



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

MODELACIÓN CONJUNTA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES Y  
SUBTERRÁNEOS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SONORA

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JOSÉ LUIS FAJARDO CALZADA

TUTOR PRINCIPAL:  
DR. FERNANDO JORGE GONZÁLEZ VILLARREAL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. NOVIEMBRE DE 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr. Ramón Domínguez Mora  
**Secretario:** M. I. Víctor Franco  
**Vocal:** Dr. Fernando Jorge González Villarreal  
**1er. Suplente:** Dr. Adrián Pedrozo Acuña  
**2do. Suplente:** Dr. José Agustín Breña Naranjo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:  
Instituto de Ingeniería, UNAM  
Cd. de México, México

**TUTOR DE TESIS:**

---

**Dr. Fernando Jorge González Villarreal**

# AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, la máxima casa de estudios del país.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por las oportunidades ofrecidas.

Al Dr. Fernando J. González Villarreal, por brindarme el privilegio de desarrollar la presente investigación bajo su dirección, y a quién expreso mi mayor gratitud por su confianza, tiempo y apoyo prestado.

Al M.I. Víctor Franco y al Dr. Ramón Domínguez, por sus incondicionales atenciones previas y durante el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Agustín Breña y al Dr. Adrián Pedrozo, por sus consejos y sugerencias al presente trabajo.

A la M.I. Angélica Mendoza por todo su apoyo, compañía y cariño; por ser alguien tan especial para mí.

A Cristian y Víctor, por su amistad y compañerismo en estos años de estudio, por compartir grandes experiencias dentro y fuera de las aulas de clase.

A quienes en la etapa más reciente de mi ejercicio profesional, me brindaron oportunidades que definieron mi interés por el ramo de la hidráulica: al M. Sc. Fernando Rueda y al Dr. Juan Carlos García, infinitas gracias por todo.

## ***Dedicatoria***

*A Dios, por la vida que me presta y que no deja de ser asombrosa*

*A mi mamá Luisa y a mi papá Amancio, a quienes les debo todo lo que soy*

*A mis hermanos Sofía y Ricardo, que son parte de mi motivación*

*A Irma y Armando, por el cariño que les tengo*

*“Comienza haciendo lo necesario, luego haz lo posible y terminarás haciendo lo imposible”*

*Francisco de Asís*

# RESUMEN

Largos periodos de escasez de lluvia en la cuenca alta del río Sonora, afectan la disponibilidad de sus recursos hídricos en fuentes de abastecimiento superficiales y subterráneas. El estrés al que han sido sometidas provoca una disminución considerable en los escurrimientos del río, limitando los aprovechamientos que se abastecen de manera superficial y generando un incremento en las extracciones subterráneas. En estas últimas, existe una sobreexplotación que se refleja en el abatimiento de sus niveles freáticos y que repercute directamente en la modificación al régimen de escurrimiento, debido a la estrecha interacción que se produce entre el río y los acuíferos, derivada de las altas permeabilidades del suelo que caracterizan a la región en estudio.

El presente trabajo de investigación propone una modelación conjunta de aprovechamientos hídricos, orientado al estudio de la interacción aguas superficiales y subterráneas, y al análisis de políticas de manejo de uso conjunto. Lo anterior se logra mediante la implementación del modelo de optimización de recursos WEAP (Water Evaluation and Planning System) y su vinculación con el modelo numérico de aguas subterráneas MODFLOW que resuelve la ecuación de flujo subterráneo mediante un esquema numérico de diferencias finitas.

Dichas herramientas evalúan de forma dinámica el comportamiento de los sistemas hidráulicos mediante la simulación de distintos escenarios propuestos. Tales instrumentos forman parte de los Sistemas de Soporte a las Decisiones (DSS, por sus siglas en inglés), a través de los cuales se desarrollan mecanismos para el diseño y manejo de esquemas óptimos de recursos hídricos.

Los trabajos requeridos contemplaron cuatro etapas generales: 1) caracterización hidrológica e hidrogeológica a partir de estudios disponibles, 2) construcción del modelo de aguas superficiales y del modelo de aguas subterráneas, 3) vinculación y calibración en su funcionamiento conjunto y 4) evaluación de escenarios de manejo de los aprovechamientos hídricos.

En lo referente a la calibración conjunta, se logra una validación de la calidad de la simulación aplicando criterios estadísticos que evalúan la eficiencia, el error medio y la desviación relativa, entre las variables observadas y calculadas. Estos criterios corresponden al índice de eficiencia NASH y PBIAS para la validación de escurrimientos y el NRMS para la validación de las cargas piezométricas.

Las políticas de manejo evaluadas demuestran que para mantener un escenario sostenible en las fuentes de abastecimiento, se requiere reducir de forma paralela las demandas que son abastecidas en los acuíferos Valle de Aconchi y Valle de Ures. En el primero las reducciones se establecen hasta en un 30%, mientras que en el segundo se disminuyen en un 15%, incrementándose en los periodos de mayor sequía a un 35%.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL .....	II
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.2. OBJETIVOS .....	3
1.2.1. <i>Objetivo general</i> .....	3
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	3
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4. ALCANCES.....	4
1.5. CONTENIDO DE LA TESIS.....	5
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>6</b>
<b>2. USO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS .....</b>	<b>6</b>
2.1. EL USO CONJUNTO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	7
2.1.1. <i>Definición del uso conjunto</i> .....	7
2.1.2. <i>Esquemas de utilización conjunta</i> .....	8
2.2. MODELACIÓN CONJUNTA .....	9
2.2.1. <i>Marco conceptual</i> .....	10
2.2.2. <i>Clasificación de modelos</i> .....	10
2.2.2.1. <i>Clasificación por información de entrada</i> .....	10
2.2.2.2. <i>Clasificación por el tipo de representación</i> .....	10
2.2.2.3. <i>Clasificación por el tipo de aleatoriedad</i> .....	11
2.2.2.4. <i>Clasificación por su aplicación u objetivo</i> .....	11
2.2.3. <i>Herramientas computacionales para la simulación del uso conjunto</i> .....	12
2.3. SISTEMAS DE SOPORTE A LA DECISIÓN EN LA MODELACIÓN CONJUNTA....	14
2.4. EXPERIENCIAS Y CASOS DE ESTUDIO .....	14
2.5. PERSPECTIVAS EN LA MODELACIÓN CONJUNTA .....	16
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>17</b>
<b>3. MODELO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....</b>	<b>17</b>
3.1. DESARROLLO TEÓRICO DE LA ECUACIÓN DE FLUJO EN MEDIOS SATURADOS.....	19
3.1.1. <i>Ley de Darcy</i> .....	19



5.2.1.2.	<i>Parámetros hidráulicos</i> .....	54
5.2.1.3.	<i>Niveles estáticos</i> .....	55
5.2.2.	<i>Modelo MODFLOW</i> .....	55
5.2.2.1.	<i>Estructura general</i> .....	56
5.2.2.2.	<i>Paqueterías</i> .....	57
5.2.3.	<i>Construcción del modelo</i> .....	58
5.2.3.1.	<i>Discretización espacio – temporal</i> .....	58
5.2.3.2.	<i>Capas del modelo</i> .....	59
5.2.3.3.	<i>Parámetros hidrogeológicos</i> .....	62
5.2.3.4.	<i>Recarga y descarga del sistema</i> .....	64
5.2.3.5.	<i>Condiciones iniciales</i> .....	64
5.2.3.6.	<i>Condiciones de frontera</i> .....	65
5.3.	<b>MODELACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES</b> .....	65
5.3.1.	<i>Componentes hidrológicas e hidrogeológicas en la modelación conjunta</i> .....	65
5.3.2.	<i>Modelo Conceptual de hidrología superficial</i> .....	65
5.3.2.1.	<i>Precipitación media acumulada</i> .....	66
5.3.2.2.	<i>Precipitación efectiva y coeficiente de escurrimiento</i> .....	66
5.3.2.3.	<i>Pérdidas por evapotranspiración</i> .....	67
5.3.2.4.	<i>Demandas y usos de Agua</i> .....	68
5.3.3.	<i>Distribución de las componentes hidráulicas en WEAP</i> .....	69
5.3.4.	<i>Vinculación WEAP - MODFLOW</i> .....	70
5.3.4.1.	<i>Discretización espacial y temporal</i> .....	70
5.3.4.2.	<i>Distribución de la infraestructura para abastecimiento</i> .....	71
5.3.4.3.	<i>Demandas y derivaciones</i> .....	71
5.3.4.4.	<i>Flujos de retorno</i> .....	72
5.3.4.5.	<i>Condiciones iniciales</i> .....	72
5.4.	<b>CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN INTEGRADA DE MODELOS</b> .....	73
5.4.1.	<i>Calibración de escurrimientos observados</i> .....	73
5.4.2.	<i>Calibración de cargas estáticas</i> .....	77
5.5.	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b> .....	79
5.6.	<b>SIMULACIÓN DE POLÍTICAS DE MANEJO CONJUNTO</b> .....	84
5.6.1.	<i>Planteamiento de escenarios</i> .....	85
5.6.1.1.	<i>Escenario 1: Reducción a las demandas en el acuífero Valle de Ures</i> .....	85
5.6.1.2.	<i>Escenario 2: Generar mayor aportación del acuífero Valle de Aconchi a los escurrimientos del río Sonora</i> .....	85

5.6.1.3. Escenario 3: Reducción simultánea a las demandas del acuífero Valle de Ures y Valle de Aconchi.....	85
5.6.1.4. Escenario 4: Manejo sostenible.....	85
5.6.2. Simulación de escenarios propuestos .....	85
5.6.2.1. Escenario 1.....	86
5.6.2.2. Escenario 2.....	87
5.6.2.3. Escenario 3.....	89
5.6.2.4. Escenario 4.....	90
5.6.3. Resultados .....	92
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>93</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>93</b>
6.1. CONCLUSIONES.....	94
6.2. RECOMENDACIONES.....	95
6.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	96
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO 3.....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO 4.....</b>	<b>125</b>
<b>ANEXO 5.....</b>	<b>128</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 ESQUEMA CONCEPTUAL EN EL SISTEMA DE FUNCIONAMIENTO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS.....	7
FIGURA 2.2 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL USO CONJUNTO ALTERNANTE Y MITIGACIÓN DE IMPACTOS.....	9
FIGURA 2.3 DIAGRAMA DE FLUJO MODELO STANFORD 1966.....	9
FIGURA 2.4 MODELO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE SOPORTE A LAS DECISIONES EN UN ESQUEMA DE USO CONJUNTO.....	14
FIGURA 3.1 EL CICLO HIDROLÓGICO.....	17
FIGURA 3.2 ESQUEMA DE LAS ZONAS QUE CONTIENEN EL AGUA EN EL SUBSUELO.....	18
FIGURA 3.3 ACUÍFERO CONFINADO Y NO CONFINADO.....	18
FIGURA 3.4 INSTRUMENTO EMPLEADO EN EL EXPERIMENTO DE DARCY.....	19
FIGURA 3.5 VOLUMEN ELEMENTAL REPRESENTATIVO ( $\Delta X \Delta Y \Delta Z$ ) CUYA DIRECCIÓN DE FLUJO SE ESTABLECE A LO LARGO DEL EJE COORDENADO Y.....	20
FIGURA 3.6 DOMINIO D Y CONDICIONES DE FRONTERA FÍSICAS.....	23
FIGURA 3.7 ESQUEMA CONCEPTUAL DE LA INTERACCIÓN RÍO-ACUÍFERO.....	26
FIGURA 3.8 ÍNDICES DE LAS CARAS ADYACENTES QUE RODEAN A LAS CELDAS I, J, K.....	28
FIGURA 3.9 FLUJO DENTRO DE LA CELDA I, J, K, DESDE LA CELDA I, J-1, K.....	29
FIGURA 3.10 MODELO CONCEPTUAL DE LA FILTRACIÓN A UNA CELDA A TRAVÉS DEL LECHO DEL RÍO.....	31
FIGURA 3.11 APROXIMACIÓN EN DIFERENCIAS FINITAS HACIA ATRÁS.....	32
FIGURA 3.12 ESQUEMA CONCEPTUAL DE RENDIMIENTO ESPECÍFICO.....	35
FIGURA 3.13 RELACIÓN ENTRE EL FLUJO Y EL GRADIENTE HIDRÁULICO. LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K) ES LA PENDIENTE QUE DEFINE LA RELACIÓN.....	36
FIGURA 4.1 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO POR SIMULACIÓN DE CUENCAS DEL MODELO WEAP.....	40
FIGURA 4.2 ESQUEMA CONCEPTUAL EN LA INTERACCIÓN RÍO - ACUÍFERO DENTRO DEL MODELO WEAP.....	42
FIGURA 4.3 VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA CONDUCTANCIA.....	43
FIGURA 4.4 VINCULACIÓN ENTRE LOS MODELOS WEAP Y MODFLOW.....	48
FIGURA 4.5 ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO WEAP-MODFLOW.....	48
FIGURA 5.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, CUENCA ALTA DEL RÍO SONORA.....	52

FIGURA 5.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES ACUÍFERAS Y DE SUS PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	54
FIGURA 5.3 PROCESOS DEL ALGORITMO DE TRABAJO DE MODFLOW .....	57
FIGURA 5.4 MÓDULOS ORGANIZADOS POR PAQUETERÍAS Y PROCEDIMIENTOS .....	58
FIGURA 5.5 CONFIGURACIÓN ESPACIAL EN DE LOS ACUÍFEROS VALLE DE ACONCHI, VALLE DE URES Y TOPAHUE .....	59
FIGURA 5.6 CONFIGURACIÓN DE LA COTA INFERIOR DEL ESTRATO ALUVIAL EN LA ESTRUCTURA MODFLOW.....	60
FIGURA 5.7 CONFIGURACIÓN DE LA COTA DEL BASAMENTO EN LA ESTRUCTURA DE MODFLOW.	61
FIGURA 5.8 DISCRETIZACIÓN VERTICAL DE SECCIONES EN MODFLOW, A) VALLE DE ACONCHI, B) VALLE DE URES Y C) TOPAHUE .....	62
FIGURA 5.9 CONFIGURACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS EN MODFLOW.....	63
FIGURA 5.10 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES MODFLOW, NIVEL PIEZOMÉTRICO AÑO 1970.....	64
FIGURA 5.11 DISTRIBUCIÓN DE LAS COMPONENTES HIDROLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LA ZONA A MODELAR .....	66
FIGURA 5.12 TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL 1970 A 2004; Y PÉRDIDAS POR EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL, PARA EL MISMO PERIODO.....	67
FIGURA 5.13 DEMANDAS DE USO AGRÍCOLA POR LOCALIDAD AÑO 1970 A 2004 .....	68
FIGURA 5.14 VOLÚMENES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN EL PERIODO 1970 A 2004.	68
FIGURA 5.15 DISTRIBUCIÓN DE LAS COMPONENTES HIDROLÓGICAS EN EL MODELO WEAP .....	69
FIGURA 5.16 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL EN EL MODELO WEAP .....	70
FIGURA 5.17 DISTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO	71
FIGURA 5.18 DERIVACIONES DEL VOLUMEN TOTAL SUMINISTRADO.....	72
FIGURA 5.19 PRIMERA CORRIDA DE LA SIMULACIÓN CONJUNTA EN LOS MODELOS WEAP- MODFLOW.....	73
FIGURA 5.20 SPI Y SRI, 36 MESES. ....	74
FIGURA 5.21 CALIBRACIÓN DEL HIDROGRAMA MENSUAL Y ANUAL, SEGUNDO CRITERIO .....	76
FIGURA 5.22 VALIDACIÓN MEDIANTE CRITERIO NASH Y PBIAS.....	76
FIGURA 5.23 VALIDACIÓN DE LAS CARGAS PIEZOMÉTRICAS CALCULADAS. ....	77
FIGURA 5.24 CORRESPONDENCIA ENTRE CARGAS ESTÁTICAS CALCULADAS Y OBSERVADAS EN 2004 .....	78
FIGURA 5.25 EVOLUCIÓN DE LOS VOLÚMENES DE ESCURRIMIENTO EN EL RÍO SONORA Y VOLÚMENES DE ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO.....	79

FIGURA 5.26 CONDICIONES FINALES PARA EL AÑO 2004, CARGAS PIEZOMÉTRICAS CALCULADAS WEAP-MODFLOW .....	80
FIGURA 5.27 CELDAS DEL MODELO QUE APORTAN GASTO A CORRIENTES SUPERFICIALES.....	81
FIGURA 5.28 ZONAS DE MAYOR ABATIMIENTO IDENTIFICADAS EN EL ACUÍFERO VALLE DE ACONCHI .....	82
FIGURA 5.29 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CARGA PIEZOMÉTRICA EN POZOS DE OBSERVACIÓN LOCALIZADOS EN EL ACUÍFERO VALLE DE URES .....	82
FIGURA 5.30 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CARGA PIEZOMÉTRICA EN POZOS DE OBSERVACIÓN LOCALIZADOS EN EL ACUÍFERO VALLE DE ACONCHI .....	83
FIGURA 5.31 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CARGA PIEZOMÉTRICA EN POZOS DE OBSERVACIÓN LOCALIZADOS EN EL ACUÍFERO TOPAHUE .....	84
FIGURA 5.32 EVALUACIÓN ESCENARIO 1, EVOLUCIÓN DEL ALMACENAMIENTO EN VALLE DE URES .....	86
FIGURA 5.33 EVALUACIÓN ESCENARIO 1, ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN EL RÍO SONORA ...	86
FIGURA 5.34 EVALUACIÓN ESCENARIO 2, EVOLUCIÓN DEL ALMACENAMIENTO A) VALLE DE ACONCHI Y B) VALLE DE URES .....	87
FIGURA 5.35 EVALUACIÓN ESCENARIO 2, ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN EL RÍO SONORA ...	88
FIGURA 5.36 EVALUACIÓN ESCENARIO 3, EVOLUCIÓN DEL ALMACENAMIENTO A) VALLE DE ACONCHI Y B) VALLE DE URES .....	89
FIGURA 5.37 EVALUACIÓN ESCENARIO 3, ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN EL RÍO SONORA ...	90
FIGURA 5.38 RESTRICCIONES REQUERIDAS EN EL ACUÍFERO VALLE DE URES Y VALLE DE ACONCHI PARA MANTENER UN VOLUMEN EN EQUILIBRIO .....	90
FIGURA 5.39 EVALUACIÓN ESCENARIO 4, ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN EL RÍO SONORA ...	91
FIGURA 5.40 EVALUACIÓN ESCENARIO 4, EVOLUCIÓN DE ALMACENAMIENTOS VALLE DE ACONCHI Y VALLE DE URES .....	91

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 MODELOS DE SISTEMAS CONJUNTOS DE RECURSOS HÍDRICOS .....	13
TABLA 3.1 RANGOS DE POROSIDAD REPRESENTATIVA EN DISTINTOS MATERIALES DE UN ACUÍFERO .....	34
TABLA 4.1 ALGORITMO DE SOLUCIÓN PARA EL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN DE PROGRAMACIÓN LINEAL EN WEAP .....	46
TABLA 4.2 DESEMPEÑO DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON BASE AL ÍNDICE PBIAS Y NASH, (MORIASI, 2007) .....	50
TABLA 5.1 VALORES DE TRANSMISIVIDAD HIDRÁULICA AÑO 2005 .....	55
TABLA 5.2 CAMBIO DE ALMACENAMIENTO AL FINAL DEL PERIODO DE SIMULACIÓN (MM <sup>3</sup> ) .....	92

# Capítulo 1

## 1. GENERALIDADES

---

México cuenta con una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud, donde destacan 50 ríos principales por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial del país, que se localizan principalmente en zonas del centro – sur del territorio, con una extensión que cubre el 65% de la superficie nacional<sup>1</sup>.

Por otro lado, de los 653 acuíferos en que está subdividido el país, 106 se encuentran en una situación de sobreexplotación. De dichos cuerpos se extrae el 60% del agua demandada para agricultura y representa un 70% de la demanda en centros urbanos. Además, 15 acuíferos en zonas costeras presentan fenómenos de intrusión marina y 31 se encuentran bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres<sup>2</sup>.

Hacia las zonas áridas del norte del país, la situación de los recursos hídricos se agudiza debido a las escasas lluvias que se asocian a fenómenos climatológicos relacionados con sequías, que inciden de forma directa en el decremento de los escurrimientos superficiales y en una mayor dependencia por parte de estas regiones al abastecimiento de agua a través de la utilización de fuentes subterráneas.

En los últimos años, el sector hídrico en México ha evolucionado hacia un manejo integrado del agua mediante el establecimiento de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), la cual ha sido posible a partir de la transformación del marco jurídico y del ente administrador a nivel federal.

Las bases que sustentan a la GIRH son:

- Ley de Aguas Nacionales, publicada en 1992 y reformada en 2016;

---

<sup>1</sup> Estadísticas del agua en México 2011, CONAGUA

<sup>2</sup> Estadísticas del agua en México 2015, CONAGUA

- La Comisión Nacional del Agua, como órgano superior con carácter técnico, normativo y consultivo de la Federación, en materia de GIRH.

Así mismo, la Comisión Nacional del Agua ha visualizado la GIRH a nivel cuenca, como un proceso en el que se deben incluir los siguientes aspectos:

1. Usos del agua integrados
2. Interacción agua superficial y subterránea
3. Disponibilidad de agua en cantidad y calidad
4. Relaciones entre el agua y otros recursos naturales de la cuenca
5. Los recursos naturales y su relación con el desarrollo económico y social

De esta manera, la aplicación de la GIRH requiere de instrumentos y herramientas de planificación que permitan evaluar de forma cualitativa y cuantitativa las acciones a implementar en torno a la gestión y planificación de recursos hídricos, con un enfoque encaminado a la preservación y mitigación de escenarios adversos que comprometan la cantidad y calidad del recurso hídrico.

### **1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

La distribución de la precipitación en la cuenca alta del río Sonora se encuentra influida de forma importante por los relieves y zonas montañosas que la rodean. En las partes altas de la misma, se presentan lluvias en mayor abundancia disminuyendo hacia zonas planas de la región, donde además existe un incremento notorio de la temperatura. Esto toma especial relevancia dentro de su ciclo hidrológico, puesto que las mayores afectaciones por la falta de lluvia se ven reflejadas en su parte media y baja; en estas últimas se concentra gran parte de la actividad agrícola del estado y su principal centro de población, correspondiente a la ciudad de Hermosillo.

Lo anterior, manifiesta la vulnerabilidad de las diversas actividades que se desarrollan dentro del territorio, impulsando a los diversos sectores que hacen uso de este recurso a satisfacer sus necesidades a través de nuevas fuentes.

Dentro del mismo contexto, el alto estrés hídrico al que se someten los recursos, provoca una disminución importante en los escurrimientos del río, afectando de forma considerable aquellos aprovechamientos que se abastecen de manera superficial. En consecuencia, se incrementa el uso de fuentes de aguas subterráneas sometiéndolas a una sobreexplotación desmedida, que repercute directamente en la disminución de almacenamiento y el abatimiento de niveles estáticos. Debido a la alta permeabilidad de los suelos en la región, el decremento de estos almacenamientos también afecta los volúmenes que escurren en el río, reduciendo su gasto al grado de desaparecer por completo en algunos tramos del mismo.

Como antecedentes, se tiene conocimiento de estudios puntuales que han sido desarrollados en zonas de la cuenca media y baja. Sin embargo, no existe una valoración de los efectos provocados por la utilización conjunta de los recursos en la cuenca alta, donde se presentan las mayores precipitaciones acompañadas de una actividad agrícola considerable del Distrito de Desarrollo Rural 142-Ures. Con respecto a lo anteriormente planteado, se genera un interés particular por evaluar la situación del recurso en esta última zona, el cual representa el objeto principal de estudio en la presente investigación.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo general

Generar una modelación conjunta de aprovechamientos hídricos, orientado al estudio de la interacción aguas superficiales y subterráneas, y al análisis de políticas de manejo de uso conjunto en la cuenca alta del río Sonora, a través del desarrollo y vinculación de un modelo de gestión y planificación de recursos con un modelo numérico de flujo de aguas subterráneas.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos en la presente investigación, son:

- Caracterizar y delimitar las unidades acuíferas del área de estudio a partir de estudios de geológicos, geofísicos y de sus propiedades hidrogeológicas.
- Construir un modelo numérico de agua subterránea con el apoyo de la herramienta MODFLOW.
- Caracterizar la climatología de la región y la distribución espacial de los sitios de demanda, así como sus principales usos.
- Construir un modelo de gestión y planificación de recursos hídricos mediante la herramienta WEAP, en la que se incluirá las demandas e infraestructura existente, fisiografía de la cuenca y su climatología; incluyendo en ésta última la precipitación media, pérdidas por evapotranspiración e infiltración y coeficientes de escurrimiento.
- Vincular el modelo numérico de agua subterránea con el modelo de gestión y planificación de recursos hídricos.
- Calibrar conjuntamente los modelos anteriormente descritos, haciendo una validación de los mismos mediante criterios estadísticos aplicados a registros históricos de escurrimientos observados y niveles piezométricos.
- Evaluar la interacción hidrológica e hidrogeológica del sistema en su funcionamiento conjunto.
- Evaluar el uso de los recursos de agua superficial y subterránea mediante un análisis de políticas de operación conjunta, en las que se incluyan la valoración de escenarios que contemplen la restricción de las demandas del sistema.
- Analizar impactos de los escenarios evaluados y determinar un esquema de manejo sostenible.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN

Los recursos hídricos representan un elemento de vital importancia en el desarrollo de vida humana, en el impulso económico de las poblaciones y en la sostenibilidad ecológica. El aumento demográfico y el avance industrial progresivo, provocan problemas a nivel global que repercuten en la degradación de este recurso, anunciado a través de la reducción de caudales en ríos, la sobreexplotación de acuíferos, problemas de contaminación y degradación en la calidad de las aguas, así como en conflictos de acceso al recurso para satisfacer necesidades básicas de un alto porcentaje de la población. Aunque en el país, tomando un valor promedio, los recursos hídricos son vastos y variados, por razones geomorfológicas y climáticas existen variaciones entre regiones que denotan una crisis de agua, resultado de una mala gobernabilidad y/o gestión del recurso. Las contrariedades mencionadas anteriormente, entre otras, representan desafíos que demandan con urgencia la búsqueda de estrategias claras y concretas, que sean sostenibles en los aspectos ambiental, socioeconómico y social, permitiendo un manejo efectivo del recurso.

Ante la incertidumbre climática que presenta la cuenca alta del río Sonora, derivada de los efectos descritos con anterioridad, se considera imprescindible comprender el funcionamiento conjunto de los aprovechamientos hídricos de la cuenca, además de la evaluación de distintas alternativas de uso que contribuyan a un mejoramiento en la disponibilidad de las fuentes de agua.

Las herramientas que ayudan a alcanzar los objetivos del presente trabajo, evalúan de forma dinámica el comportamiento de los sistemas hidráulicos mediante la simulación de distintos escenarios propuestos. Dichos instrumentos forman parte de los sistemas de soporte a las decisiones (DSS, por sus siglas en inglés), a través de los cuales se desarrollan mecanismos para el diseño y manejo de esquemas óptimos de recursos hídricos. La investigación tiene un enfoque práctico, buscando evaluar la respuesta del modelo ante políticas idóneas que pueden fungir como apoyo en la implementación de regulaciones realizadas por instituciones u organismos encargados de la planificación de los recursos, promoviendo el desarrollo de modelos sostenibles y fomentando a su vez la aplicación de políticas exitosas a nivel operativo.

### 1.4. ALCANCES

Con base en lo anteriormente planteado, se establecen los siguientes alcances:

- Describir los procesos y metodologías implementadas en la construcción y calibración de un modelo conjunto con las herramientas WEAP-MODFLOW.
- Estudiar la interacción de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas, definiendo la afectación de un sistema a otro en términos de cambio temporal de escurrimiento y volúmenes de almacenamiento.
- Evaluar alternativas de uso conjunto que mejoren la disponibilidad del recurso dentro de los escenarios propuestos de simulación y establecer un manejo sostenible.
- Determinar si la optimización designada a los recursos conduce al incremento de los escurrimientos en el río y/o a un aumento en los almacenamientos subterráneos, identificando además, si existe algún beneficio a los volúmenes que llegan a la cuenca media y baja.

## 1.5. CONTENIDO DE LA TESIS

El presente trabajo de investigación comprende seis capítulos. El segundo capítulo contiene una revisión del estado del arte en el que se define el marco conceptual asociado al uso conjunto. Se incluye una revisión en la literatura del software existente para la construcción de modelos conjuntos, y se presenta brevemente casos de estudio donde se han implementado algunos modelos y algoritmos de gestión conjunta para la evaluación de recursos hídricos.

Por su parte, el tercer capítulo expone el marco teórico de las ecuaciones gobernantes del modelo de aguas subterráneas. Se describe el desarrollo teórico de la ecuación de flujo subterráneo en medios saturados y su discretización mediante el método numérico en diferencias finitas. Dentro de este mismo apartado se detallan las ecuaciones fundamentales que definen la interacción río – acuífero y se presenta el criterio de validación para la calibración de cargas piezométricas calculadas.

El cuarto capítulo se refiere al modelo de aguas superficiales, donde se define la ecuación general de balance a nivel cuenca y el algoritmo de optimización de recursos empleado por el modelo de gestión y planificación de recursos hídricos. También se describe la interacción río – acuífero y su vinculación en el funcionamiento acoplado entre ambos modelos. Por otro lado, se presentan los criterios estadísticos utilizados en la validación y calibración de los escurrimientos calculados.

En lo que respecta al quinto capítulo, se exhibe la implementación de los modelos de gestión y planificación de recursos hídricos y de aguas subterráneas con el apoyo de las herramientas WEAP y MODFLOW, respectivamente. Se plantea un modelo conceptual que representa el área de estudio que es simulada en los modelos, al cual se asocia a las componentes hidrológicas e hidrogeológicas caracterizadas a partir de los estudios y análisis descritos en los anexos correspondientes. A su vez, se describe la construcción individual de cada modelo definiendo las condiciones iniciales y de frontera; posteriormente se explica la vinculación entre ambos modelos. Así mismo, se realiza una calibración y validación integrada de los modelos en su simulación conjunta tomando en cuenta los criterios estadísticos detallados en los capítulos tres y cuatro. Finalmente se presenta una revisión del modelo integrado a partir de una evaluación de políticas de funcionamiento conjunto. Se ejecuta un análisis de las respuestas del modelo ante las distintas políticas definidas y se establece un esquema de manejo sostenible.

Finalmente, el sexto capítulo presenta las conclusiones, recomendaciones y futuras líneas de investigación, que se derivan de la presente tesis.

## Capítulo 2

### 2. USO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS

---

En la práctica, la diversidad de enfoques del uso conjunto conlleva un reto importante para quienes se encuentran a cargo de una planificación de los recursos hídricos en los distintos niveles de gestión. Una correcta evaluación de políticas de manejo debe garantizar que los recursos se encuentren controlados, de tal manera que exista una eficiencia en la que no se comprometa el derecho universal al acceso del agua y que asegure la sostenibilidad y protección de las fuentes frente a efectos secundarios que puedan presentarse.

El enfoque multiobjetivo en la utilización conjunta de recursos hídricos pierde validez en aquellos escenarios donde de manera individual, los usuarios establecen objetivos de maximización, producción, rentabilidad y seguridad de los mismos. En tales circunstancias, es importante igualar estos objetivos entorno a una planificación integral en la que se involucre a los distintos actores que gestionan y hacen uso de las fuentes dentro de un mismo territorio.

En México, la Ley de Aguas Nacionales (LAN, 2004) concibe la Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH) con la finalidad de que el Estado en coordinación con los usuarios del agua y organizaciones de la sociedad, implementen políticas necesarias para el control, aprovechamiento, distribución y preservación de los recursos hídricos en términos de calidad y cantidad, considerando estrategias pertinentes para la mitigación de impactos negativos que se deriven de su explotación, y que permitan un desarrollo sustentable en el manejo conjunto de las aguas superficiales y subterráneas que integran la cuenca.

En virtud de lo anterior, la modelación hidrológica en su uso conjunto constituye un elemento imprescindible en torno a esta gestión. La correcta representación de los fenómenos hidrológicos e hidrogeológicos que ocurren dentro de la cuenca, permite hacer una valoración cuantitativa de las políticas de operación que representan la mejor definición de opciones dentro de la administración y manejo del recurso en sus diferentes usos.

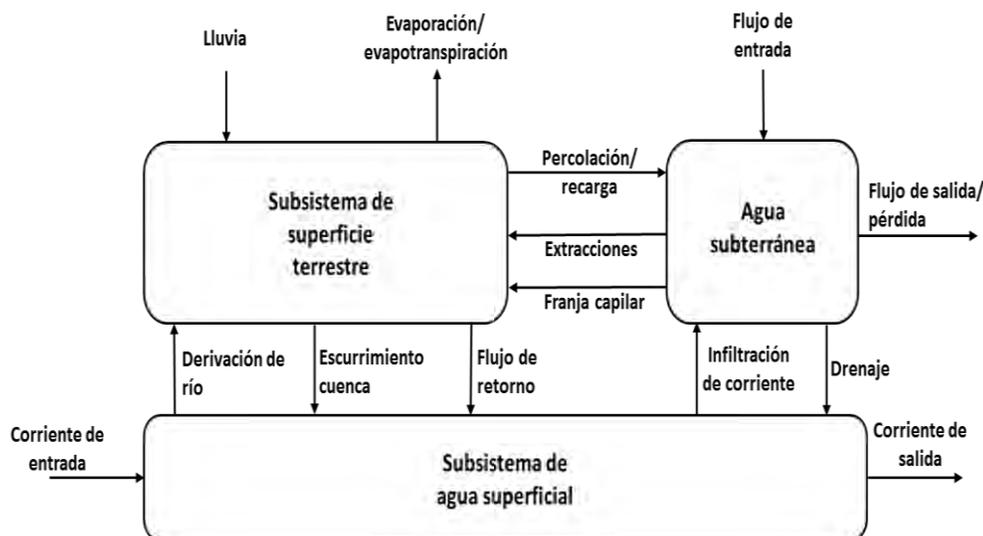
## 2.1. EL USO CONJUNTO DE RECURSOS HÍDRICOS

La gestión y planificación de las fuentes de agua superficial y subterránea se desarrolla hasta finales de 1950 como sistemas por separado; de esta manera, los análisis correspondían a sistemas sin interacción entre sí, que dio paso a efectos adversos en la disponibilidad del recurso. Es hasta años recientes que se ha hecho necesaria la integración del uso conjunto como una componente fundamental dentro de la GIRH.

### 2.1.1. Definición del uso conjunto

La utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, propone la integración de ambas fases del recurso tomando en cuenta su interacción mutua, definida a través de cambios en la dirección de flujo, niveles, almacenamiento y calidad del agua, que se produce en ríos y acuíferos por el aprovechamiento de cualquiera de ellos; lo que conlleva a considerar ambas fuentes como un elemento único que engloba las características propias de cada uno de estos sistemas (*Winter et al., 1998*). El análisis de forma conjunta de los aprovechamientos se hace necesario en aquellas zonas donde existe una problemática de escasez, abastecimiento, mala calidad del agua y una sobreexplotación de acuíferos.

Coe (1990) define la optimización del uso conjunto como “el manejo de los recursos superficiales y subterráneos en una operación coordinada, con el fin de que la producción del sistema global, en un determinado período de tiempo, exceda la suma de las producciones de sus componentes por separado como el resultado de una operación no coordinada”.



**Figura 2.1** Esquema conceptual en el sistema de funcionamiento conjunto de aguas superficiales y subterráneas

En relación con las ventajas que ofrece la implementación de esquemas de uso conjunto, se pueden encontrar las siguientes:

1. Incrementar los volúmenes almacenados como resultado de la disminución de las pérdidas de agua dulce.
2. Mejorar la distribución del recurso en el tiempo, disminuyendo las diferencias entre los meses con mucha y poca agua.

3. Creación de almacenamientos en las cercanías de los usuarios finales evitando grandes obras de desvío.
4. Al ocupar los cuerpos de agua subterránea como almacenamientos, el sistema funciona con embalses superficiales menores, disminuyendo las pérdidas por evaporación, además de mitigar impactos negativos que se producen por la construcción de grandes presas.

Al realizar cualquier análisis cuya finalidad sea la optimización de recursos, es recomendable estudiar y comprender el funcionamiento del sistema en su operación conjunta. Por ejemplo, en relación con el escurrimiento, se puede presentar escenarios donde la interacción agua superficial y subterránea provoque una modificación en el régimen de flujo de ríos, convirtiéndolos a un estado de “ganadores” de las aguas provenientes de fuentes subterráneas, o a un estado de “perdedores” cuando parte del flujo cede a la recarga de acuíferos.

### 2.1.2. Esquemas de utilización conjunta

El término *uso conjunto* abarca el comportamiento de las fuentes de agua en relación a la forma en que éstas se combinan y su alternancia en distintos periodos de tiempo. Una breve descripción de estas categorías se presenta a continuación.

#### - *Combinación en el uso conjunto*

La forma en la que se combina el agua de diferentes fuentes es de importancia fundamental para la comprensión de las oportunidades en el manejo conjunto. Normalmente, uno de dos enfoques distintos puede ser aplicado:

- Un uso simultáneo proveniente de diferentes fuentes de abastecimiento, por lo que el agua es combinada antes de ser suministrado a la demanda.
- La utilización por separado, en la que el suministro para cada sitio de demanda proviene de una fuente en particular.

El uso simultáneo, se emplea normalmente cuando hay limitaciones en la disponibilidad de las fuentes de agua. Esto sucede cuando el flujo total de la fuente primaria es insuficiente para permitir el suministro requerido, y debe ser complementado con agua de una fuente secundaria para solventar este déficit. La utilización por separado es más común en aquellas zonas donde existe menor fluctuación en los almacenamientos de las fuentes disponibles.

#### - *Uso conjunto alternante*

El término uso conjunto alternante se refiere al esquema de uso en el que se considera el almacenamiento de los acuíferos como complementos al suministro de agua en los periodos de sequía. Lo anterior, permite incrementar las posibilidades de disponibilidad de agua de un sistema sin hacer necesario el aumento de infraestructura relacionada con almacenamientos superficiales, obras de derivación o de conducción; además de favorecer a la disminución de pérdidas por efectos de evaporación. En sistemas con uso conjunto alternante hay demandas que se satisfacen exclusivamente con agua superficial, otras con agua subterránea y otras más con ambas fuentes en proporción cambiante en el tiempo.

La disminución de los excedentes de agua superficial, permite una mejora en el balance de aguas subterráneas, cuya estrategia facilita la recuperación de sus volúmenes almacenados y por consiguiente de los niveles piezométricos. Estos últimos, aumentan en los periodos húmedos y

descienden en las épocas de estiaje, por lo que será importante mantener la recarga y recuperación en equilibrio.

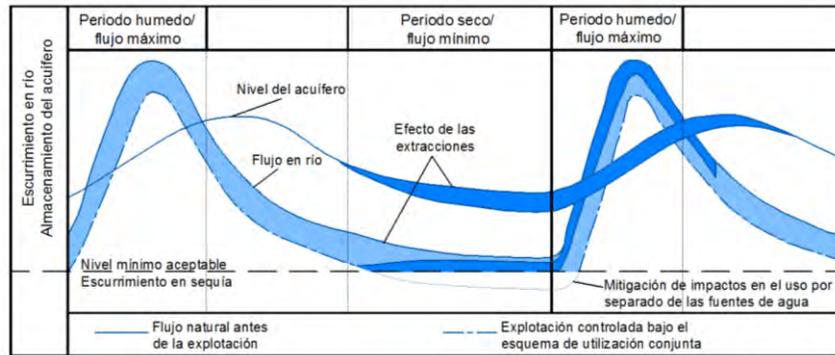


Figura 2.2 Esquema conceptual del uso conjunto alternante y mitigación de impactos

## 2.2. MODELACIÓN CONJUNTA

La modelación hidrológica comienza a principios del siglo XIX empleándose principalmente en el diseño de redes de drenaje, presas, puentes, diques y sistemas de distribución de agua.

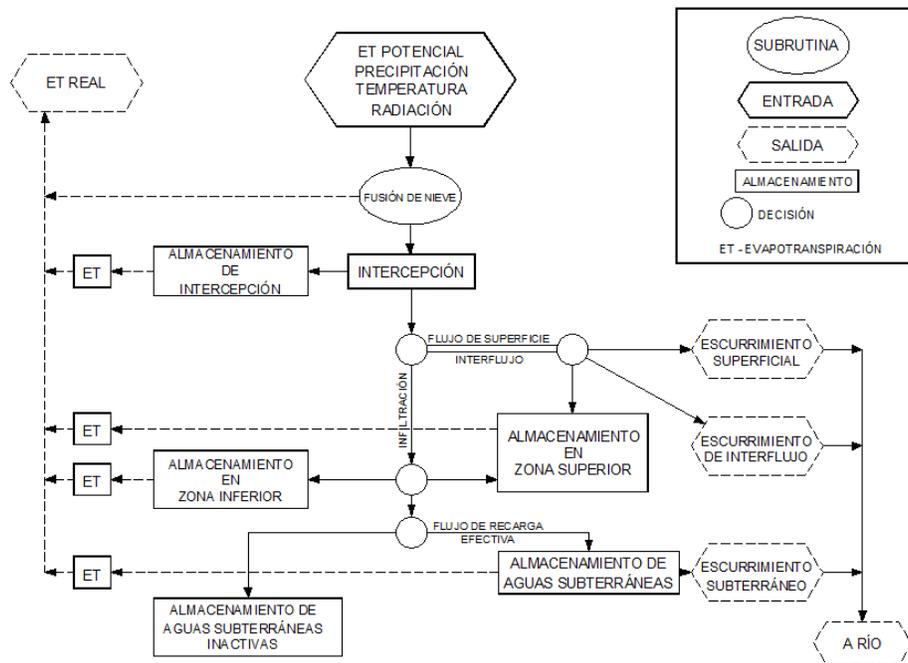


Figura 2.3 Diagrama de flujo modelo Stanford 1966

Es en los años 60's que se limita a tratar de explicar los mecanismos individuales involucrados dentro del ciclo hidrológico. A partir de entonces la modelación hidrológica tratar de evaluar mediante expresiones matemáticas simples las principales componentes que interactúan dentro de este ciclo. Algunas de estas metodologías son: el método racional, la curva de infiltración de Horton, los trabajos de Thornthwaite y Penman para la estimación de la evapotranspiración, entre otras.

En este mismo periodo se realiza el primer intento por representar en su totalidad el ciclo hidrológico de una cuenca, surgiendo el *Standford Watershed Model SWM* de Crawford y Linsley en el año de 1966 (figura 2.3). A partir de entonces se ha producido un desarrollo de modelos computacionales que emplean métodos numéricos para la solución de ecuaciones matemáticas y soluciones estadísticas de los procesos hidrológicos.

### 2.2.1. Marco conceptual

El modelo conceptual de agua superficial y subterránea, se desarrolla a nivel de cuenca (Sarwar, 1999) basándose en un balance hidrológico que contabiliza las entradas y salidas de un sistema, y que conduce a un cambio de almacenamiento en el tiempo. Este balance se sustenta en la ley de la conservación de masa y tiene por objetivo encontrar la recarga neta a los volúmenes de agua subterránea, la cual se expresa de la forma:

$$I - O = \pm\Delta S_t \quad (2.1)$$

donde:

I: Total de entradas al sistema

O: Total de salidas del sistema

$\pm\Delta S_t$ : Cambio de almacenamiento en el tiempo

### 2.2.2. Clasificación de modelos

Los modelos matemáticos emplean formulismos que representan relaciones, proporciones, variables, parámetros y entidades asociadas a un medio físico de la realidad, en sistemas de tipo simples o complejos. En recursos hídricos la utilización de modelos matemáticos permite hacer una valoración cuantitativa de las variables que intervienen en la situación del elemento en los distintos puntos de interés, mediante simulaciones que pueden incluir predicciones de su distribución en diferentes espacios del tiempo.

La clasificación de los modelos matemáticos estará en función del tipo de información de entrada, tipo de representación, la aleatoriedad y su aplicación u objetivo.

#### 2.2.2.1. Clasificación por información de entrada

En función del origen de la información utilizada se puede distinguir los modelos de tipo heurístico y empírico.

- *Modelos heurísticos*. Están basados en explicaciones sobre las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno en estudio.
- *Modelos empíricos*. Utilizan la información de observaciones directas o resultados de experimentos realizados.

#### 2.2.2.2. Clasificación por el tipo de representación

Otra clasificación se realiza en virtud de las predicciones que se pretendan realizar, ya sea de tipo cuantitativo o en aquellos casos donde se intenta cuantificar aspectos del sistema que se está modelando. Estos casos se agrupan en:

- *Modelos cualitativos o conceptuales.* Utilizan gráficos, figuras o descripciones causales, que en general se limitan a predecir el rumbo del estado del sistema, hacia cierta dirección o si existe la posibilidad de que las magnitudes se incrementen o disminuyan, sin hacer necesario una acotación de la magnitud en la mayoría de aspectos.
- *Modelos cuantitativos o numéricos.* Utilizan números para la representación de aspectos relacionados al sistema modelado y generalmente incluyen formulaciones y algoritmos matemáticos complejos que relacionan los valores numéricos. Su cálculo permite representar el proceso físico o cambios cuantitativos del sistema modelado.

### 2.2.2.3. Clasificación por el tipo de aleatoriedad

Esta clasificación está en función de si una entrada o situación inicial puede corresponder o no a las salidas o resultados del modelo. Para esto se clasifican en:

- *Modelos deterministas.* Se conoce de manera puntual la forma del resultado ya que no existe incertidumbre. Las variables son determinadas por leyes físicas consideradas como exactas que explican toda su variabilidad, los datos de entrada son conocidos y determinados en su totalidad.
- *Modelos estocásticos.* Las variables son regidas en todo o parte por las leyes del azar y por tanto se caracterizan en términos de probabilidad lo que provoca la existencia de incertidumbre en los resultados.

### 2.2.2.4. Clasificación por su aplicación u objetivo

Suelen basarse en los modelos anteriormente descritos, su clasificación dependerá del área de aplicación. De manera general comprenden:

- *Modelo de control.* Utilizado para conocer la situación de un sistema, organización investigación, área de operación, etc. Este esquema pretende ayudar en la toma de decisiones cuando se requiere la realización de ajustes de variables o parámetros con el objetivo de lograr un resultado o estado concreto del sistema modelado.
- *Modelo de simulación o descriptivo.* Situaciones medibles de manera precisa o aleatoria, utilizando, por ejemplo, aspectos de programación lineal cuando es de manera precisa, y probabilística o heurística cuando es aleatorio. Este tipo de modelos pretenden predecir qué sucede en una situación dada.
- *Modelo de optimización.* Su utilización determina el punto exacto para resolver problemas asociados a la administración, producción, o cualquier otra situación. Cuando la optimización es de tipo entera o no lineal, se agrupa en modelos matemáticos poco predecibles aunque existe la posibilidad de ser acoplados en alguna alternativa existente y que aproxime su cuantificación. Se requiere comparar dentro de estos modelos, diversas condiciones, casos o posibles valores de los parámetros para establecer cuál de ellos resulta óptimo a partir del criterio elegido.

En cuanto a los modelos de optimización se refiere, su utilización en los recursos hídricos ha sido creada *ad hoc* para cada caso en particular. La expresión matemática que define estos esquemas es:

$$\text{Max}f(x) \text{ sujeto a } g(x) \leq b \quad (2.2)$$

Refiriéndose a la búsqueda de los valores de  $x$  que maximicen la función objetivo  $f(x)$ , sujeta a una serie de restricciones  $g$ . Si bien, este tipo de problemas pueden clasificarse en optimización con restricciones y sin restricciones, generalmente la modelación se limita a esquemas de optimización restrictiva.

Los modelos de optimización jerárquica son otra categoría de los modelos de optimización, y son definidos por primera vez por Bracken y McGill (1974) como una generalización de la optimización matemática. Dentro de estos modelos, la región de restricción se determina implícitamente por una serie de problemas de optimización que deberán ser resueltos en una secuencia predeterminada. Este tipo de modelos resultan ser una herramienta importante en los denominados *Sistemas de Soporte a la Decisión (SSD)*, los cuales representan un instrumento fundamental en la planificación y gestión de los recursos hídricos.

### 2.2.3. Herramientas computacionales para la simulación del uso conjunto

Existe un desarrollo importante de herramientas computacionales que permiten la simulación y evaluación integrada de recursos hídricos. De forma generalizada, en cuanto a su grado de complejidad se refiere, pueden ser clasificados como:

- *Modelos de simulación física de procesos hidrológicos e hidrogeológicos:* Modelos que suelen implementar métodos numéricos en la estimación de niveles de ríos, caudales, almacenamientos, cargas piezométricas, etc.; y que requieren parámetros que representan las características físicas de cada fuente contenida en el modelo. Se caracterizan además, por requerir información histórica observada para conseguir su calibración y validación.
- *Modelos de disponibilidad temporal y espacial:* Requieren únicamente de información espacial y temporal del agua en los diferentes usos y fuentes de abastecimiento, que existen en la cuenca. Su construcción es más sencilla debido a que no requiere de información física del entorno.

En cuanto a las metodologías de análisis, se han desarrollado procedimientos capaces de evaluar el comportamiento de modelos hidrológicos e hidrogeológicos de forma acoplada. La mayoría de estos modelos descritos en la literatura consideran: características físicas, climatología de la región (lluvia, evapotranspiración, nieve, etc.), series de aportaciones a los embalses o en tramos de ríos, las demandas suministradas y sus respectivas prioridades de abasto, además de las restricciones al uso del recurso.

En sistemas de uso conjunto, es importante determinar la variabilidad temporal del recurso en cada nodo o sitio de interés. Se entiende por nodo a la representación en el sistema de una demanda, aportaciones que entran y salen de ríos y fuentes subterráneas, así como lo relacionado con infraestructura hidráulica. Los distintos efectos que se produzcan de manera particular o global en cada componente del sistema podrán ser evaluados y en consecuencia, permitirán hacer una valoración de las afectaciones o mejorías que aporte cada escenario simulado en términos del intercambio de caudales y pérdidas en el sistema. En algunos casos sólo interesa conocer los intercambios de agua de los acuíferos con los ríos, zonas húmedas o el mar, pero en la mayoría también interesa la variación piezométrica en distintos puntos o zonas del acuífero a lo largo del periodo de simulación.

Las diversas herramientas computacionales que permiten evaluar modelos de utilización conjunta, se han desarrollado con base a la clasificación descrita en el apartado anterior. Algunos ejemplos de estos modelos se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Modelos de sistemas conjuntos de recursos hídricos

Modelo	Desarrollador	Descripción
RiverWare (2002)	Universidad de Colorado / Buro de reclamación de los Estados Unidos	Modelo de optimización y simulación de cuencas y depósitos, utilizado para evaluar políticas operativas para la optimización del sistema, contabilidad del recurso, administración de los derechos del agua y su planificación a largo plazo.
MIKE BASIN (2000)	DHI Water Environment Health	Modelo de simulación que trata cuestiones relativas a la asignación temporal de los recursos, uso conjunto, funcionamiento de almacenamientos y la calidad del agua. Su interfaz gráfica se desarrolla en el SIG ArcView.
MODSIM (1992)	Colorado State University	Modelo en escala mensual o semanal que implementa restricciones no lineales a través de su incorporación mediante el lenguaje PEARL.
AQUATOOL (1996)	Universidad Politécnica de Valencia	Modelo de sistemas de soporte a la decisión para la modelación de recursos hídricos en diferentes aspectos como son la optimización, simulación aguas subterráneas, calidad del agua, etc.
WEAP (1996)	Stockholm Environment Institute	Modelo utilizado en la evaluación de la planificación de cuencas hidrológicas. Realiza balances de agua mediante el uso de redes de flujo e incorpora diferentes elementos como embalses, ríos y demandas. Permite vincular modelos numéricos para la solución de la ecuación de agua subterránea en acuíferos libres, confinados y semiconfinados, y multicapa, con conexión a las fuentes superficiales a través de ríos.
SYMLYD II (1970)	Texas Water Development Board	Modelo de simulación de sistemas de recursos hídricos con diferentes elementos: embalses, ríos y canales, intentando satisfacer un grupo de demandas especificadas por reglas de operación definidas por el usuario.
CALSIM (2000)	California Department of Water Resources	Modelo de simulación de recursos hídricos incorporando diferentes tipos de reglas de operación y restricciones.

La variedad de aplicaciones que consideran en su mayoría los modelos de sistemas conjuntos, permiten evaluar de forma integral diversos aspectos, tales como:

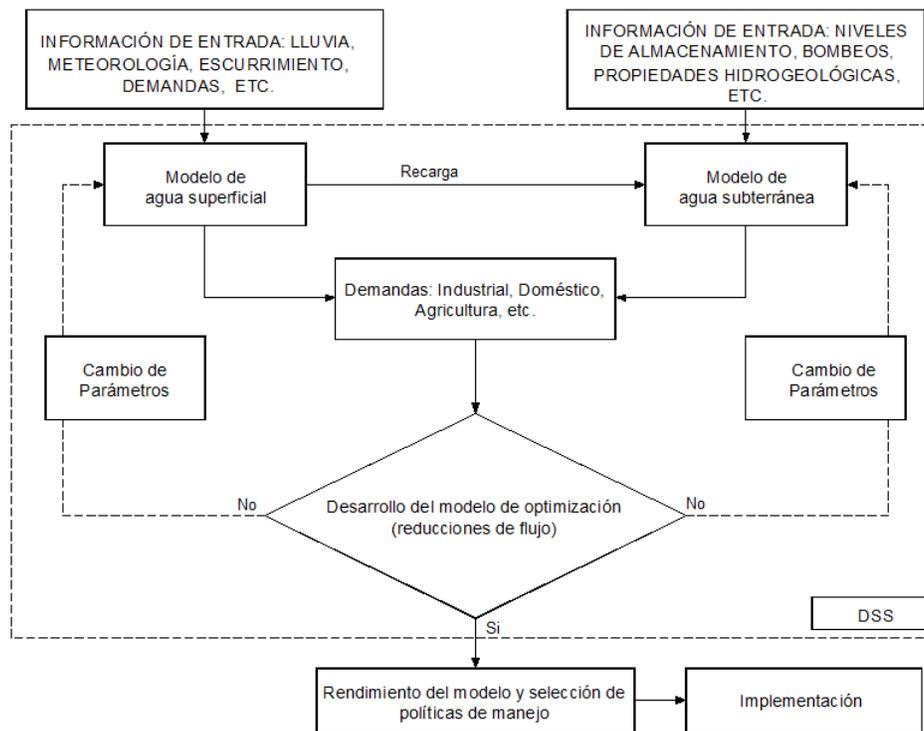
- Modelación de la interacción río-acuífero.
- Problemas de salinidad del suelo.
- Análisis de los efectos provocados en fuentes superficiales por efecto de los bombeos en acuíferos.
- Cuantificación de la recarga en embalses de agua subterránea.
- Evaluación de sequías en zonas de riego
- Programación de los temporales de siembra y caracterización del tipo de cultivo.
- Programación de la aplicación de nutrientes a las parcelas de siembra.
- Optimización de los recursos del sistema.
- Proyecciones a futuro.

- Cambio climático y sus efectos en las diversas fuentes y demandas que integran el sistema, etc.

La selección del modelo a emplear dependerá de múltiples aspectos tales como: la cantidad de información disponible, el entorno a simulación, la complejidad del sistema a evaluar y del tipo de análisis que se requiera.

### 2.3. SISTEMAS DE SOPORTE A LA DECISIÓN EN LA MODELACIÓN CONJUNTA

El uso de modelos de simulación conjunta en la que se incluyen procedimientos que abarcan un análisis espacial y temporal de la información, ya sea para el diseño del sistema con fines operativos o de gestión, es catalogado como *Sistema de Soporte a las Decisiones (DSS)*.



**Figura 2.4** Modelo conceptual de un Sistema de Soporte a las Decisiones en un esquema de uso conjunto

Un *Sistema de Soporte a la Decisión* proporciona los instrumentos de diseño y manejo de esquemas de optimización de recursos, dentro de un territorio. Su versatilidad radica en las capacidades que brinda para calcular y visualizar los efectos de un sistema hidráulico en tiempo y espacio bajo la operación de distintas políticas de operación.

### 2.4. EXPERIENCIAS Y CASOS DE ESTUDIO

En los últimos años, se han desarrollado diversas investigaciones que emplean esquemas de modelación conjunta, principalmente en regiones donde se pretende optimizar recursos para reducir efectos que se derivan de la escasez de agua y cambio climático. A continuación se presenta de manera simplificada, algunas de las aplicaciones de estas herramientas en diferentes casos de estudio.

- *Planificación de los recursos hídricos para la Cuenca del río Jordán (2011):*  
La creciente problemática de escasez de los recursos hídricos transfronterizos de la cuenca del río Jordán, se encuentra estrechamente relacionada con ciertos conflictos políticos de la región. De forma conjunta se desarrolla con las partes interesadas y expertos de los países vecinos, una base de datos dinámica con el apoyo de modelos de simulación de escenarios hídrico-climatológicos que permite evaluar políticas de adaptación al cambio climático considerando aspectos de tipo socioeconómico.
- *Sistema de soporte a las decisiones para la gestión del agua subterránea del acuífero Zeuss Koutine (2013):*  
Este caso de estudio describe el desarrollo de un Sistema de Soporte a las Decisiones (DSS) para la gestión de las aguas subterráneas del acuífero de la Zeuss Koutine en el sureste de Túnez, con el apoyo de la herramienta WEAP-MODFLOW. Las entradas al modelo hidrogeológico incluyen la recarga natural de los acuíferos; mientras que las salidas consideran el consumo de agua, principalmente agrícola, turístico y urbano. Los resultados demuestran que las plantas de desalinización existentes en la región (Jerba y Zarzis) contribuyen a la disminución de los abatimientos observados en 1999.  
El uso de plantas de desalinización de agua de mar para abastecer las demandas futuras, constituyen una solución para la disminución de la sobreexplotación del acuífero, según los escenarios evaluados.
- *Modelo hidrológico WEAP aplicado a la Cuenca del río Conchos (2005):*  
Los alcances de este estudio, permiten evaluar la viabilidad de la incorporación de un modelo hidrológico WEAP para la cuenca del Río Bravo. Al crear dicho modelo, los datos de diversas fuentes fueron compilados y pre-procesados para su uso; mientras que las capacidades hidrológicas se evaluaron mediante la comparación de los flujos simulados por WEAP con los flujos simulados por el modelo HEC-HMS desarrollado por el IMTA (Martínez et al., 2005).
- *Modelación óptima del agua mediante la gestión de las demandas en Selangor, Malasia (2016):*  
Un crecimiento acelerado de la población y la expansión de la industrialización en el estado de Selangor, Malasia, ha generado la necesidad de contar con nuevas fuentes de abastecimiento de agua y una modificación a la gestión de los recursos hídricos. Este estudio tiene por objetivo, estimar el impacto sobre la brecha entre oferta y demanda de los sectores de la ciudad y de la industria en el estado para el año 2050.  
Se realizan dos simulaciones que incluyen: la integración de un modelo de optimización económica y un modelo de gestión del agua. El primero implica alternativas sin cambios a las condiciones actuales de uso, mientras que el segundo incorpora medidas de ahorro de agua a través del análisis de la gestión de la demanda (DSM). Los resultados demuestran que los almacenamientos subterráneos pueden ser considerados como un recurso alternativo.

## 2.5. PERSPECTIVAS EN LA MODELACIÓN CONJUNTA

Los modelos de simulación conjunta son ampliamente utilizados en la formulación de estrategias de gestión entorno al suministro de agua. Los esfuerzos por representar en su totalidad cada una de las componentes que intervienen en la utilización de las fuentes superficiales y subterráneas, hacen necesaria la implementación de modelos matemáticos que describan de manera aproximada la realidad de estos sistemas.

Generalmente, el análisis conjunto de los recursos hídricos se desarrolla con el apoyo de técnicas de simulación y optimización matemática, y el empleo de herramientas computacionales que ayudan a resolver numéricamente el planteamiento del problema. Estos esquemas de optimización hacen un comparativo entre las diversas condiciones de funcionamiento, tomando en cuenta las prioridades y restricciones establecidas dentro de una función de maximización de recursos.

Respecto a sus principales limitantes, la implementación de modelos conjuntos resulta en ocasiones compleja debido a la gran cantidad de información requerida para tratar de representar en la mayor medida posible el entorno físico de cada sistema. Así mismo, la calibración y validación de los resultados representan procesos complejos, sobre todo cuando se dispone de una limitada y mala calidad de información relacionada con observaciones históricas. Bajo este contexto, el propósito de la modelación y el nivel de detalle de los resultados esperados, definirán la elección del modelo a implementar y su grado de complejidad en cuanto a su construcción se refiere.

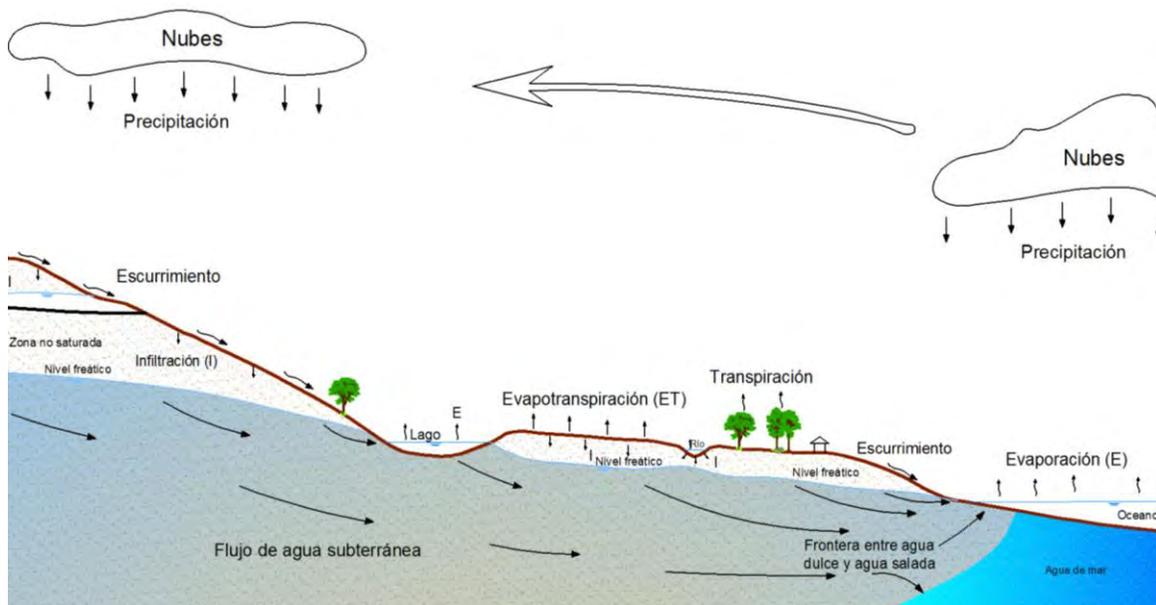
En México, el manejo conjunto de las fuentes de agua ha tomado relevancia en los últimos años como parte de las medidas de conservación y planificación de los recursos hídricos. A pesar de los diversos intentos por establecer una gestión integral, aún existe un limitado uso de herramientas de simulación conjunta que permitan evaluar de forma cuantitativa distintas políticas de gestión. Los casos que implementan modelos conjuntos resultan condicionados en virtud de que se realizan simplificaciones e idealizaciones de los sistemas, representando de forma generalizada y parcial las características del medio que se estudia.

La presente investigación despliega un caso de estudio que incluye la modelación conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Se implementan dos modelos que describen las características propias de cada sistema y que trabajan en una simulación acoplada; de esta manera se estudia la dinámica de funcionamiento en la interacción mutua de las fuentes de agua. Finalmente, se busca reproducir los impactos producidos por efecto de la explotación de las fuentes de agua bajo diversos escenarios hipotéticos de simulación, y a partir de esto se establecerá aquel que represente un manejo sostenible para la conservación de los recursos.

## Capítulo 3

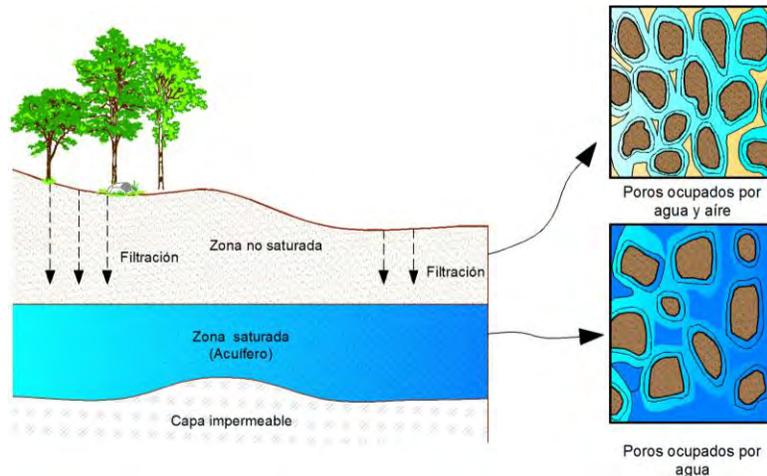
### 3. MODELO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La circulación permanente de agua entre el océano, la atmósfera y la tierra se denomina como ciclo hidrológico. El agua se hace presente dentro del sistema en forma de precipitación, a través de lluvia o nieve derretida, que se distribuye sobre las corrientes superficiales de ríos y arroyos; y hacia el subsuelo como un interflujo (flujo subsuperficial) que proporciona un elemento importante en la infiltración a capas profundas. Las salidas por su parte, incluyen en mayor medida la evapotranspiración que es una combinación de la evaporación de agua en suelos y almacenamientos superficiales, y la transpiración que producen las plantas.



*Figura 3.1 El ciclo hidrológico*

La definición de agua subterránea involucra todas las formas de agua que existen por debajo de la superficie terrestre. Según el lugar que domine en la fracción de subsuelo, se puede dividir verticalmente en zonas de espacios vacíos ocupados en su totalidad por una fase líquida (zona saturada), o zonas donde existe una combinación de la fase líquida y la fase gaseosa (zona no saturada o vadosa).

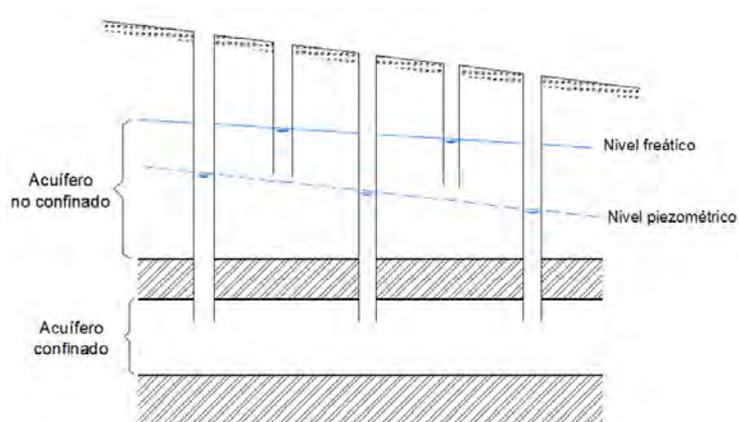


**Figura 3.2** Esquema de las zonas que contienen el agua en el subsuelo

Un acuífero es una formación geológica y saturada que puede transmitir importantes cantidades de agua a través de una región de dominio. Se clasifican principalmente como acuíferos confinados, no confinados y artesianos.

El acuífero confinado o de presión es aquel que tiene por frontera superior e inferior una capa impermeable, es decir, material que no permite la circulación de agua. A lo largo de una serie de perforaciones que penetran este tipo de acuíferos, el nivel que alcanza el agua con respecto a una superficie horizontal es denominado como nivel piezométrico o superficie piezométrica.

Por su parte, un acuífero no confinado o freático, es aquel cuya frontera impermeable se localiza en su porción inferior, mientras que la frontera superior coincide con la línea de saturación de agua, la presión atmosférica y el nivel piezométrico. Finalmente, un acuífero artesiano es un acuífero de tipo semiconfinado donde la superficie piezométrica se localiza sobre la superficie de la tierra.



**Figura 3.3** Acuífero confinado y no confinado

El flujo de agua a través de un medio poroso se presenta en tres dimensiones. Sin embargo, cuando la geometría del acuífero representa dimensiones horizontales mucho más grandes con respecto a las verticales, se puede asumir que el acuífero es horizontal despreciándose de esta manera la componente vertical del flujo en su aproximación.

### 3.1. DESARROLLO TEÓRICO DE LA ECUACIÓN DE FLUJO EN MEDIOS SATURADOS

#### 3.1.1. Ley de Darcy

En el año 1856, Henry Darcy reporta experimentos de laboratorio que describen la dinámica de flujo en un medio poroso saturado. Con un instrumento similar al que se muestra en la figura 3.4, se hace pasar un flujo constante de agua a través de un medio poroso de longitud  $L$  que mantiene un nivel constante sobre el mismo y que permite observar el movimiento del líquido a través de un medio poroso. Con dichos experimentos se deduce que el gasto  $Q$  es proporcional a la pérdida de carga  $(h_1-h_2)$  e inversamente proporcional a la longitud  $L$  del cilindro.

$$Q = k A \frac{(h_1-h_2)}{L} \tag{3.1}$$

donde  $k$  es un coeficiente de proporcionalidad y las longitudes  $h_1$  y  $h_2$  se miden con relación a un mismo nivel que se establece de forma arbitraria con respecto a un plano horizontal.

El coeficiente de proporcionalidad  $k$ , se denomina conductividad hidráulica del medio poroso o coeficiente de permeabilidad, que depende directamente de la porosidad del medio y de las características propias del fluido.

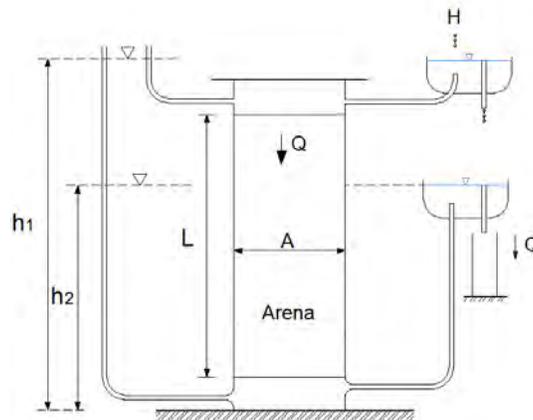


Figura 3.4 Instrumento empleado en el experimento de Darcy

Otra manera de expresar la Ley de Darcy es mediante el término de descarga específica  $q$ . Se refiere al volumen de agua que fluye por unidad de tiempo a través de una unidad de área de sección transversal y que es normal a la dirección del flujo. Al representar  $q$  en la ecuación 3.1, se tiene:

$$q = k \frac{(h_1-h_2)}{L} \tag{3.2}$$

donde  $q = \frac{Q}{A}$

Las dimensiones de  $Q$  corresponden a unidades de volumen sobre tiempo, mientras que  $A$  tiene unidades de superficie. Por lo tanto  $q$  asume unidades de velocidad.

### 3.1.2. Ecuación general de flujo subterráneo

La ecuación que gobierna el flujo subterráneo se deduce a partir de un cubo de material poroso que involucra la expresión matemática de la ley de Darcy. El cubo de material poroso debe ser lo suficientemente largo para representar las propiedades del medio, así como lo suficientemente pequeño en el que los cambios de carga internos sean relativamente cortos. Este cubo es conocido como volumen elemental representativo (REV por sus siglas en inglés) y contiene un volumen equivalente a  $\Delta x \Delta y \Delta z$ .

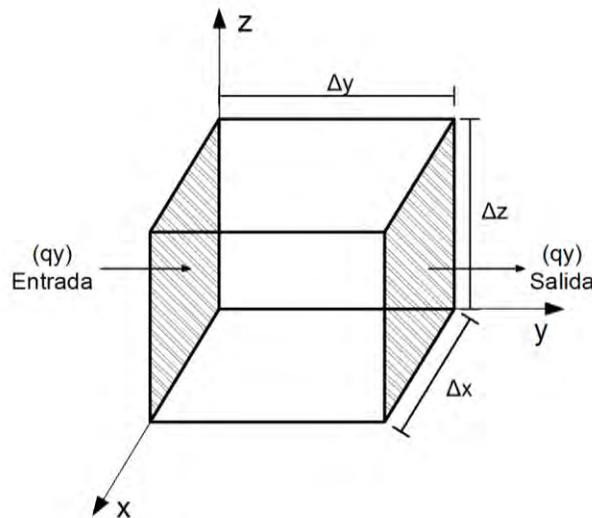


Figura 3.5 Volumen elemental representativo ( $\Delta x \Delta y \Delta z$ ) cuya dirección de flujo se establece a lo largo del eje coordenado y

El flujo a través de un REV es expresado en términos del vector  $q$ , cuya magnitud se representa por las componentes  $q_x$ ,  $q_y$  y  $q_z$ , tal como se indica a continuación:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (3.3)$$

donde  $i_x$ ,  $i_y$  e  $i_z$  son vectores unitarios a lo largo de los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Por otro lado, la conservación de masa dentro del REV requiere de un balance que se establece como:

$$\text{Flujo de salida} - \text{flujo de entrada} = \text{Cambio de almacenamiento} \quad (3.4)$$

Considerando la circulación a través de un mismo eje y dentro del REV, el flujo que ingresa ocurre a través de la cara  $\Delta x \Delta z$  y es igual a  $(q_y)_{\text{entrada}}$ , mientras que el flujo de salida equivale entonces a  $(q_y)_{\text{salida}}$ . La tasa de cambio entre el volumen de entrada menos el volumen de salida es:

$$\left[ (q_y)_{\text{entrada}} - (q_y)_{\text{salida}} \right] \Delta x \Delta z \quad (3.5)$$

que puede ser expresado como:

$$\frac{q_{y_{entrada}} - q_{y_{salida}}}{\Delta y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (3.6)$$

Eliminando los subíndices de entrada y salida, el cambio en el flujo equivale a:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (3.7)$$

A partir de esta expresión se pueden escribir términos similares para el cambio en la proporción de flujo a lo largo de los ejes restantes ( $x$ ,  $z$ ). El cambio total del flujo es igual al cambio en el almacenamiento y se expresa como:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) (\Delta x \Delta y \Delta z) = \text{Cambio de almacenamiento} \quad (3.8)$$

Cuando se incluye un término sumidero (p.e. pozo de bombeo) o un término fuente (p.e. pozo de inyección o fuente de recarga) dentro del REV, el flujo de agua está representado por  $R^* \Delta x \Delta y \Delta z$ . Se define  $R^*$  como intrínsecamente positiva cuando sea un término fuente; por lo tanto, se resta al lado izquierdo de la ecuación 3.8.

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) (\Delta x \Delta y \Delta z) = \text{Cambio de almacenamiento} \quad (3.9)$$

Así mismo, el cambio de almacenamiento puede expresarse en términos del almacenamiento específico  $S_s$ :

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (3.10)$$

Se considera que  $\Delta V$  es intrínsecamente positivo cuando el cambio de carga  $\Delta h$  es negativo o que el agua es liberada del almacenamiento cuando la recarga decrece. El rango del cambio en el REV es:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.11)$$

Sustituyendo las ecuaciones obtenidas en 3.9 y 3.11, además de dividir entre los incrementos  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  se obtiene la forma final de la ecuación del balance de agua 3.12.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (3.12)$$

La ecuación anterior resulta poco utilizada en virtud de que no cuantifica el gasto de manera directa. En este caso se emplea la ecuación mostrada en 3.2 que relaciona el gasto  $q$  y la carga  $h$ .

Por otro lado, la ley de Darcy en tres dimensiones es representada por:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Donde  $K_x$ ,  $K_y$  y  $K_z$ , son componentes del tensor de conductividad hidráulica que corresponde al coeficiente de proporcionalidad, el cual depende de las propiedades del medio, tales como la porosidad del suelo, geometría y distribución del tamaño de los poros, así como de las características del fluido como la viscosidad, densidad, etc. El signo negativo se debe a que el caudal es una magnitud vectorial, cuya dirección es hacia el  $\Delta h$  decreciente, es decir, la diferencia entre  $h_1$  y  $h_2$  es negativa, por lo tanto el caudal será positivo.

Sustituyendo los términos de 3.13 en 3.12, se obtiene la ecuación diferencial de flujo subterráneo en la forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (3.14)$$

donde  $R^*$  representa el término fuente/sumidero intrínsecamente positivo y define el volumen de entrada que ingresa al sistema por unidad de volumen de acuífero por unidad de tiempo. En acuíferos confinados el coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) se relaciona con el almacenamiento específico  $S_s$  mediante la expresión  $S = h S_s$ . Sustituyendo está en la ecuación 3.14 se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (3.15)$$

La ecuación 3.15 es la forma general de la ecuación de flujo saturado, que considera un flujo tridimensional, en estado transitorio ( $\frac{\partial h}{\partial t} \neq 0$ ), en un medio heterogéneo ( $K_x = f(x)$ ) y conductividad hidráulica anisótropa ( $K_x \neq K_y \neq K_z$ ).

### 3.1.3. Simplificación de la ecuación general

La modelación de flujo subterráneo puede simplificarse tomando en cuenta una modelación de tipo bidimensional. Esto a partir de lo propuesto por Fitts (2002) que asume una configuración del acuífero similar al aspecto de un pastel delgado, con dimensiones horizontales de cientos o miles de veces superiores a la dimensión vertical.

La mayor parte de la resistencia encontrada a lo largo del flujo subterráneo es la relacionada con el movimiento horizontal. Cuando se presenta este caso, el sistema de flujo en tres dimensiones puede simplificarse a un sistema de flujo bidimensional en el que se asume que  $h$  varía con  $x$  e  $y$ , pero no con  $z$ ; lo que permite reducir las dimensiones espaciales del problema matemático a un plano horizontal. La suposición en flujo bidimensional es denominada como aproximación de Dupuit – Forchheimer (2002).

El concepto de modelación bidimensional fue propuesto originalmente para flujos en acuíferos libres, sin embargo, se aplica de igual manera para acuíferos de tipo confinado bajo un flujo vertical mínimo. Su aproximación se basa en la eliminación del término vertical  $\frac{\partial h}{\partial z} = 0$ .

Por su parte, Anderson y Woessner (1992) sintetizan las suposiciones propuestas por Dupuit en los siguientes puntos:

1. Las líneas de flujo son horizontales y las equipotenciales son verticales.
2. El gradiente hidráulico horizontal es igual a la inclinación de la superficie libre e invariante con la profundidad.

Al aplicar las hipótesis anteriormente descritas en la ecuación 3.15:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (3.16)$$

Que describe la ecuación para acuíferos libres, donde se toma el coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) igual al rendimiento específico ( $S_y$ ).

### 3.2. CONDICIONES LÍMITE

Las ecuaciones diferenciales parciales que describen el flujo de agua a través de un medio poroso, tienen un número infinito de posibles soluciones. Para obtener una solución particular de las distintas posibilidades, es necesario definir información adicional que acote las soluciones de la ecuación de flujo subterráneo. Se debe entonces incluir especificaciones de:

- El estado preliminar del flujo en el dominio, condiciones iniciales.
- Relación de la interacción del flujo con sus alrededores, condiciones en la frontera.

#### 3.2.1. Condiciones iniciales

De acuerdo con Bear (1978) las condiciones iniciales incluyen la especificación de la incógnita  $u$  que se desea calcular en todos los puntos dentro de un dominio  $D$  en algún tiempo inicial, usualmente denominado como  $t=0$ . Matemáticamente consiste en:

$$u = f(x, y, z) \quad (3.17)$$

Para todos los puntos  $x, y, z$ , dentro de  $D$ ;  $f$  es una función conocida en  $t=0$ .

#### 3.2.2. Condiciones de frontera

Un dominio puede intercambiar con su entorno, a través de una frontera o en parte de ésta, masa, energía y momento. De acuerdo al tipo de condición, éstas pueden ser parcial o totalmente cerradas a cualquier intercambio, permitiendo expresar matemáticamente la relación del dominio  $D$  con el entorno y partiendo de una interpretación de las condiciones físicas del área de estudio.

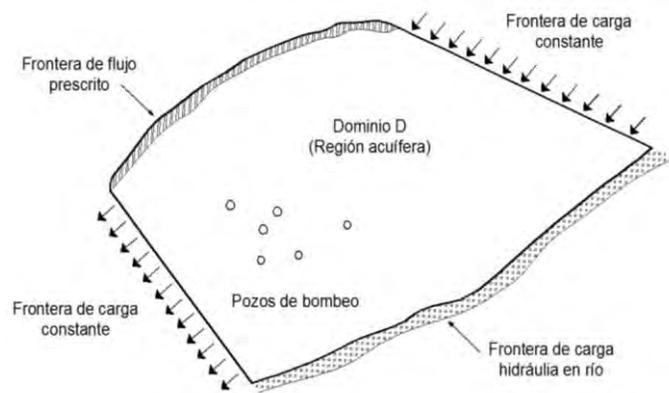


Figura 3.6 Dominio  $D$  y condiciones de frontera físicas

En el estudio de un acuífero típico, se pueden definir tres tipos de condiciones de frontera. Cada una de ellas puede actuar en un segmento de toda la frontera en la  $i^{\text{ésima}}$  capa del acuífero. En términos generales, las condiciones iniciales y de frontera según Lapidus y Pinder (1982) son definidas como:

$$\alpha(x, y)u(x, y) + \beta(x, y)u_n(x, y) = \gamma(x, y) \quad (3.18)$$

donde  $u_n = \frac{\partial u}{\partial n}$  es la derivada normal a la frontera.

Casos particulares de la ecuación 3.18 son las condiciones de frontera tipo Dirichlet y Neumann.

- *Condición de frontera Dirichlet*

Una condición de frontera tipo Dirichlet es llamada condición de frontera de carga piezométrica prescrita o de primer tipo. Se obtiene una condición de frontera de esta forma cuando  $\beta = 0$  en la ecuación 3.18.

$$\alpha(x, y)u(x, y) = \gamma(x, y) \quad (3.19)$$

Aral (1989) define esta condición de frontera como:

$$h(x, y, t) = g_i(x, y, t) \quad (3.20)$$

donde  $g_i(x, y, t)$  es una función conocida. Aunque esta función es continua por tratarse de un dato de entrada, solo se requieren valores discretos en los nodos de frontera a cada cierto intervalo de tiempo.

Esta condición de frontera es frecuentemente utilizada para describir condiciones de campo lejano, por ejemplo, un segmento de frontera donde se esperan cambios despreciables en la carga piezométrica.

- *Condición de frontera tipo Neumann*

Una condición de frontera tipo Neumann es conocida como condición de frontera de flujo prescrito o de segundo tipo. Se obtiene una condición de frontera así cuando  $\alpha(x, y) = 0$ , en la ecuación 3.18.

$$\beta(x, y)u_n(x, y) = \gamma(x, y) \quad (3.21)$$

Aral (1989) describe esta condición de frontera como:

$$(T_i \cdot \nabla h_i) \cdot n = q_i(x, y, t) \quad (3.22)$$

con  $n$  definido como el vector normal unitario hacia afuera del dominio,  $q_i(x, y, t)$  es una función conocida definida en la frontera del dominio de la  $i^{\text{ésima}}$  capa del sistema regional,  $T_i$  es el tensor de transmisividad con componentes principales  $T_{xi}$  y  $T_{yi}$ , y  $\nabla$  es el operador gradiente bidimensional.

Una forma especial de esta condición de frontera ocurre frecuentemente en estudios de flujo de agua subterránea. Para fronteras impermeables o para fronteras donde una división de agua es especificada, el flujo a través de la frontera necesita ser definida como cero, en tal caso la función  $q_i(x, y, t)$  asume un valor nulo.

- Condición de frontera de carga hidráulica en río o tipo Robbins

Una condición de frontera de carga hidráulica en río o tipo Robbins, es conocida como condición de frontera de flujo mixto, de tercer tipo o de Radiación de Newton. Esta condición de frontera es usada para describir lo que se denomina como condición de filtración; se obtiene una condición de este tipo cuando  $\alpha$  y  $\beta$  son diferentes de cero en la ecuación 3.18.

$$\alpha(x, y)u(x, y) + \beta(x, y)u_n(x, y) = \gamma(x, y)$$

Según Pinder (2002),  $\gamma(x, y)$  es una función valuada a lo largo de la frontera del dominio  $\alpha$  y  $\beta$ . Así mismo puede ser utilizada para representar una frontera física que se encuentre a una gran distancia de la frontera del modelo en una, dos o tres dimensiones. La fórmula se expresa por:

$$K \cdot \frac{\partial h(u)}{\partial n} = k(h_o(u) - h(u)) \quad (3.23)$$

donde  $h_o$  es la carga externa al modelo (p.e. niveles de los tirantes de un río),  $h$  el nivel del lecho y el coeficiente  $k$  representa la resistencia del flujo a través de la frontera que separa el cuerpo de agua superficial del acuífero. La diferencia de cargas es tomada en dirección  $n$  en la región de interés.

### 3.3. RÉGIMEN DE FLUJO

#### 3.3.1. Estacionario

El flujo en estado estacionario se produce cuando la magnitud y la dirección del flujo son constantes con el tiempo a lo largo de todo el dominio. Es decir:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3.24)$$

Es importante señalar que la ecuación 3.24 no representa que en un sistema en estado estacionario deje de existir movimiento de las aguas subterráneas, por el contrario, significa que la cantidad de agua dentro del dominio sigue siendo la misma ( $\Delta V = 0$ ).

#### 3.3.2. Transitorio

El análisis de aguas subterráneas en régimen transitorio, es importante cuando existe un cambio de magnitud o dirección del flujo en el tiempo. Esto ocurre cuando cambian las condiciones de contorno de las aguas subterráneas y que requieren de una cantidad finita de tiempo para alcanzar las condiciones de flujo esperadas ( $\frac{\partial h}{\partial t} \neq 0$ ).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \nabla^2 h \quad (3.25)$$

### 3.4. INTERACCIÓN RÍO - ACUÍFERO

La interacción río-acuífero implica la definición de una combinación entre la carga hidráulica en la corriente de un río y la especificación del flujo que se deriva de las transferencias existentes entre el flujo superficial y el acuífero. Es decir, la velocidad del flujo que entra y sale de la formación geológica se encuentra en función de la elevación del lecho del río, el nivel piezométrico del acuífero y las descargas que ocurren entre el acuífero y la corriente. Otra forma de expresar la ecuación 3.23 en términos de estas características se describe a continuación.

Considerando el contorno del lecho del río mostrado en la figura 3.7, la filtración por unidad de longitud dentro del acuífero es definida por:

$$(T_i \cdot \nabla h_i) \cdot n = \left( \frac{K_r w_r}{m_r} \right) (h_r - h_i) = q_r \quad (3.26)$$

donde  $K_r$  corresponde a la conductividad hidráulica del río,  $w_r$  es el ancho medio de la sección transversal,  $m_r$  es el espesor del lecho,  $h_r$  es la elevación de la carga del tirante del río y  $h_i$  es el nivel freático del acuífero. Cuando  $h_i$  es menor que  $z_r$ , correspondiente al nivel del fondo del río, la descarga del río alcanza un punto máximo de  $q_r$ , por lo que el acuífero recibe la máxima transferencia de agua a sus niveles de almacenamiento. Cuando  $h_i$  resulta mayor a  $z_r$ , se dice que el río está recibiendo aportaciones de las corrientes subterráneas.

$$q_r \begin{cases} a) \left( \frac{K_r w_r}{m_r} \right) (h_r - h_i) \text{ para } h_i > z_r, \text{aportación al río} \\ b) \left( \frac{K_r w_r}{m_r} \right) (h_r - z_r) \text{ para } h_i \leq z_r, \text{aportación al acuífero} \end{cases} \quad (3.27)$$

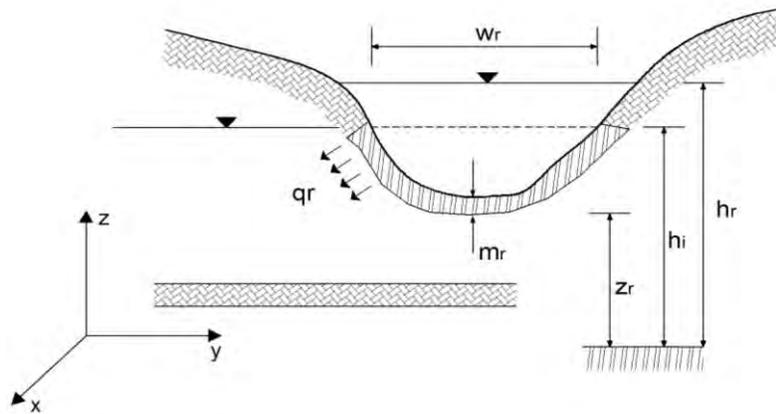


Figura 3.7 Esquema conceptual de la Interacción río-acuífero

### 3.5. ESQUEMA DE SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LA ECUACIÓN DE FLUJO SUBTERRÁNEO

La solución de la ecuación de flujo subterráneo representada en la expresión 3.16, consiste en encontrar el valor de la carga hidráulica  $h$ , en cada punto del sistema o región de flujo. Los métodos disponibles en la solución de esta ecuación se clasifican como analíticos y numéricos.

Algunos ejemplos de las metodologías de resolución para dichas clasificaciones son:

- Métodos Analíticos
  1. Separación de Variables
  2. Técnicas de Variable Compleja
  3. Transformada de Fourier o Laplace
  4. Funciones de Green
  5. Series de Potencias
  
- Métodos Numéricos
  1. Diferencias Finitas
  2. Elemento Finito

Para problemas que involucran ecuaciones lineales o casi lineales en regiones geométricas simples, es posible obtener una solución exacta por medio de un método analítico. Algunas veces, resulta complejo encontrar la solución por separación de variables o utilizando un cambio de variable que funcione como variables separables y permita llegar a una solución. En ocasiones las técnicas de variable compleja, la aproximación por identidades de Green, por transformadas de Fourier o de Laplace, conducen a una solución exacta.

En problemas no lineales con regiones de geometría irregular, son pocas las soluciones que existen y usualmente son obtenidas a partir de modificaciones del método de series de potencias. Las transformaciones son aplicables cuando los términos no lineales de la ecuación son más pequeños en comparación con los términos lineales. Aunque son poco utilizados, los métodos de series de potencia son buenos, pero requieren evaluar un coeficiente para cada término de la serie lo cual resulta en ocasiones tardado. Finalmente, se vuelve difícil demostrar que la serie de potencias converge en la solución exacta.

Las consideraciones necesarias para resolver un modelo matemático de forma analítica son bastante restrictivas, por ejemplo, muchas soluciones de este tipo requieren la contemplación de que el medio sea homogéneo e isotrópico. Por otro lado, problemas que involucran regiones de geometría irregular que resultan ser situaciones más reales y frecuentes, generalmente no pueden ser resueltos de manera analítica. Para brindar resolución a este tipo de dificultades es ventajoso el empleo de métodos numéricos para la aproximación de la solución.

Los métodos numéricos proveen la herramienta más general del análisis cuantitativo de las aplicaciones de agua subterránea. Estos no están sujetos a consideraciones restrictivas que se requieren en los métodos de solución analítica. A pesar de la flexibilidad de los modelos numéricos, sus bases matemáticas son menos sofisticadas que las encontradas en los métodos analíticos.

Para desarrollar un modelo numérico de un sistema físico (en este caso un acuífero), es necesario entender cómo se comporta el mismo. Lo anterior requiere comprender la forma de leyes y conceptos matemáticos que rigen el fenómeno en estudio (p.e. ley de Darcy), para posteriormente transformarlas en expresiones que pueden ser aproximadas a través de incrementos finitos.

### 3.5.1. Método numérico de diferencias finitas

El desarrollo de la ecuación de flujo de agua subterránea en forma de diferencias finitas fue realizado por McDonald y Harbaugh (1988). Este método sigue la aplicación de la ecuación de continuidad que se expresa como: la suma de todos los flujos de entrada y salida de la celda debe ser igual a la tasa de cambio en el almacenamiento dentro de la misma.

Suponiendo que la densidad del agua subterránea es constante, la ecuación de la continuidad que expresa el balance de flujo en cada celda es:

$$\Sigma Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \tag{3.28}$$

donde

- $Q_i$       tasa de flujo dentro de la celda ( $L^3 T^{-1}$ )
- $S_s$       almacenamiento específico ( $L^{-1}$ )
- $\Delta V$      volumen de la celda ( $L^3$ )

$\Delta h$  cambio de la carga en un intervalo de tiempo  $\Delta t$

El término de lado derecho de la ecuación es equivalente al volumen de agua que entra en el almacenamiento durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$  dado un cambio en la carga  $\Delta h$ . La igualdad 3.28 se expresa en términos de ganancia a la entrada y almacenamiento. El flujo de salida y la pérdida se representan mediante la definición de flujo de salida como un flujo de entrada negativo y la pérdida como una ganancia negativa.

La figura 3.8 representa la celda  $i, j, k$  y seis celdas adyacentes a ésta  $i-1, j, k$ ;  $i+1, j, k$ ;  $i, j-1, k$ ;  $i, j+1, k$ ;  $i, j, k-1$ ; y  $i, j, k+1$ . Para simplificar el desarrollo los flujos se consideran positivos si entran en la celda  $i, j, k$ . De esta manera el flujo dentro de la celda  $i, j, k$  en la dirección de las filas desde  $i, j-1, k$  en la figura 3.9, es representada por la ley de Darcy como:

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (3.29)$$

donde

$h_{i,j,k}$  carga en el nodo  $i, j, k$  (L)

$h_{i,j-1,k}$  carga en el nodo  $i, j-1, k$  (L)

$q_{i,j-1/2,k}$  flujo volumétrico a través de la cara localizada entre las celdas  $i, j, k$  y  $i, j-1, k$  ( $L^3 T^{-1}$ )

$KR_{i,j-1/2,k}$  conductividad hidráulica a lo largo de la fila entre los nodos  $i, j, k$  y  $i, j-1, k$  ( $LT^{-1}$ )

$\Delta c_i \Delta v_k$  área de la cara de la celda normal a la dirección de la fila ( $L^2$ )

$\Delta r_{j-1/2}$  distancia entre los nodos  $i, j, k$  y  $i, j-1, k$  (L)

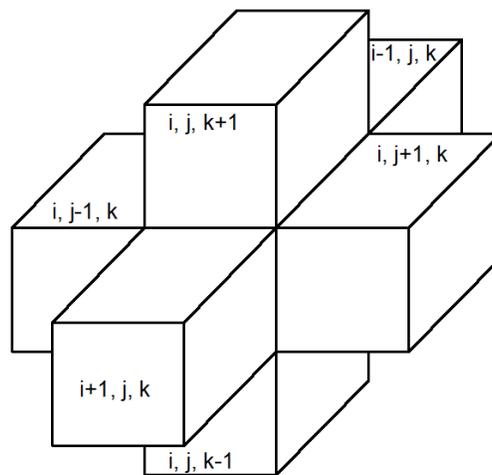


Figura 3.8 Índices de las caras adyacentes que rodean a las celdas  $i, j, k$ .

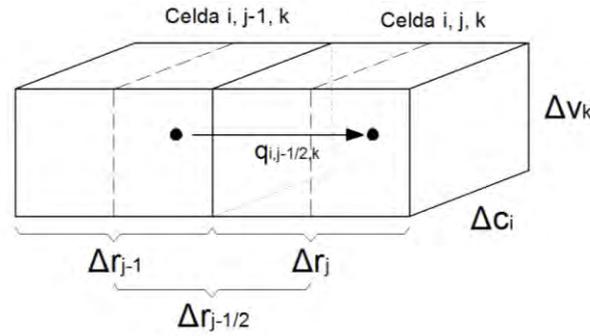


Figura 3.9 Flujo dentro de la celda  $i, j, k$ , desde la celda  $i, j-1, k$

Le ecuación 3.29 indica el flujo en una dimensión en régimen estacionario a través de la fila de una celda de acuífero que se extiende desde el nodo  $i, j, k$  y  $i, j-1, k$ ; que tiene una sección transversal representada por  $\Delta c_i \Delta v_k$ ; y una conductividad hidráulica  $KR_{i,j-1/2,k}$  del material contenido entre estos nodos, normalmente calculada como un promedio armónico.

El subíndice  $\frac{1}{2}$  se utiliza en la ecuación 3.29 para designar la región entre los nodos  $i, j, k$  y  $i, j-1, k$ , y no representa un punto específico a la mitad de la trayectoria entre los dos nodos, por lo tanto,  $q_{i,j-1/2,k}$  será el flujo que existe entre ambos nodos. Expresiones similares se pueden escribir para representar el flujo de la celda a través de las cinco caras restantes, por ejemplo para el flujo en la dirección de las filas a través de la cara localizada entre las celdas  $i, j, k$  y  $i, j+1, k$  se tiene:

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}} \quad (3.30)$$

en la dirección de la columna, el flujo dentro del bloque a través de la cara frontal es:

$$q_{i+1/2,j,k} = KC_{i+1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{i+1/2}} \quad (3.31)$$

el flujo dentro del bloque a través de la cara posterior es:

$$q_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{i-1/2}} \quad (3.32)$$

para la dirección vertical, el flujo de entrada a través de la cara inferior es:

$$q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}} \quad (3.33)$$

finalmente, el flujo de entrada por la cara superior es:

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k-1/2}} \quad (3.34)$$

Las ecuaciones 3.29 a 3.34 expresan el flujo de entrada a través de cada una de las caras de la celda  $i, j, k$  en términos de cargas, dimensiones de la malla y la conductividad hidráulica. La notación puede simplificarse combinando las dimensiones de la malla y la conductividad hidráulica en una simple constante denominada como conductancia hidráulica:

$$CR_{i,j-1/2,k} = \frac{KR_{i,j-1/2,k}\Delta C_i\Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (3.35)$$

donde

$CR_{i,j-1/2,k}$  es la conductancia hidráulica en la fila  $i$  y la capa  $k$  entre los nodos  $i, j-1, k$  y  $i, j, k$  ( $L^2 T^{-1}$ )

Sustituyendo el término de conductancia hidráulica, anteriormente descrito en la ecuación 3.29:

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad (3.36)$$

De forma similar, para las ecuaciones 3.30 a 3.34 se tiene:

$$q_{i,j+1/2,k} = CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \quad (3.37)$$

$$q_{i+1/2,j,k} = CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (3.38)$$

$$q_{i-1/2,j,k} = CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (3.39)$$

$$q_{i,j,k+1/2} = CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \quad (3.40)$$

$$q_{i,j,k-1/2} = CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \quad (3.41)$$

Para considerar flujos de celdas que provienen de procesos externos del acuífero, por ejemplo arroyos, áreas de recarga, evapotranspiración o pozos, se requiere de términos adicionales. Los flujos pueden ser dependientes de la carga en la celda receptora, pero independientes para todas las demás cargas del acuífero, o bien, pueden ser totalmente independientes de la carga que se presenta en la celda que lo recibe. El flujo desde el exterior del acuífero puede representarse por la expresión:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n}h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad (3.42)$$

donde

$a_{i,j,k,n}$  flujo desde la  $n$ ésima fuente externa dentro de la celda  $i, j-1, k$  ( $L^3 T^{-1}$ )

$p_{i,j,k,n}, q_{i,j,k,n}$  corresponden a constantes ( $L^2 T^{-1}$ ) y ( $L^3 T^{-1}$ ), respectivamente

En el supuesto en que una celda reciba recarga de dos fuentes, por ejemplo desde un pozo o el goteo de un río, la primera fuente corresponde a:

$$a_{i,j,k,1} = q_{i,j,k,1} \quad (3.43)$$

Para la segunda fuente, se supone que la interconexión entre río y acuífero puede ser manejado como una conductancia, de tal forma que el goteo es proporcional a la diferencia de cargas entre el lecho del río y la carga en la celda  $i, j, k$ , por lo que:

$$a_{i,j,k,2} = CRIV_{i,j,k,2}(R_{i,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (3.44)$$

donde

$R_{i,j,k}$  es la carga en el río (L)

$CRIV_{i,j,k,2}$  es la conductancia hidráulica del río ( $L^2 T^{-1}$ ) que controla el flujo hacia la celda  $i, j, k$ .

En la figura 3.10, el término  $CRIV$  se encuentra definido por el producto de la conductividad hidráulica vertical del material del lecho del río y el área total en el lecho que cruza la celda, dividido entre el espesor del material.

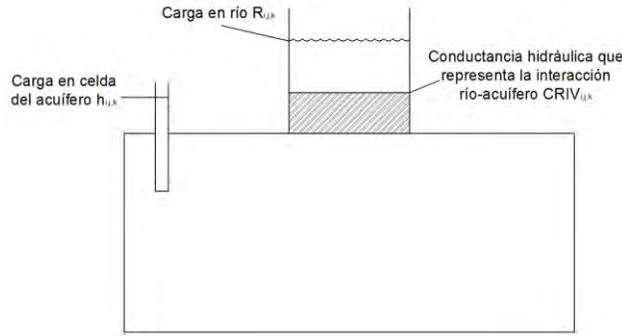


Figura 3.10 Modelo conceptual de la filtración a una celda a través del lecho del río

Si existen  $N$  fuentes externas o esfuerzos que afectan una celda, el flujo de todas ellas se expresa por:

$$QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad (3.45)$$

El flujo general externo de la celda  $i, j, k$  es

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k,n} \quad (3.46)$$

Al aplicar la ecuación 3.15 a la celda  $i, j, k$ , y considerando el flujo externo ( $QS$ ) en las celdas adyacentes, se tiene:

$$q_{i,j-\frac{1}{2},k} + q_{i,j+\frac{1}{2},k} + q_{i-\frac{1}{2},j,k} + q_{i+\frac{1}{2},j,k} + q_{i,j,k-\frac{1}{2}} + q_{i,j,k+\frac{1}{2}} + QS_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \quad (3.47)$$

donde

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$  es la aproximación en diferencias finitas de la carga con respecto al tiempo ( $L T^{-1}$ )

$Ss_{i,j,k}$  almacenamiento específico de la celda  $i, j, k$  ( $L^{-1}$ )

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$  volumen de la celda  $i, j, k$  ( $L^3$ )

Las ecuaciones 3.36 a 3.41 y 3.46, se sustituyen en la ecuación 3.47 para obtener la aproximación en diferencias finitas de la forma:

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\
 & + CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\
 & + P_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k,n} = SS_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \quad (3.48)
 \end{aligned}$$

Una aproximación en diferencias finitas de la carga con respecto al tiempo puede ser representada mediante la siguiente forma:

$$\left( \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)_m = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (3.49)$$

Donde m es el tiempo para el cual es evaluado el término de flujo en la ecuación 3.48. La pendiente de la recta o la derivada en el tiempo, es aproximada mediante el cambio de carga en el nodo sobre el intervalo de tiempo del cual procede y termina con el tiempo para el cual se evalúa. Este método es conocido como aproximación en diferencias finitas hacia atrás, el cual tiende a ser numéricamente estable, es decir, el error introducido en cualquier paso de tiempo disminuye progresivamente para los pasos de tiempo subsecuentes.

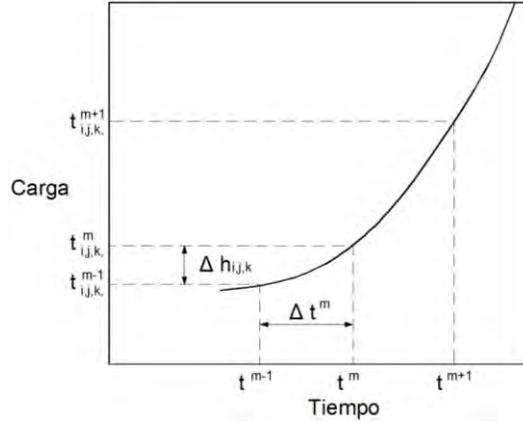


Figura 3.11 Aproximación en diferencias finitas hacia atrás.

La ecuación 3.48 puede reescribirse bajo el método de diferencias finitas hacia atrás en términos de m, es decir:

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\
 & + CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \\
 & + P_{i,j,k}h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k,n} = SS_{i,j,k} \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \quad (3.50)
 \end{aligned}$$

La ecuación 3.50 no se resuelve de forma independiente en virtud de que representa una ecuación con siete incógnitas, sin embargo, se puede escribir una ecuación de este tipo para cada celda activa en la malla y debido a que solamente existe una carga desconocida por cada celda, se tiene un sistema de n ecuaciones con n incógnitas.

El objetivo de la simulación en estado transitorio es predecir la distribución de las cargas en tiempos sucesivos dada una distribución inicial de las mismas, bajo ciertas condiciones de frontera, con la asignación de parámetros hidráulicos específicos y la definición de esfuerzos externos a las que se encuentran sujetas. La distribución inicial de cargas corresponde al valor  $h_{i,j,k}$  en cada nodo central de la malla y al inicio del primer paso de tiempo. Se requiere calcular valores de  $h_{i,j,k}^2$  en el proceso de solución, que son las cargas correspondientes al tiempo  $t_2$  al final del primer paso  $t_1$ .

El conjunto de ecuaciones en diferencias finitas es reformulado para cada paso de tiempo, es decir, en cada paso hay un sistema nuevo de ecuaciones. Las cargas al final de cada paso de tiempo son las incógnitas para las cuales se debe resolver el sistema, las cargas al inicio son los términos conocidos en las ecuaciones. El proceso de solución es repetido en cada paso de tiempo produciendo un nuevo arreglo de cargas para el final del paso.

Al reordenar los términos de la ecuación 3.50 de tal forma que los términos que contienen las cargas al inicio del paso de tiempo ( $m$ ), estén agrupadas en el lado izquierdo de la ecuación y los términos independientes de la carga al final del paso de tiempo ( $m+1$ ) se encuentren al lado derecho, se tiene:

$$\begin{aligned}
 & CV_{i,j,k-1/2}h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-1/2,j,k}h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-1/2,k}h_{i,j-1,k}^m + (-CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} \\
 & -CR_{i,j-1/2,k} - CR_{i,j+1/2,k} - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k})h_{i,j,k}^m \\
 & + CR_{i,j+1/2,k}h_{i,j+1,k}^m + CC_{i+1/2,j,k}h_{i+1,j,k}^m + CV_{i,j,k+1/2}h_{i,j,k+1}^m = RHS_{i,j,k} \quad (3.51)
 \end{aligned}$$

donde

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SCI_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}} \quad (L^2 T^{-1})$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - \frac{SCI_{i,j,k}h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (L^3 T^{-1})$$

$$SCI_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \quad (L^2)$$

El sistema de ecuaciones descrito en la ecuación 3.51, puede representarse en forma matricial como:

$$[A]\{h\} = \{q\} \quad (3.52)$$

donde

[A] Matriz de coeficientes de carga para los nodos activos de la malla

{h} Vector de valores de carga final del paso de tiempo  $m$  para los nodos activos de la malla

{q} Vector de términos constantes

### 3.6. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Las características correspondientes a los parámetros hidrogeológicos definen las posibilidades de explotación que ofrecen los acuíferos.

#### 3.6.1. Porosidad

Se define como la relación entre el volumen de vacíos respecto al volumen total de una muestra de suelo. En el caso de rocas totalmente saturadas, el volumen de vacíos coincide con el contenido de agua.

$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad (3.53)$$

En general las rocas tienen menos porosidad que los suelos. Las gravas, arenas y aluviones que están formados por partículas angulares y redondas, tienen menor porosidad que los suelos ricos en minerales.

*Tabla 3.1 Rangos de porosidad representativa en distintos materiales de un acuífero*

Medio	Porosidad total (%)
Granito no alterado y Gneis	0.002 - 1.8
Cuarzos	0.08
Arcillas, Pizarras, mica-esquisto	0.5 - 7.5
Calizas, Dolomitas primarias	0.5 - 12
Dolomitas secundarias	10 - 30
Yeso	8 - 37
Areniscas	3.5 - 38
Piedra Volcánica	30 - 40
Arenas	15 - 48
Arcillas	44 - 53
Arcillas Húmedas	más de 90
Suelos comunes	45 - 65

#### 3.6.2. Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico de un acuífero, se define como el volumen de agua liberada por unidad de acuífero del almacenamiento bajo una unidad de disminución en la carga hidráulica.

Una disminución en la carga hidráulica ( $h$ ) infiere una disminución de la presión ( $p$ ) del fluido y un incremento de una fuerza efectiva ( $\Gamma'$ ). El agua es liberada del almacenamiento bajo las condiciones en las cuales  $h$  decrece bajo alguno de los siguientes mecanismos:

1. La compactación del acuífero causada por la fuerza  $\Gamma'$ .
2. La expansión del agua causada por la disminución de la presión  $p$ .

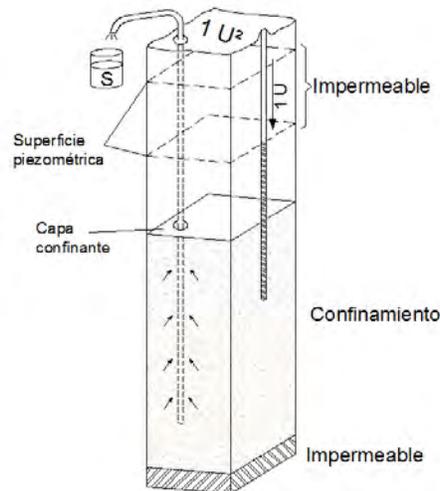


Figura 3.12 Esquema conceptual de rendimiento específico

El primero de estos mecanismos se controla por la comprensibilidad del acuífero ( $\alpha$ ), y el segundo por la comprensibilidad del fluido ( $\beta$ ). El volumen de agua liberado de la unidad de volumen del acuífero durante la compactación del mismo, es igual a la reducción en el volumen de la unidad de volumen del acuífero. El almacenamiento específico para acuíferos libres se expresa como:

$$Ss = \rho g (\alpha - n\beta) \tag{3.54}$$

Para un acuífero confinado de espesor  $b$ , el coeficiente de almacenamiento se define como:

$$S = \rho g b (\alpha + n\beta) \tag{3.55}$$

La producción específica de un acuífero libre es más alta que el almacenamiento en acuíferos confinados, el rango usual en los primeros es de 0.01 a 0.30

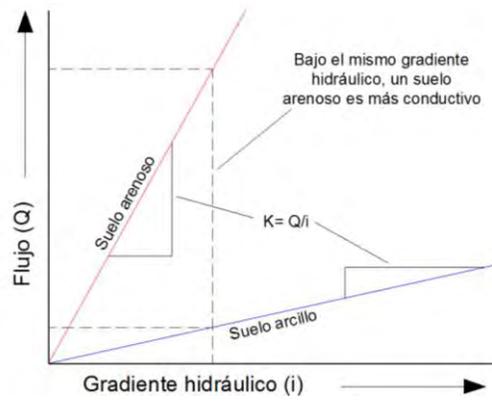
### 3.6.3. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica saturada es una medida cuantitativa de la capacidad de un suelo saturado para transmitir agua cuando es sometido a un gradiente hidráulico. Representa la facilidad con la que los poros en un medio saturado permiten el movimiento del agua.

En la Ley de Darcy, la conductividad hidráulica saturada representa una constante de proporcionalidad que define la relación lineal entre las variables de flujo ( $J$ ) y gradiente ( $i$ ). El flujo representa la cantidad de agua que se mueve en dirección y velocidad al gradiente hidráulico.

$$k = \frac{J}{i} \tag{3.56}$$

En un suelo arenoso se produce una velocidad de flujo más alta que en un suelo arcilloso que contiene el mismo gradiente hidráulico.



**Figura 3.13** Relación entre el flujo y el gradiente hidráulico. La conductividad hidráulica ( $k$ ) es la pendiente que define la relación.

La conductividad hidráulica saturada se ve afectada tanto por el suelo como por las propiedades del fluido, es decir, depende de la geometría de los poros del suelo, así como de la viscosidad y la densidad del líquido.

### 3.6.4. Transmisividad

La transmisividad es el valor de la conductividad hidráulica  $k$  multiplicada por el espesor saturado del acuífero:

$$T = k b \tag{3.57}$$

### 3.7. CRITERIO NRMS PARA VALIDACIÓN DE CARGAS ESTÁTICAS

Uno de los estimadores que mejor evalúa el error de la modelación de aguas subterráneas (*Anderson y Woessner, 1992; King et. al., 2003*) es el Error de la Raíz Media Cuadrática (RMSE o RMS) que se define como:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{calc} - X_{obs})^2} \quad (3.58)$$

Donde:

$X_{calc}$ : Valor de la carga piezométrica calculada

$X_{obs}$ : Valor de la carga piezométrica observada

$n$ : Número total de datos observados

Algunos autores (*Waterloo Hydrogeologic, 1999; Fernández, 2004*), sugieren la normalización del RMS en función de la máxima diferencia entre los niveles piezométricos observados.

$$NRMS = \frac{RMS}{(X_{obs})_{max} - (X_{obs})_{min}} * 100 \quad (3.59)$$

Donde:

$NRMS$ : Normalización de RMS en %

$(X_{obs})_{max}$ : Valor de la carga máxima observada dentro del dominio

$(X_{obs})_{min}$ : Valor de la carga mínima observada dentro del dominio

Un criterio importante del error medio cuadrático normalizado establece que debe mantenerse por debajo del 10% para ser considerado como una simulación aceptable (*King et. al., 2003; Barnett y Muller, 2008*). Si durante el periodo de calibración este error no sobrepasa el 5%, asegura que el error en la estimación de los niveles se mantendrá bajo a lo largo de toda la simulación (*Waterloo Hydrogeologic, 1999*).

## Capítulo 4

### 4. MODELO DE AGUAS SUPERFICIALES

---

#### 4.1. MODELO DE USO CONJUNTO WEAP

El modelo *Water Evaluation and Planning (WEAP)* fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute (SEI), como una herramienta de apoyo a la planificación de recursos hídricos. La primera aplicación de este modelo se realiza por *Raskin et. al. (1992)* para un caso de estudio desarrollado en el mar de Aral.

El esquema de funcionamiento de WEAP se basa en el principio básico de balance de masa, empleándose en sistemas de tipos urbanos y agrícolas, en simulaciones a nivel cuenca o multicuencas. La construcción del modelo incluye de forma generalizada las siguientes etapas:

1. Definición del estudio: En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
2. Búsqueda de información: Se realiza una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa es iterativa, y generalmente se ejecuta en dos partes: una primera etapa de recolección de datos generales, y una etapa subsecuente de recaudación de datos específicos una vez que se ha ensamblado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.
3. Desarrollo del modelo: Se construye el esquema, se ingresan datos y se realizan simulaciones iniciales para observar su comportamiento preliminar y eliminar posibles inconsistencias y errores.
4. Calibración: Se desarrolla una comparación a través de observaciones históricas y resultados obtenidos de las simulaciones del modelo. Generalmente se emplean criterios estadísticos para la medición del error y validación de resultados.
5. Uso del modelo, generación de escenarios: A partir de la calibración del modelo, se evalúan los impactos que tendría una serie de escenarios hipotéticos sobre políticas futuras, por ejemplo: demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación.

### 4.1.1. Formulación matemática

*Yates et. Al. (2005a, 2005b, y 2006)*, describen la forma en que se integra la modelación hidrológica dentro de WEAP. En general, este modelo hidrológico es espacialmente continuo con un área de estudio configurado como una red de subcuencas contiguas que cubren toda la extensión de la cuenca de análisis. Una serie de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizada en cada una de estas subcuencas, que se encuentran divididas en diferentes tipos de cobertura o usos de suelo.

Un modelo cuasi físico unidimensional, con dos volúmenes de control de balance de agua para cada tipo de suelo, reparte el agua entre escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación. Los valores de cada una de estas áreas se suman para obtener los valores agregados en una subcuenca.

Para cada paso de tiempo WEAP calcula inicialmente los flujos hidrológicos, que son traspasados a los ríos y acuíferos asociados. La distribución de agua se realiza para el mismo tiempo de simulación, donde las restricciones relacionadas con las características de los embalses y la red de distribución, las regulaciones ambientales, prioridades y preferencias asignadas a los diferentes puntos de demanda, son usadas como condiciones de operación de un algoritmo de programación lineal que maximiza la satisfacción de demanda hasta el mayor valor posible.

#### 4.1.1.1. Ecuación general de balance de aguas superficiales y subterráneas en la modelación conjunta

La modelación conjunta de aguas superficiales y subterráneas involucra una serie de componentes que describen las interacciones que se producen entre las fuentes, demandas e infraestructura disponibles. De esta manera la expresión mostrada en la ecuación 2.1 se puede representar en términos de éstas como:

$$\pm\Delta S_t = P^t - EVT^t - Pe^t \pm R - ext^t + r^t \quad (4.1)$$

Donde:

$\pm\Delta S_t$ :	Cambio del almacenamiento
$P^t$ :	Precipitación total sobre la cuenca
$EVT^t$ :	Pérdidas por evaporación y evapotranspiración
$Pe^t$ :	Precipitación efectiva o escurrimiento
$R$ :	Recarga o descarga del almacenamiento
$ext^t$ :	Extracciones superficiales y / o subterráneas
$r^t$ :	Retornos por riego

La ecuación 4.1 se aplica en sistemas únicos en los que existe una interacción del tipo hidrológico e hidrogeológico y debe adaptarse a las necesidades de cada sitio en particular, tomando en cuenta que pueden agregarse o eliminarse algunos de los términos que la componen.

#### 4.1.1.2. Método de simulación de cuencas

El balance hidrológico de la cuenca propio del modelo WEAP, divide en dos capas el suelo, cada una de las cuales es denominada volumen de control (VC). La primera de ellas se refiere al flujo intermedio en zona de raíces (VC 1), mientras que la segunda se relaciona con la percolación profunda (VC 2).

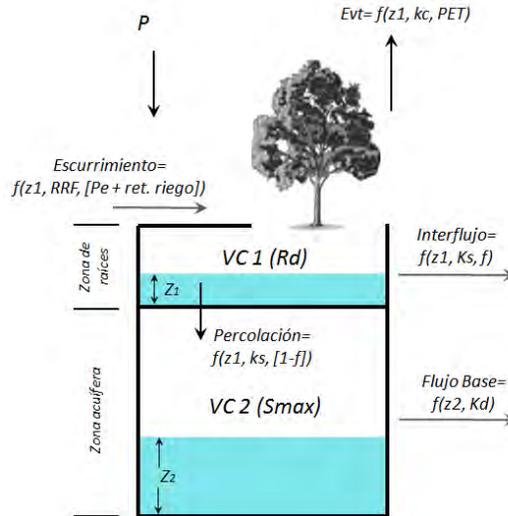


Figura 4.1 Esquema conceptual del funcionamiento por simulación de cuencas del modelo WEAP

El balance de ambos almacenamientos, queda definido por las funciones empíricas que contabilizan las variables de evapotranspiración, escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial (flujo intermedio) y percolación profunda. Esta última puede ser transmitida a una masa de agua superficial como flujo base o directamente al almacenamiento de agua subterránea si el enlace se hace entre el nodo de la cuenca y el nodo de aguas subterráneas.

Una cuenca puede ser dividida dentro del modelo en N fracciones de área que representan distintos usos o tipos de suelo. El balance de aguas en el VC 1 se calcula para cada una de estas fracciones mediante la ecuación:

$$Rd \frac{dz_{1,j}}{dt} = Pe(t) - PET(t)K_{c,j}(t) \left[ \frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right] - Pe(t)z_{1,j}^{RRFj} - f_j K_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j) K_s z_{1,j}^2 \quad (4.2)$$

Donde:

- $Rd \frac{dz_{1,j}}{dt}$ : Cambio de almacenamiento
- $Pe(t)$ : Precipitación neta (incluye derretimiento de nieve)
- $PET(t)K_{c,j}(t) \left[ \frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right]$ : Evapotranspiración
- $Pe(t)z_{1,j}^{RRFj}$ : Escurrimiento superficial (+ retornos por riego)
- $f_j K_s z_{1,j}^2$ : Flujo intermedio
- $(1 - f_j) K_s z_{1,j}^2$ : Percolación

El almacenamiento total efectivo de la capa superior se aproxima por la capacidad del suelo de mantener el agua  $Rd$  en mm, prescrito para cada fracción de la cobertura vegetal  $j$ . El término  $z_{1,j}$  corresponde al almacenamiento relativo del agua en el suelo, expresado como una fracción del

almacenamiento total cuyo valor está entre 0 y 1; donde 0 representa el punto de marchitamiento permanente (PMP) y 1 la capacidad de campo total (CC).

PET se refiere a la evapotranspiración del área fraccionada que puede ingresarse de manera directa o puede ser calculado por el modelo WEAP mediante el uso del método de Penman-Montieth y se encuentra en función del coeficiente de cultivo  $K_c$  y de la cubierta vegetal.

En lo que respecta al escurrimiento superficial, el término RRF corresponde al factor de resistencia al escurrimiento de la cubierta vegetal, valores altos de este parámetro producen un menor escurrimiento.

Así mismo,  $K_s$  se asocia a la conductividad hidráulica en zona de raíces. Finalmente,  $f$  es un parámetro de ajuste relacionado con el suelo, la cubierta vegetal y la topografía que fracciona en partes al agua ya sea horizontal ( $f$ ) o verticalmente, esto último representado por  $1-f$ .

Para las subcuencas sin un acuífero, la ecuación del balance de masa para el segundo almacenamiento está dado por:

$$S_{max} \frac{dz_2}{dt} = -K_d z_{2,j}^2 + (1 - f_j) K_s z_{1,j}^2 \quad (4.3)$$

$S_{max}$  corresponde al almacenamiento en el cubo inferior,  $Z_2$  es equivalente a  $Z_1$  pero propio del VC 2 y  $K_d$  a la conductividad hidráulica saturada.

Cuando un acuífero se introduce en el modelo, el término de flujo intermedio  $f_j K_s z_{1,j}^2$  se elimina de la expresión del balance en 3.59, y entonces la recarga se genera desde la superficie hasta el término de percolación (VC 2), así, la recarga hacia el acuífero se define entonces como:

$$R = \sum_{j=1}^N A_j (1 - f_j) K_d z_{1,j}^2 \quad (4.4)$$

Donde  $R$  tiene unidades de volumen por unidad de tiempo y  $A$  representa la superficie de aportación de la cuenca.

Aunque este método es comúnmente utilizado en sistemas simplificados, en el presente trabajo de investigación no será empleado en virtud de que el almacenamiento subterráneo es simulado por un modelo numérico de flujo subterráneo, el cual viene a sustituir el volumen de control caracterizado en la ecuación 4.2 y 4.3.

#### 4.1.1.3. Interacción de corrientes superficiales y subterráneas

En la mayoría de las cuencas, las aguas superficiales y subterráneas están interconectadas hidráulicamente. Una corriente puede contribuir a la recarga de aguas subterráneas o puede obtener una ganancia de agua proveniente del acuífero, dependiendo de la elevación de su nivel freático.

Las variaciones de nivel en los almacenamientos subterráneos responden a la recarga natural de las precipitaciones, pero también pueden ser influidas por el riego en la cuenca, donde una parte de esta agua genera una recarga al acuífero en lugar de ser absorbida por el cultivo. Para simular las interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas dentro del modelo WEAP, existen cuatro posibilidades:

1. Especificar directamente la cantidad de entrada y salida de agua en el río y hacia el acuífero.

2. Simular las interacciones de agua mediante un nodo que representa el acuífero y que se conecta a modo de cuña con el río (método de simulación de cuencas).
3. Utilizando el método de humedad del suelo.
4. Vinculando el modelo WEAP con el modelo de aguas subterráneas MODFLOW

En este último caso, la principal liga entre ambos modelos se desarrolla en la interacción del río con el acuífero. Dentro del esquema de balance mostrado en la figura 4.1, la vinculación con el modelo MODFLOW sustituye el término  $S_{max}$  por un balance propio de aguas subterráneas que realiza este último modelo.

El término  $R$  de la ecuación 4.4 representa la recarga que se genera hacia las fuentes de agua subterránea o las aportaciones que reciben las aguas superficiales de éstas, y que además es se asocia al término fuente o sumidero de la ecuación 3.16 de flujo subterráneo. Se expresa en unidades de volumen sobre tiempo, por lo que requiere ser definida en términos de carga  $h$  para ser relacionada con la ecuación 3.26 que constituye la definición de la interacción río – acuífero, y que está a su vez en función de la variación de niveles en los tirantes del río.

Dentro del modelo WEAP, el acuífero se toma como una cuña simétrica con respecto al río con un almacenamiento total estimado, el cual supone que el nivel de aguas freáticas se encuentra en equilibrio con el tirante del río (figura 4.2).

El almacenamiento en equilibrio para un lado de la cuña  $GS_e$  es representado como:

$$GS_e = B_d l_w A_d S_y \tag{4.5}$$

Donde:

- $B_d$ : distancia normal que se extiende horizontalmente desde la corriente (L)
- $l_w$ : longitud mojada del acuífero en contacto con la corriente (L)
- $A_d$ : profundidad del acuífero en equilibrio (L)
- $y_d$ : estimación de la altura a la que el nivel del acuífero se encuentra por arriba del nivel de almacenamiento en equilibrio  $d_w$  (L)

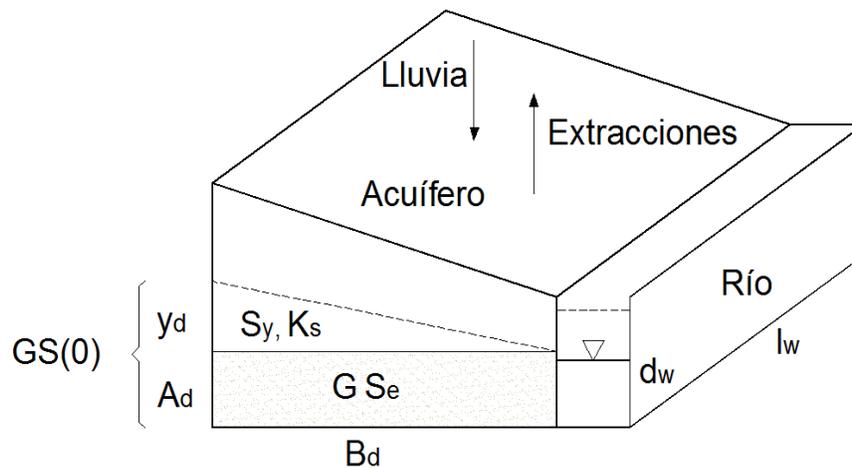


Figura 4.2 Esquema conceptual en la interacción río - acuífero dentro del modelo WEAP

En la figura anterior,  $d_w$  es el nivel de almacenamiento en equilibrio del río que permanece invariante en el tiempo (n);  $S_y$  coeficiente de almacenamiento del acuífero;  $K_s$  conductividad hidráulica saturada del acuífero (m/t).

La estimación de la altura a la cual el acuífero permanece por arriba del nivel de almacenamiento en equilibrio (cuando  $A_d = d_w$ ), se encuentra definida por  $y_d$ , por lo que el almacenamiento total inicial  $GS(0)$  en el acuífero en  $t=0$  es:

$$GS(0) = GS_e + (y_d B_d l_w S_y) \tag{4.6}$$

$GS_e$  en  $A_d$

De esta manera la altura vertical del acuífero sobre el nivel  $d_w$ , se define como:

$$y_d = \frac{GS(0) - GS_e}{(l_w B_d S_y)} = h \tag{4.7}$$

Mientras que el nivel del acuífero  $A_d$  con relación al nivel del río se incrementa, mayor será la percolación hacia el cauce. Esta expresión representa la ecuación 3.27a mostrada en el apartado 3.4, que constituye las aportaciones que se generan al río desde las fuentes de agua subterránea.

Por otro lado, cuando el nivel del acuífero  $A_d$  de la figura 4.2 resulta ser menor al nivel de almacenamiento  $d_w$ , se generan aportaciones al acuífero desde las fuentes de agua superficial. La carga  $d_w$  sobre el lecho del río resulta equivalente a  $h$ , cuya tasa de transferencia al acuífero será controlada en mayor medida por la permeabilidad de los materiales en la cama inferior del río (ecuación 4.8).

$$d_w = h \tag{4.8}$$

Esto último corresponde a la expresión mostrada en la ecuación 3.27b del apartado mencionado anteriormente.

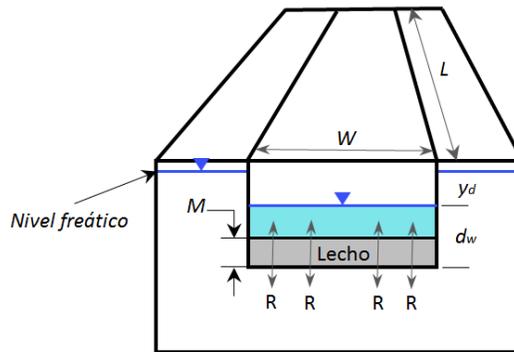


Figura 4.3 Variables que intervienen en la conductancia

Para ambos casos, el tirante y la longitud mojada del río aproximan el área a través de la cual se genera el intercambio de agua entre ambas fuentes. En este contexto, la conductividad hidráulica del lecho del río controla la tasa a la cual el agua se mueve hacia dentro o fuera del acuífero y cuyo término se representa por la ecuación 3.44 que asocia la conductancia hidráulica  $CRIV$  mediante:

$$C_h = \frac{KLW}{M} \quad (4.9)$$

Donde:

$C_h$ : conductancia hidráulica del río ( $L^2/T$ )

$K$ : conductividad hidráulica vertical en la cama del lecho del río ( $L/T$ )

$L$ : longitud del tramo ( $L$ )

$W$ : ancho de la sección transversal del cauce ( $L$ )

$M$ : espesor del material en el lecho del río ( $L$ )

Finalmente, el volumen de agua  $R$  mostrado en la ecuación 4.4 se relaciona mediante las ecuaciones 4.5 y 4.8 como:

$$R = C_h(h) \quad (4.10)$$

Donde  $h$  corresponde a  $y_d$  o  $d_w$ , según sea el caso. En el apartado 4.2 se describen los procedimientos de vinculación entre el modelo WEAP y MODFLOW.

#### 4.1.1.4. Método de optimización de recursos

La programación lineal estándar (*Berkelaar et al., 2004*) es utilizada dentro de la modelación WEAP para resolver problemas de asignación de agua. Se basa en funciones objetivo que maximizan la satisfacción de la demanda sujeta a una serie de restricciones que involucran prioridades de asignación, preferencias de suministro, balances de masa y otras limitaciones. El conjunto de acotaciones definidas son evaluadas en forma iterativa para cada paso de tiempo y de manera secuencial. Dentro de este contexto, cuatro funciones objetivo individuales son usualmente consideradas: (a) la satisfacción de la demanda ( $f_{DS}$ ), (b) la minimización de abatimientos ( $f_{DD}$ ), (c) la reducción de costos ( $f_c$ ) y (d) la satisfacción en términos de calidad de agua (salinidad). Es necesario realizar especial hincapié en que los principales requerimientos de los usuarios son delimitados por la satisfacción de la demanda del agua y su calidad, mientras que la reducción de costos y la minimización de abatimientos son los principales objetivos en el manejo del agua subterránea.

La satisfacción de la demanda ( $f_{DS}$ ), se encuentra definida como:

$$f_{DS} = \max \left[ \left| \sum_{se=1}^{NSEmax} \frac{F_D(se,d,t) - D(d,t)}{D(d,t)} \right| \right] \quad (4.11)$$

Donde:

$f_{DS}$ : Satisfacción de la demanda

$F_D$ : Agua suministrada

$se$ : Fuente de agua

$d$ : Sitio de demanda

$t$ : Paso de tiempo

$NSE_{max}$ : Número de fuentes de agua en el área de estudio

El mejor valor que puede alcanzarse para lograr la maximización de la satisfacción de la demanda  $f_{DS}$  corresponde a cero, que representa el escenario donde la fuente de agua *se* satisface por completo la necesidad del sitio de demanda  $d$  en el tiempo  $t$ . Cuando  $f_{DS}$  es diferente de cero, significa que uno o más sitios de demanda reciben mayor o menor cantidad de agua que la requerida.

Para la estimación de los impactos que tienen las demandas sobre las fuentes de abastecimiento de agua subterránea, se emplea la función objetivo de abatimientos ( $f_{DD}$ ) que se define como:

$$f_{DD}(s) = \max \left[ \frac{DwDw(w,t) \times VmaxDD(w)}{(Hi(w)-BOTM(w) \times I(w))} \right] \quad w = 1, \dots, N_{aw} \text{ y } t = T_{inicial}, \dots, T_{final} \quad (4.12)$$

La función anterior evalúa el abatimiento relativo y el abatimiento máximo aceptable. El término  $DwDw(w,t)$  es el abatimiento que se presenta en el sitio de bombeo  $w$  en el paso de tiempo  $t$  calculado por el modelo MODFLOW;  $VmaxDD(w)$  representa la máxima reducción al abatimiento observado en el sitio  $w$ ;  $Hi(w)$  es la carga inicial en el sitio  $w$ ;  $BOTM(w)$  es el fondo de bombeo;  $I(w)$  es la importancia del sitio  $w$  y  $N_{aw}$  es el número de pozos activos.

Los abatimientos son calculados mediante las corridas efectuadas en el modelo MODFLOW, permitiendo que los suministros que satisfacen los sitios de demanda  $F_D(se,d,t)$  sean distribuidos por igual entre los pozos de bombeos ligados a WEAP.

$VmaxDD(w)$  es un término de penalización que multiplica a la función objetivo. Donde se encuentre la máxima reducción al abatimiento permitido, es donde se localiza un valor mayor a 1 y por lo tanto la función objetivo está incrementándose. Por otro lado, si el valor es igual a 1, la función objetivo no se habrá modificado.

$$VmaxDD(w) = \max \left[ \frac{DwDw(w,t)}{DDmax(w)}, 1 \right] \quad w = 1, \dots, N_{aw} \text{ y } t = T_{inicial}, \dots, T_{final} \quad (4.13)$$

$DDmax(w)$  es el máximo abatimiento aceptable en el sitio  $w$ .

Este enfoque de programación tiene algunos atributos asociados a la programación dinámica tradicional, donde el modelo se resuelve en una secuencia basada en el cálculo de valores a partir de variables y ecuaciones previas (*Loucks et al, 1981; Nandalal y Sakthivadivel, 2002*).

Los sitios de demanda, almacenamientos y requerimientos de flujo, son clasificados con un número de prioridad dentro de un nivel de asignación en un rango de 1 (prioridad más alta) a 99 (prioridad más baja). El algoritmo de programación lineal considera las entidades en un mismo nivel, agrupándolas dentro de un único grupo al que le asigna una fracción de agua para cada miembro que forma parte de esta entidad. En cada sitio de demanda el algoritmo funciona con:

1. *Una variable por fracción de cobertura*: representa el porcentaje de la demanda total cubierta en el paso de tiempo evaluado.
2. *Una restricción de igualdad*: involucra satisfacer por igual a todas las demandas contenidas en cada grupo de prioridad en términos de demanda suministrada.

3. *Una restricción de cobertura:* que asegura la cantidad de agua solicitada para ser suministrada al sitio de demanda o al requerimiento de flujos en corrientes.

El algoritmo es resuelto al menos una vez para cada grupo de prioridad, maximizando la cobertura en cada sitio de demanda. Cuando se resuelve la prioridad que se evalúa, el algoritmo de programación lineal suspende el procedimiento de solución y pasa a evaluar a los siguientes grupos de prioridad.

Al igual que los grupos de demanda, se aplica un esquema de clasificación de primacías de suministros a las fuentes de abastecimiento de agua. Para conseguir este efecto en el algoritmo de asignación, a cada suministro se le asigna una categoría de preferencias y una prioridad determinada, así se repite el algoritmo a través de cada parcialidad de suministro para maximizar la cobertura en cada sitio de demanda.

Finalmente, se puede establecer una limitación de flujo a través de los vínculos de transmisión entre los suministros y las demandas, fijando un volumen máximo o porcentaje de la asignación, con la finalidad de representar diversas limitaciones físicas de la infraestructura existente (derivaciones, tuberías, bombeos, etc.).

**Tabla 4.1 Algoritmo de solución para el método de optimización de programación lineal en WEAP**

Para cada $p = 1 a P$	Para cada prioridad de demanda
<p>Para cada <math>f = 1 a F \in (D_k^{p,t-n})</math></p> <p><math>Z = C_p</math></p> <p><b>Sujeto a</b></p> <p><math>\sum_{j=1}^n x_{j,i}^p - \sum_{r=1}^m x_{i,r}^p + S_i^{t-1} = S_i^t</math></p> <p><math>\sum_{j=1}^F x_{j,k}^p = D_k^{p,t-1}</math></p> <p><math>\sum_{j=1}^F x_{j,k}^p = D_k^{p,t-1} * C_k</math></p> <p><math>\sum_{j=1}^m x_{j,k}^p \geq D_k^{p,t-1} * C_k</math></p> <p><math>c_k^p = C</math></p> <p><math>c_k^p \geq C</math></p> <p><math>0 \leq c_k^p \leq 1</math></p> <p><math>x_{i,l}^{&gt;p} = 0</math></p> <p><math>x_{i,k}^p \geq 0</math></p> <p><math>x_{i,k}^f \geq 0</math></p> <p><math>x_{i,k}^{&gt;f} = 0</math></p>	<p>En cada preferencia de suministro de la demanda, maximiza k (Cobertura a todos los sitios de demanda <math>k \in N</math> con prioridad p)</p> <p>Función objetivo, <math>C_p</math> es la cobertura total de la prioridad p</p> <p>Restricción de equilibrio de masas para el almacenamiento i al nodo r</p> <p>Restricción en el nodo de demanda k desde la fuente j</p> <p>Restricción de cobertura de la demanda k desde la fuente j</p> <p>Restricción de la cobertura para requerimiento de flujo en corrientes y almacenamientos k desde la fuente j</p> <p>Restricción de igualdad del sitio de demanda k con prioridad p</p> <p>Restricción de igualdad para requerimiento de flujo en corrientes y almacenamientos k con prioridad p</p> <p>Sitio de demanda obligado para las variables de cobertura (no se incluye requerimiento de flujo en corrientes o almacenamientos)</p> <p>Para sitios de demanda l con prioridad <math>&gt; p</math></p> <p>Para sitios de demanda k con prioridad <math>= p</math></p> <p>Para sitios de demanda k con prioridad <math>= f</math></p> <p>Para sitios de demanda k con prioridad <math>&gt; f</math></p>
<p><b>Resolver algoritmo de programación lineal, después</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Evaluar costos <math>h_k^p</math> para cada restricción de igualdad si es <math>&gt; 0</math></li> <li>2. Fijar <math>x_{j,k}^p</math> y <math>C_k</math> a valores óptimos de la solución</li> <li>3. Remover las restricciones de igualdad para <math>h_k^p &gt; 0</math></li> </ol> <p><b>Siguiente iteración para la prioridad actual, p</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. Fijar <math>x_{i,k}^f</math> a valores óptimos</li> </ol> <p><b>Siguiente f</b></p> <p><b>Siguiente p</b></p>	

De la tabla 3.2,  $p$  representa la prioridad de demanda,  $f$  es la preferencia de suministro para cada sitio de demanda  $k$  del número total de sitios de demanda  $N$ . La constante  $D_k^{p,t-1}$  es determinada para cada sitio de demanda  $k$  con prioridad  $p$ .

El término  $x_{j,i}^p$  define el flujo entre los nodos  $j$  a  $i$  a partir de la prioridad  $p$ ,  $S_i^t$  corresponde a los almacenamientos disponibles para el sitio  $i$  en un tiempo  $t$ ,  $C_p$  designa la cobertura total de la prioridad  $p$  y  $C_x^p$  representa el porcentaje total cubierto en los sitios de demanda individuales. Para la preferencia establecida, el suministro a cada sitio de demanda es definido en función con su rango de preferencia, presentando  $x_{j,k}^{>p}$  igual a cero como valor objetivo para la solución óptima en la cobertura total.

Respecto a la solución del algoritmo de programación lineal, los resultados sobre las restricciones de igualdad son examinados y si resulta un valor nulo, en cualquier sitio de demanda, el agua suministrada en este punto, resulta óptima para el conjunto de restricciones establecidas. El suministro  $x_{j,i}^p$  se instaura a partir de encontrar la solución óptima, retirando la restricción de igualdad y pasando al siguiente grupo restrictivo para resolver de nueva cuenta el algoritmo.

La misma secuencia es repetida para las preferencias de suministro, iterándose hasta que todos los sitios de demanda tienen un suministro de agua asignado. Una vez que todos los grupos se resuelven en el paso de tiempo evaluado, el algoritmo continúa con el siguiente paso de tiempo en el que se actualizan las exigencias y limitaciones dependientes del tiempo, y se reincide todo el procedimiento anteriormente descrito.

#### 4.2. VINCULACIÓN CON MODELOS EXTERNOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Para los casos donde los esquemas de solución de almacenamientos subterráneos utilizados por el modelo WEAP, son simples y no representan de forma detallada las características físicas de los sistemas acuíferos, existe la opción de realizar simulaciones conjuntas vinculando modelos de aguas subterráneas, específicamente con MODFLOW.

MODFLOW es un modelo que resuelve la ecuación de flujo subterráneo mediante un esquema numérico de diferencias finitas, el cual fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Cuando ambos modelos se vinculan de forma correcta, fluye información y la retroalimentación de resultados se genera de manera circular entre WEAP y MODFLOW para cada paso de tiempo de la simulación.

Con este acoplamiento es posible estudiar los impactos provocados por los cambios locales en los niveles de agua subterránea y sus implicaciones respecto a las afectaciones en el sistema a nivel regional, por ejemplo: interacciones en las corrientes superficiales y subterráneas, problemas de bombeo, recarga lateral, etc.; así como afectaciones a la infiltración de acuíferos por la modificación o disminución del escurrimiento superficial. En el apartado 5.2.2, se presenta una descripción más detallada de las componentes que integran el modelo MODFLOW.

4.2.1. Esquema de funcionamiento WEAP-MODFLOW

La vinculación entre ambos modelos, requiere de la configuración espacial de un mallado en formato shape que debe coincidir con la discretización realizada dentro del modelo de aguas subterráneas. En esta malla, se realiza una caracterización de las celdas que están ligadas en los procesos de simulación de ambos modelos y que básicamente corresponde a la definición de los sitios relacionados a cuencas, acuíferos, ríos, usos de suelo, demandas, pozos de bombeo y recargas.

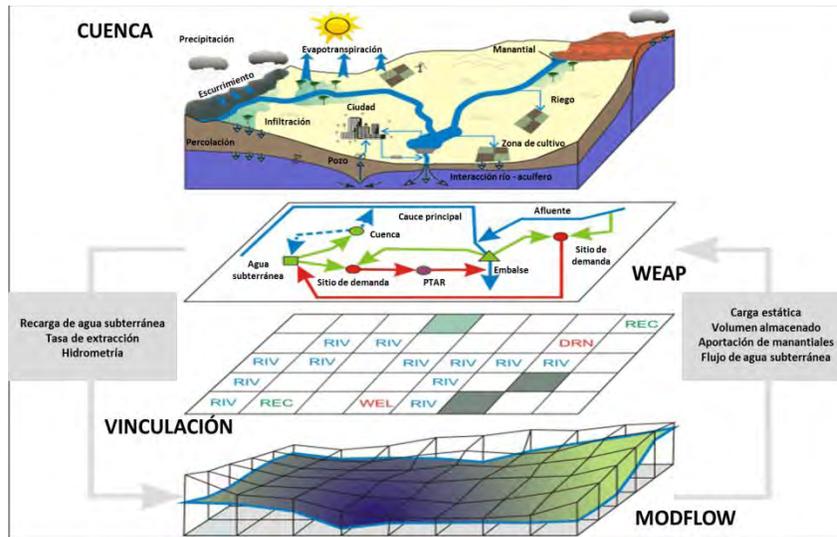


Figura 4.4 Vinculación entre los modelos WEAP y MODFLOW

El proceso de simulación conjunta implica inicialmente la lectura por parte del modelo WEAP de la información proveniente de las paqueterías activadas del modelo MODFLOW, en las celdas ligadas entre sí.

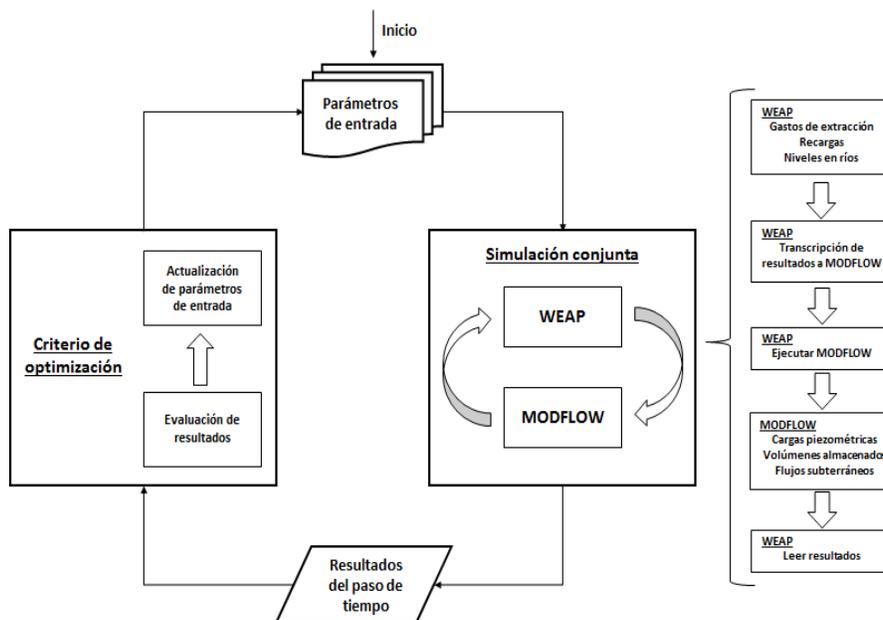


Figura 4.5 Esquema del funcionamiento WEAP-MODFLOW

Al iniciar la simulación en el primer paso de tiempo, WEAP genera los cálculos correspondientes a los gastos de extracción, recargas y niveles en las corrientes de ríos (ecuación 4.10), basado en los parámetros definidos internamente. Al término de la corrida, WEAP transcribe los resultados a las paqueterías en MODFLOW que contienen la información asociada a las variables calculadas y que representan principalmente las recargas superficiales o las descargas subterráneas requeridas en el sistema. El modelo MODFLOW es ejecutado desde WEAP y genera la simulación numérica para el cálculo de las cargas piezométricas, volúmenes almacenados, flujos subterráneos, etc. La simulación de este último funciona de acuerdo al algoritmo presentado en el apartado 5.2.2.1.

Posteriormente, WEAP retoma los resultados de MODFLOW para hacer una evaluación integral de la información arrojada por ambos modelos mediante el criterio de optimización que sea definido, y que se basa en el algoritmo presentado en el apartado anterior. Luego, se actualizan los parámetros internos de WEAP para iniciar la corrida del siguiente paso de tiempo (figura 4.5). El proceso se repite hasta concluir el tiempo de simulación establecido.

**4.3. CRITERIO DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA NASH Y PBIAS EN ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL**

El criterio que establece el grado de correspondencia entre valores de escurrimiento observados y calculados, es utilizado mediante el empleo del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el índice de sesgo PBIAS (desviación relativa de caudales).

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \tag{4.14}$$

$$PBIAS = 100 * \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)}{\sum_{i=1}^n (Q_o)} \right] \tag{4.15}$$

donde:

*NASH*: Entre más cercano a 1, representa una mejor correspondencia de los valores observados y calculados.

*PBIAS*: Entre más se aproxime a 0, existe un menor sesgo. Positivo indica un sesgo de subestimación, negativo indica sesgo de sobrestimación.

$Q_s$  y  $Q_o$ : Gasto simulado y observado respectivamente.

Moriasi et. al. (2007) sugiere un rango de valores que determinan el desempeño de un modelo a partir de los índices anteriormente descritos (tabla 4.2).

**Tabla 4.2 Desempeño de la modelación hidrológica con base al índice PBIAS y NASH, (Moriasi, 2007)**

<b>Desempeño</b>	<b>PBIAS (%)</b>	<b>NASH</b>
Muy preciso	PBIAS <±10	0.75 < NASH < 1.00
Bueno	10 <±PBIAS <±15	0.65 < NASH < 0.75
Satisfactorio	15 <±PBIAS <±25	0.50 < NASH < 0.65
No satisfactorio	PBIAS >±25	NASH < 0.50

## Capítulo 5

### 5. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE USO CONJUNTO

---

El presente capítulo aborda la implementación de las metodologías empleadas en la construcción de los modelos WEAP y MODFLOW. Ambos corresponden a la representación matemática del modelo conceptual que constituye la hidrología superficial y subterránea del caso de estudio, cuyas características principales son descritas en los anexos correspondientes.

Por otro lado, se despliega la vinculación de ambos modelos y su funcionamiento acoplado en la primera fase de simulación, lo que permite establecer un proceso de calibración y validación de forma integrada, tomando en cuenta los criterios estadísticos señalados en el apartado 3.7 y 4.3. De esta manera se evalúa el grado de correspondencia de los resultados obtenidos en las corridas numéricas, con relación a las observaciones históricas de escurrimientos en la cuenca y cargas piezométricas de los acuíferos.

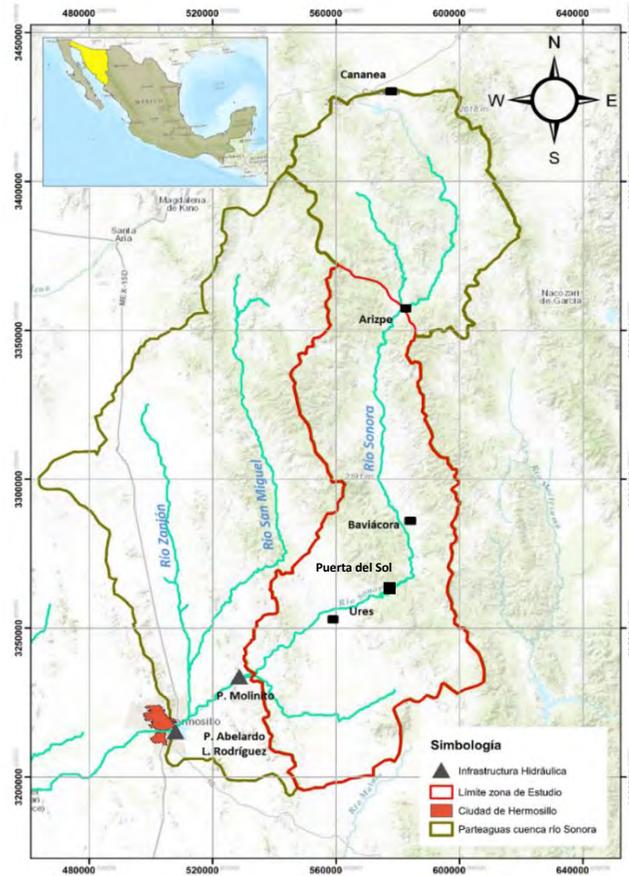
#### 5.1. CASO DE ESTUDIO

La cuenca del río Sonora cubre una extensión aproximada de 26 010 km<sup>2</sup>, se localiza en la porción norcentral del estado de Sonora y en dirección oeste de la región hidrológica 9. Presenta una precipitación media anual de 376 mm, así como una pendiente que va de fuerte (extremo norte) a baja (suroeste de la cuenca).

Geográficamente se encuentra delimitada por los paralelos 28°51' y 31°00' latitud norte y los meridianos 109°55' y 111°25' longitud oeste. Por su parte, el río Sonora se origina en la sierra de Cananea y recorre 294 km hasta verter sus aguas en la presa Abelardo L. Rodríguez, presenta una pendiente media de 0.38% y dirección norte – sur hasta Mazocahui donde cambia al suroeste hasta la ciudad de Hermosillo.

De este modo, el medio físico de la región permite identificar tres zonas principales dentro de la cuenca:

- *Cuenca alta*: recibe la mayor parte de las precipitaciones y se delimita desde el nacimiento del río hasta la presa Abelardo L. Rodríguez;
- *Cuenca media*: comprende la ciudad de Hermosillo hasta los afluentes del río San Miguel y Zanjón;
- *Cuenca baja*: constituye la planicie de la Costa de Hermosillo.



**Figura 5.1** Localización de la zona de estudio, cuenca alta del río Sonora

A partir de los límites del área de estudio, precisados por los objetivos de la presente investigación, el caso de estudio se desarrolla en el contexto de la cuenca alta, en el tramo que comprende la presa el Molinito y la localidad de Arizpe. El modelo conceptual en este tramo, contempla la definición de las unidades hidrogeológicas Valle de Aconchi, Valle de Ures y Topahue, las cuales son constituidas por acuíferos del tipo libre.

Por su parte, la hidrología superficial se encuentra caracterizada por los principales rasgos de la cuenca relacionados con su superficie, climatología, sitios de demanda y el trazo de su corriente principal.

La configuración del río Sonora en ambos modelos (WEAP y MODFLOW), funge como elemento clave dentro de su proceso de vinculación. Lo anterior implica que la representación de dicha corriente deba ser caracterizada a través de parámetros de tipos fisiográficos e hidrogeológicos.

## 5.2. MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO SUBTERRÁNEO

### 5.2.1. Modelo Conceptual de hidrología subterránea

Con relación a la información analizada de los estudios geológicos y geofísicos descritos en el anexo 1, y a partir de los requerimientos de carácter hidrogeológico del presente trabajo, se establece una caracterización de las principales litologías que dominan la región. Esta clasificación toma en cuenta rasgos relacionadas a morfología, porosidad y rango de permeabilidad en los suelos.

- *Aluviones*: constituido de gravas y arenas de alta permeabilidad, que conforman la capa principal de explotación de agua subterránea en la región.
- *Conglomerados*: terrazas aluviales, material semiconsolidado de permeabilidad media, en la que existen algunos aprovechamientos hidráulicos de rendimiento medio.
- *Granito y calizas intemperizadas*: rocas fracturadas con permeabilidad generalmente baja.
- *Formaciones Báucarit (Basaltos)*: rocas volcánicas de permeabilidad baja que representan una parte del basamento de los acuíferos de la región.
- *Cuarcitas y Esquistos*: material consolidado de permeabilidad baja a nula que constituye gran parte del basamento acuífero en la región.

#### 5.2.1.1. Unidades hidrogeológicas

Se logra identificar un área compuesta por tres unidades hidrogeológicas independientes entre sí por efecto de la configuración de su basamento impermeable, pero interconectadas de manera superficial por el cauce del río Sonora. Dos de ellas se localizan en los valles formados por las cordilleras de la Sierra Madre Occidental (Valle de Ures y Valle de Aconchi), y una más hacia la confluencia del río Sonora y el arroyo la Junta. Las características principales de cada una de éstas son:

- *Acuífero Valle de Aconchi*: Acuífero libre compuesto por dos estratos superiores; el primero de ellos de material no consolidado de gravas y arenas de alta permeabilidad, cuyo espesor va desde 100 a 150 metros, en el cual se concentra la mayor cantidad de aprovechamientos subterráneos. El segundo estrato que subyace está compuesto por conglomerados de terrazas aluviales, cuyo espesor promedio es de 200 metros en la porción central del río Sonora, aflorando hacia las márgenes del mismo en las cordilleras que conforman la Sierra Madre Occidental.
- *Acuífero Valle de Ures*: Acuífero libre que presenta una litología conformada por estratos de material aluvial y algunos conglomerados de terrazas aluviales. El espesor promedio del acuífero es del orden de los 200 metros.
- *Acuífero Topahue*: Acuífero libre localizado en suelos de tipo aluvial con 100 metros de espesor promedio, una porción limitada se localiza en el extremo noreste del mismo y abarca materiales de tipo riolitas.

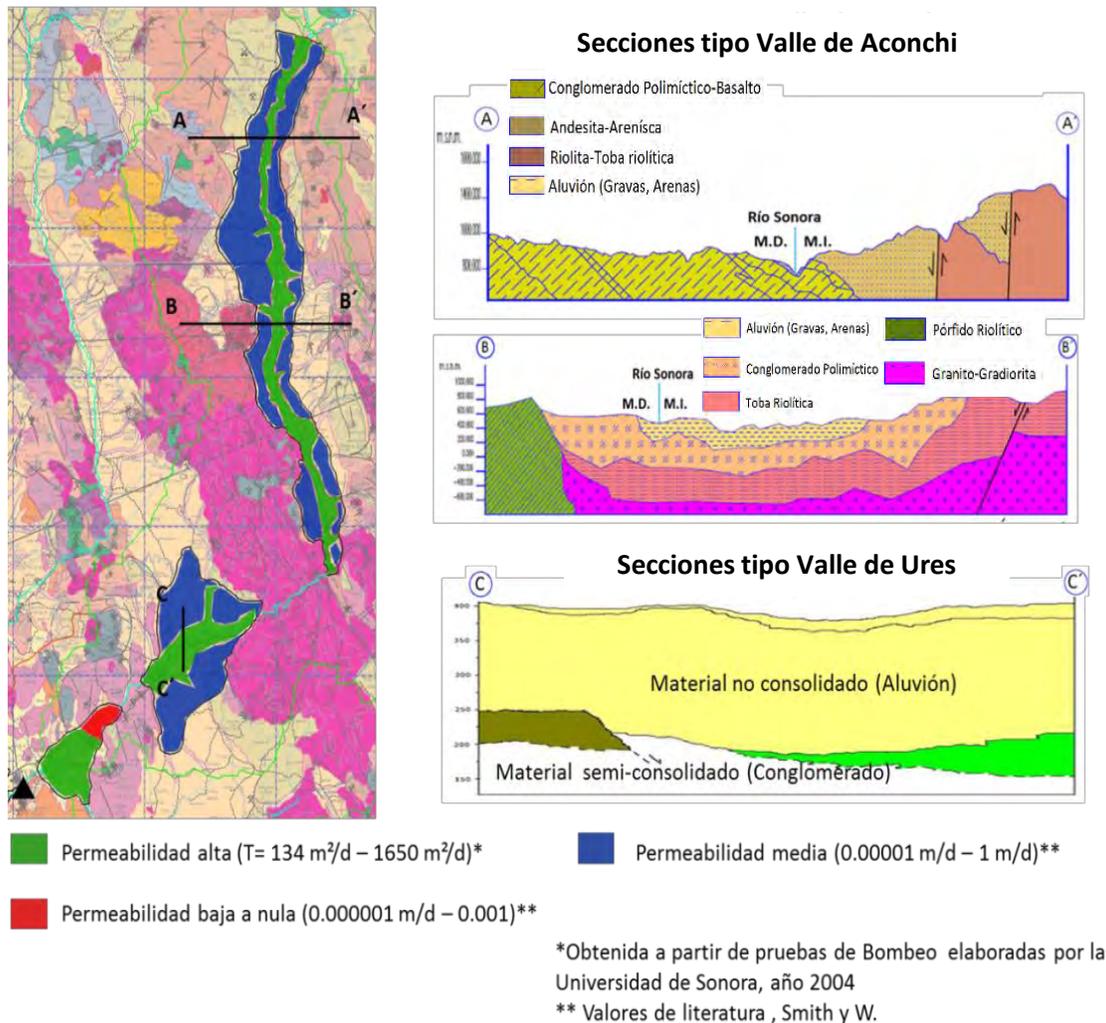


Figura 5.2 Caracterización de las unidades acuíferas y de sus propiedades hidrogeológicas

### 5.2.1.2. Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos que caracterizan el suelo en relación con la dinámica del flujo saturado subterráneo, son los relacionados a transmisividades, conductividades hidráulicas, porosidad, coeficiente de almacenamiento (acuíferos confinados) y rendimiento específico (acuíferos libres).

De esta manera, se identifica una serie de estudios relacionados con pruebas de bombeo que estiman parámetros de transmisividad y conductividad hidráulica en la zona de estudio. Estas pruebas fueron realizadas por la Comisión Estatal del Agua de Sonora en el año 2005 (tabla 5.1).

Debido a que no se cuenta con pruebas de campo para la estimación de los coeficientes de almacenamiento, se asigna un valor del rendimiento específico de 0.15 tomando en cuenta la clasificación realizada en la literatura por Frezze y Cherry (1979); y de acuerdo al tipo de litología existente en la zona de interés.

Tabla 5.1 Valores de transmisividad hidráulica año 2005

Obra No.	Localidad	X	Y	Transmisividad (m <sup>2</sup> /día)		
				Abat.	Recup.	Media
21	La Aurora	584084	3272230	---	---	---
30	La Labor	584438	3276416	557.28	571.97	564.62
40	El Molinote	583768	3280111	907.20	552.10	729.65
44	Suaquí	582086	3284286	705.89	---	705.89
53	San José de Baviácora	578429	3290937	148.61	133.92	141.26
57	La Estancia	575763	3296115	686.02	416.45	551.23
58	Aconchi	574241	3299588	697.25	589.25	643.25
62	Ranchito de Huépac	575485	3305776	852.77	680.83	766.80
63	Ranchito de Huépac	575459	3306043	1650.24	976.32	1313.28
64	Ranchito de Huépac	575409	3306043	---	---	---
68	Ojo de Agua	575986	3312647	3283.20	1650.24	2466.72
72	Huépac	575507	3309078	3265.92	1572.48	2419.20
74	Los Torreones	574704	3309959	667.87	769.82	718.85
83	La Blanca	575957	3318589	1650.24	1114.56	1382.40

A partir de los estudios consultados, se establece una caracterización a nivel regional de los rangos de permeabilidad y el rendimiento específico representativos del área (figura 5.2). Se observa que las permeabilidades altas de la región, se localizan dentro de los suelos aluviales con valores de transmisividad de 134 m<sup>2</sup>/d a 1650 m<sup>2</sup>/d, lo que supone una recuperación de los niveles freáticos muy rápida ante eventos climatológicos importantes. La mayoría de las pruebas de bombeo se realizaron dentro de esta litología, por lo que no se dispone de pruebas para el resto de las unidades litológicas.

### 5.2.1.3. Niveles estáticos

Una de las componentes principales que permite entender el comportamiento de los acuíferos en relación con las extracciones de agua y volúmenes de almacenamiento en un periodo de tiempo, es la relacionada a la variación de sus niveles estáticos. Se recopiló información relativa a los registros históricos de las piezometrías de los años 1970 y 2004, que permitió realizar una configuración de mapas de isolíneas de igual elevación del nivel estático en los tres acuíferos de interés en la región. La información consultada se describe en el anexo 2 del presente documento.

### 5.2.2. Modelo MODFLOW

El modelo MODFLOW es una herramienta computacional que utiliza una estructura de tipo modular, y que permite simular en tres dimensiones el flujo de agua subterránea en medios porosos. Fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) a mediados de 1970, en el lenguaje de programación FORTRAN.

La traslación numérica emplea el método de diferencias finitas para la resolución de las ecuaciones de flujo subterráneo presentadas en el capítulo tres, que se fundamentan en la conceptualización matemática propuesta por Darcy y que explica el movimiento de un fluido en un medio poroso saturado (McDonald M. y Harbaugh W., 1988).

En cuanto a sus capacidades, simula condiciones de tipo estacionario y transitorio; bajo los ejes principales de conductividad hidráulica, que se alinean con coordenadas unidireccionales asumiendo la densidad del agua como constante.

Por otro lado, la infraestructura hidráulica consistente en pozos, ríos, drenes; además de los procesos de evapotranspiración y recarga, son simulados como condiciones de borde (frontera) y constituidos como elementos de campo externo donde se conoce el nivel de energía del agua. La representación de los acuíferos se realiza por aproximación tridimensional, donde los nodos pueden cambiar de confinados a no confinados, en el desarrollo del proceso de simulación.

### 5.2.2.1. Estructura general

En lo que respecta a la estructura del tipo modular, ésta consiste en un programa principal (MAIN) y una secuencia de subrutinas independientes llamadas módulos, que se agrupan en una serie de paqueterías (packages).

El trabajo dentro de cada módulo se lleva a cabo desde las llamadas que se establecen en MAIN. Los módulos llamados por éste se denominan primarios, los que llama un módulo primario son denominados como secundarios.

Un paquete consiste en todos los módulos asociados con un trabajo hidrológico particular, un método de solución o el control de toda la simulación. Esta configuración del programa, permite examinar características específicas del modelo en forma independiente, además del desarrollo de nuevos paquetes que pueden ser añadidos al programa sin realizar una modificación a las existentes.

El periodo de simulación se divide en periodos de estrés donde todas las acciones externas se mantienen constantes. Cada uno de estos periodos puede ser dividido en una serie de pasos de tiempo. El sistema de ecuaciones en diferencias finitas mostrado en el apartado 3.5.1, se formula y resuelve para obtener el potencial de carga en cada nodo al final de cada paso de tiempo.

Para cada simulación existen tres ciclos encadenados entre sí. El primer ciclo corresponde a los periodos de estrés dentro de los cuales existe un ciclo de pasos de tiempo, dentro del que hay a su vez un ciclo de iteraciones (figura 5.3).

Antes de entrar al ciclo de periodos de estrés, el programa ejecuta tres procedimientos que pertenecen a la simulación como configuraciones iniciales. El primero de ellos se denomina como *Define*, el cual establece el problema a simular asociando sus características que lo configuran tales como tamaño del modelo, tipo de simulación (estacionaria o transitoria), número de periodos de estrés, opciones hidrológicas y esquemas de solución numérica. El segundo procedimiento corresponde a *Allocate*, que reserva el espacio de memoria necesaria en la simulación. Finalmente, el correspondiente a *Read and Prepare*, lee datos no asociados a la configuración temporal y que son constantes en la simulación, en los que se incluye condiciones de frontera, cargas iniciales, transmisividad o conductividad hidráulica, coeficientes de almacenamiento, porosidad efectiva, cotas inferior y superior de las capas acuíferas, entre otros.

Dentro del ciclo de periodo de estrés, se establece el procedimiento *Stress*, que lee el número de pasos de tiempo en el periodo y calcula a su vez la cantidad y el cambio de longitud en los incrementos de tiempo para el ciclo de iteración. En un segundo procedimiento *Read and Prepare*, se lee información que cambia de un periodo de cálculo al siguiente preparando la nueva información de entrada.

En cuanto al ciclo de pasos de tiempo, se encuentra el procedimiento *Advance* que calcula la longitud del paso de tiempo y fija las cargas para el comienzo del paso siguiente; estas últimas corresponden a las calculadas al final del incremento anterior.

El ciclo de iteraciones es representado por los procesos *Formulate* y *Approximate*. El primero contiene los módulos que formulan las ecuaciones y que determina los términos de conductancias y coeficientes restantes requeridos en la ecuación 3.51; el segundo procedimiento se refiere al cálculo de cargas con la solución del sistema de ecuaciones en diferencias finitas. El proceso iterativo prosigue hasta que se cumple el criterio de error o se alcanza un número máximo de iteraciones previamente especificado.

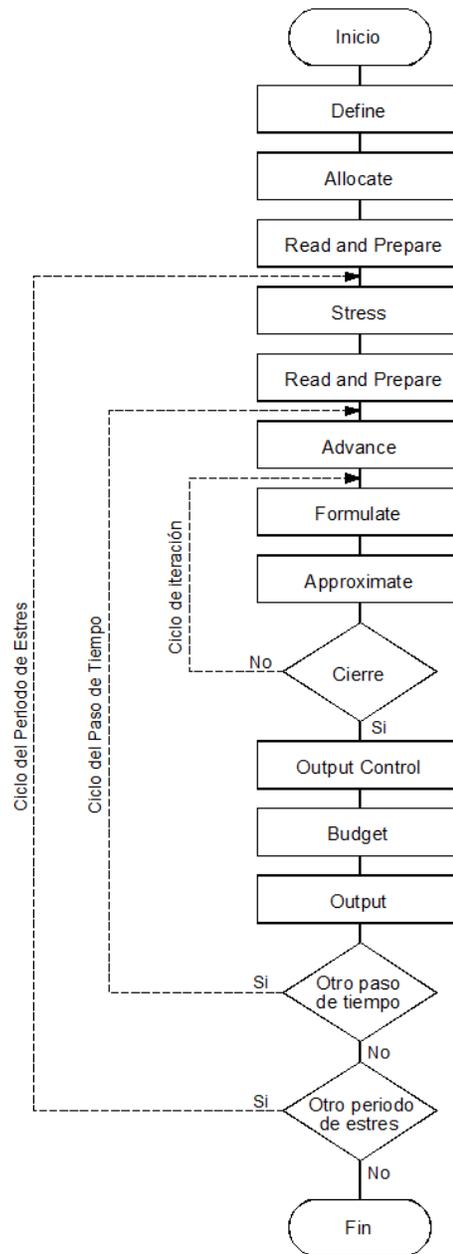


Figura 5.3 Procesos del algoritmo de trabajo de MODFLOW

Al final del ciclo de iteración, el procedimiento *Output Control* determina si la disposición de las cargas calculadas, los términos globales y el flujo de cada celda, deben ser almacenados al final del incremento de tiempo. En *Budget* se calculan los términos volumétricos y el flujo entre celdas que a su vez son guardadas. Finalmente en *Output* se imprimen y registran las cargas, abatimiento y términos generales, a partir de lo recabado en *Output Control*.

#### 5.2.2.2. Paqueterías

Dentro de las paqueterías que conforman los módulos que representan la configuración del modelo, se puede reconocer dos categorías principales: paqueterías de flujo y de resolución de ecuaciones.

Las primeras se refieren al cálculo de los coeficientes de la ecuación en diferencias finitas de flujo subterráneo. Por su parte, el paquete de resolución de ecuaciones, implementa algoritmos para la solución de la ecuación en diferencias finitas. Fuera de estas paqueterías, el resto comprenden las componentes hidrológicas del modelo y pueden ser opcionales en la ejecución del mismo (figura 5.4).

Procedures	Flow Component Packages								Solver Packages	
	B A S	B C F	Stress Packages						S I P	S O R
			W E L	R C H	R I V	D R N	E V T	G H B		
Define (DF)	X									
Allocate (AL)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Read and Prepare (RP)	X <sub>u</sub>	X <sub>us</sub>							X	X
Stress (ST)	X									
Read and Prepare (RP)			X	X <sub>u</sub>	X	X	X <sub>u</sub>	X		
Advance (AD)	X									
Formulate (FM)	X	X <sub>s</sub>	X	X	X	X	X	X		
Approximate (AP)									X <sub>s</sub>	X <sub>s</sub>
Output Control (OC)	X									
Budget (BD)		X <sub>us</sub>	X <sub>u</sub>	X <sub>u</sub>	X <sub>u</sub>	X <sub>u</sub>	X <sub>u</sub>	X <sub>u</sub>		
Output (OT)	X <sub>u</sub>									

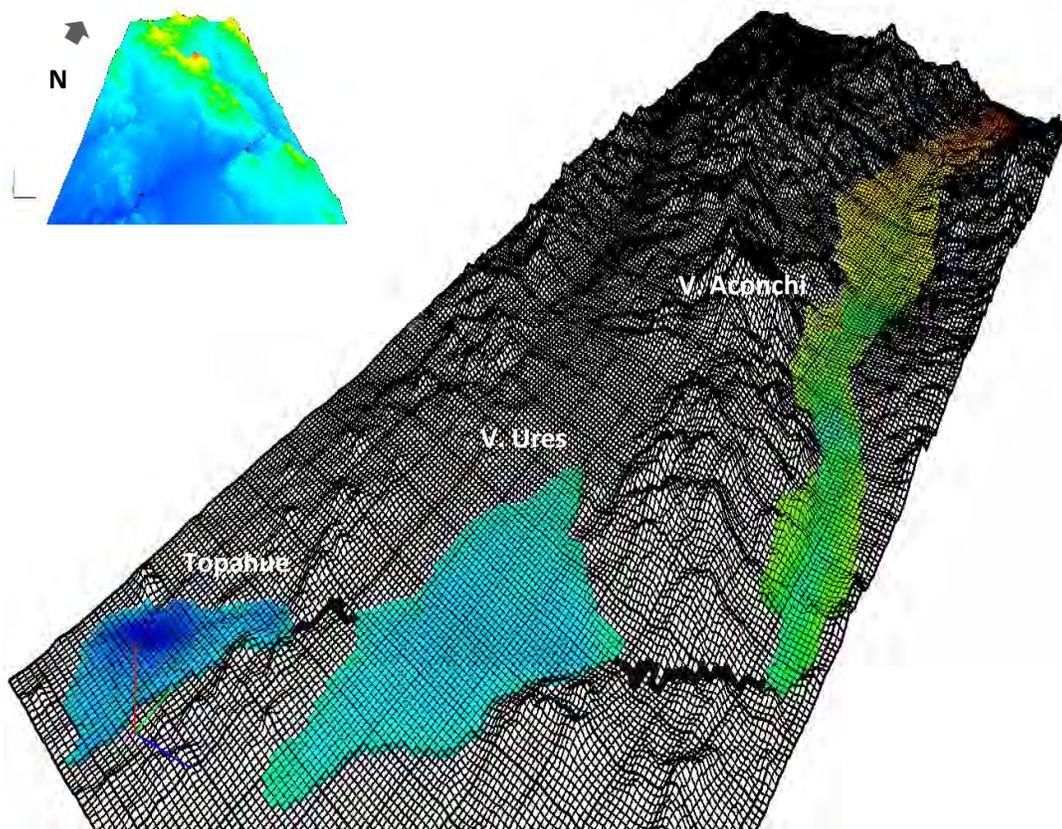
Figura 5.4 Módulos organizados por paqueterías y procedimientos

### 5.2.3. Construcción del modelo

#### 5.2.3.1. Discretización espacio – temporal

La geometría de los acuíferos de interés, es representada por una malla regular equidistante compuesta por 32,208 celdas cuyas dimensiones son definidas por una superficie de 500 x 500 metros. El dominio del modelo abarca 122 filas y 264 columnas, en las que se representa el funcionamiento de los tres acuíferos (Valle de Aconchi, Valle de Ures y Topahue). Del total de celdas que constituyen el modelo, 10,120 son celdas activas y el resto se comportan como celdas inactivas (figura 5.5).

Por otro lado, el trazo de la corriente principal del río Sonora se discretiza por un total de 468 tramos caracterizados por celdas en las que se define su cota al lecho inferior.



*Figura 5.5 Configuración espacial en de los acuíferos Valle de Aconchi, Valle de Ures y Topahue*

La orientación de la malla está referenciada en el sentido norte a sur y este a oeste. El primero se toma como paralelo al eje coordenado  $y$ , mientras que el segundo corresponderá al eje  $x$ .

Los pasos de tiempo simulados se hacen a intervalos de tiempo mensual, representado por un total de 420 incrementos (periodos de estrés), equivalentes a 35 años de simulación. Se establece una simulación del tipo transitoria que permitirá conocer la evolución de las cargas piezométricas en el tiempo.

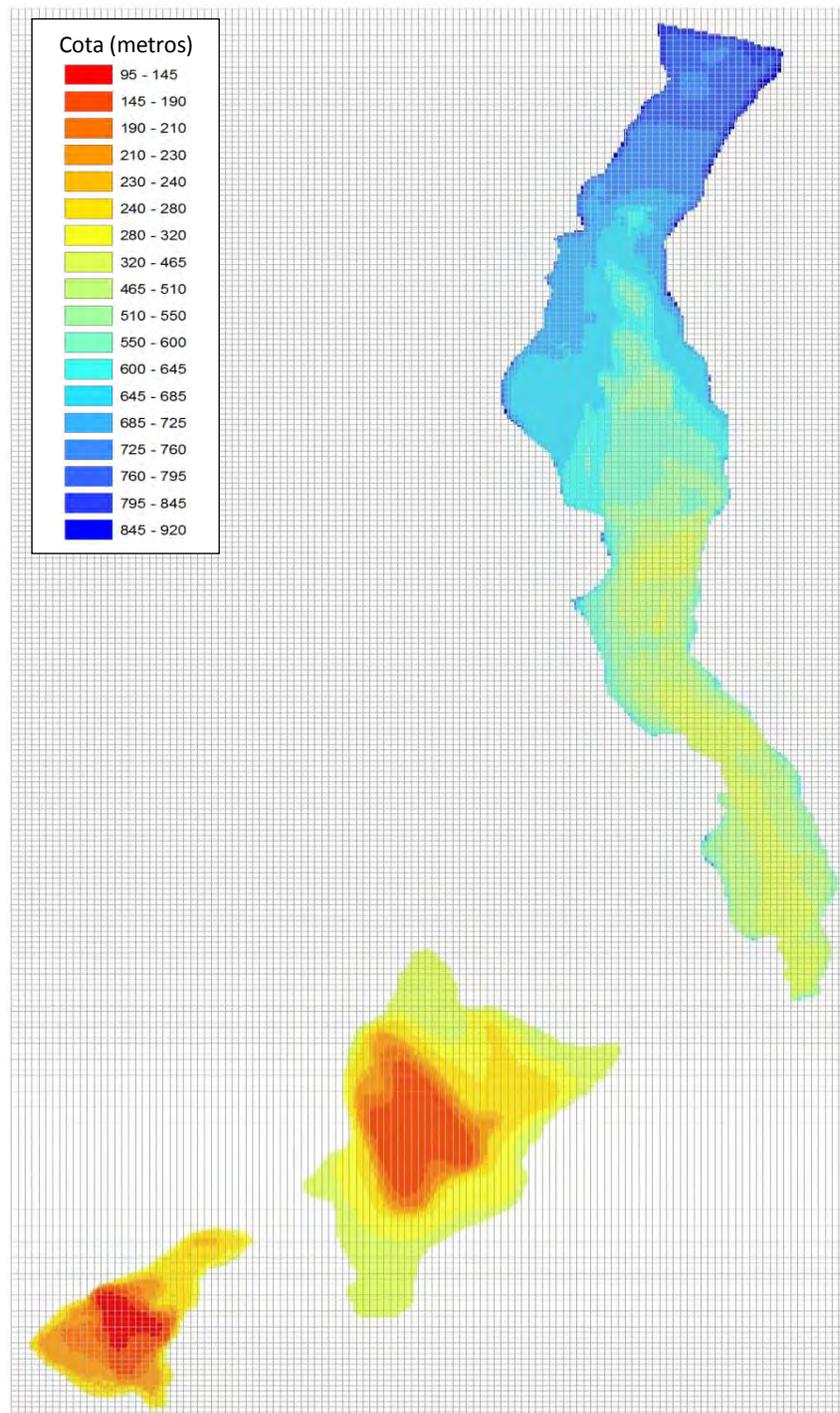
Cabe destacar que la discretización espacio – temporal en MODFLOW coincide con la realizada dentro del modelo WEAP, para efectos de vinculación efectiva entre ambos.

### 5.2.3.2. Capas del modelo

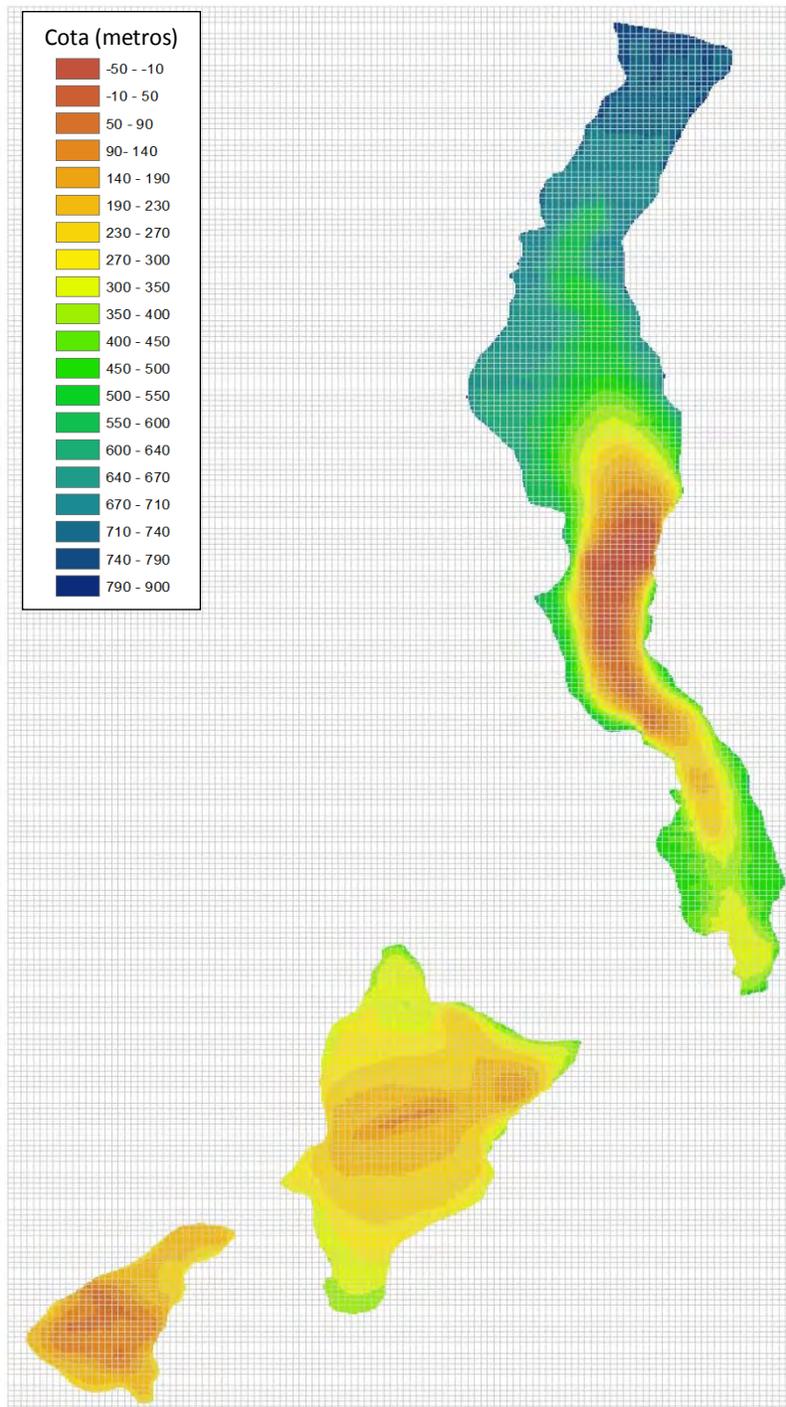
Las unidades acuíferas están constituidas por las capas caracterizadas en el anexo 1. En éstas se incluye una representación de la configuración del acuífero Valle de Aconchi constituida por dos estratos, que corresponden a las litologías de tipo aluvial y conglomerados. Por su parte, los acuíferos Valle de Ures y Topahue, son definidos principalmente por capas aluviales, y estratos de conglomerados y riolitas en menores espesores.

Dentro del modelo, las capas son representadas por una discretización vertical de celdas, en las que se da de alta información correspondiente a las cotas a nivel de terreno, y el lecho inferior de las capas aluviales y el basamento.

El estrato aluvial es representado mediante la configuración mostrada en la figura 5.6. Por su parte, la cota del basamento impermeable es mostrada en la figura 5.7.



*Figura 5.6 Configuración de la cota inferior del estrato aluvial en la estructura MODFLOW*



*Figura 5.7 Configuración de la cota del basamento en la estructura de MODFLOW*

Finalmente, la configuración de la topografía del terreno se obtiene a partir de Modelos de Elevación Digital del INEGI. La diferencia entre las cotas definidas en cada capa, permiten obtener los espesores de las celdas, las cuales son calculadas por el propio modelo. Algunos ejemplos de la discretización vertical realizada en MODFLOW, se presentan en las secciones contenidas en la figura 5.8.

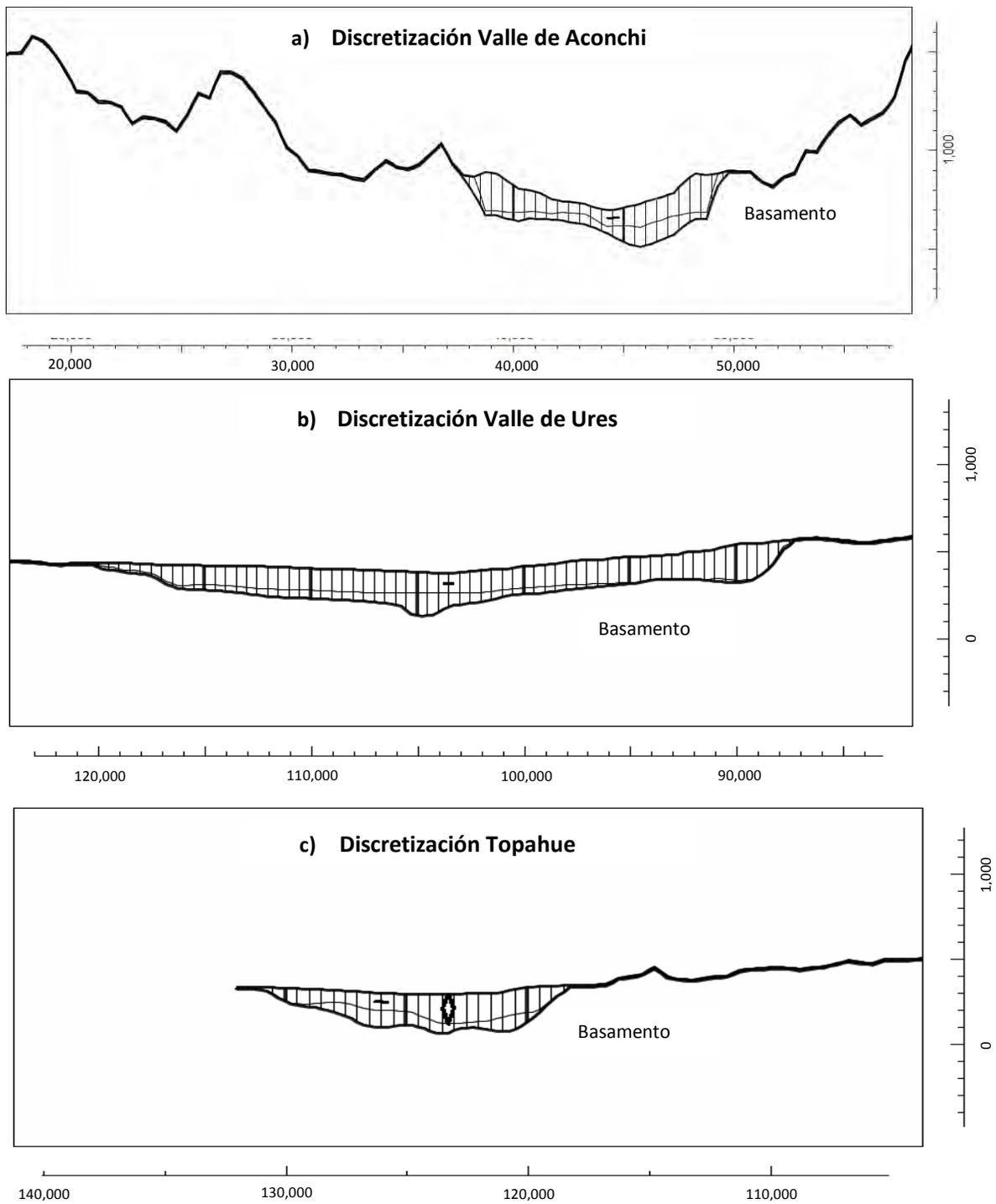


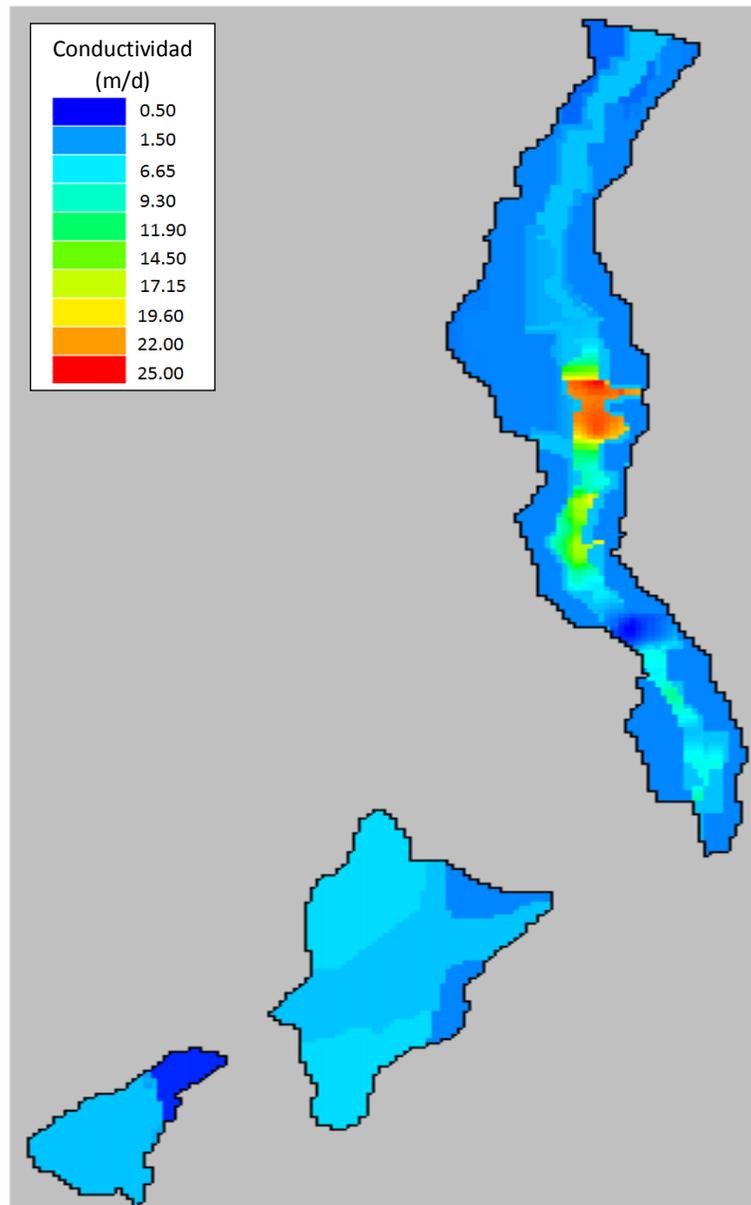
Figura 5.8 Discretización vertical de secciones en MODFLOW, a) Valle de Aconchi, b) Valle de Ures y c) Topahue

### 5.2.3.3. Parámetros hidrogeológicos

Los acuíferos se alojan en un medio poroso de tipo granular constituido por depósitos de origen aluvial (gravas y arenas), que son clasificados como acuíferos de libres. De esta manera, con base en las pruebas de bombeo presentadas en la tabla 5.1 y mediante la interpolación de la información

insitu recabada, se dan de alta los parámetros de conductividad hidráulica y coeficientes de almacenamiento en los estratos que constituyen el modelo.

Partiendo de la interpolación de los valores de conductividad hidráulica, se inició con una configuración de valores en el rango de 0.50 m/día a 25 m/día, en las celdas activas de los acuíferos (figura 5.9). Con respecto al rendimiento específico, se estableció un valor de 0.15 de acuerdo a lo presentado en el mismo apartado.



*Figura 5.9 Configuración y distribución espacial de conductividades hidráulicas en MODFLOW*

Cabe destacar que las pruebas de bombeo empleadas en la definición de los parámetros, fueron realizadas mayoritariamente en el estrato aluvial, por lo cual, para el resto de las estratigrafías se utilizaron valores sugeridos en literatura (Smith, L & S. J. Weathercraft, 1993).

De Acuerdo con Freeze y Cherry (1979) en medios porosos de naturaleza sedimentaria, su conductividad hidráulica vertical oscila entre uno y dos órdenes de magnitud menor que su conductividad hidráulica horizontal. Para la zona de estudio no existe información sobre la magnitud de la conductividad hidráulica vertical o de su relación con la conductividad hidráulica horizontal, de manera que se propone una relación de  $K_x/K_z = 10$ ; para la estimación de la conductividad hidráulica del lecho del río definida en la ecuación 4.9.

#### 5.2.3.4. Recarga y descarga del sistema

Las principales fuentes de recarga a los acuíferos, se realiza a través de los materiales de tipo aluvial que se localizan sobre las márgenes del río Sonora y en el lecho del mismo, además de los retornos provenientes del riego agrícola. Por otro lado, las descargas del sistema se efectúan principalmente por los aprovechamientos hidráulicos de pozos de bombeo.

De igual manera, el cauce del río recibe en algunas partes de su trazo aportaciones de las fuentes de agua subterránea, que se genera en zonas donde el cauce se estrecha o la profundidad del basamento impermeable disminuye.

#### 5.2.3.5. Condiciones iniciales

La configuración inicial de los niveles estáticos corresponde a la piezometría presentada en el año 1970, descrita en el anexo 2. La distribución de la misma, dentro del modelo se muestra en la figura 5.10.

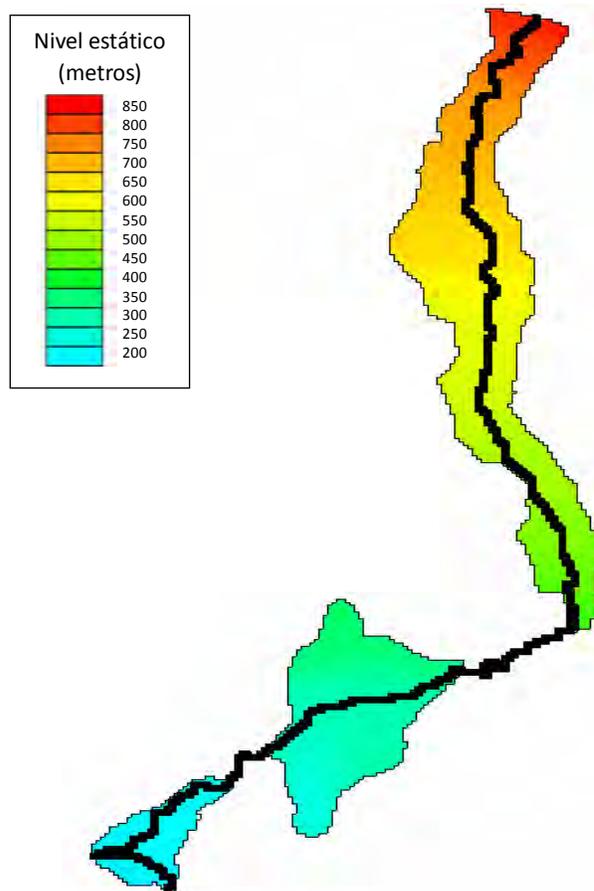


Figura 5.10 Definición de las condiciones iniciales MODFLOW, nivel piezométrico año 1970

### 5.2.3.6. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera consideradas en la construcción del modelo, se definen por las laderas y el basamento impermeables que forman los valles que rodean a los acuíferos. Éstas representan una frontera de no flujo equivalente a  $q_i(x, y, t) = 0$ , en la ecuación 3.22.

Se presenta una condición de frontera tipo Robbins (ecuación 3.23) en la interacción río – acuífero, a lo largo de la totalidad de su trazo.

## 5.3. MODELACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES

### 5.3.1. Componentes hidrológicas e hidrogeológicas en la modelación conjunta

Como se ha mencionado anteriormente, la configuración del modelo en su forma conjunta requiere de la integración de diversos elementos tales como cuencas, sitios de demanda, infraestructura hidráulica y almacenamientos subterráneos (figura 5.11). A cada una de estas componentes se asocian las siguientes características.

- *Cuencas*: Constituyen la superficie total de la cuenca y se describe por sus atributos de área, precipitación, evapotranspiración y coeficientes de escurrimiento.
- *Hidrografía*: Relaciona la red de drenaje de la cuenca mediante la representación del río Sonora, se define a su vez las componentes de hidrometría y fisiografía.
- *Sitios de demanda*: Representan las demandas del sistema que requieren ser abastecidas a través de las diferentes fuentes de agua que constituyen el modelo. Son caracterizadas por información de volúmenes de abastecimiento, consumos, pérdidas, prioridades en el suministro, entre otros.
- *Infraestructura hidráulica*: Concierne la infraestructura proporcionada por canales de derivación y pozos de bombeo.
- *Acuíferos*: Se refiere a cuerpos de agua subterránea que requieren de una caracterización detallada de sus principales parámetros hidrogeológicos. Estos últimos son establecidos dentro del modelo MODFLOW.

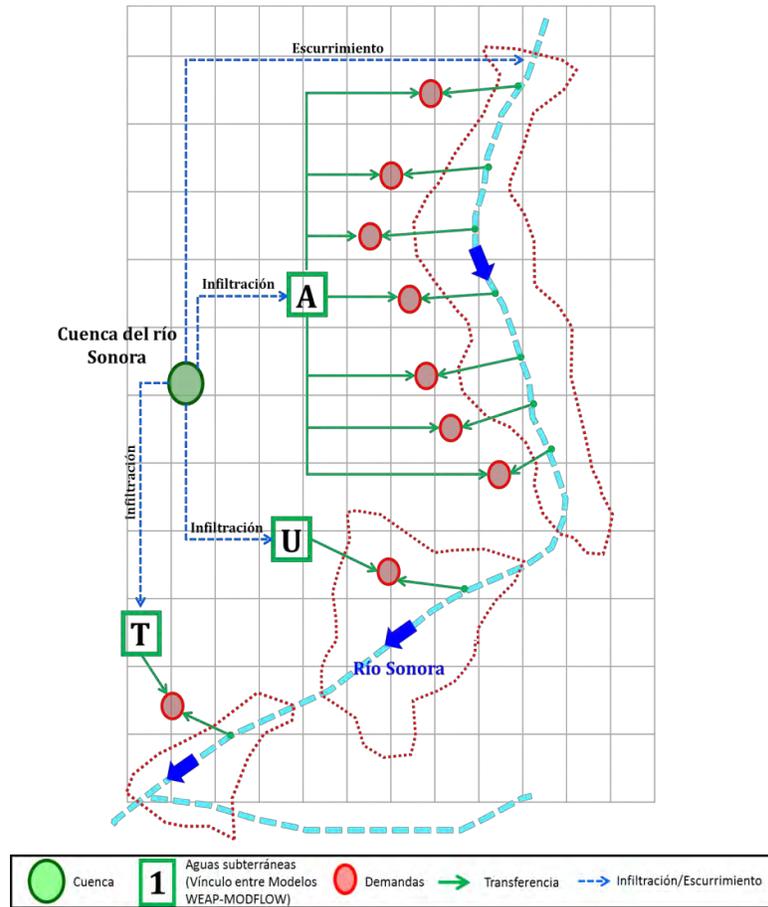
### 5.3.2. Modelo Conceptual de hidrología superficial

El análisis de las variables hidrológicas y climatológicas realizado en el presente trabajo, comprende la cuenca alta desde Cananea hasta la presa el Molinito.

Las estimaciones realizadas se centran en el cálculo de las precipitaciones medias acumuladas, pérdidas por evapotranspiración y la cuantificación de la precipitación efectiva. Además, se realiza un análisis exhaustivo de los registros hidrométricos contenidos en las estaciones que se localizan sobre la corriente del río Sonora. Finalmente se determinan las demandas de riego y abastecimiento de agua potable que históricamente han sido consumidas en la cuenca.

Las variables anteriormente descritas, alimentan la hidrología del modelo que se desarrolla en la plataforma WEAP-MODFLOW, las cuales a su vez permiten ejecutar el proceso de calibración de los parámetros globales en su simulación conjunta. El intervalo de tiempo analizado para todos los casos es mensual, dentro del periodo de 1970 a 2004, definido a partir de la disponibilidad de

información relacionada con las observaciones históricas de los niveles estáticos descritos en el anexo 2.



**Figura 5.11** Distribución de las componentes hidrológicas e hidrogeológicas de la zona a modelar

### 5.3.2.1. Precipitación media acumulada

El régimen de lluvias que se presenta en la cuenca, se relaciona con lluvias de verano en las que se genera la mayor parte de la precipitación anual. Este tipo de lluvias son características de la combinación de lluvias orográficas y convectivas debidas a la posición fisiográfica de la cuenca, haciéndose presente en los meses de julio a septiembre. Por su parte, en invierno tiene lugar eventos relacionados con masas de aire polar que chocan de frente con las masas de aire semitropical; estos toman relevancia en los meses de diciembre y enero.

La precipitación media acumulada se estima en intervalos de tiempo mensual y a partir de la región de influencia de las estaciones seleccionadas, definidas con el método de los polígonos de Thiessen. La serie de precipitación para el periodo que comprende las simulaciones realizadas, se presenta en la tabla 1 del anexo 3.

### 5.3.2.2. Precipitación efectiva y coeficiente de escurrimiento

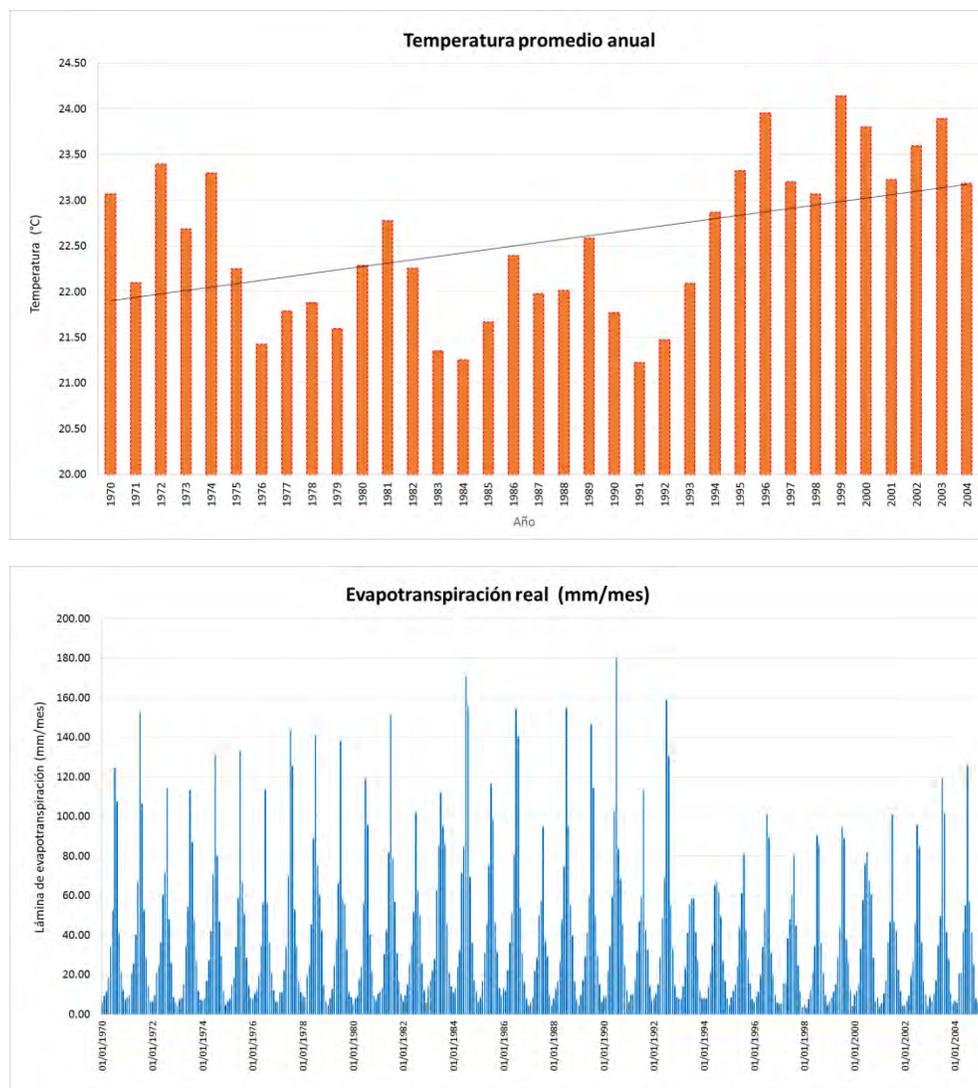
Se obtiene una estimación de la lámina de precipitación efectiva a partir de los registros de escurrimiento contenidos en la estación hidrométrica el Orégano y de la superficie de la cuenca, considerando en esta última las observaciones descritas en el anexo 3.

Las metodologías empleadas para la estimación de los coeficientes de escurrimiento, lámina de infiltración y lámina de escurrimiento base, a partir de ajustes efectuados entre la lámina de precipitación total y la lámina de precipitación efectiva, se presentan en el anexo 4. Las ecuaciones representativas de cada temporal establecido, son representadas por:

Verano	$Pe = [(P - 72.915) * 0.09] + 0.7056$
Invierno	$Pe = [(P - 51.973) * 0.15] + 0.3529$
Estiaje	$Pe = [(P - 29.040) * 0.01] + 0.1144$

### 5.3.2.3. Pérdidas por evapotranspiración

La estimación de la evapotranspiración contempla la utilización del método de Thornwaite y Coutagne que hacen una evaluación empírica a partir de la precipitación media acumulada y de la temperatura media de la cuenca. Los registros de temperatura se procesaron a partir de la información contenida en las estaciones climatológicas utilizadas en los registros de precipitación.

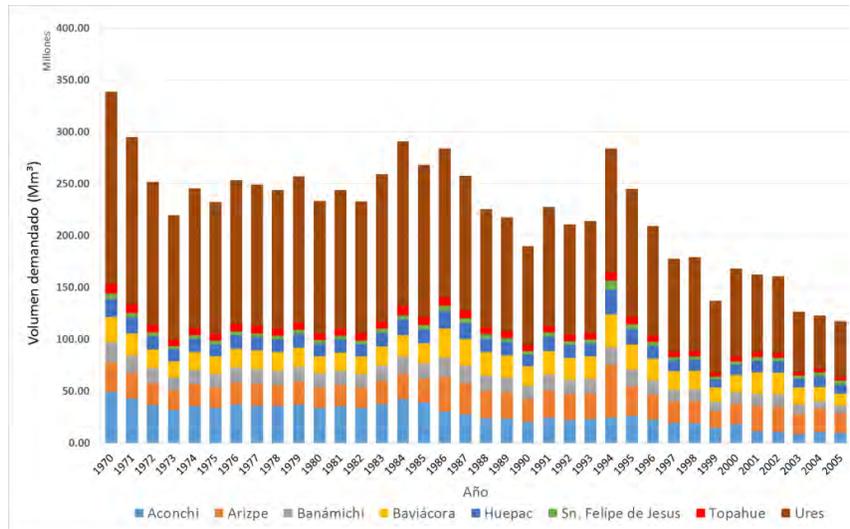


**Figura 5.12** Temperatura promedio anual 1970 a 2004; y pérdidas por evapotranspiración mensual, para el mismo periodo

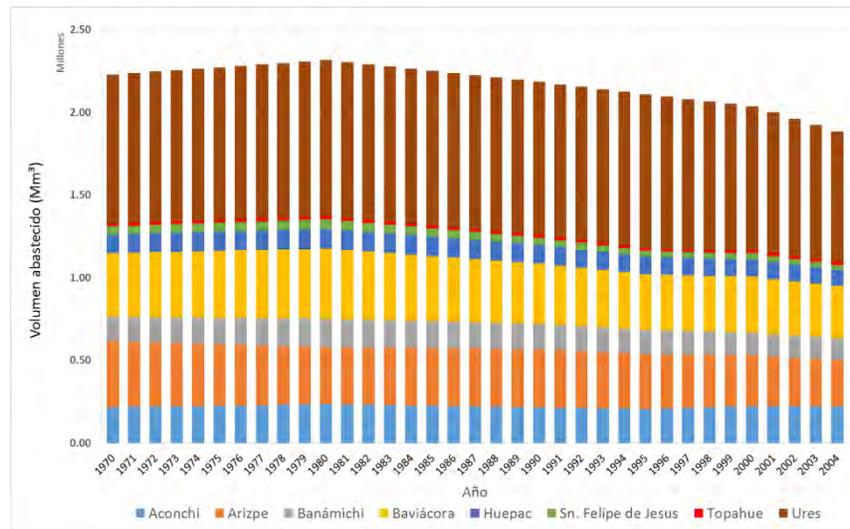
### 5.3.2.4. Demandas y usos de Agua

La principal demanda de agua en la región corresponde a la relacionada con el uso agrícola que representa una de las actividades económicas preponderantes, seguida del uso para abastecimiento de agua potable.

Debido a que no se cuenta con una cuantificación que precise los volúmenes de extracción y derivación, de los aprovechamientos superficiales y subterráneos, se procedió a realizar una estimación de las demandas de agua que prevalecen dentro de la zona de estudio, tal como se indica en el apéndice 5. Los volúmenes estimados se presentan en las figuras 5.13 y 5.14.



**Figura 5.13 Demandas de uso agrícola por localidad año 1970 a 2004**

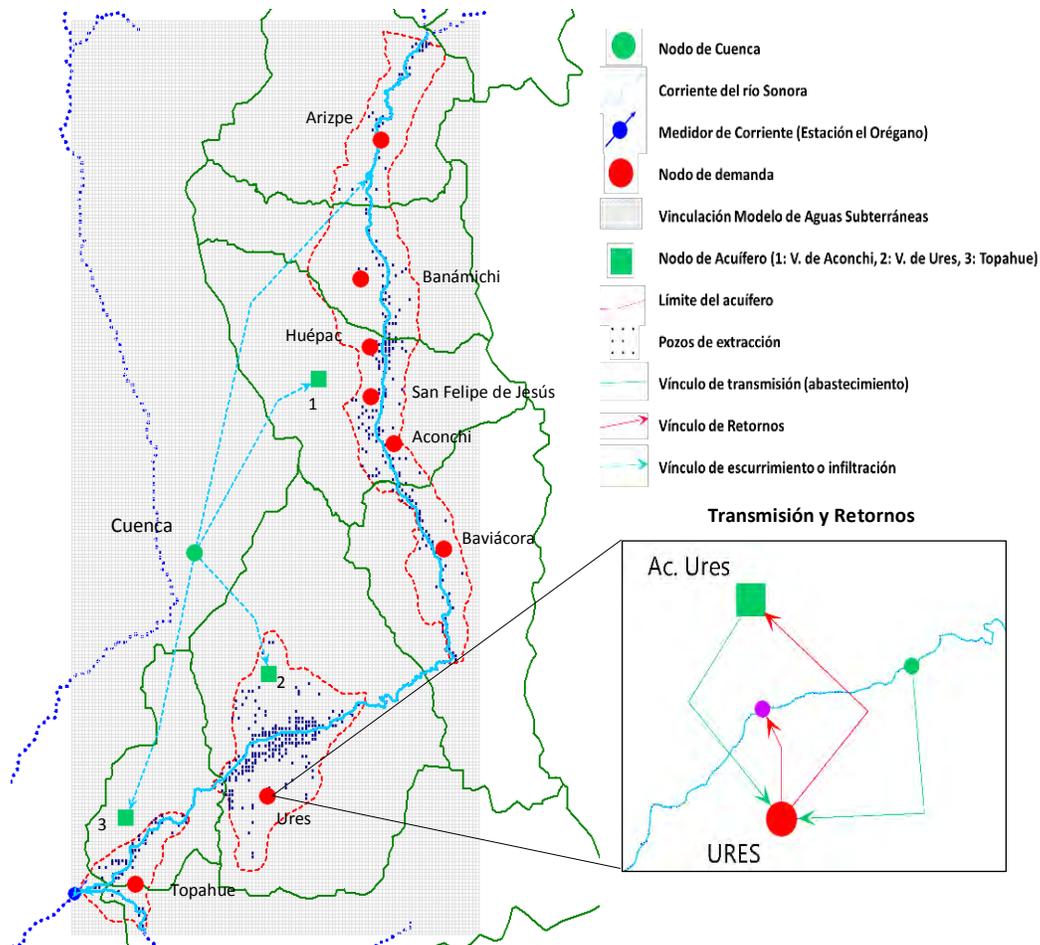


**Figura 5.14 Volúmenes de abastecimiento de agua potable en el periodo 1970 a 2004**

### 5.3.3. Distribución de las componentes hidráulicas en WEAP

Los datos requeridos para la construcción del modelo WEAP corresponden a las componentes hidrológicas de la cuenca. Ésta es representada mediante un nodo al que se le asignan las características hidrográficas de superficie y climatología; en esta última se incluye lo relacionado a la precipitación mensual acumulada y la evapotranspiración.

De igual manera se ingresan las ecuaciones de ajuste mostradas en 5.3.2.2. Con estas igualdades el modelo realiza una distribución de la lluvia que escurre con relación a la precipitación neta, que es la diferencia entre la precipitación total en la cuenca menos la evapotranspiración.



**Figura 5.15** Distribución de las componentes hidrológicas en el modelo WEAP

La hidrografía queda representada por el trazo del río Sonora al que se le asigna una sección media a lo largo de su trazo y un medidor de corriente que equivale a la estación hidrométrica el Orégano, que se localiza a la salida de la cuenca.

Las fuentes subterráneas se representan por tres nodos que corresponden a cada acuífero simulado: Valle de Aconchi, Valle de Ures y Topahue; dentro de éstos se constituye la discretización espacial de la malla contenida en el modelo MODFLOW. Los nodos se ligan entre sí, mediante vínculos de transmisión que distribuyen la precipitación en escurrimiento e infiltración.

Por su parte, las demandas son representadas por las localidades que se alojan dentro del área de estudio las cuales son definidas por los sitios: Arizpe, Banámichi, Huépac, San Felipe de Jesús, Aconchi, Baviácora, Ures y Topahue; que se establecen mediante vínculos de transmisión los cuales abastecen el requerimiento desde las fuentes de agua disponibles (río y acuífero). En cada sitio de demanda se genera un retorno que se integra hacia los flujos de agua subterránea o hacia el escurrimiento superficial.

### 5.3.4. Vinculación WEAP - MODFLOW

#### 5.3.4.1. Discretización espacial y temporal

La vinculación de ambos modelos requiere de la configuración espacial de una malla en formato shape que coincide con la discretización realizada en el modelo de agua subterránea MODFLOW, como se muestra en la figura 5.16. La forma en que se establece la vinculación de estos modelos corresponde a lo descrito en el apartado 4.2.1.

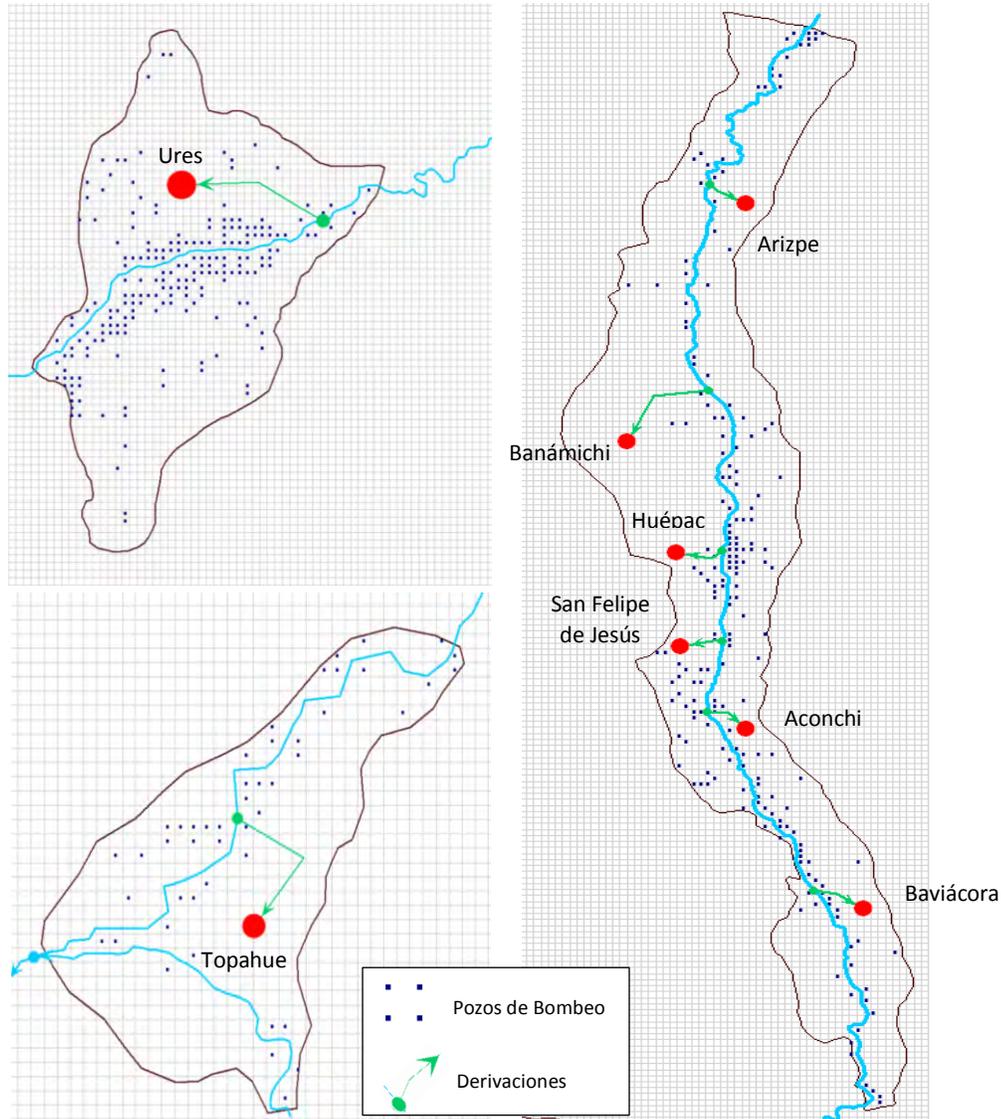


**Figura 5.16** Discretización espacial en el modelo WEAP

El tipo de información que contiene cada celda se relaciona con el área, perímetro, sitios de demanda, acuíferos, ríos y pozos de bombeo, así como el estatus de la celda (activa o inactiva). De manera análoga, la discretización temporal corresponde a intervalos de tiempo mensual.

### 5.3.4.2. Distribución de la infraestructura para abastecimiento

La infraestructura que abastece a los sitios de demanda, se define por canales que derivan aguas provenientes de los escurrimientos superficiales del río Sonora y por pozos de bombeo situados principalmente en las márgenes del río.



*Figura 5.17 Distribución de las fuentes de abastecimiento superficial y subterráneo*

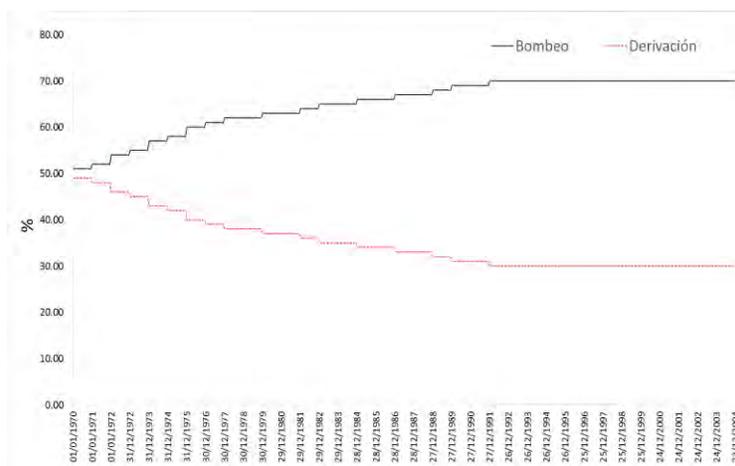
En cuanto a los bombeos, tomando en cuenta la distribución de los pozos censados en el año 2004 y con base en la información del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) para el mismo año, se representa un total de 449 aprovechamientos dentro del modelo. De estos 199 se localizan en el acuífero Valle de Aconchi, 213 en Valle de Ures y 37 se sitúan en Topahue (figura 5.17).

### 5.3.4.3. Demandas y derivaciones

Puesto que no existe disponibilidad de información histórica que relacione la distribución del volumen dotado a través de la infraestructura presentada en el apartado anterior, se realiza una estimación de su repartición con base en las siguientes consideraciones.

- Los estudios consultados correspondientes al año 1970, elaborados por la empresa Ariel Construcciones S.A., reportan un abastecimiento realizado por derivación en canales equivalente al 49% del volumen total demandado, mientras que el 51% restante es complementado por las extracciones realizadas a través de pozos de bombeo.
- Por otro lado, en lo referente al año 1977, estudios de la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A., reportan un incremento en las extracciones subterráneas respecto al censo del año 1970, alcanzando un volumen total abastecido de 151.49 Mm<sup>3</sup>. Lo anterior equivale a un 61% del agua demandada en ese mismo año.
- Registros del REPDA contienen información del volumen total concesionado en el periodo de 1994 a 2011, los cuales revelan que asciende a los 135.5 Mm<sup>3</sup>. La cifra previa corresponde a un porcentaje de abastecimiento del 70% por medio de fuentes de agua subterráneas, asignándose el resto a volúmenes superficiales.

Considerando lo anteriormente descrito, se realiza una ponderación de la distribución de los volúmenes dotados por fuentes superficiales y subterráneas, tomando en cuenta los periodos 1970 a 1976 y 1977 a 1993; a partir de 1994 se considera la distribución reportada por REPDA. Las demandas del sistema corresponden a las presentadas en el apartado 5.3.2.4.



*Figura 5.18 Derivaciones del volumen total suministrado*

#### 5.3.4.4. Flujos de retorno

Cada sitio de demanda genera retornos al sistema que serán establecidos en la misma proporción a las derivaciones que se describen en el apartado anterior. Estos retornos se ligan mediante vínculos que parten de los sitios de demanda hacia las distintas fuentes de abastecimiento.

#### 5.3.4.5. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales en la modelación conjunta quedan definidas por la piezometría presentada en el año 1970 contenida dentro del modelo de agua subterránea y por las demandas del sistema que se despliegan como un dato conocido para cada periodo de estrés y que son definidas dentro del modelo WEAP.

## 5.4. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN INTEGRADA DE MODELOS

El proceso de calibración consiste en realizar ajustes en los parámetros de hidrología e hidrogeología estimados inicialmente. Esto adquiere la finalidad de aproximar los valores calculados en la simulación del modelo con los valores de escurrimiento y cargas piezométricas observados históricamente.

La calibración del modelo en su forma conjunta presenta un carácter complejo debido principalmente al requerimiento de un acoplamiento de dos modelos que trabajan con parámetros propios e independientes entre sí. La interacción de ambos, provoca que la modificación de algún parámetro altere las condiciones de simulación del otro y viceversa.

La ecuación que representa el balance integral de la modelación conjunta, queda definida a partir de la expresión 4.1 mostrada en el apartado 4.1.1.1. Se considera como válida la calibración, cuando se cumplen los criterios estadísticos descritos con anterioridad.

### 5.4.1. Calibración de escurrimientos observados

En la primera fase de ejecución de simulaciones realizada con los parámetros inicialmente establecidos, se identifica una subestimación en los volúmenes de escurrimiento calculados, lo cual es manifestado principalmente en algunos picos del hidrograma. Por otro lado, existen periodos de menor escurrimiento observado donde se genera una sobrestimación de dichos volúmenes dentro de la simulación (figura 5.19).

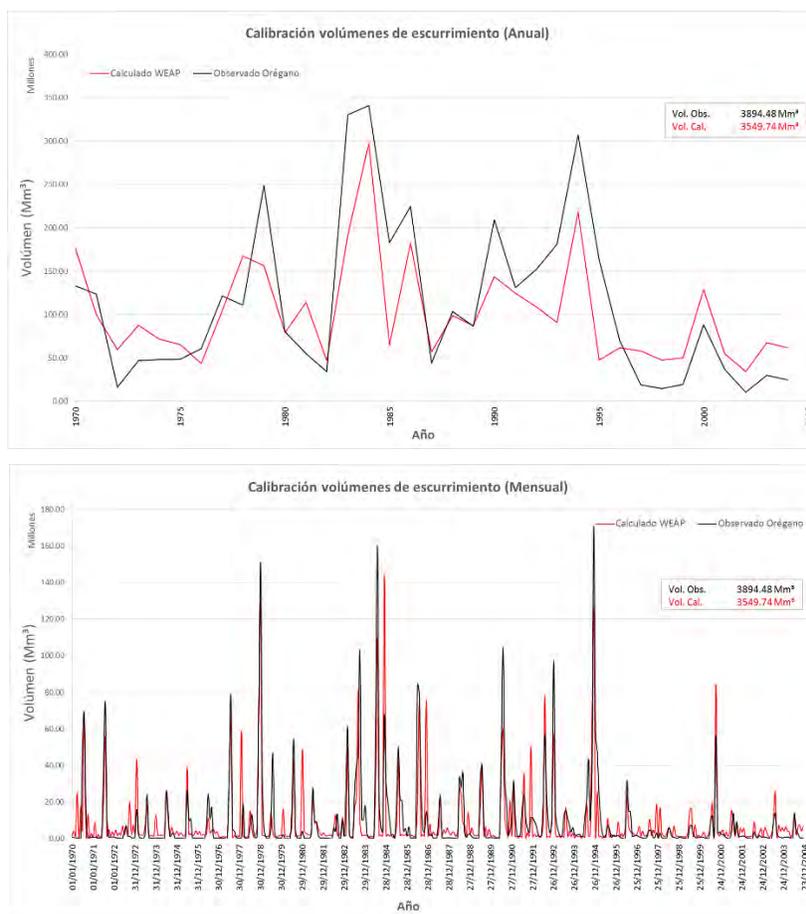
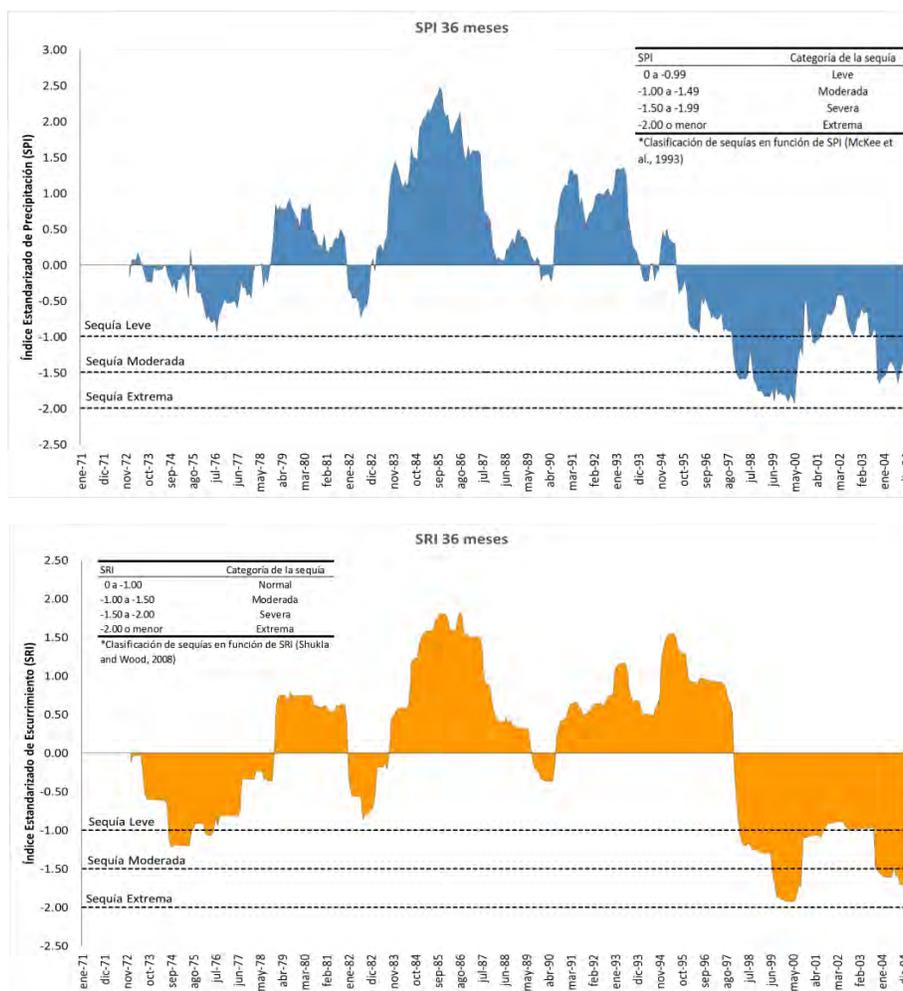


Figura 5.19 Primera corrida de la simulación conjunta en los modelos WEAP-MODFLOW.

Lo anterior conlleva a modificar los parámetros que constituyen la ecuación general de balance, con la finalidad de incrementar el volumen calculado en los picos del hidrograma. Se parte entonces de una modificación al término relacionado con el escurrimiento, que es definido por las funciones de precipitación efectiva descritas en el anexo 4. En éstas, se busca alcanzar un reajuste que permita incrementar el parámetro relacionado al coeficiente de escurrimiento.

Para tal efecto, se identifican primeramente tres periodos hidrológicos dentro de la cuenca: un periodo húmedo en el que se concentran eventos importantes de precipitación y dos periodos secos relacionados a sequías de distinta magnitud. Lo anterior, es corroborado mediante un análisis de sequías elaborado a partir de la información de precipitación y escurrimiento, y para lo cual se utilizan las metodologías relativas al Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) y el Índice Estandarizado de Escurrimiento (SRI, por sus siglas en inglés), figura 5.20.



**Figura 5.20 SPI y SRI, 36 meses.**

Por otro lado, para cada periodo establecido, se generan funciones de ajuste que contienen nuevos valores en los parámetros que representan a los coeficientes  $C_e$ ,  $a$  y  $E_b$ . Los primeros periodos correspondientes a 1970 - 1982 y 1983 - 2004, permiten precisar para los temporales de verano, una mejoría al coeficiente de escurrimiento que pasa de 0.09 a 0.11. Así mismo, se presenta el incremento de este factor para los temporales de invierno definido por el cambio de 0.15 a 0.22. Cabe destacar, que lo expuesto anteriormente coincide con los periodos de la simulación donde se presenta la subestimación del hidrograma calculado.

Así mismo, en el caso de 1995 a 2004 donde se genera el periodo hidrológico de mayor sequía, existe un decremento en el coeficiente de escurrimiento para el temporal de invierno pasando a ser prácticamente cero. En lo relativo al temporal de verano, se mantiene un valor similar al de los periodos anteriores (0.11) pero con un coeficiente  $a$  que se incrementa debido a una saturación del suelo mucho menor (ecuaciones 5.1 a 5.9).

Reajuste periodo 1970 a 1982.

$$\text{Verano} \quad Pe = [(P - 62.928) * 0.108] + 0.3530 \quad (5.1)$$

$$\text{Invierno} \quad Pe = [(P - 77.868) * 0.223] + 0.3059 \quad (5.2)$$

$$\text{Estiaje} \quad Pe = [(P - 32.920) * 0.016] + 0.1144 \quad (5.3)$$

Reajuste periodo 1983 a 1995.

$$\text{Verano} \quad Pe = [(P - 69.869) * 0.106] + 1.1762 \quad (5.4)$$

$$\text{Invierno} \quad Pe = [(P - 49.912) * 0.217] + 0.6374 \quad (5.5)$$

$$\text{Estiaje} \quad Pe = [(P - 25.160) * 0.026] + 0.1134 \quad (5.6)$$

Reajuste periodo 1996 a 2004.

$$\text{Verano} \quad Pe = [(P - 98.855) * 0.112] + 0.2886 \quad (5.7)$$

$$\text{Invierno} \quad Pe = [(P) * 0.002] + 0.0488 \quad (5.8)$$

$$\text{Estiaje} \quad Pe = [(P) * 0.006] + 0.0001 \quad (5.9)$$

Con lo expuesto anteriormente, se infiere que existía un sesgo inicial en los valores que conformaban los parámetros de la función de ajuste original, puesto que para el periodo húmedo se presentaba un mayor grado de saturación del suelo, lo que implicaba la generación de un escurrimiento mayor y como consecuencia un  $Ce$  también superior. Caso contrario lo que se presenta en el periodo de mayor sequía, en el que inicialmente se tenía un  $Ce$  mayor lo que generaba sobrestimación en los volúmenes calculados. Para este último también se incrementa la lámina de saturación del suelo en la función que corresponde al temporal de verano.

Tomando en cuenta las modificaciones al parámetro  $Ce$  descritas con anterioridad, se sigue presentando en las corridas subsecuentes, volúmenes inferiores al hidrograma observado. Bajo un segundo criterio de calibración se procede a ampliar las aportaciones de los acuíferos al escurrimiento superficial, incrementando el parámetro de conductancia hidráulica del río, cuyo valor inicial fue estimado a partir de lo descrito en el apartado 5.2.3.3.

En esto último se precisa, que se dio seguimiento a la evolución de los niveles almacenados subterráneamente, puesto que se buscó al mismo tiempo la calibración de las cargas piezométricas simuladas dentro del modelo de agua subterránea y cuyos resultados se presentan en el apartado siguiente. El ajuste final a los escurrimientos, se muestra en la figura 5.21.

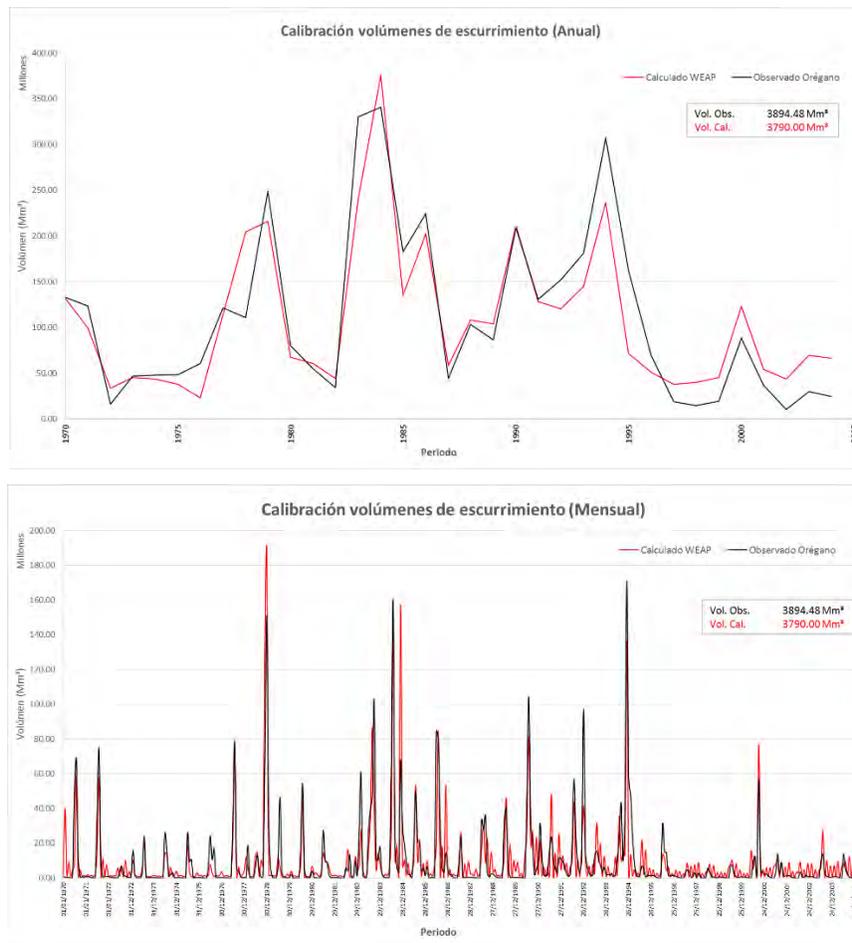


Figura 5.21 Calibración del hidrograma mensual y anual, segundo criterio

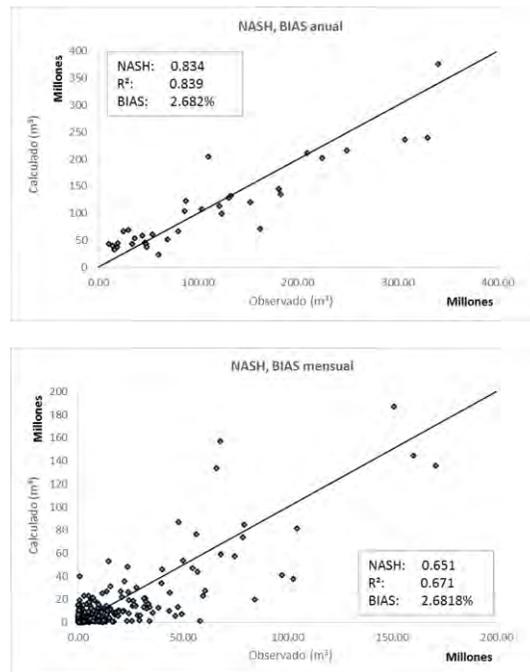


Figura 5.22 Validación mediante criterio NASH y PBIAS

Asumiendo los valores sugeridos en la literatura para la validación de modelos de escurrimiento presentados en la tabla 4.2 del apartado 4.3, se considera la calibración como satisfactoria a escala mensual y buena para la simulación anual; esto a partir de valores obtenidos del índice de NASH de 0.651 y 0.834 respectivamente. También se obtuvo un PBIAS de 2.682%, lo cual indica una ligera subestimación en los volúmenes calculados.

La validación con los criterios estadísticos antes descritos, permite obtener las gráficas mostradas en la figura 5.22.

#### 5.4.2. Calibración de cargas estáticas

Una vez que se considera satisfactoria la aproximación de los volúmenes de escurrimiento, se procede a la calibración de las cargas piezométricas observadas para el año 2004. Esta fase consiste en reasignar los valores iniciales de conductividad hidráulica, de tal manera que se reduzca el error entre las cargas observadas y las cargas simuladas.

Se seleccionaron un total de 44 pozos de observación distribuidos a lo largo de los tres acuíferos, a partir de la información recopilada en el censo de aprovechamientos del año 2004.

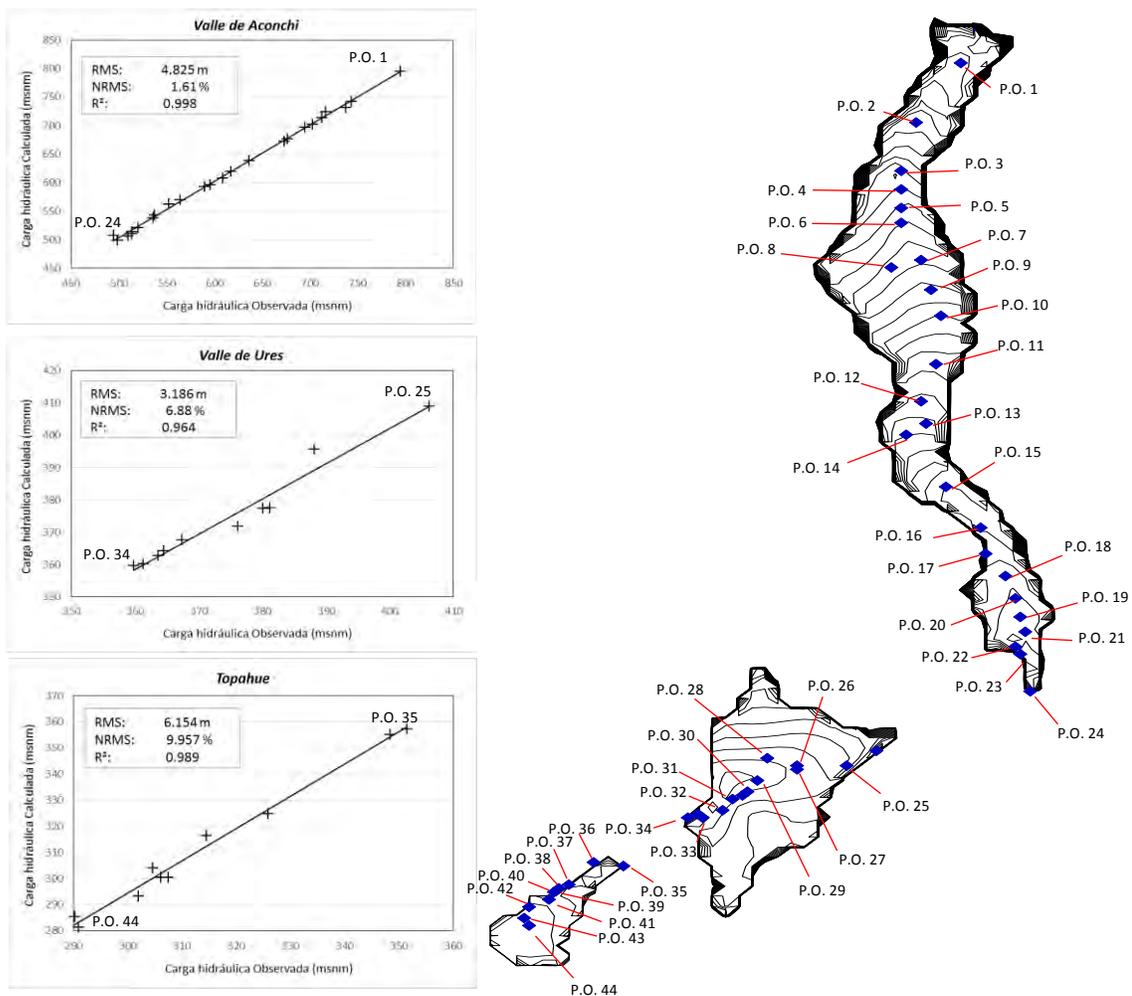
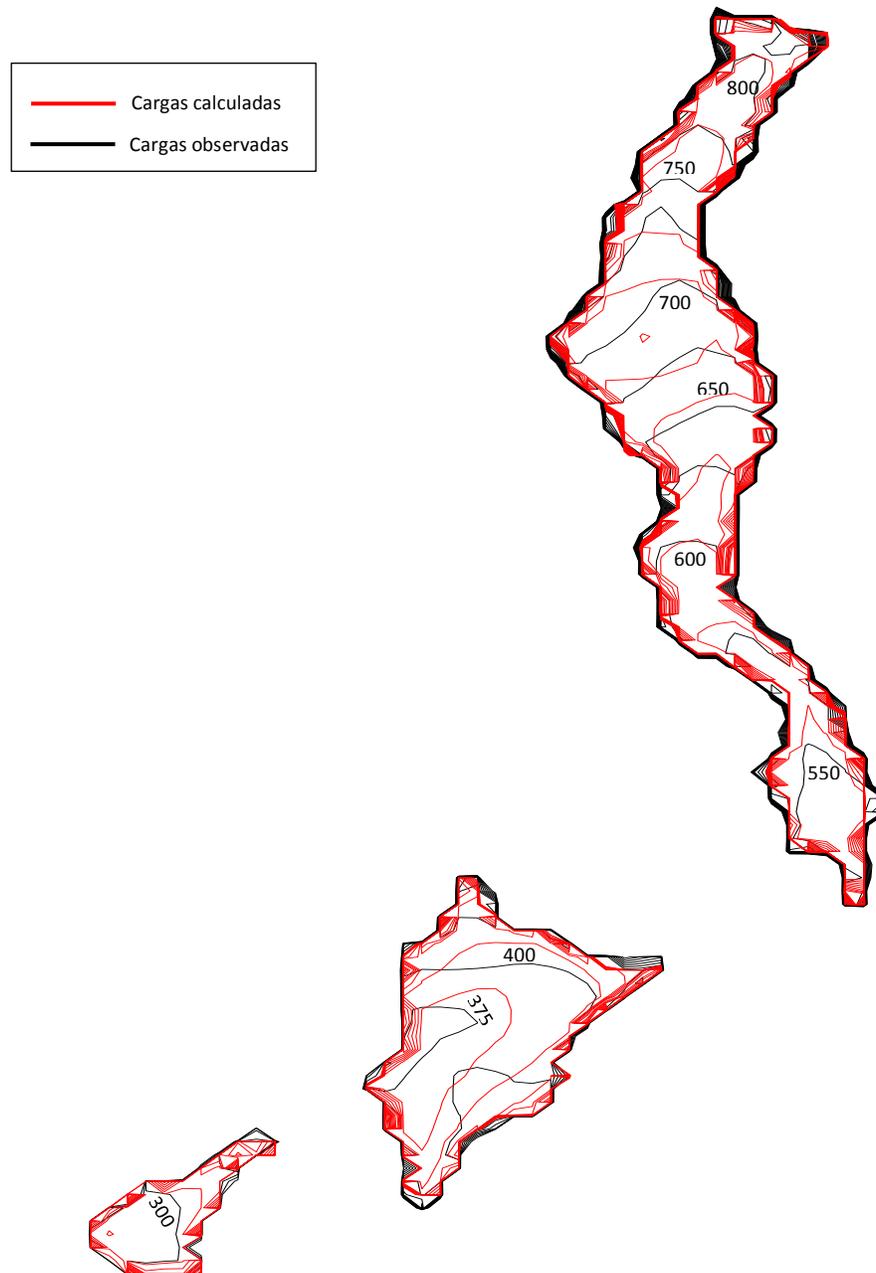


Figura 5.23 Validación de las cargas piezométricas calculadas.

La calibración de estas conductividades, también tuvo repercusiones en los volúmenes de escurrimiento presentados en la figura 5.21, como consecuencia del acoplamiento simultáneo de ambos modelos.

En lo que concierne a la validación de las cargas estáticas, un error menor al 10% del NRMS considera como aceptable la calibración realizada, bajo el criterio expuesto por King et al., 2003 & Barnett y Muller, 2008. En este contexto se observa que los acuíferos Valle de Aconchi y Valle de Ures, presentan valores NRMS de 1.61% y 6.88% respectivamente, mientras que el acuífero de Topahue tiene un valor de 9.96% (figura 5.18). El grado de correspondencia entre los niveles piezométricos calculados y observados en 2004 se muestran en la figura 5.24.



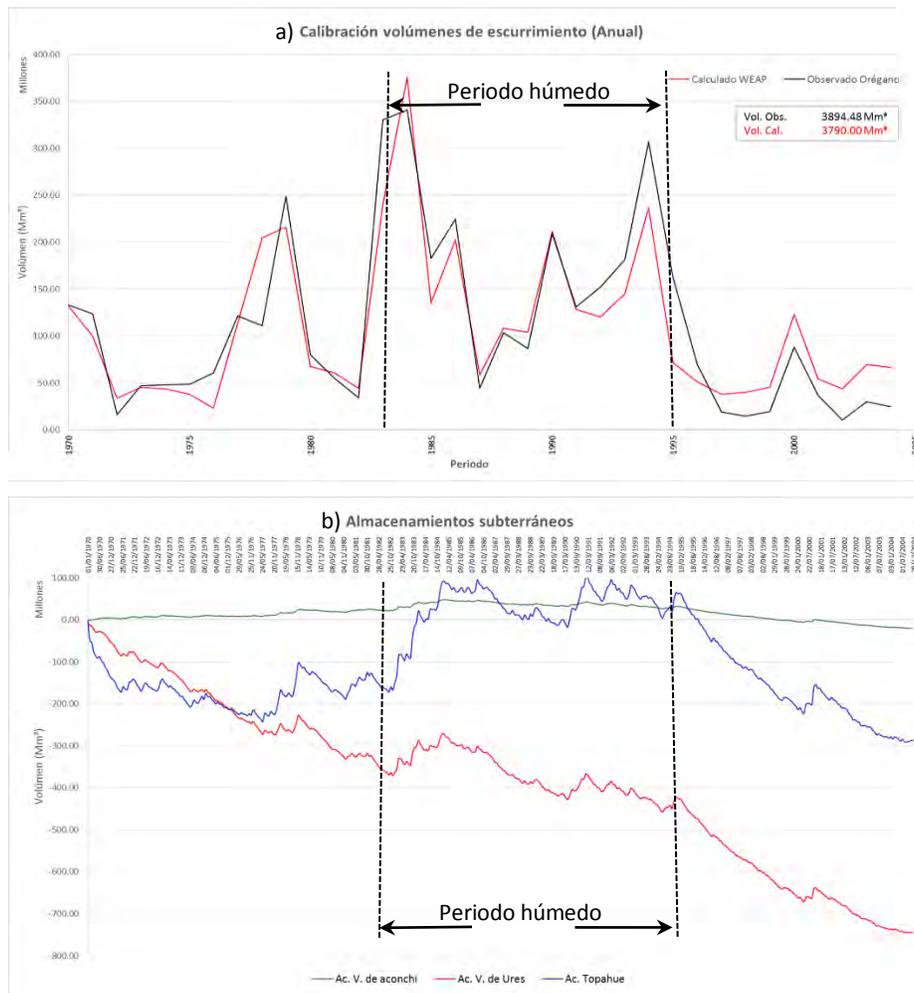
*Figura 5.24 Correspondencia entre cargas estáticas calculadas y observadas en 2004*

### 5.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados derivados de la calibración del modelo, permiten hacer algunas precisiones respecto a la evolución del comportamiento histórico de los aprovechamientos hidráulicos en el periodo comprendido entre 1970 y 2004.

En un primer análisis, se identifican dos ciclos de lluvia escasa: 1970 a 1982 y 1996 a 2004. En éstos se presentan las mayores afectaciones en la región, puesto que existe un descenso considerable en los escurrimientos del río y en consecuencia, las tasas de infiltración disminuyen hacia los almacenamientos subterráneos. Lo anterior se corrobora por el hidrograma presentado en la figura 5.25a, donde se exhibe un escurrimiento promedio de 75.16 Mm<sup>3</sup>, el cual resulta muy inferior respecto al volumen medio observado en el periodo húmedo (1983 a 1995) que asciende a los 164.35 Mm<sup>3</sup>.

Así mismo, se denota que existe una respuesta importante a la recarga de los acuíferos en los años húmedos producto de las altas permeabilidades del suelo, donde se registran eventos asociados a lluvias abundantes en la cuenca (figura 5.25b). Esto último coincide con las observaciones de mayor escurrimiento registrado en la estación hidrométrica el Orégano que de igual forma se presenta en la figura 5.25a.

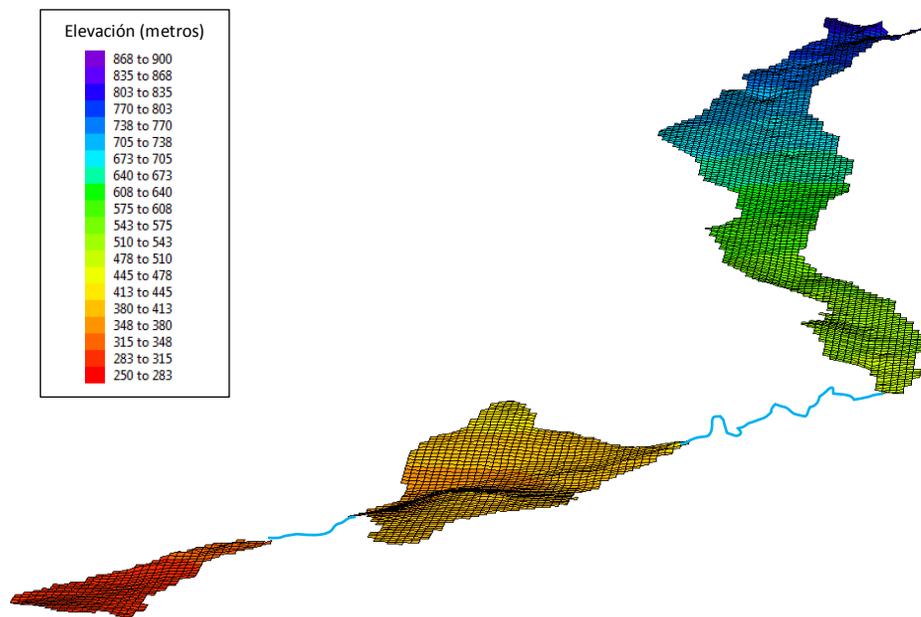


**Figura 5.25** Evolución de los volúmenes de escurrimiento en el río Sonora y volúmenes de almacenamiento subterráneo.

En relación con la figura 5.25b, para el acuífero valle de Aconchi, persiste una recuperación que iguala o excede en algunos años, los volúmenes presentados en las condiciones iniciales del año 1970. Lo opuesto sucede en el acuífero Valle de Ures, que manifiesta una sobreexplotación reflejada en la disminución considerable de su almacenamiento, y en el que existe una ligera tendencia a recuperarse en el periodo de mayor lluvia (1983 a 1995). Cabe destacar que en este último almacenamiento es donde ha persistido la mayor actividad agrícola dentro de la zona de estudio, además que corresponde al sitio donde se presentan los menores escurrimientos de la cuenca.

Finalmente, el acuífero de Topahue indica un comportamiento relativamente estable en virtud de que no se aprecian variaciones drásticas de sus niveles almacenados.

Los efectos anteriormente descritos, pueden ser evaluados dentro del modelo a partir de los análisis realizados respecto a la evolución de cargas piezométricas, las cuales son simuladas a lo largo de todo el periodo de calibración (figura 5.26).

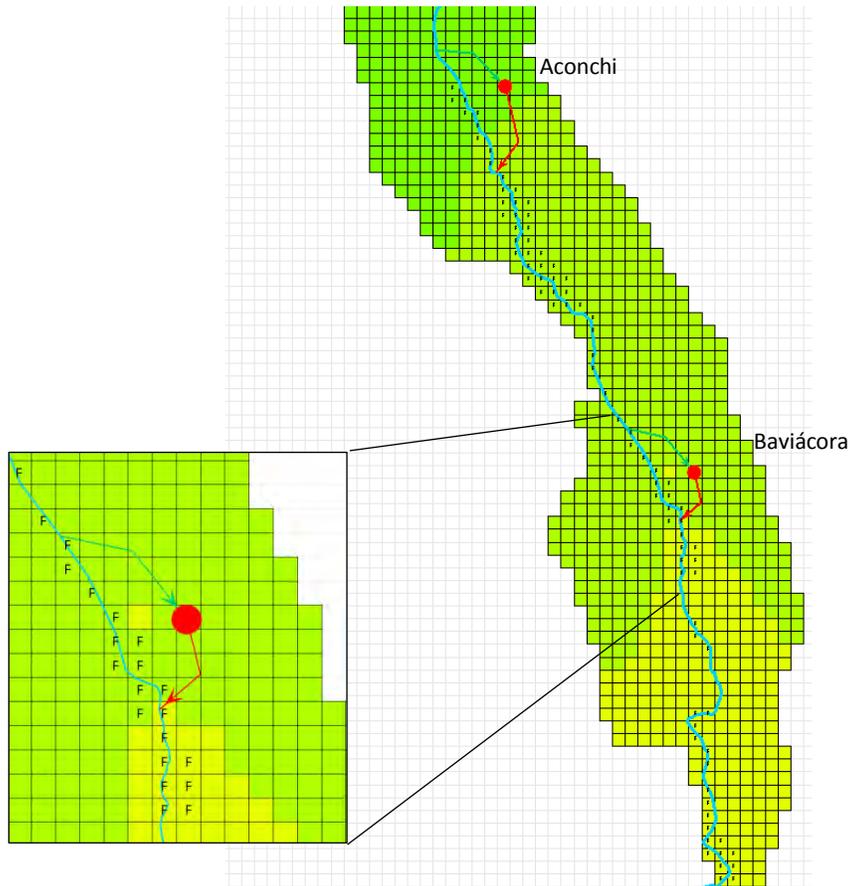


**Figura 5.26** Condiciones finales para el año 2004, cargas piezométricas calculadas WEAP-MODFLOW

Un rasgo importante que caracteriza los suelos de la región, es el relacionado con las principales zonas de recarga. Se identifica que la recarga a las fuentes de agua subterránea proviene principalmente de aportaciones del río Sonora. Lo anterior se corrobora a partir de las metodologías implementadas en la calibración del modelo conjunto, donde se pudo observar que ante la subestimación del volumen escurrido era necesario ajustar parámetros hidrogeológicos relacionados con la conductancia hidráulica del cauce, con el propósito de incrementar las aportaciones provenientes de los flujos subterráneos o por el contrario, generar mayor recarga hacia los acuíferos.

Por su parte, las zonas con presencia de mayor permeabilidad persisten a lo largo del acuífero Valle de Aconchi, lo que permite inferir que gran parte de los volúmenes escurridos sobre el río Sonora son retenidos en este punto. En lo que respecta a los acuíferos Valle Ures y Topahue destacan materiales de menor permeabilidad lo que implica que los almacenamientos presenten una tasa de renovación más lenta.

En época de estiaje, se genera un escurrimiento base producto de las aportaciones realizadas por los acuíferos de la región. Esto puede ser precisado a partir de las simulaciones del modelo, que permiten identificar aquellas áreas de aportación (o celdas de la discretización espacial) que generan contribuciones al escurrimiento del río Sonora, y que son identificadas por la letra F en la figura 5.27. Dicho efecto es más notorio en el acuífero Valle de Aconchi, ya que en éste es donde existen puntos de estrechamiento del valle o donde el espesor del acuífero aluvial disminuye, según lo mostrado en la caracterización geológica del anexo 1. Parte de estas aportaciones alcanzan a recargar los acuíferos que se localizan aguas abajo, en el Valle de Ures y Topahue.



*Figura 5.27 Celdas del modelo que aportan gasto a corrientes superficiales.*

Por otro lado, se identifica de forma puntual aquellas zonas en las que existe una sobreexplotación de las aguas subterráneas, concretamente en las inmediaciones de las localidades de Banámichi y Huépac (figura 5.28), y por lo anteriormente descrito en la mayor parte del Valle de Ures.

Lo anterior es reflejado por conos de abatimiento que contrastan con el resto de la superficie del acuífero Valle de Aconchi. En el caso del acuífero Valle de Ures, existe un descenso uniforme de las cargas piezométricas en la totalidad de las celdas que conforman el acuífero.

La evolución de los almacenamientos a través de los distintos sitios de demanda se presenta en las figuras mostradas en 5.29 a 5.31, que corresponden a la evolución temporal de la carga piezométrica en algunos pozos de observación utilizados dentro de la calibración del modelo de aguas subterráneas.

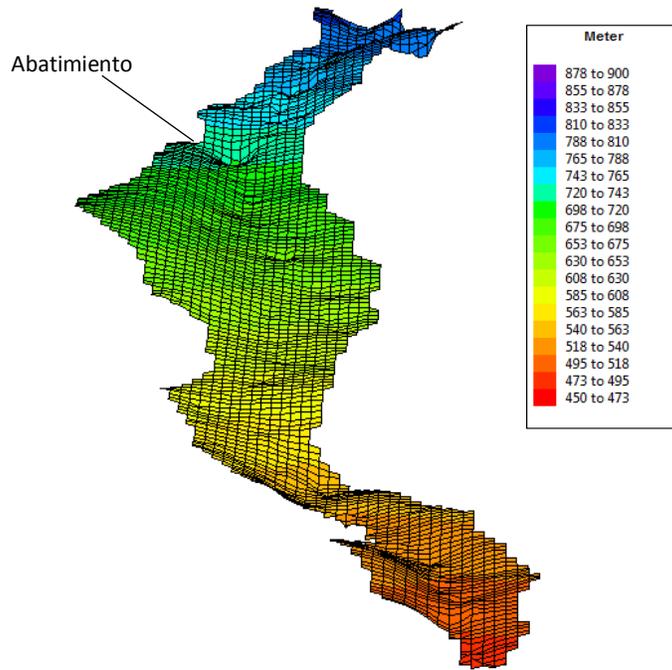


Figura 5.28 Zonas de mayor abatimiento identificadas en el acuífero Valle de Aconchi



Figura 5.29 Evolución temporal de la carga piezométrica en pozos de observación localizados en el acuífero Valle de Ures

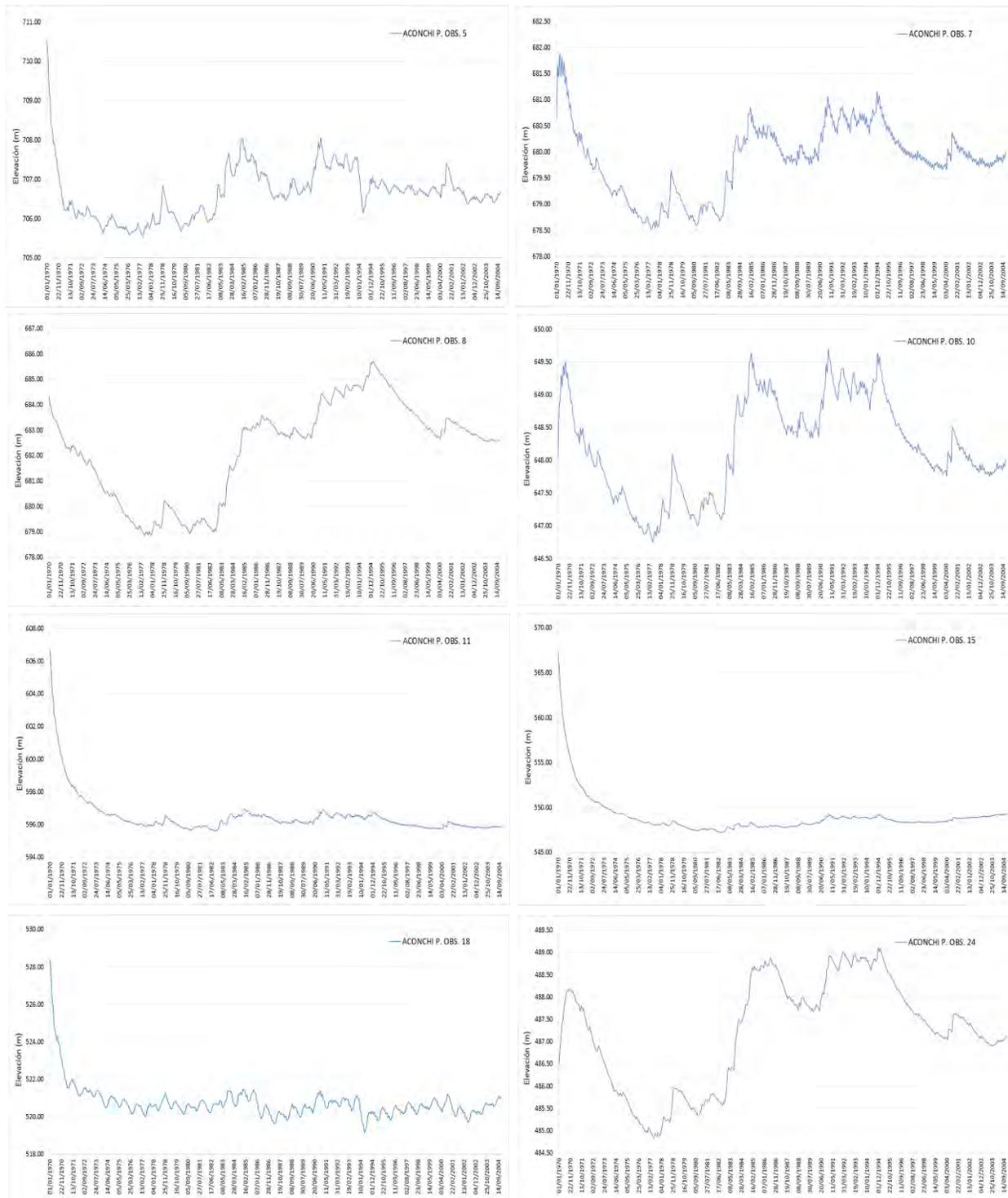
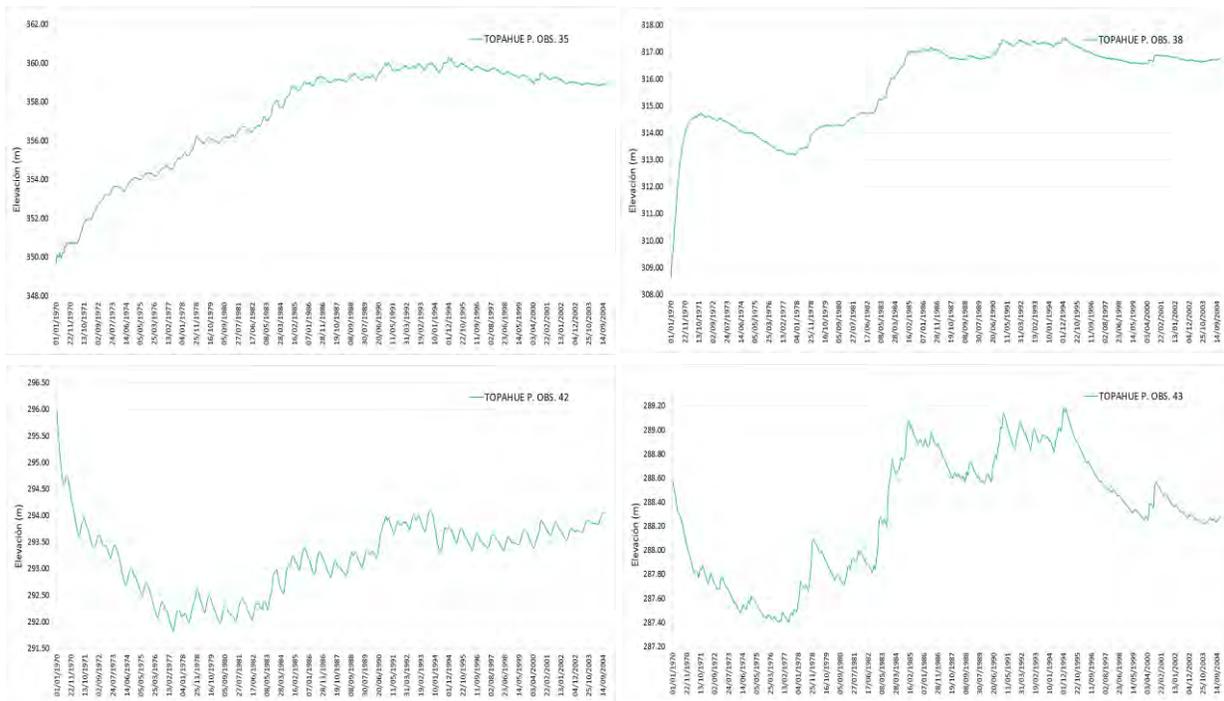


Figura 5.30 Evolución temporal de la carga piezométrica en pozos de observación localizados en el acuífero Valle de Aconchi



**Figura 5.31** Evolución temporal de la carga piezométrica en pozos de observación localizados en el acuífero Topahue

Tomando en cuenta los análisis anteriormente presentados, se identifican zonas en las cuales se requiere acciones concretas que maximicen las condiciones actuales de disponibilidad de las fuentes de agua subterránea y en las que se deberá manifestar en mayor medida, el beneficio de los escenarios de manejo que se evalúen dentro de la última etapa de la modelación. Dentro de este contexto, serán simuladas distintas alternativas de operación conjunta basadas principalmente en restricción a las demandas del sistema.

Para efecto de lo anterior y con la finalidad de evaluar la respuesta del modelo ante las distintas políticas establecidas, se toma en cuenta una valoración de escenarios dentro del periodo de calibración comprendido de 1970 a 2004.

## 5.6. SIMULACIÓN DE POLÍTICAS DE MANEJO CONJUNTO

Los impactos generados por un hipotético manejo de los aprovechamientos superficiales y subterráneos pueden ser evaluados en función de objetivos de tipo socioeconómico, ambiental o hidrológico, que son establecidos dentro de la gestión y planificación de los recursos hídricos. La finalidad de revisar políticas de manejo conlleva a la necesidad de hacer una comparación de los efectos obtenidos del modelo ante los distintos planteamientos del problema.

La propuesta dentro de la presente investigación, consiste en generar un análisis de manejo conjunto orientado en alcanzar un equilibrio hídrico en las fuentes de agua disponibles. Aunque los alcances se establecen función de la evaluación de respuestas del modelo ante los distintos escenarios simulados, existe la posibilidad de ampliar dichas observaciones incluyendo análisis de impactos económicos y sociales a manera de brindar un marco solucionario integral. Estos enfoques no se encuentran situados dentro de los alcances del presente trabajo.

### 5.6.1. Planteamiento de escenarios

Los análisis efectuados de políticas de manejo serán acotados a establecer un manejo sostenible de las fuentes de abastecimiento subterráneas, esto último en virtud de que representan los elementos con mayor déficit en el sistema. Para tal efecto se revisan los impactos producidos por la disminución de las demandas proponiendo un porcentaje de reducción que se define de manera arbitraria. Esto permite hacer una aproximación al escenario que potencialmente genere mejores efectos respecto a la recuperación en los volúmenes de almacenamiento.

Por otro lado, se revisará si los beneficios obtenidos en cada escenario generan cambios en el régimen de escurrimiento del río Sonora.

#### 5.6.1.1. Escenario 1: Reducción a las demandas en el acuífero Valle de Ures.

Este escenario describe la hipótesis de generar reducciones en las demandas que se abastecen del acuífero Valle de Ures, que constituye la fuente subterránea con mayor déficit hídrico en relación al resto de los aprovechamientos subterráneos. Las restricciones se realizan a un 80%, 70% y 60% del volumen históricamente demandado.

#### 5.6.1.2. Escenario 2: Generar mayor aportación del acuífero Valle de Aconchi a los escurrimientos del río Sonora

Tomando en cuenta los resultados del escenario anterior, y a partir de lo observado en el comportamiento del acuífero Valle de Aconchi (donde se generan mejores condiciones de almacenamiento), se busca una aportación adicional de éste al escurrimiento del río Sonora. Para tal efecto se establecen reducciones a las demandas en la misma proporción a las definidas en el escenario anterior.

#### 5.6.1.3. Escenario 3: Reducción simultánea a las demandas del acuífero Valle de Ures y Valle de Aconchi.

Se genera dentro del presente escenario una reducción simultánea de las demandas en los acuíferos Valle de Aconchi y Valle de Ures, estableciendo para el primero una reducción que se mantiene fija al 70%, y para el segundo una disminución al 80%, 70% y 60%.

#### 5.6.1.4. Escenario 4: Manejo sostenible.

En función de los resultados obtenidos en los tres escenarios descritos con anterioridad, se establece un volumen de descenso máximo en los almacenamientos subterráneos, con la finalidad de encontrar las restricciones óptimas a las demandas. Para tal efecto se generan simulaciones restringiendo el almacenamiento en Valle de Aconchi a 100 Mm<sup>3</sup> y en Valle de Ures a 300 Mm<sup>3</sup>.

### 5.6.2. Simulación de escenarios propuestos

En el presente apartado, se muestran los resultados de las simulaciones efectuadas bajo las condicionantes establecidas para cada escenario.

## 5.6.2.1. Escenario 1

En Valle de Ures, se procede a reducir las extracciones de agua a un 80%, 70% y 60% en los volúmenes demandados. Esto permite revisar la respuesta del acuífero en términos de recuperación de su almacenamiento.

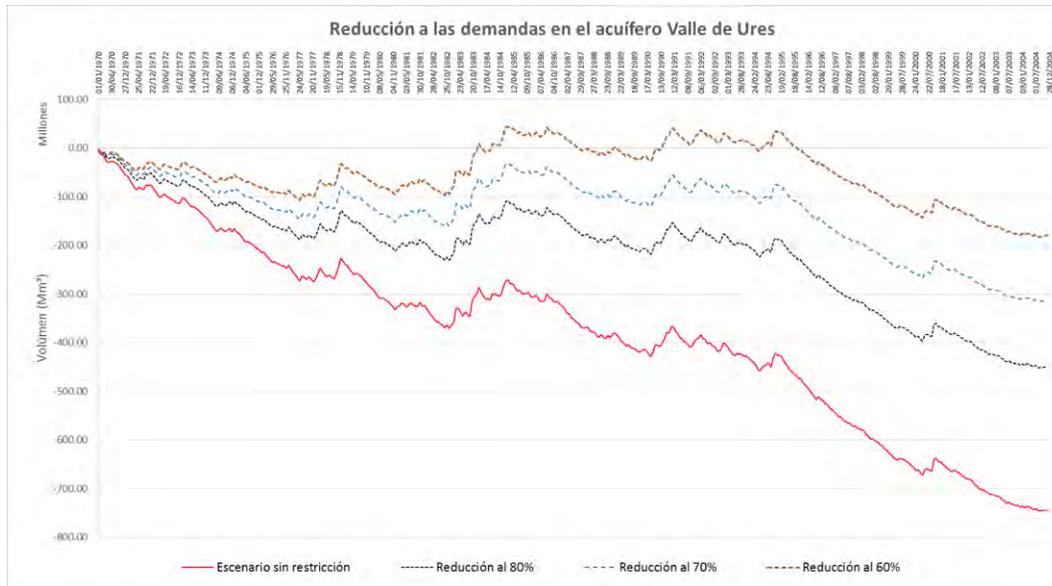


Figura 5.32 Evaluación escenario 1, evolución del almacenamiento en Valle de Ures

La figura 5.32 representa la evolución del volumen almacenado en el acuífero Valle de Ures, donde se aprecia una recuperación significativa para todos los porcentajes de disminución propuestos. Por otro lado, se observa que en el escurrimiento superficial no se generan aportaciones importantes que permitan incrementar de forma sustancial los volúmenes a la salida de la cuenca (estación el Orégano), los resultados se muestran en la figura 5.33.

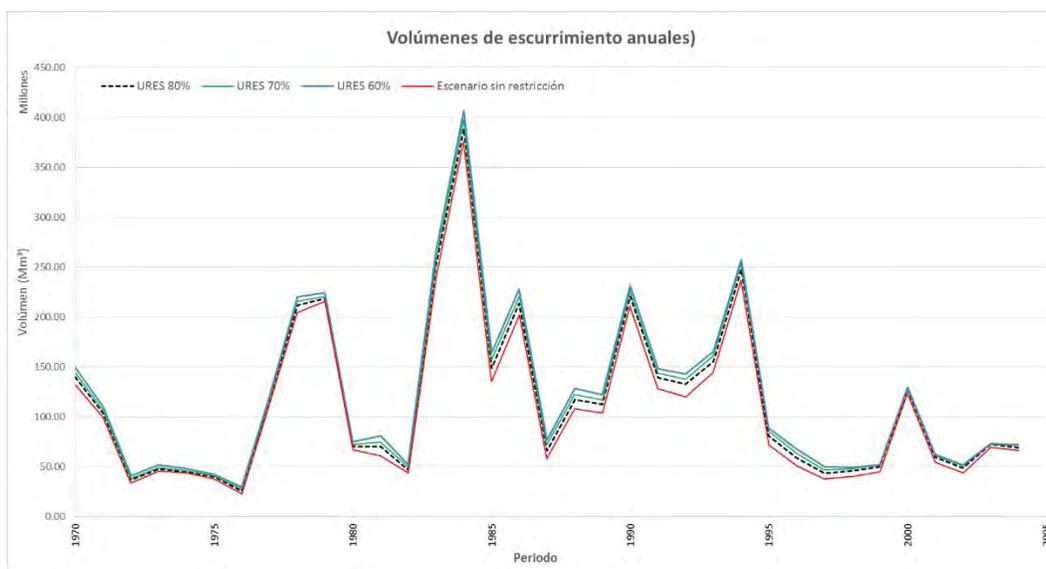


Figura 5.33 Evaluación escenario 1, escurrimientos superficiales en el río Sonora

Se puede concluir que el mayor beneficio en la utilización de esta política se expresa en un mejoramiento de los niveles de almacenamiento del acuífero Ures y no en la aportación a los volúmenes de escurrimiento del río Sonora.

### 5.6.2.2. Escenario 2

La hipótesis de este escenario define la posibilidad de que al disminuir las extracciones en el acuífero Valle de Aconchi, se incrementen sus niveles piezométricos lo cual produzca en determinado momento aportaciones adicionales al escurrimiento del río Sonora y por tanto, se logre incrementar los volúmenes que escurren hasta Valle de Ures. En este escenario, las reducciones a las demandas se realizan a un 80%, 70% y 60%. Por el contrario, en el acuífero Valle de Ures se establece un funcionamiento sin restricción. La respuesta observada en los almacenamientos subterráneos a esta política se presenta en la figura 5.34.

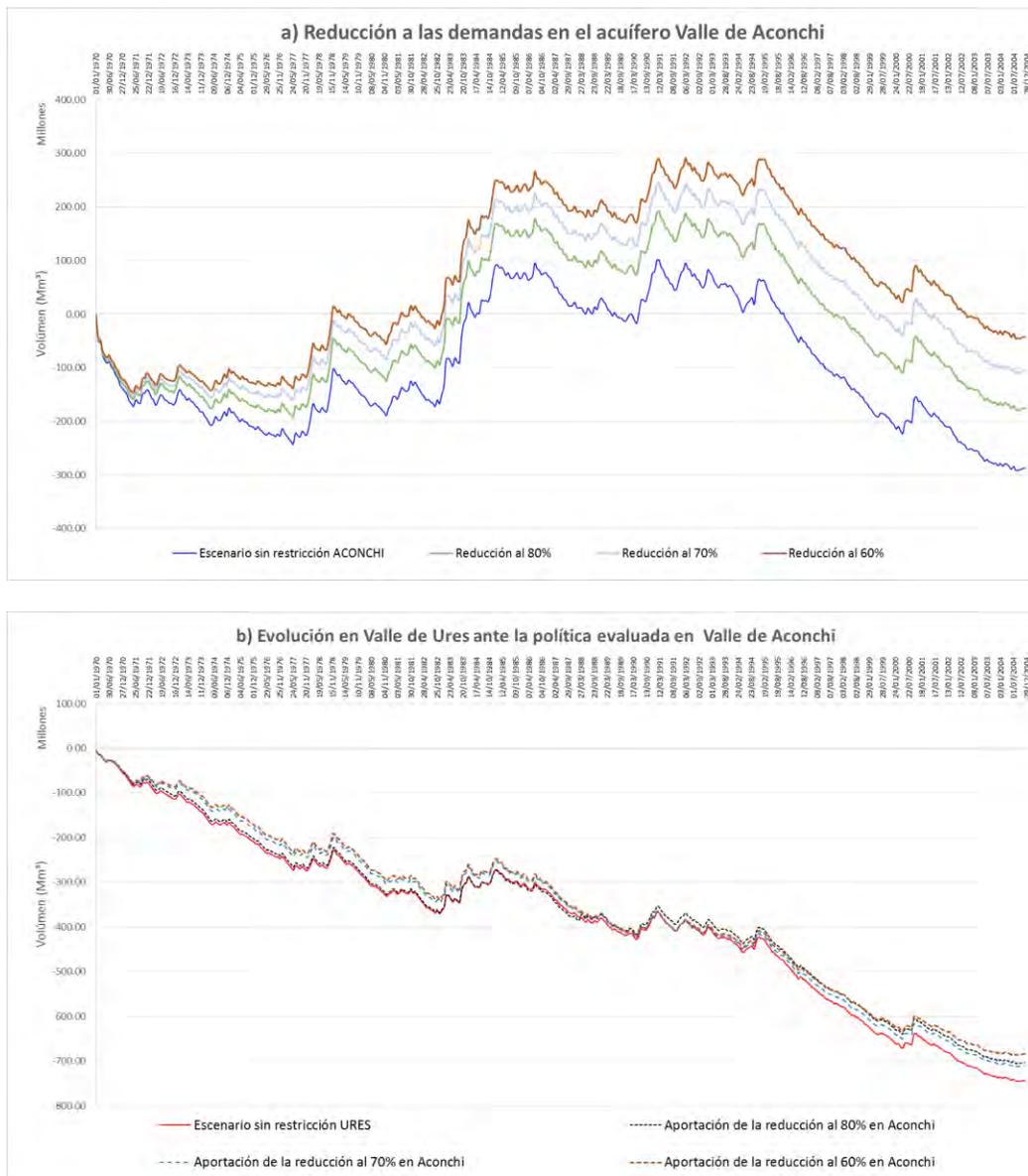
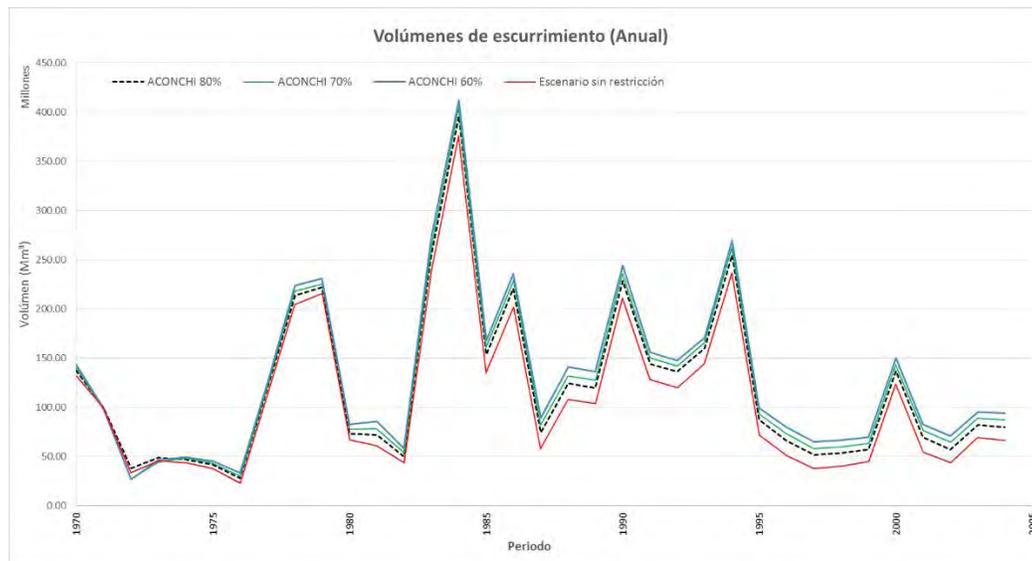


Figura 5.34 Evaluación escenario 2, evolución del almacenamiento a) Valle de Aconchi y b) Valle de Ures

En la figura 5.34a, se aprecia una recuperación acelerada del acuífero Valle de Aconchi. Por otro lado, en el acuífero Valle de Ures, se presenta una ligera tendencia a la recuperación de su almacenamiento. De igual manera, en cuanto al escurrimiento superficial, existe una aportación ligeramente mayor con relación al escenario anterior (figura 5.35).



**Figura 5.35 Evaluación escenario 2, escurrimientos superficiales en el río Sonora**

Dentro de esta política de manejo se destaca que la mayor parte de los volúmenes ganados por la restricción a las demandas son almacenados en el acuífero Valle de Aconchi. Lo anterior, coincide con lo presentado en la valoración mostrada en el apartado 5.5, donde se menciona que gran parte de los escurrimientos de la cuenca son retenidos en este acuífero, efecto conjunto de las altas permeabilidades que se presentan en este tramo. En el Valle de Ures, existen permeabilidades menores que limitan la recarga del acuífero, la cual se realiza a una tasa de infiltración menor.

## 5.6.2.3. Escenario 3

Dentro de este escenario se plantea la posibilidad de reducir simultáneamente las demandas en un 70% para el acuífero Valle de Aconchi y a un 80%, 70% y 60% las solicitadas en el acuífero Valle de Ures.

En la figura 5.36 se presenta el cambio en la evolución de los almacenamientos subterráneos, y en la figura 5.37 el cambio a los volúmenes de escurrimiento superficiales.

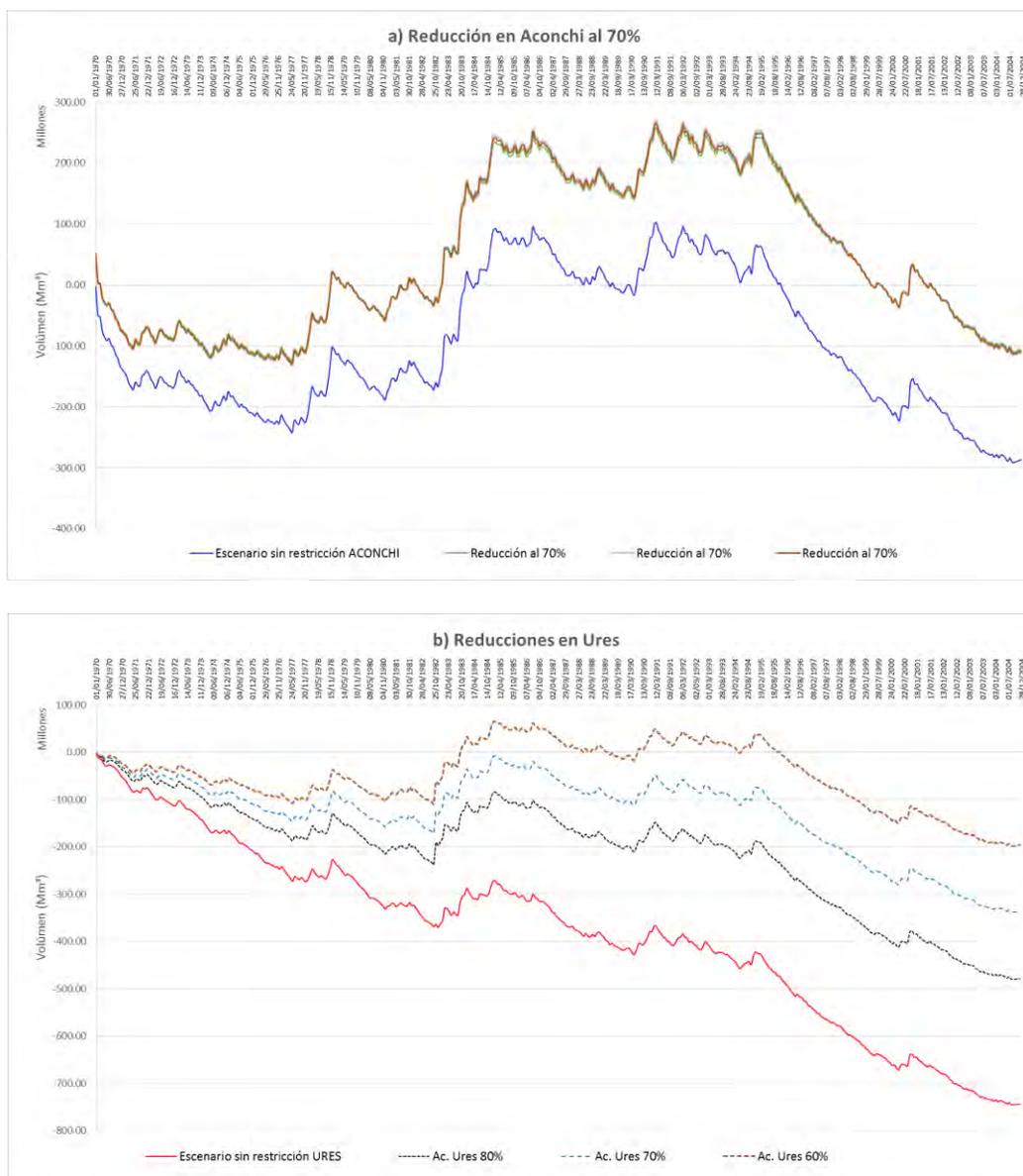
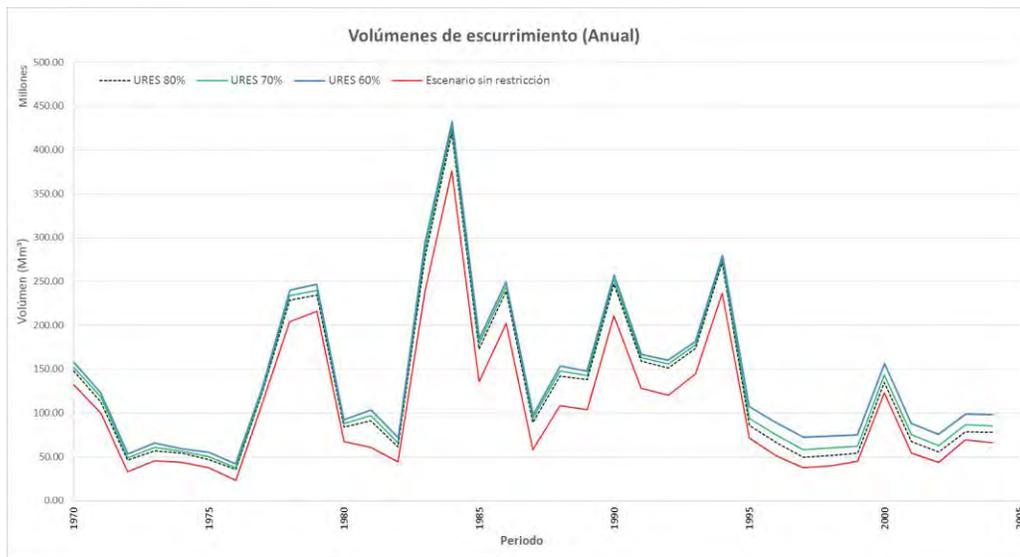


Figura 5.36 Evaluación escenario 3, evolución del almacenamiento a) Valle de Aconchi y b) Valle de Ures

En relación al escurrimiento, este escenario representa la combinación que genera mayores aportaciones al río Sonora, en virtud de que se forman incrementos mayores con relación a los obtenidos en escenarios anteriores.



**Figura 5.37** Evaluación escenario 3, escurrimientos superficiales en el río Sonora

#### 5.6.2.4. Escenario 4

Con los resultados obtenidos en el escenario 1 y 2, se identifica que las aportaciones al escurrimiento resultan ser mínimas bajo las políticas evaluadas, en virtud de que el mayor beneficio de estas últimas es reflejado principalmente en el mejoramiento de los volúmenes de almacenamiento subterráneo; sin embargo, un análisis más detallado del escenario 3 respecto a lo que sucede con el escurrimiento superficial, permite identificar un volumen máximo de descenso a partir del cual existe la posibilidad de que se generen gastos adicionales al escurrimiento superficial. Se observa en las gráficas 5.36 y 5.37 que cuando el volumen de explotación en Valle de Ures no desciende en más de 300 Mm<sup>3</sup> y en Valle de Aconchi los 100 Mm<sup>3</sup>, se mejoran las aportaciones al escurrimiento del río Sonora.

Tomando en cuenta lo anterior, el presente escenario se enfoca en la propuesta de una política restrictiva al cambio de almacenamiento subterráneo, que permita afinar las restricciones a las demandas que se abastecen en estos almacenamientos. Los resultados de este escenario se muestran en las figuras 5.38 a 5.40.



**Figura 5.38** Restricciones requeridas en el acuífero Valle de Ures y Valle de Aconchi para mantener un almacenamiento sostenible

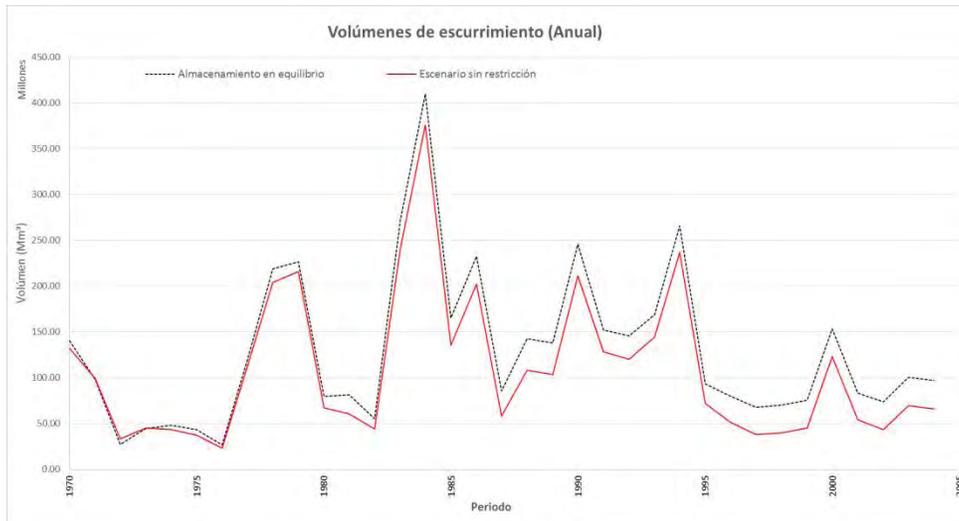


Figura 5.39 Evaluación escenario 4, escurrimientos superficiales en el río Sonora

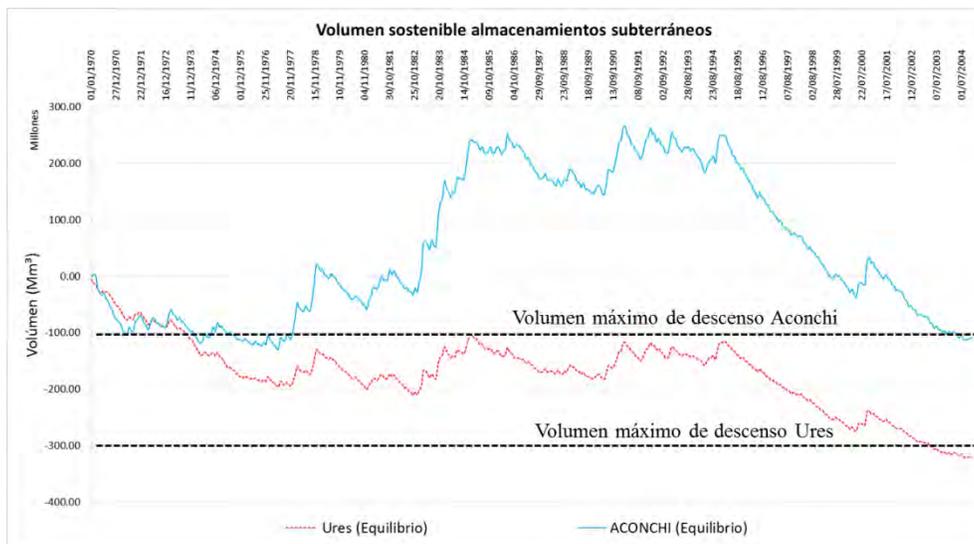


Figura 5.40 Evaluación escenario 4, evolución de almacenamientos Valle de Aconchi y Valle de Ures

Se logra mantener un equilibrio de los volúmenes almacenados en el acuífero Valle de Ures a partir de las reducciones mostradas en la figura 5.38. En lo que respecta a Valle de Aconchi, se mantiene una restricción del 70%.

### 5.6.3. Resultados

Los escenarios 1 y 2 restringen a las demandas y favorecen a los acuíferos, los cuales reflejan un menor descenso en sus volúmenes de almacenamiento subterráneo. Por otra parte, el escenario 3 representa una opción que permite incrementar los escurrimientos del río Sonora bajo una política de restricción simultánea. Los resultados del cambio de almacenamiento al final del periodo de simulación se muestran en la tabla 5.2.

*Tabla 5.2 Cambio de almacenamiento al final del periodo de simulación (Mm<sup>3</sup>)*

Fuente de Almacenamiento	Sin políticas	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
		80%	70%	60%	80%	70%	60%	80%	70%	60%
ACONCHI	-286.69	-	-	-	-174.70	-105.73	-42.61	-	-111.99	-
URES	-793.45	-449.54	-313.20	-179.34	-703.29 <sup>1</sup>	-709.11 <sup>1</sup>	-683.74 <sup>1</sup>	-478.75	-336.51	-196.94
R. SONORA <sup>2</sup>	-	+234.19	+362.92	+493.62	+410.98	+582.08	+777.25	+742.20	+938.02	+1196.98

<sup>1</sup> Sin considerar restricción

Estos tres escenarios permiten establecer un volumen en equilibrio con el cual se establece un esquema de funcionamiento dentro del modelo basado en mantener un nivel de almacenamiento sostenible en las fuentes de agua. Para este escenario se obtiene como resultado un cambio de almacenamiento final en el acuífero Valle de Aconchi equivalente a -114.72 Mm<sup>3</sup>, para Valle de Ures -319.82 Mm<sup>3</sup>, y finalmente una aportación al escurrimiento superficial de 741.85 Mm<sup>3</sup>. Las reducciones temporales que se requieren para mantener este equilibrio se presentan en la figura 5.38; donde se muestra que la restricción óptima en Valle de Aconchi es del 70%, y en Valle de Ures se compone por un valor medio del 67.30% en el periodo de mayor sequía (1996 a 2004), y para el resto del periodo se tiene una restricción media del 84.78%.

## Capítulo 6

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

La Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH) considera necesario incluir diversas directrices de sostenibilidad, mediante el establecimiento de un enfoque integral de manejo de recursos en el que la participación dinámica de los diversos actores que administran y hacen uso de las fuentes de agua dentro de un territorio, sea preponderante.

En México, la Ley General de Aguas Nacionales (LAN, 2004) provee la oportunidad implementar la GIRH mediante la definición de políticas de manejo, control, aprovechamiento y preservación de los recursos hídricos, con el objeto de mitigar impactos negativos ante efectos que se deriven de su explotación. Para tal efecto, se requiere de estudios relacionados con aspectos técnicos en los que se pueden incluir análisis con enfoques de tipo económico, social, hidrológico y ecológico.

Aunque en el país se cuenta con un marco normativo que concibe a la GIRH como un instrumento de planificación, se carece de metodologías concisas que permitan realizar una valoración de las medidas de manejo que mejor definan la protección de los recursos ante los diversos escenarios de uso. Es dentro de este contexto que la modelación hidrológica en su uso conjunto se presenta como un elemento imprescindible en la evaluación de las estrategias de utilización de las fuentes de agua.

La modelación conjunta permite representar fenómenos de tipos hidrológicos e hidrogeológicos que ocurren en una cuenca, con lo cual se puede realizar una evaluación cuantitativa de la respuesta de las fuentes de agua ante escenarios de manejo hipotéticos. Dentro de ésta, se toma en cuenta una valoración equilibrada que involucra aspectos comparativos entre los beneficios o impactos que se derivan de la sobreexplotación de las fuentes de agua.

En la presente investigación, se desarrolló un modelo conjunto de aguas superficiales y subterráneas con el apoyo de herramientas de simulación numérica y de planificación de recursos hídricos, que en un funcionamiento acoplado permitió generar una modelación de las fuentes superficiales y

subterráneas que conforman la cuenca alta del río Sonora. Estas herramientas de simulación conjunta forman parte de un Sistema de Soporte a la Decisión (SSD, por sus siglas en inglés).

### 6.1. CONCLUSIONES

Las conclusiones principales se dividen en dos categorías: las que conciernen a la construcción, calibración y validación del modelo en su funcionamiento conjunto; y la relacionada a los escenarios de políticas de manejo de los aprovechamientos hídricos de la región.

- *Construcción y validación conjunta del modelo.*

La integración de la información para la conceptualización y construcción del modelo, requirió de una detallada caracterización hidrológica e hidrogeológica de los recursos de la zona de estudio.

En lo que respecta a la parte de hidrología superficial, se realizó un análisis de la información que concierne a demandas, coeficientes de escurrimiento, climatología, pérdidas por evapotranspiración y configuración fisiográfica de la cuenca. Se requirió de la consulta de información histórica relacionada principalmente con hidrometría, precipitación y superficies de riego cultivadas. Los análisis de cada una de estas variables son presentadas en los anexos correspondientes.

Por su parte, la hidrología subterránea constó de una caracterización de sus principales componentes hidrogeológicas a partir de estudios existentes de geología y prospección geofísica; además de estudios en campo para la estimación de las conductividades hidráulicas sobre la principal unidad acuífera que se relaciona con materiales de tipo aluvial. Finalmente se obtuvo información histórica relacionada con observaciones de cargas piezométricas levantadas en campo para los años 1970 y 2004, periodo que definió la longitud temporal de simulación dentro del modelo.

La construcción del modelo dentro del programa WEAP tomó en cuenta los aspectos relacionados con hidrología superficial, por otro lado, el programa MODFLOW contuvo aquellas que se relacionan con la caracterización hidrogeológica. En lo consistente a la calibración conjunta de éstos, se logra una validación de la calidad de la simulación aplicando criterios estadísticas que miden la eficiencia, el error medio y la desviación relativa, entre las variables observadas y calculadas, clasificando dicha calidad con relación a rangos de validez consultados en la literatura.

La hidrología superficial se calibra con escurrimientos históricos de la cuenca, siendo validada mediante los índices NASH y PBIAS, que considera la calibración como satisfactoria a escala mensual y buena para la simulación anual, a partir de valores obtenidos del índice de NASH de 0.651 y 0.834 respectivamente. También se obtuvo un PBIAS de 2.682%, lo cual indica una ligera subestimación en los volúmenes calculados.

Por otra parte, en la modelación subterránea se hace una evaluación de su eficiencia mediante el criterio del NRMS el cual valida las cargas calculadas para los tres acuíferos simulados, con un valoración para el acuífero Valle de Aconchi de 1.61%, en Valle de Ures en 6.88% y para Topahue en 9.96%.

La calificación con la que se alcanza la calibración en su modelación conjunta, se encuentra asociada a la calidad de la información recabada de variables hidrológicas e hidrogeológicas, que resulta mala y en ocasiones inexistentes. A pesar de esta incertidumbre, se obtienen resultados confiables que describen el comportamiento general de los aprovechamientos en los últimos 35 años.

Las simulaciones efectuadas a partir de la calibración, permiten concluir que los acuíferos Valle de Aconchi y Topahue han sufrido las menores afectaciones en términos de explotación: se identifican años donde el volumen almacenado decrece de forma considerable, y cómo esa disminución se logra recuperar en años donde se presentan mayores precipitaciones en la cuenca. En lo que concierne al acuífero Valle de Ures se presenta un balance negativo: su almacenamiento ha disminuido por un incremento de las extracciones, efecto aunado a un descenso importante en los escurrimientos que llegan a esta zona.

- *Evaluación de políticas de manejo*

En cuanto las políticas de manejo conjunto se refiere, se evaluaron cuatro escenarios que contemplan como principal variable la reducción en la demanda hasta alcanzar un equilibrio hídrico en relación a los almacenamientos subterráneos que mayor déficit presentan, y que corresponden a los acuífero Valle de Aconchi y Valle de Ures.

Los primeros dos escenarios se simularon mediante una combinación de porcentajes de reducción que permitió establecer que los mayores beneficios a la implementación de estas políticas se reflejaban en la mitigación de los descensos de los niveles subterráneos. Por su parte un tercer escenario identificó la posibilidad de generar escurrimientos adicionales al río Sonora, garantizando de igual manera una recuperación de los niveles freáticos.

El cuarto escenario se definió a partir de las observaciones obtenidas en los contextos previos, lo cual permitió establecer una evaluación con un enfoque restrictivo a los volúmenes de descenso máximo de los almacenamientos, de esta manera e inverso a lo realizado en los anteriores, el modelo arrojó los resultados de las restricciones temporales necesarias para mantener los un escenario sostenible.

Se deduce a partir de lo anterior, que un manejo sostenible en las fuentes de abastecimiento, requiere disminuir la demanda en Valle de Aconchi en un 30% y en Valle de Ures a un 15%, incrementándose en el periodo de mayor sequía hasta un 35%. Se presenta la posibilidad de incrementar los escurrimientos superficiales cuando el almacenamiento en el acuífero Valle de Ures no desciende en más de 300Mm<sup>3</sup>, así mismo en el acuífero Valle de Aconchi deberá mantenerse con un descenso máximo de 100 Mm<sup>3</sup>. Lo anterior conlleva a un cambio en el patrón de riego o a la disminución de las superficies cultivadas. En este último caso, existe la posibilidad de que se mejoren las condiciones de riego mediante sistemas de tecnificación que permitan hacer más eficientes las láminas actuales.

## 6.2. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación exhiben una primera aproximación que aborda el manejo conjunto de los recursos hídricos de la cuenca alta del río Sonora, y que analiza distintos escenarios relacionados a una hipotética gestión hídrica.

Es importante destacar, que ante la limitada información relacionada con las variables utilizadas, es recomendable continuar con los procedimientos de calibración de parámetros de los modelos en su forma conjunta, además de afinar la parte relacionada a los balances hídricos que cuantifican extracciones y derivaciones a las demandas de abastecimiento para riego.

Por otro lado, se recomienda explorar el resto de las capacidades del modelo de gestión, introduciendo variables de decisión que tomen en cuenta otros aspectos de índole económica, social e inclusive de calidad del agua. Con esto se puede alcanzar una mejor definición de las políticas de manejo conjunto.

Finalmente, es recomendable incorporar análisis que implementen medidas de tipo estructural, encaminadas a la preservación de las fuentes de agua mediante el incremento de su oferta, los cuales pueden anexar la optimización de procesos de infiltración con una recuperación de volúmenes mediante el reúso y recarga artificial de acuíferos (MAR, por sus siglas en inglés).

### 6.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El enfoque multidisciplinario de la presente investigación, representa una oportunidad para el desarrollo de futuras líneas de trabajo que pueden complementar y afinar el modelo aquí presentado, entre los que destacan:

- Implementación de sistemas de monitoreo para el seguimiento a la evolución temporal de las fuentes de agua subterránea principalmente a las relacionadas con niveles piezométricos, los cuales representan un elemento clave dentro de la calibración de parámetros en el modelo de flujo subterráneo.
- Generar metodologías más eficientes que permitan realizar una cuantificación más detallada de las extracciones subterráneas y derivaciones superficiales para el abastecimiento de las demandas en la cuenca.
- Realizar predicciones futuras de los impactos producidos por escenarios de cambio climático sobre los almacenamientos hídricos existentes.
- Efectuar una evaluación que identifique el grado de tecnificación que prevalece en la zona. Si dicha componente no se encuentra presente en el sistema, se propone la implementación de la misma para mejorar las condiciones de riego y disminuir los problemas de sobreexplotación actuales de las fuentes de agua.
- Ejecutar un reordenamiento de la agricultura tomando en cuenta la posibilidad de realizar un cambio en los patrones de cultivo a siembras que requieran menor cantidad de agua de riego y que generen una mayor rentabilidad.
- Predicciones a los impactos socioeconómicos y ambientales frente a la modificación de los esquemas de explotación.
- Incorporación de temas relacionados con calidad del agua y transporte de contaminantes, evaluando interacciones relativas al agua – subsuelo y agua de recarga – agua subterránea nativa; lo anterior contemplado dentro de la modelación de flujo subterráneo.

## **BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS**

---

- Abusaada, M. (2013). Projecting water availability within the Western Aquifer Basin: WEAP-MODFLOW Coupling (Briefing 2.6).
- Ahmed, S., Jayakumar, R., & Salih, A. (2008). *Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers*. Springer.
- Alcobendas Cobo, J., & Moreno Valencia, M. (s.f.). *Necesidad de riego de los cultivos*. UCLM.
- Ali, A., & Lebel, T. (2009). The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, 1705-1714.
- Almestad, C. (2015). *Modelling of water allocation and availability in Devoll River Basin, Albania*. Norwegian University of Science and Technology.
- Anderson, M., Woessner, W., & Hunt, R. (2002). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. Elsevier.
- Aral, M. (1990). *Groundwater modeling in multilayer aquifers, unsteady flow*. Lewis Publishers.
- Ariel Constructores S.A. (s.f.). *Censo de aprovechamientos hidráulicos (superficiales y subterráneos) en los valles del río Sonora, desde Mazocahui hasta Arizpe, Son. Anexo I*.
- Ariel Constructores S.A. (s.f.). *Censo de aprovechamientos hidráulicos (superficiales y subterráneos) en los valles del río Sonora, desde Mazocahui hasta Arizpe, Son. Tomo I*.
- Ariel Constructores S.A. (s.f.). *Censo de aprovechamientos hidráulicos (superficiales y subterráneos) en los valles del río Sonora, desde Mazocahui hasta Arizpe, Son. Tomo II*.
- Ariel Constructores, S.A. (s.f.). *Estudio de hidrología subterránea en el área de las cuencas altas de los ríos desde El Matape hasta El Magdalena, Son. Tomo III*.
- Ariel Constructores, S.A. (s.f.). *Estudio geohidrológico preliminar de los valles de Ures y Rayón, Son. Tomo II*.
- Bercián Solís, K., & Palomo Rivera, K. (2004). *Revisión de metodologías para extensión y relleno de datos en series históricas, y su aplicación a los ríos de El Salvador*. San Salvador, El Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.
- Bitrán Bitrán, D., Jiménez Espinosa, M., Eslava Morales, H., Salas Salinas, M., Vázquez Conde, M., Matías Ramírez, L., . . . Acosta Colsa, L. (2014). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2000*. México, D.F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Bojorquez O., J., & Rosas H., J. (1988). *Geología de la hoja Aconchi H12D13, Municipio de Aconchi, Sonora*. Universidad de Sonora.
- Breña Puyol, A., & Jacobo Villa, M. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- California Department of Water Resources. (2016). *Groundwater Information Center*. Obtenido de Water interaction:  
[http://www.water.ca.gov/groundwater/groundwater\\_basics/gw\\_sw\\_interaction.cfm](http://www.water.ca.gov/groundwater/groundwater_basics/gw_sw_interaction.cfm)

- Calmus, T., Vega-Granillo, R., & Lugo-Zazueta, R. (2011). *Evolución geológica de Sonora durante el Cretácico Tardío y el Cenozoico*. Instituto de Geología - UNAM.
- Campa Robles, F. (1995). *Avenidas extremas ocurridas en la cuenca Río Sonora durante el año 1994*. Universidad de Sonora .Departamento de Ingeniería Civil y Minas.
- Campos Aranda, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis Potosí, S.L.P.: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Campos-Aranda, D. (2014). Modelación del proceso precipitación-escorrimento mensual por medio de regresiones. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 625-636.
- Comisión Estatal del Agua - CEA Sonora. (2016). Obtenido de <http://www.ceasonora.gob.mx/>
- Comisión Nacional del Agua. (2008). *Estadísticas Agrícolas de las Unidades de Riego - Año Agrícola 2006 - 2007*. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola - Gerencia de Unidades de Riego.
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *Estadísticas agrícolas de los Distritos de Riego. Año agrícola 2008 - 2009*.
- Coronado Peraza, V. (2007). *Sistema de manejo de información sobre unidades de riego y sus aprovechamientos hidráulicos. Una propuesta para los municipios de Aconchi, Baviácora, Huépac y San Felipe de Jesús, Sonora*. Hermosillo, Sonora: El Colegio de Sonora.
- De Wrachien, D., & Fasso, C. (2007). Conjunctive use of surface and groundwater. *ICID 22nd European Regional Conference*. Pavia, Italy.
- Dinar, A., Dinar., S., McCaffrey, S., & McKinney, D. (2007). Bridges over water: Understanding Transboundary Water Conflict, Negotiation and Cooperation. *World Scientific Series on Energy and Resources Economics*.
- Domínguez Mora, R., Jiménez Espinosa, M., García Jiménez , F., & Salas Salinas, M. (1994). *Cuadernos de investigación: Modelo lluvia - escurrimento*. México: CENAPRED.
- Droogers, P., & Perry, C. (2008). *Scenario Based Water Resources Model to Support Policy Making*. Wageningen, The Netherlands.
- Droubi, A., Al-Sibai, M., Abdallah, A., Wolfer, J., Huber, M., Hennings, V., . . . Dechiech, M. (2008). *Development and Application of a Decision Support System (DSS) for Water Resources Management in Zabadani Basin, SYRIA and Berrechid Basin, MOROCCO*.
- Dudley, T., & Fulton, A. (s.f.). Conjunctive water management: what is it? why consider it? what are the challenges? *Agricultural & Natural Resources*.
- ENV 303. (s.f.). Obtenido de Enviromental Groundwater Modeling: <http://www2.nau.edu/~doetqp-p/courses/env303a/lectures.htm>
- Estrela, T. (1992). *Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- Félix Salas, F. (2004). *Análisis del escurrimento de la cuenca del río San Miguel, Sonora, México, durante el 2004*. Universidad de Sonora - Departamento de Geología.

- Flores López, F., Yates, D., & Purkey, D. (s.f.). A Regional Water Resource Planning Model to Explore the Water-Energy Nexus in the Southeastern United States (GC21C-0977). Stockholm Environment Institute, US Center - National Center for Atmospheric Research.
- Foster, S., van Steenberg, F., Zuleta, J., & Garduño, H. (2010). Conjunctive Use of Groundwater and Surface Water from spontaneous coping strategy to adaptive. *Sustainable Groundwater Management (The World Bank - Water Partnership Program)*.
- Franke, L., Reilly, E., & Bennett, G. (19887). *Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated groundwater flow systems - an introduction*. U.S. Geological Survey.
- García y Barragán, J., & Jacques-Ayala, C. (2011). *Estratigrafía del Cretácico de Sonora, México*. Instituto de Geología - UNAM.
- González León, C. (2013). *La geología de Sonora: una historia de 1800 millones de años*. Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Geología.
- González León, C., Valencia, V., López-Martínez, M., Bellon, H., Valencia-Moreno, M., & Calmus, T. (2010). Arizpe sub basin: a sedimentary and volcanic record of Basin and Range extension in north-central Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 292-312.
- Guoting, G. (2009). *Development of Approaches to Integrated Water Resources Management*. The University of Edinburgh.
- Haitjema, H. (1995). *Analytic element modeling of groundwater flow*. Academic Press.
- Harbaugh, A., Banta, E., Hill, M., & McDonald, M. (2000). *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular groundwater model - user guide to modularization concepts and the groundwater flow process*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Igboekwe, M., & Amos-Uhegbu, C. (2001). Fundamental Approach in Groundwater Flow and Solute Transport Modelling Using the Finite Difference Method. *Earth and Environmental Sciences*, 301-328.
- IMTA - CONAGUA. (s.f.). *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía - Consejo de Cuenca Alto Noroeste*. Programa Nacional Contral la Sequía (PRONACOSE).
- Instituto Geológico y Minero de España. (s.f.). *Desarrollo Sostenible, Uso Conjunto y Gestión Integral de Recursos Hidricos - Estudios y actuaciones realizadas en la provincia de Alicante*.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2006). *Estudio en modelo físico del funcionamiento del vertedor de la presa "Abelardo L. Rodríguez" en el río Sonora*.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1994). *Sonora: resultados definitivos: VII Censo Agrícola - Ganadero*.
- Instituto Tecnológico de Sonora. (2006). *Caracterización a detalle de la permeabilidad en sitios del cauce de los ríos Sonora y San Miguel Horcasitas, en sus cuencas alta y media*.
- Instituto Tecnológico de Sonora. (2006). *Monitoreo de la calidad del agua en la cuenca alta y media del río Sonora, en varias localidades*. Sonora (municipios varios).

- Karamouz, M., Ahmadi, A., & Akhbari, M. (2011). *Groundwater hydrology: Engineering, Planning and Management*. Taylor & Francis Group.
- Lanini, S., Bakalowicz, M., El-Hajj, A., & Dörfliker, N. (s.f.). Construction of a Water Management Support System for the Chekka Bay area (Lebanon). European MEDITATE project (PL 509112).
- Ley de Aguas Nacionales. (1 de Diciembre de 1992). *Diario Oficial de la Federación* . Estados Unidos Mexicanos.
- Lugo Zazueta, R. (2006). *Extensión basin and range en la sierra de Acochi, Sonora, México: análisis termocronológico basado en 40Ar/39 y trazas de fisión*. Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Geología.
- Mabmann, J., Nouri, I., Schelkes, K., & Droubi, A. (2011). Development, application and dissemination of a Decision Support System (DSS) for Integrated Water Resources Management (IWRM) in te Arab Region. *Arab - German Cooperation Project: Management, Protection and Sustainable Use of Water and Soil Resources*.
- Mahamadou Mounir, Z., Ming Ma , C., & Amadou , I. (2011). Application of Water Evaluation and Planning (WEAP): A Model to Assess Future Water Demands in the Niger River (In Niger Republic) . *Modern Applied Science*, 38-49.
- Mariño, M. (2001). Conjunctive management of surface water and groundwater. *Regional Management of Water Resources* . Maastricht, The Netherlands: IAHS.
- Miranda Rodriguez, F. (1999). *Modelación del comportamiento hidrodinámico del agua subterránea de la zona comprendida entre Carbó, Pesqueira y Zamora, Sonora*. Universidad de Sonora. División de Ciencias Exactas y Naturales.
- Molina González, J. (2009). *Análisis integrado y estrategias de gestión de acuíferos en zonas semiáridas- Aplicación al caso de estudio del Altiplano (Murcia, SE España)*. Granada: Instituto Geológico y Minero de España - Instituto del Agua, Universidad de Granada.
- Murray-Rust, H. (s.f.). Conjunctive water use and conjunctive water management.
- Muyinda, A. (2011). *A finite volume transient groundwater flow model*.
- Naresh Kumar, M., Murthy, C., Sessa Sai, M., & Roy, P. (2009). On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. *Meteorological Applications*, 381-389.
- Nouri, I., Yitayew, M., & Maßmann, J. (2015). Multi-objective Optimization Tool for Integrated Groundwater Management. *Water Resour Management*.
- Nourse, J., Anderson , T., & Silver , L. (1994). Tertiary metamorphic core complexes in Sonora, northwestern Mexico. *Tectonics*, 1161-1182.
- Peñúñuri Romero, M. (s.f.). *Distribución espacial de las lluvias de diseño para el estado de Sonora*. Universidad de Sonora.
- Pinder, G. (2002). *Groundwater Modeling Using Geographical Information Systems*. John Wiley & Sons, Inc.

- Pineda-Pablos, N., Scott, C., Wilder, M., Salazar-Adams, A., Díaz-Caravantes, R., Brito, L., . . . Neri, C. (s.f.). Hermosillo, ciudad sin agua para crecer. Vulnerabilidad hídrica y retos frente al cambio climático. *Moving Forward from Vulnerability to Adaptation*.
- Proyectos de Interés Común S.C. (2008). *Organización de productores en unidades de riego de la cuenca del río Sonora en localidades varias*. Sonora (municipios varios).
- Quevedo Estrada, J. (2007). *Propuesta de acción para la gestión untegrada en la Costa de Hermosillo, Sonora*. Hermosillo, Sonora: El Colegio de Sonora.
- Ramesh, H., & Mahesha, A. (2012). Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater for Sustainable Water Management. *Sustainable Development - Energy, Engineering and Technologies - Manufacturing and Environment*, 172-205.
- Ramos Taipe, C., & Chávez Mayta, V. (s.f.). Statistically downscaled climate change for the Santa River Basin, using global circulation models (GCM) and its impact on the availability of water resources. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Ríos, S. (1995). *Modelización*. Alianza Universidad.
- Roberts, S. (2010). *Conjunctive surface water and groundwater management: a new framewrok for strategic decision-making*. San Marcos, Texas: Texas State University-San Marcos .
- Rodríguez-Castañeda, J. (1999). Cretaceous-tertiary detachment surface - Cerro El Vigía, structural block in the Banámichi - San Antonio Region, Central Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 63-72.
- Roldán Quintana, J. (1979). *Geología y yacimientos minerales del Distrito de San Felipe, Sonora*. Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Geología.
- Roldán Quintana, J. (1989). *Geología de la hoja Baviácora, Sonora*. Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Geología.
- Rukuni, S. (2006). *Modeling the response of small multi-purpose reservoirs to hydrology for improved rural livelihoods in the Mzingwane catchment: Limpopo Basin* . University OF Zimbabwe.
- Sahuquillo, A., Cassiraga, E., Solera, A., & Murillo, J. (2010). *Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Sámano Tirado, A. (2008). *Evaluación de erosión natural de la cuenca media y alta del río Sonora*. Universidad de Sonora - Departamento de Geología.
- Sánchez Cohen, I., & Catalán Valencia, E. (2006). *Sistema para optimización de patrones de cultivo en distritos de riego del norte del país*. Gómez Palacio-Duranco: INIFRAP - Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Sarwar Qureshi, A., Turrall, H., & Masih, I. (2004). *Strategies for the Management of Conjunctive use of Surface Water and Groundwater Resources in Semi-arid Areas - A Case Study from Pakistan*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Schelkes, K. (s.f.). Decision Support System (DSS) for Integrated Water Resources Management WEAP- MODFLOW DSS.

- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1977). *Informe final del "Estudio geohidrológico de las cuencas altas de los ríos Sonora, Zanjón y San Miguel" Tomo I.*
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1977). *Informe final del "Estudio geohidrológico de las cuencas altas de los ríos Sonora, Zanjón y San Miguel" Anexo I.*
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1977). *Informe final del "Estudio geohidrológico de las cuencas altas de los ríos Sonora, Zanjón y San Miguel" Anexo II.*
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1977). *Informe final del "Estudio geohidrológico de las cuencas altas de los ríos Sonora, Zanjón y San Miguel" Anexo III.*
- Servicio Geológico Mexicano. (1999). Carta Geológico-Minera Aconchi H12-D13 Sonora.
- Servicio Geológico Mexicano. (1999). Carta Geológico-Minera Baviácora H12-D23.
- Servicio Geológico Mexicano. (1999). Carta Geológico-Minera Hermosillo H12-8 Sonora.
- Servicio Geológico Mexicano. (2002). Carta Geológico-Minera Ures H12-D32 Sonora.
- Servicio Geológico Mexicano. (2003). Carta Geológico-Minera Arizpe H12-B73 Sonora.
- Servicio Geológico Mexicano. (2008). Carta Geológico-Minera Banámichi H12-B83 Sonora.
- Shen, H., Yuan, F., Ren, L., Ma, M., Kong, H., & Tong, R. (2015). Regional drought assessment using a distributed hydrological model coupled with Standardized Runoff Index. *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources*, 397-402.
- SIAFESON - Sistema de Alerta Fitosanitaria del Estado de Sonora. (2014-2016). *Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora*. Obtenido de Estaciones meteorológicas: <http://www.siafeson.com/remas/index.php/estacionglobal/estaciones#DDR144-HERMOSILLO-panel>
- Sieber, J., & Purkey, D. (2015). *User guide for WEAP 2015*. Somerville, MA : Stockholm Environment Institute.
- Silva Pérez, D. (2003). *Modelo evolutivo del acuífero del Valle de Puebla*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Silveira, L., & Usunoff, E. (2009). *Groundwater - Encyclopedia of life support systems*. Oxford, United Kingdom: EOLSS Publishers/UNESCO.
- Singh, A., Panda, S., Saxena, C., Verma, C., Uzokwe, V., Krause, P., & Gupta, S. (2015). Optimization Modeling for Conjunctive Use Planning of Surface Water and Groundwater for Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
- Smit, H., Bourke, F., & Giroux, G. (2014). *2014 Resource estimate and preliminary economic assessment San Felipe Project, Sonora, Mexico*.
- Tanji, K., & Kielen, N. (2002). *Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas*. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.
- TC ACSAD: *A Decision Support System for Integrated Water Resources Management (IWRM)*. (s.f.). Obtenido de Management, Protection and Sustainable Use of Groundwater and Soil Resources (ACSAD) (Phase IV):

- [http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/TZ/Acsad\\_dss/dss\\_fb\\_en.html](http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/TZ/Acsad_dss/dss_fb_en.html)
- TERMICOLD S.A. de C.V. (2006). *Estudio de identificación para localizar sitios de almacenamiento en la cuenca alta del río Sonora y río San Miguel Horcasitas.*
- Trescott, P., Pinder, G., & Larson, S. (1980). *Finite-difference model for simulation in two dimensions with results of numerical experiments - Chapter 1.* U.S. Geological Survey.
- U.S. Geological Survey. (2013). *Ground Water and Surface Water A Single Resource--USGS Circular 1139.* Obtenido de Natural processes of groundwater and surface-water interaction: [http://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/hdocs/natural\\_processes\\_of\\_ground.htm](http://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/hdocs/natural_processes_of_ground.htm)
- U.S. Geological Survey. (s.f.). *MODFLOW–200, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model.*
- Universidad de Sonora. (2004). *Actualización del estudio geohidrológico de las subcuencas de los ríos Sonora, Zanjón, San Miguel y Mesa del Seri-La Victoria y cuenca Bacoachi.*
- Universidad de Sonora. (2005). *Estudio de piezometría y evolución de los niveles de la cuenca media y alta del río Sonora y río Bacoachi.*
- Universidad de Sonora. (2006). *Estudios de piezometría y evolución de niveles en la cuenca media y alta del río Sonora.*
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2006). *Estudio sobre las normas de operación en las presas-acuíferos de la cuenca del río Sonora.*
- Valencia Vargas, J. C., Díaz Nigenda J. J., Vargas Martínez L. (2006). *La gestión integrada de los recursos hídricos en México: Un nuevo paradigma en el manejo del agua*, 213 - 257.
- Vega Granillo, E., Cirett Galán, S., de la Parra Velasco, M., & Zavala Juárez, R. (2011). *Hidrogeología de Sonora, México.* Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Geología.
- Waelti, C., & Spuhler, D. (s.f.). *Sustainable sanitation and water management.* Obtenido de Conjunctive Use: <http://www.sswm.info/content/conjunctive-use>
- Ward, G. (2013). *Hydrological indices and triggers, and their application to hydrometeorological monitoring and water management in Texas.* Austin: Center of Research in Water Resources - The University of Texas .
- William Shelton, C. (2011). *An analytical and numerical investigation of stream/aquifer interaction methodologies.* Faculty of Washington State University.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 – A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model, Part 1: Model Characteristics. *International Water Resources Association*, 30(4), 487-500.
- Yeomans Galli, Laura (2004). *Modelos hidrológicos en la gestión integrada de cuencas.* CIVITEC

## **ANEXO 1**

---

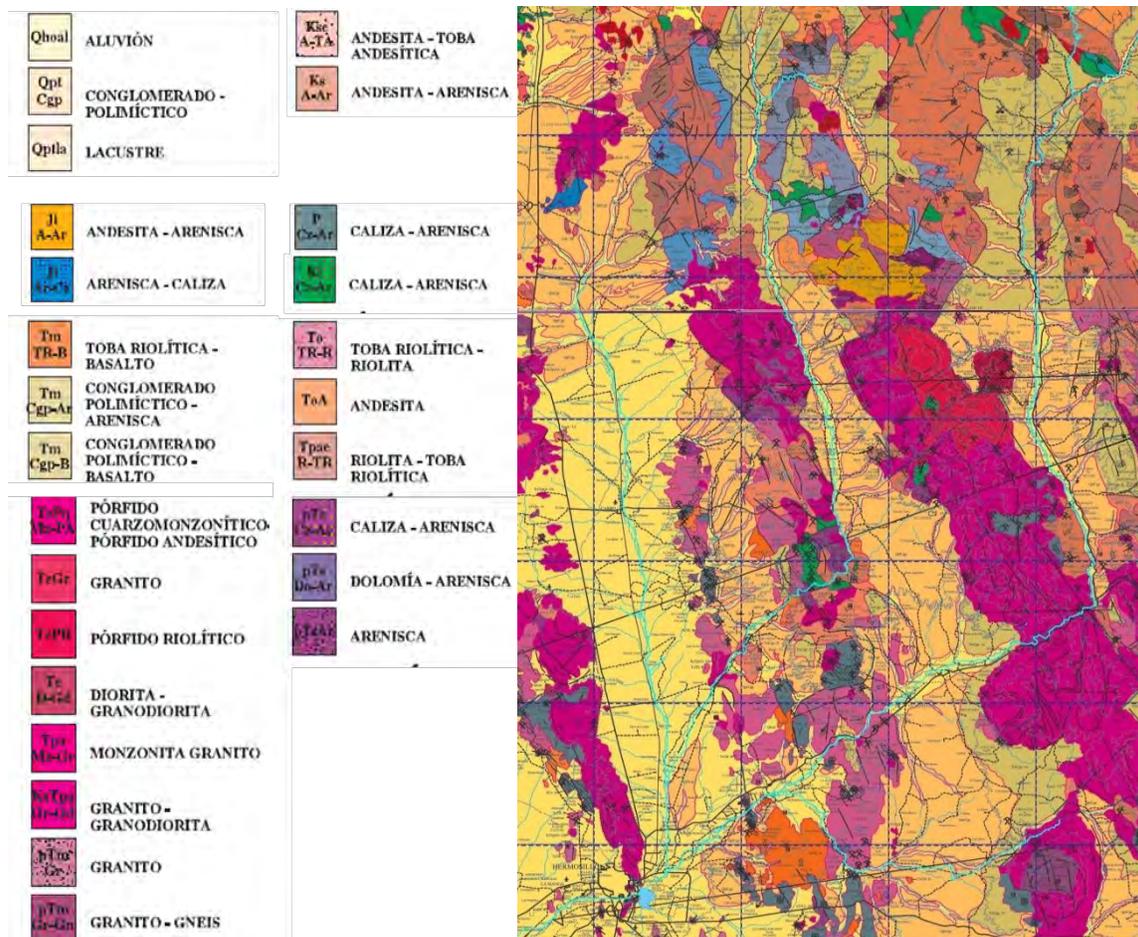
**A.1. GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA**

Los trabajos de recopilación de información relacionados con la geología, geofísica e hidrogeología del área de estudio, permiten caracterizar las unidades acuíferas que existen dentro de la zona de interés. La consulta de estudios existentes incluyen distintas instituciones, entre las que destacan el Servicio Geológico Mexicano, el Instituto de Geología de la UNAM, la Comisión Estatal del Agua de Sonora y la Universidad de Sonora.

**A.1.1. Marco geológico regional**

En la zona de estudio predomina una geología compuesta de afloramientos de calizas de mármol de la edad Paleozoica, afloramientos que componen la formación barranca que consisten en clásticos, conglomerados cuarcíferos y alternancias de lutitas y areniscas, así como afloramientos de rocas volcánicas (andesitas).

Se observa también dentro de la zona de interés, afloramientos de batolitos graníticos que son considerados como el basamento regional de la cuenca. También preexisten afloramientos de rocas volcánicas pertenecientes al Terciario, constituidos por riolitas y alternancias de tobas y derrames, así como afloramientos de basaltos del Terciario Superior que algunas veces se localizan en las partes altas de la Sierra.



*Figura A.1-1 Geología de la zona de estudio*

Algunas formaciones en los valles intermontanos, están constituidos por clásticos tales como la formación Baucari perteneciente al Terciario y sedimentos recientes de origen aluvial y fluvial principalmente, y en menor extensión por sedimentos de origen eólico.

#### **A.1.1.1. Estratigrafía**

Las rocas expuestas en la región, siguen la secuencia que se describe a continuación, desde la unidad más antigua hasta la más reciente. La integración se realiza a partir de cartas geológicas, cartas geológicas - mineras y algunos estudios de exploración realizados de forma puntual en la zona de estudio.

#### **Paleozoico**

Las rocas más antiguas que afloran en el área, son las correspondientes al tipo Paleozoico. Por su antigüedad, estas rocas se encuentran cubiertas por depósitos más jóvenes o muy erosionados, por lo cual sus afloramientos se encuentran distribuidos en poca proporción con respecto a la columna geológica del área. Refiriéndose a éstas, en estudios realizados por el Instituto de Geología de la UNAM, se nombran como unidades del Paleozoico Metamórfico, en tanto que en estudios realizados en el año 1970 se les identifica como cuarcitas y calcarenitas con cierto grado de metamorfismo. Esta descripción coincide con la realizada por Carl Fries Jr. (1962), para Petróleos Mexicanos, en el que se refiere a ellas como capas de calizas con pedernal e intercalaciones de cuarcita y rocas pizarrosas correspondientes al Paleozoico Inferior.

La ocurrencia de estos afloramientos Paleozoicos en forma lineal, se debe probablemente a los movimientos originados hacia fines del Mesozoico y principios del Terciario, que elevaron el bloque tectónico sobre el que se encontraban estos afloramientos, por lo que actualmente pueden encontrarse expuestos sobre una traza de falla. Por sus características físicas de compacidad, estas rocas son de naturaleza impermeable.

En las inmediaciones de Hermosillo (cerros Tecoripa, La Campana, La Cementera, El Molinito, Santa Gertrudis, Lomas el Rayón y Sierra de Leyva); de acuerdo con Rodríguez (1981), se tienen secuencias constituidas principalmente de calizas y brechas metamorfoseadas de color gris verdoso a gris oscuro con estratificación mediana a gruesa, que localmente presenta un aspecto masivo debido al metamorfismo de contacto que la afecta.

Así mismo se reporta una secuencia compuesta de calizas y areniscas del Paleozoico Inferior, la cual aflora en los poblados de: San José de Baviácora (sureste), Ures (oeste), San Miguel de Horcasitas (noroeste), Carbó (este), La Junta (sureste y suroeste), Rancho Viejo y Molino de Camou (ambos en su porción sureste).

#### **Mesozoico**

Sobreyaciendo a las rocas del Paleozoico, se encuentran las correspondientes al Mesozoico, que tienen una distribución muy restringida y están representadas por sedimentos clásticos del Grupo Barranca, cuya edad ha sido asignada al Triásico y por calizas y areniscas del Cretácico Inferior. Los afloramientos de rocas triásicas se encuentran expuestas en el extremo noreste de la cuenca y los del Cretácico medio en su porción sur.

Hacia esta misma era y a fines del Periódico Cretácico, tuvo lugar la aparición de las rocas plutónicas representadas por granitos y granodioritas que intrusionaron a las rocas Paleozoicas y del Mesozoico. Estas masas intrusivas tienen una extensa distribución en el área, sobre todo en la parte oriental y central donde forman cadenas montañosas.

El conjunto de rocas del Paleozoico y Mesozoico descritas en los párrafos anteriores, constituyen el basamento geológico regional; sobre ellas, se depositó una potente columna de sedimentos Cenozoicos, que transformó notablemente sus propiedades físicas debido al peso ejercido sobre ellas, anulando prácticamente la permeabilidad intersticial de los sedimentos y sellando las fracturas de los granitos y calizas.

### **Cenozoico (Terciario)**

Las rocas del Cenozoico son las que tienen mayor distribución horizontal en el área de estudio, ya que entre rocas sedimentarias y volcánicas cubren aproximadamente dos terceras partes de la superficie de la cuenca. Las rocas volcánicas están compuestas por emisiones lávicas de naturaleza ácida e intermedia como son riolitas y andesitas. Casi contemporáneo con estas emisiones lávicas, se dio lugar a la formación de las tobas volcánicas que afloran en la porción norte de la cuenca.

También se reportan rocas sedimentarias clásticas por Dumble (1900) y King (1939), que afloran principalmente a lo largo de toda la cuenca y corresponde a conglomerados polimícticos; en algunos lugares afloran areniscas del mismo evento y que pertenecen a la parte distal del abanico aluvial.

Dentro del grupo de rocas Cenozoicas, específicamente de la época Terciaria, se encuentran expuestos enormes espesores de conglomerados continentales de la formación Baúcarit, nombrada así por King (1939) y quién distinguió dos miembros en esta unidad; el superior, que consiste de arenas, arcillas y conglomerados poco consolidados y el inferior que se compone de conglomerados bien consolidados. Esta unidad aflora en los márgenes de las montañas altas y medias, forman lomeríos altos y con grandes acantilados a las márgenes de los ríos.

### **Cenozoico (Cuaternario)**

Estas secuencias corresponden a depósitos aluviales de granulometría y composición sumamente diversas. Su granulometría varía de acuerdo a la cercanía o lejanía de donde se encuentra la roca madre y están constituidas por gravas, arenas y limos, que bordean las montañas altas y medias. Las amplias planicies aluviales de las porciones central y occidental están conformadas por este tipo de depósitos; en ellas se han desarrollado terrazas aluviales ocasionadas por eventuales rejuvenecimientos. Estas secuencias de sedimentos afloran en las partes bajas de los valles que descansan discordantemente sobre rocas más antiguas, pero en mayor proporción sobre rocas terciarias.

Tienen una distribución horizontal muy reducida, ya que se encuentran supeditados a los cauces de los ríos y arroyos y a las vegas y planicies de inundación de los mismos. Estos materiales aluviales y fluviales del Cuaternario, constituyen un acuífero libre de alta transmisividad y de altos valores de caudales específicos, donde quedan alojadas la mayor parte de las obras de explotación de aguas subterráneas de la cuenca estudiada.

#### **A.1.1.2. Secciones geológicas**

El contexto geológico y estratigráfico que comprende el área de estudio, es descrito a través de las secciones geológicas obtenidas a partir de la información consultada, que permite obtener algunas unidades que se distribuyen a lo largo de la cuenca desde las localidades de Ures y Topahue hasta la localidad de Arizpe, las cuales se muestran en las figuras A.1-2 y A.1-3.

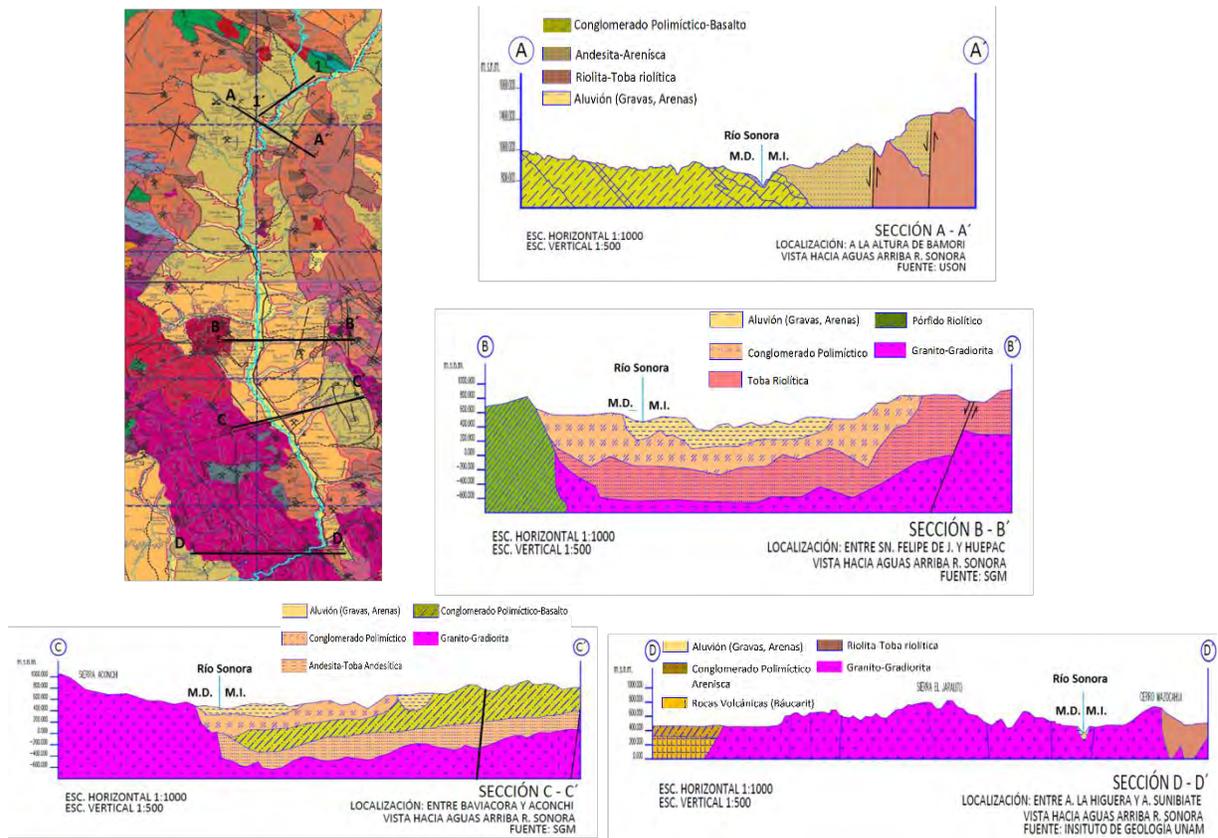


Figura A.1-2 Secciones estratigráficas Valle de Aconchi

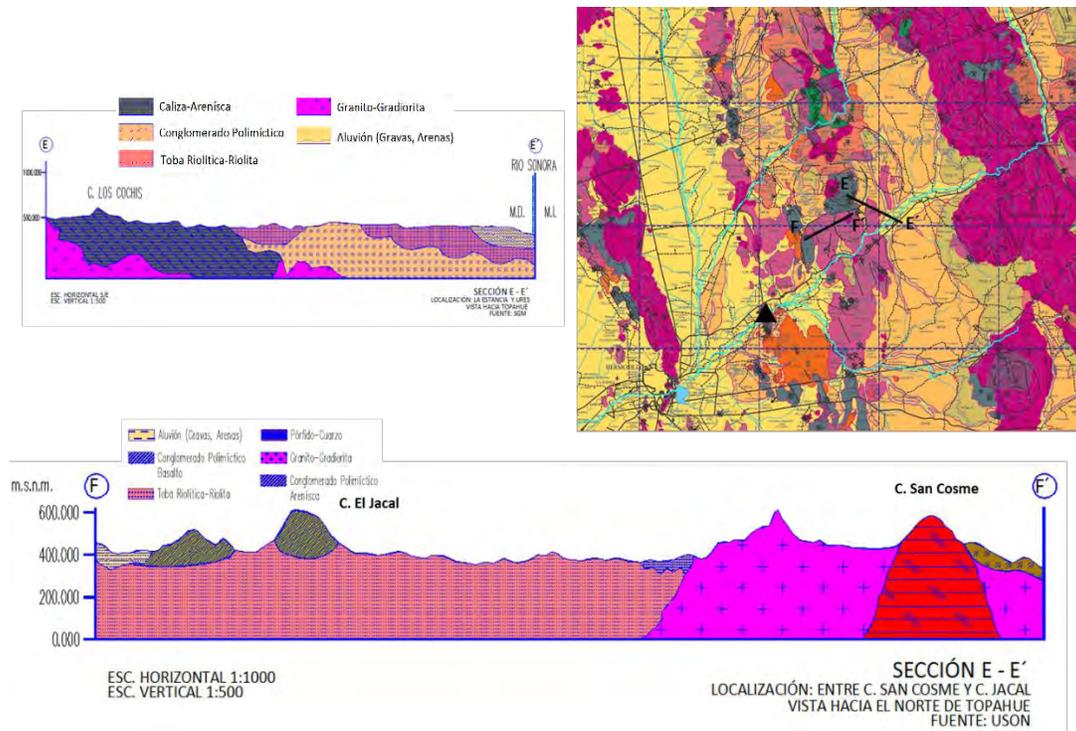


Figura A.1-3 Secciones estratigráficas Ures y Topahue

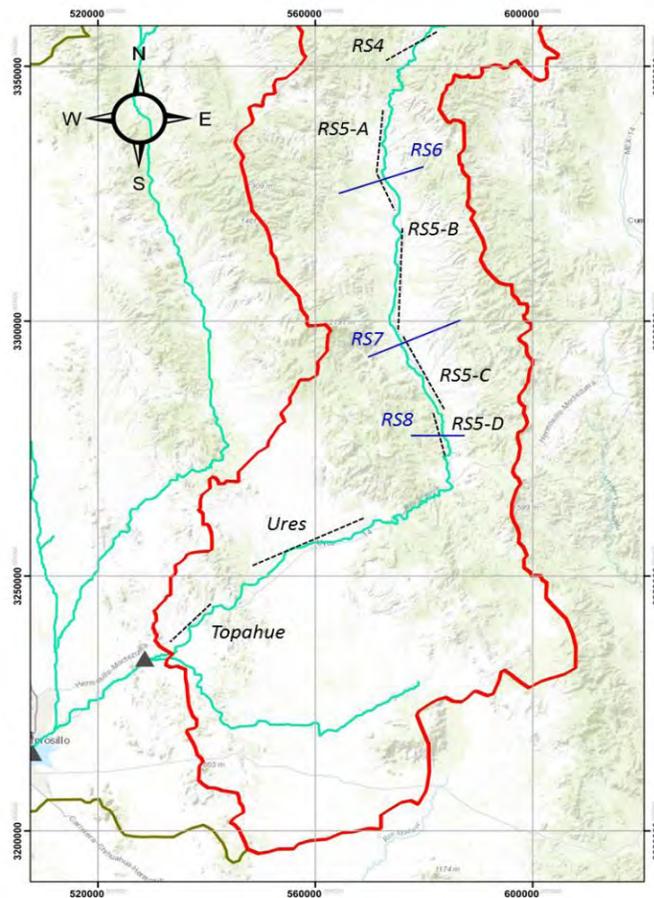
### A.1.2. Geofísica

Se dispone de una serie de estudios de prospección geofísica de aguas subterráneas, que permiten describir de forma indirecta las características del subsuelo. Estos estudios fueron elaborados por parte de la Comisión Estatal del Agua de Sonora en el año 2004, con la finalidad de definir la geometría y estructura en los acuíferos de la región, así como las principales características de los materiales que los conforman.

#### A.1.2.1. Sondeos eléctricos verticales

Mediante la metodología de Sondeos Eléctricos Verticales, se realiza una interpretación litológica de carácter especulativo que relaciona valores de resistividad de diversos materiales, entorno a los diferentes horizontes detectados en los sondeos. Esto permite inferir litologías de acuerdo a condiciones fisiográficas y geológicas de cada área, basándose primordialmente en resistividades que caracterizan a cada material.

En lo que respecta al área situada en el Valle de Aconchi, se realizaron un total de 55 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) distribuidos en 3 secciones transversales al cauce del río y 5 perfiles longitudinales paralelos al mismo. Se distribuyen a lo largo de una longitud aproximada de 123 km que van desde la localidad de Arizpe hacia Mazocahui, en dirección Norte a Sur. La separación entre sondeos es del orden de 1.5 a 2.5 km.



**Figura A.1-4 Localización de Sondeos Eléctricos Verticales**

Las secciones inferidas en el valle se presentan en las figuras A.1-5 a A.1-7. En estas secciones se presenta una caracterización de los materiales que conforman las distintas litologías de la región.

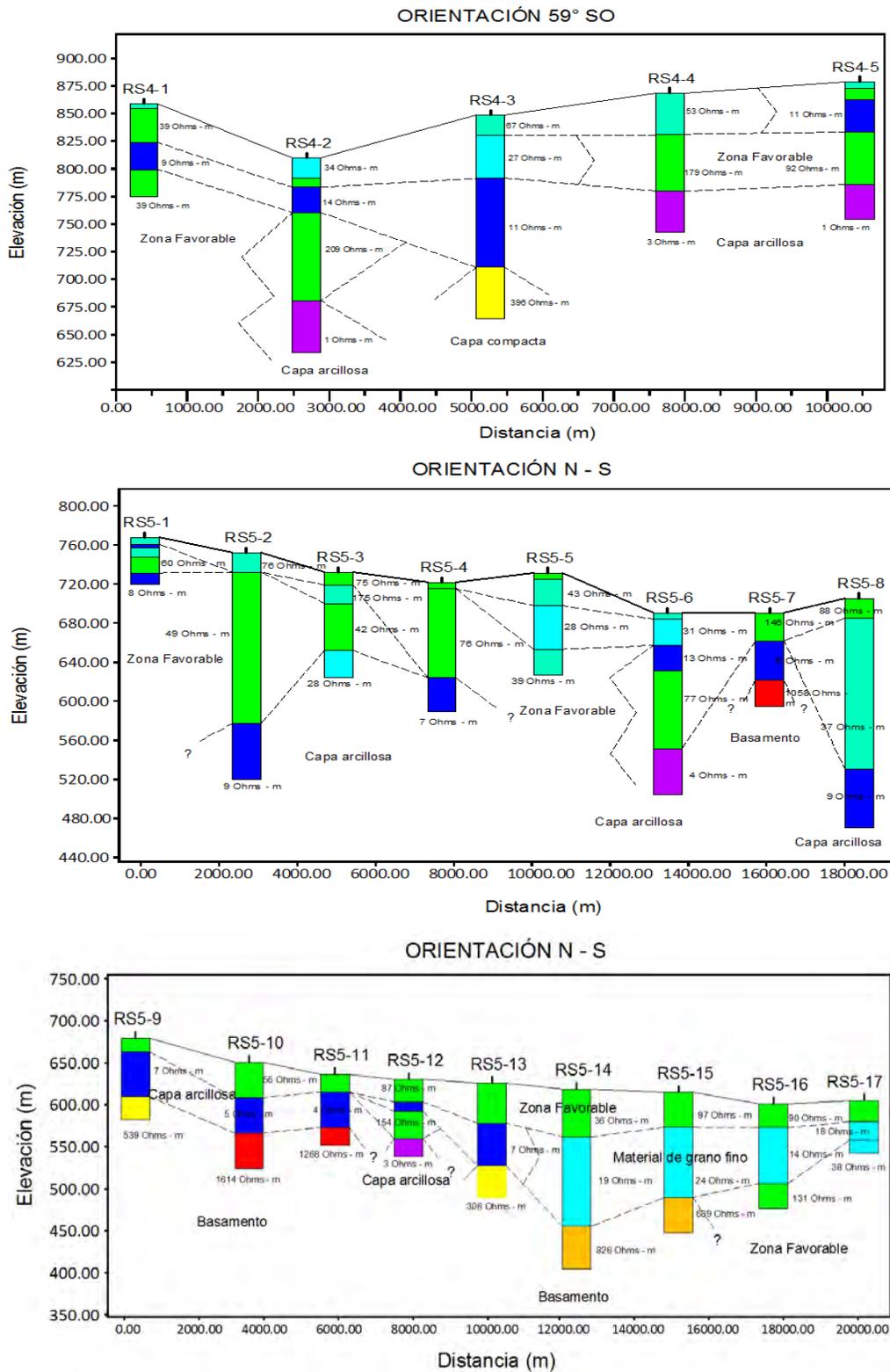


Figura A.1-5 Perfil geoelectrico RS4, RS5-A y RS5-B

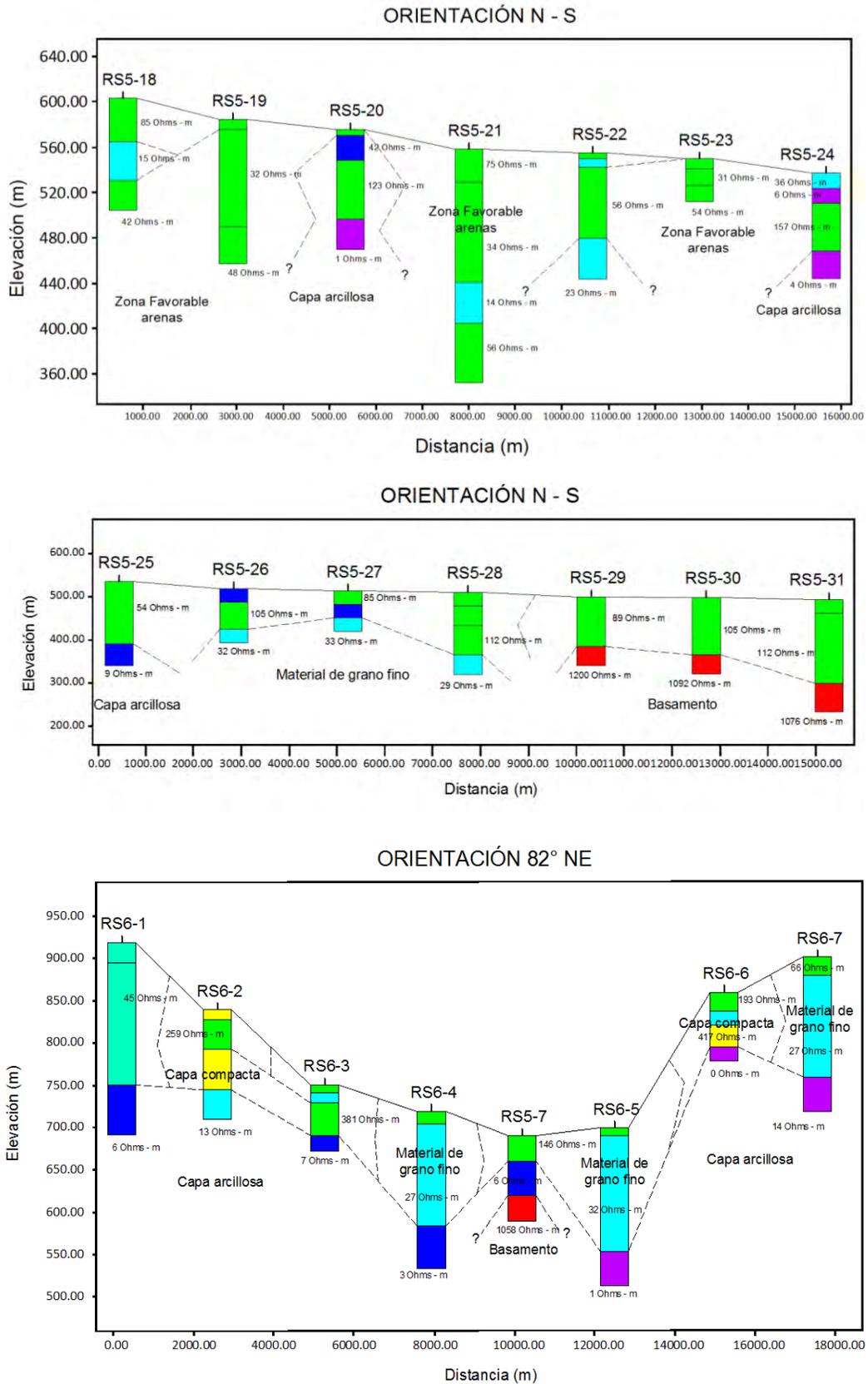


Figura A.1-6 Perfil geoelectrico RS5-C, RS5-D y RS6

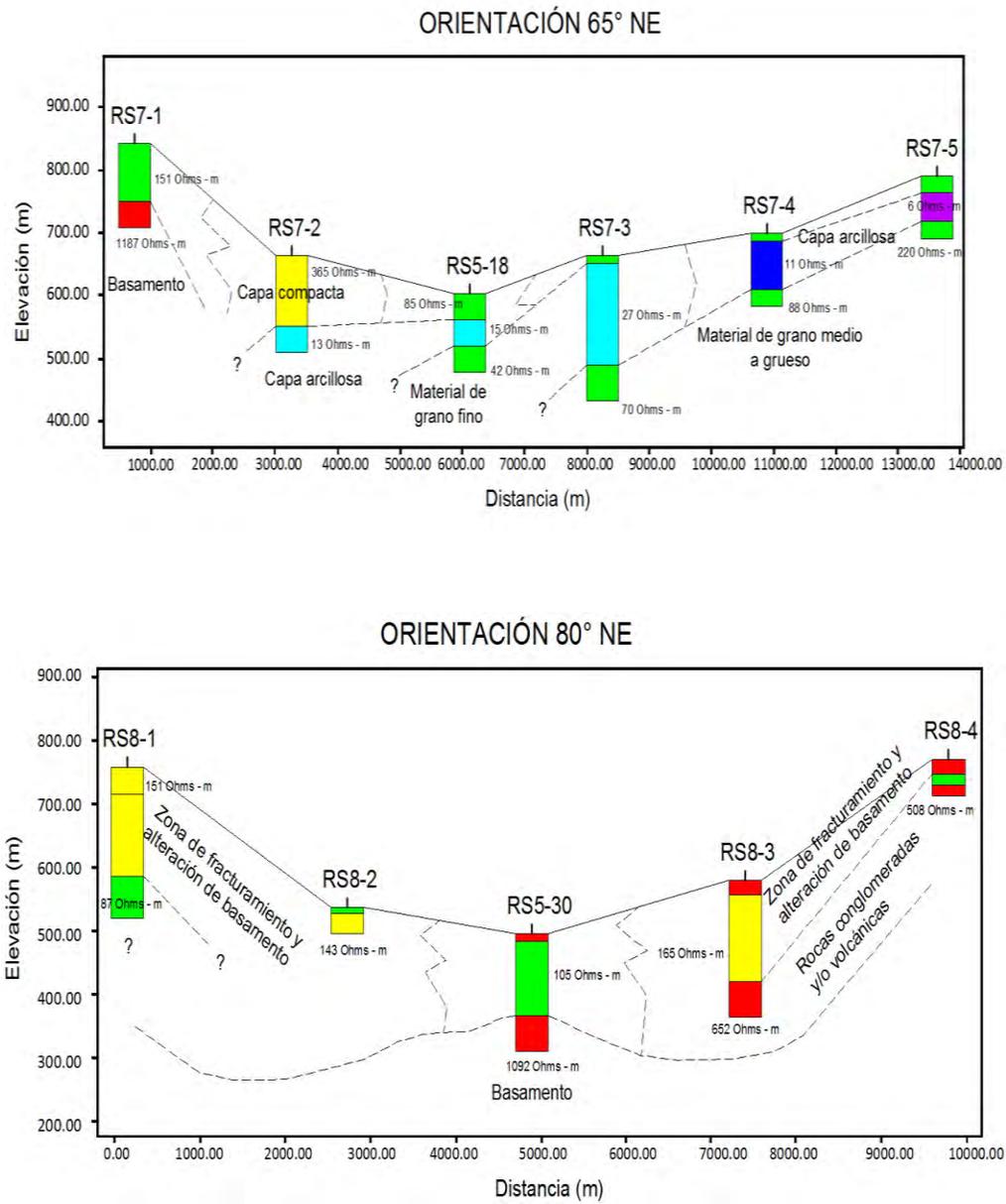


Figura A.1-7 Perfil geoelectrico RS7 y RS8

Lo que respecta a la región de Ures y poblados aledaños, se realiza un levantamiento de 35 SEV. Se presenta una sección general con rumbo SW y paralela a la margen derecha del cauce del río Sonora, constituida por un total de 9 sondeos espaciados a una longitud de 21.5 Km. La figura A.1-8, muestra la caracterización de las litologías obtenidas a partir de dichos levantamientos.

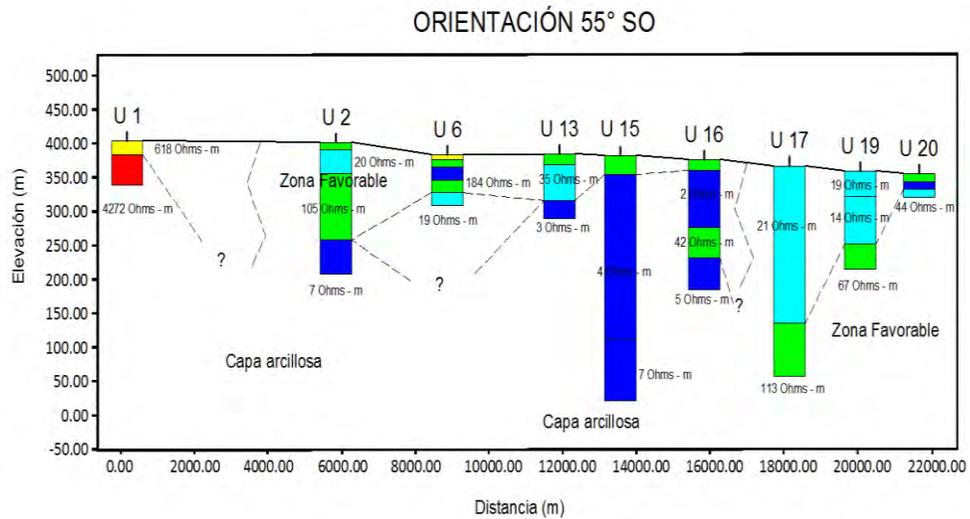


Figura A.1-8 Perfil geoelectrico Ures

Finalmente, en la zona comprendida entre el poblado de San José de Gracia y Topahue, se realizan 12 SEV cercanos al cauce del río, que permiten obtener una sección representativa del área. Esta sección tiene un rumbo SW y una longitud aproximada de 5.1 km. La litología se presenta en la figura A.1-9.

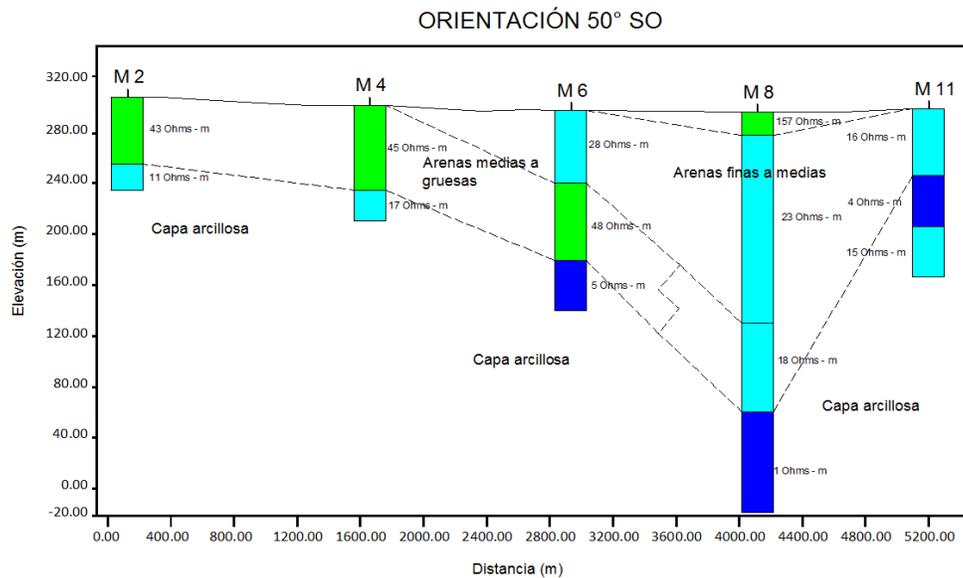
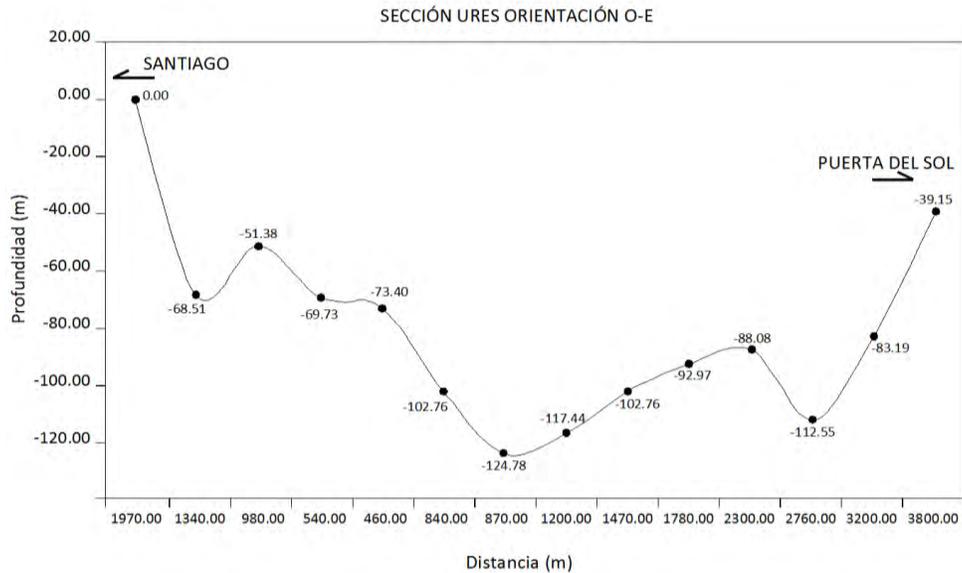


Figura A.1-9 Perfil geoelectrico Topahue

**A.1.2.2. Perfiles gravimétricos**

La elaboración de perfiles gravimétricos, permite interpretar las características de la profundidad de basamento en cuencas de tipo sedimentarias. Este método se emplea en algunas zonas de la cuenca del río Sonora con la finalidad de identificar cuerpos rocosos bajo los sedimentos que conforman los suelos aluviales de la región.

Se dispone de una sección en perfil gravimétrico en las inmediaciones de Ures que presenta una longitud de 3.8 km, con un espaciamiento promedio de 250 m entre los puntos levantados. La orientación del levantamiento es en el sentido E-O desde el poblado de Santiago hasta la localidad de Puerta del Sol. Esta sección representa una configuración del basamento muy irregular con espesores que se profundizan hacia el centro de la misma, figura A.1-10.



*Figura A.1-10 Sección gravimétrica Ures*

### A.1.2.3. Configuración del basamento impermeable

Desde la perspectiva hidrogeológica, las capas de mayor importancia en las unidades acuíferas identificadas corresponden a las constituidas por suelos y terrazas aluviales. A partir de esto se define la configuración del basamento impermeable para los 3 acuíferos de la región, como puede observarse en la figura A.1-11.

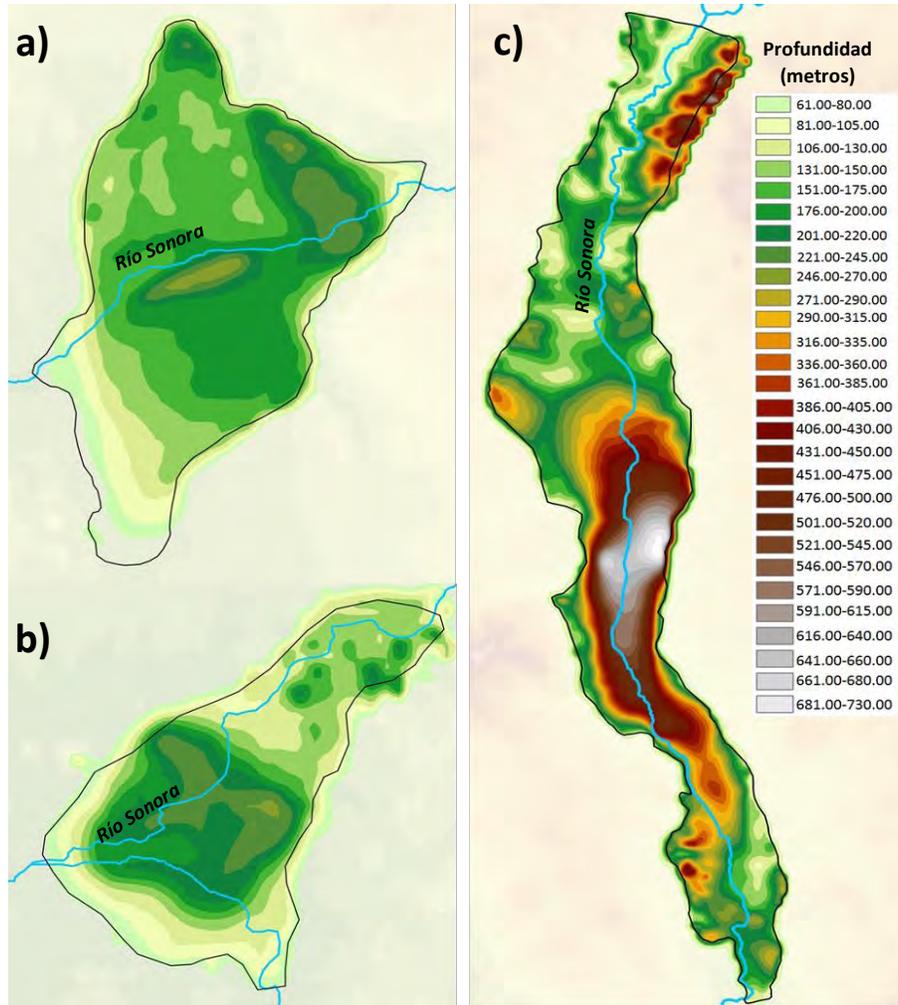


Figura A.1-11 Profundidad del basamento impermeable a) Valle de Ures, b) Topahue y c) Valle de Aconchi

## **ANEXO 2**

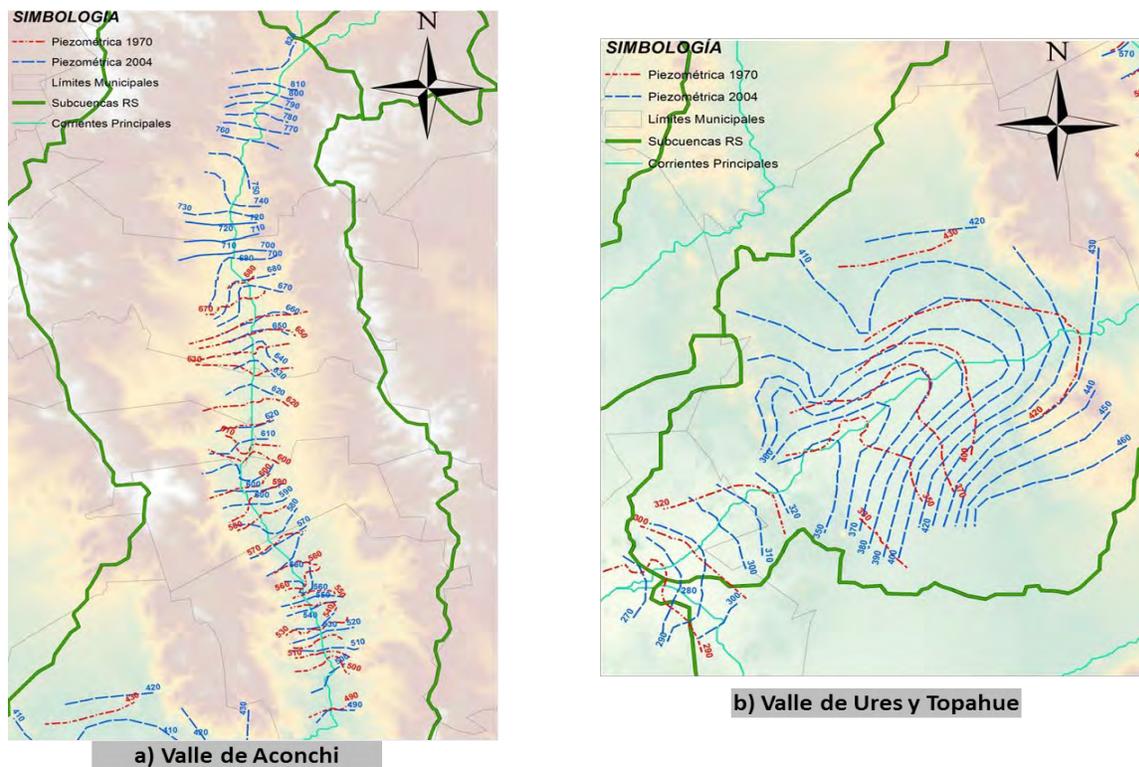
---

## A.2. PIEZOMETRÍA

### A.2.1. Observaciones históricas

En el año 1970 la empresa Ariel Construcciones S.A., realiza un censo de aprovechamientos hidráulicos entre los meses de septiembre a octubre que incluye el levantamiento en campo de 194 pozos de bombeo. Dicho levantamiento proporciona información de las características principales de cada pozo, tales como: profundidad de carga estática, profundidad de carga dinámica y gasto de extracción. La información consultada se sometió a un proceso de georreferenciación de las coordenadas X Y, con el apoyo de un Sistema de Información Geográfica y Modelos de Elevación Digital del INEGI; esto en virtud de que sólo se cuenta con mapas impresos de la localización de los pozos levantados. A partir de los datos digitalizados, se efectuó una configuración de las líneas de igual elevación estática mostradas en la figura A.2-1.

Por otro lado, la Universidad de Sonora elabora en septiembre del año 2004 un censo de aprovechamientos hidráulicos que incluye el levantamiento de 118 pozos de bombeo. Contrario al levantamiento efectuado en 1970, se cuenta con una base de datos digitalizada en la que se incluye la georreferenciación de los mismos.



**Figura A.2-1 Elevación del nivel estático para los años 1970 y 2004 a) Valle de Aconchi y b) Valle de Ures y Topahue**

### A.2.2. Evolución piezométrica

Se realizan algunas apreciaciones con relación a la evolución de los niveles piezométricos comparando entre sí las diferencias de niveles en los pozos censados en 1970 con respecto a los de 2004, que son mostrados en la figura A.2-2.

En el valle de Aconchi, se observa un comportamiento de los niveles del acuífero que infiere un almacenamiento estable en términos de explotación, identificando algunas zonas en las que se tienen abatimientos del orden de los 6 metros, y en otras con recuperaciones de hasta 8 metros. Por otro lado, contrario a lo que se presenta en la región anterior, en los pozos situados dentro del valle de Ures y en la localidad de Topahue, se identifica que los niveles estáticos han decrecido generando abatimientos hasta de 20 metros. Esta zona es una de las de mayor vulnerabilidad en términos de sobreexplotación debido a que se tiene conocimiento de un incremento importante en los volúmenes de extracción en los últimos años, principalmente para usos destinados a la agricultura.

La alta permeabilidad en la zona tiene una influencia importante en el comportamiento natural de vaciado y llenado de las unidades acuíferas; además, la mayor parte de los aprovechamientos hidráulicos relacionados con pozos de extracción, se sitúan sobre la capa de materiales de tipo aluvial, cuyas profundidades de extracción van desde 6 a 25 metros.

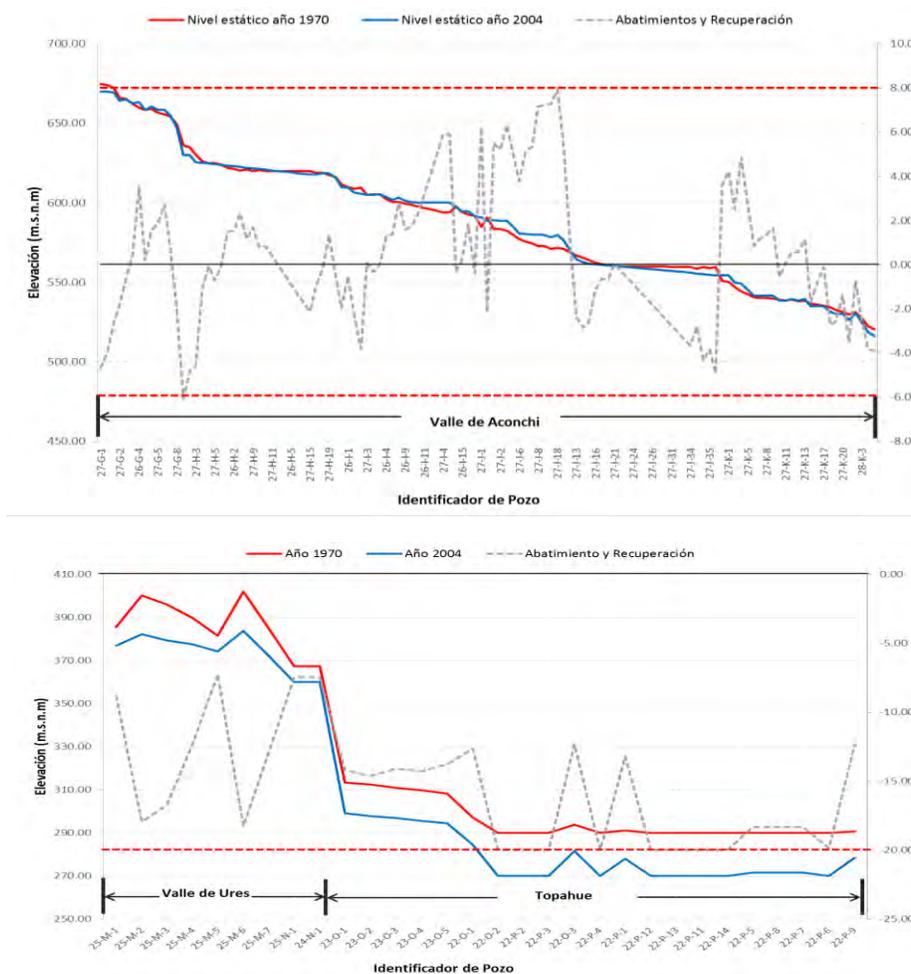


Figura A.2-2 Evolución del nivel estático en el periodo de 1970-2004

En lo que respecta al flujo en la región, hay una tendencia del mismo en dirección norte a sur que se acentúa en la zona del valle de Aconchi. En relación a los acuíferos contiguos, Ures y Topahue, existe una tendencia del flujo en el sentido noreste a suroeste.

También se logra identificar algunos rasgos que caracterizan el comportamiento del río Sonora y el acuífero valle de Aconchi, en virtud de que existen tramos del río donde el acuífero funciona como afluente, es decir, zonas donde el acuífero aporta agua al río. Esto se debe a factores que relacionan las litologías impermeables, el estrechamiento del valle en algunas zonas y la profundidad somera del basamento regional. En Ures y Topahue existe un fenómeno similar que se refleja en el punto más bajo del río. Lo anterior supone que existe una conexión hidráulica entre los acuíferos que se realiza de manera superficial a través del cauce del río y que se refleja por los escurrimientos observados en épocas de estiaje.

Es importante señalar que al no contar con una medición precisa de las coordenadas X Y en el censo de 1970, se puede llegar a tener cierto grado de error en los niveles piezométricos, sin embargo, en términos generales se tiene una representación aceptable de la evolución de los almacenamientos en los últimos 35 años.

Dado la limitante expuesta anteriormente en cuanto a información histórica se refiere, la calibración de los modelos estará acotada a los periodos de observación de 1970 y 2004.

## **ANEXO 3**

---

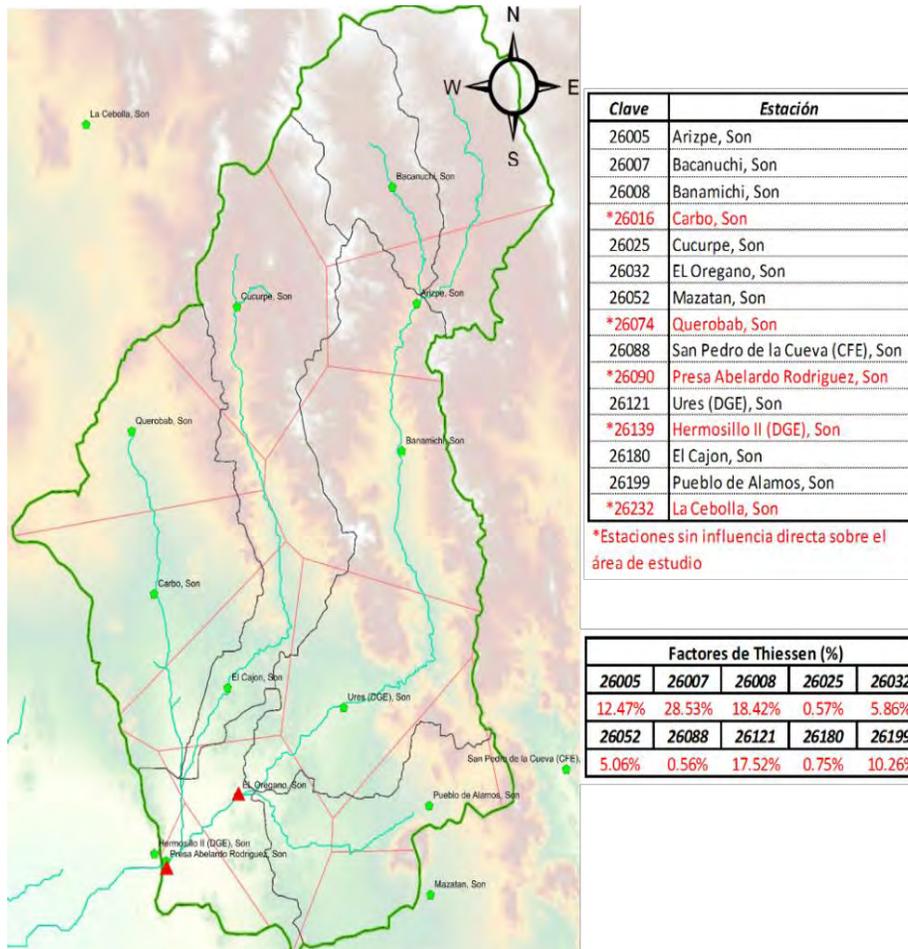
**A.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA**

En cuanto a la información relacionada con registros de precipitación y temperatura, se logran identificar sobre el área de estudio un total de quince estaciones climatológicas que permiten recopilar información a escala diaria de estas variables.

Con relación a su distribución, de forma directa y en virtud de que se localizan dentro de la cuenca de estudio, se utiliza el registro contenido en diez estaciones. Las cinco estaciones restantes son utilizadas con la finalidad de comprobar y validar registros que se muestren inconsistentes. Su localización en el área de estudio se presenta en la figura A.3-1.

La revisión consiste en identificar aquellas mediciones que se muestran atípicas con respecto al comportamiento medio observado dentro de los registros de la estación. En ese sentido, se compara la magnitud y ocurrencia del evento con registros de estaciones próximas. En algunos casos fue necesario comprobar la ocurrencia de los eventos con observaciones de registros hidrométricos.

En aquellos meses en que fue ineludible realizar el relleno de información por falta de la misma, se empleó la metodología de la distancia inversa para la extensión de los registros de la serie.



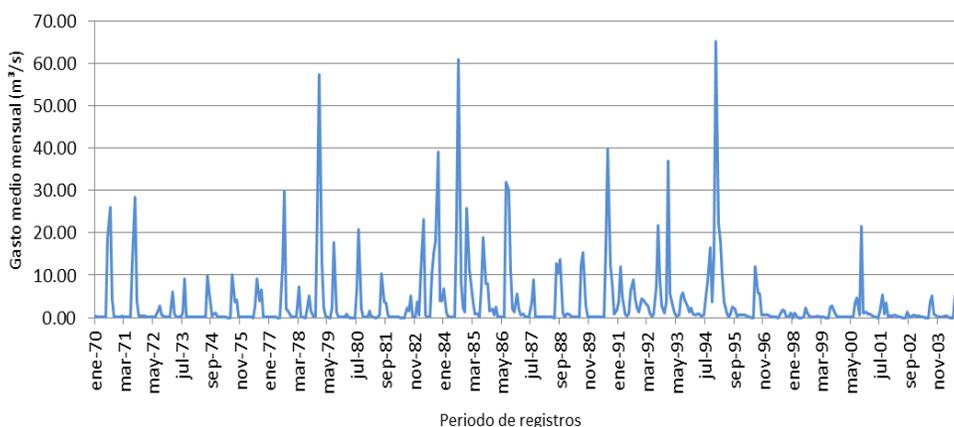
**Figura A.3-1 Localización de estaciones climatológicas e hidrométricas**

**A.3.1. Procesamiento de la información hidrométrica**

Sobre la corriente principal del río Sonora se identifica la estación hidrométrica el Orégano localizada aguas arriba de la presa el Molinito y aguas debajo de la localidad de Topahue. En las cercanías a este punto, sobre el río San Miguel que es afluente del río Sonora, se localiza la estación hidrométrica el Cajón.

Partiendo de los límites establecidos dentro de la cuenca alta y del punto donde se concentran los escurrimientos drenados de esta superficie, se toma en cuenta los registros históricos contenidos en la estación hidrométrica el Orégano.

De la información obtenida se logra identificar dos periodos de registro distintos, el primero que va del año 1942 a 1991 y el segundo de 1992 a 2011. Esto último en virtud de que la estación fue desplazada de su sitio original por la construcción de la presa el Molinito en el año 1992, y que originalmente se localizaba en una sección del río que actualmente se encuentra inundada por el embalse de la presa. Esto implicó que las mediciones dejaran de tomar en cuenta los escurrimientos drenados por el arroyo la Junta, restando a la totalidad de la cuenca un área aproximada de 2000 km<sup>2</sup>.



**Figura A.3-2 Hidrograma mensual de escurrimientos observados en la estación el Orégano (1970-2004)**

En la figura A.3-2 se muestra el hidrograma mensual de escurrimientos observados en la estación el Orégano para un periodo de registro de 1970 a 2004. Dichos registros de gastos medios se sometieron a una revisión a escala mensual, que a su vez permitió identificar años que carecen de información. Al conjunto de datos faltantes, se le sometió a un tratamiento de relleno y extensión de series, basado en una correlación con información contenida en la estación hidrométrica el Cajón.

**A.3.2. Precipitación media acumulada**

La precipitación media acumulada se estima en intervalos de tiempo mensual y a partir de la región de influencia de las estaciones seleccionadas, definidas con el método de los polígonos de Thiessen.

El procedimiento consiste en realizar inicialmente una estimación de la precipitación media a escala diaria sobre la cuenca, que posteriormente se acumula para obtener la precipitación media mensual. En la tabla siguiente se muestran los registros de lluvia media obtenidos a partir de este procedimiento.

*Tabla A.3-1 Series mensuales de la precipitación media para el periodo 1970 a 2004*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1970	10.951	9.391	21.646	3.601	0.000	28.544	129.473	105.698	36.658	6.606	0.000	0.000
1971	1.077	13.265	0.000	0.003	0.000	11.755	159.498	106.589	55.732	49.693	13.346	33.102
1972	1.056	0.000	1.236	0.000	28.550	44.338	70.340	109.928	40.406	70.976	8.016	14.727
1973	27.404	59.786	25.079	0.000	23.034	11.330	108.651	88.321	10.131	0.000	0.763	0.000
1974	48.498	0.000	2.051	0.000	1.215	24.685	155.039	74.940	44.848	29.790	26.906	2.772
1975	41.425	0.099	14.619	3.182	0.000	2.788	213.605	43.687	51.768	0.158	4.303	14.655
1976	4.698	31.463	1.206	10.434	3.937	12.825	116.892	52.362	57.818	9.230	22.838	11.101
1977	39.024	0.000	2.664	3.280	2.433	4.507	187.356	121.721	23.565	33.438	1.287	9.988
1978	28.416	73.047	39.583	0.006	1.617	7.883	143.372	76.792	34.369	35.760	45.625	80.955
1979	109.848	5.157	18.963	0.000	5.373	9.365	140.433	66.074	27.320	0.000	1.748	6.143
1980	5.005	68.636	3.454	0.666	0.000	25.485	109.209	101.370	16.447	1.006	1.958	4.413
1981	65.139	25.307	33.288	15.899	1.998	30.998	151.515	69.051	73.599	17.507	34.549	0.000
1982	26.277	0.011	0.598	0.603	3.560	0.000	97.876	81.233	42.686	0.891	36.252	89.635
1983	27.642	29.801	68.949	16.025	0.356	1.577	148.198	112.073	150.967	69.569	34.759	25.460
1984	42.504	2.273	0.000	5.353	18.470	15.285	196.741	163.695	37.226	16.970	25.823	118.013
1985	40.291	24.341	3.735	27.372	0.000	7.239	124.312	100.931	52.316	32.533	20.698	5.992
1986	14.271	34.701	9.032	3.707	15.977	26.986	159.984	139.873	49.122	11.301	13.632	80.666
1987	2.092	23.899	0.910	3.656	19.687	2.246	60.536	96.706	32.971	6.141	10.661	37.576
1988	21.837	1.361	12.253	18.368	0.112	8.490	157.474	103.442	69.869	44.283	0.207	45.469
1989	29.769	10.478	5.324	0.000	6.443	4.619	135.258	130.624	39.656	26.081	1.394	22.052
1990	18.246	22.467	5.960	0.034	0.008	41.140	200.373	111.725	91.775	38.165	28.049	49.716
1991	15.476	54.698	20.410	0.000	0.000	2.598	52.799	130.330	21.574	6.658	17.132	66.620
1992	31.779	28.886	41.202	6.017	8.505	0.479	134.338	144.537	47.401	2.507	3.869	47.325
1993	80.149	25.160	4.376	2.990	1.164	13.675	57.122	75.037	40.304	24.432	21.061	23.472
1994	0.391	20.144	5.003	1.712	0.000	53.701	54.059	79.590	49.513	5.875	88.521	119.992
1995	14.767	55.752	8.728	0.571	0.000	0.011	36.379	90.326	53.571	17.189	22.861	3.293
1996	0.000	12.119	0.000	0.666	0.000	4.679	161.546	53.356	59.112	3.142	7.337	0.000
1997	7.505	11.413	1.766	8.403	14.903	0.058	61.974	72.925	48.237	5.045	23.334	82.279
1998	0.000	48.082	10.467	0.166	0.000	9.948	104.043	49.063	12.577	10.454	5.233	1.317
1999	0.000	0.000	0.034	0.031	0.000	23.273	131.990	90.973	35.756	10.649	0.000	2.401
2000	0.000	1.185	20.227	0.000	0.000	66.291	112.155	100.013	26.441	148.701	22.020	0.000
2001	17.704	5.120	4.828	9.386	2.453	18.167	133.056	62.629	33.817	8.599	1.526	10.716
2002	11.407	36.900	0.392	0.000	0.000	0.856	87.517	69.930	20.592	0.311	14.466	37.104
2003	0.000	26.316	8.303	1.626	0.000	3.369	109.289	114.804	29.095	18.154	13.472	11.028
2004	21.371	10.540	23.482	23.042	0.000	9.408	122.056	30.994	62.013	26.024	14.506	27.968

## **ANEXO 4**

---

## A.4. PRECIPITACIÓN EFECTIVA Y COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO

### A.4.1. Correlación lluvia - escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento depende de diversos factores asociados a la intercepción, detención superficial, almacenamiento de la humedad en el suelo, infiltración, flujo subsuperficial, evapotranspiración y percolación profunda. Éstos influyen de forma directa en la magnitud del escurrimiento que se presenta en la cuenca.

La intercepción es el primer proceso que actúa redistribuyendo y modificando la precipitación sobre el área. La cantidad de precipitación que llega a la superficie del terreno depende en gran parte de la naturaleza y de la densidad de la cubierta vegetal, o de las características de la cobertura artificial que se origina por factores de tipo antropogénicos. La cobertura, natural o antropogénica, intercepta parte de esta precipitación, reteniéndola temporalmente en su superficie de donde una porción se evapora o transpira para retornar a la atmósfera durante o después de la tormenta, o bien para escurrir de manera superficial. Por otro lado, la intensidad de la lluvia, pendiente del terreno y proximidad del nivel freático, son otros factores que influyen de manera directa en el proceso de escurrimiento.

También, los volúmenes escurridos dependen de la condición de humedad antecedente, esto se refiere a la humedad que contiene el suelo en el instante en que se presenta una tormenta. Dentro de este mismo contexto, un factor preponderante que condiciona en gran medida el escurrimiento en zonas áridas es el referido a la permeabilidad de las estructuras que forman el terreno.

Cuando el terreno es muy permeable, el sistema fluvial durante la época de estiaje provoca que el nivel de la corriente disminuya considerablemente o bien desaparezca. En ocasiones, la morfología de la cuenca permite que la corriente superficial sea abastecida por el flujo subterráneo proveniente de las aportaciones de los acuíferos aluviales. Esto último es propiciado también por la cercanía de los niveles freáticos con la superficie del terreno.

En función de lo anteriormente descrito, se realiza una estimación de la precipitación efectiva y el coeficiente de escurrimiento relacionándolo con el régimen de lluvias que dominan el área, es decir, se hace una clasificación por temporales que incluye estiaje, lluvias de verano (Julio – Septiembre) y lluvias de invierno (Diciembre – Febrero). Esto permite tomar en cuenta el efecto de la saturación y evapotranspiración de los suelos, para cada temporal definido.

Se construye una función de ajuste que estima la lámina efectiva de precipitación a partir de una correlación con la lámina de precipitación total, lámina de escurrimiento base, coeficiente de escurrimiento, y una lámina de saturación y evapotranspiración del suelo, esta última definida como la lámina a partir de la cual se genera el escurrimiento en la cuenca. Así, la expresión utilizada asume la forma:

$$Pe = (P - a)Ce + Eb \quad (A.4-1)$$

Donde:

Pe Lámina de precipitación efectiva

P Precipitación total

a Lámina de saturación y/o evapotranspiración del suelo

Ce Coeficiente de escurrimiento

Eb Escurrimiento base

A.4.2. Estimación de parámetros de ajuste

Los parámetros a, Ce y Eb que describen la ecuación A.4-1, se estiman a partir de técnicas de optimización matemática empleando el método del Gradiente Conjugado, con la finalidad de reducir el error de ajuste entre la correlación lluvia – escurrimiento.

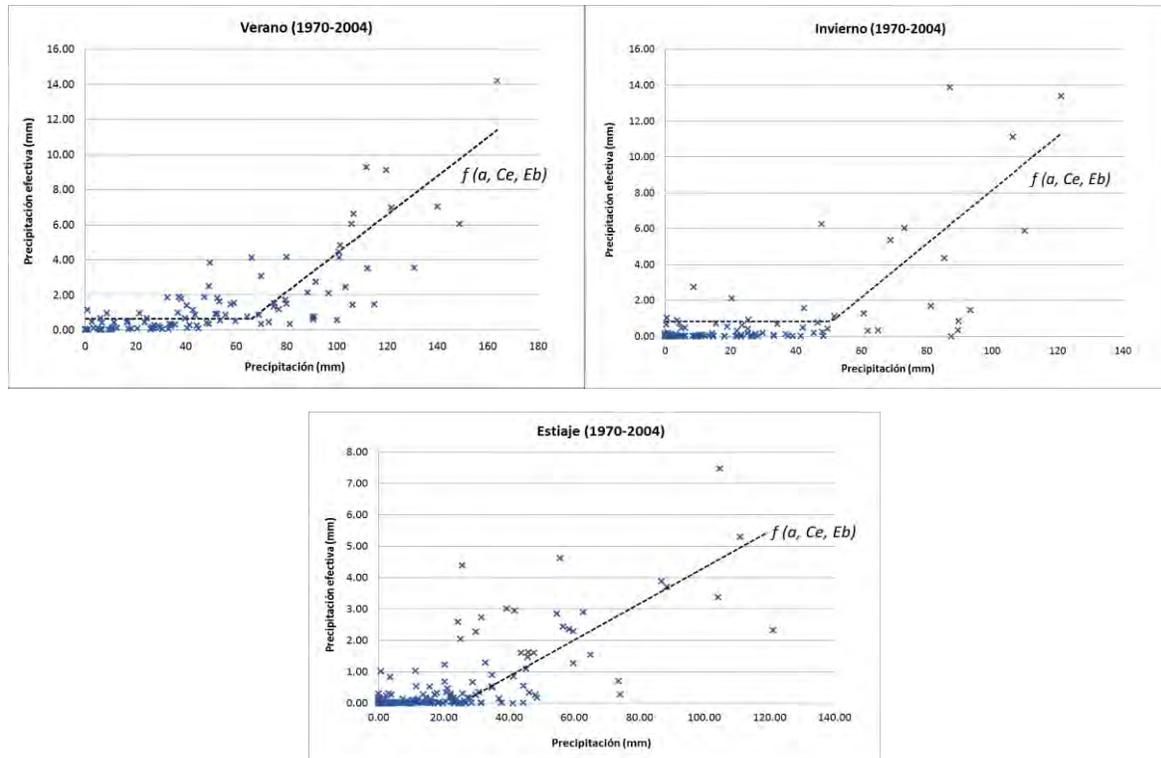


Figura A.4-1 Correlación lámina de precipitación total y precipitación efectiva

Las ecuaciones correspondientes a los distintos temporales, son representadas por las siguientes expresiones:

$$\text{Verano} \quad Pe = [(P - 72.915) * 0.09] + 0.7056 \quad (A.4-2)$$

$$\text{Invierno} \quad Pe = [(P - 51.973) * 0.15] + 0.3529 \quad (A.4-3)$$

$$\text{Estiaje} \quad Pe = [(P - 29.040) * 0.01] + 0.1144 \quad (A.4-4)$$

Cabe destacar, que en lo que respecta a la función de ajuste que relaciona el temporal de estiaje, se identifica un escurrimiento prácticamente nulo que se refleja por un coeficiente de escurrimiento bajo 0.01 (ecuación A.4-4).

Otro aspecto importante en los ajustes anteriormente descritos, es el relacionado a las lluvias que se presentan a finales de junio y principios de julio, que son de mayor intensidad pero que generan un escurrimiento mínimo. Lo anterior encuentra su explicación en que dicha precipitación se percola, logrando que el subsuelo alcance su un grado de saturación importante. El efecto consecuente es reflejado cuando tienen lugar aquellas lluvias de verano con intensidad baja, que provocan un mayor escurrimiento en la cuenca al intentar infiltrar poros ocupados por el agua anteriormente ingresada.

## **ANEXO 5**

---

**A.5. DEMANDAS DEL SISTEMA**

**A.5.1. Demandas agrícolas**

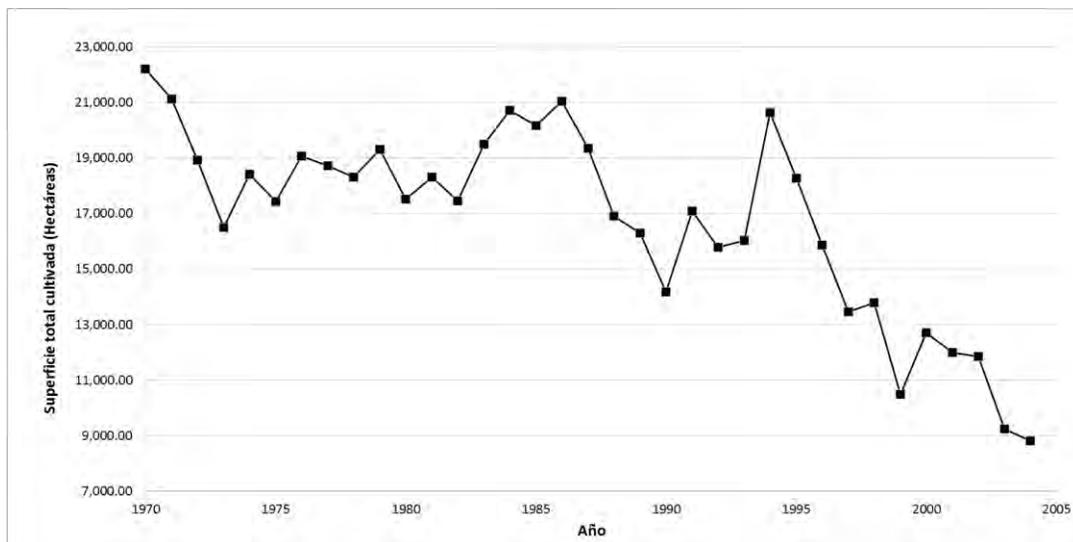
En el área de estudio se localiza una porción del distrito de riego DDR-142 Ures, que incluye a los municipios: Aconchi, Arízpe, Banámichi, Baviácora, Huépac, San Felipe de Jesús y Ures; los cuales se abastecen principalmente de las aguas subterráneas localizadas en los acuíferos Valle de Aconchi, Valle de Ures y Topahue.

Debido a la escasa información histórica relacionada a volúmenes de riego en la región, se realizó una estimación de los mismos a partir de láminas brutas medias de riego, por tipo de cultivo y por superficie regada. Para tal efecto se consultaron registros de los censos agrícolas y ejidales de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Por otro lado, se integró información correspondiente a la localidad de Topahue que se sitúa dentro de la zona de estudio pero fuera del distrito de riego de Ures.

Los cultivos identificados se dividen en cíclicos y perennes, siendo los que predominan en mayor medida los relacionados a forrajes, seguidos por los granos (maíz, trigo, sorgo, frijol) así como las hortalizas y frutales (tabla A.5-1).

La sequía que ha afectado en los últimos años a la zona, ha contribuido a un decremento en la producción agrícola, reflejado por una disminución de las superficies cultivadas en años recientes (figura A.5-1).



*Figura A.5-1 Superficie total cultivada en el periodo 1970-2004*

Tabla A.5-1 Patrón de cultivos en la región para ciclos agrícolas 1969/1970 a 2004/2005

Cultivo	Superficie cosechada (Hectáreas)											
	1969 - 1970	1970 - 1971	1971 - 1972	1972 - 1973	1973 - 1974	1974 - 1975	1975 - 1976	1976 - 1977	1977 - 1978	1978 - 1979	1979 - 1980	1980 - 1981
<b>Ciclo Otoño-Invierno</b>												
Trigo	1463	1333	1232	1122	1210	1165	1239	1224	1205	1250	1169	1205
Cártamo	62	56	52	47	51	49	52	52	51	53	49	51
Forrajes	6191	5644	5216	4748	5121	4929	5244	5179	5102	5292	4947	5100
Hortalizas	580	529	489	445	480	462	492	486	478	496	464	478
Varios	30	27								26	24	25
<b>TOTALES:</b>	<b>8326</b>	<b>7590</b>	<b>6989</b>	<b>6362</b>	<b>6862</b>	<b>6605</b>	<b>7027</b>	<b>6940</b>	<b>6836</b>	<b>7117</b>	<b>6652</b>	<b>6858</b>
<b>Ciclo Primavera-Verano</b>												
Algodón	267	280	241	199	233	216	244	238	231	248		231
Sorgo G	955	1001	863	713	833	771	872	851	827	888	777	826
Maíz	2452	2570	2217	1831	2139	1981	2241	2187	2123	2280	1995	2122
Frijol	577	604	521	431	503	466	527	514	499	536	469	499
Forrajes	5327	5584	4817	3979	4647	4303	4868	4751	4612	4954	4335	4609
Hortalizas	715	750	647	534	624	578	653	638	619	665	582	619
Varios	962	1009	870	719	839	777	879	858	833	895	783	833
<b>TOTALES:</b>	<b>11254</b>	<b>11797</b>	<b>10178</b>	<b>8406</b>	<b>9817</b>	<b>9092</b>	<b>10284</b>	<b>10038</b>	<b>9744</b>	<b>10466</b>	<b>8941</b>	<b>9738</b>
<b>Perennes</b>												
Alfalfa	1938	1110	1150	1193	1159	1177	1147	1153	1161	1143	1175	1161
Nogal	52	30	31	32	31	32	31	31	31	31	32	31
Otros	11	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>TOTALES:</b>	<b>2000</b>	<b>1146</b>	<b>1187</b>	<b>1232</b>	<b>1196</b>	<b>1215</b>	<b>1184</b>	<b>1191</b>	<b>1198</b>	<b>1180</b>	<b>1213</b>	<b>1198</b>

Cultivo	Superficie cosechada (Hectáreas)											
	1981 - 1982	1982 - 1983	1983 - 1984	1984 - 1985	1985 - 1986	1986 - 1987	1987 - 1988	1988 - 1989	1989 - 1990	1990 - 1991	1991 - 1992	1992 - 1993
<b>Ciclo Otoño-Invierno</b>												
Trigo	1166	1259	1389	1290	1405	1265	1152	1124	1026	1160	1100	1112
Cártamo		53	58	54	59	53	48	47	43	49	46	
Forrajes	4936	5329	5878	5458	5948	5356	4874	4756	4341	4912	4657	4705
Hortalizas	463	500	551	512	558	502	457	446	407	461	437	441
Varios			28	26	29	26			21		23	23
<b>TOTALES:</b>	<b>6565</b>	<b>7140</b>	<b>7905</b>	<b>7341</b>	<b>8000</b>	<b>7203</b>	<b>6531</b>	<b>6373</b>	<b>5837</b>	<b>6581</b>	<b>6263</b>	<b>6280</b>
<b>Ciclo Primavera-Verano</b>												
Algodón	216	252		263	283	254	211	200	163	214	191	196
Sorgo G	773	899	1030	941	1014	908	754	716	582	766		699
Maíz	1987	2310	2645	2417	2603	2333	1936	1838	1495	1966	1756	1796
Frijol	467	543	622	568	612	548	455	432	352	462	413	422
Forrajes	4316	5019	5747	5252	5656	5068	4205	3993	3249	4272	3815	3901
Hortalizas	579	674	772	705	759	680	565	536	436	573	512	524
Varios	780	907	1038	949	1022	915	760	721	587	772	689	705
<b>TOTALES:</b>	<b>9118</b>	<b>10604</b>	<b>11854</b>	<b>11095</b>	<b>11949</b>	<b>10707</b>	<b>8884</b>	<b>8436</b>	<b>6864</b>	<b>9026</b>	<b>7377</b>	<b>8242</b>
<b>Perennes</b>												
Alfalfa	1176	1140	1181	1127	1107	1137	1182	1193	1231	1178	1202	1197
Nogal	32	31	32	30	30	31	32	32	33	32	32	32
Otros	6	6	6	6	6	6	6	6	7	6	7	6
<b>TOTALES:</b>	<b>1214</b>	<b>1176</b>	<b>1219</b>	<b>1164</b>	<b>1142</b>	<b>1174</b>	<b>1220</b>	<b>1231</b>	<b>1271</b>	<b>1216</b>	<b>1241</b>	<b>1236</b>

Cultivo	Superficie cosechada (Hectáreas)											
	1993 - 1994	1994 - 1995	1995 - 1996	1996 - 1997	1997 - 1998	1998 - 1999	1999 - 2000	2000 - 2001	2001 - 2002	2002 - 2003	2003 - 2004	2004 - 2005
<b>Ciclo Otoño-Invierno</b>												
Trigo	1430	1230	1798	1780	1760	1540	1035	768	965	787	442	700
Cártamo		150	240	140								
Forrajes	5652	5010	4575	3520	4175	1610	4545	4356	4224	4708	4108	3900
Hortalizas	91	105	176	325	509	521	592	382	345	288	324	400
Varios		300										
<b>TOTALES:</b>	<b>7173</b>	<b>6795</b>	<b>6789</b>	<b>5765</b>	<b>6444</b>	<b>3671</b>	<b>6172</b>	<b>5506</b>	<b>5534</b>	<b>5783</b>	<b>4874</b>	<b>5000</b>
<b>Ciclo Primavera-Verano</b>												
Algodón				625								
Sorgo G	146	215	1056		320	740	280	506	590	560	235	950
Maíz	4318	490	1308	975	760	1142	770	1485	1405	1746	1465	1800
Frijol	315	420	550	140	330	190	374	101	180	175	119	200
Forrajes	6660	7987	3760	3510	3540	2095	2661	2100	1964	2422	2055	2750
Hortalizas	124	112	195	104	303	448	378	516	327	462	245	545
Varios	590	390	418	520	510	730	513	400	371	420	386	500
<b>TOTALES:</b>	<b>12153</b>	<b>9614</b>	<b>7287</b>	<b>5874</b>	<b>5763</b>	<b>5345</b>	<b>4976</b>	<b>5108</b>	<b>4837</b>	<b>5785</b>	<b>4505</b>	<b>6745</b>
<b>Perennes</b>												
Alfalfa	1222	1520	1480	1550	1310	1240	1290	1287	1397	1501	1460	1800
Nogal	76	76	76	76	76	85	85	90	90	90	90	90
Otros	2	2	2	2	2	3	3	3	3	10	5	25
<b>TOTALES:</b>	<b>1300</b>	<b>1598</b>	<b>1558</b>	<b>1628</b>	<b>1388</b>	<b>1328</b>	<b>1378</b>	<b>1380</b>	<b>1490</b>	<b>1601</b>	<b>1555</b>	<b>1915</b>

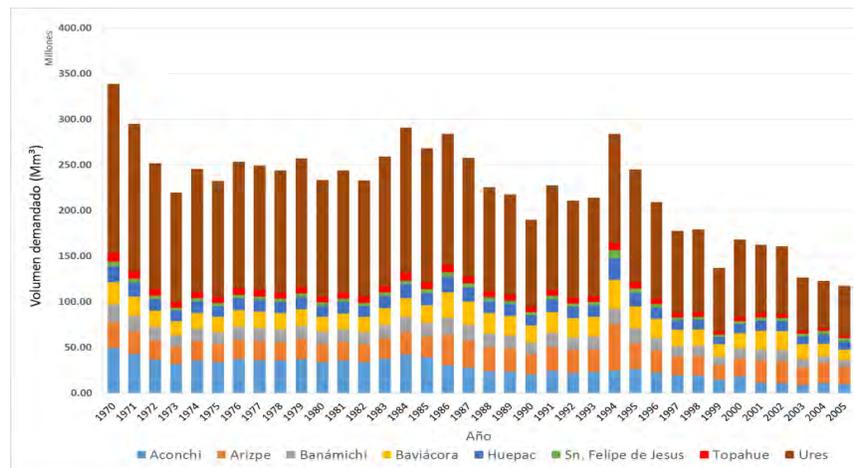
La estimación de los volúmenes requeridos para riego se realiza a partir de láminas brutas medias de riego tomadas de estudios realizados en la región norte del país por el Instituto Nacional de

Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), dependiente de la SAGARPA<sup>1</sup>; y de la Comisión Nacional del Agua. Las láminas brutas por tipo de cultivo se muestran en la tabla A.5-2.

**Tabla A.5-2 Láminas brutas de riego por tipo de cultivo INIFAP (2006) y CONAGUA (1990-2003)**

Cultivo	Lámina de riego (m/ha)	Cultivo	Lámina de riego (m/ha)	Cultivo	Lámina de riego (m/ha)
Trigo	0.98	Algodón	1.31	Alfalfa	2.41
Cártamo	0.68	Sorgo G	1.34	Nogal	2.27
Forrajes	1.34	Maíz	1.58	Otros/Varios	1.50
Hortalizas	0.85	Frijol	1.17		

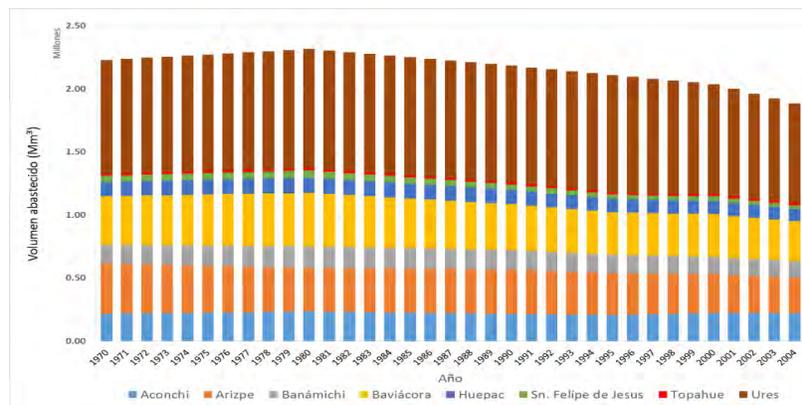
A partir de la información recabada se estimaron los volúmenes históricos totales demandados para la agricultura, los cuales son mostrados en la figura A.5-2.



**Figura A.5-2 Demandas de uso agrícola por localidad año 1970 a 2004**

**A.5.2. Abastecimiento de agua potable**

En cuanto a las estimaciones de los volúmenes para uso de agua potable, se tomó en cuenta la distribución poblacional de los censos de población del INEGI, y se consideró una dotación media de 350 lts/hab/día. Los volúmenes destinados a este uso, correspondientes a los municipios anteriormente mencionados, son mostrados en la figura A.5-3.



**Figura A.5-3 Volúmenes de abastecimiento de agua potable en el periodo 1970 a 2004**

<sup>1</sup> Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación