



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA CUASI-DISTRIBUIDA PARA SU
APLICACIÓN A LAS CONDICIONES MEXICANAS, CASO CUENCA DEL
RIO GRANDE DE MORELIA. PROCEDIMIENTOS DE PREPARACIÓN DE
INFORMACIÓN, CALIBRACIÓN Y PUESTA EN MARCHA.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA

ALEJANDRO SOTO CASTRO

ASESOR DE TESIS

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

Septiembre 2009

Contenido

Índice de figuras	v
Dedicatoria.....	x
Agradecimientos.....	xi
1. Introducción.....	13
2. Antecedentes.....	16
2.1. Modelación hidrológica	16
2.2. Clasificación de los modelos hidrológicos	17
2.2.1. Modelos matemáticos determinísticos	19
2.2.2. Modelos de simulación continua de la cuenca. Tipos.....	19
2.2.3. Modelos agregados con elevado número de parámetros	20
2.2.4. Modelos agregados con reducido número de parámetros	23
2.2.5. Modelo de Témez	25
2.3. Modelos distribuidos	29
2.3.1. El modelo S.H.E.....	29
2.3.2. Modelo CEQUEAU	31
2.4. Etapas en el desarrollo de un modelo distribuido	31
a) Formación del modelo	32
a) Construcción del modelo.....	32
b) Calibración de los parámetros del modelo	34
c) Validación del modelo.....	35
d) Análisis de sensibilidad del modelo.....	35
2.5. Modelos cuasi-distribuidos	36
2.6. Sistemas de Información Geográfica.....	36
2.6.1. Definición de un Sistema de Información Geográfica (SIG).	37
2.7. Idrisi.....	40
2.7.1. Idrisi Andes.....	41
2.7.2. Innovaciones en Idrisi Andes	42
2.7.3. Componentes de Idrisi Andes	42
2.7.4. ¿Qué se puede hacer con Idrisi Andes?	43
2.8. ArcView	44
2.8.1. Funciones básicas del programa ArcView	44
a) Visualización	44

b)	Generación de productos cartográficos	45
c)	Consulta grafica y tabular	45
d)	Análisis espacial	45
e)	Integración de datos.....	45
f)	Desarrollo de aplicaciones.....	46
g)	Manejo de bases de datos.....	46
2.9.	GRASS	47
2.9.1.	Funciones de GRASS	48
2.10.	Bases de datos meteorológicas e hidrológicas	50
2.10.1.	Bases de datos meteorológicas.....	50
a)	CLICOM	50
b)	ERIC	51
2.10.2.	Bases de datos Hidrológicos	53
c)	Sistema de Información de Aguas Superficiales (SIAS, BANDAS)	54
3.	Modelo PATRICAL (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua).....	57
3.1.	Simulación de transporte de nitrato en el ciclo hidrológico.....	57
3.2.	Módulo hidrológico	60
3.3.	Módulo de calidad del agua.....	64
3.4.	Formulación del modelo	66
3.5.	Información necesaria y conveniente para la construcción y simulación del ciclo hidrológico	82
3.5.1.	Información esencial.....	83
a)	Capas o mapas digitales básicos (cuenca del rio grande de Morelia)	83
b)	Series de datos meteorológicos.....	84
c)	Series de datos hidrológicos.....	84
3.5.2.	Información conveniente	84
a)	Series de datos hidrológicos.....	85
b)	Información georreferenciada con sus coordenadas (ya sea en tabla o en capa digital)	85
3.5.3.	Información de ayuda	85
a)	Series de datos hidrológicos.....	85
b)	Capas o mapas digitales	86
3.6.	Resultados del modelo	86
4.	Procedimientos de preparación información (Modelo PATRICAL)	90

4.1. Información esencial	90
4.1.1. Capas o imágenes digitales	90
a) Uso de suelo	90
b) Mapa de geología.....	97
c) Modelo digital de elevaciones	97
d) Delimitación de las demarcaciones hidrográficas (Cuencas)	102
e) Trazo de cuenca en ArcView.....	104
4.2. Series de datos meteorológicas	113
4.2.1. Consistencia de datos	115
4.3. Series de datos hidrológicos	116
5. Calibración	119
5.1. Parámetros de calibración	119
5.2. Procedimiento de calibración	121
6. La cuenca del rio Grande de Morelia	124
6.1. Antecedentes de la gestión de la cuenca	128
6.2. Información del modelo de la cuenca	129
6.3. Calibración del modelo	137
6.3.1. Análisis de la consistencia de datos	137
a) Consistencia de datos de precipitaciones	139
7. Resultados del modelo	152
8. Conclusiones y recomendaciones	173
8.1. Conclusiones y recomendaciones	173
8.2. Recomendaciones.....	174
Referencias.....	175

Índice de figuras

Figura 1-1. Distribución del agua en el mundo.....	14
Figura 2-0. Clasificación de los modelos determinísticos (Adaptada de Abbot y Refsgaard, 1996).....	18
Figura 2-1. Descripción esquemática del flujo de agua del modelo de Témez.....	25
Figura 2-2: Diagrama general de flujo del modelo de Témez.....	27
Figura 2-3. Estructura del modelo S.H.E. (D.I.H. 1985).....	20
Figura 2-4. Etapas en la implementación de un modelo hidrológico (Adaptada de Abbot y Refsgaard, 1996).....	23
Figura 2-5. Esquema de la base de datos de un SIG.....	37
Figura 2-6: Modelo de datos vectorial.....	38
Figura 2-7: Modelo de datos raster.....	38
Figura 2-8. Pantalla de inicio en GRASS.....	48
Figura 2-9. Interfaz de CLICOM.....	51
Figura 2-10. Interfaz grafica de ERIC y formas de consulta de información.....	53
Figura 2-11. Menú principal del Sistema de Información de Aguas Superficiales (SIAS).....	55
Figura 3-0. Régimen natural y régimen alterado en la componente subterránea y evaluación de afecciones.....	58
Figura 3-1. Metodología para la simulación de la calidad del agua, resultados y aplicaciones.....	59
Figura 3-2. Modelación del ciclo en dos capas, zona superficial y zona profunda o acuífero.....	61
Figura 3-3. Esquema de flujo del modelo conceptual del ciclo hidrológico Patricial.....	51

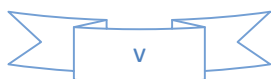


Figura 3-4. Precipitación temperatura y aportación en la red fluvial en Octubre.....	63
Figura 3-5. Caudales en régimen natural del rio chiquito de Morelia (hm3/Seg).....	64
Figura 3-6. División del terreno para la simulación de la calidad química del agua.....	66
Figura 3-7. Ley regional de Budyko.....	68
Figura 3-8. Transformación de la precipitación líquida en excedente y balance en el suelo.....	69
Figura 3-9. Ley de excedentes.....	71
Figura 3-10. Ley de excedentes junto a la evapotranspiración real, la humedad del suelo y las pérdidas totales obtenidas mediante el modelo de Témez.....	73
Figura 3-11. Conexión del acuífero con el río.....	76
Figura 3-12. Transferencias laterales entre los acuíferos.....	77
Figura 3-13. Transmisividad equivalente de dos acuíferos conectados en serie.....	78
Figura 3-14. Acuífero rectangular homogéneo conectado a un río totalmente penetrante.....	79
Figura 3-15. Obtención aproximada del ancho del acuífero para la aplicación de la formulación.....	80
Figura 3-16. Diagrama del proceso de simulación del modelo PATRICAL.....	87
Tabla 3-17. Estaciones de registro de caudales incluidas para la calibración del modelo.....	88
Figura 4-0. Ventana de Idrisi para importar un mapa en formato Shape.....	91
Figura 4-1. Ventana de Idrisi para crear un nuevo campo en la base de datos.....	92
Figura 4-2. Editor de la base de datos en Idrisi.....	92
Figura 4-3 Ventana de Idrisi para importar los códigos de reclasificación.....	93

Figura 4-4. Ventana de Idrisi para reclasificación de mapas con el comando ASSING.....	94
Figura 4-5. Ventana de Idrisi para generación de una imagen vacía INITIAL.....	95
Figura 4-6. Imagen vacía INITIAL generada en Idrisi.....	95
Figura 4-7 Ventana del comando <i>rastervector</i> para convertir un mapa de vector a raster en Idrisi.....	96
Tabla 4-8. Municipios que conforman la cuenca del rio grande de Morelia.....	97
Figura 4-9. Ventana de Idrisi que permite cargar manualmente las coordenadas del modelo digital de elevaciones.....	98
Figura 4-10. Ventana de Idrisi que permite importar un mapa en formato BIL con el comando “ <i>Genericraster (BIL BIP, BSQ)</i> ”.....	99
Figura 4-11. Ventana que se activa en Idrisi con el comando MOSAIC que sirve para unir modelos digitales de elevación.....	100
Figura 4-12. Ventana que activa el comando <i>PROJECT</i> para transformar coordenadas geográficas a UTM.....	101
Figura 4-13. Ventana de idrisi para verificar el cambio de coordenadas de geográficas a UTM.....	101
Figura 4-14. Partes básicas de la delimitación de una cuenca hidrográfica.....	102
Figura 4-15. Trazo preliminar de la cuenca del rio Grande de Morelia.....	104
Figura 4-16. Visualización del modelo digital de elevaciones sin depresiones.....	105
Figura 4-17. Mapa de dirección de flujo resultado del comando <i>Flow direction</i>	106
Figura 4-18. Mapa de acumulación de flujo, resultado del comando “ <i>Flow Accumulation</i> ”.....	107
Figura 4-19. Mapa de la red de drenaje obtenida mediante el comando “ <i>Stream Definition</i> ”.....	108
Figura 4-20. Mapa de segmentación de los cauces obtenido mediante el comando “ <i>Stream Segmentation</i> ”.....	109

Figura 4-21. Mapa de visualización de cuencas generado con el comando <i>Watershed delineation</i>	110
Figura 4-22. Mapa de la delimitación de cuencas mediante polígonos con el comando “ <i>Watershed Polygon Processing</i> ”.....	111
Figura 4-23. Mapa de segmentación de cauces con el comando “ <i>Stream Segment Processing</i> ”.....	112
Figura 4-24. Cuenca del rio grande de Morelia generada en ArcView.....	113
Tabla 4-25. Orden de los registros de precipitaciones para el modelo PATRICAL.....	114
Tabla 4-26. Orden de los registros de temperaturas para el modelo PATRICAL.....	115
Tabla 4-27. Orden de los registros de caudales históricos a régimen natural para el modelo PATRICAL.....	116
Tabla 4-28. Orden de los registros históricos y de los resultados del modelo PATRICAL para elaborar los gráficos.....	117
Figura 5-1 Esquema de calibración del modelo PATRICAL.....	121
Tabla 6-1. Estaciones climatológicas se la cuenca del rio grande de Morelia.....	127
Figura 6-2. Precipitación anual acumulada de la estación 16055 de la localidad de Jesús del Monte.....	127
Tabla 6-3. Estaciones hidrométricas de la cuenca del rio grande de Morelia.....	128
Figura 6-4. Mapa de estaciones meteorológicas de la cuenca del río Grande de Morelia.....	138
Figura 6-5 Comparación de caudales a régimen natural del modelo contra los registros aforados en las estaciones hidrométricas.....	139
Tabla 6-6. Cronograma de estaciones con y sin registro de datos de precipitación.....	142
Figura 6-7. Curva masa de las estaciones de la cueca del rio grande de Morelia.....	144
Figura 6-8. Curva masa doble para la estación de San Miguel del Monte.....	145

Tabla 6-9. Comparación de valores de las medias anuales de la precipitación contra los valores acumulados de las estaciones.....	148
Grafica 6-10. Comparación de caudales del modelo contra los registros históricos mensuales.....	149
Figura 6-11. Mapa de localización de las estaciones eliminadas.....	150
Tabla 7-1. Máxima capacidad de infiltración a régimen natural del modelo PATRICAL (parámetro calibrado).....	153
Tabla 7-2. Máxima capacidad de humedad en el suelo a régimen natural del modelo PATRICAL (parámetro calibrado).....	153
Tabla 7-3. Resultados de caudales a régimen natural del modelo PATRICAL.....	167
Figura 7-4. Grafica de comparación mensual de la cuarta simulación de caudales del modelo a régimen natural contra los registros históricos.....	168
Figura 7-5. Grafica de comparación mensual de la quinta simulación de caudales del modelo a régimen natural contra los registros históricos.....	169
Figura 7-6. Grafica de comparación mensual de la quinta simulación de caudales del modelo a régimen natural contra los registros históricos de la estación Río Chiquito.....	170

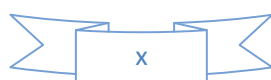
Dedicatoria

A mi madre por haberme dado la vida y por todo su esfuerzo para que yo estudiara, por sus horas de trabajo que ha dedicado para mi formación profesional.

A mis abuelitos por sus consejos de su experiencia de la vida que sin duda han guiado mi vida.

A mis tíos Andrés, Víctor, Silvestre, Minerva y Mary por todo su apoyo durante mi preparación.

A mi hermana y primos.



Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a la Dra. Sonia Tatiana del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por su comprensión durante el desarrollo de mi trabajo de tesis y por compartir sus conocimientos conmigo, que sin duda fueron clave para alcanzar los objetivos de este proyecto, desde luego también agradezco a la Universidad Michoacana la que fue mi casa por más de 5 años de estancia en la misma.

También un agradecimiento por el apoyo económico a PROMED (Programa de Mejoramiento del Profesorado) que hizo posible la dedicación de tiempo completo a mi trabajo de tesis.

Un agradecimiento especial a las casas del estudiante Espartaco de la FNERRR (Federación Nacional de Estudiantes Revolucionarios Rafael Ramírez), que sin duda forman gente con una visión más profunda y preocupada por la sociedad y la gente pobre de México. En especial a Alejandra Mondragón que fue quien dedico parte de su tiempo para apoyar la gestión de recursos económicos para finalizar este proyecto.

Agradezco también al Dr. Miguel Ángel Pérez y Dr. Abel Solera de la Universidad Politécnica de Valencia quienes colaboraron para que este trabajo fuera realizado.

Un agradecimiento especial también a todos mis amigos(as) que sin duda tienen una influencia en los ánimos para realizar mi trabajo, y que forman parte de mi vida diaria, de los cuales me haría falta espacio para sus nombres pero estoy seguro que si buscan un poquito encontraran sus nombres en el siguiente párrafo. De igual forma a toda la gente que sin conocerme me ha brindado su apoyo.

A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, Ñ, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z.

Agradezco también todo el apoyo del Sr. José Luis Álvarez que ha estado pendiente de mis necesidades y por todo el apoyo a mi madre y a mi hermana que son todo para mí. A mis abuelitos Vicenta Gómez y Bernardino Castro de quienes recogí muchas experiencias. Desde luego mis tíos y toda mi familia que ha estado cerca de mí cuando los he necesitado.

CAPÍTULO I

Introducción

1. Introducción

Desde los inicios de nuestra era el agua fue, es y será el recurso indispensable para el desarrollo de cualquier tipo de vida en nuestro planeta, mejor conocido como el planeta azul, el cual está formado en su mayoría por agua que puede ser dulce o salada, siendo esta última la que más abunda en la faz del mismo, con 97.5 aproximadamente del total que existe.

El resto está distribuida en los continentes en forma de hielo en los casquetes polares, líquida que se encuentra en la superficie de la tierra en lagunas, ríos etc, y subterránea en los mantos acuíferos. Para más información ver la figura 1-1 la cual muestra con más detalles la distribución del agua en el planeta.

En la actualidad el agua cada vez más está siendo un recurso escaso en diversas partes del mundo, como ejemplos claros tenemos Latinoamérica y África siendo este último el que más sufre por la falta de este recurso. La contaminación es el principal factor que hace que este recurso sea escaso, ya que el mal tratamiento ha originado que la mayoría de los mantos acuíferos y manantiales sean severamente contaminados.

México es un país que tiene muchas deficiencias en el tratamiento del agua residuales, tan solo en la capital del país donde más se generan estas aguas debido al total de población que tiene esta ciudad, tan solo se trata el 6% según información de la CNA (Comisión Nacional del Agua) lo cual indica que el 94% son vertidas a los ríos sin ningún tipo de tratamiento. Esto ocasiona grandes problemas, no solo la contaminación de los cauces ya que estos van a dar a lagos que también son contaminados una vez que las aguas se mezclan teniendo como consecuencia la extinción de la vida acuática por la gran cantidad de contaminantes que transportan estas aguas.

Debido a los constantes cambios que se han generado en nuestro planeta se ha despertado en el ser humano el interés por conocer los fenómenos que ocurren en el mismo, y los cambios que estos fenómenos van experimentando a través del tiempo. Uno de estos fenómenos y el de más relevancia en la actualidad es el tan mencionado cambio climático, el cual trae consigo otras alteraciones de otros fenómenos que ocurren en la tierra. Uno de los más importantes es el ciclo hidrológico, el cual tiene un importante impacto en la vida humana. El mejor reconocimiento de este fenómeno, es a través de modelos que representen los procesos que se llevan a cabo dentro del mismo. Existen diversos modelos que simulan el ciclo hidrológico unos con mayor detalle que otros dependiendo del periodo de simulación y tipo de modelo que elija utilizar. Para el caso de este trabajo se utilizara el modelo **PATRICAL** (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua) el cual es un modelo de simulación mensual del ciclo hidrológico. Los resultados de los modelos son las aportaciones

en las salidas de los cauces (escorrentía de los cauces), niveles piezométricos, y volumen almacenado en los acuíferos. El modelo tiene un modulo de calidad de agua sin embargo el alcance de este trabajo no incluirá la modelación de la calidad del agua.

La modelación del ciclo hidrológico de los cauces de forma distribuida no es de uso común en el desarrollo de un proyecto, el presente trabajo pretende mostrar los procedimientos seguidos para la preparación de la información, así como mostrar de forma clara y sencilla la actual accesibilidad de estas herramientas para poder realizar un estudio hidrológico, que en este caso es a régimen natural.

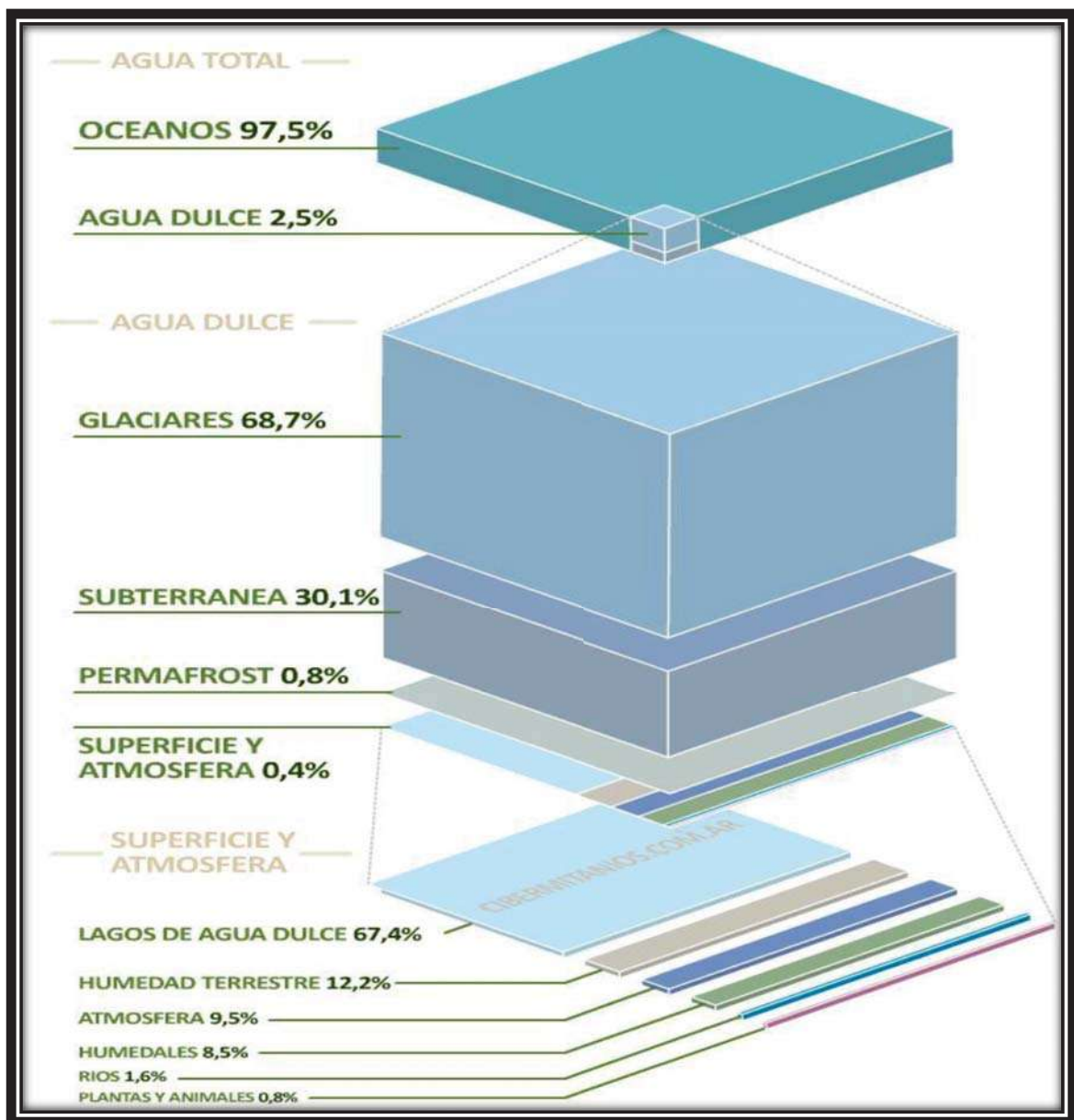


Figura 1-1. Distribución del agua en el mundo.

CAPÍTULO II

Modelos hidrológicos

2. Antecedentes

El inicio de los modelos matemáticos con aplicación a la hidrología comienza con el desarrollo del Método Racional en el siglo XIX por Mulvaney en 1858 con lo cual se le da apertura a un amplio campo del conocimiento que sin duda a tenido un amplio desarrollo en la actualidad. A principios del siglo XX Sherman (1932) estableció los conceptos básicos del hidrograma unitario, y la teoría de infiltración fue desarrollada por Horton (1933). Y a mediados del siglo XX Penman (1948) desarrolló su teoría sobre la evaporación y en la década de 1950 se aplicó la teoría de los sistemas lineales, lo cual culminó con la generalización de la teoría del hidrograma unitario, la cual ha sido muy utilizada hasta nuestros tiempos. La década de 1960 marca el inicio de la aplicación de los modelos en computadora con lo cual se hace posible desarrollar de una manera más compleja el modelado del ciclo hidrológico. Se considera que el primer modelo en simular varios componentes del ciclo hidrológico en una cuenca, fue el Stanford Watershed Model-SWM (Crawford y Linsley, 1966).

2.1. Modelación hidrológica

La modelación hidrológica consiste en utilizar un modelo matemático y adaptarlo para reproducir lo más cercano a la realidad el proceso de lluvia-escorrentía. Para llevar a cabo este proceso se necesita la mayor cantidad de información disponible de la cuenca, como son datos hidroclimatológicos disponibles, así como también datos fisiográficos de la cuenca.

Los problemas que se refieren a la hidrología, a menudo tienen su área de estudio en la parte de la superficie de la Tierra que está delimitada por la cuenca hidrográfica. La cuenca está formada básicamente por un curso de agua y sus tributarios, los análisis se efectúan en un punto que está ubicado sobre el curso de agua principal y la totalidad del área topográfica drena a través de ambos. Los componentes más importantes que intervienen en el estudio de las cuencas hidrográficas son: las características topográficas, la ocupación del suelo, las precipitaciones, la evapotranspiración y los flujos o caudales observados (Réménieras, 1999).

Los modelos hidrológicos, son utilizados para comprender la dinámica del ciclo hidrológico con respecto a los componentes climatológicos y la superficie terrestre (Singh y Woolhiser, 2002). Estos modelos se emplean para evaluar el recurso hídrico en una cuenca hidrográfica, además tienen una gran cantidad de usos, como por ejemplo, la planificación de explotación de acuíferos, comportamiento de los mantos acuíferos, evaluación del impacto en el caso de la sobreexplotación de

acuíferos, tal es el caso del acuífero Morelia-Querendaro del cual forma parte la cuenca de estudio de este trabajo.

En la actualidad existen múltiples modelos hidrológicos, desde los más sencillos hasta los más complejos, capaces de reproducir hasta periodos de tiempo horarios, esto debido a los constantes avances tecnológicos de los últimos años, que cada vez ofrecen mejores herramientas de cómputo para facilitar los trabajos, y desde luego obtener los mejores resultados. Para el caso del presente trabajo, fue realizado en el modelo hidrológico PATRICAL, que permite construir modelos del ciclo hidrológico y de calidad de las aguas distribuidas espacialmente con paso de tiempo de simulación mensual.

Los enfoques de los modelos hidrológicos son diferentes como por ejemplo: simulación de caudales, evaluación del cambio climático, variabilidad en el cambio de uso de suelo, análisis de calidad del agua, análisis del flujo subterráneo, y en otras áreas también tienen una gran aplicación, por ejemplo en Biología.

2.2. Clasificación de los modelos hidrológicos

Algunos modelos hidrológicos comparten ciertas similitudes y otros son totalmente distintos en su estructura. Esto ha generado que los modelos se puedan clasificar de distintas formas, dependiendo de la estructura y enfoque que le haya dado el autor. Los modelos determinísticos por ejemplo, pueden ser clasificados de acuerdo con la forma en que consideran el área de la cuenca, esta puede ser de manera agregada (Abbot y Refsgaard, 1996). La descripción de los procesos hidrológicos se consideran empíricos, conceptuales o de base física. La mayoría de los modelos conceptuales son globales (agregados), y los modelos físicamente basados o de base física son modelos determinísticos. Los modelos empíricos son considerados como modelos de caja negra, los modelos agregados conceptuales como de caja gris y los modelos distribuidos de base física se consideran de caja blanca (Figura 2-0). Los modelos distribuidos realizan una descripción de los procesos que se llevan a cabo, mediante la discretización de la cuenca en una malla de cuadros.

El modelo PATRICAL se considera de base física (caja blanca) ya que se tiene el control del modelo a la hora de la calibración a diferencia de otros que la calibración es automática y no permiten ninguna operación manual.

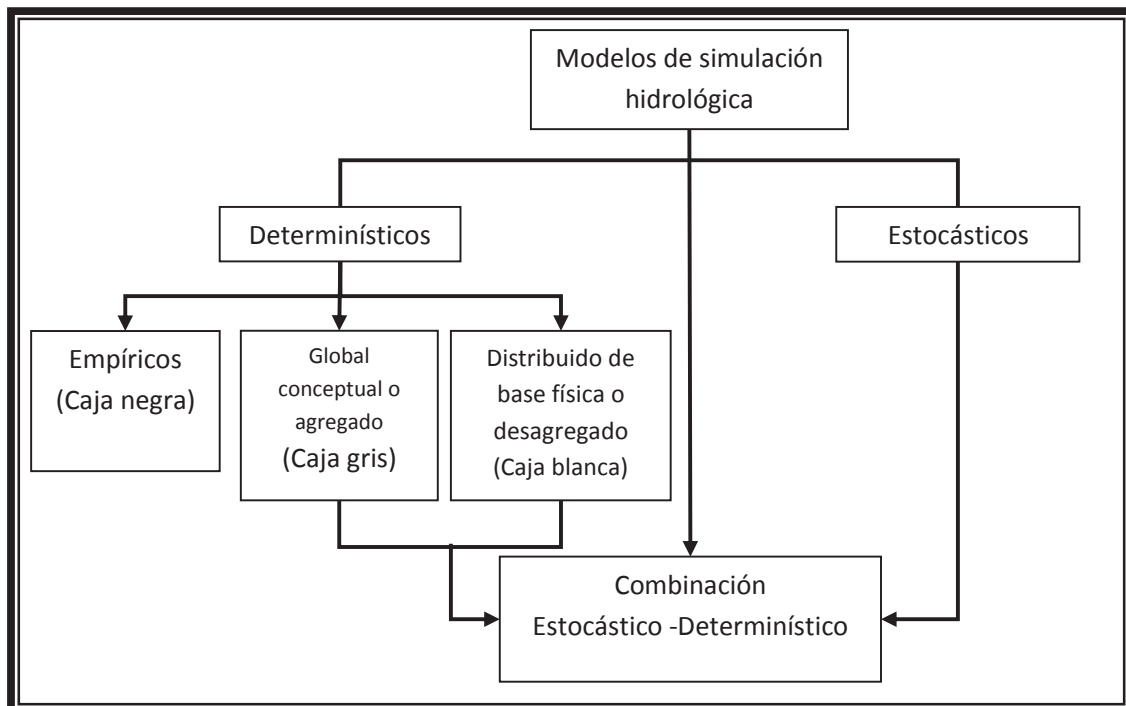


Figura 2-0. Clasificación de los modelos determinísticos (Adaptada de Abbot y Refsgaard, 1996).

Los modelos se clasifican de acuerdo con la imagen del sistema, en inductivos (estocásticos) y deductivos (deterministas) y de acuerdo con las variables independientes en el tiempo y el espacio, se clasifican en tiempo y espacio continuo, espacio discreto y tiempo continuo, y en tiempo y espacio discretos. Llamas (1993).

Los modelos se clasifican de acuerdo a la descripción del proceso utilizado en agregados o distribuidos, Singh (1995). Se entenderá por un modelo agregado o global, aquel en que sus parámetros están promediados en toda la cuenca y no se toma en cuenta la variabilidad espacial y temporal de las características físicas de la misma. A diferencia, un modelo distribuido toma en cuenta la variabilidad de las características físicas, de acuerdo a una discretización espacial, la cual puede ser con base en subcuencas, índices o en una malla de cuadros, siendo este último el más común y el que se aplica al modelo PATRICAL. Según la aleatoriedad del fenómeno, Singh los clasifica en determinísticos y estocásticos o una combinación de ambos. Y de acuerdo con la escala del tiempo, los clasifica en basados en eventos, de simulación continua o distribuida. Según la técnica de solución, los clasifica en numéricos (diferencias finitas, elemento finito, etc.), analógicos y analíticos.

Por su parte Wagener et al. (2004), utilizan una clasificación en base a tres tipos de modelos que son: modelos métricos, modelos paramétricos y modelos mecánicos. Los modelos métricos (conocidos como empíricos o de caja negra), utilizan comúnmente las series de datos temporales disponibles, para desarrollar

la estructura del modelo y obtener los parámetros del mismo. Están basados únicamente en la información obtenida de los datos, y no incluyen ningún conocimiento acerca del comportamiento de la cuenca o del proceso de escurrimiento. Ejemplos de este tipo de modelos son las redes neuronales artificiales y las funciones de transferencia. Además, son usualmente agregados, debido a que consideran la cuenca como un todo, sin variar la variación de sus características espacialmente.

Los modelos paramétricos se basan en almacenamientos o reservorios como componente principal de su estructura. Son llenados a través de los flujos de agua como la lluvia, la infiltración o la percolación, y se vacían mediante la evapotranspiración, el escurrimiento o el drenaje. Presentan una estructura que debe ser especificada antes de usarse. Al contrario de los modelos métricos, la estructura de éstos, está definida por la comprensión que el modelador tiene con respecto a los procesos del ciclo hidrológico. Debido a lo anterior, son conocidos como modelos *conceptuales*. Los parámetros describen aspectos como el tamaño de los reservorios o la distribución del flujo entre ellos, y a menudo no son medidos directamente en el campo. Algunos consideran a la cuenca como una unidad hidrológica homogénea. Sin embargo, otros llevan a cabo una subdivisión en subcuencas, y son conocidos como semidistribuidos. Los modelos paramétricos dependen de las mediciones del flujo, lo cual dificulta su aplicación en cuencas no aforadas, ya que sin la información no se puede llevar a cabo la modelación con éxito.

Como se ha mencionado los modelos representan el comportamiento de un fenómeno en el tiempo y se adaptan de manera que reproduzcan lo más fielmente posible la realidad a partir de diferentes tipos de información.

2.2.1. Modelos matemáticos determinísticos

Los modelos determinísticos suelen tener un mayor potencial que los estocásticos, generalmente cajas negras, para simular aportaciones en cuencas no aforadas dada la posible relación de sus parámetros con las características físicas de las cuencas. Este tipo de modelos ha sido utilizado por los hidrólogos con un mayor agrado en el campo de la evaluación de recursos hídricos, al reflejar los procesos esenciales del ciclo hidrológico en su fase terrestre.

2.2.2. Modelos de simulación continua de la cuenca. Tipos

Dentro de los modelos matemáticos determinísticos destacan por su utilización los modelos agregados de simulación continua de la cuenca, lo cuales simulan el ciclo

hidrológico en su fase terrestre, completo y de forma continuada en el tiempo, estableciendo balances de humedad entre los distintos procesos que tienen lugar desde el momento en que llueve hasta que el agua fluye por el río. Es por esto que suelen llamarse modelos determinísticos de balance de humedad.

El uso de los modelos distribuidos de simulación continua no está muy extendido, y es debido fundamentalmente a su complejidad (resolución de las ecuaciones diferenciales de flujo y conservación de masa) y de la disponibilidad de datos que precisan.

Un caso intermedio lo constituyen los modelos cuasidistribuidos, que no resuelven las ecuaciones diferenciales de los procesos estudiados, si no que en esencia se basan en integrar un modelo agregado n veces, tantas como se divida la zona de estudio en subcuencas.

Las principales aplicaciones de simulación continua en el campo de la evaluación de recursos hídricos son las siguientes:

- a) Extender series de aportaciones en puntos aforados a partir de series meteorológicas más largas.
- b) Generar series de aportaciones en puntos no aforados a partir de series meteorológicas.

2.2.3. Modelos agregados con elevado número de parámetros

Por modelos agregados de simulación continua con elevado número de parámetros se entiende aquellos que utilizan del orden de 15 a 25 parámetros. Reproducen el ciclo hidrológico con mucho detalle y son utilizados cuando la simulación se realiza a escala horaria o diaria. En la actualidad existen muchos modelos de este tipo, siendo la diferencia fundamental entre ellos el grado de detalle con que tratan cada uno de los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico.

Los modelos más conocidos son los siguientes (Viessman et al, 1989; Singh, V.P., 1988):

a) El modelo STANFORD IV

Crawford y Linsley diseñaron este modelo matemático para simular el ciclo hidrológico en una cuenca de una forma distribuida. Este modelo ha sido ampliamente aceptado como una forma de obtener hidrogramas horarios o diarios a la salida de la cuenca. Es un modelo de parámetros agregados por cual los requerimientos de datos son mucho menores que los modelos distribuidos. Los datos de entrada al modelo son los de precipitaciones horarias o diarias según la el tiempo de modelación, evapotranspiraciones potenciales diarias y una amplia variedad de parámetros de la cuenca, hasta un número de 19 sujetos a calibración.

b) Modelos KENTUCKY Y OPSET

El modelo Kentucky Watershed model (KWM) es una versión modificada del modelo STANFORD. La principal característica de este modelo es su adaptación al clima y geografía de Kentucky y otras zonas de la parte oriental húmeda de los Estados Unidos.

c) El modelo TWM

El modelo TWM fue desarrollado por la Universidad Tecnológica de Texas, el cual también presenta modificaciones al Standford para adaptarlo al Estado de Texas. De las principales por ejemplo se tienen mejoras claras en la fase de infiltración, en la que considera dos zonas en donde el STANFORD utilizaba una única zona de almacenamiento inferior. Con lo cual se pretende diferenciar los comportamientos de las zonas radicular y no radicular del suelo. El porqué de estas diferencias es fácilmente explicable si se tiene en cuenta que el estado de Texas es una gran llanura donde prácticamente toda el agua que llueve se infiltra.

Considera incrementos de tiempo en la simulación, inferiores al de STANFORD, llegando hasta los 5 minutos en algunos casos.

Cuando se dispone de datos de caudales medidos, el modelo permite realizar varios tipos de análisis estadísticos.

d) Modelo USDAHAL

Este modelo fue desarrollado por agrónomos y está orientado hacia la agricultura. Está pensado para cuencas pequeñas explotadas agronómicamente. La finalidad de este modelo consiste en el estudio del impacto ambiental que se produce al modificar tipos de cultivo, prácticas agrícolas, etc.

La entrada de datos al modelo es relativamente extensa, requiriéndose registros continuos de precipitaciones, temperaturas medias semanales, evaporaciones en tanque semanales y datos detallados sobre suelos, vegetales, usos de suelo y prácticas agronómicas. Permite dividir la cuenca objeto de estudio hasta en 4 zonas distintas en función del tipo de suelo o las practicas de cultivo. El modelo además de la escorrentía, calcula la evapotranspiración real, los cambios de humedad en el suelo, la recarga de agua al acuífero y los retornos de riego.

e) Modelo NWSRFS

El modelo NWSRFS fue desarrollado por el servicio nacional del tiempo de los E.E. U.U. para predecir caudales y niveles de agua en ríos con grandes cuencas. No requiere por ello tanto detalle como el STANFORD, que está pensado para cualquier tipo de cuencas. Permite simular datos diarios presentando como ventaja respecto a otros modelos, el incluir un algoritmo de estimación automática de los parámetros.

En la práctica es un modelo cuasi-distribuido, formado por un modulo hidrológico agregado, el STANFORD de aplicación en cada una de las subcuencas en que se divide la cuenca de estudio además de un modulo hidráulico, que permite combinar los hidrogramas de las subcuencas y estudiar su propagación por los cauces.

El servicio Nacional del Tiempo de Sacramento dispone de este modelo con el modulo hidrológico SACRAMENTO en lugar del STANFORD (Burnash, 1985)

f) Modelo SACRAMENTO

El modelo SACRAMENTO fue desarrollado por el Servicio Nacional del Tiempo y el Departamento de recursos hídricos de california (Burnash et al 1973). El modelo anteriormente mencionado (Modelo NWSRFS) del mismo organismo lo tiene integrado como modulo de cálculo de aportaciones a partir de variables meteorológicas. De las diferencias que existen respecto al modelo STANFORD cabe citar las siguientes: a) consideración en las zonas de almacenamiento de dos formas de estado para la humedad en tensión (susceptible de ser

evapotranspirada) y libre (susceptible de descarga a otras zonas de almacenamiento o a la red fluvial), b) la zona inferior (asimilable a aguas subterráneas) permite una recesión variable al considerar dos leyes de descarga independientes y tiene también como característica diferenciadora respecto a otros modelos la limitación en su almacenamiento, c) los efectos de laminación en cuenca y cauce son considerados con menos detalle, pues utiliza para su simulación una función de distribución, que define el usuario del modelo. En general, tanto las leyes de almacenamiento como de descarga son diferentes a las del modelo STANFORD. En la práctica es un modelo para simulación diaria que ha sido utilizado mucho en España en simulaciones a escala diaria.

g) Modelo OSUSWM

Este modelo fue desarrollado por la Universidad del Estado de Ohio (EEUU) y dado que este estado está situado parte de él en zona de terminación de morrenas glaciares considera el comportamiento de las mismas. Introduce también el fenómeno del agrietamiento por penetración en suelos arcillosos y utiliza varias constantes de descarga para las aguas subterráneas (el STANFORD IV utiliza una permitiendo así su aplicación en zonas de geología compleja).

h) Modelo HSPF

Es el modelo más reciente de este tipo. Fue desarrollado por la agencia de protección ambiental de los EE.UU (EPA) además de ser el primero de los de simulación continua que introduce los aspectos de calidad de las aguas. Permite trabajar con la cuenca en forma desagregada (Modelo cuasidistribuido).

Presenta también una importante mejora en el diseño del software respecto a sus modelos antecesores.

Tiene algunos inconvenientes como: a) no estar muy extendido por el mundo, b) para familiarizarse con su manejo precisa de más tiempo que con otros modelos, como el STANFORD IV o el SACRAMENTO.

2.2.4. Modelos agregados con reducido número de parámetros

Este tipo de modelos reproducen el ciclo hidrológico de una manera más simplificada que los anteriores. Ya que utilizan pocos parámetros (entre 2 y 6 generalmente) dado que su escala temporal de simulación (semanas, meses, etc.) hace que no sea preciso considerar todos los procesos que constituyen el ciclo hidrológico.

En la práctica han sido muy utilizados por las siguientes razones:

1. No siempre la finalidad del estudio justifica simulaciones a escalas temporales inferiores al mes en la práctica.
2. Falta de disponibilidad de datos para la aplicación de modelos más complejos.
3. Conveniencia de simular y contrarrestar los datos a una escala temporal superior antes de proceder a la evaluación de los recursos hídricos a otra inferior.

En ocasiones se puede justificar su utilización a escalas inferiores, por ejemplo la diaria, si los resultados son posteriormente agregados a una escala temporal superior, como puede ser el mes.

Entre los modelos más conocidos cabe citar los siguientes (Alley, 1984)

a) Modelo THORNTHWAITE T (Thornhwaite and Mather, 1985)

Es el más sencillo de los existentes. Su origen se remonta al año 1955 en que fue creado por Thornhwaite. Considera el suelo como un único embalse en el que el excedente de agua se produce solamente cuando este se encuentra lleno. Ese excedente se reparte entre agua que escurre superficialmente y agua que se almacena en el acuífero para ser descargada al río en instantes posteriores.

b) Modelo PALMER P (Palmer, 1965)

Este modelo fue creado por Palmer en el año 1965. Considera dos zonas de almacenamiento para reproducir el funcionamiento del suelo, la zona radicular o superior, donde la evapotranspiración tiene lugar a la velocidad de la ETP y la inferior en donde plantea una ley de evapotranspiración que tiene en cuenta la mayor dificultad para que la evapotranspiración se produzca a la velocidad de la potencial. El excedente de agua se genera cuando ambos embalses están llenos.

c) Modelo ABCD (Thomas et al, 1962)

Este modelo permite que se produzca excedente de agua aun cuando el suelo no se encuentre completamente saturado. El reparto del excedente entre agua que escurre superficialmente y agua que recarga el acuífero lo hace mediante un coeficiente constante en el tiempo, lo cual no es excesivamente realista. Establece un balance de agua en el almacenamiento subterráneo y considera su descarga como una fracción constante del mismo.

d) Modelo de TÉMEZ (Témez, 1977)

Este modelo permite que se produzcan excedentes de agua aunque el suelo no se encuentre saturado. Realiza un reparto del excedente más realista que el modelo

ABCD, entre el agua que escurre superficialmente y el agua que infiltra al acuífero. Considera, al igual que el modelo Thornhwaite una única zona de almacenamiento en el suelo. Fue formulado por J.R. Témez en el año de 1977 y su uso en España está muy extendido, por ejemplo se ha aplicado al Modelo SIMPA y al PATRICAL.

Se hará especial énfasis en el modelo de Témez ya que es modelo utilizado para formular el modelo PATRICAL a continuación se muestran los detalles del modelo.

2.2.5. Modelo de Témez

Es un modelo simplificado de lluvia-escorrentía de paso mensual, creado por J.R. Témez en 1977. El esquema general de flujo de agua, así como el diagrama de flujo general para el modelo de Témez se muestra en las Figuras 2-1 y 2-2.

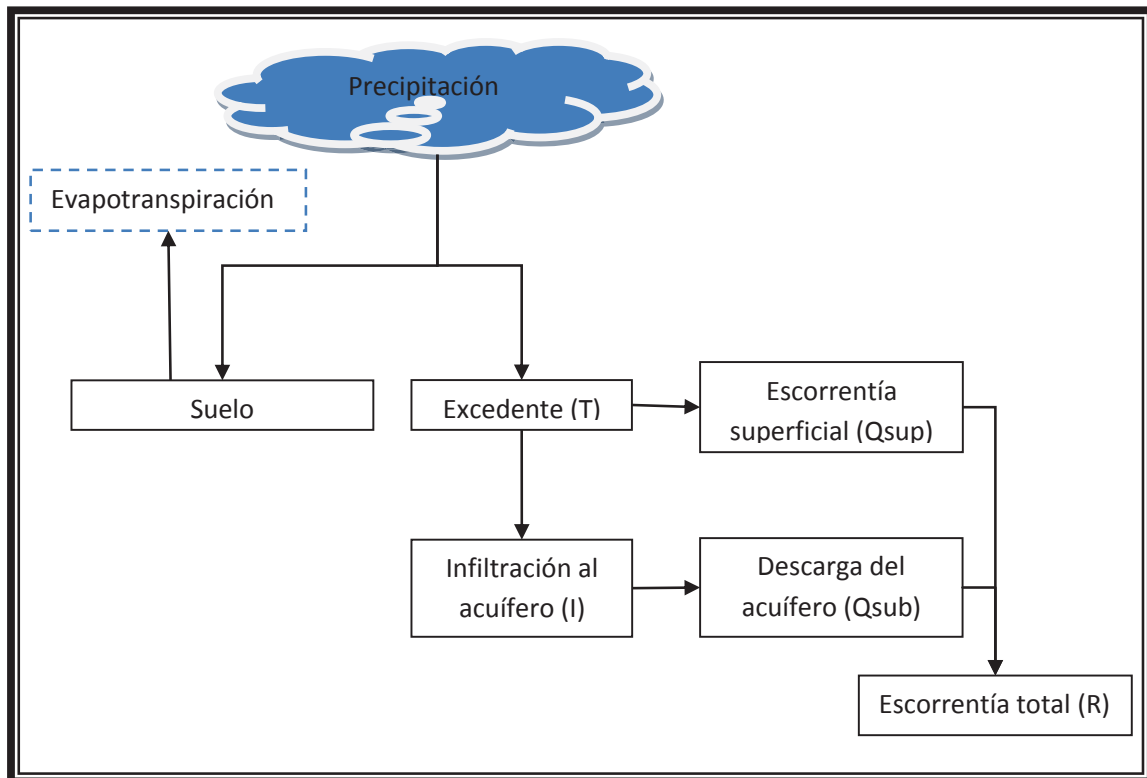


Figura 2-1: Descripción esquemática del flujo de agua del modelo de Témez.

Este modelo supone que el perfil del suelo está dividido en dos zonas:

- 1) Zona superior
- 2) Zona inferior

La zona superior que se halla completamente saturada, y la segunda que asemeja su comportamiento a un embalse subterráneo que desagua en la red superficial.

En las dos zonas anteriores la escorrentía total es el resultado de la suma de la componente superficial y de la subterránea. La componente superficial es la fracción no infiltrada, ni evaporada de la precipitación; mientras que la componente subterránea resulta de un modelo simple tipo celda. El agua precipitada (P_i), se divide en evapotranspiración (ET_i) y excedente (T_i), cuyo cálculo se efectúa según la siguiente ley (1):

$$T_i = \begin{cases} 0, & \text{si } P_i \leq P_0 \\ \frac{(P_i - P_0)^2}{(P_i - \delta_i - P_0)}, & \text{si } P_i > P_0 \end{cases} \quad (1)$$

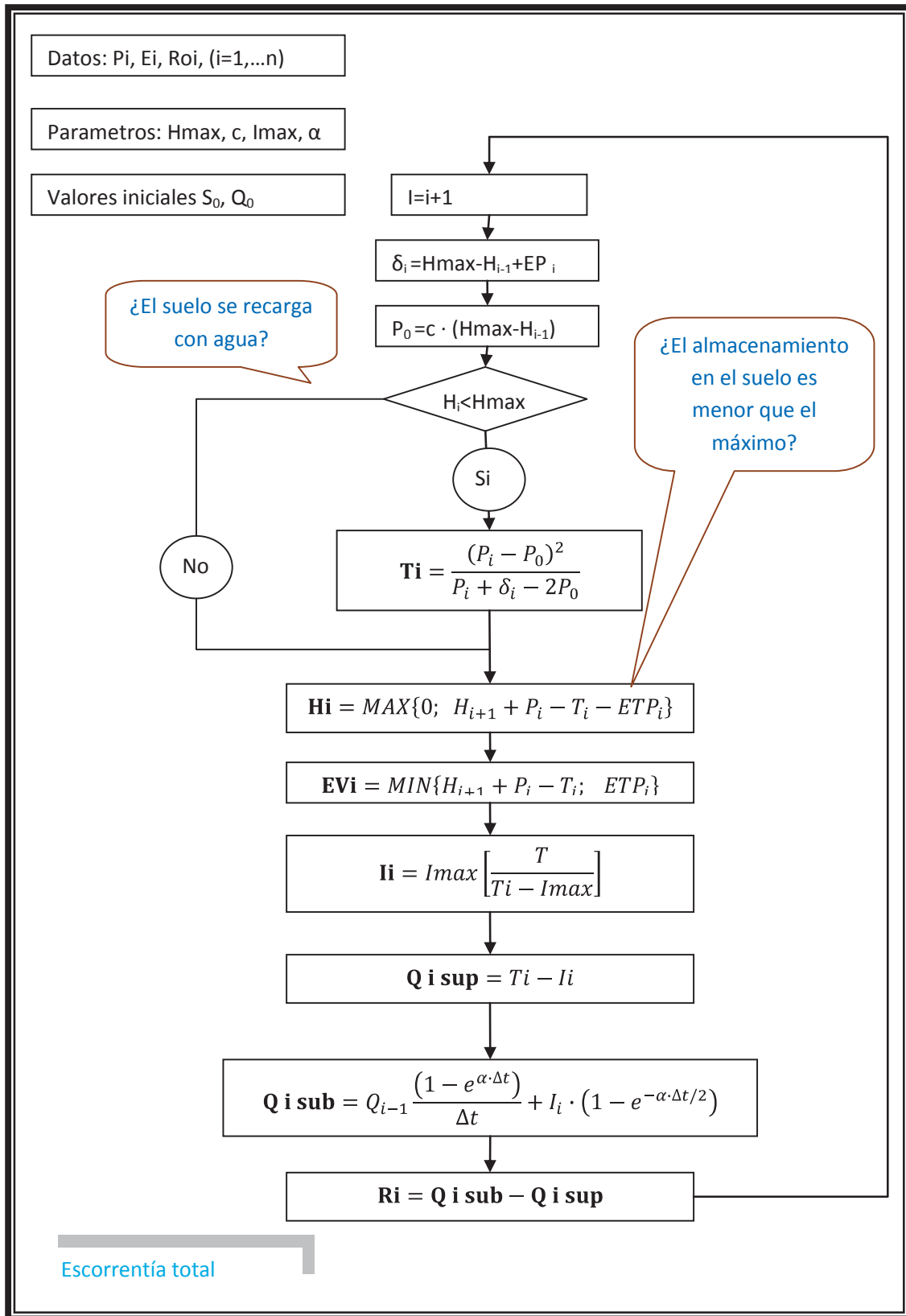


Figura 2-2: Diagrama general de flujo del modelo de Témez

Donde previamente se necesita conocer P_0 y δ_i como sigue;

$$\delta_i = H_{max} - S_{i-1} + ETP_i \quad (2)$$

$$P_0 = C(H_{max} - S_{i-1} + P_i) \quad (3)$$

En donde,

δ_i = Déficit máximo de humedad del suelo en mm.

P_0 = Déficit de humedad del suelo modificado, en mm.

De acuerdo a este modelo se tienen dos partes, la primera que no es excedente y otra parte que forma el excedente.

Lo que no es excedente se divide en humedad del suelo y evapotranspiración real y se calcula de cómo sigue:

- 1) Para que la humedad del suelo (H_i) sea máxima al final del mes se tiene que:

$$H_i = \text{máxima} \begin{cases} 0 \\ -H_{i-1} + P_i - T_i - ETP_i \end{cases} \quad (4)$$

- 2) Con una evapotranspiración (EV_i) mínima dada por la siguiente condición:

$$EV_i = \text{mínima} \begin{cases} H_{i-1} + P_i - T_i \\ ETP_i \end{cases} \quad (5)$$

Para el excedente se tienen dos partes, la infiltración real (I_i) que se convierte en recarga al acuífero, mientras que la otra parte del excedente va a formar parte de la escorrentía superficial (aportación superficial) y se calcula como sigue:

- 1) La infiltración calcula de acuerdo a la siguiente ley:

$$I_i = I_{max} \cdot \frac{T_i}{T_i + I_{max}} \quad (6)$$

- 2) Y la escorrentía superficial está dada por la siguiente expresión:

$$A_{sup i} = T_i - I_i \quad (7)$$

Por lo que las ecuaciones que regulan el comportamiento del acuífero son las siguientes:

$$V_i = V_{i-1} + R_i \quad (8)$$

$$Q_i = \alpha \cdot D_i \cdot V_i \quad (9)$$

El volumen de agua almacenada en el acuífero es:

$$V_{i-1} = V_i - Q_i \quad (8)$$

La aportación total se calcula como la aportación superficial más la aportación subterránea. Así el modelo contempla el ajuste de 4 parámetros H_{max} , C , I_{max} α .

Este modelo es muy sencillo y se puede crear este proceso completo en Excel teniendo los datos de entrada que sería las precipitaciones, las temperaturas y la evapotranspiración de la zona que se trate.

Para el presente trabajo se elaboró en Excel con el objetivo de comprender el funcionamiento del modelo de Témez, ya que en la formulación del modelo PATRICAL tiene algunas modificaciones que se verán en el apartado de Formulación del modelo.

2.3. Modelos distribuidos

Este tipo de modelos simulan el funcionamiento del sistema cuenca, resolviendo de forma numérica el sistema de ecuaciones diferenciales de flujo y conservación de masas de los procesos que constituyen el ciclo hidrológico. Son muy recientes y hasta la fecha su utilización ha sido escasa, si se exceptúa en proyectos de investigación. Por otra parte requieren de una serie de datos difícilmente disponibles en la mayoría de los estudios. El modelo más conocido en Europa es el S.H.E. (Abbott et al, 1986), sistema realizado conjuntamente por el Instituto de Hidrología Británico y el SOGREAH (Francia) con la ayuda financiera de la Comunidad Europea. Los fundamentos de este modelo se describen brevemente a continuación.

2.3.1. El modelo S.H.E.

La cuenca es representada en el plano horizontal mediante un mallado rectangular y el sistema río se adapta a los contornos de una serie de elementos de la malla. La estructura del modelo es la siguiente:

- a) Componente de flujo no saturado unidimensional en columnas de suelo de espesor variable.
- b) Componente de flujo superficial bidimensional, que conecta con a)
- c) Componente de flujo subterráneo bidimensional, que conecta con a)

Esta estructura viene ilustrada en la figura siguiente (Figura 2-3)

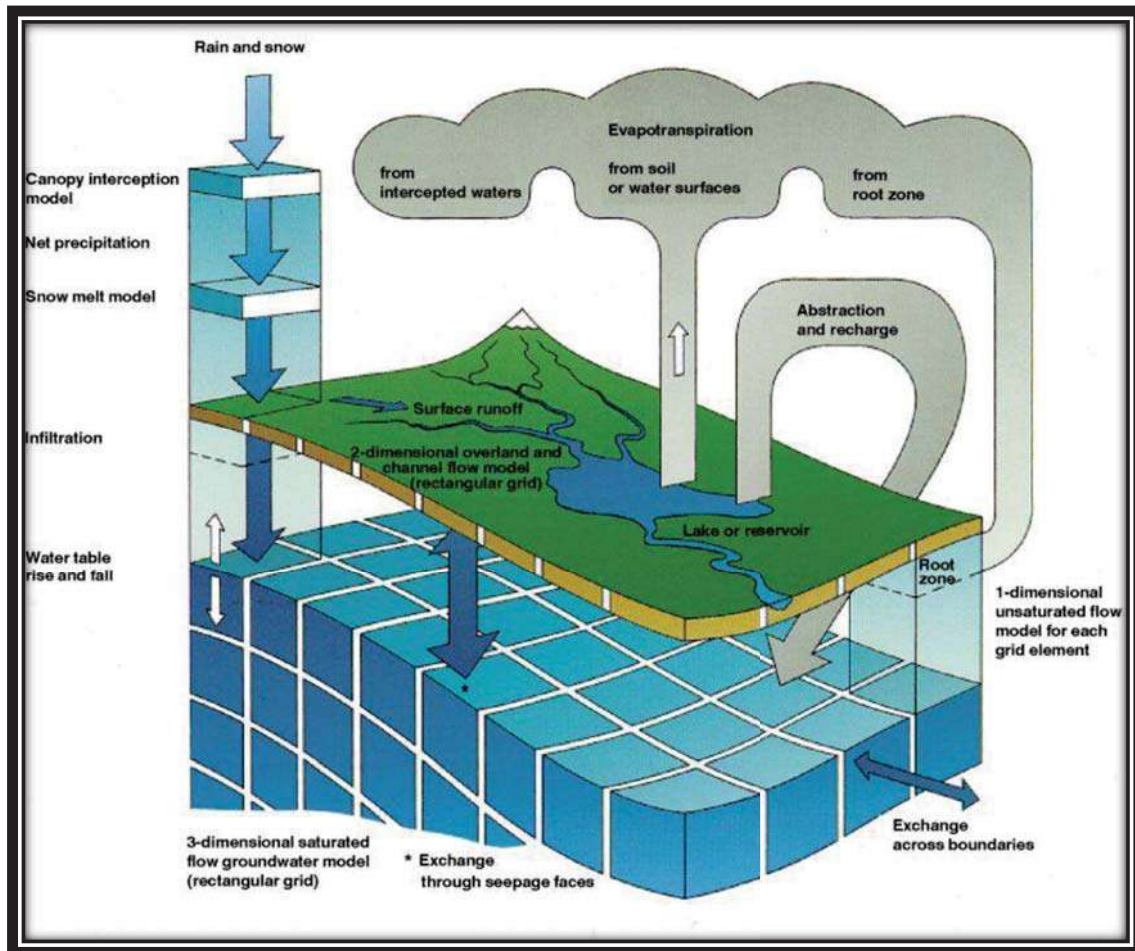


Figura 2-3. Estructura del modelo S.H.E. (D.I.H. 1985)

Los cinco procesos hidrológicos incluidos en el S.H.E. son:

- 1) Intercepción/evapotranspiración
- 2) Flujo en el canal y sobre el terreno. Resolución de la ecuación y momentos.
- 3) Flujo no saturado. Resolución de la ecuación diferencial de Richards.
- 4) Flujo saturado. Resolución de la ecuación diferencial en derivadas parciales de flujo subterráneo.
- 5) Fusión de la nieve. Resolución simultánea de las ecuaciones de flujo de calor y de agua dentro del paquete de nieve.

Este modelo requiere de un gran número de datos para su operación. La falta de estos puede crear dudas significativas en los resultados de los parámetros de la cuenca, que se convertirán en dudas en las predicciones. Sin embargo el S.H.E. es capaz de cuantificar esas incertidumbres llevando a cabo análisis de sensibilidad para rangos realistas de los parámetros.

2.3.2. Modelo CEQUEAU

El modelo hidrológico CEQUEAU fue desarrollado en el Instituto Nacional de Investigación Científica de La Universidad de Québec en Canadá, y reproduce el sistema hidrológico de una cuenca (Morin y Paquet, 1995). CEQUEAU es un modelo hidrológico de parámetros distribuidos que puede discretizar el área en estudio hasta un máximo de 1000 cuadrados elementales, los que a su vez se pueden subdividir en cuatro subáreas como máximo; esto permite al modelo calcular los caudales en cada cuadro o subcuadro y tomar en cuenta las variaciones espacio-temporales de las características fisiográficas e hidrometeorológicas de la cuenca en estudio (Bâ et al. 2001). Además el modelo CEQUEAU permite estimar caudales tanto en puntos aforados como en puntos no aforados, y ofrece la posibilidad de simular la existencia de almacenamientos artificiales.

El modelo hidrológico CEQUEAU está constituido básicamente por el módulo de preparación de datos fisiográficos, el módulo de preparación de datos hidrometeorológicos y el módulo de simulación. Los datos de entrada al módulo de preparación de datos fisiográficos consisten de los datos generales de los cuadros (información de la red de drenaje, ocupación del suelo y altitud de los cuadros que discretizan la cuenca en estudio), los datos de la superficie de la cuenca, así como la ubicación de las estaciones hidrométricas consideradas en la simulación.

2.4. Etapas en el desarrollo de un modelo distribuido

Las etapas del desarrollo de un modelo establecen el mejor orden para llevar a cabo el desarrollo de un modelo, y así que nos permita el mejor manejo de la información y los mejores resultados, las etapas se listan a continuación.

- 1) Formación del modelo conceptual
- 2) Construcción del modelo
- 3) Calibración de los parámetros del modelo
- 4) Validación del modelo
- 5) Análisis de sensibilidad del modelo

Para estas fases de desarrollo de un modelo se muestra el esquema de la figura 2-4.

a) Formación del modelo

Por modelo conceptual se entiende la idea, fundamentalmente cualitativa, que se tiene del funcionamiento del modelo. Aunque el propio proceso de modelación contribuirá a formar una idea definitiva del funcionamiento del mismo, y a eliminar ciertas subjetividades en el planteamiento inicial, es conveniente formular con anterioridad, la o las posibles hipótesis basándose en los datos disponibles y en la experiencia existente en sistemas similares.

Dada la subjetividad de este proceso, es difícil dar reglas precisas de cómo atacarlo. De hecho, en la formulación del modelo conceptual es donde entran en juego todas las técnicas hidrológicas existentes o relacionadas con ellas. La calidad del modelo depende críticamente de la selección adecuada del modelo conceptual y, por tanto, el esfuerzo dedicado a esta fase por el modelador.

Es quizá la etapa más importante del desarrollo del modelo, porque esta parte será la base de toda la estructura, y donde se fijaran los objetivos del mismo.

a) Construcción del modelo

La construcción del modelo es la etapa del proceso de implementación del mismo en la que se formulan las ecuaciones que describen los distintos procesos que tienen lugar en el modelo conceptual formado, se establecen las relaciones entre ellas y se procede a su resolución, bien mediante técnicas analíticas o numéricas.

Uno de los puntos claves en la construcción del modelo determinístico es al saber aprovechar todos los esfuerzos ya realizados por otras personas u organismos en modelos similares, ya sea aprovechando parcialmente los mismos e incluso utilizándolos íntegramente si el problema objeto de estudio se adapta a sus hipótesis de funcionamiento. Lo anterior permitirá un mayor avance en el desarrollo del modelo, ahorro de tiempo y trabajo.

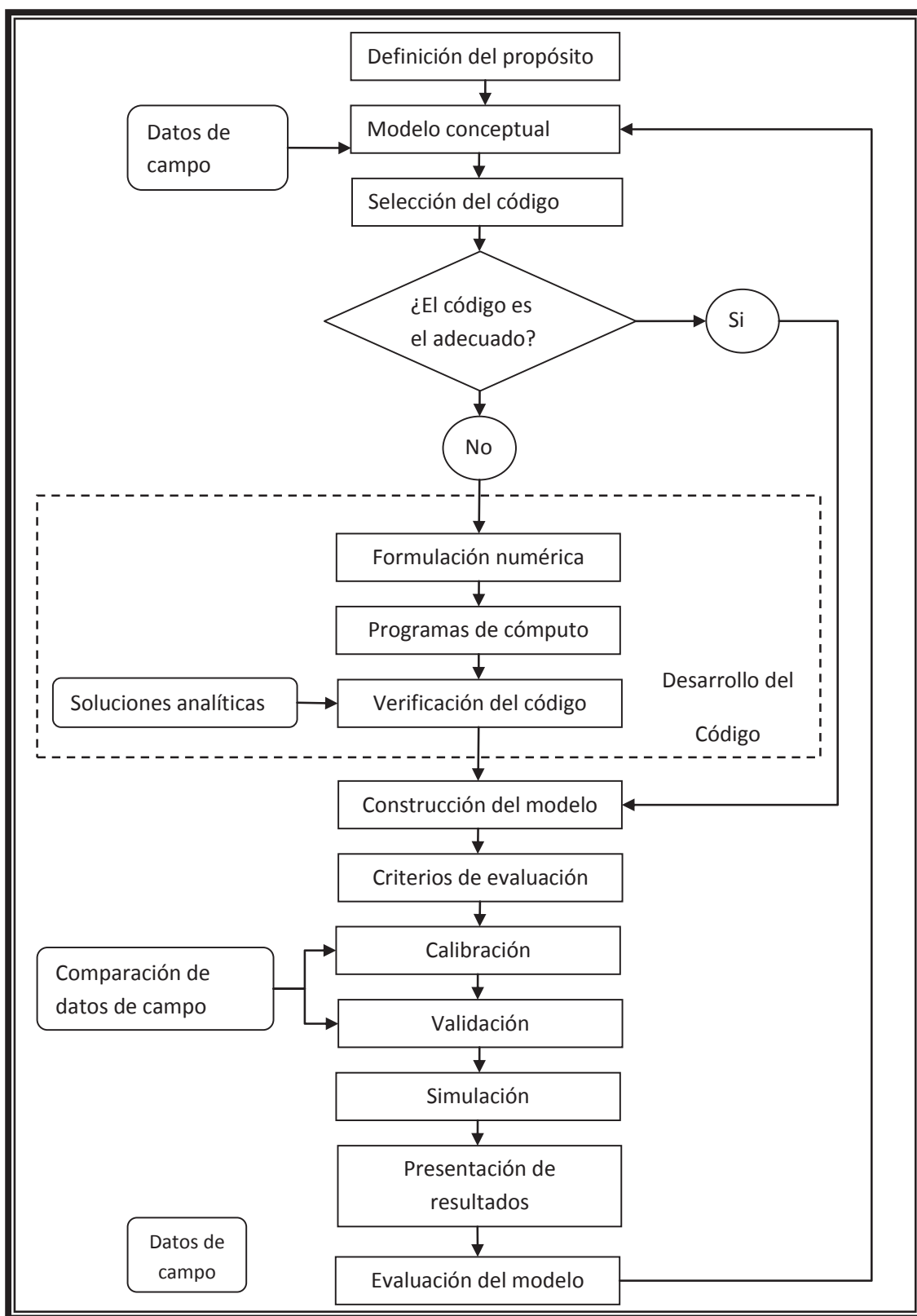


Figura 2-4. Etapas en la implementación de un modelo hidrológico (Adaptada de Abbot y Refsgaard, 1996).

b) Calibración de los parámetros del modelo

La calibración es la etapa del proceso de modelización que obliga a que el funcionamiento del modelo matemático reproduzca con mayor o menor fidelidad la historia del sistema real. Asegura que todos los datos disponibles (variables y parámetros) son cualitativa y cuantitativamente compatibles. Además de ello, la calibración suele utilizarse para dar valores numéricos a aquellos parámetros sobre los que se dispone de pocos o ningún dato. Aun en el caso hipotético de tener datos sobre todos los parámetros del modelo, no es conveniente proceder a la simulación sin haber calibrado el modelo, ya que sería difícil, sino imposible, determinar la fiabilidad de los resultados del mismo.

El grado de ajuste entre los valores simulados (Q_c) y los observados (Q_o), se puede medir o cuantificar mediante una función objetivo o criterio numérico. El proceso de calibración puede llevarse a cabo de forma manual utilizando la técnica “de prueba y error” o de manera automática, siendo el primero el más común. Cuando se realiza de forma manual, el criterio objetivo gráfico consiste en una comparación visual de los hidrogramas de los caudales simulados y observados. Estos gráficos sirven para conocer como repercute en el ajuste las modificaciones hechas en los parámetros del modelo. El proceso de calibración automático, consiste en la selección de una función objetivo de tipo numérica, la cual pueda expresarse en forma de ecuaciones matemáticas que representen el grado de ajuste del modelo, y que puedan ser tratadas mediante técnicas de optimización. Estas técnicas consisten en algoritmos de búsqueda que parten de un conjunto inicial de parámetros, y mediante un proceso iterativo, tratan de encontrar el conjunto de parámetros que mejor ajusten el modelo (Estrela, 1992).

Durante el proceso de calibración del modelo, los valores de algunos parámetros deben ser estimados, debido a que, no pueden ser evaluados directamente de datos de campo. En principio, se pueden aplicar tres métodos diferentes de calibración:

- 1) Ajuste de parámetros manualmente mediante prueba y error
- 2) Ajuste automático de parámetros mediante optimización numérica o,
- 3) Una combinación de los anteriores.

El método de calibración mediante prueba y error implica una evaluación manual de los parámetros a través de un gran número de simulaciones. Sin embargo este método es el más ampliamente usado y el más recomendado, especialmente cuando el modelo es complejo. La optimización automática de parámetros involucra el uso de algoritmos numéricos, los cuales encuentran el extremo de una función objetivo. El propósito de la optimización automática, es encontrar a través de combinaciones y permutaciones de los distintos parámetros, el posible conjunto de parámetros que den los mejores resultados en términos de los criterios de precisión. El proceso de calibración combinando la calibración manual y automática, se realiza ajustando inicialmente los parámetros de manera preliminar

a prueba y error, y posteriormente se lleva a cabo el ajuste fino mediante la calibración automática (Boyle et al., 2000).

c) Validación del modelo

La validación del modelo es el paso siguiente a su calibración. Consiste en comprobar el adecuado funcionamiento del modelo con observaciones no utilizadas en el proceso de calibración.

Una prueba clásica para llevar a cabo la validación de un modelo, consiste en dividir en dos partes la muestra de datos. Esto se puede aplicar en los casos en los que se cuenta con datos suficientes para la calibración y la validación, y dónde las condiciones de la cuenca se mantienen sin cambio o estacionarias (Klemes, 1986).

Los registros de datos disponibles se dividen en dos partes, una parte se utilizará para la calibración y la otra para la validación, y en ambos casos los resultados de la simulación deben ser aceptables. El principal problema asociado a esta prueba es que, no toda la información disponible es utilizada en la calibración, por lo que el registro de datos debe cubrir la mayor cantidad de información posible.

En la práctica esta fase se le concede poca importancia y en muchas ocasiones ni siquiera tiene lugar, utilizándose todos los registros disponibles en la fase de calibración. Esta forma de actuar es solo justificable cuando se dispone de series de observaciones muy cortas.

d) Análisis de sensibilidad del modelo

En esta fase se determina como varían los resultados proporcionados por el modelo con pequeñas variaciones del conjunto del parámetro calibrado. De esta forma se pueden acotar y tener en cuenta las incertidumbres existentes.

Como se ha visto anteriormente existen diversas clasificaciones de los modelos hidrológicos, que varían de acuerdo al autor y al enfoque que el mismo les asigne. Para nuestro caso los clasificaremos en dos grupos los determinísticos y los estocásticos. En los primeros las variables vienen determinados por leyes físicas (empíricas, conceptuales o teóricas) consideradas como exactas y que explican toda su variabilidad, mientras que en los segundos las variables son regidas en todo o en parte por las leyes del azar, y por tanto caracterizadas en términos de probabilidad.

2.5. Modelos cuasi-distribuidos

Los modelos cuasi-distribuidos son un caso intermedio entre los modelos distribuidos, tienen como característica principal que no resuelven las ecuaciones diferenciales de los procesos estudiados, sino que en esencia se basan en integrar un modelado agregado “ n ” veces, tantas como se divida la zona de estudio en subcuencas.

Como ejemplo de estos modelos se tiene el PATRICAL (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua) es un modelo distribuido espacialmente que permite la construcción de modelos de simulación mensual del ciclo hidrológico con el transporte de sustancias químicas a través de la cuenca hidrográfica.

2.6. Sistemas de Información Geográfica

En la actualidad con el avance de la tecnología surgen diversos paquetes de software que facilitan mas los trabajos del ser humano, estos avances traen consigo ahorro tanto de trabajo humano, como ahorro de energía, siendo este ultimo una de las causas principales por la que cada día se hacen esfuerzos por mejorar para ofrecer mejores servicios y productos que ayuden a preservar el medio ambiente no solo en el área de la informática sino en las diferentes áreas que existen. Uno de los grandes avances de nuestra época es el surgimiento de los Sistemas de Información Geográfica, que desde sus inicios se han ido mejorando sus capacidades y a la vez incluyendo nuevas herramientas que les dan nuevas aplicaciones.

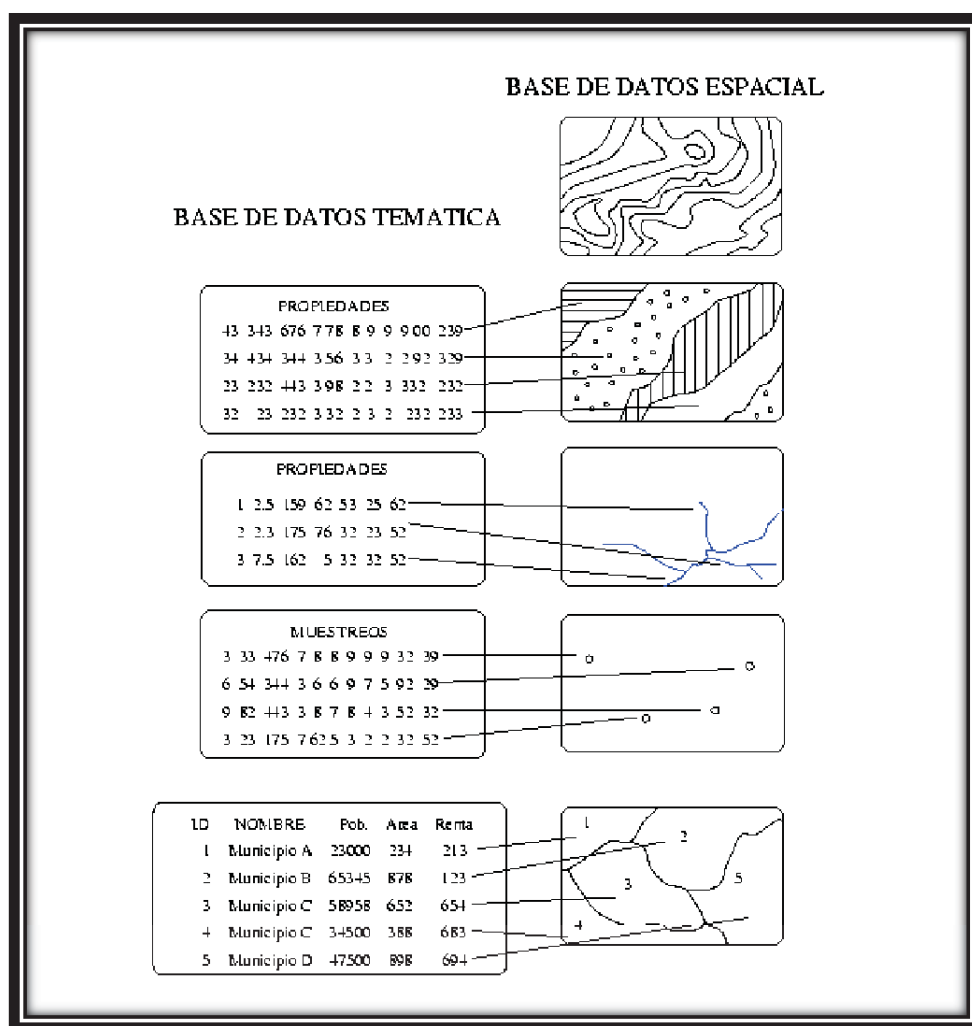


Figura 2-5. Esquema de la base de datos de un SIG.

2.6.1. Definición de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Existen diversas definiciones de un SIG, dependiendo de qué punto de vista lo vea el autor, algunas muy similares y simples y otras más complejas, sin embargo en general un Sistema de Información consiste en la unión de información y herramientas informáticas (programas) para su análisis con unos objetivos concretos. En el caso de los SIG se asume que la información incluye su posición en el espacio.

La base de un Sistema de Información Geográfica es, por tanto, una serie de capas de información espacial en formato digital que representan diversas

variables (formato raster, ver Figura 2-6), o bien capas que representan objetos (formato vectorial, ver Figura 2-7) a los que corresponden varias entradas en una base de datos enlazada. Esta estructura permite combinar, en un mismo sistema, información con orígenes y formatos muy diversos incrementando la complejidad del sistema.

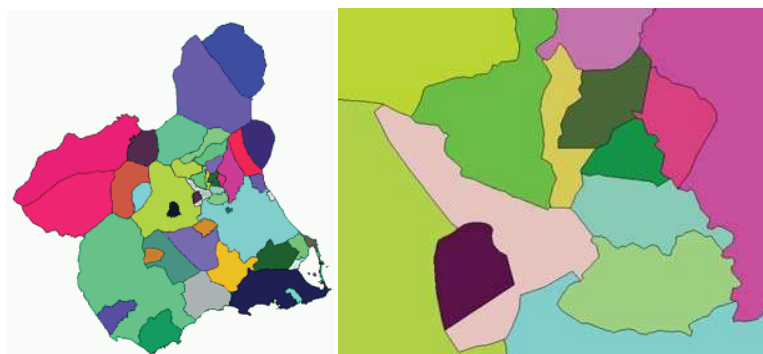


Figura 2-6: Modelo de datos vectorial.

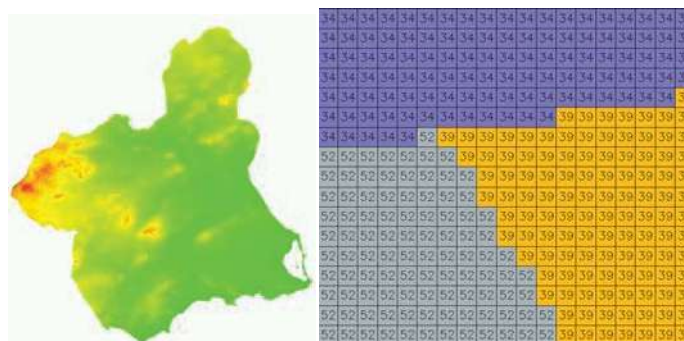


Figura 2-7: Modelo de datos raster.

Los Sistemas de Información Geográfica se han desarrollado además a partir de la unión de diversos tipos de aplicaciones informáticas: la cartografía automática tradicional, los sistemas de gestión de bases de datos, las herramientas de análisis digital de imágenes de satélite, los sistemas de ayuda a la toma de decisiones y las técnicas de modelización física. Por ello tienden a veces a ser considerados un subproducto de las facultades de informática para ser usados por informáticos.

Precisamente la fuerte carga teórica (teoría de ciencias de la tierra y ambientales) de los SIG los convierte en un auténtica pesadilla para los informáticos que acaban buscando SIG simples, blandos donde la flexibilidad (y por tanto las decisiones *científicas* que hay que tomar) a la hora de trabajar es mínima. Por otro lado, para un experto en estas materias (ciencias de la tierra y ambientales) resulta imprescindible, lógicamente, una formación informática sólida. Se ha

llegado a considerar a los SIG como un enlace entre la Geografía y la Informática al igual que la Geomorfología enlazaría Geografía y Geología.

Una de las primeras percepciones que se tienen de un SIG son las salidas gráficas a todo color, impresas o en la pantalla de un ordenador. Conviene recordar sin embargo que hay una diferencia fundamental entre los programas de manejo de gráficos y los SIG. En los primeros, el objeto importante es la imagen que vemos, siendo de poca o nula importancia como se codifique, en un SIG la imagen es sólo una salida gráfica sin mayor importancia, lo relevante son los datos que se están representando.

De acuerdo a la literatura consultada se tienen las siguientes definiciones para un SIG:

1. La primera referencia al término SIG aparece en TOMLINSON (1967) referida a una aplicación informática cuyo objetivo era desarrollar un conjunto de tareas con información geográfica digitalizada. Se trataba del Sistema de Información Geográfica de Canada (CGIS)
2. Para BERRY (1987) un Sistema de Información Geográfica es un sistema informático diseñado para el manejo, análisis y cartografía de información espacial.
3. Para BURROUGH (1988), se trata de un conjunto de herramientas para reunir, introducir, almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto particular de objetivos.
4. El National Center for Geographic Information and Analysis de USA los define como Sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión (NCGIA, 1990)

Como se puede ver estas definiciones son cada vez más complejas debido a los grandes avances tecnológicos y que cada vez se incorporan nuevos componentes a los paquetes de los SIG.

Actualmente, un Sistema de Información Geográfica o mejor conocido por su acrónimo como SIG, se define como, todo un sistema para la recolección, almacenamiento, análisis y despliegue de datos geográficos asistido por computadora. La base de datos espaciales es la parte central del sistema y está formada por una colección de mapas e información relacionada en formato digital (Eastman, 2004).

Existen en la actualidad una gran cantidad de paquetes de SIG disponibles en el mercado, con características diferentes cada uno de acuerdo al enfoque en que fue desarrollado, en el presente trabajo se vio la necesidad de trabajar con SIG para la preparación de los mapas que requiere el modelo PATRICAL, los cuales se listan a continuación:

2.7. Idrisi

IDRISI es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de estructura raster desarrollado por la Escuela de Post-Grado en Geografía, de la Universidad de Clark, en Worchester, Massetusets, EE.UU. Es un SIG de bajo costo, de tipo no comercial y está diseñado para ofrecer herramientas profesionales y geográficas en el análisis espacial.

Este software nació bajo del nombre "The IDRISI Project" (IP) en el "Clark Laboratories for Cartographic Technology and Geographic Analysis" que pertenece a la Escuela de Post-grado en Geografía.

"The IDRISI Project" comenzó con financiamiento de UNEP/GRID (United Nations, Environmental Program/Global Research Information Database) y USAID (United States Agency for International Development). Aunque sigue manteniendo relaciones con ambos organismos, económicamente el IP está financiado solamente por las ventas propias de software.

La filosofía del IP originalmente fue ofrecer a los académicos y estudiantes de centros educativos, un SIG de bajo costo para aplicarlo en capacitación e investigación en el análisis espacial. El hecho que de ser parte de una universidad, el grupo de IDRISI trabaja en un plan más familiar y no tanto como una gran casa comercial, permitiendo un ambiente más accesible y amigable para los usuarios.

Desde su inicio en 1987, IDRISI ha evolucionado constantemente para convertirse en uno de los SIG's más utilizados a nivel mundial y con altas capacidades de análisis tanto para mapas, como imágenes de satélite, todo ello a nivel de microcomputadoras. Este SIG puede ser ubicado en más de 120 países alrededor del mundo y sus aplicaciones son de las más variadas, entre ellas: planificación regional y local, manejo y conservación de los recursos naturales, etc.

A partir de 1995 el IP se dio a la tarea de fundar diversos Centros de Recursos a nivel mundial con el objetivo de establecer relaciones académicas cuyo objetivo es aplicar a Idrisi en sus diferentes actividades.

Estos centros están dedicados a la capacitación y divulgación del software de IDRISI a la comunidad académica y profesional. El más nuevo de estos centros, es el que se fundó en el estado de México en la Universidad Autónoma de Toluca.

El autor principal del software es el Profesor en Geografía J. Ronald Eastman y con un equipo de aproximadamente 15 personas en programación, diseño gráfico, elaboración de manuales, arte, etc., sacaron la nueva versión para Windows (Versión 1.0) que salió en setiembre de 1995.

Actualmente, está disponible Idrisi Andes VERSION 15 y el CRI-CR es un facilitador para adquirir este software.

2.7.1. Idrisi Andes

Tras dos décadas de desarrollo continuo IDRISI ofrece en la actualidad uno de los productos con mayor poder analítico en el ámbito del geoanálisis, especialmente en las áreas de toma de decisiones, gestión de la incertidumbre, procesamiento de imágenes y análisis de cambios y series temporales. Fruto de un importante esfuerzo investigador, IDRISI es una herramienta con un marcado carácter profesional, cuyo desarrollo se ha basado siempre en una filosofía sin ánimo de lucro. Quizás lo más destacable de este proyecto haya sido su carácter abierto y de intercambio de ideas, permitiendo el desarrollo de un producto fruto de las contribuciones de usuarios procedentes de un amplio abanico de disciplinas, lo que se evidencia en la última versión del programa.

IDRISI Andes es una solución software con SIG integrado y procesamiento de imágenes que ofrece más de 250 módulos para el análisis y presentación de información espacial digital. IDRISI ofrece el paquete más completo de herramientas GIS y de procesamiento de imágenes de la industria en un paquete único y asequible.

Herramientas para planificación de territorios, soporte para la toma de decisiones y análisis de riesgo son incluidas con poderosas herramientas de estadística espacial, análisis de superficies y modelaje espacial. Con IDRISI, todas las necesidades estadísticas se vuelven simples no hay necesidad de comprar extensiones del programa para mejorar sus habilidades investigativas. La edición Andes, lanzada en abril del 2007, es la decimoquinta edición del

software IDRISI desde 1987. IDRISI es utilizado por investigadores y profesionales de las industrias de más de 175 países del mundo.

2.7.2. Innovaciones en Idrisi Andes

Idrisi Andes ofrece de forma integrada las funciones de un SIG y de un software para el procesamiento de imágenes, pues contiene más de 250 módulos para el análisis y despliegue de información espacial digital.

Ofrece el más amplio grupo de herramientas SIG y de procesamiento de imágenes en un paquete accesible.

Incluye herramientas para el ordenamiento territorial, toma de decisiones y análisis de riesgo junto a funciones para estadísticas espaciales, análisis de superficie y modelado espacial, por lo que no es necesario comprar módulos adicionales.

Además, Idrisi Andes incluye mejoras en el despliegue de datos espaciales y la combinación de los mismos mediante el uso de transparencias.

2.7.3. Componentes de Idrisi Andes

- 1) **Sistema de gestión de archivos y visualización:** en el nuevo gestor de archivos se han unificado las tareas que se realizaban a través de cuatro módulos anteriores (Idrisi Explorer, MetaData, Data Paths y Collection Editor). Además se han incorporado mejoras en el módulo de visualización en 3D, generación de vuelos virtuales en 3D, modificación de las categorías de la leyenda, creación de transparencias, etc.
- 2) **Renovación del sistema de base de datos:** mayores posibilidades de intercambio con bases de datos externas y hojas de cálculo. Compatibilidad con la tecnología ADO de Microsoft.
- 3) **Clasificadores:** inclusión de nuevos módulos de clasificación de imágenes de satélite basados en redes neuronales, clasificadores “blandos”, etc. y mejora de los ya existentes.
- 4) **Módulo de evaluación de cambios de usos del suelo:** sin duda la gran novedad y aportación de esta nueva versión es la creación de un módulo completo para analizar y predecir cambios de usos del suelo y calcular las implicaciones que esos cambios puedan tener sobre los distintos hábitats y sobre la biodiversidad. Se trata de la primera aplicación vertical desarrollada por Clark Labs y en

Octubre de 2007 ha sido lanzado a la venta una versión de este módulo como extensión de ArcGis.

Como se ha mencionado, Idrisi tiene una variedad de funciones y aplicaciones lo que lo hace un software muy potente al igual que otros SIG y puede desarrollar un sinfín de tareas de acuerdo a las habilidades del usuario para manipularlo.

2.7.4. ¿Qué se puede hacer con Idrisi Andes?

- a) Explorar, predecir y modelar impactos en la cobertura del suelo a través del innovador Modelador del Cambio de Uso del Suelo (Land Change Modeler – LCM).
- b) Procesar imágenes de sensores remotos a través de un amplio grupo de técnicas de procesamiento que incluyen innovadores clasificadores suaves, redes neuronales y análisis de árboles de decisión.
- c) Utilizar herramientas para toma de decisiones y manejo de incertidumbre para localizar recursos y crear mapas de idoneidad.
- d) Comparar pares de imágenes y analizar tendencias y anomalías a partir de una serie de imágenes de periodos anteriores.
- e) Importar y exportar a una gran variedad de fuentes de información, incluyendo los más importantes formatos de vector e imágenes.

Al igual que muchos SIG, Idrisi es uno de los Sistemas de Información Geográfica más popular desde sus inicios y ha ido mejorando su estructura y funcionalidad de acuerdo a las necesidades de los usuarios y los constantes avances tecnológicos que van surgiendo. Lo más nuevo en la actualidad de este SIG es la nueva edición llamada Idrisi TAIGA la cual a la está en venta en los centros de recurso IDRISI de todo el mundo.

2.8. ArcView

ArcView es un producto del Environmental Systems Research Institute (ESRI), los fabricantes de ARC/INFO, el más importante software de sistemas de información geográfica (SIG). A diferencia de ARC/GIS, ArcView está optimizado para ver, consultar, analizar presentar en forma de mapas datos espaciales, no obstante es posible utilizarlo para elaborar información geográfica de una manera más sencilla que con ARC/GIS. Elaborar información geográfica es localizar puntos (p.ej. lugares), líneas (p.ej. carreteras o ríos) o polígonos (p.ej. parcelas de terreno, campos de cultivo) del espacio y asignarles unos atributos.

ArcView es conocido como un SIG "desktop" o de escritorio, lo cual quiere decir que es una aplicación enfocada a usuarios finales y administradores de sistemas, los cuales no requieren de hacer complejos análisis y producir nueva información, sino consultar información que ya existe de una manera rápida y precisa en una interface amigable y accesible.

Cuenta con importantes características de funcionalidad tales como tener una arquitectura abierta que no se encuentra ligada a una plataforma específica de hardware. Puede ser ejecutado sin problemas en las diferentes plataformas comerciales disponibles en el mercado, tanto en PC bajo NT como en estación de trabajo bajo sistemas UNIX, sin perder funcionalidad, ya que cuenta con la misma interface y herramientas de trabajo en ambos entornos.

Cuenta con dos valores agregados primarios, un lenguaje de programación nativo denominado AVENUE el cual permite personalizar las funciones del programa y la interface de trabajo, así como un conjunto de extensiones especializadas que permiten al usuario realizar procesamiento más complejos de aquellos contenidos en el núcleo base, haciendo del entorno de ArcView una herramienta de visualización, consulta y análisis, poderosa, accesible y fácil de usar.

2.8.1. Funciones básicas del programa ArcView

Las funciones de ArcView son similares a las de otros SIG, la diferencia es que está orientado a datos vectoriales (Figura 2-2), aunque también se puede trabajar con datos raster. A continuación se listan algunas de las funciones de ArcView:

a) Visualización

Arcview es capaz de visualizar y desplegar información raster y vectorial provenientes de diferentes formatos estándar, así como aquellos de la familia de

productos de ESRI. De tal manera que es posible integrar datos provenientes de diferentes fuentes en un solo ambiente de despliegue, consulta y análisis.

b) Generación de productos cartográficos

De manera rápida, sencilla y accesible, se pueden generar mapas de calidad profesional con diferentes tipos de datos tanto vectoriales como raster. Cuenta con todas las herramientas necesarias para crear los mapas de una manera automatizada con todos los elementos necesarios tales como leyendas o simbología, nortes, barras de escala, textos adicionales, logotipos e imágenes. La impresión de los mismos puede llevarse a cabo en impresoras convencionales o plotters de diferentes marcas y modelos.

c) Consulta grafica y tabular

Cuenta con las opciones para visualizar tanto datos gráficos como tabulares de manera ligada por la estructura de datos topológicas, de tal manera que pueden realizar selecciones interactivas, utilizando una entidad gráfica (polígono, círculo o línea), una expresión lógica o condición, expresando estos resultados visualmente por medio de gráficas de pie, barras ó líneas para hacer análisis comparativos.

Así mismo, pueden realizarse clasificaciones mediante diferentes métodos en base a los atributos de los elementos de las diferentes capas de información para generar información temática. De esta forma una misma capa puede ser desplegada de diferentes maneras en base a sus atributos, por lo que es posible hacer comparaciones directas de la información e incluso graficaciones de la misma.

d) Análisis espacial

Arcview en su módulo base cuenta con herramientas especiales para realizar operaciones de análisis espacial entre capas de información, las cuales van desde sobreposición gráfica de diferentes layers con la opción de ligar sus bases de datos, hacer análisis de área de influencia o afectación y establecer las relaciones existentes entre diferentes capas.

e) Integración de datos

ArcView cuenta con la funcionalidad de desplegar diferentes formatos de información en un ambiente integrado, tales como dibujos CAD en formato DXF o DWG, archivos de texto o ASCII, coberturas en formato de Arcinfo, además de contar con un archivo de formato nativo denominado shapefile, entre los formatos

vectoriales. Para los formatos raster puede visualizar archivos en formato TIFF, GIF, genérico binario, imágenes de satélite o mapas escaneados en formato de ERDAS Imagine .img o .lan, así como archivos GRID de Arcinfo. Finalmente en las bases de datos, de manera nativa trabaja los archivos en formato .dbf, por lo cual son accesibles las tablas provenientes de otros paquetes de software que manejen este mismo formato sin necesidad de conversión, archivo de texto ASCII y archivos en formato INFO.

f) Desarrollo de aplicaciones

Por la funcionalidad del lenguaje de programación AVENUE es muy fácil incluso para usuarios no experimentados o que no tienen conocimientos de programación personalizar la interface de trabajo del software o realizar pequeñas aplicaciones. Cuenta además con la herramienta de Dialog Designer, la cual integra nuevas funciones y objetos al ambiente de programación de manera accesible para los usuarios lo cual permite crear aplicaciones más complejas.

g) Manejo de bases de datos

Además de tener un manejador interno de bases de datos para la administración y control de las tablas de atributos de los elementos, cuenta con la opción de tener acceso a bases de datos relaciones tales como ORACLE, SYBASE, INFORMIX, SQL SERVER, entre otras.

Como funciones nativas, permite manejo de tablas tales como adición o eliminación de campos, modificación de registros, uniones o relaciones de tablas.

2.9. GRASS

En estos momentos, el software libre se ha convertido en un sinónimo de innovación y progreso. Uso libre, modificación y distribución de programas y su código fuente garantizan el libre intercambio de ideas entre usuarios y desarrolladores al igual que un sistema de licencias apropiado. GRASS (por su siglas en inglés, the Geographic Resources Analysis and Support System, <http://grass.itc.it>) es un Sistema de Información Geográfica (SIG) gratuito y código abierto integrado con un sistema de procesamiento de imágenes y subsistemas de visualización. GRASS cuenta con interfaces para PostgreSQL, MySQL, DBF y bases de datos conectadas con ODBC. Además puede ser conectado a UMN/MapServer, R-stats, gstat, Matlab, Octave, Povray y otros paquetes del software, lo que lo hace un software versátil y compatible con diferentes paquetes de programación. GRASS es un programa completamente modular, es decir se basa en más de 350 módulos y herramientas que ejecutan tareas concretas y simples. Cuando se ejecuta GRASS no se carga un gran programa en memoria, sino que simplemente se cargan una serie de nuevas variables de entorno que permiten el acceso a los datos y a los módulos de GRASS. Estos incluyen herramientas para el manejo de información en formatos raster y vectorial así como mapas de puntos (sites), herramientas para el análisis de imágenes de satélite, para el enlace a bases de datos y paquetes estadísticos GIS, así como para la producción de gráficos. Sin embargo en las últimas versiones existe una interfaz gráfica de usuario basada en Tcl-Tk. Existe también una versión para Windows, que funciona con un emulador llamado Cygwin, el cual proporciona un comportamiento similar a los sistemas Unix en Windows, con la cual es la que trabaja el modelo PATRICAL (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua) implementado en la cuenca del río grande de Morelia.

Fue inicialmente desarrollado como herramienta militar en los laboratorios de investigación del Cuerpo de Ingenieros del ejército americano (USA-CERL, 1982-1995). A partir de estos orígenes GRASS ha evolucionado como una herramienta de gran potencia cuyo rango de aplicaciones abarca diversas ramas de la investigación científica. Se utiliza en el contexto académico, comercial y administrativo. Entre las organizaciones que lo utilizan destacan NASA, NOAA, USDA, el servicio americano de parques nacionales, la oficina americana de censos o el USGS.

GRASS incluye herramientas para el almacenamiento, actualización, visualización y análisis de datos espaciales; así como para la introducción de diversas estrategias de modelización. El objetivo inicial con que fue diseñado era la planificación territorial, pero sus capacidades se han extendido a otros campos como la ingeniería, hidrología, geología, física, estadística, teledetección y aplicaciones empresariales.



Figura 2-8. Pantalla de inicio en GRASS.

Desde sus inicios GRASS está pensado para trabajar bajo el entorno del sistema operativo Linux, debido a que este también es un sistema operativo de uso libre, y muy potente, sin embargo debido a la gran cantidad de usuarios de todo el mundo, como se ha comentado se ha trabajado este paquete con un emulador que hasta la fecha ha dado muy buenos resultados.

GRASS es un programa ideal para usar en aplicaciones ingenieriles, en el área de investigación y en el ámbito de planificación territorial. Es un programa que al igual que otros SIG puede visualizar y manipular datos vectoriales, como carreteras, ríos, límites, etc. Puede además utilizarse para la actualización de mapas utilizando las herramientas de digitalización con que cuenta este software. Dispone también de capacidad de manipular datos raster así como también para realizar transformación entre diferentes formatos, como raster y vectorial.

2.9.1. Funciones de GRASS

La potencia de GRASS reside en los diversos campos ya tiene la capacidad de realizar diferentes tareas como las que se listan a continuación:

- Capacidad para leer y escribir mapas y tablas de datos en los formatos propietario más generalizado (incluyendo ARC/Info e Idrisi).
- Los usuarios que quieran escribir su propio código pueden hacerlo utilizando las librerías de GRASS disponibles y bien documentadas y el Manual del Programador de GRASS
- La gran potencia de sus herramientas para el manejo de datos raster, da a GRASS la capacidad para funcionar como un entorno de modelización espacial. Contiene más de 100 comandos para la gestión y análisis de datos raster.
- Procesos superficiales como la transformación lluvia-escorrentía tal es el caso de este trabajo de investigación aplicado a la cuaca del rio grade de Morelia, construcción de líneas de flujo, análisis de estabilidad de taludes y análisis espacial son algunas de las posibles aplicaciones para ingeniería y planificación territorial. Puesto que muchas de las herramientas son multifuncionales los usuarios pueden crear sus propios mapas a partir del análisis de datos en GRASS. Además de la perspectiva convencional en 2 dimensiones, GRASS permite la incorporación de la tercera dimensión. Los mapas raster, vectoriales y puntuales pueden utilizarse para la visualización.
- Las herramientas de GRASS permiten al usuario realizar animaciones con los datos espaciales disponibles, cambiando sobre la marcha las capas visualizadas. Los datos utilizados en visualizaciones 3D pueden también almacenarse como ficheros gráficos o como animaciones en formato mpeg para posterior visualización.
- GRASS contiene un amplio conjunto de herramientas para el análisis y modelización hidrológica, análisis de cuencas, obtención de número de curva, análisis de avenidas, características de los cauces y redes de drenaje, todas estas potencialidades son aprovechadas por el modelo PATRICAL para modelar lo más fiel a la realidad el ciclo hidrológico, sin embargo este modelo posee un herramienta de modelación de calidad del agua, pero no el alcense de este trabajo se limitara a la simulación exclusivamente del ciclo hidrológico, cabe mencionar que este es solo el inicio de un gran proyecto para su aplicación en México.
- GRASS puede utilizar datos de campo como entrada de modelos o simular parámetros a partir de datos numéricos.
- Además de la versión tradicional en línea de comandos, se ha desarrollado una interfaz gráfica en Tcl/Tk, independiente de la plataforma, que facilita el acceso a los recursos del programa. Se trata de una interfaz intuitiva que facilita la visualización y manipulación de los datos del usuario. Prácticamente todos los programas disponibles en GRASS están disponibles en esta interfaz. Esta sencilla interfaz de usuario convierte al programa en la plataforma ideal para el aprendizaje del uso de Sistemas de Información Geográfica

Una de sus grandes ventajas de este sistema de información geográfica en comparación con otros SIG es que es de uso público y está al alcance de quienes

lo deseen utilizar, siempre y cuando tengan las herramientas necesarias para obtener el máximo rendimiento del mismo, ya que tiene un gran potencial al ser desarrollado por diferentes desarrolladores expertos en el área de la informática de los SIG y que cada uno lo ha ido mejorando de acuerdo a sus necesidades y a las tareas que cada quien realiza. Sin embargo tiene el inconveniente de que no es muy amigable y su uso se vuelve un poco complicado.

2.10. Bases de datos meteorológicas e hidrológicas

La información es uno de los requisitos indispensables para cualquier proyecto de investigación, sin la cual no sería posible la realización de los trabajos, esto nos lleva a recabar la información de las mejores fuentes para obtener resultados confiables que se ajusten a las necesidades del trabajo del usuario de dicha información. Además debe ser información de fuentes confiables que nos garantice que es información correcta.

En México hay diferentes bases de datos de las cuales se puede extraer información tanto meteorológica como hidrológica, sin embargo hay información con muchos errores, lo que hace que antes de utilizar la información se haga una revisión para ver que la información sea correcta. A continuación se listan las principales bases de datos que se consultaron y de las cuales se obtuvo la información para este trabajo.

2.10.1. Bases de datos meteorológicas

Las bases de datos meteorológicas contienen información de temperatura, de precipitación principalmente y son las que se muestran a continuación.

a) CLICOM

México cuenta con alrededor de 6000 estaciones climatológicas de las cuales solo unas 3500 se encuentran en operación. Esta información se recopila en la Base de Datos Climatológica Nacional (BDCN) que administra la Unidad de Servicio Meteorológico Nacional (USMN) que es una dependencia de la Comisión Nacional de Agua (CNA) y que a su vez depende de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)

La CNA se maneja con el programa CLICOM, (Figura 2-9) proporcionado por la organización meteorológica mundial, el cual en la actualidad está al alcance de todos, la desventaja es que es poco amigable, ya que no tiene una interfaz gráfica, sino que hay que introducir algunos comandos en la interfaz para poder bajar la

información, de la cual se obtuvo la información de precipitaciones y temperaturas necesarias para este trabajo.

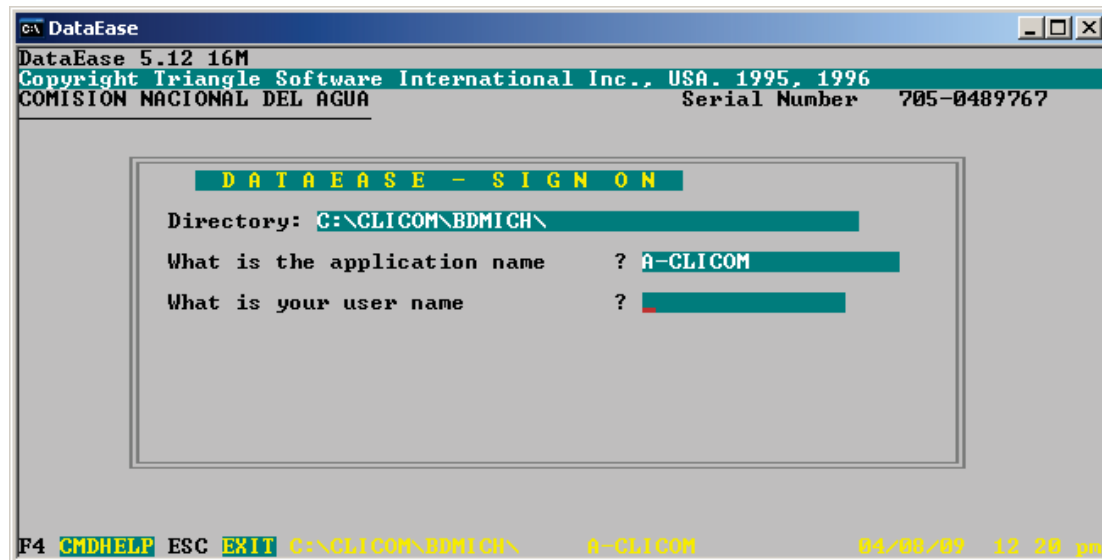


Figura 2-9. Interfaz de CLICOM.

CLICOM tiene el inconveniente de solo proporcionar información de un solo estado, lo que nos ha hecho recurrir a otras bases de datos como el ERIC para aprovechar el máximo de información disponible.

b) ERIC

ERIC es una base de datos al igual que CLICOM, la diferencia radica en que ERIC contiene información a escala nacional y CLICOM es una herramienta de gestión de datos únicamente estatal, aunque hay ciertas variaciones respecto a los registros que tiene cada base de datos, sin embargo es una diferencia mínima de 0.1mm en promedio, desde luego, eso no nos garantiza que toda la información sea correcta, ya que la información está expuesta a diversos errores, como por ejemplo, se pueden cometer errores al cargar la información a las bases de datos, al hacer las mediciones, ect.

ERIC cuenta con los datos de cerca de 5000 estaciones, de las cuales están en operación alrededor de 3000. Se trata de estaciones que reportan información cada 24 horas de las siguientes variables climatológicas:

- Temperatura observada (A las 8 hrs)
- Temperatura mínima
- Temperatura máxima (Día anterior)
- Precipitación 24 hrs (de 8:00 am a 8:00 am)
- Evaporación 24 hrs (de 8:00 am a 8:00 am)
- Tormenta 0=no hubo 1=si hubo

- Granizo 0=no hubo 1=si hubo
- Niebla 0=no hubo 1=si hubo
- Cobertura del cielo: 0=despejado, 1=medio nublado y 2=nublado

Existen 95000 registros de anuales de cada variable. Algunas estaciones trabajan desde 1930, aunque la mayoría de los datos corresponden al periodo de 1960 a 1995. A partir de 1988 solo se cuenta con información de 20 estados.

El programa ERIC facilita la extracción rápida de la información climatológica permitiendo seleccionar la variable de interés y el intervalo de tiempo para una región determinada que puede elegirse de distintas maneras como puede verse en la figura 2-10, lo hace un programa más eficiente que el CLICOM, debido a que CLICOM se obtienen los resultados en una sola hoja de cálculo y hay que separarlos para tener cada variable que nos interese.

ERIC tiene diferentes opciones para bajar la información, puede ser por estación, por las estaciones de un área rectangular, por estaciones de un polígono convexo como se muestra en la Figura 2-10.

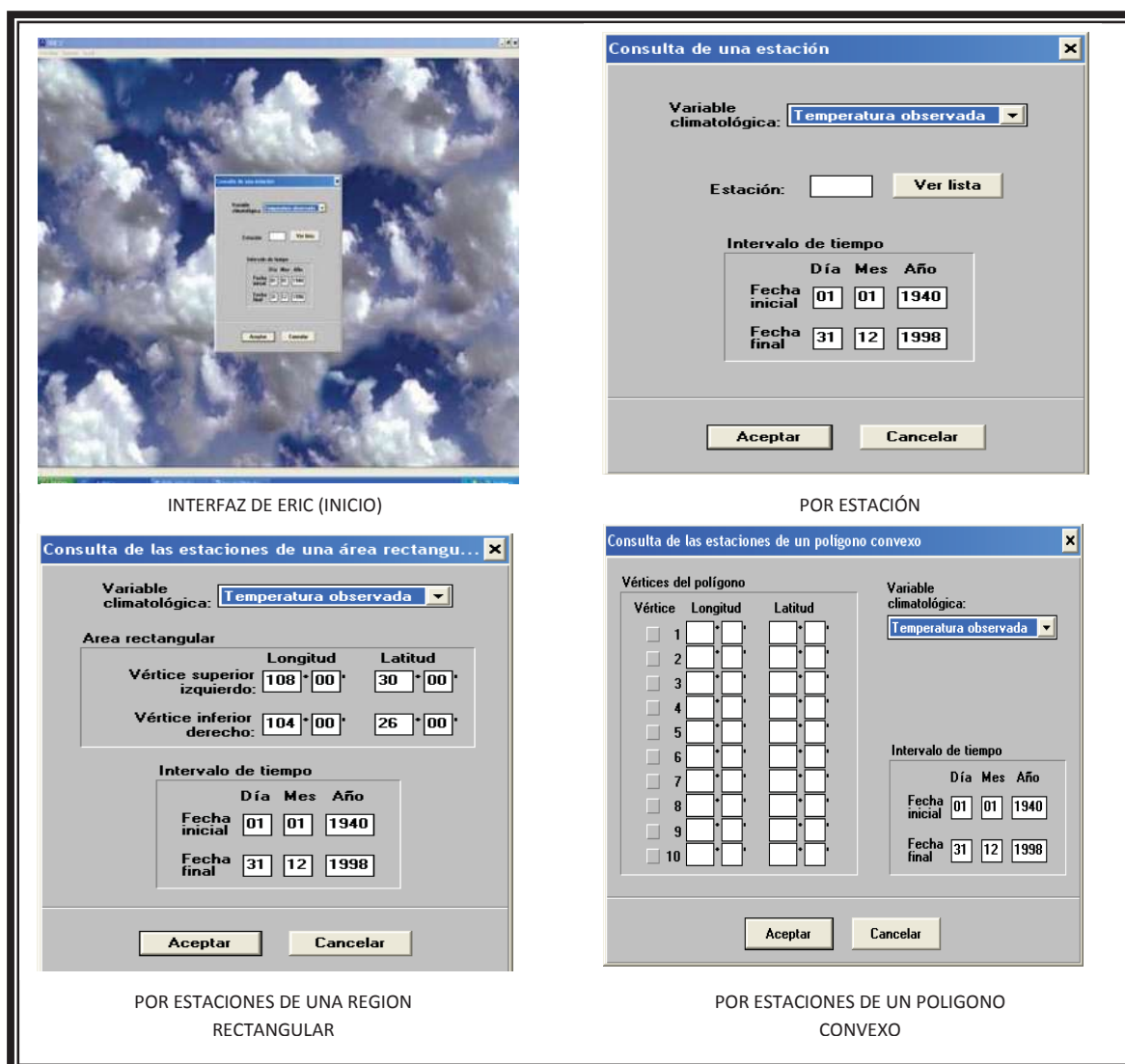


Figura 2-10. Interfaz gráfica de ERIC y formas de consulta de información.

2.10.2. Bases de datos Hidrológicos

Dentro de la información conveniente hemos manejado los registros históricos de las estaciones hidrométricas, que nos servirá para el proceso de calibración, esta información se encuentra en las bases de datos hidrológicas, que en el caso de nuestro país solo se cuenta con una de estas bases de datos, el SIAS (Sistema de información de aguas superficiales)

c) Sistema de Información de Aguas Superficiales (SIAS, BANDAS)

El SIAS (sistema de Información de Aguas Superficiales) o mejor conocido como BANDAS es una base de datos que brinda información de los registros de las estaciones hidrométricas, así como también nombres de cuencas y corrientes que existen en el país, cuenta con una interfaz muy sencilla como la mostrada en la Figura 2-11, en la cual aparecen las siguientes opciones:

a) Archivo

- Permite indicar al sistema la ubicación de la información a consultar. Permite respaldar en medios magnéticos los archivos de catálogos, hidrometría y de vasos de almacenamiento.
- Permite salir del sistema.

b) Catálogo

- Permite acceder y consultar la información registrada de estados, regiones hidrológicas, nombres de cuencas, nombres de corrientes, estaciones hidrométricas, estaciones climatológicas, vasos de almacenamiento, estaciones de otras dependencias, así como las descripciones de estaciones hidrométricas y vasos de almacenamiento registradas en los boletines hidrométricos.

c) Hidrometría

- Permite consultar la información con que cuenta cada estación hidrométrica: en todo el período de registro de información, así como consultar los gastos medios diarios y gastos mensuales por año-mes.
- Permite obtener en papel y en pantalla diversos reportes por estación, por ejemplo, permite visualizar en pantalla los gráficos resultado de la información hidrométrica almacenada: hidrogramas, sedimentogramas y curvas de gasto. En el caso de los hidrogramas y sedimentogramas se permite obtener gráficas para un periodo determinado: semana, mes o año.

d) Almacenamiento

- Permite consultar la información con que cuenta cada vaso de almacenamiento en todo el periodo de registro de información.
- Permite obtener en papel y en pantalla diversos reportes por vaso de almacenamiento, por ejemplo, permite visualizar en pantalla los gráficos resultados de la información de vasos: avenidas. Se permite obtener gráficas para un periodo determinado: semana, mes o año.



Figura 2-11. Menú principal del Sistema de Información de Aguas Superficiales (SIAS).

SIAS puede proporcionar información de las tres formas siguientes, lo que facilita su consulta:

- a) Por entidad federativa.
- b) Por región hidrológica.
- c) Todas las estaciones.

La información de registros históricos que nos proporciona el SIAS, es de vital importancia en realización de este trabajo, ya que estos datos son uno de los elementos fundamentales para contrastar la realidad con lo que estamos modelando, sin la cual no tendríamos bases para hacer la calibración, ya que PATRICAL es un modelo de calibración manual, y esta información nos ayuda mucho en los avances del trabajo. Sin embargo de acuerdo a la clasificación de nuestra información, esta se clasifica como conveniente, ya que no es utilizada durante el desarrollo de los procesos que realiza PATRICAL, sino hasta la fase de calibración.

Cabe mencionar que de no contar con la misma, la etapa de calibración no tendría lugar a realizarse, debido a que el modelo solo realiza los cálculos y no es de calibración automática.

CAPÍTULO III

Modelo PATRICAL

3. Modelo PATRICAL (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua)

El módulo de simulación “Patrical” (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua) permite construir modelos del ciclo hidrológico y calidad de las aguas distribuidos espacialmente, con paso de tiempo de simulación mensual (Pérez, 2005).

3.1. Simulación de transporte de nitrato en el ciclo hidrológico

Los modelos que se construyan realizan la simulación del ciclo hidrológico, en régimen natural o en régimen alterado, por la actividad antrópica, aplicando la formulación de Témez (1977) en cada pequeño elemento (p.e. resolución de 1 km x 1 km) en que discretiza la cuenca hidrográfica, incluyendo la menor posibilidad de evapotranspiración de la vegetación con contenidos bajos de humedad en el suelo, las transferencias laterales entre acuíferos, el movimiento del agua a través de la red fluvial, las relaciones río-acuífero (incluyendo la posibilidad de pérdidas en cauces), y la evolución de la piezometría media de los acuíferos.

El módulo “Patrical” puede funcionar, como se ha indicado, en régimen natural o en régimen alterado antrópicamente. En este último caso incluye la evolución temporal y distribución espacial de los retornos de riego que recargan los acuíferos, y las extracciones de aguas subterráneas (agrícolas y urbanas), y adicionalmente, para el caso de simulación de la calidad del agua, también los retornos de riego superficiales y los retornos urbanos superficiales. Debe tenerse en cuenta que el modelo reproduce el ciclo hidrológico natural y parte del ciclo hidrológico alterado, ya que no incluye la gestión de embalses ni las modificaciones que se producen en el régimen de caudales por los mismos.

La comparación entre los caudales circulantes y niveles piezométricos en régimen natural y en régimen alterado, cuando se consideran los bombeos y las recargas de riego al acuífero, se obtienen las modificaciones que se producen en la parte subterránea del ciclo hidrológico y cómo afectan estas modificaciones a los caudales superficiales. Estos resultados permiten: mejorar el conocimiento de los flujos de agua que se producen en el ciclo hidrológico, reconstruir el régimen natural de aportaciones, conocer las interconexiones del subsistema subterráneo y superficial, obtener los efectos que se producen en los caudales circulantes en los ríos, etc... Además, los resultados pueden enlazarse con modelos de simulación de la gestión, en el caso de que estos modelos, para mayor sencillez de los mismos, no hayan considerado estas afecciones (Figura 3-0).

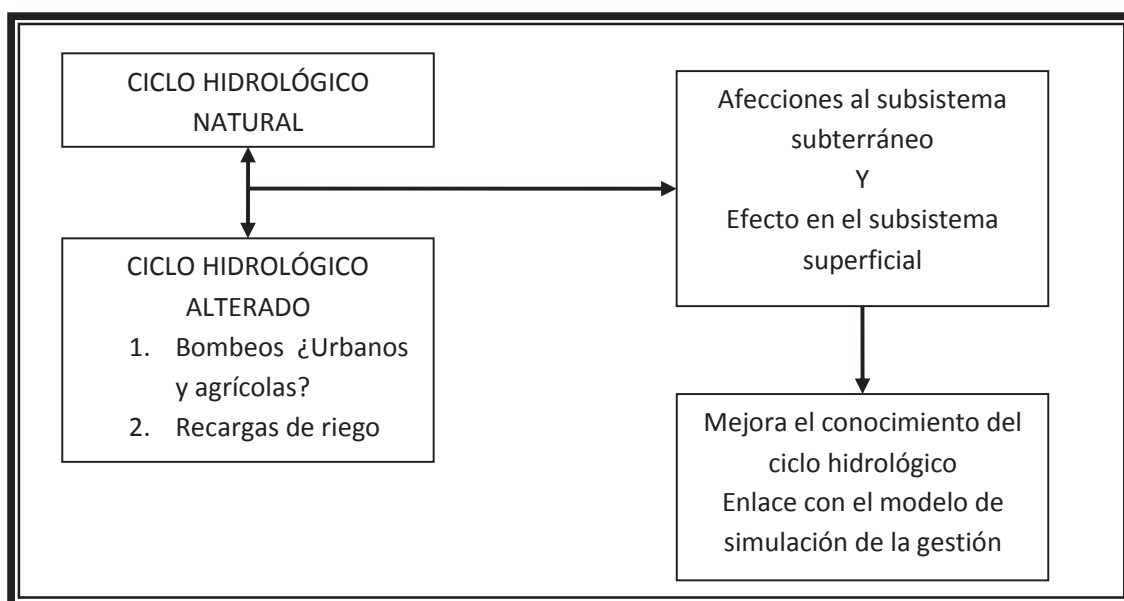


Figura 3-0. Régimen natural y régimen alterado en la componente subterránea y evaluación de afecciones.

En el caso de la utilización de los modelos construidos para la simulación de la calidad del agua y del transporte de sustancias químicas, se incluyen los retornos superficiales urbanos y agrícolas, ya que de esta forma el resultado obtenido se aproxima en mayor medida al régimen de caudales histórico del que se disponen muestreos de los diferentes parámetros de calidad del agua.

Los resultados de concentraciones químicas de las sustancias en el agua, permiten conocer el estado químico del agua y cómo los diferentes aportes de sustancias químicas, ya sean de origen antrópico o de origen natural, alcanzan la red fluvial y los acuíferos. El modelo permite conocer a partir de la información de las diferentes fuentes de contaminación o de aportes naturales distribuidos espacialmente en la cuenca hidrográfica, ya sean puntuales o difusos, cómo se transportan las sustancias químicas por la cuenca hidrográfica, y cómo alcanzan las masas de agua superficiales y subterráneas.

Los resultados de calidad del agua obtenidos con el modelo de simulación tienen las siguientes utilidades (Figura 3-1):

- Conocer el estado químico de los parámetros modelados, nitratos y conductividad eléctrica del agua, de todas las masas de agua de la cuenca hidrográfica, tengan datos históricos muestreados o no, y de esta forma detectar las zonas con valores elevados o normales.
- Esclarecer cuáles son los agentes causantes, o el origen, del estado químico de las masas de agua.

- Conocer la evolución histórica de los diferentes parámetros químicos modelados, detectando zonas con tendencia a tener mayores o menores concentraciones de estas sustancias.
- Plantear medidas correctoras para mejorar el estado químico, y evaluar cuantitativamente la eficacia de esas medidas.
- Obtener series históricas de caudales y de los diferentes parámetros de calidad.
- Conocer los niveles de fondo, es decir la concentración de sustancias químicas de origen natural, mediante la simulación sin afecciones de tipo antrópico.

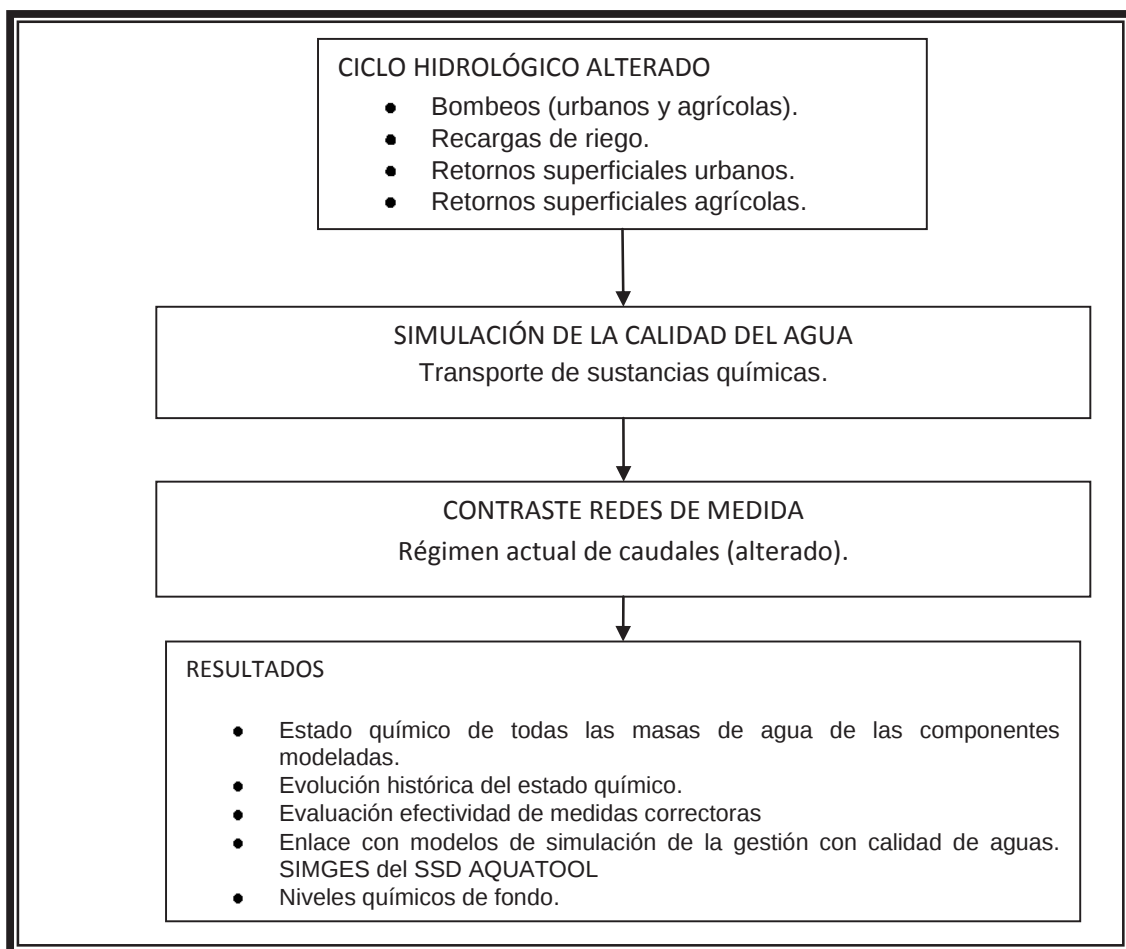


Figura 3-1. Metodología para la simulación de la calidad del agua, resultados y aplicaciones.

La simulación de la calidad del agua incluye: el transporte de nitrógeno, en su forma movilizable “nitrato”; la generación de erosión y el transporte de sólidos; el transporte de fósforo, y la conductividad eléctrica del agua a 25 °C. Para estos parámetros se consideran, tanto los focos de contaminación o generación puntual, como los difusos.

3.2. Módulo hidrológico

La aplicación del módulo desarrollado se realiza mediante la discretización de la cuenca hidrográfica en celdas de pequeño tamaño (p.e. 1 km x 1 km, aunque puede variarse esta configuración en función del tamaño de la cuenca, de la capacidad de procesamiento de los equipos informáticos y del tiempo de cálculo de la simulación), donde se ajusta, en función de las características fisiográficas propias de cada una de ellas un modelo conceptual de pocos parámetros, el modelo de Témez (1977), que está basado a su vez en el modelo del Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS, 1954).

La cuenca que se modela se divide en dos capas o zonas en vertical (Figura 3-3): una zona superior, formada por la superficie del terreno y discretizada en celdas; y una zona inferior, formada por los acuíferos que, de forma agregada, reciben agua de las celdas superiores. Estas zonas se caracterizan porque:

- La zona superior representa la superficie del terreno hasta donde alcanza la capacidad de extracción de agua de la vegetación, y se corresponde con la parte de la zona no saturada, donde en sus poros coexisten el agua y el aire, y su contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo.
- La zona inferior, o acuífero, representa los almacenamientos de agua subterránea que se producen en la cuenca, se encuentra saturada y las salidas de agua que se producen de la misma son: el desagüe a la red de drenaje superficial, las salidas directas al mar y las transferencias laterales entre acuíferos.

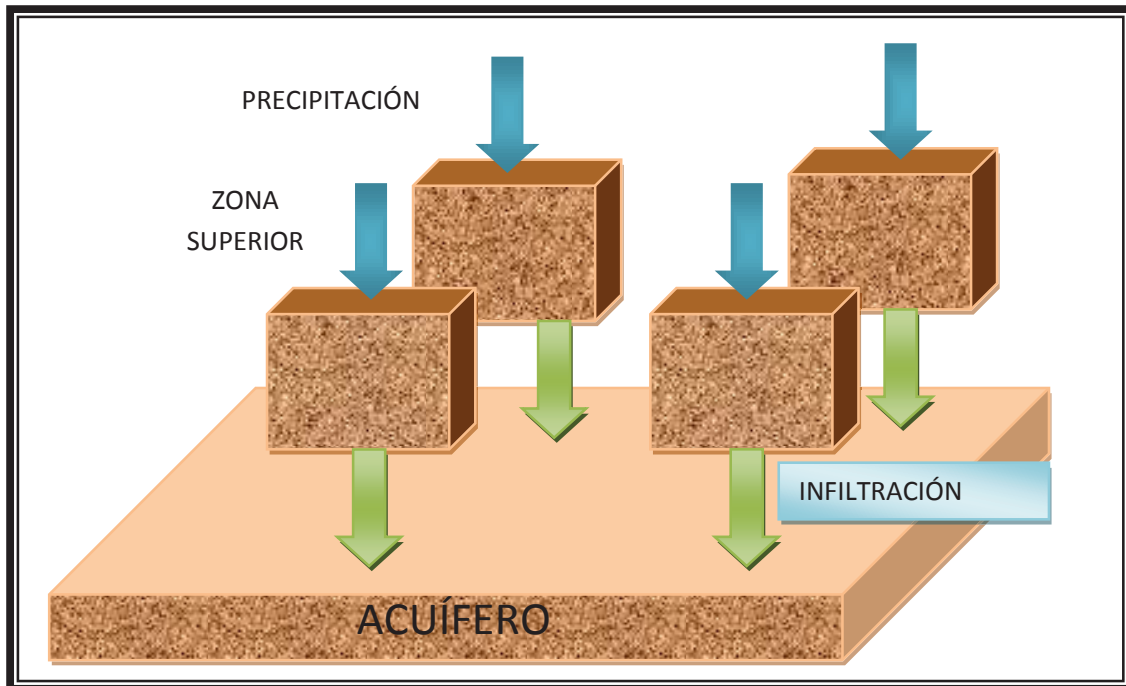


Figura 3-2. Modelación del ciclo en dos capas, zona superficial y zona profunda o acuífero.

El modelo es de tipo conceptual, de paso de tiempo mensual, y reproduce los principales flujos y almacenamientos de agua del ciclo hidrológico en cada una de las celdas en que se ha discretizado la cuenca, preservando en todo momento el principio de continuidad o de conservación de la masa. La Figura 3-3 describe las componentes del modelo, donde los rectángulos representan almacenamientos, las elipses flujos de agua, y los rectángulos con bordes suavizados son las variables de entrada al modelo.

Los datos iniciales necesarios para el posterior funcionamiento del modelo de simulación son los valores de lluvia total mensual y de temperatura diaria media mensual, procedentes de las estaciones meteorológicas, con los cuales se calcula por interpolación los mapas mensuales de lluvia y temperatura, del que se derivan los mapas de evapotranspiración potencial mensual. Los mapas mensuales de precipitación y de evapotranspiración potencial son la información de partida para el modelo de simulación y se calcula: en primer lugar, la porción de lluvia líquida que cae en cada celda, manteniéndose el resto en forma de nieve sobre la superficie de terreno; en segundo lugar, con dicho valor de lluvia líquida y con las características fisiográficas de la cuenca en cada celda mediante la formulación de Témez: el flujo de excedente generado, la evaporación real producida y el volumen en forma de humedad retenido por el terreno. El excedente, a su vez, se descompone en escorrentía superficial directa y en infiltración a los acuíferos, que interactúan entre sí y se transfieren agua en función de las diferencias de altura piezométrica que tengan. Finalmente, los acuíferos generan la escorrentía subterránea que se suma a la escorrentía superficial formando la escorrentía total,

que se acumula a través de la red de drenaje de la cuenca y permite conocer el volumen de agua en cada tramo de la red de drenaje, del que se calcula la reinfiltración a los acuíferos y se obtiene la escorrentía en los cauces.

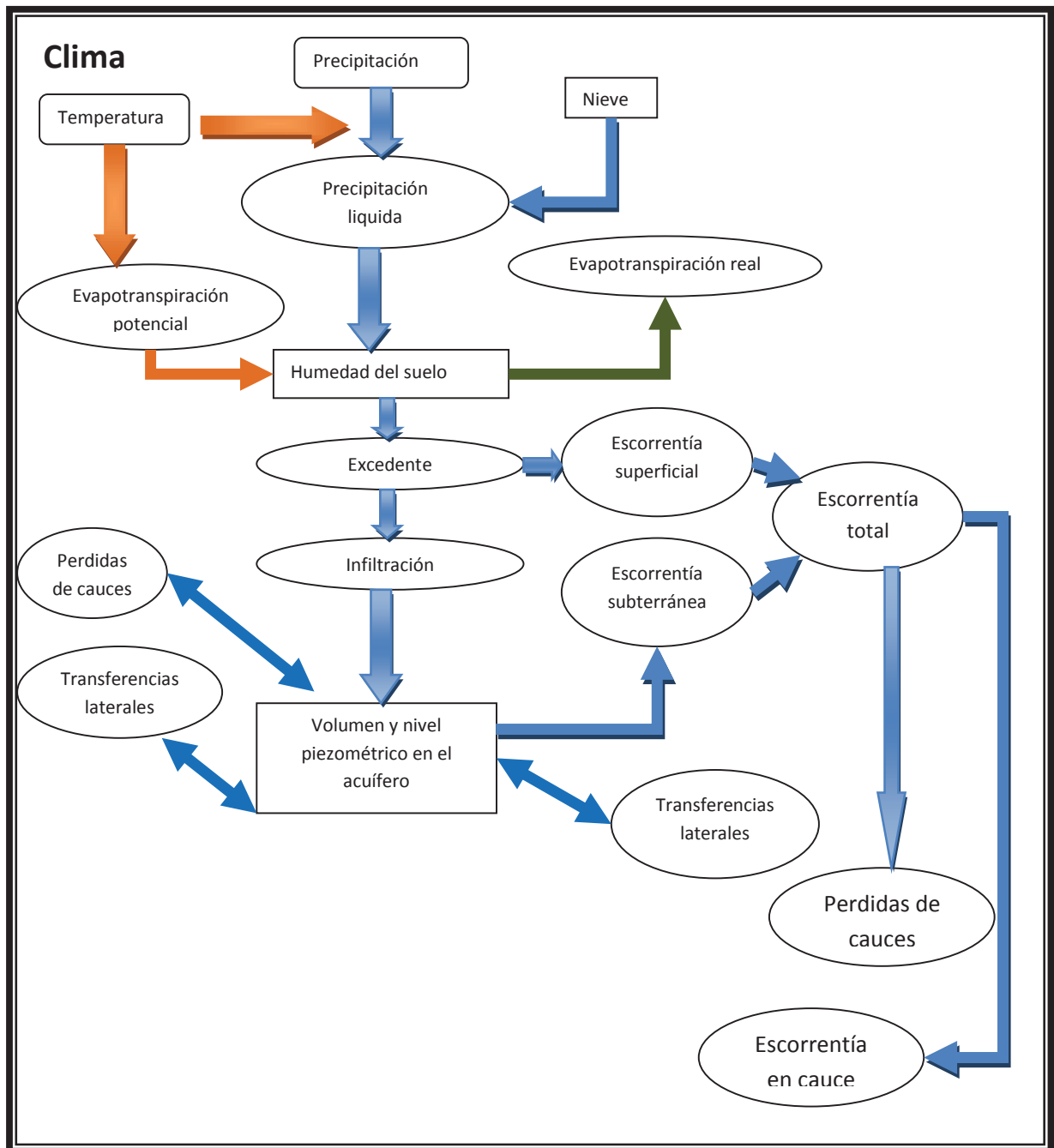


Figura 3-3. Esquema de flujo del modelo conceptual del ciclo hidrológico Patrical.

El modelo lluvia-escorrentía utiliza los registros históricos de información de la lluvia total mensual y los registros históricos de las temperaturas diarias medias del mes, con los que mediante interpolación, los mapas de lluvia mensual distribuida y de temperatura media distribuida, los cuales se introducen como datos en el modelo de simulación para reproducir el ciclo hidrológico, que obtiene, como resultados, los mapas de aportación generada en cada punto de la cuenca. Con los resultados de aportación generada en cada celda se calculan, mediante su desplazamiento a través de la red de drenaje, las aportaciones en cada punto de la red fluvial y las pérdidas en cauces. Finalmente de cada acuífero se obtienen los volúmenes de agua almacenados, transferidos, salidas al mar, y niveles piezométricos.

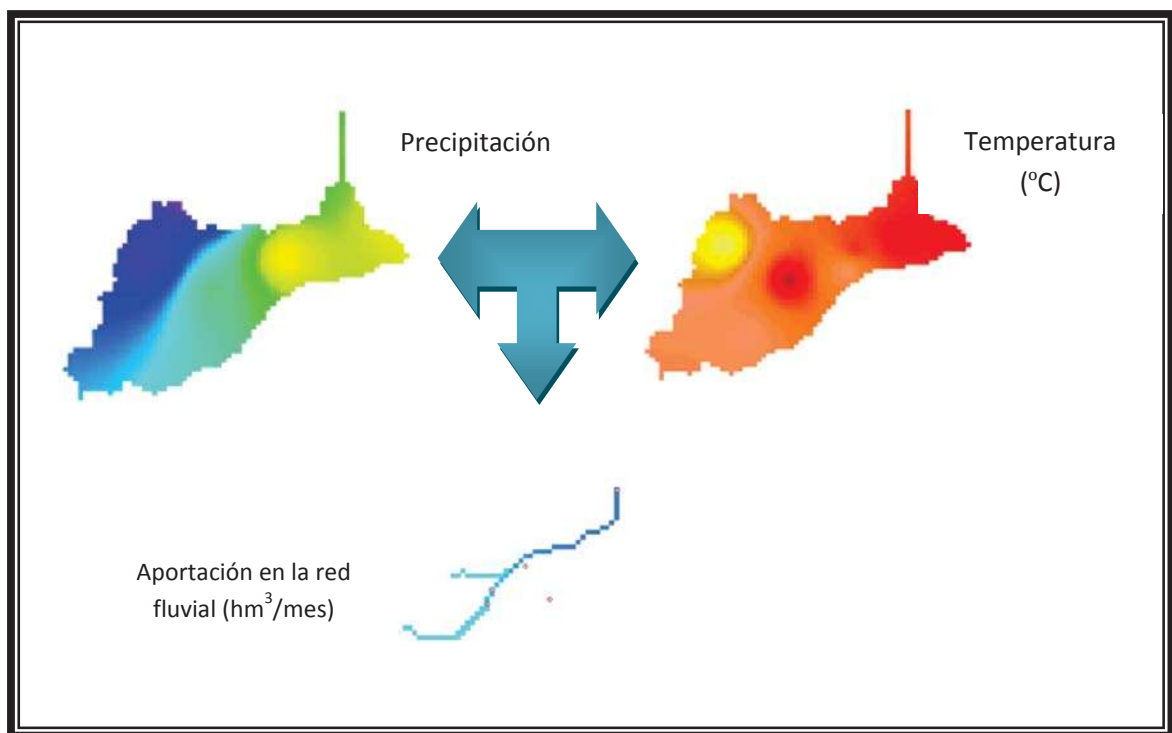


Figura 3-4. Precipitación temperatura y aportación en la red fluvial en Octubre.

El modelo de simulación permite conocer los flujos y almacenamientos de agua que se producen en la cuenca tanto en régimen natural como en régimen alterado.

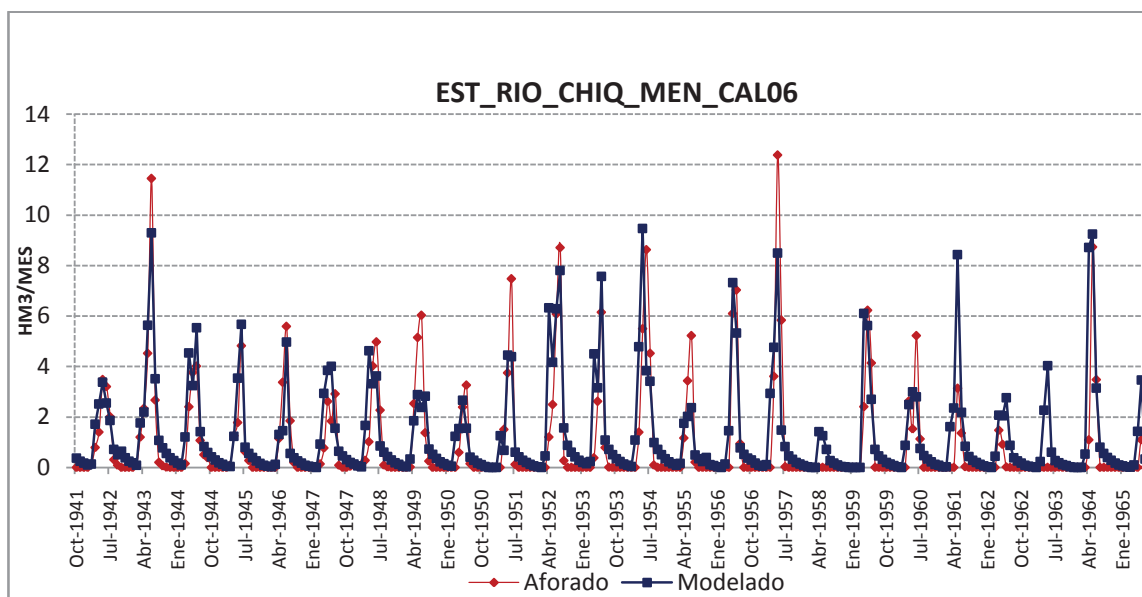


Figura 3-5. Caudales en régimen natural del río chiquito de Morelia (hm3/Seg).

3.3. Módulo de calidad del agua

La variabilidad temporal de los recursos hídricos y la evolución histórica de los usos de agua y de los focos de contaminación, son determinantes para la situación físico-química de las masas de agua, tanto en la actualidad como en su evolución futura, por lo que es necesario utilizar modelos de simulación que incluyan estos efectos. Presiones antrópicas iguales en el medio pueden provocar impactos muy diferentes dependiendo de si la cuenca hidrográfica está en situación de sequía o no, de esta forma para obtener una evaluación cuantitativa de los efectos de las presiones ejercidas por la actividad humana en las masas de agua, es necesario utilizar un modelo de simulación que tenga en consideración los caudales circulantes y su variabilidad temporal, ya que la situación físico-química de las masas de agua depende fuertemente de la situación hidrológica de la cuenca y de su evolución histórica reciente.

El módulo desarrollado permite construir modelos de simulación mensual mediante los cuales se obtienen las concentraciones, en cada periodo de tiempo, de determinadas sustancias químicas en los caudales circulantes y en los acuíferos, y de esta forma poder contrastar los resultados con las redes de medida existentes.

La obtención de los resultados en todos los puntos de la cuenca hidrográfica y su contraste con las redes de medida permite identificar, con mayor detalle para los compuestos químicos analizados, las zonas de mayor problema en la cuenca, la situación en el resto de masas de agua, la tendencia producida en los últimos años, las interrelaciones existentes entre unos puntos de la cuenca y otros, los

principales agentes generadores de ese impacto, y también la calidad de los datos muestreados disponibles.

Una vez conocidos y validados los resultados obtenidos con el modelo de simulación, podrán definirse los escenarios futuros de la presión humana y de los focos de contaminación, y cuantificar los efectos que producirán en el medio. De igual forma, podrán cuantificarse los efectos que producirán las medidas que tengan por objeto la reducción de los focos de contaminación.

Al módulo de simulación hidrológica se le han incorporado diferentes módulos de simulación del transporte de elementos químicos por las diferentes zonas de la cuenca hidrográfica. Este transporte se produce a través de los flujos de agua obtenidos con la simulación hidrológica. Los módulos desarrollados son: transporte de nitrógeno en su forma movilizable, nitrato, el transporte de sales, utilizando como variable representativa la conductividad eléctrica del agua a 25 °C, y el transporte de fósforo. Estas sustancias químicas tienen origen antrópico y origen natural, por lo que su introducción en el modelo de simulación se realiza de diferentes formas. Los nitratos proceden principalmente del uso de fertilizantes en la agricultura y de los vertidos de las aguas residuales urbanas. Cuando su origen es agrícola y ganadero, es el principal foco de contaminación difusa, y su modelación se realiza a partir del exceso de nitrógeno que se produce por la fertilización orgánica e inorgánica de las zonas agrícolas, o por el exceso de nitrógeno que se produce en las zonas ganaderas y de pastoreo.

Para simular el transporte de sustancias químicas en la cuenca hidrográfica se definen tres zonas en la cuenca hidrográfica (Figura 3-6): la zona superficial del suelo, donde existe agua en forma de humedad del suelo y las sustancias químicas pueden ser arrastradas por la escorrentía superficial o por la infiltración al acuífero; el medio no saturado, formado por la porción de terreno desde el acuífero hasta donde alcanza la zona radicular de la vegetación y que varía a lo largo de la simulación en función del nivel piezométrico que exista en el acuífero; y el acuífero, medio saturado donde se ha considerado que se produce el mezclado total del agua. Esta definición atiende a los diferentes puntos donde se pueden depositar y acumular las sustancias químicas.

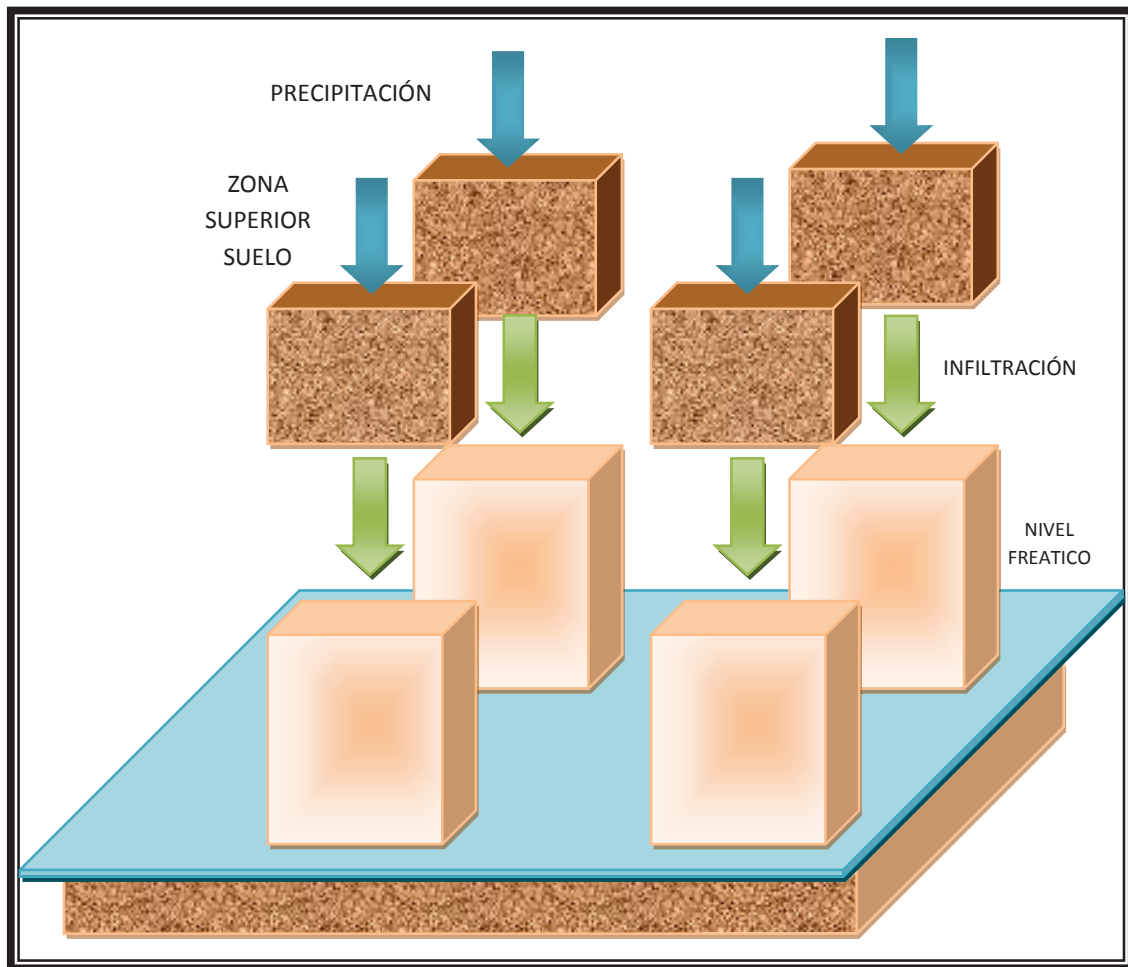


Figura 3-6. División del terreno para la simulación de la calidad química del agua.

La modelación de la calidad del agua no se llevó a cabo para este trabajo por falta de información, sin embargo el modelo cuenta con un módulo para la modelación de la calidad del agua y para el transporte del nitrato en el ciclo hidrológico. Estos módulos lo hacen que se convierta en un modelo robusto ya que incorpora otros procesos más complejos que el del ciclo hidrológico.

3.4. Formulación del modelo

La formulación aplicada para obtener cada una de las componentes del ciclo hidrológico se inicia con la obtención del volumen de agua en forma de nieve y el volumen de precipitación líquida en cada celda “ j ” en el mes “ t ”. Para ello, se utilizan los datos mensuales en cada celda de precipitación y temperatura, a los que se les aplica una ley exponencial que representa el deshielo producido en meses posteriores. La hipótesis establecida consiste en un deshielo lineal cuando la temperatura es superior a 0 °C., con un coeficiente de deshielo rápido de valor $\alpha = 0.6 \text{ mes}^{-1}$:

$$Si \ T > 0$$

$$Pl = \alpha \cdot Vn$$

Donde (Pl) es la precipitación líquida, (α) el coeficiente de deshielo, (Vn) el volumen de nieve y (T) la temperatura.

Aplicando esta formulación de forma discretizada para cada mes " t " se obtiene, a partir de los datos de precipitación y temperatura registrada en la celda " ij " del mes " t ", ($P_{ij,t}$) y ($T_{ij,t}$), la precipitación líquida en la celda " ij " del mes " t ", ($Pl_{ij,t}$), y el volumen almacenado en forma de hielo en ese mes, ($Vn_{ij,t}$), tal y como se muestra a continuación.

$$Conocido \ P_{ij} \rightarrow \begin{cases} si \ T_{ij,t} \leq 0 & \rightarrow \begin{cases} Vn_{ij,t} = Vn_{ij,t-1} + P_{ij,t} \\ Pl_{ij,t} = 0 \end{cases} \\ \text{Ó} \\ Si \ T_{ij,t} > 0 & \rightarrow \begin{cases} Vn_{ij,t} = Vn_{ij,t-1} \cdot e^{-\alpha} \\ Pl_{ij,t} = (Vn_{ij,t-1} - Vn_{ij,t}) + P_{ij,t} \end{cases} \end{cases}$$

Conocido el volumen de agua líquida en cada mes (precipitación líquida), el siguiente paso consiste en aplicar la formulación de Témez, en cada una de las celdas de la cuenca, mediante la cual se reproduce las componentes del ciclo hidrológico relacionadas con la superficie del terreno: humedad del suelo (que incluye la intercepción), infiltración y generación de escorrentía superficial (que incluye la subsuperficial).

La ley de Témez consiste en la aplicación de un modelo conceptual sencillo y de pocos parámetros que permite obtener el volumen de agua neta que genera un fenómeno de precipitación, y que se denomina "excedente". Dicha ley es matemáticamente muy similar a la del modelo del Número Curva del Soil Conservation Service (SCS, 1954).

$$Q = \frac{(P - I_0)^2}{P - I_0 + S} \quad \text{con } P > I_0$$

Donde:

Q , es la cantidad de escorrentía generada (mm).

P , es la precipitación (mm).

S , es la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm).

I_0 , es la abstracción inicial (mm), almacenamiento en depresiones, infiltración y evaporación.

En la expresión anterior si se asume que $I_0 = 0.2 S$, se obtiene la conocida expresión del Número de Curva (CN-SCS) que únicamente depende de un parámetro, la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (S).

$$Q = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + 0.8 \cdot S}$$

Esta formulación recibe su nombre de la posibilidad de expresar el parámetro S en función de un parámetro adimensional denominado Número de Curva (CN).

$$S = \frac{100}{CN} - 10$$

Tanto el modelo de Témez, que se verá a continuación, como el modelo del Número de Curva, son modelos sencillos que, a partir de la información de lluvia, determinan el agua generadora de escorrentía o de recursos utilizando para ello leyes similares a la ley regional de Budyko (1961) (Figura 3-7) que tiene por expresión:

$$E = P \cdot e^{\frac{ETP}{P}}$$

Donde:

P = Es la precipitación,

ETP = Es la evapotranspiración potencial

E = La escorrentía

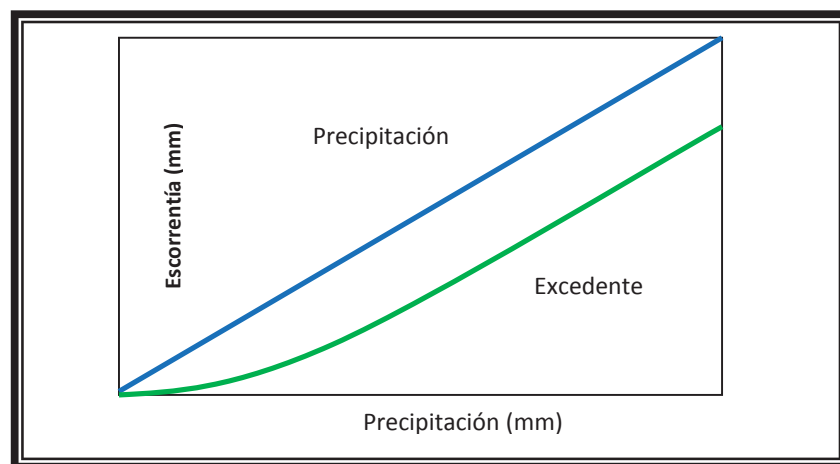


Figura 3-7. Ley regional de Budyko.

En el modelo de Témez la zona más superficial del terreno está formada por la porción del suelo a la que alcanzan las raíces de las plantas y, por lo tanto, se

corresponde con la zona donde se produce extracción de agua por evapotranspiración. De esta forma una fracción del agua líquida que precipita sobre cada celda ($Pl_{ij,t}$) es almacenada en la zona superior del suelo en forma de humedad ($H_{ij,t}$), evaporándose otra porción muy importante ($EV_{ij,t}$), y el resto, el excedente ($H_{ij,t}$), se distribuye entre la aportación de origen superficial ($Asup_{ij,t}$) y la infiltración hacia el acuífero ($I_{ij,t}$).

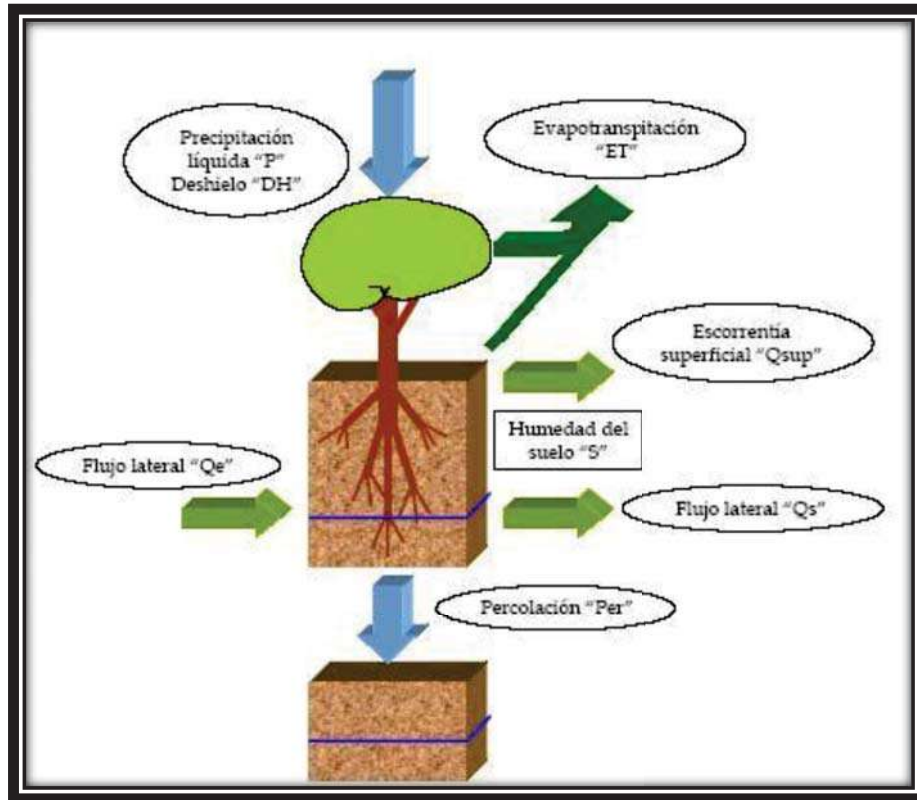


Figura 3-8. Transformación de la precipitación líquida en excedente y balance en el suelo.

La ley de excedentes (Figura 3-9), en cada celda sobre la que cae precipitación líquida, adopta la siguiente expresión (estando todas las unidades expresadas en milímetros):

$$T_{ij,t} = \begin{cases} 0, & \text{si } P_{ij,t} \leq P_{ij,t}^o \\ \frac{(Pl_{ij,t} - P_{ij,t}^o)^2}{(Pl_{ij,t} + \delta_{ij,t} - 2 \cdot P_{ij,t}^o)}, & \text{si } P_{ij,t} > P_{ij,t}^o \end{cases}$$

Donde previamente se necesita conocer P_0 y δ_i como sigue;

$$\delta_{ij,t} = Hmax_{ij} - H_{ij,t-1} + ETP_{ij,t} \quad (2)$$

$$P_{ij,t}^o = C(Hmax_{ij} - H_{ij,t-1}) \quad (3)$$

En donde,

$\delta_{ij,t}$ = Déficit máximo de humedad del suelo en mm.

$P_{ij,t}^o$ = Déficit de humedad del suelo modificado, en mm.

Siendo:

$Pl_{ij,t}$, la precipitación líquida sobre cada celda durante el mes “i”.

$T_{ij,t}$, el excedente en cada celda “j” durante el mes “i”.

$Hmáx_{ij,t}$ El parámetro capacidad máxima de almacenamiento hídrico en el suelo en cada celda.

$H_{ij,t-1}$, $H_i - 1$ la humedad en la zona superior del suelo en cada celda en el mes “t-1”.

$ETP_{ij,t}$ La evapotranspiración potencial en cada celda en el mes “t”, es la evapotranspiración que se produciría en condiciones óptimas de suministro de agua en cada una de las celdas.

C , el coeficiente de excedente. Dada la menor sensibilidad del modelo respecto a este coeficiente se ha considerado constante en diversos trabajos, como por ejemplo en el modelo SIMPA en su aplicación a toda España (MIMAM, 2000)

$(Hmáx_{ij,t} - H_{ij,t-1})$ El hueco libre existente en el suelo en el mes “t”

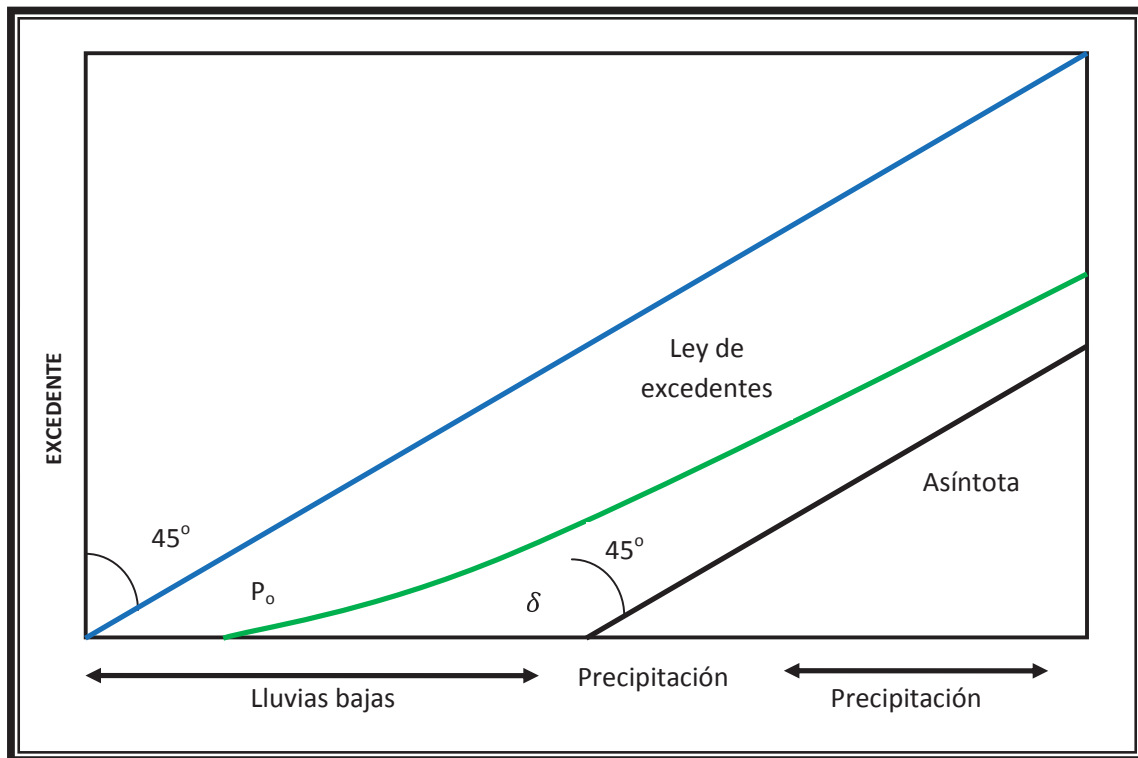


Figura 3-9. Ley de excedentes.

De esta forma, si la precipitación caída sobre la celda “ ij ” durante el mes “ t ” es menor que el umbral $P_{ij,t}^o$, no se producirá excedente ($T_{ij,t}$) y por lo tanto, el agua precipitada ese mes se almacenará en el suelo como humedad ($H_{ij,t}$), siendo susceptible de convertirse en evapotranspiración.

Si la precipitación caída sobre una celda “ ij ” durante el mes “ t ” supera el umbral $P_{ij,t}^o$, se producirá un excedente ($T_{ij,t}$), el cual se convertirá en infiltración al acuífero o en escorrentía superficial.

De las ecuaciones se deduce, que cuanto menor sea la humedad antecedente en una celda del suelo mayor será el umbral $P_{ij,t}^o$, lo que significa que mayor será la capacidad del suelo para absorber agua y no producir excedentes. La curva que expresa los excedentes es no lineal para lluvias bajas (cuando superan el umbral $P_{ij,t}^o$) y tiende hacia una línea recta para lluvias altas que se obtiene como “ $P_{ij,t} - \delta_{ij,t}$ ”, de forma que, a partir de una cantidad de precipitación el agua que no se convierte en excedente se mantiene prácticamente constante para cualquier lluvia. Es decir, para lluvias elevadas la diferencia entre la precipitación y el excedente es la evapotranspiración potencial en ese mes ($ETP_{ij,t}$) y el agua que ha rellenado el hueco libre que existía en el suelo, debido a que el suelo en esa celda estará saturado de humedad durante ese mes y no admitirá mayor cantidad de agua.

Asociado a esta ley de generación de excedentes se calcula la humedad en el suelo y la evapotranspiración real producida. La humedad del suelo en cada una de las celdas al final del mes “*t*”, se calcula mediante la expresión:

$$H_{ij,t} = \text{máxima} \begin{cases} 0 \\ H_{ij,t-1} + P_{ij,t} - T_{ij,t} - ETP_{ij,t} \end{cases}$$

Que se obtiene por balance de la siguiente forma: a la humedad existente en una celda “*ij*” en el mes anterior “*t-1*” se le añade el flujo entrante (la diferencia entre la precipitación $P_{ij,t}$ durante ese mes y el excedente ($T_{ij,t}$), y se le sustrae la evapotranspiración potencial en el mes “*t*”, ($ETP_{ij,t}$). Si el balance que se establece entre el agua que entra en la celda ($P_{ij,t}$), la que sale ($ETP_{ij,t}$) y la existente en el intervalo anterior ($H_{ij,t-1}$), resulta ser negativo, entonces la humedad del suelo al final del periodo será nula, y la evapotranspiración potencial no se habrá podido desarrollar en su totalidad.

La evaporación real que se produce en una celda durante el mes “*t*”, ($EV_{ij,t}$), se obtiene mediante la expresión:

$$EV_{ij,t} = \text{mínima} \begin{cases} H_{ij,t-1} + P_{ij,t} - T_{ij,t} \\ ETP_{ij,t} \end{cases}$$

La evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la evapotranspiración potencial si existe suficiente agua en el suelo, en caso contrario la humedad en el suelo al final de mes será nula.

El modelo planteado reproduce la generación de excedente, la evaporación real y la humedad del suelo almacenada, utilizando para ello únicamente dos parámetros: la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo ($Hmáx_{ij}$), y el coeficiente de excedente. Estas características le confieren un alto grado de robustez al modelo.

El modelo planteado tiende a agotar el contenido de agua del suelo con la evapotranspiración de la vegetación de toda el agua almacenada en forma de humedad, y únicamente queda humedad en el suelo a partir de lluvias superiores a P_o , o lo que es lo mismo, a partir del momento en que se inicia la generación de excedente (véase Figura 3-10) que muestra la ley de excedentes junto con la humedad del suelo, la evapotranspiración y las pérdidas de agua que se producen, es decir, la cantidad de agua que no se convierte en excedente, para diferentes lluvias). En situaciones de lluvias muy bajas la evapotranspiración real supera a la propia lluvia caída, ya que la vegetación consume la totalidad del agua caída y los contenidos de humedad existentes en el terreno de meses anteriores.

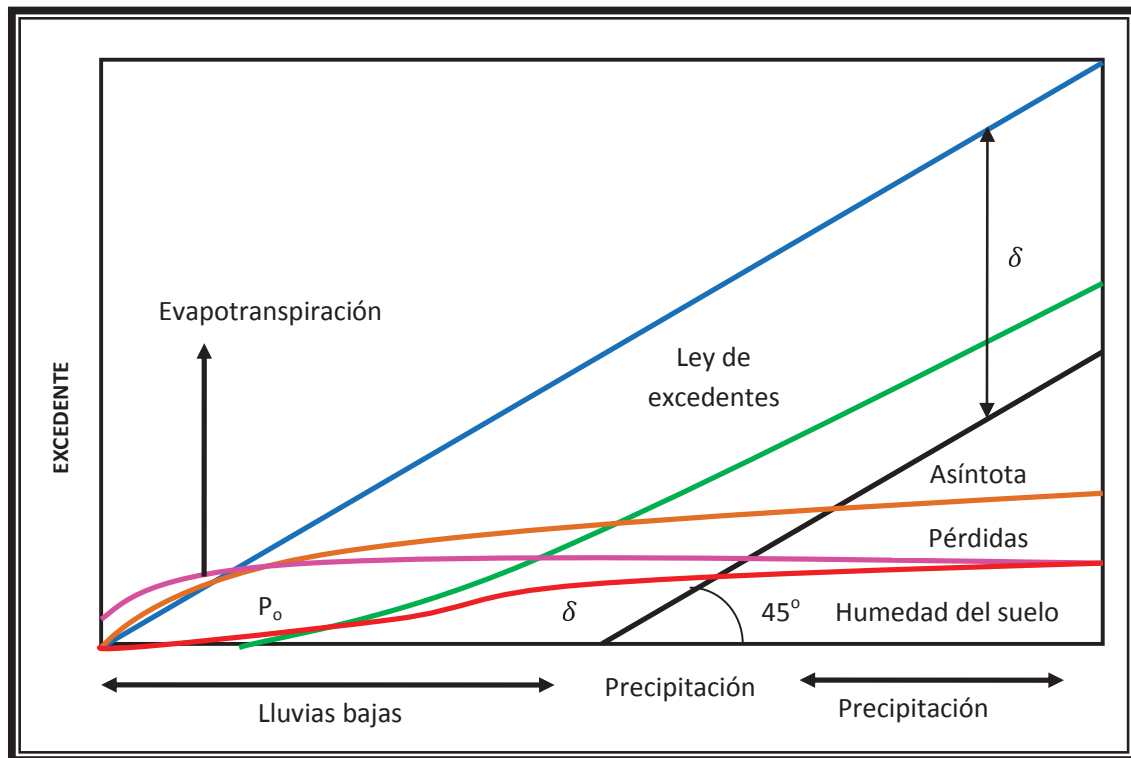


Figura 3-10. Ley de excedentes junto a la evapotranspiración real, la humedad del suelo y las pérdidas totales obtenidas mediante el modelo de Témez.

Este efecto que en principio no tiene importantes repercusiones en la evaluación de los recursos naturales en una cuenca, se ha de tener en consideración si el objetivo es conocer el estado de la humedad del suelo y las afecciones que ello produce en la vegetación de la zona, como por ejemplo, conocer situaciones de sequía o tipologías de la vegetación en función de los estados de humedad del suelo.

La humedad del suelo y la evapotranspiración que produce la vegetación están fuertemente relacionadas. El potencial matricial del agua del suelo depende del contenido de humedad del suelo, y este potencial es el que debe superar la vegetación durante la respiración para obtener agua del suelo mediante los procesos de ósmosis, de forma que a mayor contenido de humedad del suelo, menor es la presión que debe superar la vegetación para obtener agua y, por lo tanto, mayor puede ser su desarrollo biológico y la evapotranspiración que produce. Este efecto se sucede de igual forma, pero a la inversa, cuando los contenidos de humedad del suelo son bajos.

Una vez determinado el excedente, el siguiente proceso consiste en conocer cuál es la componente de infiltración profunda y cuál la de escorrentía superficial directa. La infiltración en cada una de las celdas “ j ” durante el mes “ t ”, ($I_{ij,t}$) está formada por la fracción de agua que, habiendo penetrado en el suelo, acaba

recargando el acuífero, es decir, es la parte del excedente ($T_{ij,t}$) que no discurre superficialmente.

El modelo toma una ley de infiltración al acuífero que es función del excedente y del parámetro de infiltración máxima del terreno ($Imáx_{ij}$). Dicho parámetro expresa la máxima infiltración que puede producirse en un mes en la celda considerada. La ley se expresa de la siguiente forma:

$$I_{ij,t} = Imáx_{ij} \cdot \frac{T_{ij,t}}{T_i + Imáx_{ij}}$$

Se considera que la infiltración se convierte en recarga al acuífero en el mismo intervalo de tiempo. Esta hipótesis deriva de suponer que el intervalo de tiempo de simulación (el mes), es superior al tiempo de paso del agua por la zona no saturada. La infiltración sólo se produce en aquellas celdas del territorio donde se haya definidos acuíferos, en el resto de celdas la infiltración es nula y todo el excedente se convierte en escorrentía superficial.

La parte del excedente que no infiltra al acuífero se convierte en escorrentía superficial ($A_{sup i}$) drenando por la red fluvial. En la celda “ ij ” al final del mes “ t ”, se tiene la siguiente expresión:

$$A_{sup i} = T_i - I_i$$

Con los resultados de infiltración distribuida se obtiene la recarga de lluvia de forma agregada para cada uno de los acuíferos de la cuenca, los cuales se simulan mediante el modelo del acuífero unicelular (López, 1981). El modelo del acuífero unicelular plantea la hipótesis de que el caudal de drenaje es proporcional al volumen almacenado en el acuífero, en función del coeficiente de descarga del acuífero α (mes⁻¹).

$$Q(t) = \alpha \cdot V(t)$$

Con la hipótesis planteada, el volumen del acuífero “ k ” a final del mes “ t ” ($V_{k,t}$), se obtiene a partir del volumen almacenado en el mes anterior ($V_{k,t-1}$), de la recarga de lluvia producida en ese mes ($R_{k,t}$) y del coeficiente de descarga del acuífero α_k .

$$V_{k,t} = V_{k,t-1} - Vumb_k \cdot e^{-\alpha_k \cdot \Delta t} + \frac{R_{k,t}}{\alpha_k} \cdot (1 - e^{-\alpha_k \cdot \Delta t})$$

Donde:

$R_{i,t} = \sum_{acuífero k}^{ij} I_{ij,t}$, es la recarga al acuífero i en el mes t , obtenida mediante la suma de la infiltración de todas las celdas que se encuentran por encima del acuífero.

α_k , es el coeficiente de descarga del acuífero (mes $t-1$).

Δt , Es el lapso de tiempo de la simulación discretizada en el tiempo, (es igual a uno si la unidad de tiempo es el mes-1).

V_{umb_k} , Es el volumen umbral del acuífero de conexión con el río, de forma que por debajo de este volumen no existe conexión río-acuífero.

Mientras que el volumen de agua que se drena a la red fluvial ($S_{sub_{k,t}}$) se obtiene por balance de masas.

$$S_{sub_{k,t}} = (V_{k,t-1} - V_{k,t}) + R_{k,t}$$

Las salidas de los acuíferos de la cuenca se producen en una zonas muy concretas: manantiales, tramos de río, zonas húmedas, etc.... Por este motivo los resultados agregados de salidas de los acuíferos ($S_{sub_{k,t}}$) se distribuyen espacialmente en la red fluvial atendiendo a las características topográficas del terreno, lo que permite obtener en cada celda la escorrentía subterránea ($A_{ij,t}^{sup}$) que sumada a la superficial proporciona la escorrentía total ($A_{ij,t}^{total}$).

$$A_{ij,t}^{total} = A_{ij,t}^{sup} + A_{ij,t}^{subt}$$

Obtenidos los valores de escorrentía total distribuidos en la cuenca, se acumulan estos valores, utilizando el modelo digital del terreno en la red de drenaje, de forma que es posible conocer la aportación provisional en cada punto de la red de drenaje ($ApoRed'_{ij,t}$). La acumulación de las aportaciones en la red fluvial se realiza con el algoritmo “ A^T Search Algorithm” (Ehlschlaeger, 1989) que se encuentra implementado en el SIG GRASS.

Una vez obtenidas las aportaciones acumuladas en la red fluvial, y dado que algunos tramos de río son claramente perdedores de agua, se ha realizado la estimación de pérdidas potenciales de agua en los cauces que reinfiltrará al acuífero subyacente en función del nivel piezométrico del acuífero.

Este cálculo está basado en los resultados de la aportación en los tramos de red fluvial ($ApoRed'_{ij,t}$), a los que en función de la máxima capacidad de infiltración del terreno (I_{ij}^{max}) junto con el parámetro “capacidad de pérdidas en cauces, “ b ” ($b = 10\%$), se obtiene el volumen de agua que se reinfiltra al acuífero.

$$PerdPot_{ij,t} = b \cdot \left(I_{ij}^{max} \cdot \frac{ApoRed'_{ij,t}}{I_{ij}^{max} + ApoRed'_{ij,t}} \right)$$

Conocidas las pérdidas potenciales en cauces, y en función de si el nivel piezométrico del acuífero supera el umbral de conexión del mismo con la red

fluvial, se determinan las pérdidas reales en el cauce. El nivel piezométrico del acuífero se determina mediante la expresión:

$$h_{k,t} = h_0 + \frac{V_{k,t}}{S_k}$$

Donde

$h_{k,t}$ Es la altura piezométrica en el acuífero “k” en el mes “t”.

$h_{0,k}$ Es la altura del suelo del acuífero, es decir, la cota a la que se encuentra el estrato impermeable del acuífero.

$V_{k,t}$ Es el volumen del acuífero resultado de la simulación en mm.

S_k Es el coeficiente de almacenamiento del acuífero (porción de agua que cabe en un metro cúbico de suelo)

El nivel piezométrico se compara con la altura de desconexión del acuífero “k” con el río, ($h_{conexión}^k$), de forma que si el nivel del acuífero es inferior a esta altura, las pérdidas por infiltración en cauces son iguales a las pérdidas potenciales, tal y como se indica en la figura 3-11 y expresiones siguientes:

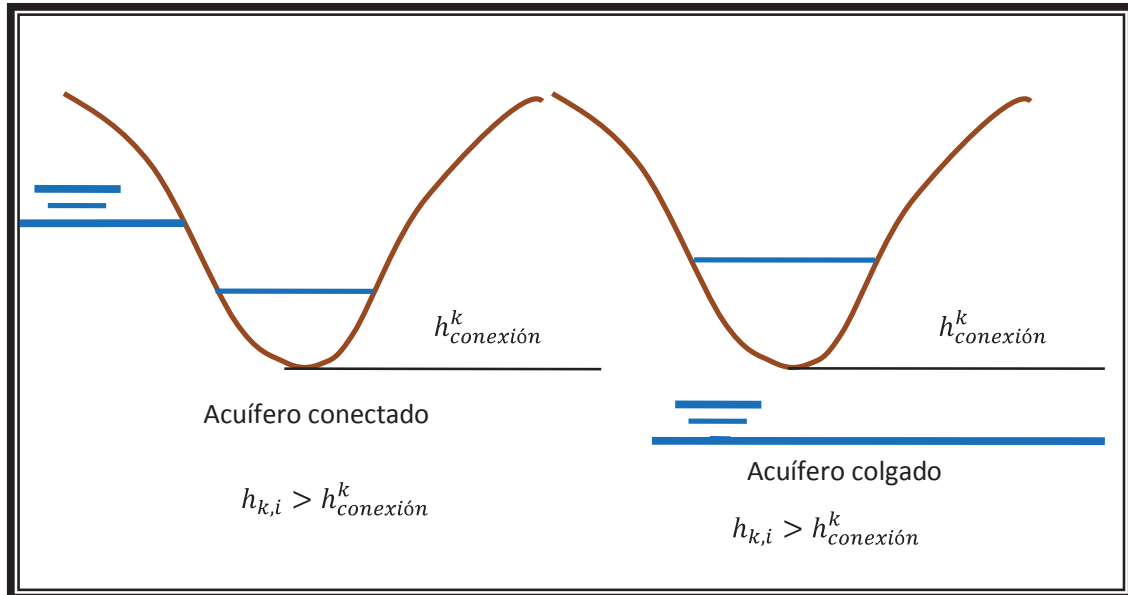


Figura 3-11. Conexión del acuífero con el río.

- 1) Si: $h_{k,i} > h_{conexión}^k$
- 2) Si: $h_{k,i} < h_{conexión}^k$

$$PerdRio_i = 0$$

$$PerdRio_i = PerdPot_i$$

Donde

$h_{conexión}^k$, Es la altura umbral a partir de la cual el acuífero descarga agua al río.

Descontando a las aportaciones de la red fluvial ($ApoRed'_{ij,t}$) las pérdidas producidas en la misma ($PerdRio_{ij,t}$), se obtiene la aportación en cauces ($ApoRed_{ij,t}$), que se comparará con los datos de aforos registrados históricamente.

$$ApoRed_{ij,t} = ApoRed'_{ij,t} - PerdRio_{ij,t}$$

Con la información de infiltración a los acuíferos por pérdidas en cauces se actualizan los volúmenes de agua en los acuíferos obtenidos en las fases previas, y se calculan las transferencias laterales que se producen entre los mismos. Estas transferencias están definidas por las diferencias de alturas piezométricas existentes entre los acuíferos (ver Figura 3-12) y por las transmisividades entre los mismos, siendo la expresión que gobierna estas transferencias la siguiente:

$$Q_{ij,t} = Te_{ij} \cdot \Delta h_{ij,t}$$

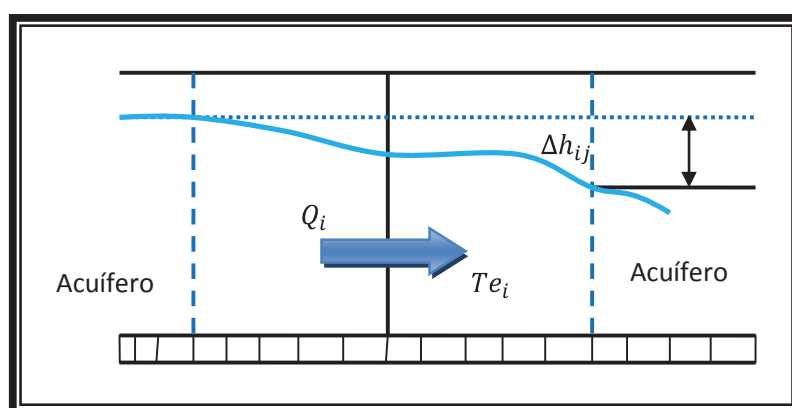


Figura 3-12. Transferencias laterales entre los acuíferos.

Donde:

$Q_{ij,t}$, Es el volumen de agua de transferencia entre los acuíferos.

Te_{ij} , Es la transmisividad equivalente entre los dos acuíferos, y que considera el conjunto de las características de cada uno de ellos y de la tipología del contacto entre los dos, superficie de contacto y características hidrogeológicas del mismo.

$\Delta h_{ij,t}$ Es la diferencia de alturas entre los dos acuíferos, $\Delta h_{ij,t} = h_i - h_j$

La transmisividad equivalente (Te_{ij}) (Ver Figura 3-13) correspondiente a la transmisividad entre los acuíferos "i" y "j", conectados en serie, se obtiene mediante la expresión adjunta:

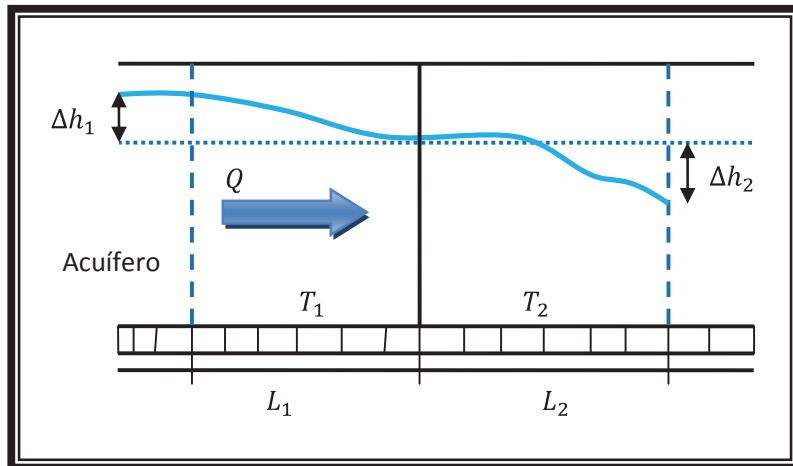


Figura 3-13. Transmisividad equivalente de dos acuíferos conectados en serie.

Siendo el caudal circulante el que se obtiene con la expresión

$$Q = T_{e_{12}} \cdot \frac{\Delta h}{L_1 + L_2} \cdot b$$

Donde

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2$$

b = Longitud de contacto entre los dos acuíferos.

L_1 y L_2 , Distancias en las que se producen los descensos piezométricos Δh_1 y Δh_2 .

Y se deduce que:

$$\frac{1}{T_{e_{12}}} = \frac{1}{(L_1 + L_2)} \left(\frac{L_1}{T_1} + \frac{L_2}{T_2} \right)$$

La transmisividad de cada acuífero es producto de la conductividad por el espesor saturado:

$$T_k = k_k \cdot h_k$$

Dado que los coeficientes de descarga de los acuíferos, α_k , pueden ser obtenidos por calibración a partir de los datos de aforos de manantiales, utilizando las curvas de recesión de los acuíferos, es posible obtener una aproximación de la transmisividad del acuífero aplicando las expresiones del modelo de acuífero rectangular homogéneo perfectamente conectado a un río totalmente penetrante (Sahuquillo, 1981).

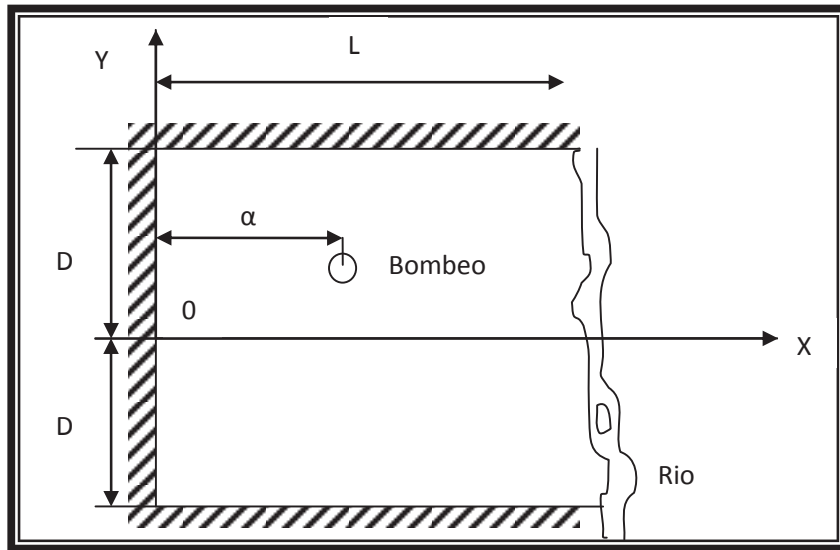


Figura 3-14. Acuífero rectangular homogéneo conectado a un río totalmente penetrante.

Las expresiones que relacionan el parámetro α_k , con la transmisividad del acuífero son:

Río pasando por un lateral del acuífero de ancho "L": $T_k = \frac{\alpha_k 4 s_k L_k^2}{\pi^2}$

Río pasando por el centro de un acuífero de ancho "L": $T_k = \frac{\alpha_k 4 s_k \left(\frac{L_k}{2}\right)^2}{\pi^2}$

Donde:

s_k , es el coeficiente de almacenamiento del acuífero (adimensional).

L_k , es el ancho del acuífero (m).

α_k , es el coeficiente de descarga del acuífero (mes⁻¹).

La aplicación de estas expresiones requiere conocer el coeficiente de almacenamiento, el ancho del acuífero y la configuración geométrica del acuífero respecto del río. El coeficiente de almacenamiento se obtendrá por calibración mediante el contraste de los resultados del modelo con los datos de piezometría de los acuíferos. Los otros dos datos pueden obtenerse de forma aproximada por la geometría del acuífero.

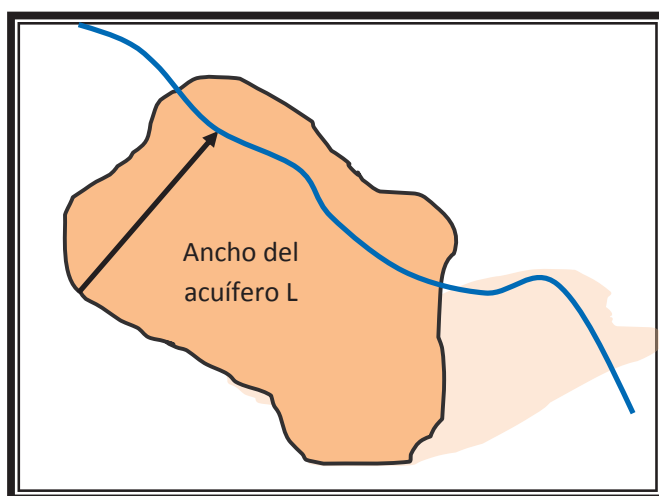


Figura 3-15. Obtención aproximada del ancho del acuífero para la aplicación de la formulación.

Conocidas las transmisividades de cada acuífero (T_k) se obtienen las transmisividades equivalentes (Te_i) entre ellos y se construye la matriz de transferencias entre todos los acuíferos del sistema " Te ".

$$\underline{Te} = \begin{matrix} \text{acuífero } 1 \\ 2 \\ \dots \\ i \\ \dots \\ j \\ \dots \\ n \end{matrix} \begin{matrix} \text{Acuífero } 1 & 2 & \dots & i & \dots & j & \dots & n \\ \left[\begin{array}{cccccc} Te_{11} & -Te_{21} & \dots & -Te_{1,i} & \dots & -Te_{1,j} & \dots & -Te_{1,n} \\ -Te_{21} & Te_{22} & \dots & -Te_{2,i} & \dots & -Te_{2,j} & \dots & -Te_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Te_{i,1} & -Te_{i,2} & \dots & Te_{i,i} & \dots & -Te_{i,j} & \dots & -Te_{i,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Te_{j,1} & -Te_{j,2} & \dots & Te_{j,i} & \dots & Te_{j,j} & \dots & -Te_{j,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Te_{n,1} & -Te_{n,2} & \dots & Te_{n,i} & \dots & Te_{n,j} & \dots & -Te_{n,n} \end{array} \right] \end{matrix}$$

Donde

$$\frac{1}{Te_{ij}} = \frac{1}{(L_i + L_j)} \left(\frac{L_i}{T_i} + \frac{L_j}{T_j} \right)$$

$$Te_{i,i} = Te_{i,1} + Te_{i,2} + \dots + Te_{i,i-1} + Te_{i,i+1} + \dots + Te_{i,n} + T_{\text{exterior}}$$

Siendo T_{exterior} la transmisividad del acuífero con elementos externos del sistema: acuíferos de otras cuencas hidrográficas no modelados o el mar.

Una vez construida la matriz de transmisividad se obtiene, por un proceso iterativo, la variación del volumen de agua en cada acuífero a partir de las alturas piezométricas, mediante la expresión:

$$\Delta V_{i,t} = Te \cdot h_{j,t}$$

Donde el caudal que se transfiere entre acuíferos es el que se obtiene mediante la expresión:

$$Q_{trans_{ij,t}} = (-Te_{ij} \cdot h_{i,t}) - (Te_{ji} \cdot h_{j,t})$$

Para finalizar el proceso se actualiza el valor del volumen en los acuíferos. Estos valores serán los datos de partida, volúmenes iniciales, de la simulación del mes siguiente.

3.5. Información necesaria y conveniente para la construcción y simulación del ciclo hidrológico

La modelación distribuida requiere de gran cantidad de información, que en la mayoría de las veces difícil es tener acceso a tal información, sin embargo aun con estos inconvenientes, este tipo de modelación es una de las que mejores resultados arroja y que mejor se ajusta a la realidad. Además de que han tenido gran auge en países de Europa, por la constante escasez de agua y que de esta manera se puede hacer una mejor planificación de la explotación de los acuíferos y del uso de las aguas superficiales lo que permite evaluar escenarios para diferentes situaciones futuras.

Uno de los principales problemas en nuestro país a la hora de entrar en temas de investigación, como es el área de hidrología distribuida, es la poca información con que se cuenta y el difícil acceso a la misma, ya que las instituciones las cuales disponen y proporcionan este tipo de información, muchas veces no cooperan para que los trabajos tengan el éxito esperado o en otros casos la información es muy costosa, lo cual hace difícil la ejecución de este tipo de proyectos y uno de las principales causas de que proyectos importantes no se lleven a cabo es la falta de recursos económicos para conseguir información, sin los cuales es muy difícil concluir trabajos que traerán beneficios no solo a los departamentos que los lleven a cabo, si no a la sociedad en general.

De acuerdo al tipo de modelo utilizado, se requiere cierta información y en determinados formatos, por lo que se deberá de dar un tratamiento específico a la información para que este en el formato adecuado al modelo. Dentro de la gran cantidad de información que se utiliza en modelación distribuida, tanto como en sistemas de información geográfica, el raster es el más cómodo. Sin embargo la información vectorial también es muy útil, ya que ambas se complementan para un mejor aprovechamiento de la información.

De acuerdo a la información disponible, se puede hacer una clasificación con el objeto de diferenciar lo que es esencial, de lo que es conveniente y de lo que puede servir de ayuda de dicha información que seguidamente se detalla, y que se clasifica de acuerdo a las tres categorías antes mencionadas:

3.5.1. Información esencial

Entendiéndose por información esencial aquella sin la cual no se pueden realizar los trabajos, por lo que será imprescindible disponer de ella. A continuación se lista la información esencial para el modelo PATRICAL en base al tipo de información

a) Capas o mapas digitales básicos de la cuenca del rio grande de Morelia

1) Masas de aguas superficiales (ríos embalses y lagos).

El uso de este mapa tiene la finalidad de ubicar los causes, así como también los embalses que se encuentren dentro de la zona de estudio, con lo cual se determina la red de escurrimiento de la cuenca hidrográfica.

2) Masas de aguas subterráneas (acuíferos).

El mapa de aguas subterráneas se utiliza para la delimitación de los acuíferos que estén dentro de la zona de análisis y hacer un estudio más detallado y poder diferenciar una zona de otra en base a los niveles de piezométricos. Debido a que la cuenca del rio grande de Morelia solo incluye el acuífero Morelia-Querendaro, se optó por subdividir en pequeños segmentos de acuíferos la cuenca y poder diferenciar así las diferencias que existen dentro de la misma cuenca, la división se puede ver en el capítulo de “Procedimientos de preparación de la información”.

3) Modelo digital del terreno (mdt) o modelo de elevaciones del terreno.

El modelo digital de elevaciones tiene la finalidad de delimitar la cuenca, así como también determinar las direcciones de escurrimiento que se tendrán en la misma.

4) Mapas de usos de suelo (Corine Land Cover 2000 y 1990).

El uso de suelo es de vital importancia en la modelación distribuida ya que nos ayuda a conocer la evapotranspiración real de la zona de estudio.

5) Delimitación de las Demarcaciones Hidrográficas.

El mapa de delimitaciones hidrográficas nos permite conocer los límites de cada cuenca que se encuentre dentro de la delimitación de

los acuíferos, así como también ubicar las salidas de los causes de cada demarcación.

6) Mapa de geología.

La geología nos ayuda a conocer la infiltración máxima de acuerdo a cada tipo de roca que se encuentre dentro de la zona, además de que nos ayuda también conocer la humedad con la que se encuentra el suelo.

b) Series de datos meteorológicos:

Estas series de datos servirán como información de entrada al modelo para la creación de mapas tanto de precipitaciones como de temperaturas, las series serán la que se listan a continuación:

- a) Toda la información disponible de precipitaciones mensuales (lluvias), del CNA. Es la total acumulada mensual ordenada en año hidrológico.
- b) Toda la información disponible de temperaturas registradas del CNA (en el caso de que exista). Es la temperatura media diaria, de igual manera en año hidrológico para tener en los mismos formatos toda la información.

c) Series de datos hidrológicos:

Las series de datos hidrológicos nos servirán para llevar a cabo la calibración del modelo, éstos deben ser datos confiables que ayuden a agilizar el trabajo, para este modelo son necesarias las siguientes series de datos hidrológicos:

- a) Toda la información disponible de niveles piezométricos.
- b) Series de caudales circulantes medidos y rectificadas a régimen natural.

3.5.2. Información conveniente

Información básica pero no imprescindible en las primeras fases del estudio, pero si se requerirá para los procesos de afinación. Por información conveniente se tiene la siguiente:

a) Series de datos hidrológicos

- a) Toda la información disponible de caudales registrados en las estaciones de aforo y de entradas, salidas y volúmenes de los embalses.
- b) Extracciones de agua subterránea en las unidades de demanda agrícola y de los municipios, o en su defecto extracciones de agua agrícola y urbana de las masas de agua subterránea.
- c) Dotaciones netas y brutas de las unidades de demanda agrícola, o en su defecto retornos de agua a las masas de agua subterráneas.

b) Información georreferenciada con sus coordenadas (ya sea en tabla o en capa digital)

Toda la información que se tenga disponible ya sea en tabla o en capa digital deberá tener cuando menos los siguientes datos:

- a) Estaciones de aforo.
- b) Puntos de control piezométricos (pozos).
- c) Embalses.
- d) Estaciones pluviométricas del CNA.

3.5.3. Información de ayuda

Información no crítica pero que puede ayudar a mejorar en los trabajos, tanto como en los resultados finales. Consideraremos como información de ayuda la que se lista a continuación:

a) Series de datos hidrológicos:

- a) Caudales derivados a las principales zonas agrícolas.

Entendiéndose por los caudales derivados aquellos que sean residuos vertidos de las principales zonas agrícolas.

- b) Volúmenes de vertidos por las principales estaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas, y concentración de nitratos del efluente.

b) Capas o mapas digitales:

- a) Delimitación de las zonas agrícolas.
- b) Principales canales y tuberías de derivación de agua a zonas agrícolas y abastecimientos urbanos.

3.6. Resultados del modelo

El modelo de simulación PATRICAL se ha aplicado a todo el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar, considerando de forma integrada tanto el análisis de las aportaciones superficiales como el de los niveles piezométricos en los acuíferos.

Se ha realizado la aplicación y calibración del modelo de simulación en régimen natural, es decir, la cuenca se encuentra en condiciones naturales y no existen por ello afecciones de tipo antrópico. Los resultados del modelo se pueden contrastar con dos tipos de información disponible: los resultados de caudales obtenidos del modelo de simulación con las series de aportación en régimen natural, ya sea por restitución o por tratarse de estaciones con afecciones antrópicas mínimas y los resultados de niveles piezométricos obtenidos en los acuíferos con los datos piezométricos de acuíferos poco antropizados. Para nuestro caso de estudio no existe información histórica de niveles piezométricos, por lo que nos limitaremos a calibrar con la serie de caudales a régimen natural.

Para la calibración del modelo, se han modificado los parámetros hidrodinámicos siguientes:

- Coeficiente de almacenamiento (S), altura a la que se encuentra el nivel impermeable inferior o suelo del acuífero (h_0) e inicial del que parten las masas de agua subterráneas.
- Transferencias laterales entre las distintas masas de agua
- Parámetros $H_{m\acute{a}x}$ e $I_{m\acute{a}x}$.
- Y la variable inicial: volumen inicial, del que parten las masas de agua subterráneas.

Dichos parámetros se van modificando en función de los resultados recogidos tras cada simulación, y se van completando y/o actualizando por comparación con los extraídos por medio de diversos estudios, si es que existen para el caso de este trabajo, no existen estudios similares, por lo que no habrá manera de contrastar estos resultados con otros estudios. Solo se realizará la calibración con datos de las estaciones hidrométricas que se encuentran en la zona de estudio.

Para agilizar el proceso de calibración, se cuenta con un programa que simula sólo en régimen estacionario (estaciona.bat), y que tarda aproximadamente 5 minutos en realizar la simulación, pero sólo muestra los cambios en la parte subterránea, no ofrece información ni del periodo transitorio del ciclo, ni de la evolución de la parte superficial, ni de cómo han variado las transferencias laterales. Para obtener dichos resultados, es preciso lanzar la simulación del modelo completa.

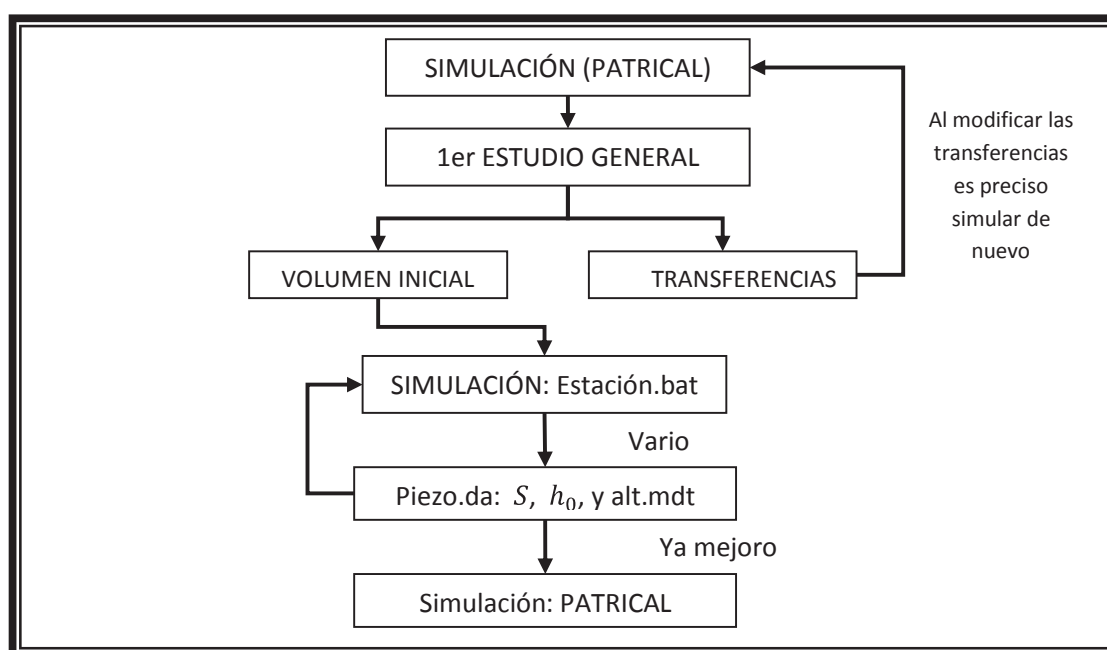


Figura 3-16. Diagrama del proceso de simulación del modelo PATRICAL.

Los resultados que se extraen se contrastan con las series de registros históricos de las estaciones hidrométricas y con la piezometría disponible en los distintos puntos de control, si es que esta existe, en el caso de nuestro país no existe información de piezometría disponible y si existe es muy limitada por lo que no se tomará en cuenta para la calibración.

La aplicación del modelo lluvia-escorrentía PATRICAL utiliza los registros históricos de información de la lluvia total mensual de 20 estaciones de la comisión nacional del agua (CNA), de las cuales la mayoría están dentro de la cuenca, la mayoría tiene registros desde el año 1962, aunque al menos 5 de estas estaciones tienen registros desde 1940. También utiliza los registros históricos de las temperaturas medias del mes, de las mismas estaciones.

Con la información mensual de las estaciones meteorológicas de lluvia total y temperatura diaria media se obtienen por interpolación, con el método de la inversa de la distancia al cuadrado, los mapas de lluvia mensual distribuida y de temperatura media distribuida, los cuales se introducen como datos en el modelo de simulación para reproducir el ciclo hidrológico.

El modelo obtiene, como resultados, los mapas de aportación generada en cada celda a partir de los cuales se calculan, mediante su agregación a través de la red de drenaje, las aportaciones en cada punto de la red fluvial y las pérdidas en cauces; de cada acuífero se obtienen los volúmenes de agua almacenados, transferidos y niveles piezométricos. También se obtienen las salidas al mar y a otros sistemas.

Los puntos de aportación son a elección del usuario, para este trabajo se eligieron los puntos donde se ubican las estaciones hidrométricas, dichos puntos son los que se muestran en la tabla 3-17.

Puntos de control de caudales de las estaciones Hidrométricas		
ESTACIÓN	X	Y
SANTIAGO UNDAMEO, MORELIA	260529	2168835
RIO CHIQUITO	268301	2181023
COINTZIO, MORELIA	262615	2169621

Tabla 3-17. Estaciones de registro de caudales incluidas para la calibración del modelo.

Los resultados principales del modelo son los siguientes:

- a) Mapa de precipitaciones.
- b) Mapa de temperaturas.
- c) Aportaciones en cada punto seleccionado de la red fluvial, que son:
 - i. Aportaciones mensuales.
 - ii. Aportaciones anuales.
- d) Niveles piezométricos de cada acuífero que se tenga dentro de la zona de estudio.
- e) Volúmenes almacenados en cada acuífero.
- f) Perdidas en cauces.

De los resultados anteriores los más usuales son las aportaciones en cada punto de la red fluvial ya que son los datos que nos servirán para la calibración del modelo, esto es solo para este trabajo, ya que de contar con registros históricos de niveles piezométricos, estos serían tan indispensables como los registros de caudales.

CAPÍTULO IV

Procedimientos

para la preparación de la información

4. Procedimientos para la preparación información

La información será siempre la base para poder modelar un fenómeno, la cual tendrá que adaptarse a los formatos del modelo que se emplee, esto hará que el trabajo sea más rápido y se obtengan mejores resultados, en seguida se mostrara los procedimientos para la preparación de la información en los formatos requeridos por el modelo PATRICAL.

4.1. Información esencial

La información esencial son un conjunto de mapas que para este caso serán generados a partir de los mapas de INEGI, adecuándolos de manera que estén en los formatos que requiere el modelo.

Los mapas que comercializa INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática) se pueden conseguir solo en formato vectorial, ya sea en formato shape o DXF, por lo cual habrá que hacer ciertos ajustes de estos mapas, ya que el modelo PATRICAL trabaja con mapas en formato raster. Los mapas a partir de los cuales se obtuvieron los mapas definitivos para el modelo son los siguientes:

4.1.1. Capas o imágenes digitales

Las capas o imágenes digitales serán los mapas de entrada al modelo para poder llevar a cabo la modelación sin los cuales ningún proceso se podrá llevar a cabo.

a) Uso de suelo

El mapa de uso de suelo de INEGI (Figura 1) se adaptó de acuerdo a la clasificación Corine land Cover 2000 con lo cual se obtuvo el mapa definitivo. El procesamiento de los mapas se realizó en el SIG Idrisi de acuerdo al siguiente procedimiento:

- a) Como primera paso se tiene que importar los mapas para poder adecuarlos al formato correspondiente.
 - Importando un mapa
 - i. *File*
 - ii. *Software-specific formats*
 - iii. *ESRI formats*
 - iv. *SHAPEIDR*

Una vez ejecutado el último paso tendremos una ventana como la que se muestra en la figura 4-0, en donde tendremos que cargar un mapa de

entrada, dar el nombre al mapa de salida y si se desea ponerle un título al mapa (opcional) una vez que se han cargado los mapas se da ok.

En la figura 4-0 se muestra tanto la ventana que tiene Idrisi para importar mapas, como el mapa resultado del procedimiento. Este proceso es para todos los mapas que estén en formato shape ya que Idrisi no carga automáticamente los mapas en formato shape. como es el caso de ArcView, esa es una desventaja de Idrisi con respecto a ArcView.

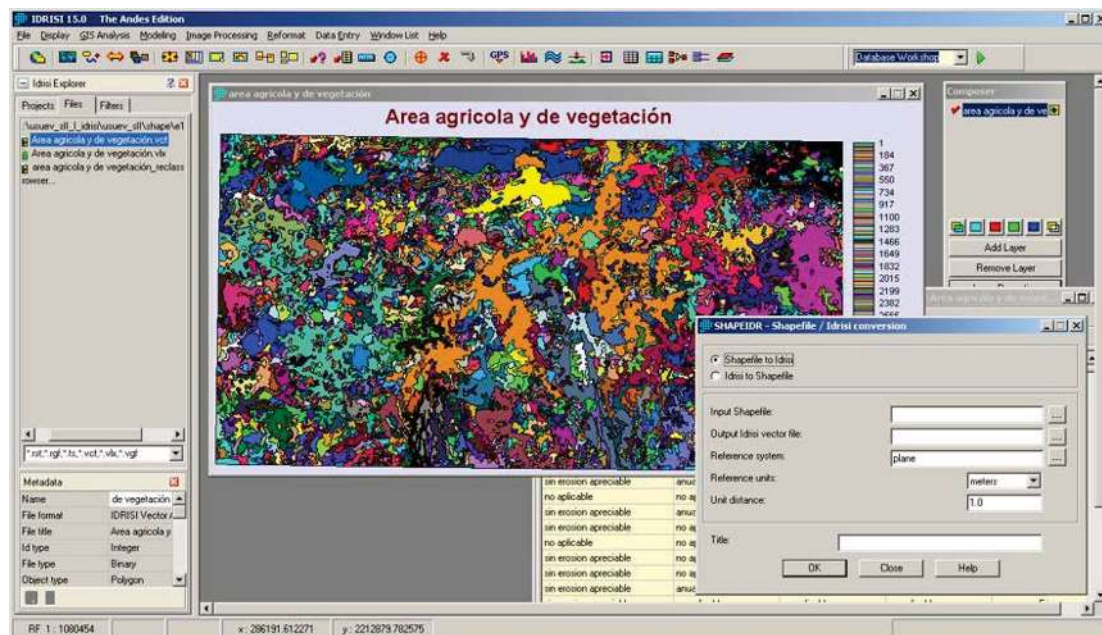


Figura 4-0. Ventana de Idrisi para importar un mapa en formato Shape.

- b) En seguida se tiene que hacer la reclasificación, creando un nuevo campo en la base de datos del mapa con los códigos correspondientes que queramos asignarle a cada polígono del mapa e importarlo para hacer la reclasificación.

- Reclasificación del mapa
 - i. *Database Workshop*

Una vez que se tiene la base de datos se sigue el procedimiento que se muestra a continuación:

- ii. *Edit*
- iii. *Add field*. Donde asignaremos un nombre a nuestro campo, para nuestro caso será reclass (Figura 4-1).



Figura 4-1. Ventana de Idrisi para crear un nuevo campo en la base de datos.

Una vez que aceptamos nos aparecerá un nuevo campo donde podremos asignar los códigos que deseemos, esto después de activar el siguiente comando:

iv. Edit mode

Una vez que activamos el editor de la base de datos podremos asignar con lo cual obtendremos la tabla como se muestra en la figura 4-2. Al terminar de cargar los códigos simplemente desactivamos el editor.

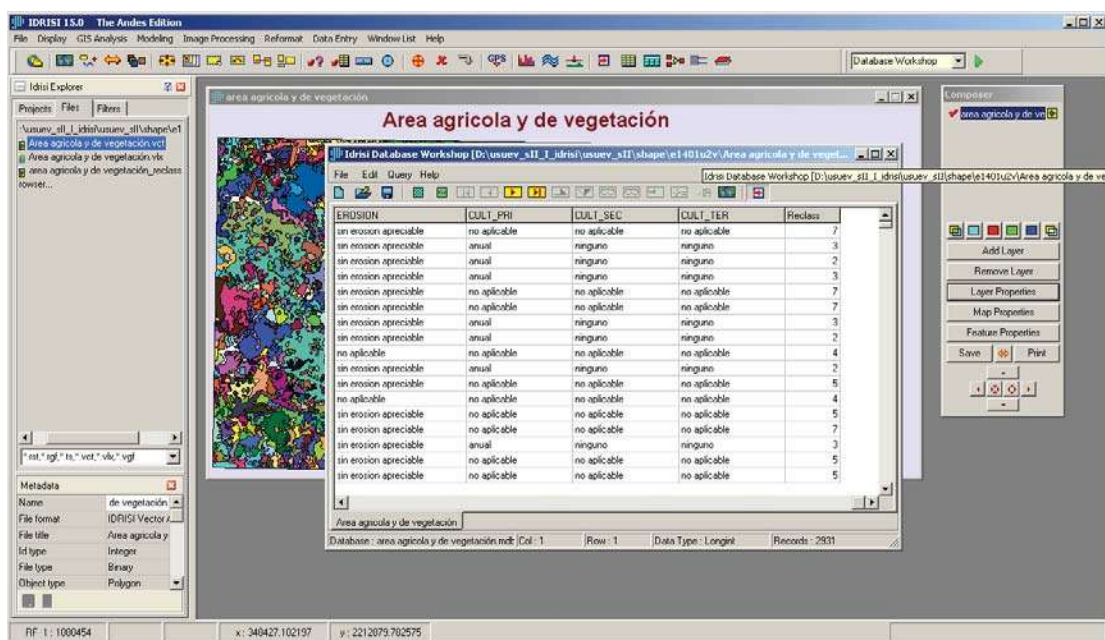


Figura 4-2. Editor de la base de datos en Idrisi.

Para concluir, importamos el campo que creamos de acuerdo a los siguientes pasos:

- i. *File*
- ii. *Import*
- iii. *Field*
- iv. *From AVL*

Una vez ejecutado el último paso tendremos una ventana como la que se muestra en la figura 4-3, donde le daremos el nombre al archivo de salida que será “reclasificación” de igual forma asignaremos el campo que queremos cambiar para nuestro caso será “IDR_ID” por “Reclass”, tendremos los códigos listos para la reclasificación.

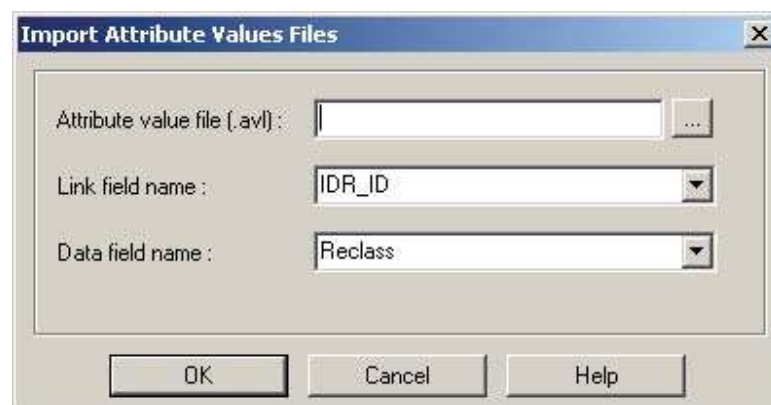


Figura 4-3 Ventana de Idrisi para importar los códigos de reclasificación.

Para hacer la reclasificación se tienen dos opciones en Idrisi por medio de los comandos “RECLASS” y “ASSIGN”, el primero se recomienda cuando los códigos que hay que cambiar son pocos, pero para nuestro caso se tiene una gran cantidad de códigos, por lo que utilizaremos el segundo que es ASSIGN, cabe mencionar que para poder utilizar este comando se tiene que hacer todo el procedimiento mencionado anteriormente: para hacer la reclasificación se tiene el siguiente procedimiento:

- i. *Data entry*
- ii. *Assing*

Al ejecutar el último paso tendremos una ventana como la que se muestra en la figura 4-4, donde nos pedirá el mapa de entrada que será el comprado de INEGI, el archivo generado en el paso anterior con los códigos nuevos que asignaremos y el nombre del mapa de salida. La Figura muestra tanto la ventana de ASSIGN para reclasificación como el mapa resultado de todo el proceso anterior.

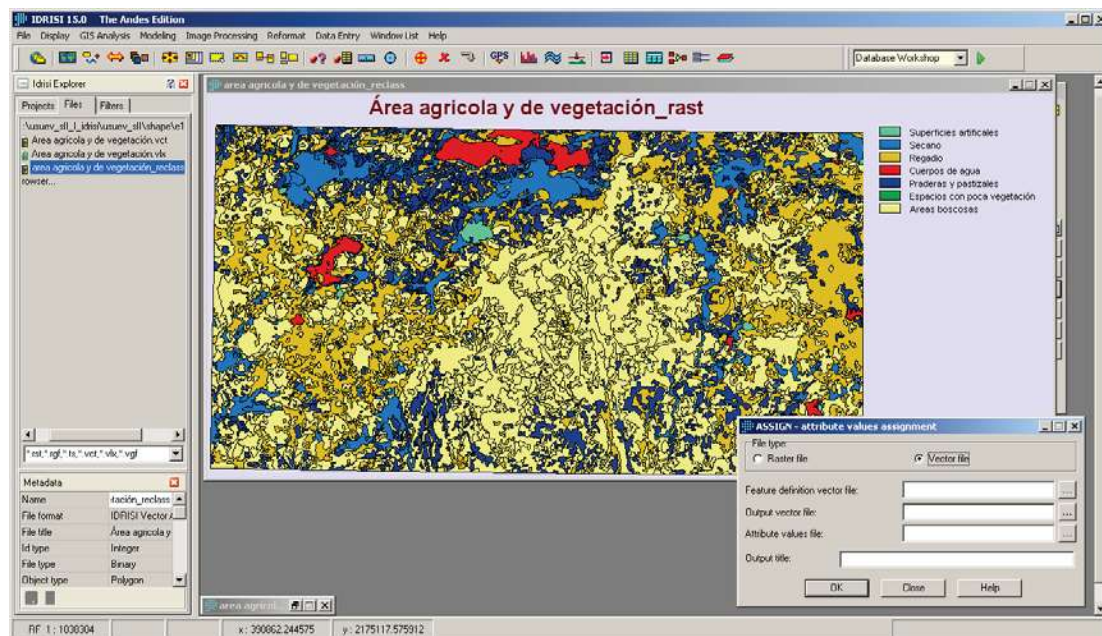


Figura 4-4. Ventana de Idrisi para reclasificación de mapas con el comando ASSING.

Terminada la reclasificación se procede a cambiar el formato del mapa del formato vectorial al formato raster. Aclarando que para generar el raster se tiene que tener una referencia de igual forma que el mapa que queremos rasterizar, es decir debemos tener una imagen en formato raster de las mismas dimensiones, para nuestro caso como no tenemos un mapa raster con las mismas características, es decir con las mismas coordenadas y la misma área, se procede a crear una imagen vacía llamada INITIAL basada en las coordenadas del mapa de uso de suelo comprado de INEGI.

- Procedimiento para crear una imagen INITIAL
 - i. Data entry
 - ii. INITIAL

Al ejecutar el comando INITIAL nos aparecerá una ventana como la mostrada en la figura 4-5, en la cual cargaremos las coordenadas del mapa, el número de columnas y de filas que tendrá en nuevo mapa. Ya introducidas las coordenadas dar clic en ok y obtendremos una imagen como la que se muestra en la figura 4-6.

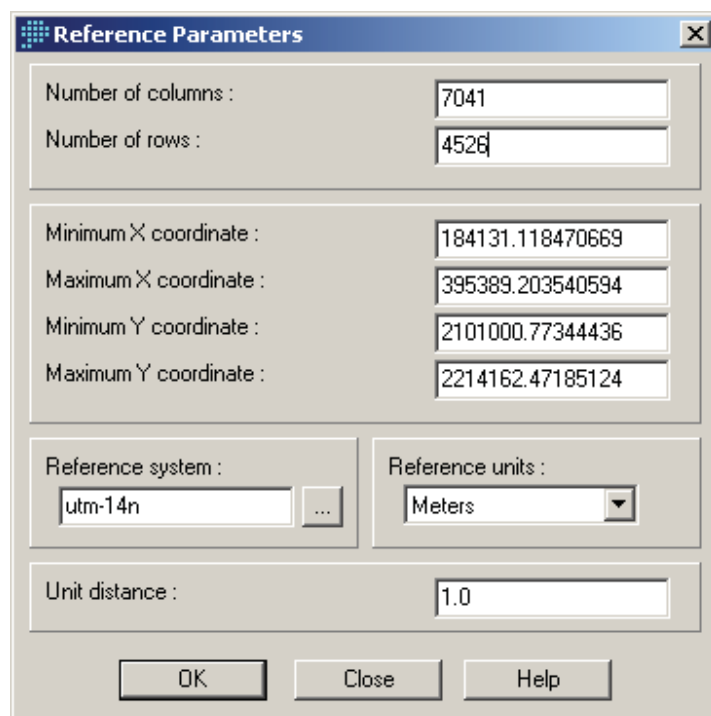


Figura 4-5. Ventana de Idrisi para generación de una imagen vacía INITIAL.

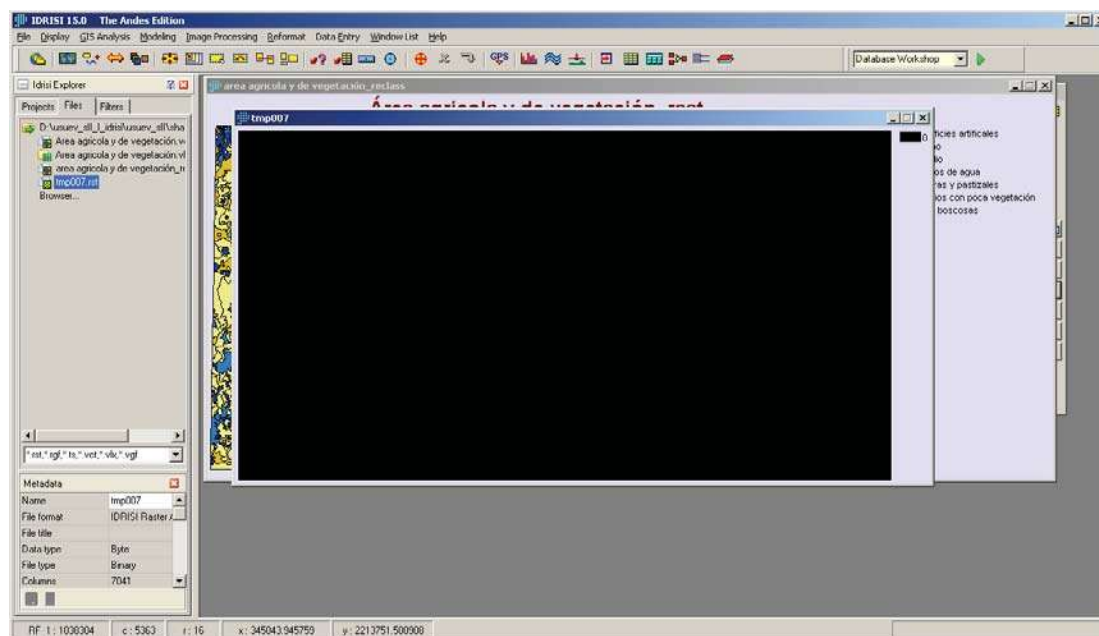


Figura 4-6. Imagen vacía INITIAL generada en Idrisi.

Una vez que se tiene la imagen vacía se procede a crear el raster con el mapa ya reclasificado mediante el procedimiento siguiente:

- i. *Reformat*
- ii. *Rastervector*

El comando anterior nos mostrará una ventana que nos muestra diferentes opciones de rasterizar como son de puntos a raster, de líneas a raster y de polígonos a raster, para este caso elegimos la última opción ya que tenemos un mapa de polígonos, elegida esta opción cargaremos el mapa reclasificado de uso de suelo. Par terminar presionamos *ok* y tendremos el mapa en formato raster como se muestra en la Figura 4-7 donde también nos muestra la ventana mencionada.

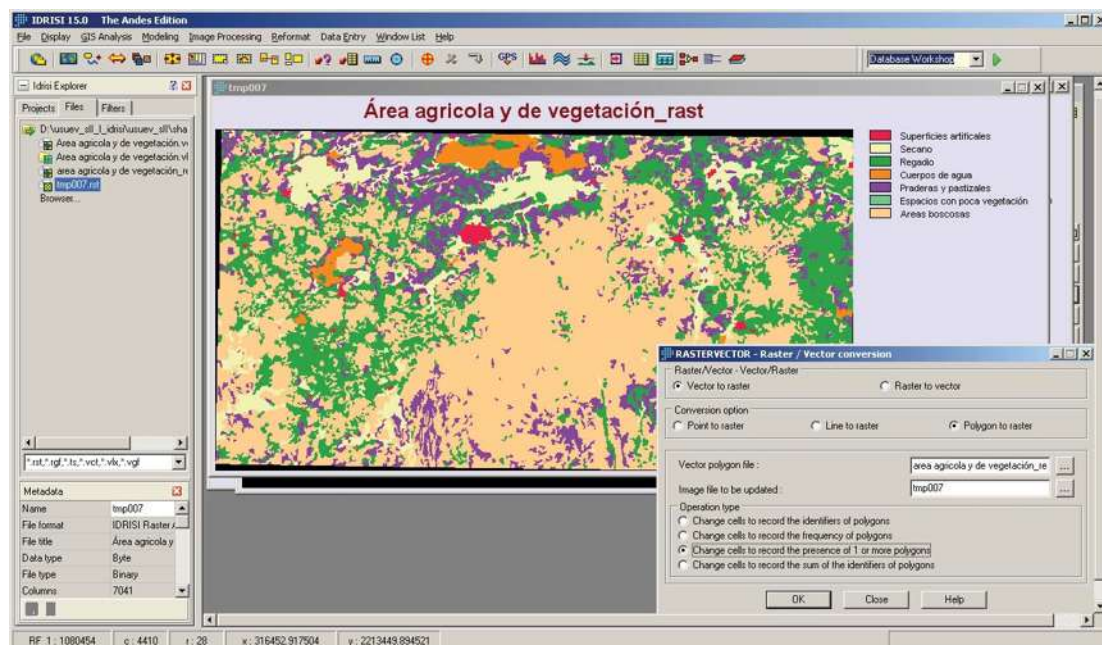


Figura 4-7. Ventana del comando *rastervector* para convertir un mapa de vector a raster en Idrisi.

Como se puede observar para hacer una reclasificación de un mapa en Idrisi es un proceso largo y un poco tedioso lo cual hace que no sea recomendable hacer una reclasificación en Idrisi sino en otros SIG como es ArcView que es poco más amigable para estos procesos, desde luego cada SIG tiene ventajas y desventajas sobre otro, lo cual no indica que alguno no sea recomendable en términos generales pero si para algunas tareas específicas como es en este caso de reclasificación.

b) Mapa de geología

El mapa de geología servirá para determinar la infiltración en el acuífero, para este mapa no se le hicieron modificaciones a la base de datos si no solo transformarlo de vectorial a raster con el mismo procedimiento mostrado para el mapa de uso de suelo que se dio a conocer anteriormente.

c) Modelo digital de elevaciones

El modelo digital de elevaciones sirve para delimitar la cuenca hidrográfica, determinar las direcciones de flujo, y para los cauces que existen en el área de estudio. Este mapa se adaptó de los modelos proporcionados por INEGI distribuidos de manera gratuita en la página web de la empresa. Los modelos digitales de elevación se obtienen de acuerdo a las claves que maneja INEGI, por lo que para tener el modelo digital completo de elevación de la cuenca del río grande de Morelia se juntaron 8 modelos que corresponden a los siguientes municipios (Tabla 4-9).

Municipio	Clave
Coeneo de la Libertad	E14A12
Cuitzeo	E14A13
Zinapécuaro	E14A14
Pátzcuaro	E14A22
Morelia	E14A23
Tzitzio	E14A24
Villa Escalante	E14A32
Villa madero	E14A33

Tabla 4-8. Municipios que conforman la cuenca del río grande de Morelia.

Para tener el modelo completo en un solo mapa se realizó el siguiente procedimiento en Idrisi:

- a) Se importaron los 8 modelos digitales de elevación con el comando **“Import”** de Idrisi siguiendo el procedimiento siguiente.
 - Importando un modelo digital de elevaciones
 - i. *File*
 - ii. *Import*
 - iii. *General Conversión Tools*
 - iv. *Genericraster (BIL BIP, BSQ)*

Ejecutado el último paso, Idrisi nos mostrara una ventana (ver Figura 4-10) donde tendremos que especificar un mapa de entrada que estará en formato BIL, el cual es el formato de distribución gratuita de INEGI, el número de bandas será 1, el nombre salida será para este ejemplo

MDE_E14A33 y el número de bits será 16. También hay que introducir las coordenadas del modelo en “*Output reference information*” como se muestra en la Figura 4-9 en donde se tienen las coordenadas del modelo digital de elevaciones para E14A33, este es solo para muestra de ejemplo, ya que los modelos tienen diferentes coordenadas. Para aceptar presionamos ok en las dos ventanas y el resultado será un mapa como el que se muestra en la figura 4-10. En la figura también se muestra la ventana que se activa al ejecutar el comando *Genericraster (BIL BIP, BSQ)*.

Cabe mencionar que las coordenadas se deben calcular en base a la resolución del modelo digital de elevaciones, restando o sumando la resolución del modelo a las coordenadas que proporciona la información del mismo.

Todos los modelos digitales de elevación se importaron de la misma forma, lo único que se tiene que tener cuidado es el cálculo de las coordenadas para que los mapas empalmen a la hora de juntarlos.

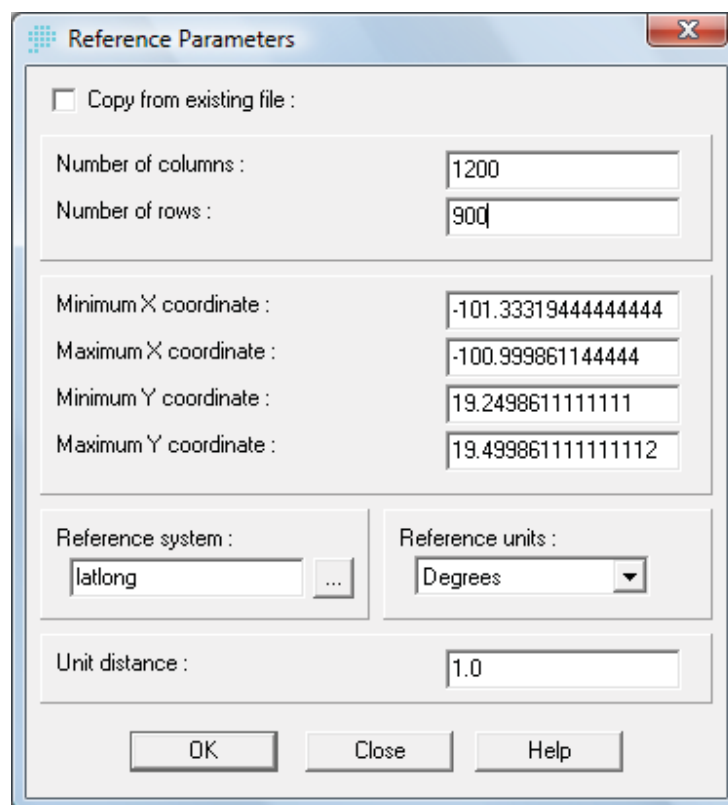


Figura 4-9. Ventana de Idrisi que permite cargar manualmente las coordenadas del modelo digital de elevaciones.

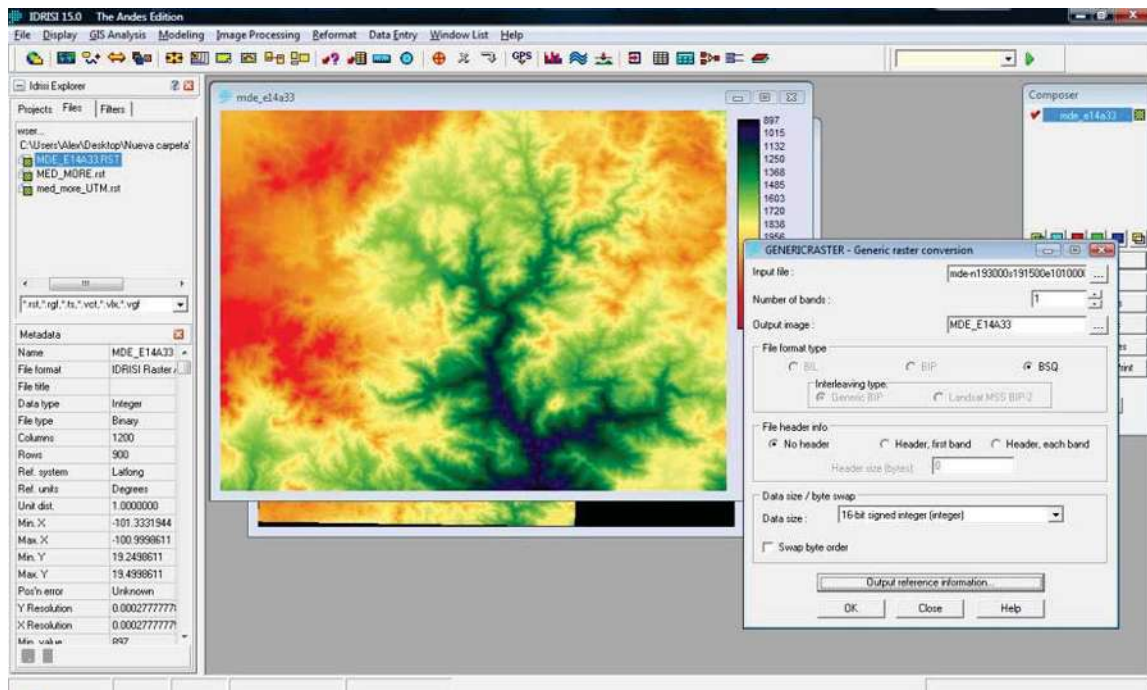


Figura 4-10. Ventana de Idrisi que permite importar un mapa en formato BIL con el comando “*Genericraster (BIL BIP, BSQ)*”.

b) Para tener un solo modelo digital de elevaciones de los 7 que se tienen, se procede a unirlos con el comando **Mosaic** de Idrisi.

- Procedimiento de unión de los modelos digitales de elevación:
 - i. *Image Processing*
 - ii. *Restoration*
 - iii. *MOSAIC*

En la ventana que activa este comando se cargan los 10 mapas de los modelos digitales de elevación y se le da un nombre de salida, para aceptar presionamos ok y tendremos el modelo digital completo como el que se muestra en la figura 4-11 junto con la ventana que activa el comando “*MOSAIC*”.

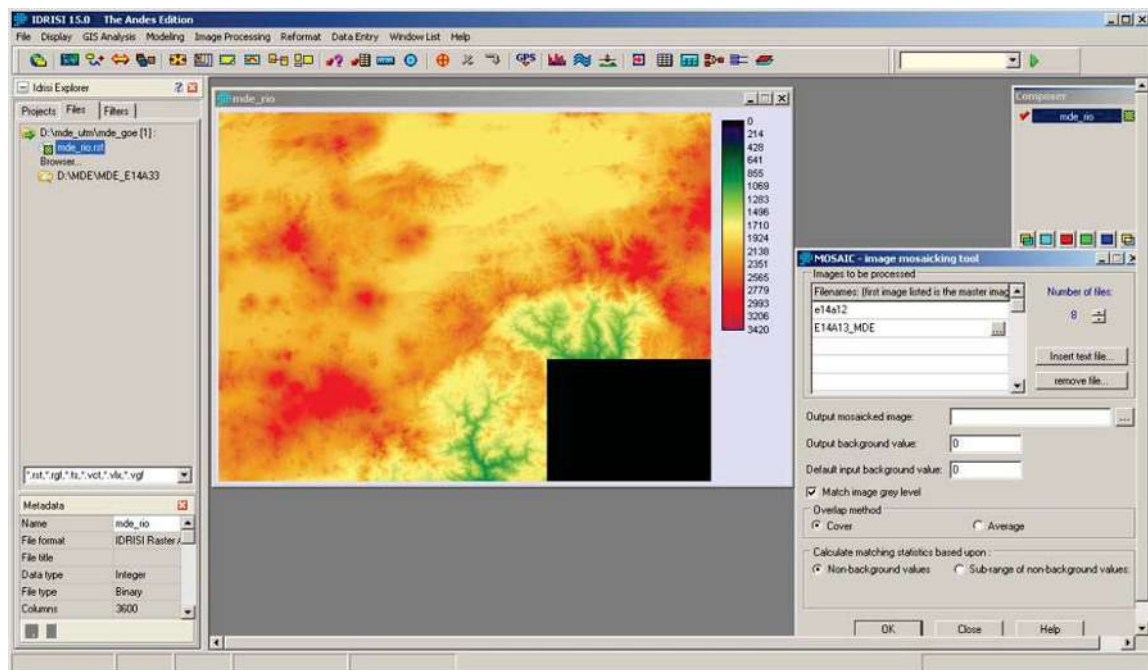


Figura 4-11. Ventana que se activa en Idrisi con el comando MOSAIC que sirve para unir modelos digitales de elevación.

c) Para más comodidad todos los mapas se requieren en coordenadas UTM, sin embargo los modelos bajados de la web de INEGI están en coordenadas geográficas, lo cual podemos cambiar con el comando **Projec** de Idrisi siguiendo los pasos siguientes:

- Cambio de coordenadas geográficas a UTM
 - i. *Reformat*
 - ii. *PROJECT*

En la ventana que se activa cargamos el modelo completo que generamos con su sistema de referencia y le damos un nombre de salida que será “*mde_rio_utm*” para distinguirlo del que está en coordenadas geográficas y elegimos el sistema de referencia en el que deseamos que este el mapa, en este caso será UTM de la zona 14-N, para aceptar presionamos ok y tendremos listo el mapa como se observa en la figura 4-12 donde también se ve la ventana que se activa con este comando.

Para verificar las coordenadas activamos la casilla “*Output reference information*” que nos proporciona las coordenadas del nuevo mapa como se observa el Figura 4-13.

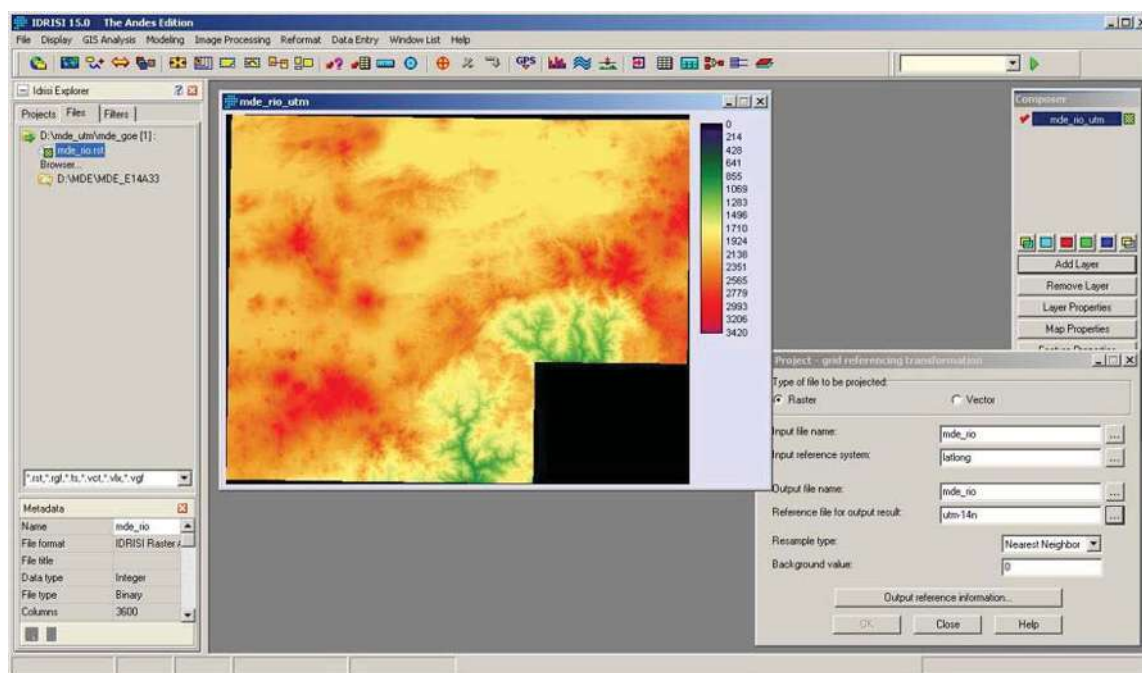


Figura 4-12. Ventana que activa el comando *PROJECT* para transformar coordenadas geográficas a UTM.

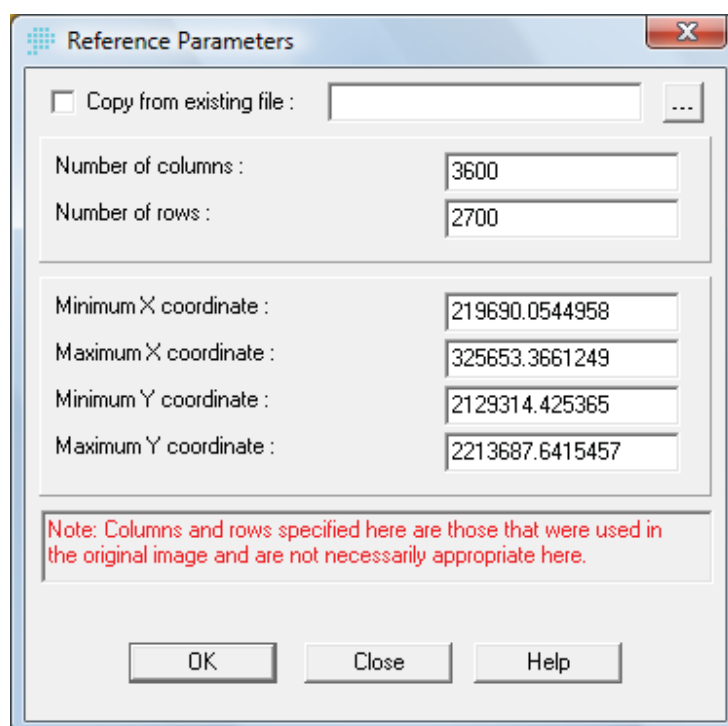


Figura 4-13. Ventana de idrisi para verificar el cambio de coordenadas de geográficas a UTM.

Todo este proceso que se hace en Idrisi es un poco complejo, ya que si no se tiene ninguna experiencia en este SIG se vuelve un poco complicada, sin embargo los pasos mostrados en este trabajo conducirán a un buen trabajo si se ejecutan correctamente. ArcView tiene funciones similares para la unión de mapas que son más sencillas que en Idrisi el único inconveniente es que requiere de mucho más tiempo que en este SIG.

d) Delimitación de las demarcaciones hidrográficas (Cuencas)

Definiremos como demarcación hidrográfica o mejor conocida como cuenca, a el área de la superficie terrestre por donde el agua de la lluvia, nieve o deshielo escurre y drena a través de una red de corrientes que fluyen hacia una corriente principal, y por esta hacia un punto común de salida que puede ser un almacenamiento de agua interior, como un lago, una laguna de una presa en cuyo caso se llama cuenca endorreica. Otro caso es cuando las descargas son en el mar y se les denomina exorreicas. Normalmente la corriente principal es la que es la que define el nombre de la cuenca, para este trabajo la corriente principal es el cauce del rio grande de Morelia por lo que nuestra cuenca será la del rio grande de Morelia.

La delimitación de las demarcaciones hidrográficas (cuencas) es el trazo de la cuenca de la zona de estudio. La cual es delimitada por la topografía que exista en el lugar. La corriente principal define la cuenca, sin embargo esta está integrada por diferentes corrientes los cuales se denominan corrientes secundarias como se muestra en la Figura 4-14. La línea que delimita a una cuenca hidrográfica se le denomina parteaguas, el cual generalmente se traza en base a las orientaciones de las pendientes del terreno.

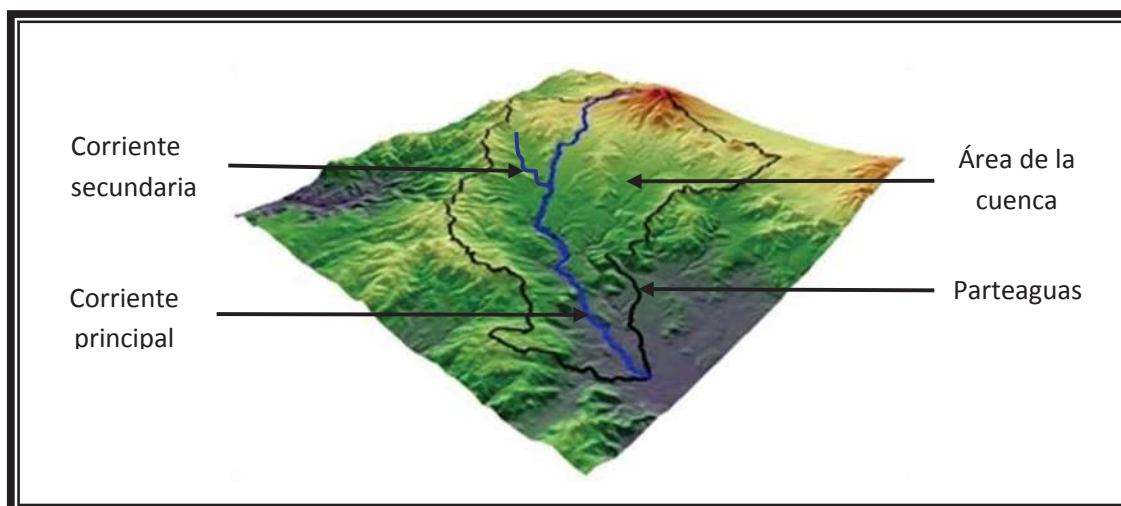


Figura 4-14. Partes básicas de la delimitación de una cuenca hidrográfica.

El trazo de la cuenca se puede hacerse manual o con algún software especializado en hidrología. La forma más sencilla es de forma manual, basta con tener a la mano una carta topográfica en papel lo cual es la manera más rudimentaria de trazar una cuenca, otra es tener las curvas de nivel y sobre estas trabajar, esta es la forma más común en la actualidad, sin embargo debido a los avances tecnológicos existen programas de computo que sin mayor esfuerzo realizan estos trabajos de una manera sencilla y rápida, como es el caso del ArcView con la extensión del Hec-GeoHMS, que solo requiere de un modelo digital de elevaciones para hacer el trazo de la cuenca.

Para este trabajo de tesis, se realizó de las dos formas mencionadas anteriormente. Para el caso manual se hizo sobre las curvas de nivel y el mapa de corrientes de INEGI en Autocad, una herramienta muy potente para el trazo de planos, con lo cual se obtuvo una cuenca muy exacta tal como se muestra en la figura 4-15. Para el trazo de una cuenca en ArcView solo se necesita tener algunos conocimientos previos en Sistemas de Información Geográfica para facilitar el trabajo, sin embargo el procedimiento siguiente nos llevara el trazo correcto aun sin tener experiencia es SIG.

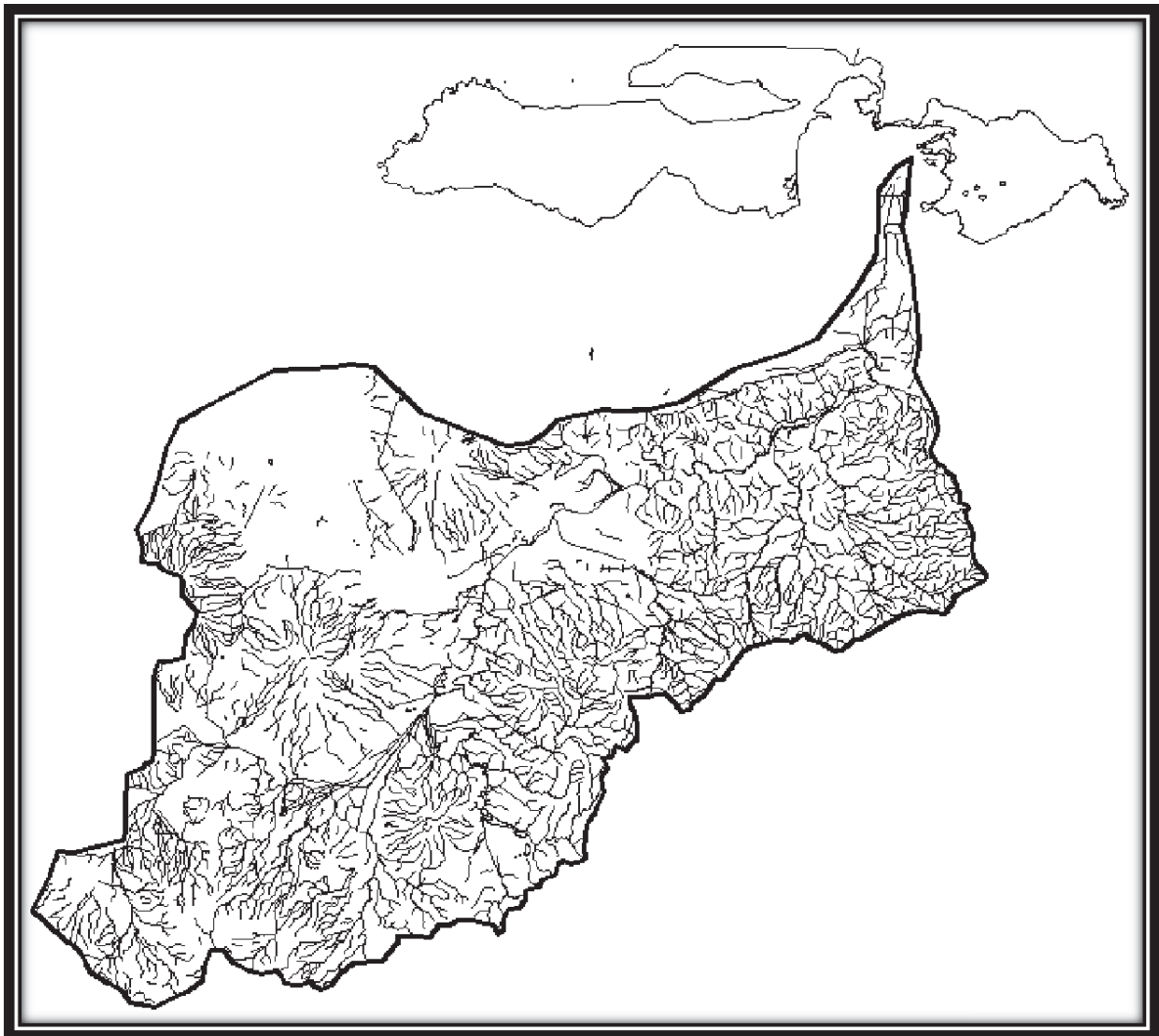


Figura 4-15. Trazo preliminar de la cuenca del río Grande de Morelia.

e) Trazo de cuenca en ArcView

- 1) Como primer paso se tiene que cargar el modelo digital de elevaciones correspondiente al área de estudio en ArcView, cabe mencionar que debe ser al modelo ya completo de toda el área de estudio. Para este procedimiento omitimos la forma de juntar modelos de elevación visto en el apartado Modelo digital de elevaciones con el SIG Idrisi, sin embargo también en ArcView se puede hacer este proceso.

- 2) MDE sin depresiones.

El DEM sin depresiones se crea rellinando las depresiones, es decir, aumentando la cota de las celdas que estén rodeadas completamente de celdas con mayor cota, asignándole a dicha celda la menor cota de las celdas circundantes. De esta manera el agua podrá fluir de una celda a otra sin “estancarse”.

Para rellenar las depresiones hay que seguir los siguientes pasos:

- a) Agregar el DEM sin rellenar a "MainView" usando el icono "Add Theme" seleccionarlo en el menú "View".
- b) Activar el grid cargado y seleccionar Terrain preprocessing/Fill Sinks.
- c) Confirmar el nombre del grid a ser rellenado y si se desea, editar el nombre de la salida.
- d) OK para aceptar.
- e) El resultado es el tema "fillgrid". Para que se muestre la leyenda, seleccionar Theme/Hide/Show Legend.

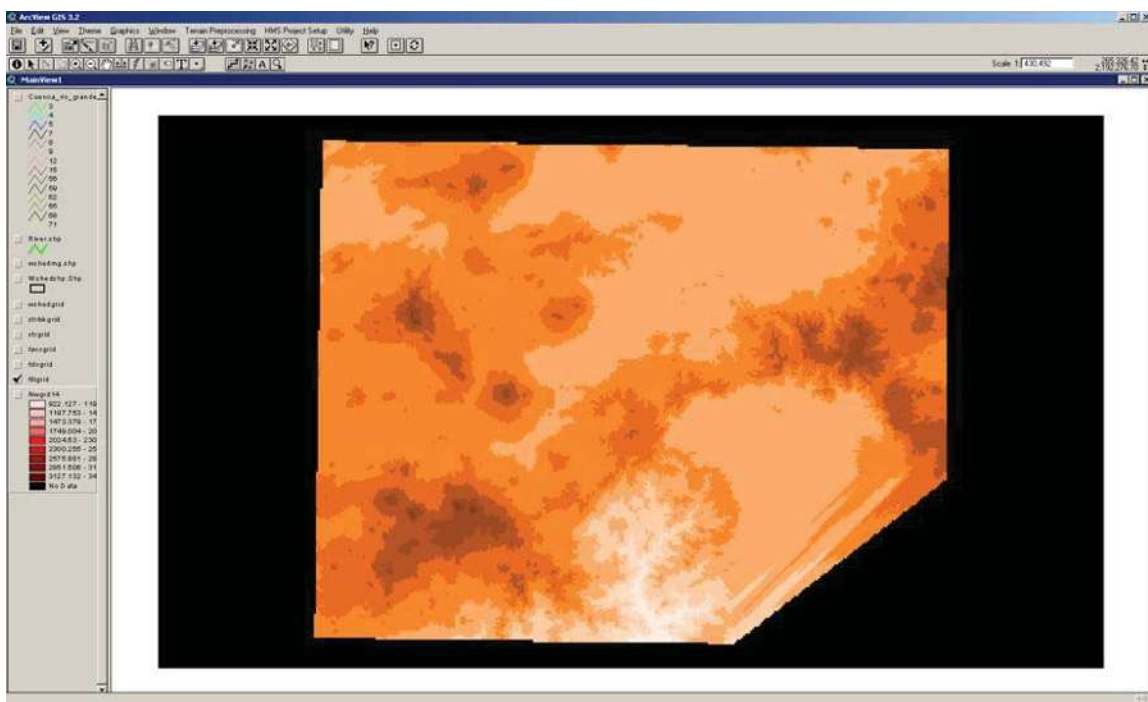


Figura 4-16. Visualización del modelo digital de elevaciones sin depresiones.

3) Pasos a seguir para la delimitación de cuencas en ArcView
Para realizar este proceso se tiene que tener activada la extensión de HEC-GeoHMS 1.1 en ArcView sin lo cual no tendrá éxito ningún proceso. Los pasos a seguir se listan a continuación:

a) Flow direction

En este paso se define la dirección de la mayor pendiente, evaluando celda a celda las cotas de las celdas circundantes a cada una de ellas.

- Seleccionar *Terrain Preprocessing/Flow direction*.
- Confirmar que la entrada de HydroDEM es “*fillgrid*”. La salida será “*FDirGrid*”.
- OK para aceptar.
- El resultado es el grid “*FDirGrid*”.

El mapa resultado de este proceso se muestra en la figura 4-17.

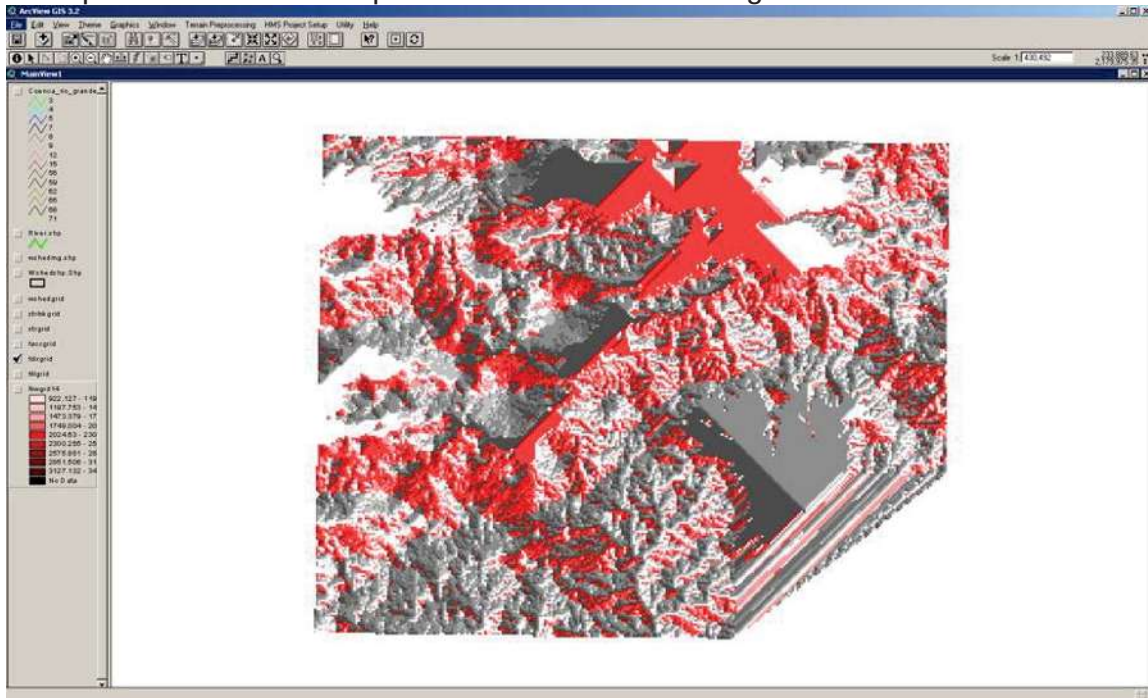


Figura 4-17. Mapa de dirección de flujo resultado del comando *Flow direction*.

b) Flow Accumulation

Este paso determina el número de celdas que drenan a cada celda. El área de drenaje de una celda dada se puede calcular multiplicando el número de celdas por el área de cada celda.

- Seleccionar *Terrain Preprocessing/Flow Accumulation*
- Confirmar que la entrada de FlowDirGrid es “*fdirgrid*” y la salida será “*FAccGrid*”.
- OK para aceptar.
- El resultado es el grid “*FAccGrid*”.

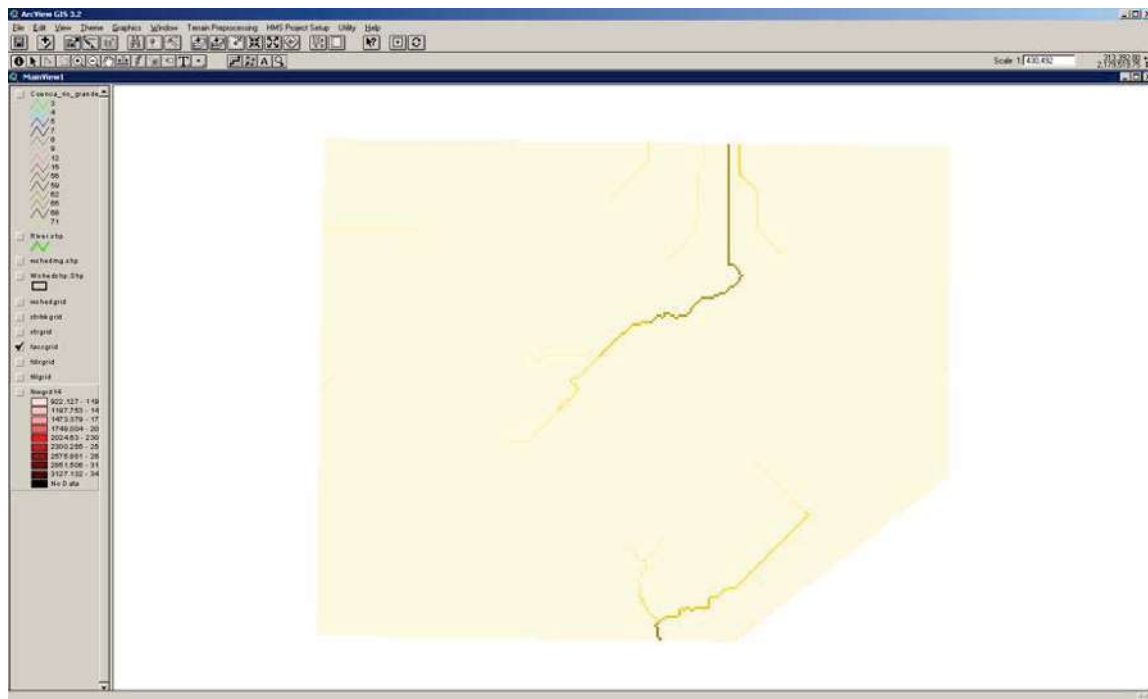


Figura 4-18. Mapa de acumulación de flujo, resultado del comando “Flow Accumulation”.

c) Stream Definition

Este paso clasifica todas las celdas con flujo procedente de un número de celdas mayor a un umbral definido por el usuario como pertenecientes a la red de drenaje. El umbral puede especificarse como área en unidades del DEM al cuadrado o como número de celdas. El valor por defecto del 1% de la mayor área de drenaje de toda la cuenca y cuanto menor sea el umbral, mayor será el número de subcuencas que defina GeoHMS.

Seleccionar View/Properties.

- En “Map Units” y “Distance Units” especificar “meters”.
- OK para aceptar.
- Seleccionar *Terrain Preprocessing/Stream Definition*
- Confirmar que la entrada de FlowAccGrid es “faccgrid” y la salida de StreamGrid es “StrGrid”.
- OK para aceptar.
- Aparecerá la ventana “Stream Threshold Definition” que es donde debemos definir el umbral. Elegir, por ejemplo, “Area in Distance Units squared” e ingresar el número deseado. Puede dejarse el valor por defecto, OK para aceptar.
- El resultado es el grid “strgrid”.

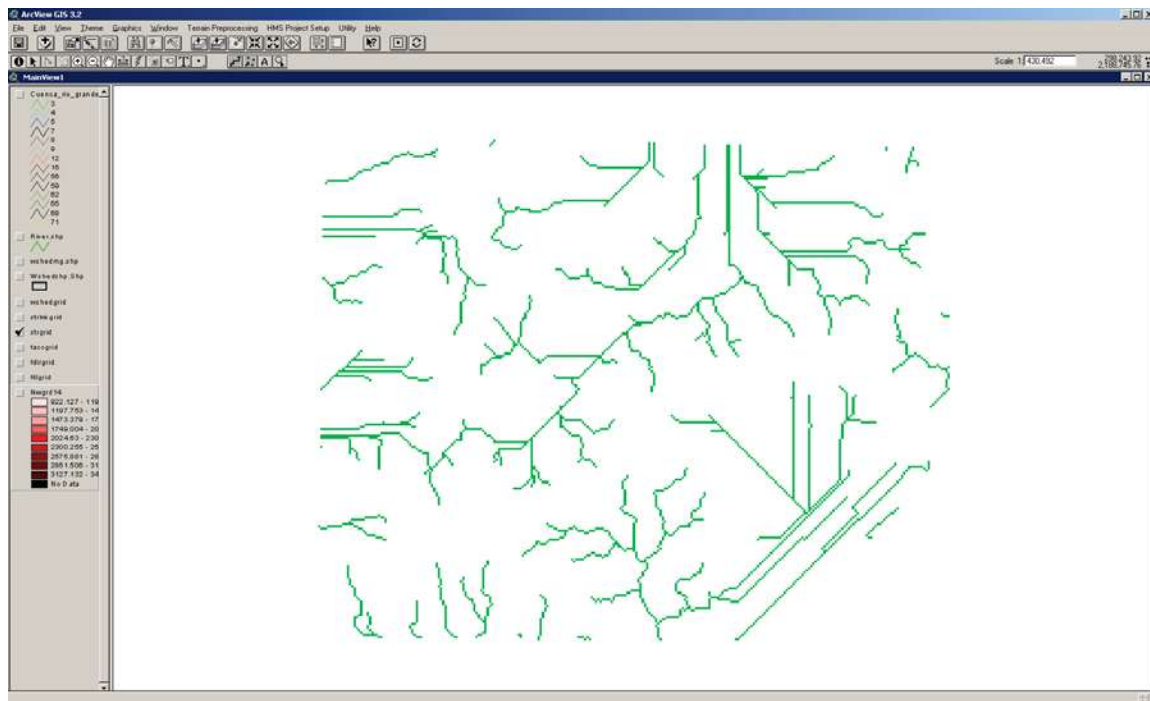


Figura 4-19. Mapa de la red de drenaje obtenida mediante el comando “*Stream Definition*”.

d) **Stream Segmentation**

Este paso divide los cauces en segmentos. Los segmentos son tramos de cauces situados entre 2 uniones de cauces sucesivas, una unión y la salida o una unión y el límite de la cuenca.

- Seleccionar *Terrain Preprocessing/Stream Segmentation*.
- Confirmar que la entrada de FlowDirGrid es “*fdirgrid*” y de StreamGrid es “*strgrid*”.
- La salida de LinkGrid será “*StrLnkGrid*”.
- OK para aceptar.

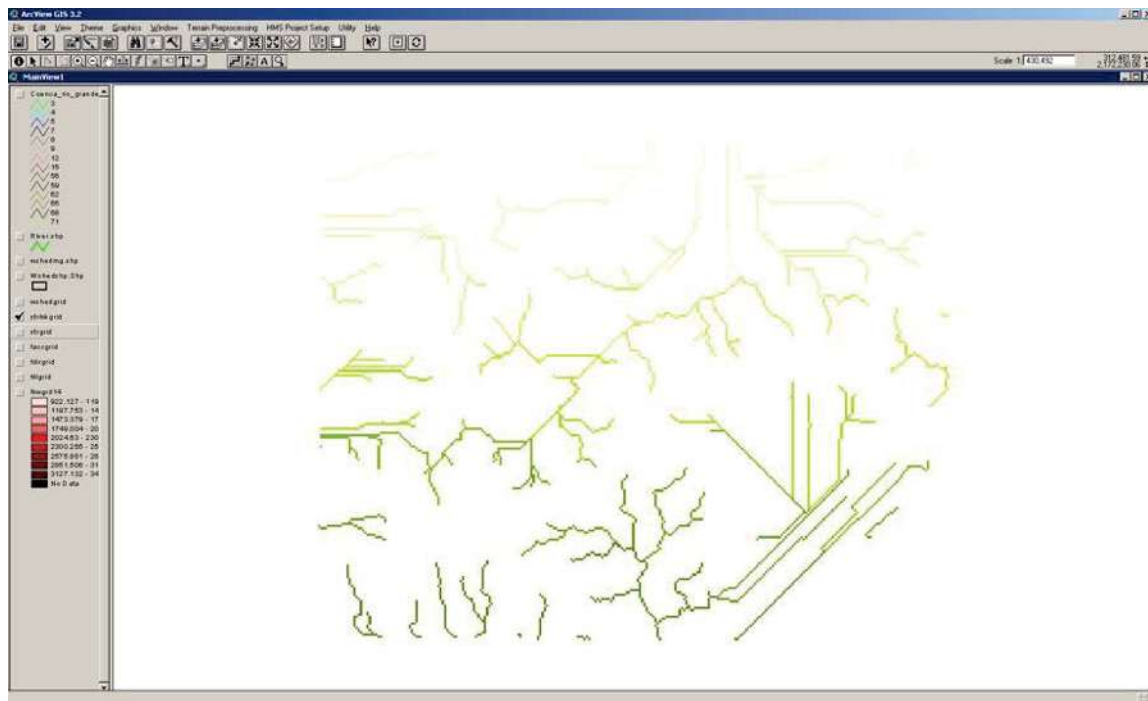


Figura 4-20. Mapa de segmentación de los cauces obtenido mediante el comando “Stream Segmentation”.

e) Watershed delineation

Este paso define una cuenca por cada segmento de cauce.

- Seleccionar *Terrain Preprocessing/Watershed Delineation*
- Confirmar que la entrada de FlowDirGrid es “*fdirgrid*” y de LinkGrid es “*strlnkgrid*”
- La salida de WaterGrid será “*WShedGrid*”.
- OK para aceptar.

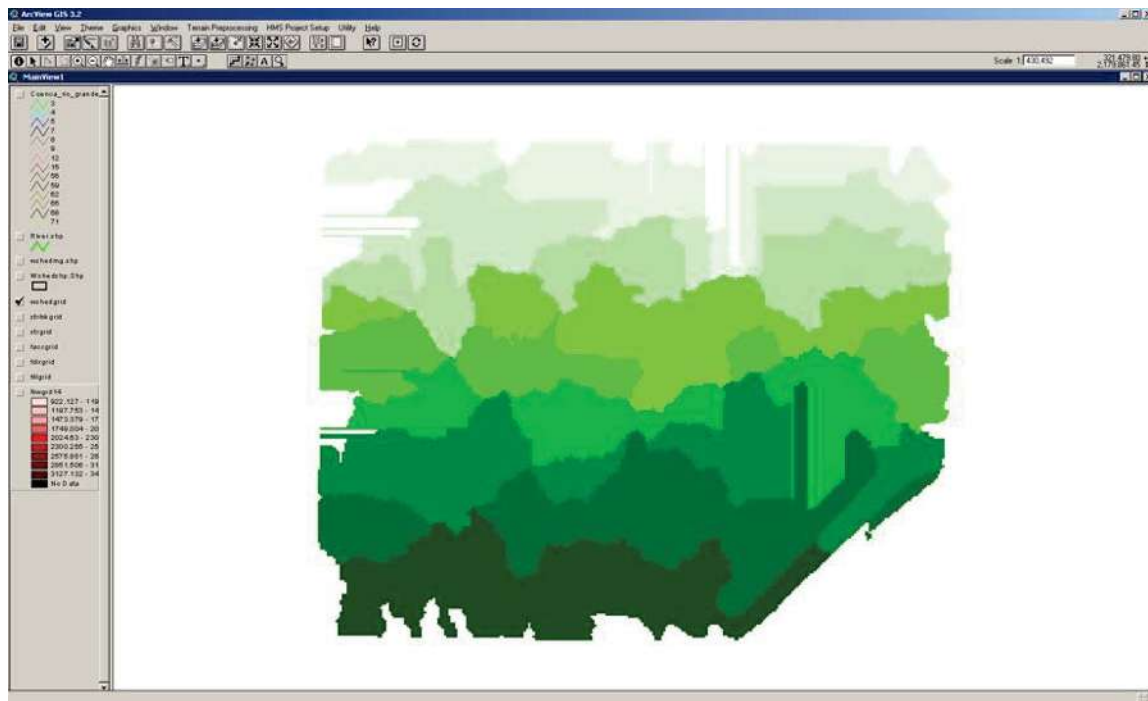


Figura 4-21. Mapa de visualización de cuencas generado con el comando *Watershed delineation*.

f) Watershed Polygon Processing

Este paso convierte las subcuentas de formato grid a formato vector.

- Seleccionar *Terrain Preprocessing/Watershed Polygon Processing*.
- Confirmar que la entrada de WaterGrid es *"wshedgrid"* y la salida de Watershed será *"Wshedshp.Shp"*.
- OK para aceptar.

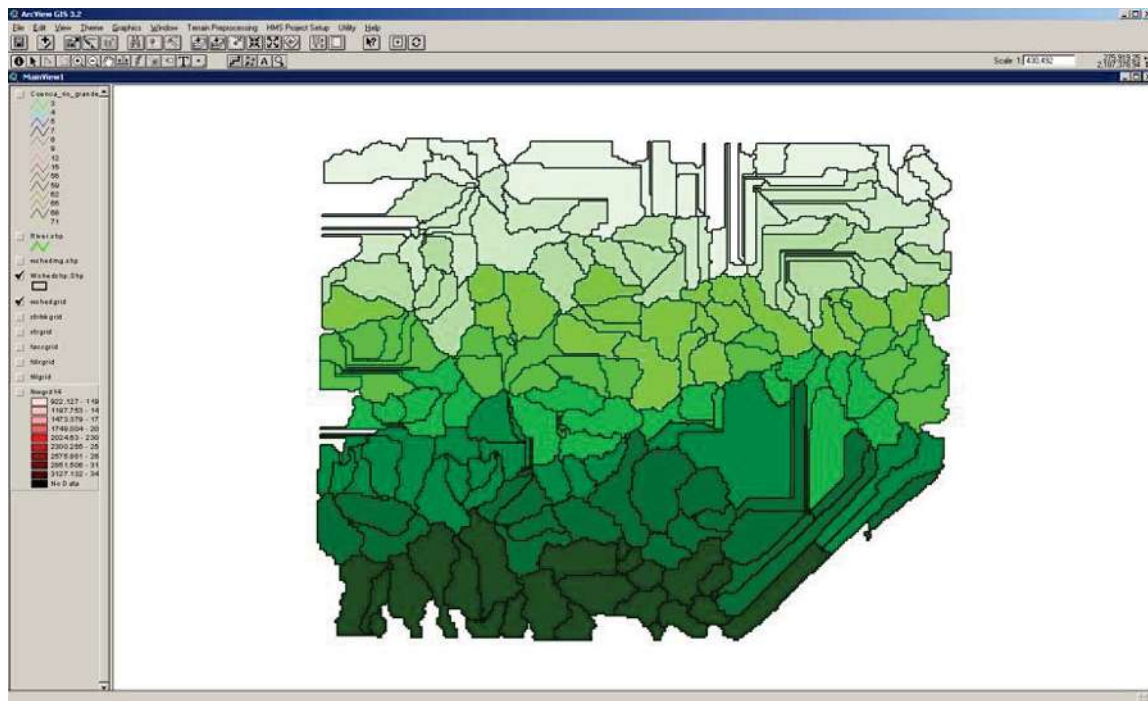


Figura 4-22. Mapa de la delimitación de cuencas mediante polígonos con el comando “*Watershed Polygon Processing*”.

g) Stream Segment Processing

Este paso convierte los cauces de formato grid a formato vector.

- Seleccionar *Terrain Preprocessing/Stream Segment Processing*.
- Confirmar que la entrada de LinkGrid es “*strlnkgrid*” y de FlowDirGrid es “*fdirgrid*”. La salida de River será “*River*”.
- OK para aceptar.
- Aparecerá una ventana que nos pregunta si el punto mostrado es una salida de una cuenca (outlet), si lo es ingresamos 1, de lo contrario ingresamos 2. Si no lo apreciamos muy bien de qué punto se trata se puede ampliar la zona de visualización con las opciones 3 y 4. Si contestamos siempre 1, el programa definirá la cuenca vertiente a cada salida y luego podemos editar las cuencas y subcuencas que nos interesen.

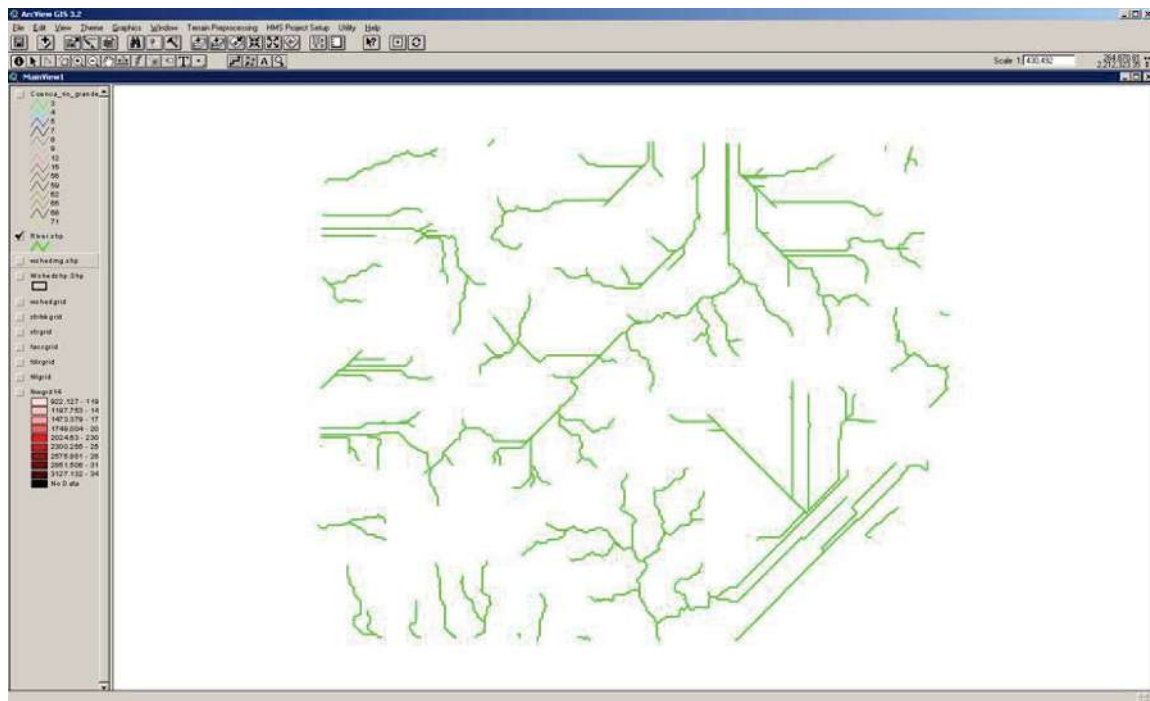


Figura 4-23. Mapa de segmentación de cauces con el comando “*Stream Segment Processing*”.

h) **Watershed Aggregation**

Este paso aglutina las subcuencas que vierten a cada confluencia de cauces. Este paso es obligatorio y se realiza para mejorar la delineación de las subcuencas y la obtención de datos.

- Seleccionar *Terrain Preprocessing/Watershed Aggregation*
- Confirmar que la entrada de River es “*River.shp*” y de Watershed es “*Wshed.shp*”. La salida de AggregatedWatershed será “*wshedmg.shp*”.
- OK para aceptar.

El resultado final del proceso anterior se muestra en la Figura 4-24 de la cuenca del río grande de Morelia. Para una vista mejor de la cuenca se eliminaron las corrientes y cuencas que no forman parte de la cuenca.

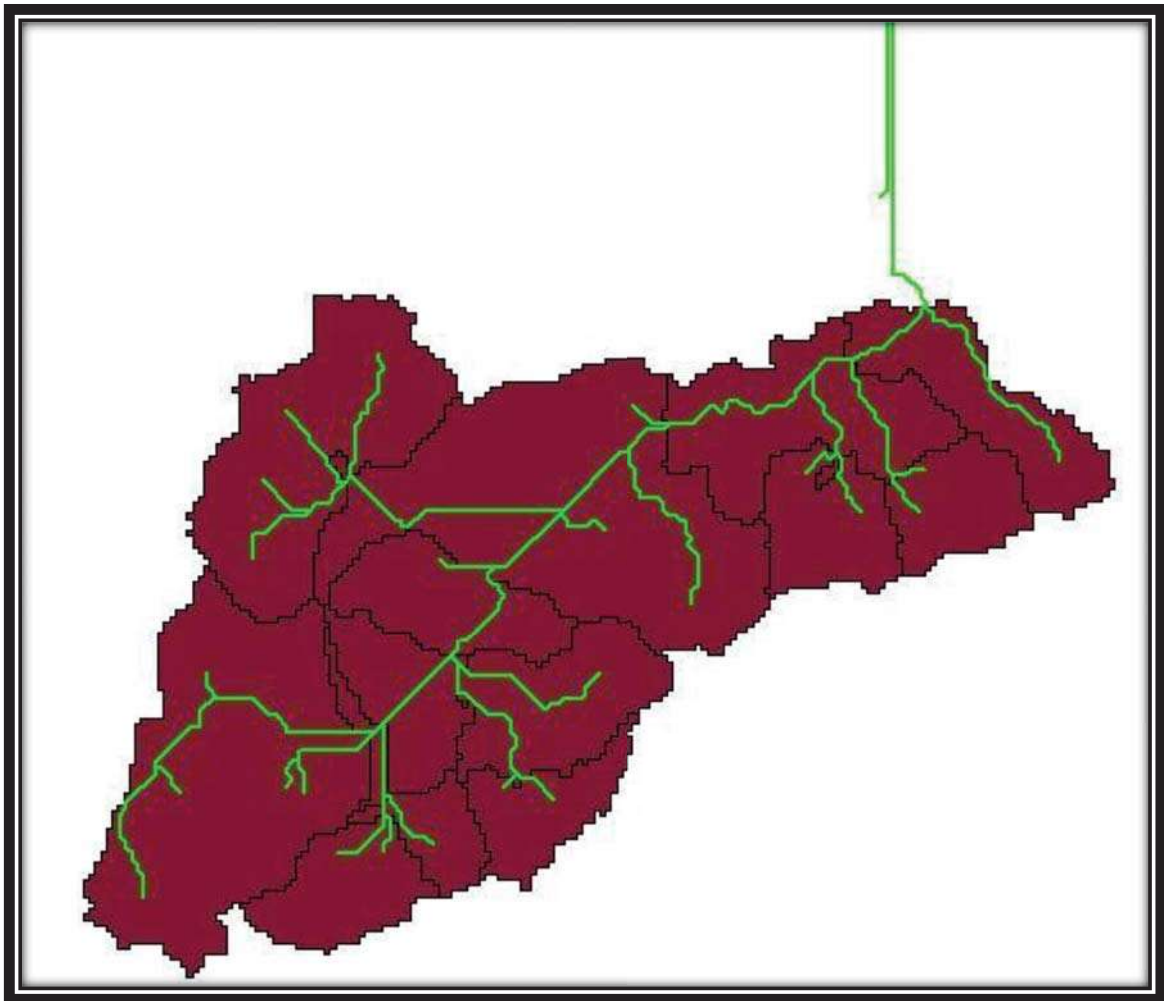


Figura 4-24. Cuenca del río grande de Morelia generada en ArcView.

Todo el procedimiento anterior nos proporciona diferentes resultados que nos ayudaran a mejorar los trabajos, ya que no solo únicamente nos traza las cuencas, si no que genera otros datos como son las corrientes, que nos pueden servir para comparar resultados con otros trabajos o con otros mapas como los que proporciona INEGI. Hasta aquí hemos mostrado el procedimiento de delimitación de cuencas de dos formas sencillas y rápidas, como es el caso de forma manual y con HEC-GeoHMS, sin embargo existen otro SIG que realizan funciones similares a las descritas anteriormente como es Idrisi, con lo cual dejamos a criterio del lector lo forma que le parezca mejor del trazado de cuencas y a la vez otras opciones como son los SIG que nos brindan resultados muy confiables.

4.2. Series de datos meteorológicas

De la información que se considera esencial solo hemos dado a conocer los procedimientos para el caso de las capas o mapas digitales, y aunque esta no es toda la información que se tiene en esta clasificación si se considera como la de

más detalle para su adaptación al el modelo. De la información esencial también se tiene las series de datos meteorológicos, que corresponden a los registros históricos de precipitaciones y temperaturas mensuales que existan disponibles de la zona de estudio. Los registros históricos tanto de precipitaciones como de temperaturas son indispensables para el modelo, ya que son datos de entrada a partir de los cuales el modelo empezara a calcular los dos mapas principales para continuar la modelación, tales mapas son el mapa de precipitaciones y el de temperaturas, sin los cuales no sería posible continuar la modelación. La adaptación de las series de datos meteorológicos es muy sencilla ya que la información que proporciona CLICOM ya esta ordenada en un año normal y se puede obtener mensual o diaria lo que nos facilita el trabajo.

El orden de los datos es en columnas y los datos estarán ordenados en un año hidrológico, que corresponde de Octubre a Septiembre, el formato será como el que se muestra en la Tabla 4-25, en la cual aparecen primero las coordenadas UTM de la estación, la clave de la estación, la variable que en este caso sería la precipitación media mensual, el año, los meses de un año hidrológico iniciando en Octubre y terminando en Septiembre y la última columna que corresponde la precipitación acumulada durante todo el año.

Y	X	CLAVE	VAR	AÑO	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	ANUAL
2168773	264002	16022	PMT	1940-41	13.4	35	44.3	19.9	-100	11.5	38.3	9.8	193	204	125	150	-100
2175975	278084	16055	PMT	1939-40	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	13.5	-100
2175975	278084	16055	PMT	1940-41	-100	52.6	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100

Tabla 4-25. Orden de los registros de precipitaciones para el modelo PATRICAL.

Los registros históricos de la información que tienen las estaciones meteorológicas en muchos casos tienen espacios vacíos, lo que indica que no se tomó el dato correspondiente a ese mes si los registros son mensuales o diarios según sea el caso. Sin embargo el modelo requiere de información continua para poder modelar ya que de lo contrario si hay espacios vacíos en la base de datos el modelo inmediatamente terminara el proceso y se saldrá de los cálculos y ahí terminara el proceso. De acuerdo a lo anterior para no alterar la información y agilizar el trabajo, no se realizó el llenado de datos, debido a la gran cantidad de información disponible, por lo que a todos los vacíos se les asignó el valor de -100. El valor anterior no solo afecta a ese mes si no que a todo el año, ya que desconociendo el valor de un mes no podremos tener valor exacto de la precipitación acumulada de todo el año por lo que le asignaremos de igual forma que los datos mensuales el valor de -100. Con esto tendríamos lista la información de precipitaciones para el modelo PATRICAL.

Los registros históricos de temperatura tendrán el mismo orden, solo que se tomarán en cuenta las precipitaciones medias de cada mes y una media anual de cada año que se tenga de registro, como se muestra en la tabla 4-26.

Y	X	Codigo	VAR	AÑO	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	ANUAL
2168773	264002	16022	TMD	1940-41	19.1	16.5	14.7	14.4	15.8	17.3	19.9	20.2	20.9	19.6	19.8	18.7	18.08
2175975	278084	16055	TMD	1936-37	17.9	15.7	15.2	16.1	16.2	17.3	19	18.7	16.1	15.7	17.1	14.3	16.61
2175975	278084	16055	TMD	1940-41	15.4	12.9	12.4	12.4	13.7	14.6	18.7	20.9	17.2	15.3	15.6	14.8	15.33

Tabla 4-26. Orden de los registros de temperaturas para el modelo PATRICAL.

De la información esencial depende que tan buenos resultados obtengamos por lo que esta debe ser confiable y más que nada correcta, para que el modelo reproduzca lo más real posible el ciclo hidrológico. Para obtener los mejores resultados, se debe hacer una revisión de toda la información tanto de precipitaciones como de temperaturas, para verificar que todos los datos sean correctos. A continuación se muestra algunos detalles de la revisión de la información para el caso de la cuenca del río grande Morelia.

4.2.1. Consistencia de datos

Este proceso se puede hacer desde el inicio de los trabajos de preparación de la información o durante la calibración del modelo, lo más conveniente es que se haga durante la preparación de la información, ya que esto nos ahorrara tiempo a la hora de la calibración.

Se entiende por consistencia de datos la acción de revisar y analizar los datos disponibles para verificar su validez y su coherencia de sus relaciones con otros datos similares. Tal consistencia tiene como propósito hacer que los datos sean tan representativos de lugar de estudio como sea posible, eliminando omisiones, anotaciones inválidas y relaciones incoherentes.

Para lograrlo se deberán tener dos principios básicos:

- 1) Hacer el mínimo de cambios en los datos originalmente registrados, y
- 2) Llevar un registro sistemático de los cambios efectuados.

Existen muchas formas de verificar la consistencia de datos, que pueden variar de acuerdo al objetivo que se tenga que llegar con la información o al tipo de datos que se tenga que verificar. Una de las más comunes en hidrología es la curva masa doble ya que es una forma sencilla y rápida de verificar los datos hidrológicos.

El proceso consiste en hacer una revisión visual de la información para ver la consistencia de datos y además verificar que sea correcta. Para este trabajo debido a la poca experiencia que se tiene en modelación, se llevo a cabo durante la calibración del modelo lo que hace que la calibración sea más tediosa y tardada.

Para una revisión rápida de la consistencia de datos meteorológicos de este trabajo se utilizó la técnica de curva masas dobles de cada estación para verificar que la información sea correcta. Los detalles se verán en la calibración del modelo.

4.3. Series de datos hidrológicos

A las series de datos hidrológicos corresponden a los registros históricos de caudales a régimen natural de las estaciones que se eligieron para la calibración del modelo, al igual los registros históricos de niveles piezométricos, las entradas y salidas de embalses que existan en la zona, las extracciones subterráneas en las unidades de demanda agrícola y de los municipios, o en su defecto extracciones de agua agrícola y urbana de las masas de agua subterránea, las dotaciones netas y brutas de las unidades de demanda agrícola o en su defecto retornos de agua a las masas de agua subterránea.

En el caso de este trabajo la calibración se llevó a cabo exclusivamente con las series de datos hidrológicos de los registros históricos de caudales a régimen natural, ya que se carecen de datos de piezometría y de entradas y salidas a embalses, por lo que nos limitaremos al uso de este tipo de información.

Para adaptar la información de registros históricos de caudales a régimen natural se ordenó la información disponible igual que las precipitaciones en un año hidrológico como se muestra en la tabla 4-27 para este caso no hace falta la ubicación ya que solo servirán para construir los gráficos de calibración. Una sería para las series anuales y otra para las mensuales, la más común es la mensual para la calibración.

Estacion Hidrometrica Chiquito Original (en miles de m3).													
AÑO/MES	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	Anual
1927-28	4667	1	0	0	0	0	0	0	0	845	1995	4273	11781
1928-29	3182	711	0		0	0	0	0	1	2427	4173	6012	16506
1929-30	235	98	0			0							333
1930-31				0	0	0	0	0	1022	6472	10930	7307	25731
1931-32	2105	828	752	568	0	0	0	0	0	980	1713	3291	10237
1932-33	2120	245	0	0	0	0	0	0	134	550	4445	5588	13082
1933-34	1331	0	0	0	0	0	0	0	595	1592	4021	9205	16744
1934-35	2002	0	0	0	0	0	0	0	3277	6074	9683	10941	31977

Tabla 4-27. Orden de los registros de caudales históricos a régimen natural para el modelo PATRICAL.

En el caso de las series de caudales no importa el orden en que estén, ya que el modelo da resultados en columnas (como se muestra en los anexos de resultados) de cada punto que se haya seleccionado, ya para hacer los gráficos estos datos se ordenarán en ese mismo formato. Como ejemplo del acomodo de los datos se tiene la tabla 4-28.

Mes-año	Afo_hm3	Modelado	Modelado	Modelado
Oct-1941	3.796	0.09	0	0.09
Nov-1941	0.466	0	0	0
Dic-1941	0	0	0	0
Ene-1942	0	0	0	0
Feb-1942	0	0	0	0
Mar-1942	0	0	0	0
Abr-1942	0	0	0	0
May-1942	0	0	0	0
Jun-1942	0.55	0.07	0	0.04
Jul-1942	1.577	4.16	0.58	3.95
Ago-1942	2.859	5.03	0.89	4.69
Sep-1942	3.001	1.97	0.52	1.59
Oct-1942	0.927	1.15	0.38	0.78
Nov-1942	0.005	0.72	0.27	0.44
Dic-1942	0.022	0.53	0.2	0.3
Ene-1943	0.109	0.4	0.15	0.2
Feb-1943	0.019	0.31	0.12	0.12
Mar-1943	0	0.22	0.09	0.06
Abr-1943	0	0.13	0.05	0.03
May-1943	0.106	0.09	0.03	0
Jun-1943	0.459	1.08	0.18	0.96
Jul-1943	0.259	0.92	0.19	0.76
Ago-1943	1.236	2.56	0.4	2.34
Sep-1943	2.18	11.08	1.66	10.71
Oct-1943	0.548	1.46	0.49	1.05
Nov-1943	0.083	0.97	0.37	0.59
Dic-1943	0.068	0.7	0.27	0.42
Ene-1944	0.058	0.53	0.2	0.3
Feb-1944	0.054	0.4	0.15	0.19
Mar-1944	0.056	0.26	0.1	0.11

Tabla 4-28. Orden de los registros históricos y de los resultados del modelo PATRICAL para elaborar los gráficos.

Para este trabajo solo se trabajo con la información esencial, ya que durante el proceso de la modelación no se requiere la información de ayuda, sino hasta la fase de calibración donde se requieren los registros históricos de caudales aforados en los puntos de control que se tengan, además de que únicamente se modelo a régimen natural por falta de información para modelar a régimen alterado.

CAPÍTULO V

Calibración

5. Calibración

La calibración es la etapa del proceso de modelización que obliga a que el funcionamiento del modelo matemático reproduzca en mayor o en menor grado a la historia del sistema real. Asegurando que todos los datos disponibles (variables y parámetros) son cualitativa y cuantitativamente compatibles. Además de ello, la calibración suele utilizarse para dar valores numéricos a aquellos parámetros sobre los que se dispone de pocos o ningún dato. Aún en el caso hipotético de tener datos sobre todos los parámetros del modelo, no es conveniente proceder a la simulación sin haber calibrado el modelo, **ya que sería difícil, sino imposible**, determinar la fiabilidad de los resultados.

5.1. Parámetros de calibración

Para el modelo PATRICAL se tienen solo cuatro parámetros a calibrar, los cuales se listan a continuación:

- 1) H_{max} = Máxima capacidad de humedad en el suelo (mm).
- 2) I_{max} = Máxima capacidad de infiltración al acuífero (mm).
- 3) α = Coeficiente de descarga de los acuíferos.
- 4) c = Coeficiente adimensional de excedente.

De estos parámetros, los mapas de los dos primeros son distribuidos, presentando, en general, valores distintos en cada una de las celdas, según la litología y el uso que tenga el terreno. El mapa del parámetro " α ", coeficiente de descarga de los acuíferos, se encuentra agregado para cada una de las distintas unidades hidrogeológicas, de forma que todas las celdas de una misma unidad hidrogeológica presentan el mismo valor, y que es distinto para cada una de estas unidades.

Del parámetro de H_{max} depende la distribución entre el volumen de agua que globalmente se evapora, y el volumen que finalmente se convierte en aportación, ya sea superficial o subterránea, de forma que este parámetro ajusta la aportación anual en la cuenca. Para valores más elevados de H_{max} se produce mayor evaporación y, por lo tanto menores aportaciones en la cuenca. De igual forma, para valores más bajos de H_{max} se produce menor evaporación y mayor aportación total en la cuenca. Tradicionalmente, los modelos hidrológicos agregados asignaban este valor entre un rango de 100 mm y 300 mm, sin que estos valores tuviesen una relación directa con la realidad física del terreno.

La capacidad máxima de almacenamiento hídrico del suelo en la zona no saturada H_{max} , depende fuertemente del fenómeno de la percolación, es decir, del movimiento del agua dentro del perfil del suelo, debido a la porosidad, pendiente del terreno, etc. Este parámetro H_{max} también depende de las características que

definen la capacidad de campo (C_c), que coincide con la humedad que posee el terreno cuando todos sus poros finos se encuentran saturados, mientras los poros gruesos se encuentran vacíos, lo que indica que nos encontramos en un punto intermedio entre la humedad de saturación y la humedad nula. Así, el agua que llena los poros gruesos está sometida fundamentalmente a la fuerza de la gravedad, por lo que esta agua se infiltrará, pasando a la zona saturada del terreno (acuífero), y quedándose únicamente el agua retenida en los poros finos del terreno, que está retenida por fuerzas de origen capilar (por encima de 0.05 atm).

La infiltración consiste en la percolación del agua de la zona superior del suelo hacia el acuífero. Así, las variables más importantes de las que depende la infiltración son, las características de los suelos, la intensidad de la lluvia, el perfil de humedad, etc.

En este modelo el parámetro de I_{max} regula la velocidad máxima de paso del agua de la superficie al acuífero, acotando la infiltración máxima que se puede producir en un mes. Esta infiltración sólo se produce con valores muy altos del excedente. Los valores que adopte el parámetro de I_{max} van a depender de las características físicas que posea el terreno, como su litología, sus características edafológicas, etc.

El parámetro " α " de descarga del acuífero expresa la proporcionalidad entre los volúmenes almacenados en el acuífero y los caudales desaguados hacia la red de drenaje.

El agotamiento de un acuífero responde a una ley exponencial, que se obtiene al asumir la hipótesis de linealidad entre volumen almacenado y caudal desaguado del acuífero en cada instante de tiempo (López 1981).

$$Q_{acuifero\ k} = \alpha_{acuif\ k} \cdot \sum_{i,j}^{V_{ij,t}} = \alpha_{acuif\ k} \cdot V_t^{acuif\ k}$$

Debido a que la modelización del flujo de agua subterránea se ha realizado de forma agregada en cada una de las masas de agua subterráneas, el parámetro α de descarga del acuífero, tiene un único valor para cada una de las masas de agua subterránea, dependiendo este parámetro de las transmisividades y coeficientes de almacenamiento del acuífero y de las dimensiones del mismo. Este parámetro " α " es estimado para cada uno de los acuíferos de forma agregada, a partir de las ramas de descargas de los caudales registrados durante los periodos secos en los puntos de contraste de caudales. El último parámetro que es el coeficiente de excedente " c " se ha considerado constante en diversos trabajos, por lo que para el modelo PATRICAL se manejara como constante.

5.2. Procedimiento de calibración

Dentro las etapas de implementación de un modelo hidrológico, tiene lugar la calibración del modelo, que como se ha mencionado puede ser manual por métodos visuales o automática dependiendo del modelo que se trate. Para este trabajo se hace de forma manual por métodos visuales, de los cuales se tiene los siguientes:

- 1) Grafico de totales anuales.
- 2) Grafico del año medio.
- 3) Grafico de la serie de valores mensuales.

Existen otros tipos de calibración, por medio de funciones objetivo que utilizan los modelos de calibración automática o una combinación de estas con los métodos gráficos que se han mencionado.

Para el modelo PATRICAL la calibración se realiza por medio de un proceso iterativo de prueba y error, de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 5-1 que se muestra a continuación.

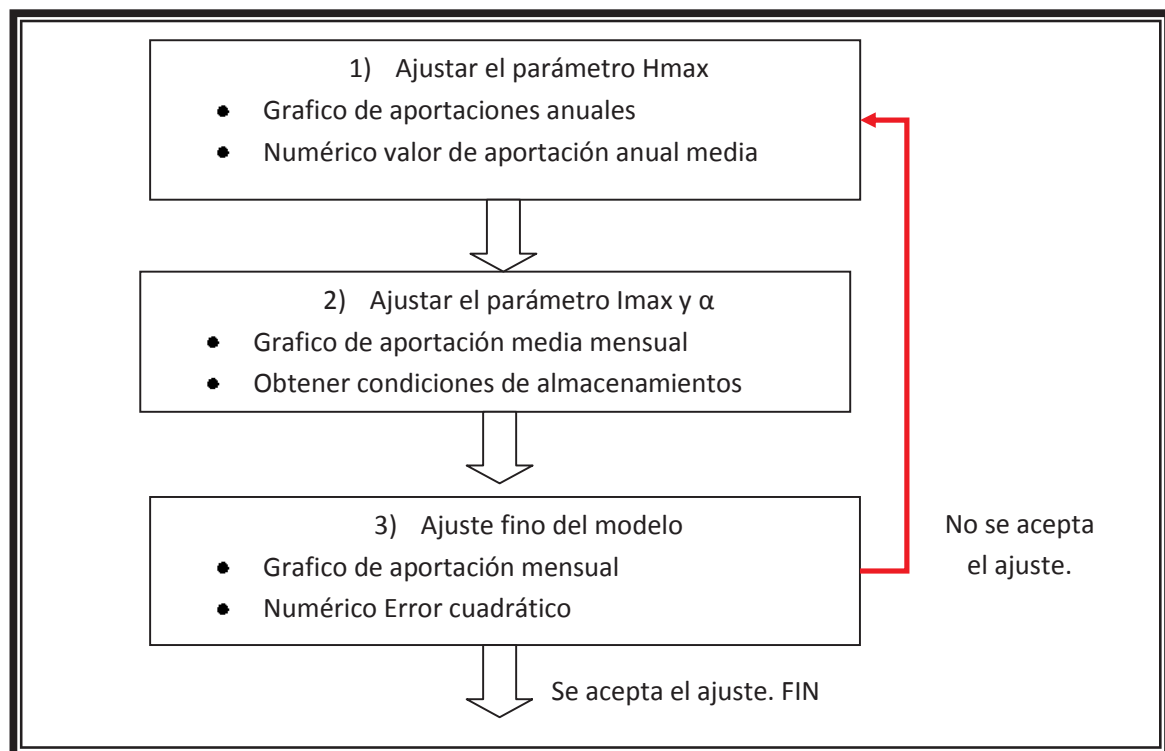


Figura 5-1 Esquema de calibración del modelo PATRICAL.

En primer lugar se recomienda ajustar el parámetro H_{max} con el grafico de anuales para el valor de aportación media anual, una vez ajustado este parámetro, se ajusta el parámetro I_{max} (infiltración máxima) y α (Coeficiente de de descarga de los acuíferos) con el grafico de aportación media mensual y obtener condiciones de almacenamientos de los acuíferos.

Para terminar el ajuste de la calibración y hacer un ajuste más fino se recomienda hacerlo con el grafico de aportación mensual calculando errores cuadráticos de cada modelación para aproximar más los parámetros. Debido a que este es un procedimiento iterativo se hará cuantas veces sea necesario hasta obtener el ajuste deseado pero que represente el sistema real.

CAPÍTULO VI

La cuenca del río Grande de Morelia

6. La cuenca del río Grande de Morelia

La cuenca del río grande de Morelia se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán entre los paralelos 19° 35' y 29° 05' de latitud norte y los meridianos 100°45' y 101° 25' de longitud oeste. Colinda con el estado de Guanajuato al norte, con el poblado de Quiroga Michoacán al occidente, con el municipio de Zinapécuaro al oriente y al sur con la sierra alta y mil cumbres. Tiene una extensión de 1200 Km² aproximadamente. Las elevaciones de la zona van los 1920 msnm en la parte baja a los 2500 msnm en la parte alta de la cuenca. La altitud media del valle es de 2200 msnm aproximadamente.

El Río Grande nace en la parte sureste de Acuitzio, tiene un trayecto de 26.0 km con rumbo norte (21°) hasta Morelia. Su principal afluente es el Río Chiquito que confluye con el Río Grande en la parte oeste de la ciudad de Morelia. El Río Grande atraviesa la ciudad de Morelia y desemboca en el lago de Cuitzeo. Los principales escurrimientos que alimentan al Río Grande son el Arroyo de Lagunillas, los arroyos de Tirio y de la Barranca de San Pedro.

La subcuenca cuenta con una disponibilidad de recursos hídricos del orden de 755 millones de metros cúbicos, constituidos por un 68% de recursos superficiales (512 millones de metros cúbicos) y el 32% (243 millones de metros cúbicos) de recursos subterráneos.

El Río Grande de Morelia cruza la zona norponiente de la ciudad desembocando en el lago de Cuitzeo.

Este sistema procede del suroeste de la ciudad recibiendo las aguas residuales de la Industria CRISOBA S.A., e ingresa a la ciudad por el oeste cruzando el libramiento poniente y el Fraccionamiento Manantiales de Morelia. Así mismo se cuenta con arroyos como los de Atécuaro, del Huerto y Refugio.

Los embalses o cuerpos de agua cercanos son la Presa de Loma Caliente ubicada a 22.0 km al suroeste de Morelia, Presa de Cointzio ubicada a 11.0 km al suroeste de la ciudad, Presa la Mintzita ubicada a 8.0 km al suroeste de la ciudad y Lago de Cuitzeo ubicado a 39.0 km al norte de la ciudad.

El arroyo Los Pirules es también otra corriente superficial de importancia y se localiza al oriente de la ciudad de Morelia. Este nace en una pequeña cordillera formada por los cerros Coronilla Grande y el Guajolote, así como en el puerto de Venado. El Arroyo continúa al norte por la carretera Morelia-Mil Cumbres, pasando

por el poblado Los Pirules hasta la compuerta cruzando la carretera Morelia-Charo y desembocando en el Río Grande a la altura de Atapaneo. Este arroyo tiene un área de cuenca de 13.3 km^2 y una longitud de 7.8 km, con un desnivel de 380 m y una pendiente de 4.8% con un flujo promedio de $7.96 \text{ m}^3/\text{s}$. A lo largo de su trayectoria recibe afluentes que nacen entre los cerros de Punhuato y Prieto, así como de la loma de Gallina y el cerro Colorado.

El arroyo Blanco descarga su agua al arroyo los Pirules antes de cruzar la carretera Morelia-Charo, este arroyo nace en el cerro del Punhuato. Su cuenca forman el Cerro Prieto y el Cerro Blanco, el área de la cuenca es de 2.8 km^2 , con una longitud de 4.0 km y un desnivel de 380 m, con un flujo promedio de $5.15 \text{ m}^3/\text{s}$.

La zona se ubica dentro de la provincia fisiográfica y geológica más recientemente formada en la república mexicana: el Eje Neovolcánico Transversal donde las fuerzas internas han actuado de manera preponderante sobre los agentes internos, de tal forma que se ha conformado un panorama montañoso por apilamiento de los materiales producto de la actividad volcánica intensa de esta región que atraviesa el país desde el Océano pacífico hasta el Golfo de México.

Las rocas aflorantes de la zona son basalto andesítica en su mayoría. En diferentes presentaciones como son; lavas, tobas, aglomerados, cenizas y material piroclástico sin consolidar.

El terreno es montañoso abrupto en su mayor parte, con varios estrechos donde se alojan los principales acuíferos existiendo un gran número de volcanes parcialmente aislados de forma cónica redondeado como acontece en el noreste de Morelia, donde presentan pendientes fuertes y quedan parcialmente sepultados por los depósitos cuaternarios.

La actividad tectónica también ha colaborado en la formación de los valles manifestándose los agentes internos por medio de la existencia de grandes fallas de carácter regional que controlan estos valles, como es el caso de el valle de Morelia-Querendaro.

Las características hidráulicas dependen y el comportamiento hidrogeológico de las rocas de este valle depende de su litología, estratigrafía y estructura. Por su litología, las rocas ígneas más antiguas que forman las montañas son prácticamente impermeable; sin embargo las que han sido fracturadas por movimientos tectónicos y/o alteradas por meteorización tienen permeabilidad significativa. De estas características depende uno de los parámetros del modelo

utilizado para el presente trabajo, este parámetro es la infiltración máxima (I_{max}). Las rocas basálticas se caracterizan por su porosidad elevada, su permeabilidad es alta en la mayoría de los casos y está controlada por el grado de fracturamiento, así como la presencia de tubos de flujo y juntas de enfriamiento derivadas de la actividad tectónica, las brechas volcánicas basálticas, de grano grueso, por su granulometría y disposición de los granos, que facilitan el paso del agua a través de ellas haciéndolas permeables.

En el subsuelo de los valles las rocas consolidadas, no fracturadas que se encuentran bajo el nivel regional de saturación son barreras al flujo de agua subterránea, tal es el caso de los derrames andesíticos que constituyen el basamento hidrológico de este valle de origen tectónico a profundidades de varios cientos de metros. Los derrames no fracturados intercalados en el relleno a diversas profundidades, independizan localmente los acuíferos adyacentes como es el caso de la pequeña y alargada sierra que divide a los valles de Morelia y de Álvaro Obregón–Querendaro, en la porción suroccidental de la zona. Los derrames basálticos jóvenes, de textura vesicular, fracturados e intemperizados forman un acuífero de gran importancia por su permeabilidad y porosidad.

En la cuenca predomina un clima templado con humedad media, con régimen de precipitación que oscila entre 700 a 1000 mm de precipitación anual. La temperatura media anual oscila entre los 16.2 °C en las zonas altas a 18.7 °C en las zonas más bajas.

Los registros tanto de precipitación como de temperaturas han sido registrados en estaciones climatológicas que se encuentran en la zona de estudio (Tabla6-1)

Nombre	Codigo	Altitud	Inicio	Final	Años	%	NORTE	ESTE
ACUITZIO DEL CANJE,(SMN)	16001	2070	1961-01	2003-12	43	71.3	2155973	255082
ALVARO OBREGON, (SMN)	16004	970	1964-10	1985-12	21.2	98.7	2194321	287045
CARRILLO PUERTO, A. O.	16016	2050	1969-09	2002-09	33.1	91.4	2203611	281921
COINTZIO, MORELIA	16022	1950	1940-04	2004-02	63.9	87.8	2168773	264002
CUITZILLO GRANDE,	16028	1831	1969-07	2004-02	34.7	89.7	2187047	278222
EL TEMASCAL, CHARO	16045	1686	1965-01	2003-06	38.5	95.3	2177714	286846
ETUCUARO, MADERO (SMN)	16049	1612	1944-06	1988-09	44.3	90.9	2146409	281221
JESUS DEL MONTE, MORELIA	16055	1250	1935-11	2004-01	68.3	94.3	2175975	278084
MORELIA, MORELIA (DGE)	16081	1915	1947-05	1986-12	39.7	99.2	2179754	271139
PLANTA BOMBEO A.ZINZIMEO	16091	344	1966-10	2004-02	37.4	90.9	2199794	292348
PSA. MALPAIS, QUERENDARO	16096	1831	1940-12	2003-12	63.1	75.1	2184913	302657
QUIRIO, INDAPARAPEO	16105	1830	1963-06	2004-03	40.8	90.3	2190568	292240
S.MIGUEL DEL MONTE, MOR.	16114	2000	1963-12	2004-02	40.3	74.1	2170461	276267

SAN SEBASTIAN, QUERENDARO	16116	2070	1969-07	1991-12	22.5	99.8	2192372	295754
SANTIAGO UNDAMEO, MORELIA	16120	2000	1953-12	2004-02	50.3	90.1	2168843	258756
TZITZIO, TZITZIO	16136	1850	1969-01	2003-06	34.5	71.1	2166501	298955
COPANDARO, JIMENEZ	16155	1981	1969-11	2001-12	32.2	96.1	2205456	281944
CAPULA, MORELIA	16247	1708	1981-07	2003-12	22.5	57.8	2176345	250114
HUANDACARO, CUITZEO	16250	2285	1982-07	2004-03	21.8	69.1	2192787	262574

Tabla 6-1. Estaciones climatológicas de la cuenca del río grande de Morelia.

De las estaciones que se presentan en la tabla 6-1, la que más años de registro tiene es la estación 16055 de la localidad de Jesús del Monte la cual sirve como base para llevar a cabo la modelación, ya que el periodo debe de ser continuo para que el modelo pueda llevar a cabo la modelación completa. La gráfica de la Figura 6-2 muestra la precipitación anual acumulada de la estación mencionada.

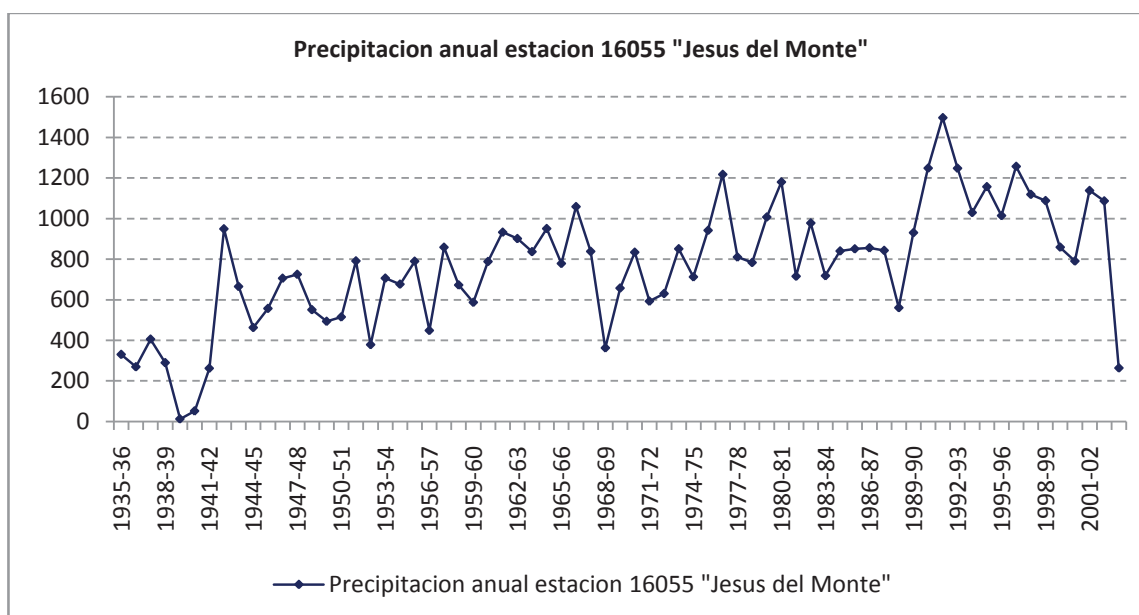


Figura 6-2. Precipitación anual acumulada de la estación 16055 de la localidad de Jesús del Monte

La cuenca cuenta con 12 estaciones hidrométricas de registro de caudales de las cuales solo tres se utilizarán en la fase de calibración del modelo PATRICAL. Las estaciones se muestran en la Tabla 6-3 donde se marcan en negritas las estaciones que se utilizarán en el presente trabajo.

Estación	Lat grad	Lat min	Lat seg	Long grad	Long min	Long seg
Cointzio	19	38	30	101	15	30
Atapaneo	19	43	30	101	10	35
Salida Túnel	19	38	0	101	15	33
Santiago Undameo	19	36	5	101	17	17
El Salto	19	38	15	101	15	35
El Plan	19	49	10	101	0	40
Rio Chiquito	19	41	45	101	11	25
Monterrubio	19	39	15	101	14	20
San Bartolo	19	48	55	100	0	40
Zacapendo	19	48	55	100	0	15
Cointzio	19	38	15	100	15	25
Joconales	19	48	7	101	0	30

Tabla 6-3. Estaciones hidrométricas de la cuenca del río grande de Morelia.

6.1. Antecedentes de la gestión de la cuenca

La gestión de la cuenca del río grande de Morelia se realiza partiendo de la presa Cointzio. El análisis realizado por la comisión nacional del agua utilizando para este análisis el software *Optima* con este modelo y los registros históricos de las aportaciones y con las demandas requeridas por los usuarios del recurso se hace un análisis. Obteniendo una grafica con las curvas de evolución del almacenamiento para diferentes probabilidades de ingreso con las que se determinan las reglas de operación del embalse; que posteriormente serán enviadas al distrito de riego 020 Morelia Querendaro para su aplicación.

El distrito de riego No. 20 Morelia-Querendaro está integrado por 5 módulos de riego, de los cuales la cuenca del río grande de Morelia suministra 4 que se listan a continuación:

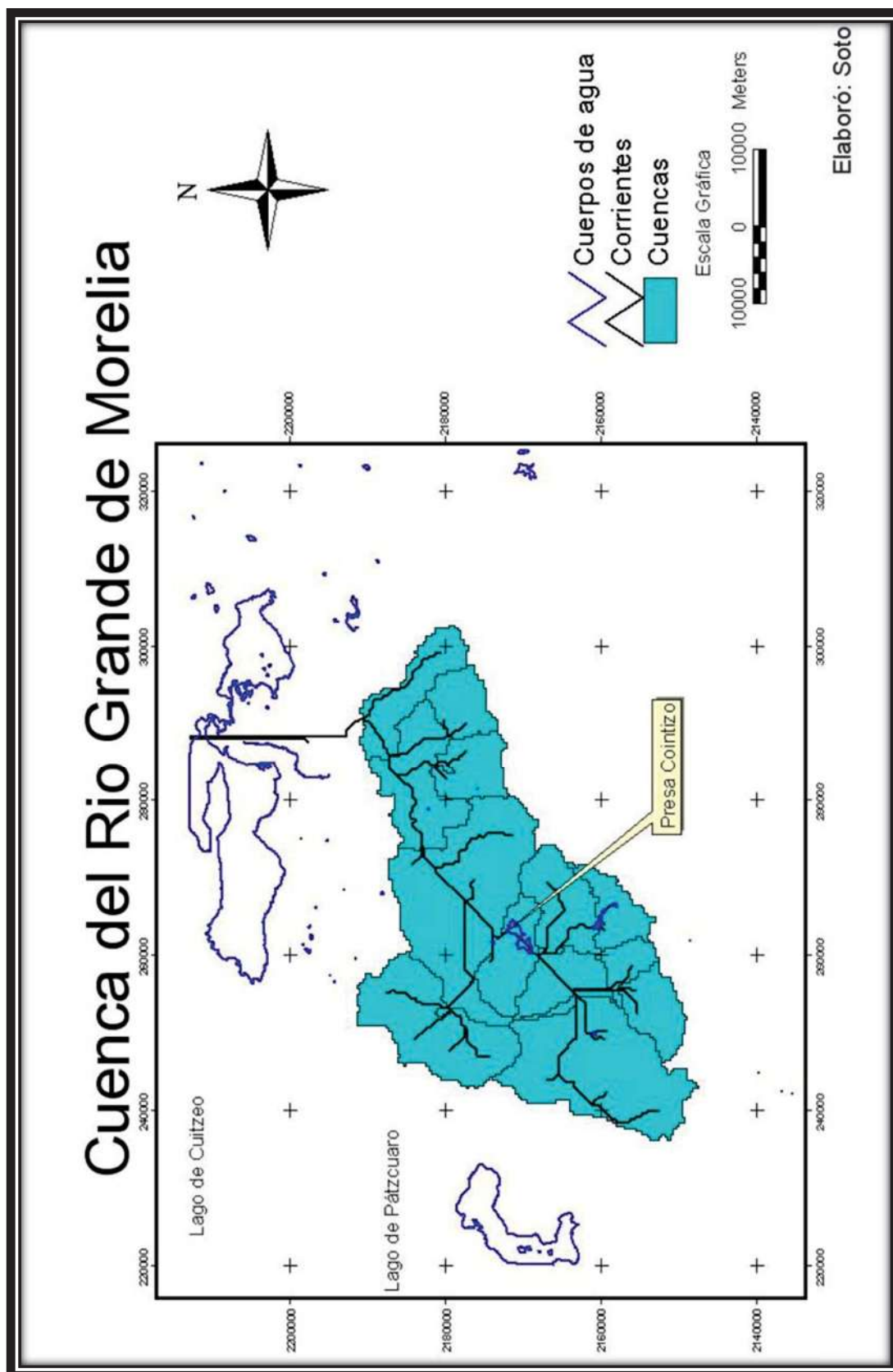
- 1) Asociación de Usuarios de Aguas de Morelia A. C. (Modulo I)
- 2) Asociación de Usuarios del Río Grande de Morelia A. C. (Modelo II)
- 3) Asociación de Agriculturas del Valle de Álvaro Obregón-Tirimbaro A. C. (Modulo III)
- 4) Asociación de Usuarios del canal de Zacapendo A. C. (Modulo IV)

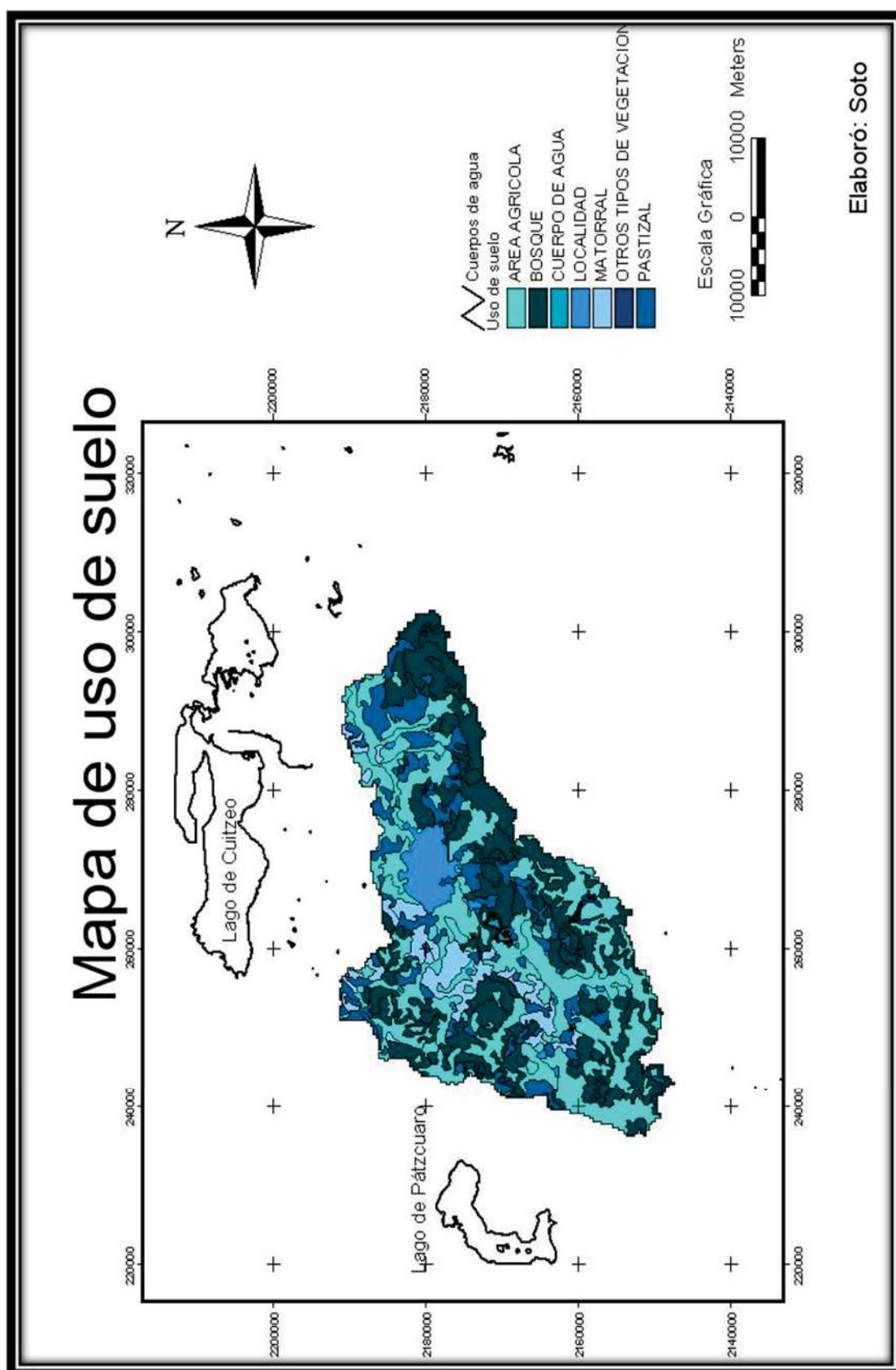
El suministro del recurso es mediante la infraestructura hidráulica localizado a lo largo del río grande de Morelia que operan dichas asociaciones, la infraestructura consta de presas derivadoras y canales de conducción que controlan los caudales suministrados a cada uno de los módulos.

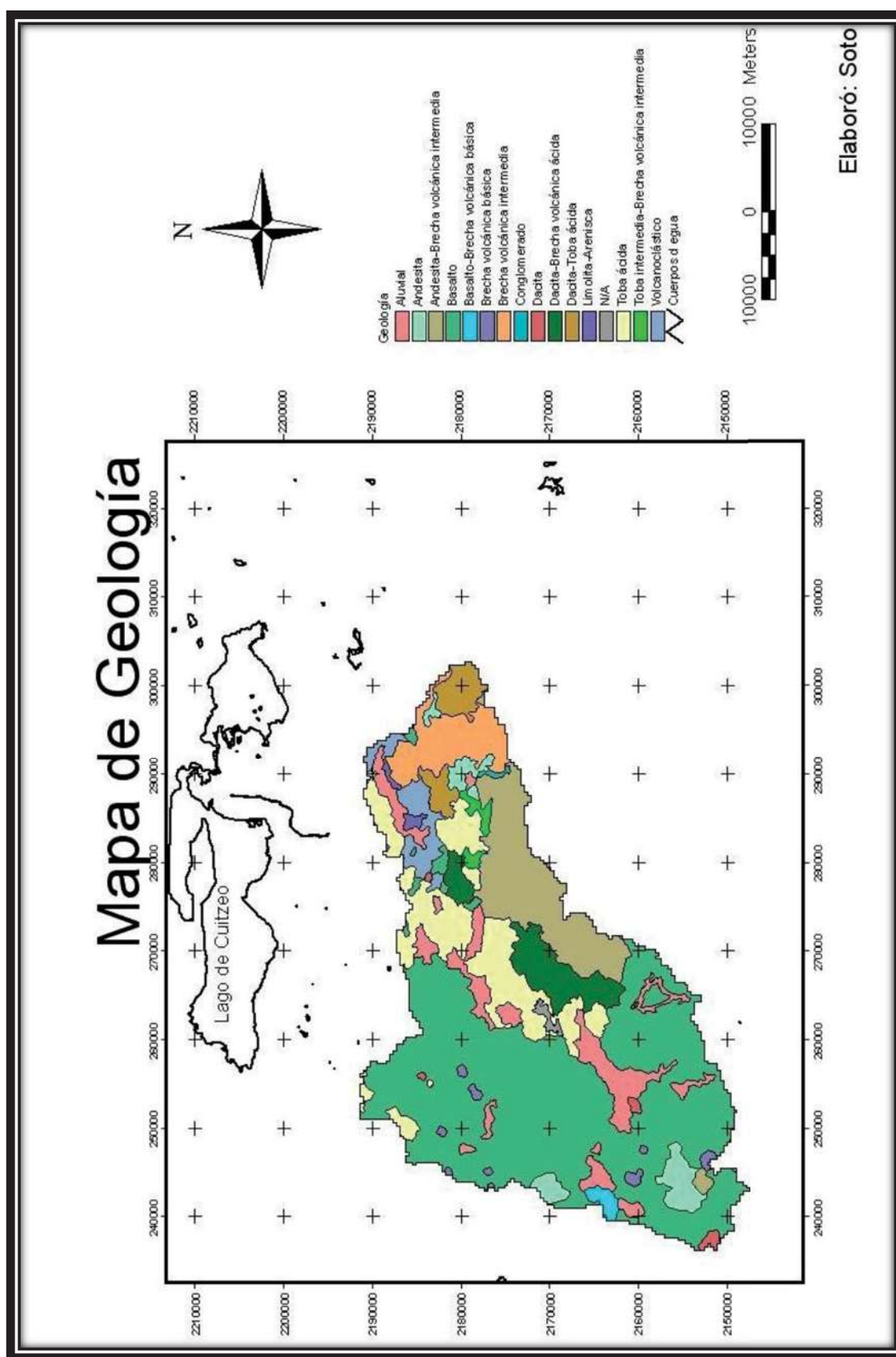
6.2. Información del modelo de la cuenca

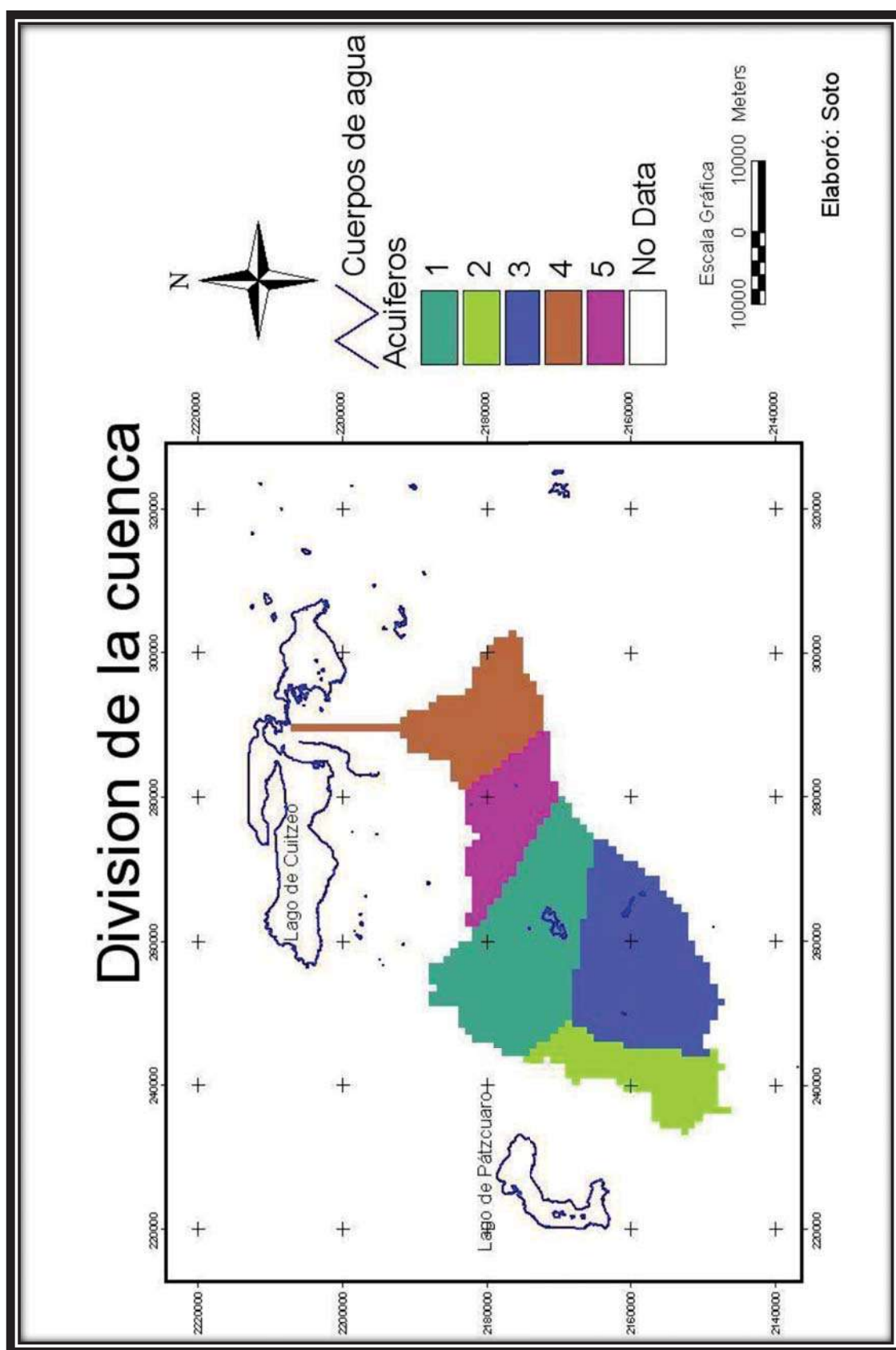
Es indispensable contar con la máxima cantidad de información disponible de la cuenca o de la región de estudio, con el fin de obtener los mejores resultados. Además debe de ser información fiable, lo que ayudará al momento de hacer la calibración del modelo y nos sirve para ajustar lo más posible los resultados del modelo a la realidad. De acuerdo a la información que requiere en el modelo y a la información disponible se cuenta con los siguientes mapas:

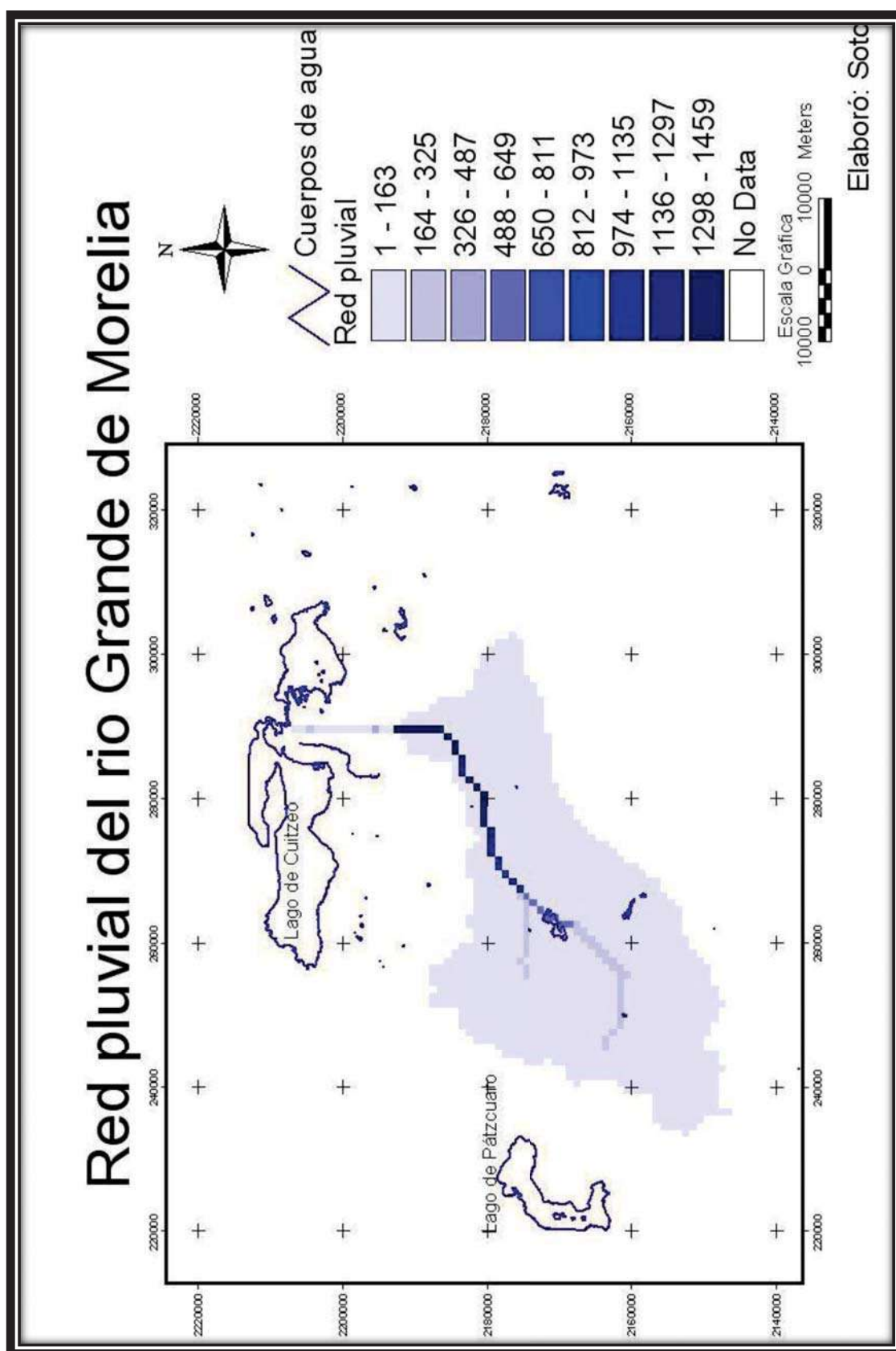
1. Mapa del la cuenca del río Grande de Morelia.
2. Mapa de uso de suelo.
3. Mapa de Geología.
4. Mapa de división de acuíferos.
5. Mapa de la red fluvial.
6. Mapa del acuífero Morelia-Querendaro.
7. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas.

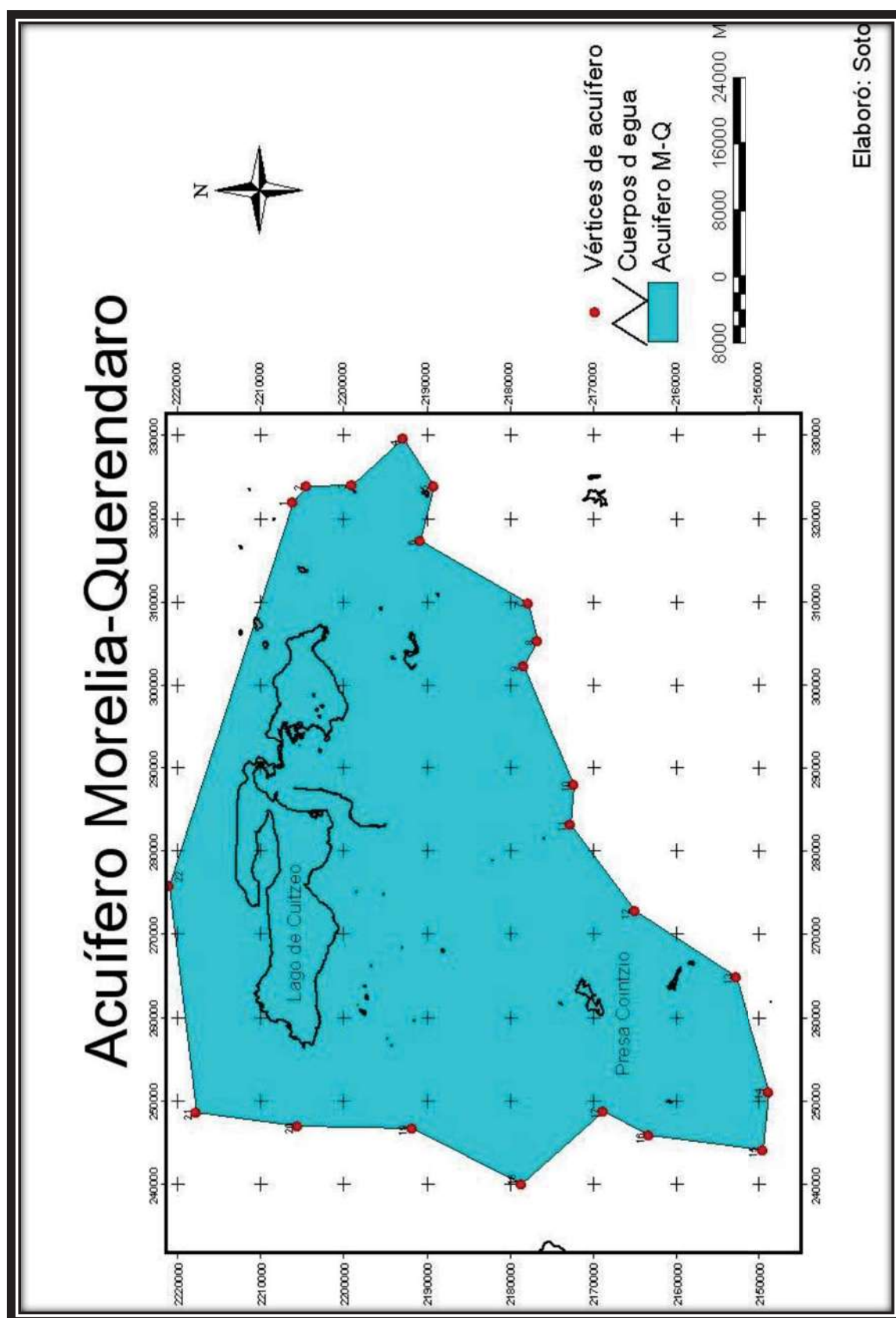


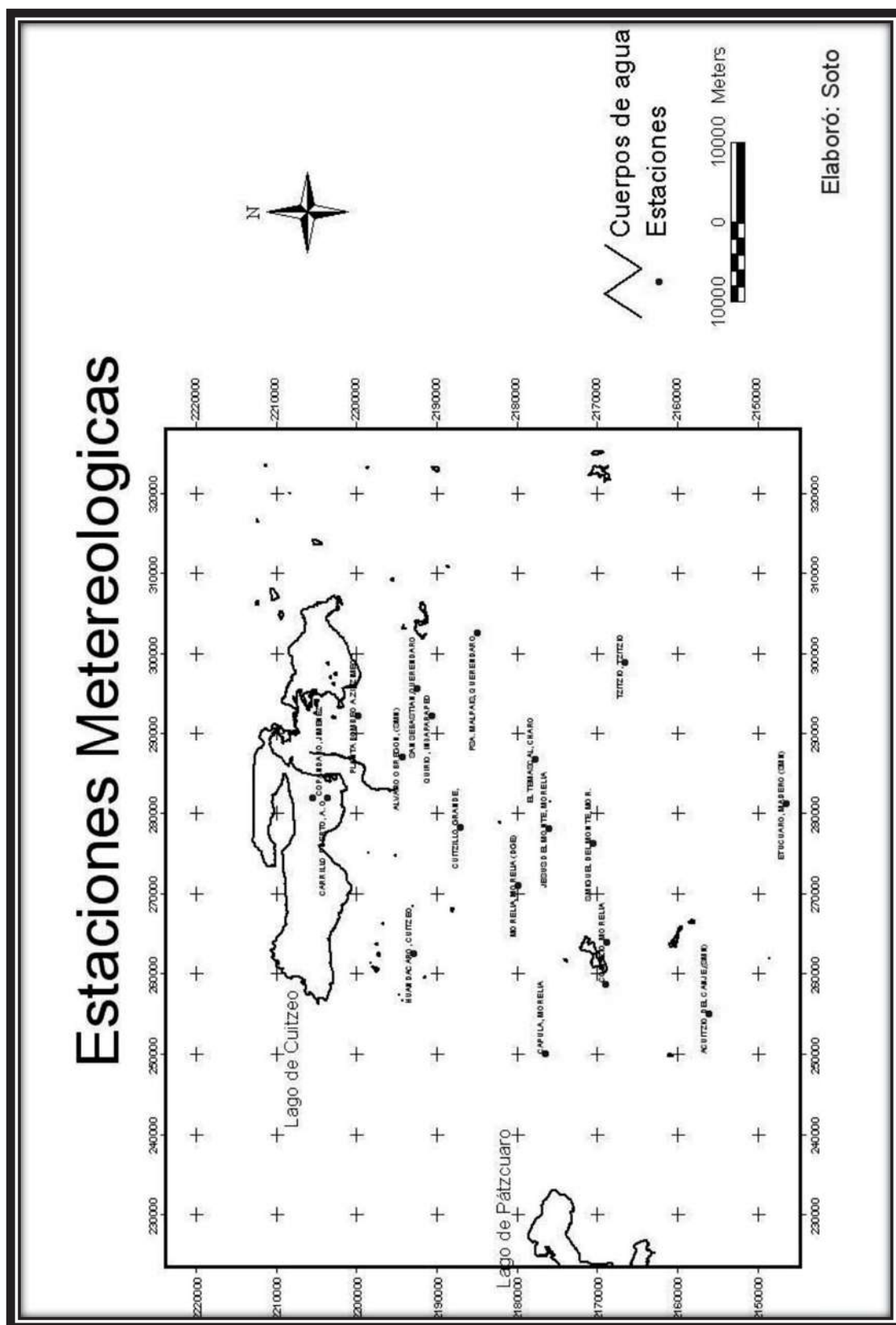












6.3. Calibración del modelo

Para este trabajo se realizó la calibración por medio de un proceso iterativo, de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 5-1.

Debido a que es un modelo sencillo el ajuste es de solo cuatro parámetros. Sin embargo la calibración se torna complicada si la información no ha tenido un tratamiento de consistencia de datos, ya que aunque los parámetros estén bien calibrados si la información no es correcta el ajuste nunca terminará. Para este caso no se había realizado la consistencia de los datos de precipitación por lo que las primeras modelaciones arrojaron resultados muy incoherentes con respecto a los registros históricos que se tienen de las estaciones hidrométricas, por lo cual para que la calibración sea más rápida se llevó a cabo la consistencia de datos que se verá a continuación.

6.3.1. Análisis de la consistencia de datos

El análisis de la información es uno de los aspectos más relevantes al realizar una simulación de algún fenómeno natural, y sin el cual, difícilmente podrá llevarse a cabo, ya que esta juega el papel más importante en los trabajos, por lo tanto es de suma importancia hacer un análisis crítico de la información, ya que la calidad de los resultados depende exclusivamente de la certeza de los datos, por lo que cualquier alteración de la información se visualizará en los resultados que se obtengan, sin embargo si la información no es la correcta se podrá analizar dicha información y repetir la modelación ya con los ajustes realizados.

Para el caso de este trabajo, se adecuó la información en el formato requerido por el modelo PATRICAL, como es el caso de los registros de precipitaciones y temperaturas mensuales de las estaciones que se muestran en la Figura 6-1, de las cuales se muestra su distribución en el mapa de la Figura 6-4, con lo cual se llevaron a cabo las primeras simulaciones a régimen natural, las cuales nos permiten hacer una comparación con los registros históricos de las estaciones hidrométricas que se tienen dentro del área de estudio.

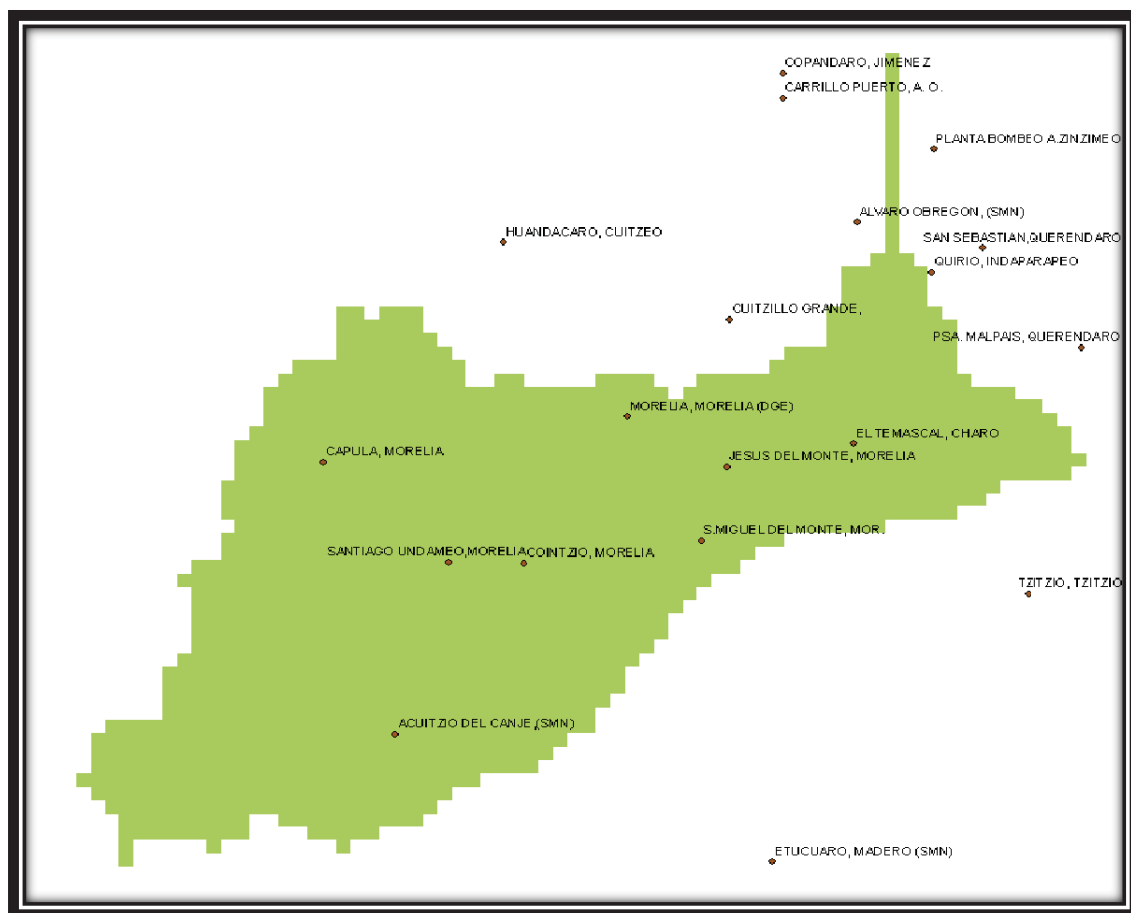


Figura 6-4. Mapa de estaciones meteorológicas de la cuenca del río Grande de Morelia.

Con estos primeros resultados de caudales calculados por el modelo, y haciendo una comparación de los gráficos de los registros históricos contra los modelados, se notaron variaciones muy grandes de los gastos, lo que obliga a hacer un análisis más cuidadoso de la información, para detectar posibles errores, y corregirlos o en su caso eliminar los registros de precipitación histórica que tengan una variación muy significativa con respecto a la media de las demás estaciones. Este análisis debe ser muy detallado, ya que al encontrar datos que no correspondan con la información correcta, se debe de eliminar toda la información de la estación meteorológica con registros erróneos, esto nos obliga a perder toda la información la estación que se trate.

Lo anterior se detecto haciendo una revisión visual de los gráficos resultado de la modelación, como se observa en la figura 6-5, donde se tiene picos que no dependen de los parámetros de la calibración, sino de que algún dato no es correcto en la base de datos que se tiene de precipitaciones.

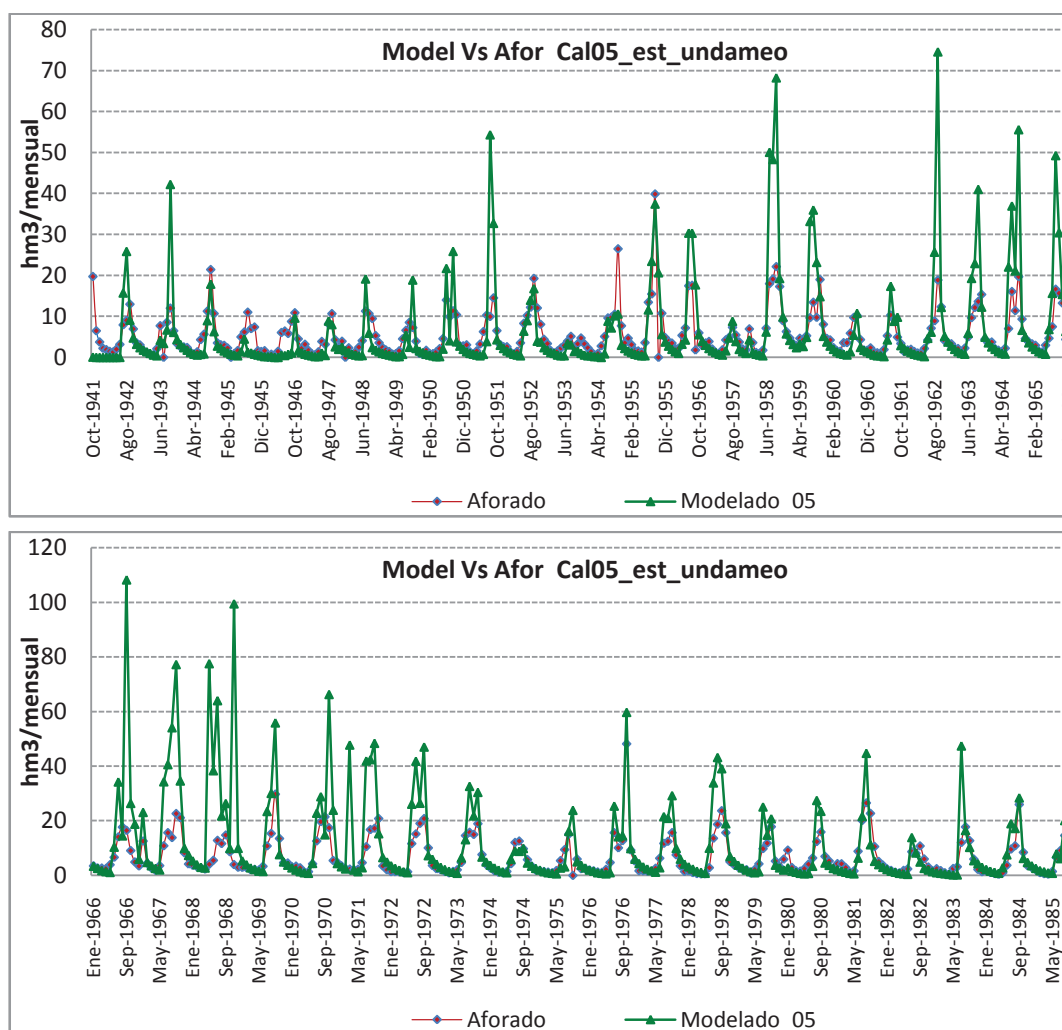


Figura 6-5 Comparación de caudales a régimen natural del modelo contra los registros aforados en las estaciones hidrométricas.

En las graficas anteriores es fácil detectar que meses tienen datos no son acorde a la realidad, por lo que detectar los errores es muy sencillo, ya que se nota claramente en que meses los datos no homogéneos, es decir corresponden a la realidad, pero para una mejor revisión se recomienda realizar alguna técnica de consistencia de datos, para este caso se verificaran los datos con la técnica de la curva masa doble, además de verificar la media con respecto a todas las estaciones que estén incluidas.

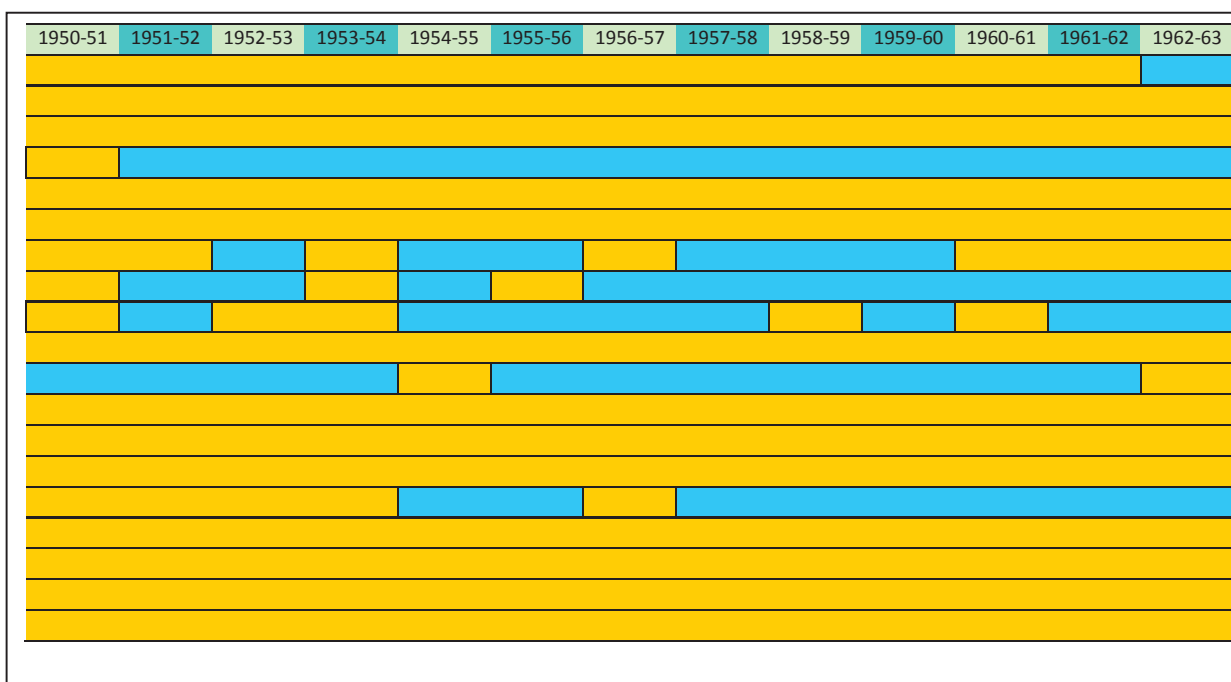
a) Consistencia de datos de precipitaciones

De acuerdo a los resultados de las primeras modelaciones se opto por verificar la consistencia de datos para ver qué datos están fuera de rango y corregirlos en caso necesario o descartarlos de la base de datos que se tiene.

La primera opción para este proceso se propuso hacer un cronograma para verificar que estaciones tienen información registrada para cada año (Tabla 6-6) y una comparación de las precipitaciones acumuladas medias anuales de cada estación (Tabla 6-9) para hacer una comparación con las medias anuales de todas las estaciones involucradas, y por medio de esta verificar que estaciones tienen datos muy desplazados de la media de todas las estaciones.

De acuerdo al análisis de los datos, se detectaron dos estaciones recientes que tienen registros muy variantes respecto a las demás estaciones que se encuentran a su alrededor, dichas estaciones son la estación 16045 de la localidad de El Temascal, Charo, con ubicación en las coordenadas $y=2177713.913$ y $x=286845.781$, así como también la estación 16114 de la localidad de San Miguel del Monte, Morelia con ubicación en las coordenadas $y=2170461.372$ y $x=276266.644$ ambas de la zona 14.

Nombre	Código	1942-43	1943-44	1944-45	1945-46	1946-47	1947-48	1948-49	1949-50
ACUITZIO DEL CANJE,(SMN)	16001								
ALVARO OBREGON, (SMN)	16004								
CARRILLO PUERTO, A. O.	16016								
COINTZIO, MORELIA	16022								
CUITZILLO GRANDE,	16028								
EL TEMASCAL, CHARO	16045								
ETUCUARO, MADERO (SMN)	16049								
JESUS DEL MONTE, MORELIA	16055								
MORELIA, MORELIA (DGE)	16081								
PLANTA BOMBEO A.ZINZIMEO	16091								
PSA. MALPAIS, QUERENDARO	16096								
QUIRIO, INDAPARAPEO	16105								
S.MIGUEL DEL MONTE, MOR.	16114								
SAN SEBASTIAN,QUERENDARO	16116								
SANTIAGO UNDAMEO,MORELIA	16120								
TZITZIO, TZITZIO	16136								
COPANDARO, JIMENEZ	16155								
CAPULA, MORELIA	16247								
HUANDACARO, CUITZEO	16250								



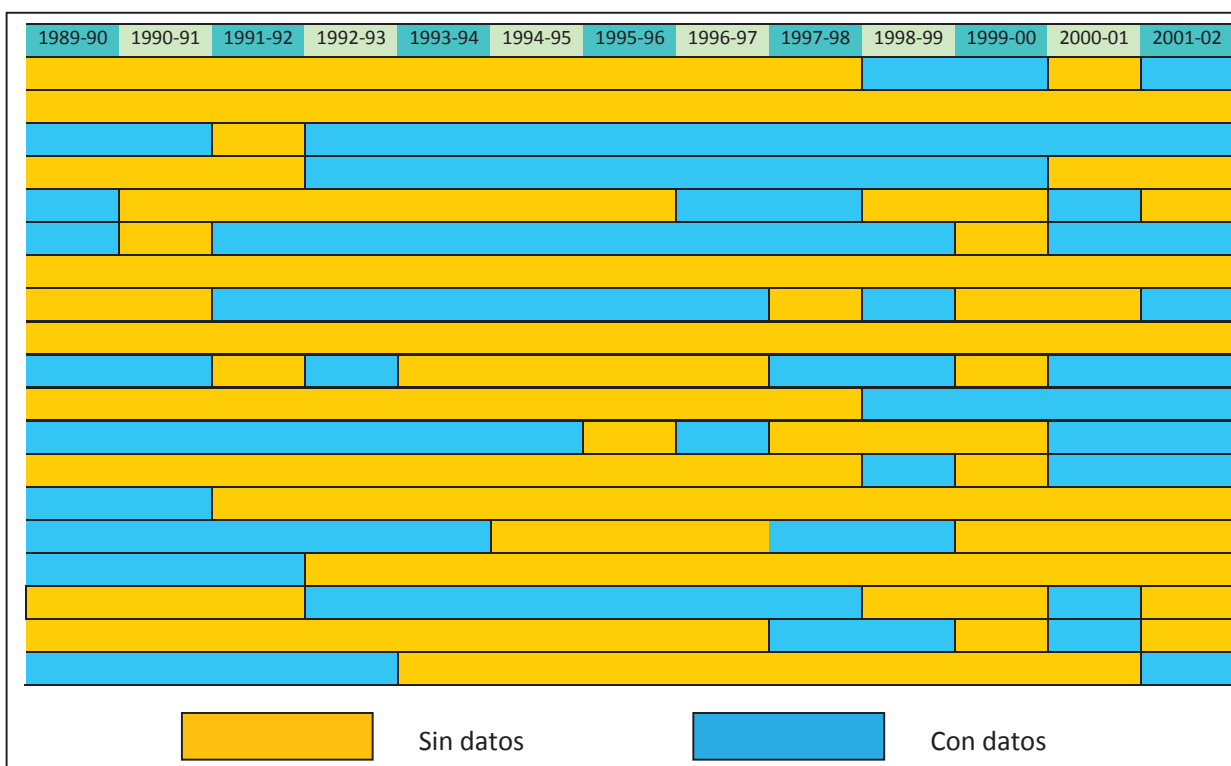


Tabla 6-6. Cronograma de estaciones con y sin registro de datos de precipitación.

Para verificar mejor la consistencia de los datos de las estaciones anteriores también se realizó una curva masa para hacer una comparación de todas las estaciones donde de igual forma se ve que las curvas de las estaciones anteriores tienen una fuerte pendiente con respecto a las demás curvas de las demás estaciones, como se puede observar en la Figura 6-7 lo cual indica que estas estaciones registraron mayor precipitación que las que están ubicadas a su alrededor, lo que no puede ser posible ya que la lamina de precipitación tiene una variación muy ligera en una zona como la que estamos analizando, por tener un área relativamente pequeña.

Debido a lo anterior se optó por eliminar dichas estaciones, ya que estos valores registrados por estas estaciones tienen una variación muy grande con respecto a las estaciones circundantes y que por su ubicación deberían tener registros similares a la estación 16055 de la localidad de Jesús del Monte, Morelia, que es la más próxima y con mas registros de la zona, además el tipo de clima que se tiene en la región no es acorde a los datos registrados, por lo cual se deduce que pueden ser errores que se comenten al cargar la información a las bases de datos.

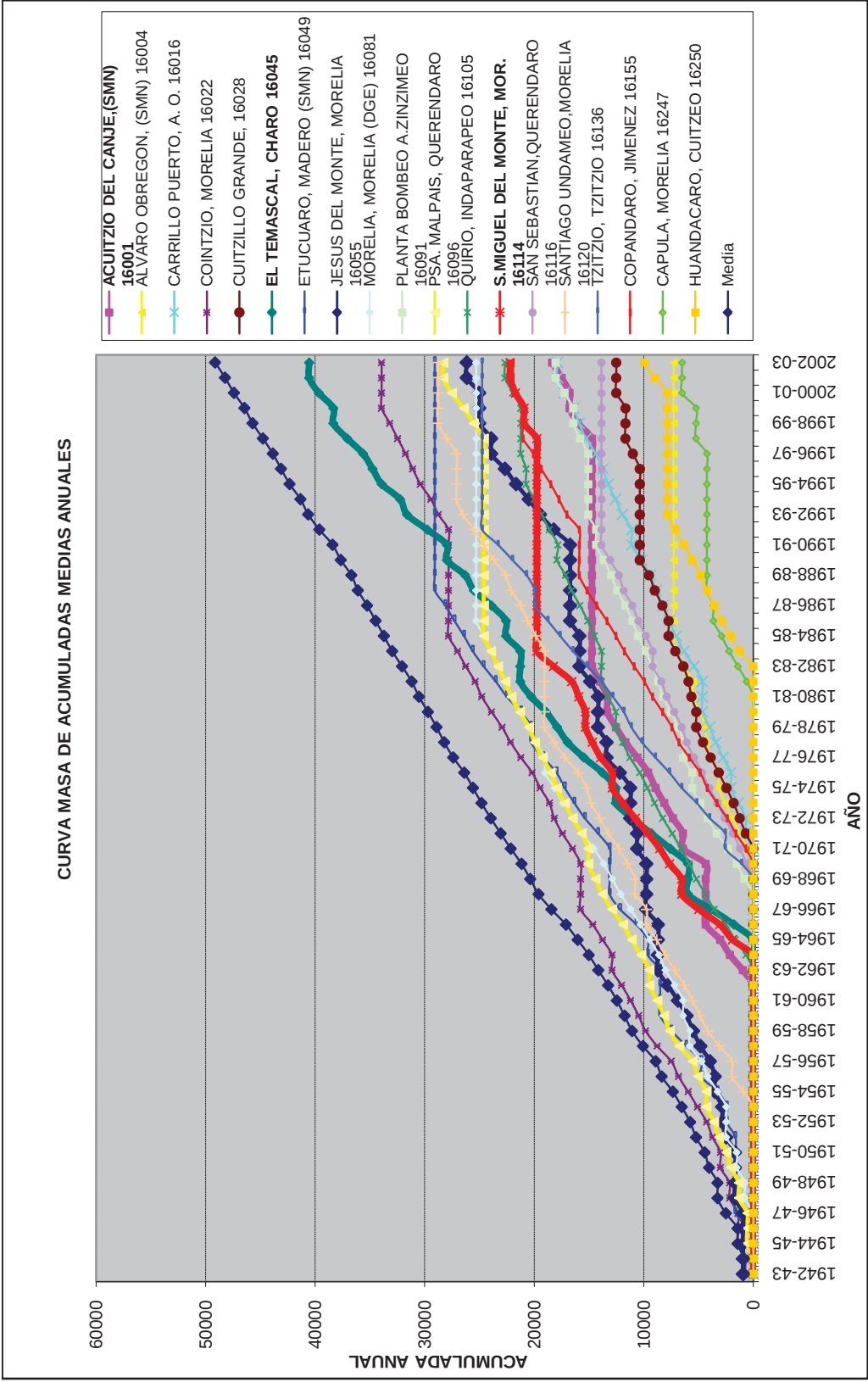


Figura 6-7. Curva masa de las estaciones de la cuenca del río grande de Morelia.

En la grafica de la figura 6-7 se muestran las líneas remarcadas de las estaciones que se eliminaron, y que tienen datos erróneos no permiten el ajuste del modelo. Una vez que se detectaron las estaciones también se realizo la curva masa doble para ver para ver que periodos de tiempo los datos no son homogéneos. Esto se puede observar en las graficas de la Figura 6-8.

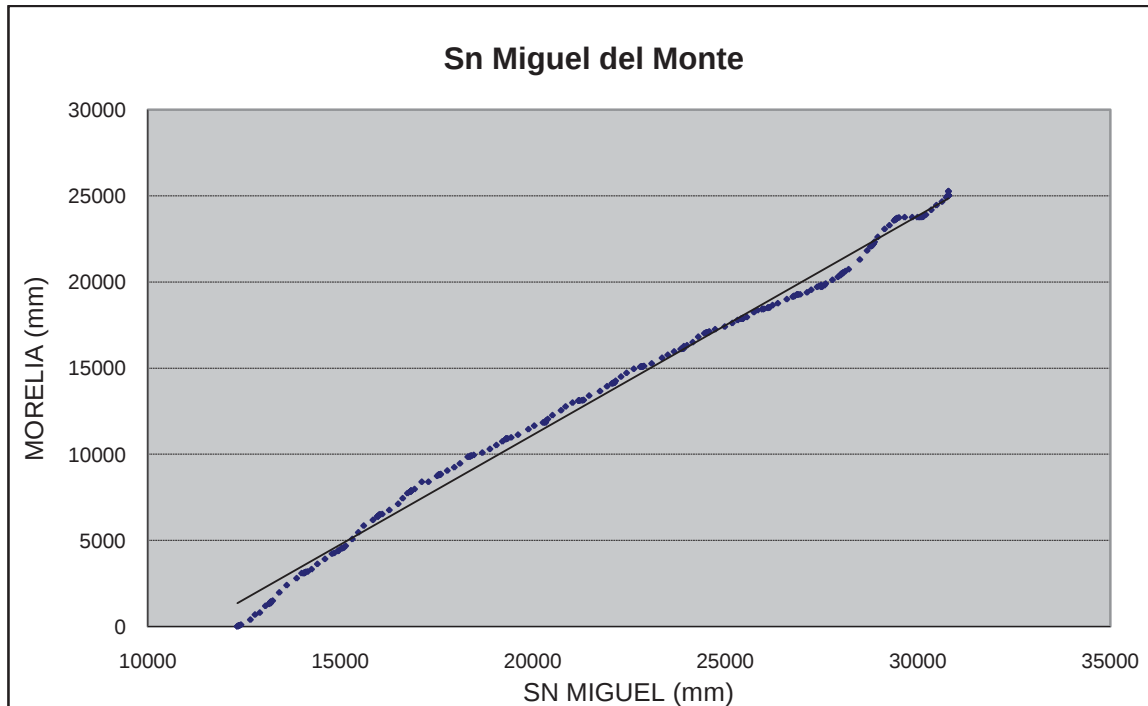


Figura 6-8. Curva masa doble para la estación de San Miguel del Monte.

La curva masa doble se realizó con la estación de Morelia ya que es la estación que tiene un periodo considerable de registros y que se ajusta mejor a la curva masa media de todas las estaciones. En la grafica se pueden ver los periodos en que los datos no tienen una sola tendencia, sino que tienen variación que indica que algunos datos no son homogéneos con los demás.

La curva masa doble se realizó para cada estación para verificar la información y conservar siempre la mayor cantidad de información disponible, lo que hará que los resultados de la modelación sean mejores.

Nombre	Código	1942-43	1943-44	1944-45	1945-46	1946-47	1947-48	1948-49	1949-50
ACUITZIO DEL CANJE,(SMN)	16001								
ALVARO OBREGON, (SMN)	16004								
CARRILLO PUERTO, A. O.	16016								
COINTZIO, MORELIA	16022	759.4		644.6			756.9		829.1
CUITZILLO GRANDE,	16028								
EL TEMASCAL, CHARO	16045								
ETUCUARO, MADERO (SMN)	16049			584.5		1066.1			
JESUS DEL MONTE, MORELIA	16055	949.6					725.6		
MORELIA, MORELIA (DGE)	16081						780.5		742.1
PLANTA BOMBEO A.ZINZIMEO	16091								
PSA. MALPAIS, QUERENDARO	16096			547.9			779		739.6
QUIRIO, INDAPARAPEO	16105								
S.MIGUEL DEL MONTE, MOR.	16114								
SAN SEBASTIAN,QUERENDARO	16116								
SANTIAGO UNDAMEO,MORELIA	16120								
TZITZIO, TZITZIO	16136								
COPANDARO, JIMENEZ	16155								
CAPULA, MORELIA	16247								
HUANDACARO, CUITZEO	16250								
nº_Estaciones con datos		2	0	3	0	1	4	0	3
Media=		854.50		592.33		1066.10	760.50		770.27
Desv.prom=		95.10		34.84		0.00	19.25		39.22

1950-51	1951-52	1952-53	1953-54	1954-55	1955-56	1956-57	1957-58	1958-59	1959-60	1960-61	1961-62	1962-63
												975.5
	730.6	527.3	847.4	853.3	873	673.5	1289.6	1049.1	637.6	732.5	814.4	883.5
		780.3		834.5	1507		1341	1363	1039			
	791.6	379.3		677		449.2	858.9	673.1	587.6	788.6	933	901.7
	964.2			770	903.2	567.7	1094.1		601.8		772.7	824.6
402.8	671.1	458.8	687.5		761.6	508.6	1230.4	859.3	512.7	618	721	
1	4	4	2	5	5	4	6	5	6	4	5	5
402.80	789.38	536.43	767.45	810.52	1017.38	549.75	1161.28	996.30	682.00	705.68	799.42	889.36
0.00	88.53	121.94	79.95	69.62	205.74	70.85	125.72	184.08	129.43	54.88	59.42	39.39

1963-64	1964-65	1965-66	1966-67	1967-68	1968-69	1969-70	1970-71	1971-72	1972-73	1973-74	1974-75	1975-76
1168	894.5	1316.1					2075.5		912.2	809.1	781.3	668.9
							618	626.6	654.5	664.8	610	
								700.6		681.9	660.8	
	864.2	894.6	1107.2				748.7	917.1	742.4	439.1	843.9	732.4
								688.8	556.5	562	653	701.3
		1761.7	2081.3	2115.3			1624.1	1723.5	1748.6	1497.5		1224.9
1117.5		1052.5	1477.5	949.5				1068.1	1204	952.5	885.5	745.8
			1059				834.3		630.8			942.1
594.9	841.5	845.7	906.9	896.1	771.8	795.3	898.4	1056.1	765.9	1021.4	738.9	878.3
					810.2	700.5	820.6	1009	823.8	689.3	726.2	
751.1	868.8	791.3	1001.6	878.6	631.9	657.2		605	828.6	703.3	741.1	551.2
673	987.2	853.6	1079.8	772.2	835.4	658.4	755.6	796	857.5	751	658	693.9
	1896.6	1173.5	1920.5	1554		1108.2	897	1093.1	1153.5	1112.5	971	
						608.9	610.2	650.2	762.8	671.4	725.9	654.9
906.4	760.2	919.8		1034.2		708.9	789.5	961	784.6	795.4	396.7	803.3
						1071.8	1497		1418.4	1186.9	1371.8	1120.2
							685.8	912.5	779.2	945.3	885.5	651.9
6	7	9	8	7	4	8	13	14	16	16	15	13
868.48	1016.14	1067.64	1329.23	1171.41	762.33	788.65	988.82	914.83	913.96	842.71	776.64	797.62
195.48	251.56	232.97	372.91	378.99	65.21	152.34	343.10	203.44	233.58	207.48	143.89	150.87

1976-77	1977-78	1978-79	1979-80	1980-81	1981-82	1982-83	1983-84	1984-85	1985-86	1986-87	1987-88	1988-89
1000.3	1071.3	884.1	787.9		652	742.2						
719.5	453		546.3	627.3		874.6	607	273.5				
716.4	663.3	556	675.1			763.9	922	705.6	631.1	574.1	610.3	547.1
1030.7	941	784.4	960.6	881.5	615	851.9	758.6	817.6				
727.8	707.8	611.6		444.4	260.8	472	735.7	608.6		565.4	699.2	523.9
1700.4	1474.1	959.2	1007.8	1353.7	999.4			1303.6		1326.5	1604.7	798.6
1223	1106		913	1295.1	1005.8	1112.3	987.9	799.2	875.3	830.3	960.7	
1217.8		783.7			716.1	978.3			850.9			
	860.8	645.7	787.3	682.5	550.4	784	617.3	676.8	678.1			
850.4	-100	562.5	655	689.7	468.1	506.7	645.7	672.4	519.7	624	758.2	550.4
745.6	702.2	548.4	819.1	778.9	561.5	662.5	637.4	652.7				
904.3	658.3	629.9		712.3	596.6			652.6	600.8	706.9	767.6	532.4
1059	764.2	637.6		610.7	631	1670.6	1514					
737.2	668.3	447.8	692.6	700.4	467.2	797.8		633.2	661.3	560.8	791.3	440.9
1193	968.7	888.8						803.3	721.5	627	883	520.2
1285.3	1218.2	976.9	691.1	993.5	1058	1281	1306.1	1167.4	1127.3	1180		766.6
985.9	955.6	634.9	850.8	912.5	742.8	935.8	901.2	771.4	823.9	915.4	900.5	696.8
					608.4	810.6	795.9	692.7	745		590	
							1253.8	825.4	820.5	666.1	671.8	592.9
16	16	15	12	13	15	15	13	16	12	11	11	10
1006.04	819.55	703.43	782.22	821.73	662.21	882.95	898.66	753.50	754.62	779.68	839.75	596.98
208.37	254.91	140.87	108.50	204.25	161.48	208.44	229.70	151.68	120.80	206.09	179.98	94.21

1989-90	1990-91	1991-92	1992-93	1993-94	1994-95	1995-96	1996-97	1997-98	1998-99	1999-00	2000-01	2001-02
									1255.5	785.8		736.3
802.6	895		857	624.7	660.2	497	624.6	900.8	634.4	499.9	894.2	592.3
			927.3	682.8	957.4	702.3	649.8	727.1	707.5	755.5		
839.9							635.3	667.6			844	
1671.2	1787.4	1853.8	623.7	1678.3	834.9	862.2	1442.7	1278.3			1322.4	883.6
		1497.1	1248.1	1029.9	1157.2	1014.8	1257.2		1088.5			1138.3
683.8	697.9		728.5					724.2	639.9		789.7	822.4
									924.1	909.5	1095	776
807.9	-100	778.6	737.7	646.6	735.6		488.9				724.1	720.8
									1161.2		796.3	479
789.8	793											
1081.2	911.7	891.1	1006.8	585.9				905.8	754.6			
1281.6	1304.2	1464.5										
			1131	727.1	756.8	864.5	709.2	935.3			923.6	
								992.6			1272.5	
747.7	740.5	800	727.3									1168.7
9	7	6	9	7	6	5	7	8	9	4	9	9
967.30	748.90	1203.12	1024.17	702.96	990.92	782.70	746.74	912.01	938.22	737.68	962.42	813.04
251.58	259.51	379.88	257.87	100.31	284.56	146.44	178.83	158.64	229.02	118.89	178.36	169.07

Tabla 6-9. Comparación de valores de las medias anuales de la precipitación contra los valores acumulados de las estaciones.

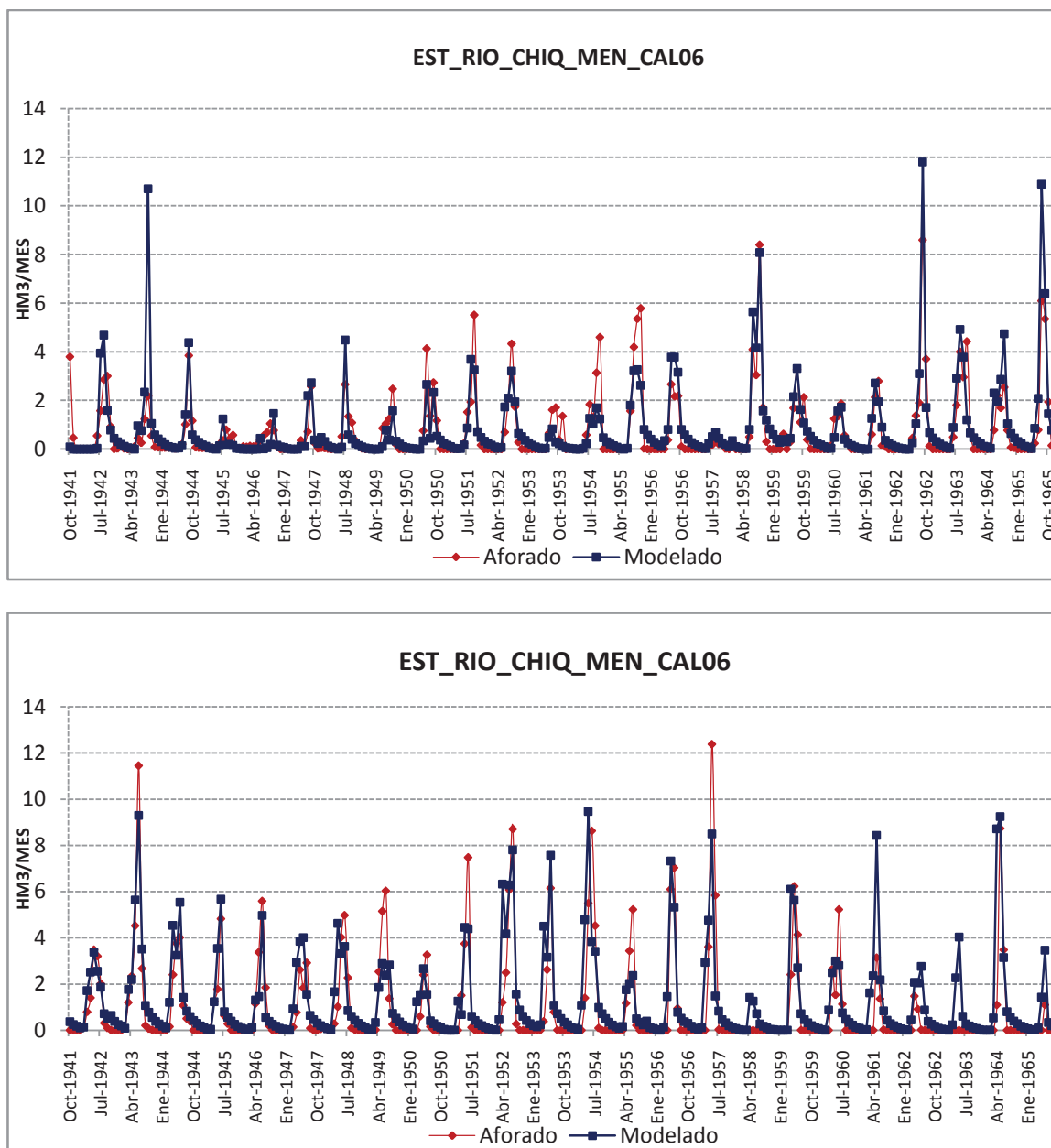
Sin embargo, aunque se eliminaron dichas estaciones no se obtienen los resultados esperados, ya que aun existen algunos picos en las graficas que indican que algún dato puede ser incorrecto. Una vez que se detectaron los meses en que se presentan estos valores, se procedió a hacer una revisión de las estaciones que tienen datos para verificar que sean correctos, con lo cual se detecto la estación 16001 de la localidad de Acuitzio del Canje que tiene valores de precipitación muy altos de precipitación. Con lo anterior se obtienen resultados mucho más precisos que la modelación anterior, esto se puede observar en las gráficas de comparación de caudales mensuales a régimen natural del modelo contra los registros históricos de la figura 6-10.

Los motivos por los cuales una estación tenga registros erróneos son varios, sin embargo se debe de tener en cuenta la magnitud del error, para tomar la opción más conveniente que nos permita siempre y en todo momento mantener la máxima cantidad de información disponible, a continuación se enlistan las principales causas de las variaciones en la información:

1. Cambio de la localización del pluviométrico.
2. Cambio en la forma de exposición del pluviométrico.
3. Cambio en el proceso de observación o reemplazo del operador.
4. Construcción de embalses en las cercanías.

5. Deforestación y reforestación de la zona.
6. Apertura de nuevas áreas de cultivo en los alrededores.
7. Industrialización en áreas circundantes.

Una vez ajustada la información se procede a la siguiente modelación para ver si el ajuste es correcto o aun se conservan las variaciones con respecto a los registros históricos.



Grafica 6-10. Comparación de caudales del modelo contra los registros históricos mensuales.

Una vez ajustados los datos, se tienen eliminadas tres estaciones la que se muestran en la Figura 6-11 con lo cual la información disponible cada vez se va reduciendo mas. Sin embargo los resultados ya son aceptables como se puede observar el las gráficas de la Figura 6-10 con lo cual quedaría terminado este proyecto de trabajo de tesis, aunque cabe mencionar que se pueden tener mejores resultados revisando las estaciones y haciendo un ajuste de todos los datos que se realizara más adelante, pero por cuestiones de tiempo no se incluirá en este trabajo.

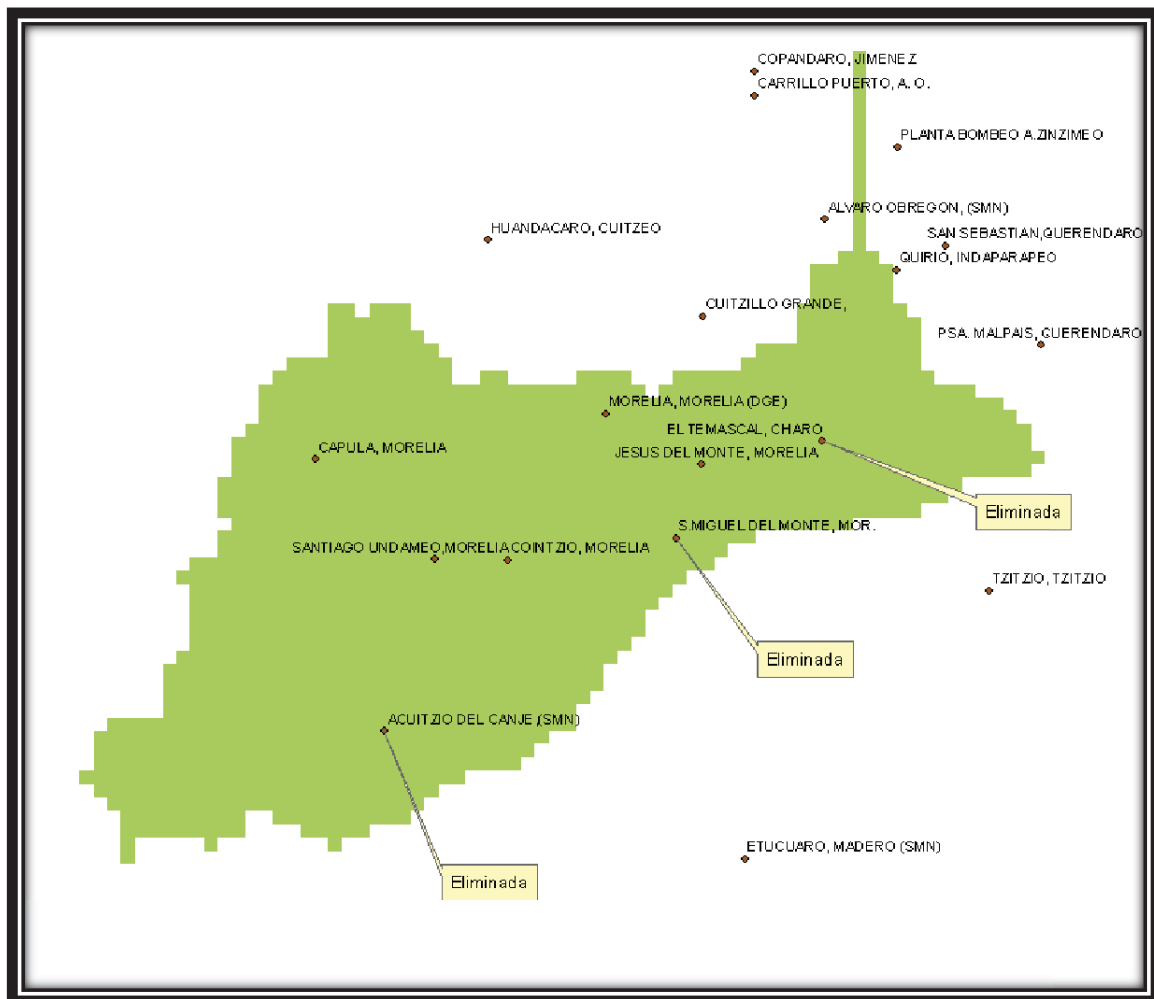


Figura 6-11. Mapa de localización de las estaciones eliminadas.

CAPÍTULO VII

Resultados del modelo

7. Resultados del modelo

Los resultados del modelo son ficheros que se crean durante la modelación, los cuales muestran la evaluación de las aportaciones de las salidas en los cauces, así como niveles piezométricos de los putos de interés del usuario, además genera otros resultados como por ejemplo volumen almacenado en cada acuífero ya sea mes a mes ó anual, las salidas al mar si fuera el caso, y las transferencias entre los acuíferos. Todos los resultados mencionados nos son posibles sin los parámetros de calibración del modelo, a partir de los cuales se generan dichos resultados. Para este caso se tienen los siguientes parámetros calibrados:

1. Máxima capacidad de infiltración al acuífero.

Núm.	Imax	Tipo
1	300	Aluvial
2	50	Andesita
3	250	Arenisca
4	201	Arenisca Toba acida
5	202	Arenisca Toba básica
6	203	Arenisca Conglomerado
7	51	Andesita Toba intermedia
8	52	Andesita Brecha volcánica intermedia
9	30	Basalto
10	31	Basalto Toba básica
11	340	Brecha sedimentaria
12	341	Brecha volcánica acida
13	342	Brecha volcánica básica
14	343	Brecha volcánica intermedia
15	261	Basalto Brecha volcánica basica
16	262	Caliza
17	301	Conglomerado
18	150	Dacita
19	151	Diorita
20	152	Dacita Toba acida
21	153	Dacita Brecha volcánica acida
22	61	Granito
23	62	Granodiorita
24	63	Granito Granodiorita
25	75	Latita
26	330	Lacustre
27	360	Limolita Arenisca
28	120	Metavolcanica

29	256	Metasedimentaria
30	40	desconocido
31	60	Riolita
32	75	Residual
33	250	Riolita Toba acida
34	400	Riolita Brecha volcánica acida
35	601	Toba acida
36	602	Toba básica
37	603	Toba intermedia
38	604	Toba acida Brecha volcánica acida
39	605	Toba básica Brecha volcánica básica
40	606	Toba intermedia Brecha volcánica intermedia
41	170	Volcanoclastico

Tabla 7-1. Máxima capacidad de infiltración a régimen natural del modelo PATRICAL (parámetro calibrado).

2. Máxima capacidad de humedad en el suelo.

Núm.	Hmax	tipo de vegetación (Uso)
1	200	Superficies artificiales urbana o residencial
6	350	Espacios con poca vegetación
2	445	Tierras de labor en secano
5	450	Praderas y pastizales naturales
3	542	Tierras de labor en regadío
7	550	Bosque
4	1700	Superficies de agua

Tabla 7-2. Máxima capacidad de humedad en el suelo a régimen natural del modelo PATRICAL (parámetro calibrado).

Los demás parámetros como el coeficiente de descarga de los acuíferos y el coeficiente de excedente se consideran como constantes para este trabajo.

Los resultados de las tres últimas modelaciones se encuentran en la tabla 7-1 junto con los valores de errores cuadráticos y sus graficas de comparación contra los registros históricos, se pueden ver en las graficas de las figuras 7-2, 7-3 y 7-4. En las graficas se puede observar la evolución de la calibración.

Mes/Año	Aforado	MODEL_06	MODEL_04	MODEL_05	DIF	DIF^2
oct-1941	3.796	0.09	0	0.09	3.706	13.734436
nov-1941	0.466	0	0	0	0.466	0.217156
dic-1941	0	0	0	0	0	0
ene-1942	0	0	0	0	0	0
feb-1942	0	0	0	0	0	0
mar-1942	0	0	0	0	0	0
abr-1942	0	0	0	0	0	0
may-1942	0	0	0	0	0	0
jun-1942	0.55	0.07	0	0.04	0.48	0.2304
jul-1942	1.577	4.16	0.58	3.95	-2.583	6.671889
ago-1942	2.859	5.03	0.89	4.69	-2.171	4.713241
sep-1942	3.001	1.97	0.52	1.59	1.031	1.062961
oct-1942	0.927	1.15	0.38	0.78	-0.223	0.049729
nov-1942	0.005	0.72	0.27	0.44	-0.715	0.511225
dic-1942	0.022	0.53	0.2	0.3	-0.508	0.258064
ene-1943	0.109	0.4	0.15	0.2	-0.291	0.084681
feb-1943	0.019	0.31	0.12	0.12	-0.291	0.084681
mar-1943	0	0.22	0.09	0.06	-0.22	0.0484
abr-1943	0	0.13	0.05	0.03	-0.13	0.0169
may-1943	0.106	0.09	0.03	0	0.016	0.000256
jun-1943	0.459	1.08	0.18	0.96	-0.621	0.385641
jul-1943	0.259	0.92	0.19	0.76	-0.661	0.436921
ago-1943	1.236	2.56	0.4	2.34	-1.324	1.752976
sep-1943	2.18	11.08	1.66	10.71	-8.9	79.21
oct-1943	0.548	1.46	0.49	1.05	-0.912	0.831744
nov-1943	0.083	0.97	0.37	0.59	-0.887	0.786769
dic-1943	0.068	0.7	0.27	0.42	-0.632	0.399424
ene-1944	0.058	0.53	0.2	0.3	-0.472	0.222784
feb-1944	0.054	0.4	0.15	0.19	-0.346	0.119716
mar-1944	0.056	0.26	0.1	0.11	-0.204	0.041616
abr-1944	0.057	0.18	0.07	0.07	-0.123	0.015129
may-1944	0.02	0.13	0.05	0.03	-0.11	0.0121
jun-1944	0.055	0.16	0.05	0.05	-0.105	0.011025
jul-1944	0.203	0.27	0.06	0.14	-0.067	0.004489
ago-1944	1.015	1.54	0.29	1.42	-0.525	0.275625
sep-1944	3.846	4.6	0.74	4.38	-0.754	0.568516
oct-1944	1.165	0.87	0.33	0.58	0.295	0.087025
nov-1944	0.069	0.62	0.24	0.39	-0.551	0.303601
dic-1944	0.052	0.48	0.19	0.28	-0.428	0.183184
ene-1945	0.045	0.35	0.14	0.18	-0.305	0.093025
feb-1945	0.043	0.26	0.1	0.12	-0.217	0.047089

mar-1945	0.05	0.18	0.07	0.05	-0.13	0.0169
abr-1945	0.049	0.13	0.05	0.02	-0.081	0.006561
may-1945	0.059	0.09	0.03	0	-0.031	0.000961
jun-1945	0.203	0.23	0.05	0.14	-0.027	0.000729
jul-1945	0.354	1.35	0.21	1.24	-0.996	0.992016
ago-1945	0.795	0.28	0.1	0.16	0.515	0.265225
sep-1945	0.422	0.32	0.09	0.2	0.102	0.010404
oct-1945	0.578	0.25	0.07	0.15	0.328	0.107584
nov-1945	0.037	0.13	0.05	0.04	-0.093	0.008649
dic-1945	0.039	0.09	0.03	0.02	-0.051	0.002601
ene-1946	0.11	0.04	0.02	0	0.07	0.0049
feb-1946	0.092	0.04	0.02	0	0.052	0.002704
mar-1946	0.128	0.04	0.02	0	0.088	0.007744
abr-1946	0.106	0	0	0	0.106	0.011236
may-1946	0.164	0	0	0	0.164	0.026896
jun-1946	0.369	0.55	0.05	0.44	-0.181	0.032761
jul-1946	0.551	0.1	0.03	0.01	0.451	0.203401
ago-1946	0.681	0.16	0.04	0.06	0.521	0.271441
sep-1946	1.05	0.34	0.07	0.2	0.71	0.5041
oct-1946	0.771	1.65	0.32	1.47	-0.879	0.772641
nov-1946	0.079	0.35	0.14	0.16	-0.271	0.073441
dic-1946	0.001	0.26	0.1	0.09	-0.259	0.067081
ene-1947	0	0.18	0.07	0.07	-0.18	0.0324
feb-1947	0	0.13	0.05	0.02	-0.13	0.0169
mar-1947	0	0.09	0.03	0	-0.09	0.0081
abr-1947	0	0.04	0.02	0	-0.04	0.0016
may-1947	0.027	0.04	0.02	0	-0.013	0.000169
jun-1947	0.357	0.18	0.03	0.12	0.177	0.031329
jul-1947	0.184	0.2	0.04	0.11	-0.016	0.000256
ago-1947	0.715	2.33	0.35	2.2	-1.615	2.608225
sep-1947	2.57	2.93	0.45	2.73	-0.36	0.1296
oct-1947	0.259	0.6	0.23	0.37	-0.341	0.116281
nov-1947	0.025	0.44	0.17	0.24	-0.415	0.172225
dic-1947	0.05	0.63	0.19	0.48	-0.58	0.3364
ene-1948	0.04	0.47	0.14	0.32	-0.43	0.1849
feb-1948	0.012	0.26	0.1	0.13	-0.248	0.061504
mar-1948	0	0.18	0.07	0.07	-0.18	0.0324
abr-1948	0	0.13	0.05	0.03	-0.13	0.0169
may-1948	0	0.09	0.03	0	-0.09	0.0081
jun-1948	0.522	0.19	0.04	0.08	0.332	0.110224
jul-1948	2.659	4.65	0.61	4.49	-1.991	3.964081
ago-1948	1.343	0.82	0.3	0.58	0.523	0.273529
sep-1948	1.089	0.62	0.21	0.41	0.469	0.219961

oct-1948	0.357	0.4	0.15	0.23	-0.043	0.001849
nov-1948	0.15	0.31	0.12	0.15	-0.16	0.0256
dic-1948	0.024	0.22	0.09	0.09	-0.196	0.038416
ene-1949	0	0.18	0.07	0.05	-0.18	0.0324
feb-1949	0	0.13	0.05	0.02	-0.13	0.0169
mar-1949	0	0.09	0.03	0	-0.09	0.0081
abr-1949	0	0.04	0.02	0	-0.04	0.0016
may-1949	0.025	0.04	0.02	0	-0.015	0.000225
jun-1949	0.86	0.18	0.03	0.11	0.68	0.4624
jul-1949	1.048	0.97	0.14	0.79	0.078	0.006084
ago-1949	1.248	0.49	0.14	0.38	0.758	0.574564
sep-1949	2.475	1.71	0.24	1.58	0.765	0.585225
oct-1949	0.192	0.49	0.19	0.33	-0.298	0.088804
nov-1949	0	0.35	0.14	0.21	-0.35	0.1225
dic-1949	0	0.26	0.1	0.11	-0.26	0.0676
ene-1950	0	0.18	0.07	0.06	-0.18	0.0324
feb-1950	0	0.13	0.05	0.04	-0.13	0.0169
mar-1950	0	0.09	0.03	0.02	-0.09	0.0081
abr-1950	0	0.04	0.02	0	-0.04	0.0016
may-1950	0.011	0.05	0.02	0	-0.039	0.001521
jun-1950	0.754	0.45	0.06	0.34	0.304	0.092416
jul-1950	4.132	2.86	0.6	2.66	1.272	1.617984
ago-1950	1.363	0.67	0.23	0.44	0.693	0.480249
sep-1950	2.734	2.61	0.74	2.33	0.124	0.015376
oct-1950	1.173	0.81	0.31	0.53	0.363	0.131769
nov-1950	0.007	0.62	0.24	0.38	-0.613	0.375769
dic-1950	0	0.44	0.17	0.25	-0.44	0.1936
ene-1951	0	0.31	0.12	0.16	-0.31	0.0961
feb-1951	0	0.22	0.09	0.1	-0.22	0.0484
mar-1951	0	0.18	0.07	0.04	-0.18	0.0324
abr-1951	0	0.13	0.05	0.02	-0.13	0.0169
may-1951	0.051	0.11	0.03	0.02	-0.059	0.003481
jun-1951	0.237	0.26	0.07	0.17	-0.023	0.000529
jul-1951	1.523	0.96	0.2	0.87	0.563	0.316969
ago-1951	1.938	3.82	0.33	3.69	-1.882	3.541924
sep-1951	5.513	3.44	0.61	3.26	2.073	4.297329
oct-1951	0.759	0.93	0.35	0.72	-0.171	0.029241
nov-1951	0.166	0.66	0.25	0.48	-0.494	0.244036
dic-1951	0	0.48	0.19	0.33	-0.48	0.2304
ene-1952	0	0.35	0.14	0.22	-0.35	0.1225
feb-1952	0	0.26	0.1	0.16	-0.26	0.0676
mar-1952	0	0.18	0.07	0.09	-0.18	0.0324
abr-1952	0	0.13	0.05	0.04	-0.13	0.0169

may-1952	0	0.16	0.03	0.07	-0.16	0.0256
jun-1952	0.697	1.83	0.4	1.73	-1.133	1.283689
jul-1952	2.079	2.24	0.44	2.1	-0.161	0.025921
ago-1952	4.329	3.43	0.81	3.21	0.899	0.808201
sep-1952	1.737	2.21	1.03	1.94	-0.473	0.223729
oct-1952	0.285	0.88	0.34	0.65	-0.595	0.354025
nov-1952	0	0.74	0.29	0.51	-0.74	0.5476
dic-1952	0	0.53	0.2	0.36	-0.53	0.2809
ene-1953	0	0.4	0.15	0.26	-0.4	0.16
feb-1953	0	0.26	0.1	0.16	-0.26	0.0676
mar-1953	0	0.22	0.09	0.09	-0.22	0.0484
abr-1953	0	0.13	0.05	0.05	-0.13	0.0169
may-1953	0	0.09	0.03	0.02	-0.09	0.0081
jun-1953	0	0.12	0.05	0.03	-0.12	0.0144
jul-1953	0.661	0.56	0.26	0.48	0.101	0.010201
ago-1953	1.613	0.92	0.28	0.83	0.693	0.480249
sep-1953	1.707	0.43	0.15	0.29	1.277	1.630729
oct-1953	0.377	0.34	0.12	0.22	0.037	0.001369
nov-1953	1.356	0.23	0.09	0.12	1.126	1.267876
dic-1953	0	0.13	0.05	0.06	-0.13	0.0169
ene-1954	0	0.09	0.03	0.04	-0.09	0.0081
feb-1954	0	0.09	0.03	0.02	-0.09	0.0081
mar-1954	0	0.04	0.02	0	-0.04	0.0016
abr-1954	0	0.04	0.02	0	-0.04	0.0016
may-1954	0	0.05	0	0.03	-0.05	0.0025
jun-1954	0.583	0.31	0.03	0.22	0.273	0.074529
jul-1954	1.838	1.39	0.4	1.27	0.448	0.200704
ago-1954	1.302	1.22	0.35	1.03	0.082	0.006724
sep-1954	3.138	1.92	0.54	1.7	1.218	1.483524
oct-1954	4.597	1.48	0.4	1.24	3.117	9.715689
nov-1954	0	0.66	0.25	0.47	-0.66	0.4356
dic-1954	0	0.48	0.19	0.31	-0.48	0.2304
ene-1955	0	0.35	0.14	0.21	-0.35	0.1225
feb-1955	0	0.26	0.1	0.14	-0.26	0.0676
mar-1955	0	0.18	0.07	0.08	-0.18	0.0324
abr-1955	0	0.13	0.05	0.02	-0.13	0.0169
may-1955	0	0.09	0.03	0	-0.09	0.0081
jun-1955	0.035	0.14	0.03	0.04	-0.105	0.011025
jul-1955	1.568	1.92	0.28	1.8	-0.352	0.123904
ago-1955	4.195	3.42	0.8	3.22	0.775	0.600625
sep-1955	5.353	3.56	0.96	3.27	1.793	3.214849
oct-1955	5.786	2.96	0.72	2.62	2.826	7.986276
nov-1955	0.02	1.13	0.43	0.81	-1.11	1.2321

dic-1955	0	0.84	0.32	0.57	-0.84	0.7056
ene-1956	0	0.62	0.24	0.41	-0.62	0.3844
feb-1956	0	0.44	0.17	0.28	-0.44	0.1936
mar-1956	0	0.31	0.12	0.18	-0.31	0.0961
abr-1956	0	0.22	0.09	0.11	-0.22	0.0484
may-1956	0	0.46	0.1	0.35	-0.46	0.2116
jun-1956	0.377	0.92	0.2	0.81	-0.543	0.294849
jul-1956	2.665	4.01	0.93	3.79	-1.345	1.809025
ago-1956	2.164	4.14	1.01	3.78	-1.976	3.904576
sep-1956	2.187	3.63	0.7	3.16	-1.443	2.082249
oct-1956	0.104	1.24	0.48	0.81	-1.136	1.290496
nov-1956	0	0.88	0.34	0.58	-0.88	0.7744
dic-1956	0	0.66	0.25	0.41	-0.66	0.4356
ene-1957	0	0.48	0.19	0.27	-0.48	0.2304
feb-1957	0	0.35	0.14	0.17	-0.35	0.1225
mar-1957	0	0.26	0.1	0.1	-0.26	0.0676
abr-1957	0	0.18	0.07	0.06	-0.18	0.0324
may-1957	0	0.13	0.05	0.02	-0.13	0.0169
jun-1957	0.109	0.34	0.08	0.24	-0.231	0.053361
jul-1957	0.169	0.64	0.14	0.52	-0.471	0.221841
ago-1957	0.317	0.86	0.28	0.68	-0.543	0.294849
sep-1957	0.204	0.59	0.18	0.44	-0.386	0.148996
oct-1957	0.25	0.42	0.15	0.26	-0.17	0.0289
nov-1957	0.016	0.31	0.12	0.16	-0.294	0.086436
dic-1957	0	0.22	0.09	0.09	-0.22	0.0484
ene-1958	0.331	0.48	0.14	0.35	-0.149	0.022201
feb-1958	0	0.26	0.1	0.11	-0.26	0.0676
mar-1958	0	0.18	0.07	0.06	-0.18	0.0324
abr-1958	0	0.13	0.05	0.04	-0.13	0.0169
may-1958	0	0.09	0.03	0.02	-0.09	0.0081
jun-1958	0.504	0.95	0.18	0.81	-0.446	0.198916
jul-1958	4.096	5.9	1.17	5.65	-1.804	3.254416
ago-1958	3.043	4.59	1.15	4.16	-1.547	2.393209
sep-1958	8.4	8.64	1.8	8.08	-0.24	0.0576
oct-1958	1.715	2.16	0.77	1.57	-0.445	0.198025
nov-1958	0.303	1.75	0.64	1.19	-1.447	2.093809
dic-1958	0	1.28	0.49	0.83	-1.28	1.6384
ene-1959	0	0.92	0.36	0.6	-0.92	0.8464
feb-1959	0	0.7	0.27	0.41	-0.7	0.49
mar-1959	0	0.53	0.2	0.28	-0.53	0.2809
abr-1959	0.622	0.6	0.22	0.4	0.022	0.000484
may-1959	0	0.51	0.18	0.31	-0.51	0.2601
jun-1959	0.291	0.62	0.2	0.44	-0.329	0.108241

jul-1959	1.685	2.39	0.97	2.16	-0.705	0.497025
ago-1959	3.267	3.66	1.33	3.31	-0.393	0.154449
sep-1959	1.102	2.09	0.71	1.63	-0.988	0.976144
oct-1959	2.128	1.5	0.62	1.08	0.628	0.394384
nov-1959	0.389	1.14	0.44	0.74	-0.751	0.564001
dic-1959	0.009	0.84	0.32	0.53	-0.831	0.690561
ene-1960	0	0.62	0.24	0.36	-0.62	0.3844
feb-1960	0	0.44	0.17	0.24	-0.44	0.1936
mar-1960	0	0.31	0.12	0.17	-0.31	0.0961
abr-1960	0	0.22	0.09	0.1	-0.22	0.0484
may-1960	0	0.18	0.07	0.04	-0.18	0.0324
jun-1960	0.145	0.14	0.05	0.03	0.005	2.5E-05
jul-1960	1.248	0.56	0.1	0.48	0.688	0.473344
ago-1960	1.344	1.67	0.31	1.57	-0.326	0.106276
sep-1960	1.869	1.88	0.3	1.72	-0.011	0.000121
oct-1960	0.564	0.58	0.2	0.4	-0.016	0.000256
nov-1960	0.318	0.4	0.15	0.25	-0.082	0.006724
dic-1960	0	0.31	0.12	0.15	-0.31	0.0961
ene-1961	0	0.22	0.09	0.09	-0.22	0.0484
feb-1961	0	0.13	0.05	0.04	-0.13	0.0169
mar-1961	0	0.09	0.03	0.02	-0.09	0.0081
abr-1961	0	0.09	0.03	0	-0.09	0.0081
may-1961	0	0.04	0.02	0	-0.04	0.0016
jun-1961	0.606	1.37	0.15	1.27	-0.764	0.583696
jul-1961	2.131	2.9	0.37	2.72	-0.769	0.591361
ago-1961	2.793	2.19	0.33	1.95	0.603	0.363609
sep-1961	0.143	1.23	0.31	0.9	-1.087	1.181569
oct-1961	0.095	0.62	0.24	0.36	-0.525	0.275625
nov-1961	0	0.48	0.19	0.25	-0.48	0.2304
dic-1961	0	0.35	0.14	0.15	-0.35	0.1225
ene-1962	0	0.26	0.1	0.09	-0.26	0.0676
feb-1962	0	0.18	0.07	0.05	-0.18	0.0324
mar-1962	0	0.13	0.05	0.02	-0.13	0.0169
abr-1962	0	0.09	0.03	0	-0.09	0.0081
may-1962	0	0.04	0.02	0	-0.04	0.0016
jun-1962	0.457	0.41	0.06	0.26	0.047	0.002209
jul-1962	1.377	1.22	0.19	1.04	0.157	0.024649
ago-1962	1.899	3.43	0.48	3.1	-1.531	2.343961
sep-1962	8.595	12.35	1.52	11.81	-3.755	14.100025
oct-1962	3.703	2.26	0.56	1.71	1.443	2.082249
nov-1962	0.123	1.14	0.44	0.68	-1.017	1.034289
dic-1962	0	0.84	0.32	0.46	-0.84	0.7056
ene-1963	0	0.62	0.24	0.32	-0.62	0.3844

feb-1963	0	0.44	0.17	0.21	-0.44	0.1936
mar-1963	0	0.31	0.12	0.13	-0.31	0.0961
abr-1963	0	0.22	0.09	0.07	-0.22	0.0484
may-1963	0	0.18	0.07	0.03	-0.18	0.0324
jun-1963	0.496	1.07	0.23	0.89	-0.574	0.329476
jul-1963	1.809	3.15	0.54	2.92	-1.341	1.798281
ago-1963	4.001	5.15	0.85	4.92	-1.149	1.320201
sep-1963	2.953	4.3	0.84	3.78	-1.347	1.814409
oct-1963	4.421	1.72	0.55	1.21	2.701	7.295401
nov-1963	0.657	1.1	0.43	0.67	-0.443	0.196249
dic-1963	0	0.79	0.31	0.47	-0.79	0.6241
ene-1964	0	0.57	0.22	0.33	-0.57	0.3249
feb-1964	0	0.44	0.17	0.22	-0.44	0.1936
mar-1964	0	0.31	0.12	0.12	-0.31	0.0961
abr-1964	0	0.22	0.09	0.09	-0.22	0.0484
may-1964	0	0.18	0.07	0.03	-0.18	0.0324
jun-1964	0.778	2.57	0.56	2.31	-1.792	3.211264
jul-1964	2.204	2.37	0.49	1.94	-0.166	0.027556
ago-1964	1.692	3.26	0.57	2.87	-1.568	2.458624
sep-1964	2.542	5.28	1.06	4.75	-2.738	7.496644
oct-1964	0.772	1.45	0.59	1.04	-0.678	0.459684
nov-1964	0.066	0.93	0.43	0.64	-0.864	0.746496
dic-1964	0.049	0.7	0.31	0.46	-0.651	0.423801
ene-1965	0	0.53	0.22	0.32	-0.53	0.2809
feb-1965	0	0.35	0.17	0.22	-0.35	0.1225
mar-1965	0	0.26	0.12	0.12	-0.26	0.0676
abr-1965	0	0.18	0.09	0.08	-0.18	0.0324
may-1965	0	0.13	0.07	0.02	-0.13	0.0169
jun-1965	0.239	0.98	0.31	0.86	-0.741	0.549081
jul-1965	0.786	2.23	0.7	2.09	-1.444	2.085136
ago-1965	6.093	11.15	1.83	10.9	-5.057	25.573249
sep-1965	5.35	6.79	1.22	6.4	-1.44	2.0736
oct-1965	1.943	1.94	0.72	1.45	0.003	9E-06
nov-1965	0.149	1.19	0.54	0.78	-1.041	1.083681
dic-1965	0.019	0.88	0.41	0.55	-0.861	0.741321
ene-1966	0	0.62	0.29	0.37	-0.62	0.3844
feb-1966	0	0.44	0.22	0.25	-0.44	0.1936
mar-1966	0	0.35	0.15	0.17	-0.35	0.1225
abr-1966	0	0.26	0.12	0.1	-0.26	0.0676
may-1966	0.133	0.25	0.09	0.13	-0.117	0.013689
jun-1966	0.79	1.86	0.37	1.71	-1.07	1.1449
jul-1966	1.401	2.84	0.96	2.52	-1.439	2.070721
ago-1966	3.482	3.51	1.28	3.38	-0.028	0.000784

sep-1966	3.203	3.46	0.75	2.55	-0.257	0.066049
oct-1966	2.008	2.49	0.91	1.86	-0.482	0.232324
nov-1966	0.309	1.28	0.65	0.72	-0.971	0.942841
dic-1966	0.088	0.97	0.51	0.51	-0.882	0.777924
ene-1967	0	1.13	0.54	0.64	-1.13	1.2769
feb-1967	0	0.79	0.41	0.38	-0.79	0.6241
mar-1967	0	0.57	0.31	0.25	-0.57	0.3249
abr-1967	0	0.4	0.22	0.18	-0.4	0.16
may-1967	0.104	0.31	0.17	0.09	-0.206	0.042436
jun-1967	1.2	2.05	0.61	1.76	-0.85	0.7225
jul-1967	2.339	2.59	0.9	2.2	-0.251	0.063001
ago-1967	4.522	6.18	1.27	5.64	-1.658	2.748964
sep-1967	11.451	9.93	2.41	9.3	1.521	2.313441
oct-1967	2.668	4.14	1.46	3.51	-1.472	2.166784
nov-1967	0.201	1.63	0.85	1.07	-1.429	2.042041
dic-1967	0.06	1.19	0.63	0.78	-1.13	1.2769
ene-1968	0.008	0.88	0.46	0.56	-0.872	0.760384
feb-1968	0	0.66	0.34	0.38	-0.66	0.4356
mar-1968	0	0.48	0.25	0.27	-0.48	0.2304
abr-1968	0	0.35	0.19	0.17	-0.35	0.1225
may-1968	0	0.41	0.2	0.1	-0.41	0.1681
jun-1968	0.151	1.76	0.58	1.21	-1.609	2.588881
jul-1968	2.402	5.2	1.51	4.54	-2.798	7.828804
ago-1968	3.764	3.72	1.16	3.24	0.044	0.001936
sep-1968	4.013	5.93	1.47	5.54	-1.917	3.674889
oct-1968	1.071	1.78	0.9	1.42	-0.709	0.502681
nov-1968	0.506	1.34	0.71	0.83	-0.834	0.695556
dic-1968	0.381	1.14	0.6	0.59	-0.759	0.576081
ene-1969	0	0.88	0.46	0.42	-0.88	0.7744
feb-1969	0	0.66	0.34	0.29	-0.66	0.4356
mar-1969	0	0.48	0.24	0.18	-0.48	0.2304
abr-1969	0	0.35	0.19	0.12	-0.35	0.1225
may-1969	0	0.26	0.14	0.05	-0.26	0.0676
jun-1969	0.083	0.2	0.1	0.04	-0.117	0.013689
jul-1969	1.258	1.52	0.44	1.23	-0.262	0.068644
ago-1969	1.778	3.9	0.7	3.54	-2.122	4.502884
sep-1969	4.822	6.22	1.41	5.67	-1.398	1.954404
oct-1969	0.622	1.23	0.56	0.8	-0.608	0.369664
nov-1969	0.274	0.92	0.43	0.55	-0.646	0.417316
dic-1969	0	0.66	0.32	0.39	-0.66	0.4356
ene-1970	0	0.48	0.24	0.26	-0.48	0.2304
feb-1970	0	0.35	0.17	0.16	-0.35	0.1225
mar-1970	0	0.26	0.12	0.09	-0.26	0.0676

abr-1970	0	0.18	0.09	0.05	-0.18	0.0324
may-1970	0	0.13	0.07	0.02	-0.13	0.0169
jun-1970	0	0.26	0.13	0.12	-0.26	0.0676
jul-1970	1.149	1.56	0.38	1.31	-0.411	0.168921
ago-1970	3.374	1.87	0.55	1.45	1.504	2.262016
sep-1970	5.589	5.14	1.23	4.97	0.449	0.201601
oct-1970	1.847	0.96	0.53	0.56	0.887	0.786769
nov-1970	0.196	0.88	0.46	0.38	-0.684	0.467856
dic-1970	0	0.7	0.37	0.26	-0.7	0.49
ene-1971	0	0.53	0.27	0.17	-0.53	0.2809
feb-1971	0	0.4	0.2	0.09	-0.4	0.16
mar-1971	0	0.35	0.19	0.05	-0.35	0.1225
abr-1971	0	0.35	0.17	0.02	-0.35	0.1225
may-1971	0	0.27	0.12	0	-0.27	0.0729
jun-1971	0.138	1.16	0.3	0.93	-1.022	1.044484
jul-1971	0.771	3.35	0.62	2.93	-2.579	6.651241
ago-1971	2.617	4.34	0.88	3.85	-1.723	2.968729
sep-1971	1.835	4.57	1.11	4.01	-2.735	7.480225
oct-1971	2.915	2.1	0.81	1.55	0.815	0.664225
nov-1971	0.086	1.1	0.56	0.64	-1.014	1.028196
dic-1971	0	0.84	0.43	0.46	-0.84	0.7056
ene-1972	0	0.62	0.31	0.31	-0.62	0.3844
feb-1972	0.044	0.44	0.22	0.2	-0.396	0.156816
mar-1972	0.101	0.31	0.17	0.13	-0.209	0.043681
abr-1972	0.046	0.22	0.12	0.06	-0.174	0.030276
may-1972	0.081	0.18	0.09	0.03	-0.099	0.009801
jun-1972	0.279	1.99	0.37	1.67	-1.711	2.927521
jul-1972	1.017	4.98	1.18	4.62	-3.963	15.705369
ago-1972	4.023	3.76	0.9	3.32	0.263	0.069169
sep-1972	4.974	4.13	1.52	3.63	0.844	0.712336
oct-1972	2.27	1.19	0.61	0.85	1.08	1.1664
nov-1972	0.093	0.88	0.48	0.6	-0.787	0.619369
dic-1972	0.017	0.66	0.36	0.43	-0.643	0.413449
ene-1973	0	0.48	0.25	0.29	-0.48	0.2304
feb-1973	0	0.35	0.19	0.19	-0.35	0.1225
mar-1973	0	0.26	0.14	0.12	-0.26	0.0676
abr-1973	0	0.18	0.1	0.05	-0.18	0.0324
may-1973	0	0.13	0.07	0.02	-0.13	0.0169
jun-1973	0.019	0.46	0.14	0.33	-0.441	0.194481
jul-1973	2.532	2.03	0.55	1.85	0.502	0.252004
ago-1973	5.15	3.23	0.64	2.89	1.92	3.6864
sep-1973	6.03	2.79	1.01	2.38	3.24	10.4976
oct-1973	1.372	3.31	1.08	2.82	-1.938	3.755844

nov-1973	0.251	1.1	0.58	0.73	-0.849	0.720801
dic-1973	0	0.84	0.43	0.52	-0.84	0.7056
ene-1974	0	0.62	0.32	0.36	-0.62	0.3844
feb-1974	0	0.44	0.24	0.22	-0.44	0.1936
mar-1974	0	0.31	0.17	0.15	-0.31	0.0961
abr-1974	0	0.22	0.12	0.09	-0.22	0.0484
may-1974	0	0.18	0.09	0.05	-0.18	0.0324
jun-1974	0	1.38	0.22	1.23	-1.38	1.9044
jul-1974	0.595	1.68	0.78	1.54	-1.085	1.177225
ago-1974	2.39	2.87	0.76	2.66	-0.48	0.2304
sep-1974	3.262	1.81	0.66	1.55	1.452	2.108304
oct-1974	0.15	0.62	0.39	0.41	-0.47	0.2209
nov-1974	0	0.44	0.29	0.28	-0.44	0.1936
dic-1974	0	0.35	0.22	0.17	-0.35	0.1225
ene-1975	0	0.22	0.17	0.11	-0.22	0.0484
feb-1975	0	0.18	0.12	0.04	-0.18	0.0324
mar-1975	0	0.13	0.09	0	-0.13	0.0169
abr-1975	0	0.09	0.07	0	-0.09	0.0081
may-1975	0	0.04	0.05	0	-0.04	0.0016
jun-1975	0	1.37	0.12	1.26	-1.37	1.8769
jul-1975	1.504	0.8	0.23	0.68	0.704	0.495616
ago-1975	3.747	4.62	0.74	4.45	-0.873	0.762129
sep-1975	7.476	4.69	0.92	4.39	2.786	7.761796
oct-1975	0.119	0.85	0.43	0.61	-0.731	0.534361
nov-1975	0	0.62	0.32	0.42	-0.62	0.3844
dic-1975	0	0.44	0.24	0.28	-0.44	0.1936
ene-1976	0	0.35	0.17	0.2	-0.35	0.1225
feb-1976	0	0.26	0.14	0.12	-0.26	0.0676
mar-1976	0	0.18	0.09	0.06	-0.18	0.0324
abr-1976	0	0.13	0.07	0.02	-0.13	0.0169
may-1976	0	0.09	0.05	0	-0.09	0.0081
jun-1976	0	0.53	0.15	0.46	-0.53	0.2809
jul-1976	1.204	6.42	1.05	6.32	-5.216	27.206656
ago-1976	2.494	4.32	0.74	4.17	-1.826	3.334276
sep-1976	6.081	6.49	0.99	6.29	-0.409	0.167281
oct-1976	8.71	8.21	1.43	7.81	0.5	0.25
nov-1976	0.27	1.93	0.66	1.57	-1.66	2.7556
dic-1976	0.002	1.16	0.51	0.87	-1.158	1.340964
ene-1977	0	0.84	0.37	0.61	-0.84	0.7056
feb-1977	0	0.62	0.27	0.42	-0.62	0.3844
mar-1977	0	0.44	0.2	0.28	-0.44	0.1936
abr-1977	0	0.35	0.15	0.2	-0.35	0.1225
may-1977	0	0.28	0.1	0.15	-0.28	0.0784

jun-1977	0	0.36	0.1	0.24	-0.36	0.1296
jul-1977	0.379	4.67	0.41	4.5	-4.291	18.412681
ago-1977	2.62	3.39	0.61	3.16	-0.77	0.5929
sep-1977	6.15	7.81	1.01	7.57	-1.66	2.7556
oct-1977	0.787	1.4	0.6	1.08	-0.613	0.375769
nov-1977	0.007	0.97	0.49	0.71	-0.963	0.927369
dic-1977	0	0.75	0.36	0.51	-0.75	0.5625
ene-1978	0	0.53	0.27	0.35	-0.53	0.2809
feb-1978	0	0.4	0.2	0.24	-0.4	0.16
mar-1978	0	0.26	0.14	0.14	-0.26	0.0676
abr-1978	0	0.22	0.1	0.09	-0.22	0.0484
may-1978	0	0.13	0.07	0.04	-0.13	0.0169
jun-1978	0	1.24	0.19	1.08	-1.24	1.5376
jul-1978	1.396	5.16	0.82	4.78	-3.764	14.167696
ago-1978	5.497	9.83	1.16	9.47	-4.333	18.774889
sep-1978	8.628	4.33	1.05	3.84	4.298	18.472804
oct-1978	4.522	3.76	0.93	3.41	0.762	0.580644
nov-1978	0.092	1.28	0.6	0.99	-1.188	1.411344
dic-1978	0	0.97	0.44	0.72	-0.97	0.9409
ene-1979	0	0.7	0.32	0.51	-0.7	0.49
feb-1979	0	0.53	0.24	0.35	-0.53	0.2809
mar-1979	0	0.35	0.17	0.22	-0.35	0.1225
abr-1979	0	0.26	0.12	0.15	-0.26	0.0676
may-1979	0	0.18	0.09	0.09	-0.18	0.0324
jun-1979	0	0.29	0.07	0.16	-0.29	0.0841
jul-1979	1.165	2.03	0.38	1.75	-0.865	0.748225
ago-1979	3.434	2.28	0.36	2.02	1.154	1.331716
sep-1979	5.224	2.72	0.5	2.37	2.504	6.270016
oct-1979	0.21	0.75	0.32	0.49	-0.54	0.2916
nov-1979	0	0.57	0.24	0.34	-0.57	0.3249
dic-1979	0	0.4	0.17	0.24	-0.4	0.16
ene-1980	0	0.59	0.15	0.4	-0.59	0.3481
feb-1980	0	0.26	0.14	0.11	-0.26	0.0676
mar-1980	0	0.18	0.1	0.08	-0.18	0.0324
abr-1980	0	0.13	0.07	0.02	-0.13	0.0169
may-1980	0	0.09	0.05	0	-0.09	0.0081
jun-1980	0	0.25	0.05	0.13	-0.25	0.0625
jul-1980	0	1.58	0.13	1.46	-1.58	2.4964
ago-1980	6.098	7.52	0.85	7.33	-1.422	2.022084
sep-1980	7.031	5.57	0.79	5.33	1.461	2.134521
oct-1980	0.944	1.03	0.39	0.78	-0.086	0.007396
nov-1980	0	0.71	0.31	0.52	-0.71	0.5041
dic-1980	0	0.53	0.22	0.37	-0.53	0.2809

ene-1981	0	0.43	0.17	0.29	-0.43	0.1849
feb-1981	0	0.31	0.14	0.17	-0.31	0.0961
mar-1981	0	0.22	0.1	0.09	-0.22	0.0484
abr-1981	0	0.18	0.07	0.05	-0.18	0.0324
may-1981	0	0.22	0.05	0.11	-0.22	0.0484
jun-1981	0	3.1	0.17	2.93	-3.1	9.61
jul-1981	3.611	5.08	0.33	4.76	-1.469	2.157961
ago-1981	12.379	8.88	0.83	8.5	3.499	12.243001
sep-1981	5.835	1.82	0.49	1.48	4.015	16.120225
oct-1981	0.027	1.12	0.43	0.83	-1.093	1.194649
nov-1981	0	0.75	0.34	0.46	-0.75	0.5625
dic-1981	0	0.53	0.25	0.32	-0.53	0.2809
ene-1982	0	0.4	0.19	0.2	-0.4	0.16
feb-1982	0	0.26	0.14	0.13	-0.26	0.0676
mar-1982	0	0.22	0.1	0.07	-0.22	0.0484
abr-1982	0	0.13	0.07	0.03	-0.13	0.0169
may-1982	0	0.09	0.05	0	-0.09	0.0081
jun-1982	0	0.09	0.03	0	-0.09	0.0081
jul-1982	0	1.58	0.23	1.42	-1.58	2.4964
ago-1982	0	1.4	0.31	1.26	-1.4	1.96
sep-1982	0	0.91	0.26	0.72	-0.91	0.8281
oct-1982	0	0.4	0.22	0.27	-0.4	0.16
nov-1982	0	0.31	0.17	0.17	-0.31	0.0961
dic-1982	0	0.22	0.12	0.1	-0.22	0.0484
ene-1983	0	0.13	0.09	0.04	-0.13	0.0169
feb-1983	0	0.09	0.07	0.02	-0.09	0.0081
mar-1983	0	0.09	0.05	0	-0.09	0.0081
abr-1983	0	0.04	0.03	0	-0.04	0.0016
may-1983	0	0.05	0.02	0	-0.05	0.0025
jun-1983	0	0	0.02	0	0	0
jul-1983	2.407	6.25	1.1	6.1	-3.843	14.768649
ago-1983	6.228	5.82	1.05	5.62	0.408	0.166464
sep-1983	4.139	2.97	0.67	2.7	1.169	1.366561
oct-1983	0.003	0.97	0.46	0.71	-0.967	0.935089
nov-1983	0	0.66	0.36	0.46	-0.66	0.4356
dic-1983	0	0.48	0.25	0.32	-0.48	0.2304
ene-1984	0	0.35	0.19	0.2	-0.35	0.1225
feb-1984	0	0.26	0.14	0.13	-0.26	0.0676
mar-1984	0	0.18	0.1	0.07	-0.18	0.0324
abr-1984	0	0.13	0.07	0.03	-0.13	0.0169
may-1984	0	0.09	0.05	0	-0.09	0.0081
jun-1984	0	1.01	0.16	0.88	-1.01	1.0201
jul-1984	2.63	2.65	0.6	2.49	-0.02	0.0004

ago-1984	1.528	3.24	0.65	3	-1.712	2.930944
sep-1984	5.223	3.08	0.79	2.8	2.143	4.592449
oct-1984	1.129	1.03	0.51	0.75	0.099	0.009801
nov-1984	0	0.7	0.41	0.47	-0.7	0.49
dic-1984	0	0.53	0.31	0.33	-0.53	0.2809
ene-1985	0	0.4	0.22	0.22	-0.4	0.16
feb-1985	0	0.26	0.15	0.12	-0.26	0.0676
mar-1985	0	0.22	0.12	0.09	-0.22	0.0484
abr-1985	0	0.13	0.09	0.03	-0.13	0.0169
may-1985	0	0.1	0.07	0.03	-0.1	0.01
jun-1985	0	1.73	0.26	1.62	-1.73	2.9929
jul-1985	0	2.41	0.46	2.36	-2.41	5.8081
ago-1985	3.137	8.63	0.68	8.44	-5.493	30.173049
sep-1985	1.36	2.45	0.45	2.18	-1.09	1.1881
oct-1985	0.027	1.03	0.38	0.84	-1.003	1.006009
nov-1985	0	0.62	0.29	0.43	-0.62	0.3844
dic-1985	0	0.44	0.2	0.28	-0.44	0.1936
ene-1986	0	0.31	0.15	0.2	-0.31	0.0961
feb-1986	0	0.22	0.12	0.12	-0.22	0.0484
mar-1986	0	0.18	0.09	0.06	-0.18	0.0324
abr-1986	0	0.13	0.05	0.03	-0.13	0.0169
may-1986	0	0.09	0.03	0	-0.09	0.0081
jun-1986	0.001	0.54	0.17	0.44	-0.539	0.290521
jul-1986	1.474	2.22	0.35	2.07	-0.746	0.556516
ago-1986	0.911	2.28	0.48	2.05	-1.369	1.874161
sep-1986	0.015	3.05	0.64	2.76	-3.035	9.211225
oct-1986	0	1.15	0.5	0.87	-1.15	1.3225
nov-1986	0	0.62	0.41	0.38	-0.62	0.3844
dic-1986	0	0.44	0.31	0.26	-0.44	0.1936
ene-1987	0	0.31	0.22	0.17	-0.31	0.0961
feb-1987	0	0.22	0.15	0.09	-0.22	0.0484
mar-1987	0	0.18	0.12	0.05	-0.18	0.0324
abr-1987	0	0.14	0.09	0.02	-0.14	0.0196
may-1987	0	0.09	0.07	0	-0.09	0.0081
jun-1987	0	0.4	0.05	0.24	-0.4	0.16
jul-1987	0	2.47	0.19	2.27	-2.47	6.1009
ago-1987	0	4.39	0.34	4.03	-4.39	19.2721
sep-1987	0	0.9	0.36	0.6	-0.9	0.81
oct-1987	0	0.57	0.29	0.27	-0.57	0.3249
nov-1987	0.006	0.4	0.2	0.19	-0.394	0.155236
dic-1987	0	0.31	0.15	0.11	-0.31	0.0961
ene-1988	0	0.22	0.12	0.07	-0.22	0.0484
feb-1988	0	0.13	0.09	0.03	-0.13	0.0169

mar-1988	0	0.09	0.05	0	-0.09	0.0081
abr-1988	0	0.09	0.03	0	-0.09	0.0081
may-1988	0	0.04	0.03	0	-0.04	0.0016
jun-1988	0	0.68	0.46	0.53	-0.68	0.4624
jul-1988	1.092	8.88	0.98	8.72	-7.788	60.652944
ago-1988	8.736	9.53	1.54	9.25	-0.794	0.630436
sep-1988	3.479	3.51	1.12	3.15	-0.031	0.000961
oct-1988	0	1.14	0.63	0.8	-1.14	1.2996
nov-1988	0	0.84	0.46	0.55	-0.84	0.7056
dic-1988	0	0.62	0.34	0.4	-0.62	0.3844
ene-1989	0	0.44	0.25	0.28	-0.44	0.1936
feb-1989	0	0.31	0.19	0.17	-0.31	0.0961
mar-1989	0	0.22	0.14	0.1	-0.22	0.0484
abr-1989	0	0.18	0.1	0.06	-0.18	0.0324
may-1989	0	0.13	0.07	0.02	-0.13	0.0169
jun-1989	0	0.1	0.05	0.01	-0.1	0.01
jul-1989	0	0.21	0.1	0.1	-0.21	0.0441
ago-1989	0	1.57	0.39	1.43	-1.57	2.4649
sep-1989	1.096	3.63	0.47	3.46	-2.534	6.421156
oct-1989	0	0.51	0.24	0.33	-0.51	0.2601
nov-1989	0	0.35	0.17	0.2	-0.35	0.1225
dic-1989	0	0.26	0.14	0.13	-0.26	0.0676

Tabla 7-3. Resultados de caudales a régimen natural del modelo PATRICAL.

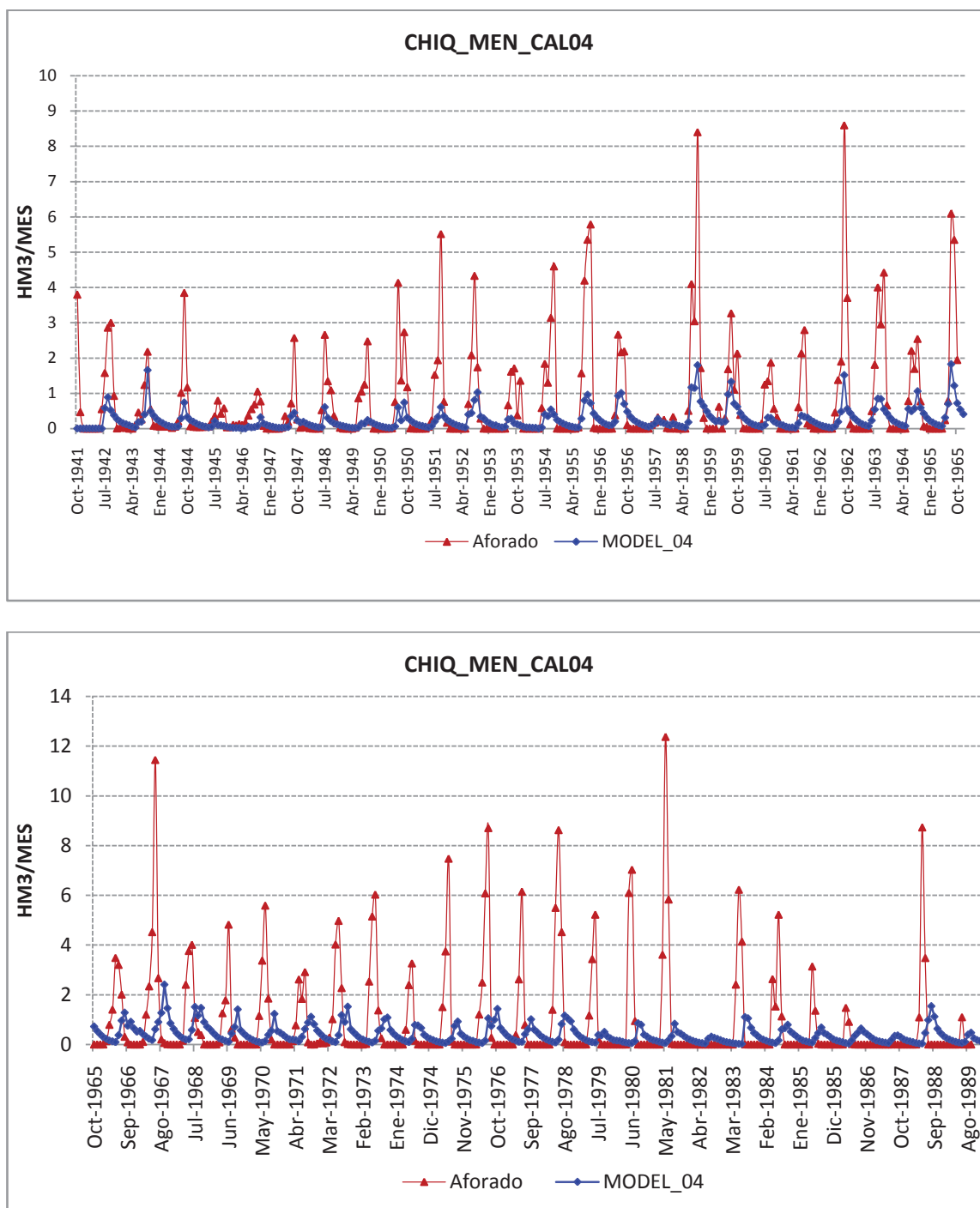


Figura 7-4. Grafica de comparación mensual de la cuarta simulación de caudales del modelo a régimen natural contra los registros históricos.

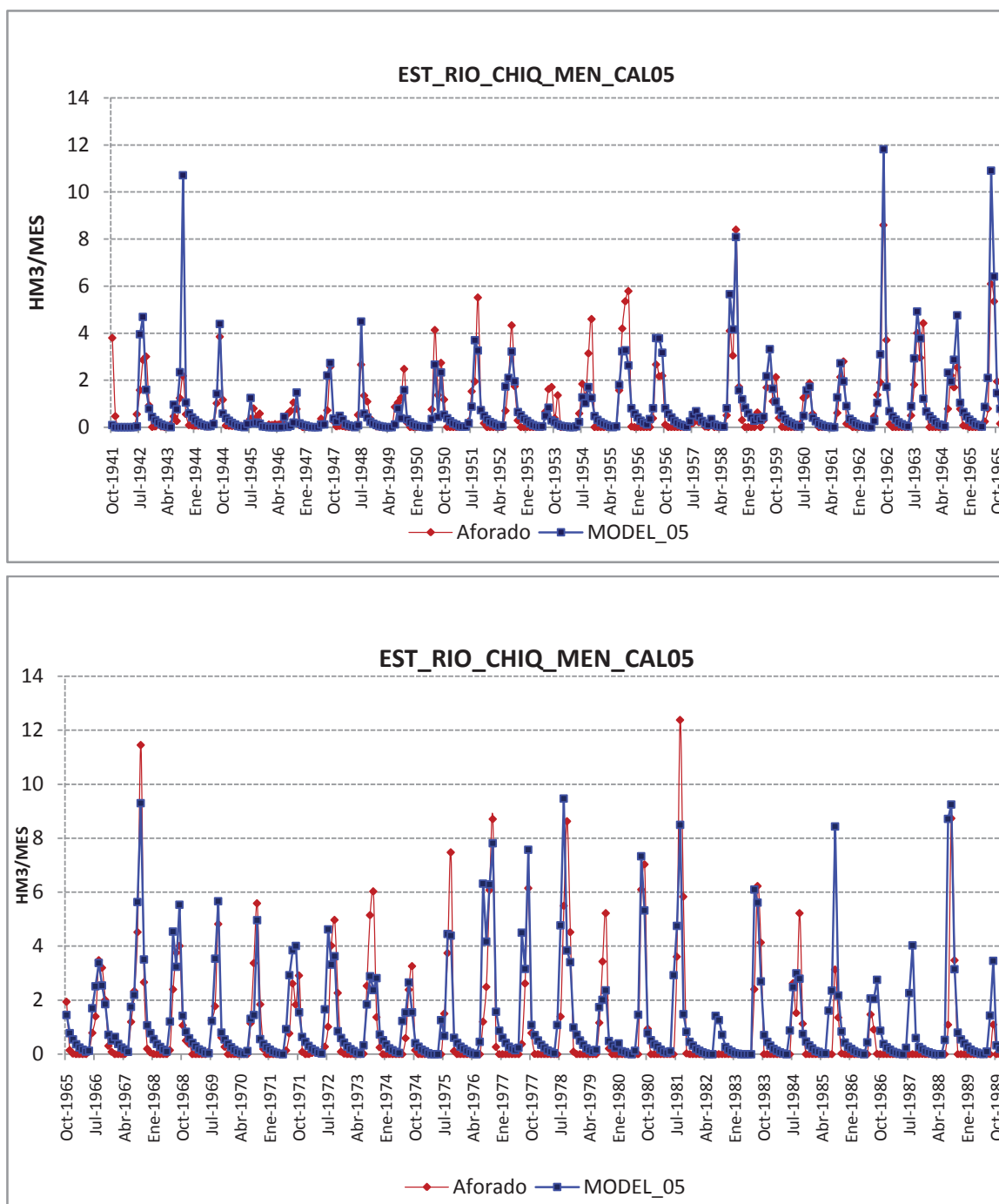


Figura 7-5. Grafica de comparación mensual de la quinta simulación de caudales del modelo a régimen natural contra los registros históricos.

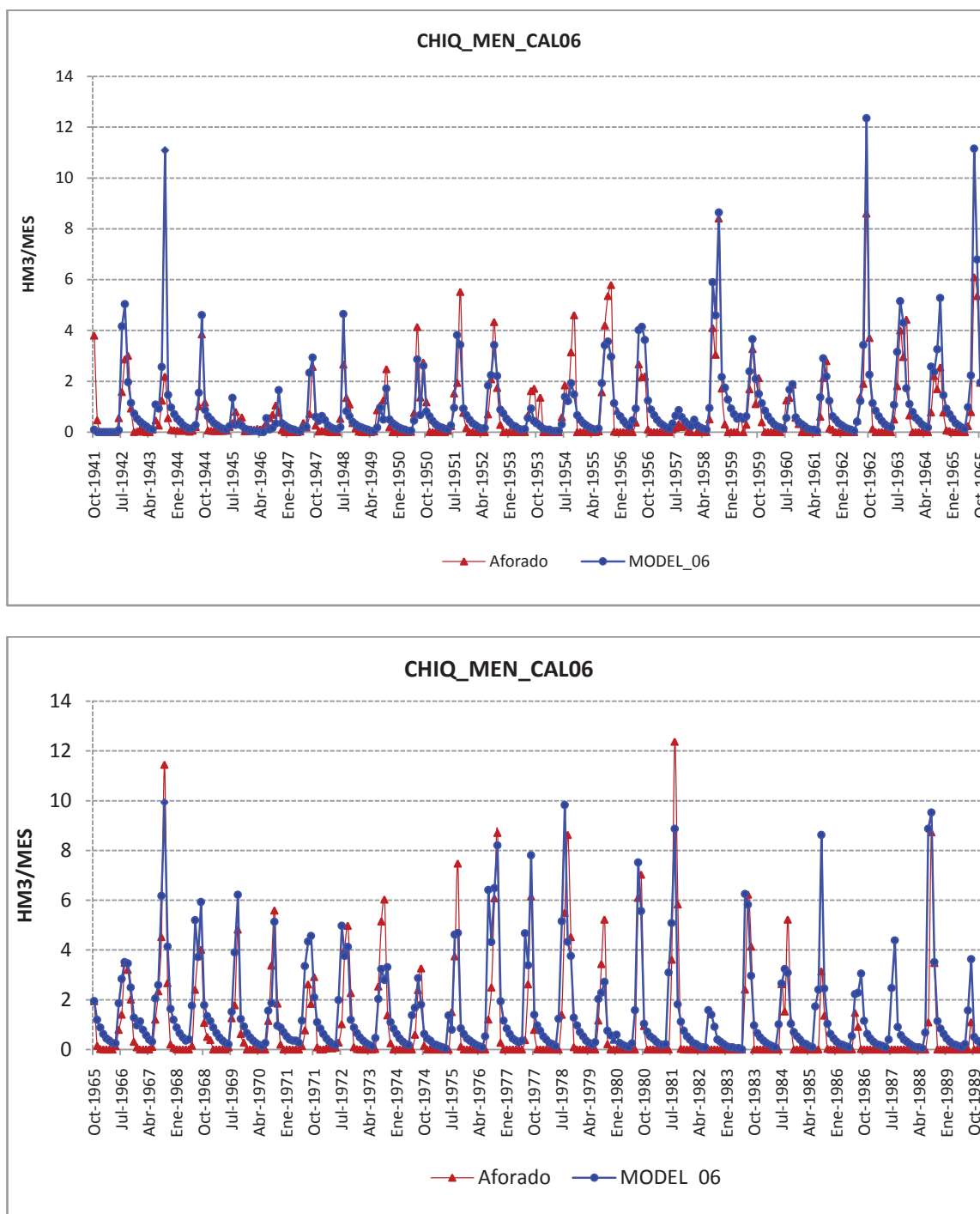


Figura 7-6. Grafica de comparación mensual de la quinta simulación de caudales del modelo a régimen natural contra los registros históricos de la estación Río Chiquito.

En las graficas de las figuras 7-4, 7-5, y 7-6 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas en el modelo PATRICAL, con las cuales quedaría

terminado este trabajo de tesis que tiene el objetivo de aplicar la modelación hidrológica distribuida a las normas de nuestro país, para tener otras opciones de estudiar estos fenómenos que día a día se llevan a cabo en nuestro planeta. Como se puede observar la quinta y sexta simulación tienen variaciones casi insignificantes en los gráficos lo cual indica que la calibración del modelo queda ajustada.

CAPÍTULO VIII

Conclusiones y recomendaciones

8. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se hará un análisis de los resultados obtenidos en este proyecto que busca como objetivo principal la aplicación de la hidrología distribuida a las condiciones mexicanas caso de la cuenca del río Grande de Morelia.

8.1. Conclusiones y recomendaciones

Los constantes avances de la tecnología permiten el desarrollo de herramientas que faciliten y mejoren la realización de cualquier proyecto, sobre todo los proyectos de investigación que requieren de detalles que demuestren la exactitud y la aplicación de los mismos en un país como el nuestro. Los modelos son la forma más simple de representar un fenómeno de la naturaleza, ya que permite ver como este se desarrolla y como varía en el tiempo, partiendo de información de registros históricos, de datos de la zona de estudio, que en países como el nuestro muchas veces no están disponibles y en la mayoría ni siquiera existen. Esta información será la materia prima para los modelos, sin la cual no sería posible ningún trabajo. Que dependiendo del tipo de modelo y del fenómeno a modelar, será necesaria cierto tipo de información que se adapte al modelo.

Para este trabajo se modeló el ciclo hidrológico mediante la formulación de Témez (1977) con algunas modificaciones desarrolladas en el modelo PATRICAL que simula este fenómeno a régimen natural y a régimen alterado, para nuestro caso la modelación fue solo a régimen natural por carecer de la información necesaria para simular a régimen alterado.

Después de algunas modelaciones los resultados fueron mejorando, sin embargo la calibración se volvió complicada debido a errores que tenía dicha información, para lo cual se le realizó una consistencia de datos para verificar que los datos fueran correctos.

Con los resultados de la última modelación se tienen una muy buena representación en comparación con los registros de caudales históricos lo cual se puede ver en la gráfica de la Figura 6-6.

La aplicación de la modelación cusi-distribuida a las condiciones mexicanas es un área poco explorada en México, lo cual hace que sea un tema de interés para tener otra perspectiva de la hidrología a partir de nuevas tecnologías. Es un tema de gran interés ya que permite evaluar los recursos hídricos de una zona, además de que permite también la evaluación del estado de los acuíferos, así como también permite hacer predicciones en base a la evolución que estos han sufrido a través del tiempo.

La modelación distribuida es una herramienta que permite evaluar no solo un punto en particular de una zona, por ejemplo, la salida de un cauce, si no que permite además evaluar de forma espacial el fenómeno que se estudie, ya que en el caso el modelo utilizado para este trabajo evalúa celda a celda el ciclo hidrológico, lo cual hace que la evaluación sea más real que haciendo este trabajo de forma tradicional.

8.2. Recomendaciones

Uno de los aspectos más importantes para la aplicación de la hidrología distribuida es la experiencia y el análisis que se haga al realizar un trabajo de este tipo en base a la cual podemos hacer recomendaciones para tener más éxito en la realización del mismo y desde luego mejores resultados que eso será siempre lo más importante.

De la experiencia y el análisis hecho en este trabajo como recomendaciones para futuras aplicaciones propondría las siguientes: Tener claro el tipo de información que requerirá el modelo.

- 1) Conseguir la máxima cantidad de información disponible.
- 2) Para el caso de las estaciones tanto hidrométricas como meteorológicas verificar su posición con GPS en campo, ya que las coordenadas de las bases de datos en algunos casos no son correctas.
- 3) De la información disponible, verificar la información que será esencial ya que esta determina la aplicación o no del modelo.
- 4) Hacer una consistencia de datos ya sean datos meteorológicos e hidrológicos antes de cualquier simulación, para que el único trabajo en esta fase sea la calibración de los parámetros del modelo.
- 5) Tener conocimientos de la zona de estudio que facilite la verificación de los datos que se vayan a utilizar para en modelo.
- 6) Investigar todos los datos posibles de características de los tipos de rocas, uso de suelo.
- 7) Conseguir toda la información que exista en mapas.
- 8) Investigar todos los estudios similares de la zona que hayan realizado para comparar resultados.
- 9) Impulsar este tipo de proyectos ya que la escases de agua día a día va aumentando, y esto nos permite hacer una evaluación que ayude a proponer políticas de prevención, planeación, explotación, así como de distribución de este recurso.

Referencias

Estrela, Teodoro (1992). Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos: Centro de Estudios Hidrográficos. – Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas Gabinete de Formación y Documentación.

MIMAN (2000). Libro blanco del agua de España: Centro de Publicaciones. Secretaría general Técnica. Ministerio de Medio Ambiente.

Miguel Ángel Pérez Martín (Junio de 2005). Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado es sistemas de información geográfica, para grandes cuencas. Universidad Politécnica de Valencia. Junio de 2005. Tesis Doctoral.

Juan Manuel Ruiz (Mayo 1998). Desarrollo de un modulo hidrológico conceptual distribuido de simulación continua integrado con sistemas de información geográfica. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis doctoral.

Aparicio Mijares, Francisco Javier; Fundamentos de Hidrología de Superficial. Limusa. México, 2001.

Dr. Abel Mejía (Junio 2007). Sistema de Modelación Hidrológica aplicación Geoespacial-SIG: HEC–geoHMS. Universidad Agraria la Molina, Curso: Métodos matemáticos en hidrología.

Víctor Hugo Guerra Cobián (Septiembre 2007). Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hidrológicas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU. Universidad Autónoma del Estado de México. Tesis doctoral.

Maynor Belteton. Curso de ArcView 8x (Sin más datos)

Carlos Campillo Torres. Manual de GRASS, Introducción a GRASS V. 1.1. Área de Ecología, Departamento de Física. Universidad de Extremadura.

Guillermo Martínez (Julio de 2005). GRASS 6. Una guía de inicio. Universidad de los Andes, de Mérida. Venezuela.

José Barajas Salcedo (Octubre 2002). Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos de en la Cuenca del Rio Grande de Morelia. (Modelo SIGMES). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Licenciatura.

María Valero Villarroya (Mayo 2007). Evaluación de los efectos del cambio en los usos del suelo mediante un modelo de simulación del ciclo hidrológico aplicado en la cuenca del Júcar. Universidad politécnica de Valencia. Proyecto final de carrera.

SIAS (1997) Sistema de Información de Aguas Superficiales. Instructivo de operación. Comisión Nacional del Agua

CLICOM, (2005). Climating Computing Program, Base de Datos Meteorológicos, Servicio Meteorológico Nacional, México.

<http://www.um.es/~geograf/sig/SIGgf2000/curso.htm>.

<http://epi.minsal.cl/SigEpi/tema01.html>. Introducción a los sistemas de información geográfica.

Singh, V. P., Woolhiser, D. A., (2002) Mathematical Modeling of Watershed Hydrology, Journal of Hydrologic Engineering, July/August, pp. 270-292

Crawford, N. H., Linsley, R. K., (1966). Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV, Technical Report No. 39, Stanford University, Palo Alto California.

Abbot, M. B., Refsgaard, J. C., (1996). Distributed Hydrological Modeling, Kluwer. Academy Publishers, Netherlands, 321 pp.

Singh, V. P., (1995). Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Colorado, U.S.A.

ArcView Gis, 1996, Environmental Systems Research Institute Inc.

<http://grass.itc.it/download/index.php>