarán de manera importante, y regiones con abatimientos muy marcados. En general, se tiene una mayor tendencia de abatimientos, que van de manera gradual desde 11 m desde la zona W del acuífero administrativo hacia el centro S y SE.

Con respecto a las zonas en donde los niveles se mantendrán relativamente estables, éstas van de 1 m a 2 m y se presentan en las zonas N, NE y E del acuífero administrativo. En el modelo se obtienen valores de recuperación en esta porción, pero esto se interpreta como

una zona de relativa estabilidad en los niveles, ya que en esta región es en donde el modelo numérico presenta la mayor incertidumbre de acuerdo con la falta de información hidrogeológica.

Con respecto a la zona de Santa Rita, también se presenta el aumento de nivel antes mencionado; sin embargo, es conocido que en esta zona tienen problemas de agua, ya que al poco tiempo de extracción se abaten rápidamente los niveles. Además es importante mencionar que existe una deficiencia en la calidad de la información de esta zona, por lo que es probable que el modelo hidrogeológico implementado no represente de manera confiable las características de esta región.

El comportamiento presentado en el actual escenario parece ser lógico de acuerdo con las condiciones planteadas y manejadas en el modelo, presentándose abatimientos en las zonas con mayor concentración de pozos.

Con respecto al balance de masa, tal como se presenta en la tabla 6.1, las cantidades manejadas calculadas por el sistema de cómputo utilizado, representan de manera aceptable las calculadas en el balance presentado en el capítulo 3.

6.2.2. E-1 + Apertura de Nuevos Pozos por Menonitas “E-2”.

El comportamiento es similar al del escenario E-1, con la particularidad en el incremento del abatimiento (aproximadamente en 4 m) por efecto del aumento de extracción en los pozos de la Colonia Menonita, teniendo en esta región, abatimientos totales hasta de 5 m en promedio. El comportamiento en E-2 comienza a diferir a partir de la equipotencial de 6 m de abatimiento con respecto a E-1.

Es importante la influencia que ejercen los pozos de la Colonia Menonita, pues ocasionan que los abatimientos se incrementen entre 1 m y 2 m hacia las zonas NW, E y SE.

En el caso de las zonas con recuperación, se mantienen entre 1 m y 2 m, reduciéndose las áreas de influencia debido al incremento de los abatimientos en las zonas anteriormente

mencionadas. Dichas zonas de recuperación (N, NE y SE del acuífero administrativo) son posiblemente por efecto de las entradas de corrientes subterráneas planteadas en el modelo numérico, pero como se mencionó previamente, esta zona debe visualizarse como estable y tomarse con reserva; además, como se mencionó en E-1, es probable que la correcta interpretación del resultado del modelo sugiera que los niveles de agua se mantendrán en lugar de un incremento.

De forma similar que en E-1, la zona de Santa Rita, también se presenta el aumento de nivel antes mencionado por lo cual, se interpreta como se describió en E-1.

Con respecto al balance de masa, tal como se presenta en la tabla 6.1, las cantidades manejadas calculadas por el sistema de cómputo utilizado, representan de manera aceptable las calculadas en el balance presentado en el capítulo 3.

6.2.3. Ahorro de Agua con Base en una Nueva Concesión Propuesta “E-3”.

El planteamiento de este escenario presenta una alternativa de un aprovechamiento más conciente del agua, con el cual se pueda lograr una disminución en la exigencia de las cantidades de agua subterránea extraída. Si bien es cierto que es muy difícil de lograr, puede ser posible mediante una mejora en las actividades de vigilancia y supervisión actuales.

De acuerdo con el plano resultados (figura 6.3), se hace muy notoria la disminución de los abatimientos en las regiones de mayor exigencia en la extracción de agua. Se presentan abatimientos entre 10 m y 3 m en la zona W del acuífero administrativo; en la región de la Colonia Menonita el abatimiento promedio es de 3 m, es decir, 3 m menos que en E-2. La zona de El Refugio se mantiene sin abatimientos, denotándose una recuperación de hasta 3 m en promedio hacia el poblado de 20 de Noviembre. En general, existe una gran recuperación con el ahorro en la extracción.

La tendencia en la recuperación de las zonas N y E del acuífero administrativo se mantienen similares a E-1 y E-2, marcadas por posibles entradas de corrientes subterráneas, y aplican las restricciones señaladas en las secciones anteriores.

Con respecto al balance de masa, tal como se presenta en la tabla 6.1, las cantidades manejadas calculadas en el sistema de cómputo utilizado, representan de manera aceptable las calculadas en el balance. Se observa un comportamiento distinto con respecto a E-1 y E-2 en el caso del escurrimiento del río el cual aumenta. Este efecto puede ser explicado como consecuencia de la recuperación del acuífero y que ocasionaría un aumento en el flujo base del Río Verde.

Capítulo 7

Conclusiones

Hermann Rocha Escalante

7. Conclusiones.

7.1. Conclusiones Generales.

El proceso de estudio comprendió tres fases muy importantes: 1) recopilación de información, 2) implementación y 3) calibración del modelo numérico del acuífero de Rioverde y el desarrollo de escenarios futuros.

La recopilación de información fue un trabajo arduo debido a la limitada uniformidad de la información generada previamente; la cual se trató de ordenar y ofrecer de manera más fluida en el presente documento.

La calibración del modelo numérico constituyó una de las actividades más exigentes y demandantes, pero fue muy útil ya que fue posible obtener conclusiones de gran importancia. En primera instancia se trató de utilizar la calibración automática, sin embargo, como se pudo observar en las gráficas de las figuras 4.16, 4.17 y 4.18, el resultado fue muy limitado, ya que de acuerdo con las características de los medios geológicos, el abatimiento calculado en el modelo era mucho menor que el que debería presentarse de acuerdo con las observaciones.

Sin embargo, al realizar un análisis exhaustivo sobre el comportamiento del sistema, se observó que la ubicación de distintos pozos que resultaron con una calibración aceptable, se localizaban entre pozos cuya calibración era deficiente. Lo anterior conllevó a pensar en la calidad de la información recabada. Por lo cual se consideró la posibilidad de que la cantidad de agua bombeada en algunos pozos durante los últimos años es mayor a la reportada en los distintos estudios referidos.

Por tal motivo, la segunda fase de la calibración se realizó de manera manual. Para ello se aumentó el caudal en distintos pozos con base en las gráficas *Carga Observada/Carga Calculada*. El proceso fue iterativo hasta obtener las gráficas mostradas en las figuras 4.19 a 4.22. Es importante mencionar que la gráfica de calibración correspondiente al año 1980 siempre fue la misma puesto que los valores de carga obtenidos para los pozos de

observación se utilizaron para realizar la configuración de carga inicial para el proceso de calibración.

Finalmente, con el proceso antes mencionado se logró la calibración del sistema, con lo se estableció, con base en los resultados de la modelación numérica, que se está extrayendo mucha más agua (tabla 4.4) de la reportada en distintos estudios a través de los años y en este caso para el valor utilizado de acuerdo con el censo de Conagua (2007), el cual radica alrededor de $75 \text{ hm}^3/\text{año}$. Esta es una conclusión que está sujeta a comprobación, ya que es necesario comprobar, mediante un control de las extracciones que llevan a cabo los usuarios, el volumen real de extracciones en el acuífero.

Con respecto al desarrollo de escenarios futuros, se trató de implementar escenarios de acuerdo con las situaciones y problemáticas que se viven actualmente en la zona de estudio. El escenario E-1 plantea una extracción constante con respecto a los caudales del año 2006, mientras que en el E-2 se plantea un incremento de la extracción debido a una colonia de un grupo Menonita ya instalado y que inclusive ya tienen sus pozos construidos, estando a la espera de que se les otorgue la concesión mencionada. Finalmente el escenario E-3, plantea un ahorro de agua con base en una estrategia que se comienza a planear en la Conagua (DLSLP), que consiste en aumentar la concesión bajo la restricción que se tiene que cumplir con los caudales de extracción permitidos, ante el desconocimiento de los aspectos a considerar y de las cantidades manejadas, se optó por proponer una extracción anual de 170 hm^3 .

De acuerdo con el comportamiento en cada uno de los escenarios es posible observar que existen zonas muy marcadas de recuperación (denotadas por posibles entradas de flujo subterráneo) y de abatimientos acordes con los niveles de exigencia establecidos en la extracción de agua.

Se pudo apreciar el comportamiento similar en los escenarios E-1 y E-2, con la diferencia marcada por la influencia de los pozos de la Colonia Menonita.

El escenario E-3 presenta una perspectiva futura alentadora cuyo planteamiento esta basado en un ahorro conciente de agua y que exigiría fuertes medidas de gestión, apoyadas por una constante vigilancia.

Con respecto a los balances de masa, el comportamiento de los cálculos en el sistema de cómputo utilizado, van de acuerdo con lo establecido en el balance general y los escenarios correspondientes.

La posibilidad de cada uno de los escenarios estará dada por las pautas que establezcan los organismos correspondientes. Mientras tanto es posible mencionar que el mayor beneficio con base en los escenarios futuros realizados, se obtendrían mediante la aplicación de un sistema similar al E-3, donde se obtendrían menores abatimientos en las zonas de mayor exigencia.

Con base en la experiencia obtenida durante el proceso del trabajo se plantearon las estrategias que se mencionan a continuación. Tales estrategias están separadas en dos ámbitos; las primeras con el objetivo de proponer mejoras en la obtención de información que permita posteriormente conocer con un mayor grado de confiabilidad, el funcionamiento del acuífero. Las segundas se refieren al manejo del acuífero con base en los escenarios desarrollados.

7.2. Estrategias para el Aprovechamiento Sustentable de los Sistemas de Flujo del Acuífero de Rioverde, S.L.P. Mejora de la Calidad de la Información.

A continuación se presentan una serie de estrategias que surgieron con base en la problemática enfrentada durante el proceso del estudio:

- Es importante mejorar la calidad de la información generada, es decir, tener mayor continuidad y establecer programas periódicos para su obtención en campo.
- Tratar de generar la información con respecto a todo el acuífero, ya que en los estudios analizados se pudo observar que año con año, suelen estudiar determinadas

zonas, las cuales a veces suelen ser muy pequeñas y que no representa el comportamiento de los sistemas de flujo en el acuífero.

- Realizar estudios de geofísica de manera distribuida, con lo cual se pueda conocer el subsuelo con mayor certidumbre. Sobre todo es importante definir el espesor del material de relleno en la planicie, lo que permitirá establecer la profundidad al basamento hidrogeológico. Incluir estudios de suelos para obtener parámetros de infiltración de acuerdo con las diferentes zonas.
- Incremento en las pruebas de bombeo, incluyendo que sean aplicadas de forma más distribuida, para definir a detalle los parámetros hidráulicos a lo largo y ancho del acuífero. Específicamente, es necesario detallar el valor del coeficiente de almacenamiento, por lo que es necesario que las pruebas de bombeo se lleven a cabo en pozos de observación.
- Lograr conjuntar un censo de aprovechamiento con información más completa, que permita conocer con mayor precisión las características particulares de cada pozo (construcción, caudales, tiempos de funcionamiento). Adicionalmente identificar los pozos clandestinos que no están registrados pero que operan a lo largo del año extrayendo agua subterránea.
- Instalar medidores totalizadores de flujo para definir con mayor detalle los caudales de extracción de los pozos y, con esto, actualizar y afinar el censo con el que se cuenta. Incluir además, las zonas de riego y tipos de cultivo a que se destina el agua de los pozos.
- Es necesario un estudio hidrogeoquímico más riguroso y su correspondiente modelación matemática, de ser posible como complemento del presente sistema de modelación, con la finalidad de tener una mejora en el entendimiento de los sistemas de flujo, tomando en cuenta cargas hidráulicas y calidad del agua.

- A su vez, generar información de mayor calidad con respecto a las variables climatológicas, que permitan conocer con mayor certidumbre parámetros como precipitación, temperatura y evapotranspiración.
- Establecimiento de una red óptima de monitoreo del agua subterránea y que además se realicen mediciones periódicas de tal modo que pueda obtenerse un historial de mediciones de profundidad al nivel del agua y su calidad físico-química.
- Implementar de manera periódica y constante los datos recabados en un sistema de información geográfica, que permita tener en conjunto y de manera integral el historial del acuífero.
- En general, las estrategias propuestas se encaminan a una generación mas amplia de la información meteorológica, hidrológica e hidrogeológica, de tal manera que pueda ser manipulada de manera confiable en “trabajo de escritorio” y pueda ser fácilmente manipulable para su implementación en el modelo numérico.

El desarrollo de estrategias futuras para el aprovechamiento sustentable del agua del acuífero de Rioverde, no puede concebirse sin un conocimiento íntegro de los factores que afectan el funcionamiento del mismo.

7.3. Estrategias para el Aprovechamiento Sustentable de los Sistemas de Flujo del Acuífero de Rioverde, S.L.P. Escenarios Futuros.

Es muy difícil el establecimiento de estrategias que puedan conllevar al desarrollo sustentable de los recursos hídricos de cualquier sistema con base en el planteamiento y el conocimiento (aún con un alto nivel de confianza) de un escenario futuro.

Aunado a la conformación de estrategias, se requiere de una amplia combinación de actividades, actitudes y cambio de costumbres de aprovechamiento del agua subterránea, así como de la permanente vigilancia en el cumplimiento de las mismas.

Con base en los escenarios desarrollados durante el presente estudio, es posible mencionar que realizar actividades para mantener los gastos de consumo de agua subterránea, aunado al aumento de extracción por los pozos de la Colonia Menonita no son opciones viables pues se esperan niveles de abatimiento entre 4 m y 11 m. Por lo tanto los planteamientos de los escenarios E-1 y E-2 no son los más recomendables.

Es importante mencionar que aunque se esperan, de acuerdo con el modelo numérico, abatimientos alrededor de 4 m en la Colonia Menonita, éstos pueden ser mayores debido a la falta de información con que se cuenta acerca de ellos y las instalaciones de las que disponen.

En la medida de lo posible, es necesario la reducción de los caudales extraídos, cuyo caso se expone en E-3; donde, de acuerdo con la calibración realizada se extraen actualmente 225.61 hm³/año y en E-3 se propone una reducción de 85.61 hm³/año, teniendo un caudal de extracción total de 170 hm³/año tomando en cuenta los 30 hm³/año que solicita la colonia Menonita.

Como se pudo observar en los resultados, E-3 presenta abatimientos menores (aproximadamente en 4 m) con respecto a los otros dos escenarios, e inclusive con una recuperación entre de 2 m promedio para la región entre Cd. Fenández y la colonia 20 de Noviembre.

Tanto la reducción de los caudales hasta un cierto límite (concesión), así como el cuidado en la conservación de una cantidad fija de extracción, requieren de actividades que aseguren su cumplimiento; para ello se proponen las siguientes estrategias:

- Mejora en los sistemas de irrigación, con base en técnicas actuales que permitan la reducción de las cantidades de riego. Además que dichas técnicas se apliquen con base en la demanda de cada cultivo en específico.
- Instalación de medidores en todos los pozos.

- Campañas de vigilancia de cumplimiento de concesiones.
- Campañas de concientización de uso responsable del agua.
- Aplicación de las estrategias en mejora de la cantidad y calidad de la información (mencionadas anteriormente).
- Estudio hidrogeoquímico del agua subterránea con su respectiva implementación en el modelo desarrollado en el presente trabajo, y con ello complementar de manera integral el sistema realizado y obtener una mayor confiabilidad en el desarrollo de escenarios.

Sin duda alguna, las estrategias propuestas mencionadas en los dos apartados anteriores necesitan ser implementadas mediante maniobras de gestión. Es aquí donde se denota la gran importancia del Consejo Técnico de Aguas Subterráneas de Rioverde (COTAS).

Es importante que el COTAS de Rioverde, integrado (al igual que cualquier otro del país) por usuarios del agua subterránea de distintos sectores, como autoridad competente en la aplicación de la Ley de Aguas Nacionales implemente estrategias de gestión para promover la afluencia de diversos recursos a fin de lograr estrategias como las que se han propuesto en esta tesis, además de dar un seguimiento mediante diseño y promoción de programas informativos y educativos de la importancia del aprovechamiento conciente del agua subterránea, aunado a una constante vigilancia en el cumplimiento de los programas establecidos.

La demanda de agua, en todos sus sentidos y respecto a todas sus fuentes, es un hecho que preferentemente no debe dejarse de lado, con decisiones que se toman sin un fundamento básico y mediante esquemas demasiado simplistas.

Para poder implementar las estrategias mencionadas anteriormente, es importante que el COTAS de Rioverde, defina y establezca el Reglamento del Acuífero, el cual es la herramienta de gestión que puntualiza distintos programas como las zonas de veda y la declaración de reservas de agua. Dicho reglamento debe estar elaborado con base en la publicación de estudios técnicos que sirvan como sustento para casos considerados de interés público y que requieren de un manejo específico para garantizar la sustentabilidad hidrológica o se comprometa la sustentabilidad de los ecosistemas vitales como lo son los acuíferos.

Por ello es necesaria la implementación de trabajos como el que se presenta, que puede ser la base del estudio técnico justificativo, con el cual se puedan conjuntar todas las partes que integran el sistema de funcionamiento de los recursos hídricos, en este caso, con respecto a las aguas subterráneas, los cuales permitan realizar análisis previos, con criterios técnicos, ambientales y en lo posible económicos para la propuesta de alternativas de aprovechamiento de agua subterránea.

Este trabajo comprendió una gama amplia de actividades, desde la conjunción de la información necesaria para el entendimiento del funcionamiento del acuífero de Rioverde, hasta la implementación de los mismos en un sistema de modelación de diferencias finitas. Finalizando con el desarrollo de escenarios futuros que han permitido establecer diferentes estrategias para el aprovechamiento sustentable del agua subterránea del acuífero de Rioverde.

De esta manera quedó planteado y elaborado un modelo hidrogeológico del acuífero de Rioverde, S.L.P., el cual representa una herramienta que puede ser utilizada para la gestión en el aprovechamiento del agua subterránea.

Es importante mencionar, que este modelo representa una herramienta inicial que está sujeta a mejoras, y se reconoce que presenta limitaciones, por lo que su enriquecimiento debe ser constante de acuerdo con la conjunción de la información que se genera

periódicamente, lo cual lo hará día con día una herramienta más poderosa y con mayor grado de confiabilidad con respecto al planteamiento de escenarios futuros.

Recalcar este enriquecimiento de información es de suma importancia, puesto que uno de los problemas enfrentados en el desarrollo de este trabajo, es la deficiencia en la calidad de la información existente, además de no tener constancia en la generación de la misma.

Referencias

Hermann Rocha Escalante

Referencias.

Abderrahman, W., Elamin, A., Al-Harazin, I., Eqnaibi, B. 2007. Management of Groundwater in Urban Centers: A Case Study Greater Dammam Metropolitan Area. Arabian Journal for Science & Engineering, Jun2007, Vol. 32 Issue 1C, p49-63, 15p.

Ahlfeld, D. 2004. Nonlinear Response of Streamflow to Groundwater Pumping for a Hydrologic Streamflow Model. Advances in Water Resources, Apr2004, Vol. 27 Issue 4, p349, 12p.

Alvarado, R. 1973. Estudio Geohidrológico de la Cuenca de Río Verde, Estado de San Luis Potosí. Trabajo Recepcional. Escuela de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P. 256 p.

Ballín, R. 2003. Caracterización y manejo del hidrosistema de la región agrícola de Rioverde. Trabajo de investigación para obtener el grado de Maestría en Hidrosistemas Especialidad en Ambiental. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. San Luis Potosí, S.L.P. 160 pp.

Ballín, R., Cardona, A., Cisneros, R. 2004. Evaluación del Impacto Agrícola Sobre el Agua Subterránea de la Zona de Rioverde, S.L.P. Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología. Facultad de Ingeniería. Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Folleto Técnico. San Luis Potosí, S.L.P., México. 20 pp.

Batista, J. 2001. Modelación Matemática de la Terraza del Río Sagua. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 2001, Vol. 22 Issue 1, p21-25, 5p.

Campos, D. 1993. Análisis Agroclimático Preliminar del Estado de San Luis Potosí. Revista Agrociencia. Serie Agua-Suelo-Clima. Vol 4. Enero-Marzo 1993. p 19-45, 26 p.

- Cardona, V. 1993.** Proyecto Ejecutivo para el Manejo, Tratamiento y Disposición de Residuos Sólidos Urbanos en Rioverde, S.L.P. Trabajo Recepcional. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P. 116 p.
- Cardona, A., Ballín, J., Escamilla, E. 2005.** Aguas Ricas en Sulfato en la Zona Media del Estado de San Luis Potosí. Origen y Evolución Geoquímica. Convenio CO3-FAI-1120.55 y Proyecto FMSP-2002-3800. Cartel FI-02.
- Charcas, H., Olivares, E. 2002.** Agua de Riego en la Región de Rioverde, San Luis Potosí, México. Ingeniería Hidráulica en México. V. XVII. Núm 4, 37-56 pp.
- Charcas, H., Olivares, E. 2002.** Proceso de Conformación y Caracterización Actual de la Región Agrícola de Rioverde, San Luis Potosí, México. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. División de Agronomía. 173 p.
- Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. 2001.** Sinopsis de los Estudios Hidrogeológicos y Modelos Matemáticos de los Acuíferos del Estado de Guanajuato. Estudios de Acuíferos. Versión Electrónica en Disco Compacto. 18 Estudios. CEAG. Guanajuato, Guanajuato, México.
- Conagua. 2005.** Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de Rioverde, Estado de San Luis Potosí. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México, D.F. 25 pp.
- Conagua. 2005.** Disponibilidad Media Anual. Acuífero de San Luis Potosí: Rioverde. Comisión Nacional del Agua. Disponible en Internet. Citado: 26 de marzo del 2007. Página web:
http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Programas/Subdirecciones/html_GAS/disp_GAS/disp_pub/estados.

- Conagua. 2006.** Capítulo 3 de El Ciclo Hidrológico. Estadísticas de Agua en México. Edición 2006. 33-70 pp. Disponible en Internet. Citado: 26 de marzo del 2007. Página web: <http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>
- Conagua. 2007.** Estudio de Actualización Geohidrológica en el Acuífero Rioverde, en el Estado de San Luis Potosí. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Estatal en San Luis Potosí. Subgerencia Técnica. Contrato No. SGT-GN-SLP-06-043-RF-LP.
- Conagua. 2007.** Los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS). Comisión Nacional del Agua. Disponible en Internet. Citado: 2 de junio del 2008. Página web: <http://www.conagua.gob.mx/ocavm/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=86d86958-3563-41ba-a0f1-b910cbf6fb68%7CConsejos%20de%20Cuenca%7C0%7C5%7C0%7C0%7C0>
- Custodio, E. 1995.** Explotación de las aguas subterráneas y su problemática asociada. Hidrología Subterránea. II Seminario Hispano-Argentino. Serie Correlación Geológica N° 11. Asociación Hidrogeológica Argentina. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo. Universidad Nacional de Tucumán. 259-275 pp. ISSN 217428.
- Custodio, E., Llamas, M. 1996.** Sección 16 de Modelos en Hidrología Subterránea. Hidrología Subterránea. Tomo II. Segunda Edición Corregida. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España, 1996. ISBN 84-282-0281-8 (Tomo II). 1571-1566 p. 96pp.
- Gadeon, M., Wemaere, I., Marivoet, J. 2007.** Regional Groundwater Model of North-East Belgium. Journal of Hydrology, Mar2007, Vol. 335 Issue 1/2, p133-139, 7p.
- García, E. 1974.** Distribución de la precipitación en la República Mexicana. Boletín del Instituto de Geografía. Volumen V. UNAM. 20 pp.
- Getchell, F. 1996.** Groundwater Modeling becomes a Mainstram Tool. Water Engineering & Management, Jul96, Vol. 143 Issue 7.

- Guvanasen, V., Wade, S. 2000.** Simulation of Regional Ground Water and SALT Water Intrusión in Hernando Country, Florida. Ground Water. Vol. 38 Issue 5. p772. 12 pp.
- INEGI. 2000.** Imagen Cartográfica Digital. Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas, San Luis Potosí. Imagen Digital. Escala 1:1 000 000. Serie II. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Estados Unidos Mexicanos. ISBN 970-13-2944-9.
- INEGI. 2005.** Mapa de División Política de los Estados Unidos Mexicanos. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. Disponible en Internet. Citado: 20 de Abril del 2008. 10pp.
Página web:
http://cuentame.inegi.gob.mx/mapas/pdf/nacional/div_territorial/nacionalestadosycolor.pdf.
- INEGI. 2008.** Estadísticas a Propósito del Día Mundial del Agua, Datos Nacionales. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F. Marzo del 2008. Disponible en Internet. Citado: 20 de Abril del 2008. 10pp.
Página web:
<http://www.inegi.gob.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/contenidos/estadisticas/2008/agua08.doc>
- Jaworska-Szulc, B. 2004.** Examination of the Effect of Altering Model Complexity on Representing Groundwater Flow. Polish Journal of Environmental Studies, 2004, Vol. 13 Issue 5, p521-524, 4p.
- Keith, D. 1973.** Capítulo 1 de Introducción. Hidrología (Agua Subterránea). Ed. Paraninfo. España 1972. 13-24 pp. ISBN – 84-283-0348-7.
- Kirshen, P. 2002.** Potential Impacts of Global Warming on Groundwater in Eastern Massachusetts. Journal of Water Resources Planning & Management, May/Jun2002, Vol. 128 Issue 3, p216, 11p.
- Hermann Rocha Escalante.**

- Mane, M., Singh, D., Singh, A., Bhattacharya, A. 2007.** Development of GIS Interface Con2grid for Groundwater Model. Current Science (00113891), 2007, Vol. 92 Issue 9, p1297-1302, 6p.
- McPhee, J., Yeh, W. 2004.** Multiobjective Optimization for Sustainable Groundwater Management in Semiarid Regions. Journal of Water Resources Planning & Management, Nov/Dec2004, Vol. 130 Issue 6, p490-497, 8p.
- McPhee, J., Yeh, W. 2008.** Groundwater Management using Model Reduction via Empirical Orthogonal Functions. Journal of Water Resources Planning & Management, Mar/Apr2008, Vol. 134 Issue 2, p161-170, 10p.
- Misnisterio de Obras Públicas. 1972.** Servicio Geológico. Boletín N° 37. Informaciones y Estudios. Número Dedicado al Seminario Sobre Modelos Analógicos y Digitales para la Explotación y Administración de Recursos Hidráulicos Subterráneos. Madrid, España. 178 p.
- Montañéz, A. 1992.** Hidrogeoquímica del Municipio de Rioverde, S.L.P. Trabajo Recepcional. Facultad de Ingeniería. Área Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P. 91 p.
- Moore, J., Zaporozec, A., Mercer, J. 2005.** Capítulo 1 de El Agua Subterránea, un Recurso Vital. Una Introducción al Agua Subterránea. Instituto de Geología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Folleto Técnico No128. San Luis Potosí, S.L.P., México. 10-12 pp.
- D.O.F. 2002.** Norma Oficial Mexicana 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. Diario Oficial de la Federación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 119 p.

- Mijares, A. 2005.** Fundamentos de Hidrología de Superficie. México. Editorial Limusa. 303 p. ISBN 968-18-3014-8.
- Obregón, V., Saavedra, I., Nava, M. 2006.** Evaluación del Flujo de Agua Superficial y Subterránea en la Ciudad Universitaria de Caracas. Tecnología y Construcción. V. 22, N° 2.35-42 pp. ISSN 0798-9101.
- Ökten, S., Yazicigil, H. 2005.** Investigation of Safe and Sustainable Yields for the Sandy Complex Aquifer System in the Ergene River Basin, Thrace Region, Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, 2005, Vol. 14 Issue 2, p209-226, 18p.
- Ortíz, R. 1996.** Glosario Geohidrológico. Facultad de Ingeniería. Universidad Uutónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P. México. Editorial Universitaria Potosina. 180 p. ISBN 968-7674-00-8.
- Planer-Friedrich, B. 1999.** Hydrogeological and Hydrochemical Investigations in the Rioverde Basin, Mexico. Tesis de Maestría. Technische Universität Bergakademie Freiberg. Germany. 276 p.
- Price, M. 2003.** Capítulo 3 de Agua en Movimiento. Agua Subterránea. Ed. Limusa S.A. de C.V. 13-19 pp. ISBN 968-18-5560-4
- Proyesco S.A. 1979.** Trabajos Complementarios del Estudio Geohidrológico de la Zona de Río Verde, S.L.P. San Luis Potosí, S.L.P.
- Ramírez, P. 2007.** Caracterización de la Dinámica de Flujo mediante la Aplicación de un Modelo Numérico Hidrogeológico. Caso de la Cuenca del Río Birrís, Cartago, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, Jun2007 Issue 34/35, p83-97, 15p.
- Ramírez, R. 2000.** Groundwater For Modeling of the Naivasha Basin, Kenya. Minería y Geología, 2000. Vol. 17 Issue 2, p15-21, 7p.

- Ricardo, R., Hernández, A. 2004.** Modelación del Acuífero La Cana y Evaluación de sus Recursos Hídricos Subterráneos. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 2004, Vol. 25 Issue 2, p55-64, 10p.
- Rojas, R. 2007.** Groundwater Flow Modelling of the Regional Aquifer of the Pampa del Tamarugal, Northern Chile. Hydrogeology Journal, May2007. Vol. 15 Issue 3, p537-551, 15p.
- Rühaak, W., Rath, V., Wolf, A., Clauser, C. 2008.** 3D Finite Volume Groundwater and Heat Transport Modeling with Non-orthogonal Grids, using a Coordinate Transformation Method. Advances in Water Resources, Mar2008, Vol. 31 Issue 3, p513-524, 12p.
- Saiers, J., Genereux D., Bolster, C. 2004.** Influence of Calibration Methodology on Ground Water Flow Predictions. Ground Water, Jan/Feb2004. Vol. 42 Issue 1, p32-44, 13p.
- Scanlon, B., Mace, R., Barrett, M., Smith, Brian. 2003.** Can We Simulate Regional Groundwater Flow in a Karst System using Equivalent Porous Media Models ? Case Study, Barton Springs Edwards Aquifer, USA. Journal of Hydrology, May2003. Vol. 276 Issue 1-4, p137, 22p.
- Schlumberger Water Services. 2006.** Aquifer Storage and Recovery in Arid Environments. Abu Dhabi, United Arab Emirates. Case Study. Waterloo Hydrogeologic, Inc. A Schlumberger Company. Waterloo, ON, Canada. April 2006.
- Schlumberger Water Services. 2007.** Aggregate Quarry Hydrogeologic Investigation. Northern California. Case Study. Waterloo Hydrogeologic, Inc. A Schlumberger Company. Waterloo, ON, Canada. March 2007.

- Schlumberger Water Services. 2007.** Hydrogeologic Impact Análisis at Acton Quarry. Acton, Ontario. Case Study. Waterloo Hydrogeologic, Inc. A Schlumberger Company. Waterloo, ON, Canada. July 2007.
- Smith, A., Nield, S. 2003.** Groundwater Discharge from the Superficial Aquifer into Cockburn Sound Western Australia: estimation by inshore water balance. Biogeochemistry, Nov2003, Vol. 66 Issue 1/2, p125-144, 20p.
- Sociedad Geológica Americana. 2003.** Active and Inactive Groundwater Flow Systems: Evidence From a Stratified, mountainous Terrain. Geological Society of America Bulletin. Dec2003, Vol. 115 Issue 12, p1456-1472, 18p.
- Tokgos, M., Yilmaz, K., Yazicigil, H. 2002.** Optimal Aquifer Dewatering Schemes for Excavation of Collector Line. Journal of Water Resources Planning & Management, Jul/Aug2002, Vol. 128 Issue 4, p248, 14p.
- UASLP. 2004.** Estudio para la Determinación de Proyectos Prioritarios para la Recarga del Acuífero Rioverde-Cd. Fernández y Región Hidrológica Pánuco. San Luis Potosí, S.L.P., Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. 189p.
- Vallner, L. 2003.** Hydrogeological Model of Estonia and its Applications. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology, Sep2003, Vol. 52 Issue 3, p179-192, 14p.
- Vásquez, M. 2005.** Evaluación del Potencial Hidrogeológico del Acuífero La Bomba, Cuenca del Río Banano, Limón, Costa Rica. Tesis de Maestría. 122pp.
- Weiss, M., Gvirtzman, H. 2007.** Estimating Ground Water Recharge using Flow Models of Perched Karstic Aquifers. Ground Water, Nov2007, Vol. 45 Issue 6, p761-773, 13p.