



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

T E S I S

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA CONTINÚA PARA FINES DE
PRONÓSTICO DE AVENIDAS EN RÍOS**

que para obtener el grado de

Maestro en

Ciencias del Agua

presenta

Guillermo Pérez Luna

Tutor: M. en I. Ernesto Aguilar Garduño

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimonial de la obra titulada “Modelación hidrológica continúa para fines de pronóstico de avenidas en ríos”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

Guillermo Pérez Luna

Lugar y fecha

Firma

Dedicatoria

En primer lugar, quiero dedicarle este trabajo a mi mamá, quien ha sido mi mejor maestra y tutora de vida, ella me enseñó que para lograr cualquier objetivo, se necesitan primero las ganas de querer conseguirlo y la valentía para iniciar el camino, pero más aún para poder continuar, a pesar de las dificultades que se presenten, con constancia y dedicación, se puede alcanzar la meta. Esto es para mi mamá Lupita, que ha dedicado toda su vida, pese a las adversidades, a hacer de mis hermanos y de mí, gente productiva, profesionistas, pero sobre todo, personas felices, le dedico este trabajo, del cual es parte primordial, sin ella no hubiera podido llegar a donde he llegado, no hay forma de agradecerle, pero le entrego en estas líneas mis más profundo y sincero reconocimiento a su labor invaluable por lo que ha hecho por nosotros.

Esta dedicatoria también la comparto con mis hermanos, con quienes he tenido la fortuna de compartir, momentos buenos y difíciles, y quienes siempre han tenido a bien apoyarme, en la prosperidad y en la adversidad, Juan Carlos, José Luis, Silvia y Jonathan, cada uno de distintas maneras, impulsándome siempre a ser mejor persona; si bien es cierto, que yo no los elegí, sino que mi tutora de vida, me los asignó, como presintiendo que iba a necesitar al mejor comité tutorial de vida, para poder recorrer este camino, tal cual se presenta ante mí, sé que, si ahora mismo, tuviera la oportunidad de poder elegir, los elegiría nuevamente sin dudarlos, siempre formarían parte de mi vida.

A mis sobrinos, Daniel, Humberto, Miriam, Juan Carlos jr. y a todos los nuevos integrantes que vengan, porque con su presencia le han dado alegría renovada a la familia, nos motivan a estar mejor preparados, tanto física, como intelectualmente y más para poder apoyarlos, como ya alguna vez, nosotros recibimos apoyo. En este trabajo de investigación, he planteado la posibilidad de anticipar sucesos que potencialmente estarían por suceder, pero con toda esta investigación, me es prácticamente imposible el poder anticipar el futuro que les espera, pero estoy noventa y

nueve por ciento seguro que lograrán cosas muy importantes en sus vidas, lo mejor está por sucederles, los límites los ponen ustedes, confío plenamente en que algún día nos darán nuevas satisfacciones, y bueno, también quiero incluir a mi tío Ramón, a Adi Cruz y Adi Roa, compañeras de mis hermanos, quienes ya forman parte de nuestra familia y aprovechando el espacio, también incluyo a Edgar.

Por último, pero no por ello menos importante, este esfuerzo y dedicatoria, también es para una persona muy especial con quién he podido compartir esta etapa de vida, de investigación, de sacrificio, de estudio y amor por la vida, a mi mejor fuente de inspiración, mi complemento, parte trascendental de esta investigación y de mi vida, de quien también me siento muy orgulloso, esto también es para ti Oli, ¿recuerdas?, cuando te dije que juntos escribiríamos un libro, no anticipe, que no solo escribiríamos uno, sino varios, ya que escribiremos una serie completa, de muchos capítulos, este es nuestro primer tomo, siempre confiamos en que lo lograríamos, espero que continuemos escribiendo esta historia juntos, venciendo a las probabilidades.

Para concluir con esta extensa dedicatoria, perdonen todos los lectores por hacerles leer estas líneas y a quienes no incluí. No pude escribir, tal vez, la mejor dedicatoria que todos se merecen, pero a todos los aquí mencionados, tan solo les quise reconocer por haber sido parte importante de mi vida y con quienes he tenido grandes enseñanzas, ustedes son los principales protagonistas de este “sueño alcanzado”, a todos les dedico este trabajo.

Agradecimientos

La consecución de esta investigación ha sido posible gracias al apoyo de muchas personas e instituciones que han contribuido de alguna u otra manera para la realización de la misma, por eso quiero reconocer la importancia que han tenido la Comisión Nacional del Agua en mi desarrollo profesional y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, que me han permitido tener esta extensión de desarrollo académico.

En primer lugar, quiero agradecerle al M. en I. Horacio Rubio, no solo por la oportunidad de seguir preparándome y sugerirme el poder hacer los exámenes para ingresar a la maestría, sino también por toda la confianza, apoyo, enseñanzas, y facilidades otorgadas hasta poder culminar estos estudios.

A todo mi comité tutorial, por su disposición, muy en especial al M. en I. Ernesto Aguilar, por todas sus enseñanzas y retroalimentación en el desarrollo de este trabajo, y por supuesto, a los M. en I. Juan Fco Gómez y Roberto Mejía, por haber contribuido con su experiencia y valiosas aportaciones para la mejora y desarrollo de esta investigación.

Agradezco al equipo del SPR, a todos mis compañeros de trabajo, donde hace ya varios años, inicie esta etapa laboral y profesional con el servicio social, todo ese aprendizaje se ve reflejado en este trabajo, mi más sincero agradecimiento a mi mejor amigo Efrén Martínez, no solo por ser un excelente profesional, sino por ser una mejor persona.

A todos los profesores y personal del IMTA, por la enseñanza recibida, a los Carbajal, así como a todos mis compañeros que iniciamos esta experiencia de maestría y en quienes encontré a personas muy dedicadas y grandes amigos, muy en especial a Alejandrina, quien fue para nosotros, literalmente, como una compañera, siempre con una sonrisa amable, que siempre nos apoyó y trató excepcionalmente a todos.

A todos ustedes, gracias por hacer esto posible.

Resumen

Se realizó mediante un modelo de lluvia-escorrentamiento, la simulación hidrológica continua en una cuenca de México para fines de pronóstico de avenidas en ríos; para dicho propósito, se empleó la información registrada en tiempo real en la red de estaciones hidrometeorológicas, tanto convencionales y automáticas, características fisiográficas y geomorfológicas de la cuenca, registros del funcionamiento de vasos en los aprovechamientos existentes en la cuenca de estudio e información de precipitación pronosticada mediante el modelo numérico WRF.

La cuenca que se estudió fue la del río Fuerte, que forma parte de la Región Hidrológica número 10, denominada río Sinaloa.

La herramienta informática empleada fue el sistema de modelación hidrológica HEC HMS, del US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC.

La información de registros de lámina de precipitación y gastos en tiempo real fue obtenida a través del Sistema de Información Hidrológica (SIH), administrado por la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos de la Subdirección General Técnica, dependiente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), sistema que concentra la información de la mayor red de estaciones hidrometeorológicas del país; además de poseer herramientas de análisis para la estimación de la lámina de precipitación distribuida espacial y temporalmente, con lo que se facilitó la obtención de la información a través de este sistema. En lo que respecta a la precipitación pronosticada, esta fue obtenida con base al modelo numérico WRF provisto por la CGSMN, también dependiente de la CONAGUA.

La calibración se realizó con información diaria y se logró una buena aproximación para las cuencas de cabecera con índices de 0.8, mientras que en las cuencas intermedias la aproximación lograda fue aproximadamente de 0.6.

Abstract

It was performed by a rainfall-runoff model, the continuous hydrologic simulation in a basin of Mexico for flood forecasting purposes in rivers; in that order, the information recorded in real-time on the hydrometeorological stations network was used, both conventional and automatic stations, physiographic and geomorphological characteristics of the basin, data from the reservoir operations on existing dams in the basin study and information of forecast precipitation by the WRF numerical model.

The basin of the study was the basin of the “Rio Fuerte”, which is part of the Mexican number 10 Hydrological Region, called “Rio Sinaloa”.

The computer tool used was the hydrological Modeling System, HEC HMS, from the US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC.

The information of the height precipitation and discharge records in real-time was obtained through the Hydrological Information System (SIH for its acronym in Spanish), which is administrated by the Management of Surface Water and River Engineering (GASIR for its acronym in Spanish) which is part of the Technical General Subdirection dependent of the Mexican National Water Commission (CONAGUA), system that concentrates the information of the highest hydrometeorological stations network in Mexico; besides, the SIH possess analysis tools to estimate the precipitation height spatially and temporally distributed, thereby obtaining the information through this system was facilitated. About the predicted information, this was obtained based on the WRF numerical model provided by CGSMN, also dependent of the CONAGUA.

The calibration was realized with daily data and the results shown a good approximation for the head basins with indexes of 0.8, whereas in the intermediate basins the approximation achieved was of 0.6.

Índice General

Dedicatoria	I
Agradecimientos	III
Resumen	III
Índice General.....	V
Índice de Tablas.....	VII
Índice de Figuras	VIII
1. Introducción.....	1
Antecedentes.....	6
1.1. Planteamiento del problema	8
1.2. Justificación.....	9
1.3. Objetivo general	11
1.4. Hipótesis.....	11
1.5. Delimitación espacio-temporal	12
1.6. Estado del Arte.....	12
1.7. Marco conceptual	19
1.8. Diseño metodológico	27
1.9. Método general del proceso hidrológico continuo	28
2. Descripción de la zona de estudio y datos disponibles.....	31
2.1. Descripción general de la zona de estudio	33
2.2. Hidrografía	36
3. Características fisiográficas y climatológicas.....	39
3.1. Recopilación y análisis de información	39
3.2. Características fisiográficas	44
3.3. Características climatológicas	46
4. Metodología.....	61
5. Resultados.....	89
6. Conclusiones y recomendaciones	93
7. Bibliografía.....	97

Apéndice.....	99
Glosario:	115
Lista de Acrónimos.....	119

Índice de Tablas

Tabla 1.- Revisión de Modelos Hidrológicos utilizados en otros países	17
Tabla 2.- Municipios y estados en la RH 10.....	34
Tabla 3.- Poblaciones importantes en la RH 10.....	35
Tabla 4.- Subcuencas consideradas	38
Tabla 5.- Cartografía de INEGI disponible en las cuencas en estudio.....	39
Tabla 6.- Estaciones climatológicas convencionales	40
Tabla 7.- Estaciones climatológicas automáticas	40
Tabla 8.- Estaciones hidrométricas utilizadas en el estudio	41
Tabla 9.- Principales presas en la cuenca de estudio	42
Tabla 10.- Características fisiográficas de las cuencas.....	46
Tabla 11.- Valores de evaporación media mensual (mm)	50
Tabla 12.- Porcentajes de influencia de las Climatológicas.....	51
Tabla 13.- Estaciones Climatológicas convencionales base	52
Tabla 14.- Porcentajes de las diferencias de valores de lámina de precipitación acumulada con respecto al método manual de los polígonos de Thiessen	59
Tabla 15.- Intercepción de agua por parte de la vegetación.....	69
Tabla 16.- Almacenamiento máximo en depresiones del terreno.....	70
Tabla 17.- Porosidad y conductividad hidráulica para distintos tipos de suelo	70
Tabla 18.- Almacenamiento máximo en la Zona Capilar, de acuerdo a la frecuencia observada de eventos de escurrimiento	71
Tabla 19.- Infiltración máxima por tipo de suelo	72
Tabla 20.- Conductividad hidráulica de acuerdo a las características de filtración	72
Tabla 21.- Valores iniciales de los parámetros en la cuenca del río Fuerte	74
Tabla 22.- Porcentajes mensuales medios en el río Fuerte de relaciones evaporación-evapotranspiración.....	78
Tabla 23.- Valores de los parámetros calibrados en las subcuencas del río Fuerte	85
Tabla 24.- Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe.....	92

Índice de Figuras

Figura 1.- Diagrama del proceso de escurrimiento en una cuenca	4
Figura 2.- Cuencas con sistema hidrológico en operación actual.....	7
Figura 3.- Hidrograma Unitario Sintético del SCS	26
Figura 4.- Metodología de la modelación hidrológica en operación.....	28
Figura 5.- Principales corrientes de la Región Hidrológica 10.....	32
Figura 6.- Subcuencas que integran el río Fuerte	38
Figura 7.- Presas del río Fuerte	43
Figura 8.- Curvas Elevaciones-Capacidades	43
Figura 9.- Edafología de cuenca	44
Figura 10.- Cobertura Vegetal y Uso de Suelo	45
Figura 11.- Distribución espacial de la precipitación mensual (1971-2000).....	47
Figura 12.- Variación mensual de la precipitación (1971-2000).....	48
Figura 13.- Distribución anual de la Precipitación en la cuenca del río Fuerte (1971-2000).....	48
Figura 14.- Evaporación media mensual.....	50
Figura 15.- Polígonos de Thiessen.....	51
Figura 16.- Curva masa doble de las estaciones climatológicas consideradas	55
Figura 17.- Diferencias de la comparación de la precipitación media total	57
Figura 18.- Diferencias de la comparación de precipitación por subcuenca.....	58
Figura 19.- Comparación de lámina de lluvia acumulada mediante diferentes métodos, incluido el método manual de los polígonos de Thiessen (<i>mm</i>).....	59
Figura 20.- Esquema del modelo hidrológico de la cuenca del río Fuerte	62
Figura 21.- Apariencia del Modelo HEC-HMS.....	63
Figura 22.- Esquema general del modelo de cuenca en HEC-HMS.....	64
Figura 23.- Esquema conceptual del modelo SMA.....	65
Figura 24.- Almacenamientos y Capas del modelo SMA	66
Figura 25.- Componentes del “Modelo de cuenca”	73
Figura 26.- Tránsito de avenidas por vaso	76
Figura 27.- Componentes de la modelación hidrológica en HEC-HMS.....	77
Figura 28.- Evapotranspiración en el modelo de cuenca en HEC-HMS.....	78
Figura 29.- Resultados iniciales en HEC-HMS	81
Figura 30.- Calibración automática en HEC-HMS.....	84
Figura 31.- Resultados con parámetros calibrados en HEC-HMS	87
Figura 32.- Pronóstico de precipitación para 3 días	88
Figura 33.- Visualización de gastos simulados y registrados (2008-2014).....	91
Figura 34.- Esquema de automatización de datos SIH-HEC HMS.....	94

1. Introducción

En México y a nivel mundial, la cultura de la predicción hidrológica, es un tema que se ha venido impulsando, sin embargo, no es suficiente con la adquisición y adaptación de herramientas, sistemas y modelos matemáticos, que con base en las condiciones y recursos, proporcionen una herramienta operativa que coadyuve a la toma de decisiones para reducir los daños provocados por las inundaciones, herramientas que además de su operación, requieren de su seguimiento y perfeccionamiento para la mejora continua de los resultados obtenidos.

En la actualidad en el país la red de estaciones de aforo en las corrientes de las cuencas nacionales se ha visto disminuida por diversos factores, y por tanto no es posible simular de una manera satisfactoria algunos componentes del ciclo hidrológico, específicamente el escurrimiento superficial, ya que requieren de la existencia de mediciones del escurrimiento, continuos y suficientes, para la calibración de los parámetros de los modelos hidrológicos.

El estudio del escurrimiento en cuencas parte de información climatológica y meteorológica, de características fisiográficas y geomorfológicas de la cuenca, distribuidas espacialmente, para poder estimar los parámetros de calibración, es necesario conocer esta distribución o plantear hipótesis de uniformidad. Sin embargo, los estudios hidrológicos deben considerar esta distribución de los procesos hidrológicos implicados, lo que supone considerar la variabilidad espacial de la información sobre la cuenca. Esta consideración supone un mayor acercamiento a la realidad de los procesos físicos hidrológicos, puesto que es evidente que existe una variabilidad espacial natural de la precipitación, de la cobertura y de otros parámetros relacionados en la modelación hidrológica. En particular el proceso de infiltración en zonas áridas es de gran importancia, ya que se puede favorecer la recarga de acuíferos o perderse el agua por evaporación en la superficie. Por lo tanto, es una gran ventaja el empleo de los modelos distribuidos respecto a los modelos agregados, empleados habitualmente; sin embargo, los primeros llegan a un notable incremento de complejidad en su aplicación, asociado, principalmente, a un aumento de información requerida para su modelación, aunque atenuada con el uso de equipos de cómputo con mayor velocidad y capacidad de almacenamiento.

Actualmente en México, se trabaja muy poco y de manera ocasional, en algunas pocas instituciones académicas o de investigación con este tipo de modelos continuos, o se emplean, principalmente, modelos comerciales, donde se pierde el conocimiento y la experiencia de cómo hacerlo y la flexibilidad en el uso, por lo que hay muy pocos aportes propios, a veces difíciles de incorporar.

Debido a lo anterior, y con el objeto de avanzar en la aplicación de las técnicas de modelación hidrológica en tiempo real en México y que los resultados pudieran emplearse en la prevención de situaciones de emergencia, se planteó la necesidad de realizar una modelación hidrológica continua en una de las cuencas principales del país.

Las características hidrológicas de las cuencas de México son muy variables, además que la disponibilidad de la información hidrometeorológica no siempre es la ideal, debido a ello no todos los modelos hidrológicos son aplicables; por lo anterior, es preferible contar con diversas herramientas informáticas que faciliten la simulación de los procesos lluvia-escorrentamiento, tales que satisfagan las necesidades de la simulación hidrológica necesaria en cada caso.

A través del tiempo, y en particular en la última década, la red de medición y monitoreo hidrometeorológico ha estado cambiando, por lo que se requiere estar actualizando los distintos sistemas de modelación hidrológica que se tienen, con el fin de considerar las condiciones hidrometeorológicas más recientes que se tengan, además de que algunos fenómenos meteorológicos, tal es el caso del huracán Alex en 2010, han cambiado las condiciones de algunas cuencas del país. También debe darse cabida a los avances tecnológicos aplicables en nuestro país, orientados a la modelación hidrológica, esto es, desarrollos e investigaciones tanto públicos, como privados.

Modelación hidrológica

La modelación hidrológica es una simplificación o representación conceptual de una parte del ciclo hidrológico. Los modelos hidrológicos utilizan bases físicas y métodos empíricos para convertir la precipitación en escurrimiento y describir el flujo de agua sobre la superficie terrestre (y en algunos casos dentro del suelo y a través del subsuelo), y el camino del agua una vez que ha ingresado a un sistema de ríos. Comúnmente la modelación hidrológica se utiliza para estimar el escurrimiento en una cuenca para proyectos de diseño hidrológico e hidráulico, es decir, la aplicación más utilizada de los modelos hidrológicos es para determinar la avenida o gasto de diseño en un sitio

determinado, sin embargo, también puede tener otros propósitos como es el pronóstico de avenidas en ríos.

El proceso de transformación de lluvia en escurrimiento

El ciclo hidrológico se desarrolla a nivel global, alimentado por una innumerable cantidad de subprocesos que ocurren en forma simultánea en todo el planeta, pero rara vez interesa un estudio global del ciclo hidrológico. En cambio, tiene mucha aplicación el estudio hidrológico teniendo como unidad básica a la cuenca, dentro de la cual ocurre el proceso de transformación lluvia-escurrimiento. En otras palabras, se estudia el proceso por el cual el agua de lluvia que cae sobre una cuenca, se mueve sobre y dentro de esta, generando hidrogramas subterráneos o superficiales, cuyos volúmenes y picos interesa conocer.

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre, una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada, sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca. Conviene dividir estos caminos en tres clases: escurrimiento superficial, escurrimiento sub-superficial y escurrimiento subterráneo. La **Figura 1** ilustra el proceso.

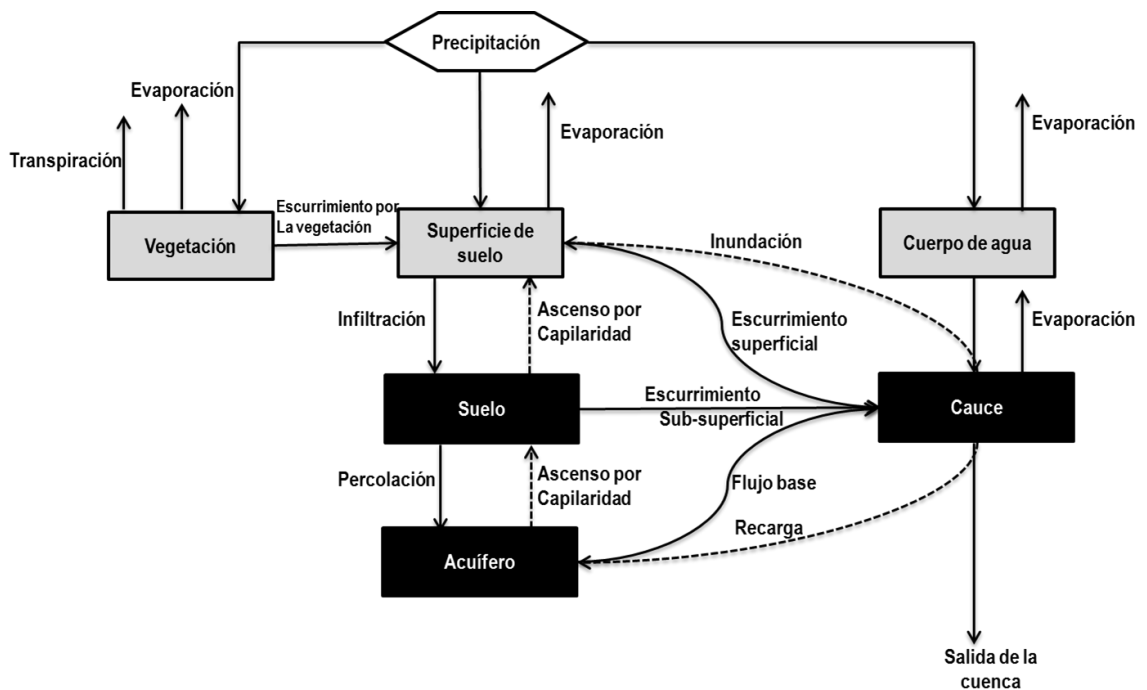


Figura 1.- Diagrama del proceso de escurrimiento en una cuenca
 Fuente: Elaboración propia basado en la figura del Manual de Referencia Técnica del HEC-HMS, 2000

Una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie. Este escurrimiento, llamado flujo en la superficie del terreno, se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos (se entiende por cauces definidos a aquellos que no desaparecen entre dos tormentas sucesivas). En su trayectoria hacia la corriente más próxima, el agua que fluye sobre el terreno se sigue infiltrando, e incluso se evapora en pequeñas cantidades. Una vez que llega a un cauce bien definido se convierte en escurrimiento en corrientes.

El flujo sobre el terreno, junto con el escurrimiento en corrientes, forma el escurrimiento superficial. Una parte del agua de precipitación que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él. A esta parte del escurrimiento se le llama escurrimiento sub-superficial; la otra parte, que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, se denomina escurrimiento subterráneo.

De los tres tipos de escurrimiento, el superficial es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca. Por ello está relacionado directamente con una tormenta particular y entonces se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y que constituye

el escurrimiento directo. El escurrimiento subterráneo es el que de manera más lenta llega hasta la salida de la cuenca (puede tardar años en llegar), y, en general, difícilmente se le puede relacionar con una tormenta particular, a menos que la cuenca sea demasiado pequeña y su suelo muy permeable. Debido a que se produce bajo el nivel de la superficie, es el único que alimenta a los cauces cuando no hay lluvias y por eso se dice que forma el escurrimiento base.

El escurrimiento sub-superficial puede ser casi tan rápido como el superficial o casi tan lento como el subterráneo, dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo; por ello es difícil distinguirlo de los otros dos. Cuando es relativamente rápido se le trata junto con el escurrimiento superficial y, cuando es relativamente lento, se le considera parte del subterráneo.

La clasificación anterior, aunque ilustrativa, no deja de ser arbitraria. El agua puede comenzar su viaje hacia la corriente como flujo superficial e infiltrarse en el camino, terminando como escurrimiento sub-superficial o subterráneo. A la inversa, el escurrimiento sub-superficial puede emerger a la superficie si en su camino se encuentra con un estrato muy permeable que aflora en una ladera (vertiente). Lo importante en realidad es determinar la velocidad de respuesta de una cuenca ante la ocurrencia de una tormenta, pues esto es lo que determina la magnitud de las correspondientes avenidas.

El modelo lluvia-escurrimiento

El proceso de transformación lluvia-escurrimiento, es sumamente complejo y requiere de una idealización a través de un modelo que simplifique suficientemente el sistema como para poder simular conceptualmente sus partes. Dentro del mismo se pueden identificar dos procesos claramente independientes desde el punto de vista conceptual, como son el proceso de producción y el de transferencia. El primero, está asociado al mecanismo por el cual sólo una parte de la precipitación llega en forma rápida a la salida de la cuenca, ya que el resto queda retenido, se evapora o se infiltra y llega a la salida de la cuenca, pero ya como flujo subterráneo. El segundo, está relacionado con el recorrido que el agua realiza desde los distintos puntos de la cuenca hasta la salida de la misma.

En síntesis, el componente de producción en un modelo de transformación lluvia-escurrimiento se encarga de estimar el porcentaje del volumen total caído sobre la cuenca como precipitación que se convierte en escurrimiento a la salida de la misma. Por

su parte, el componente de transferencia se ocupa de establecer la forma en la cual llega repartido en el tiempo ese volumen a la salida de la cuenca, obteniendo así, el hidrograma de escurrimiento directo en la sección de salida de la cuenca.

En cuencas intermedias y grandes, para realizar el análisis del proceso de transformación lluvia-escurrimiento, normalmente se subdividen en subcuencas. Entonces, se determina el hidrograma de salida de cada subcuenca y luego, se transita la avenida hasta la salida de la cuenca. Este proceso se denomina tránsito de avenidas. Esto es, el proceso por el cual el escurrimiento de agua a la salida de la subcuenca viaja hacia aguas abajo del río, alterándose el hidrograma de una sección del mismo, a la sección siguiente. Para este tipo de casos se implementan los modelos de tránsito de avenidas o crecientes. Los mismos tienen por objetivo calcular el hidrograma en una sección del río, conociendo el hidrograma en otra sección, aguas arriba del mismo.

Entonces los modelos hidrológicos pueden ser basados en eventos, que simulan el comportamiento de un sistema hidrológico durante un evento de precipitación, y por eso requieren especificación de todas las condiciones al inicio del evento; o continuos, cuando se hace una simulación continua se emplea un método que cuantifique los cambios de la humedad del suelo entre eventos de precipitación. Un modelo que intenta simular tanto el comportamiento en períodos de precipitación o en ausencia de ésta, es el modelo Soil Moisture Accounting (SMA), el cual está integrado en el HEC-HMS.

Antecedentes

En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), desde 1998, tiene implementado un Sistema de Pronóstico en Ríos (SPR), que integra la medición en las estaciones hidrométricas existentes, infraestructura de recopilación de datos climatológicos, a través del Sistema de Información Hidrológica (SIH) e información meteorológica.

El SPR es la integración de modelos conceptuales, datos en tiempo real y características de cuencas y ríos, que permite la generación de pronósticos de avenidas, tanto en condiciones de emergencia como en situaciones de planificación del futuro, aprovechamiento de los recursos hídricos, en un sistema en el que las condiciones hidrológicas y meteorológicas son registradas y transmitidas a un centro de pronóstico (estación de trabajo), permanentemente, en tiempo real, su objetivo principal es obtener

pronósticos a corto, mediano y largo plazo, tanto de gastos y niveles en sitios definidos, que permitan prever las situaciones que se puedan presentar, al comparar los resultados con las capacidades o niveles máximos admisibles, que puedan causar problemas, y así tomar las decisiones pertinentes de manera oportuna.

La **Figura 2** muestra las cuencas del país que cuentan con un sistema hidrológico en operación actual de simulación continua.

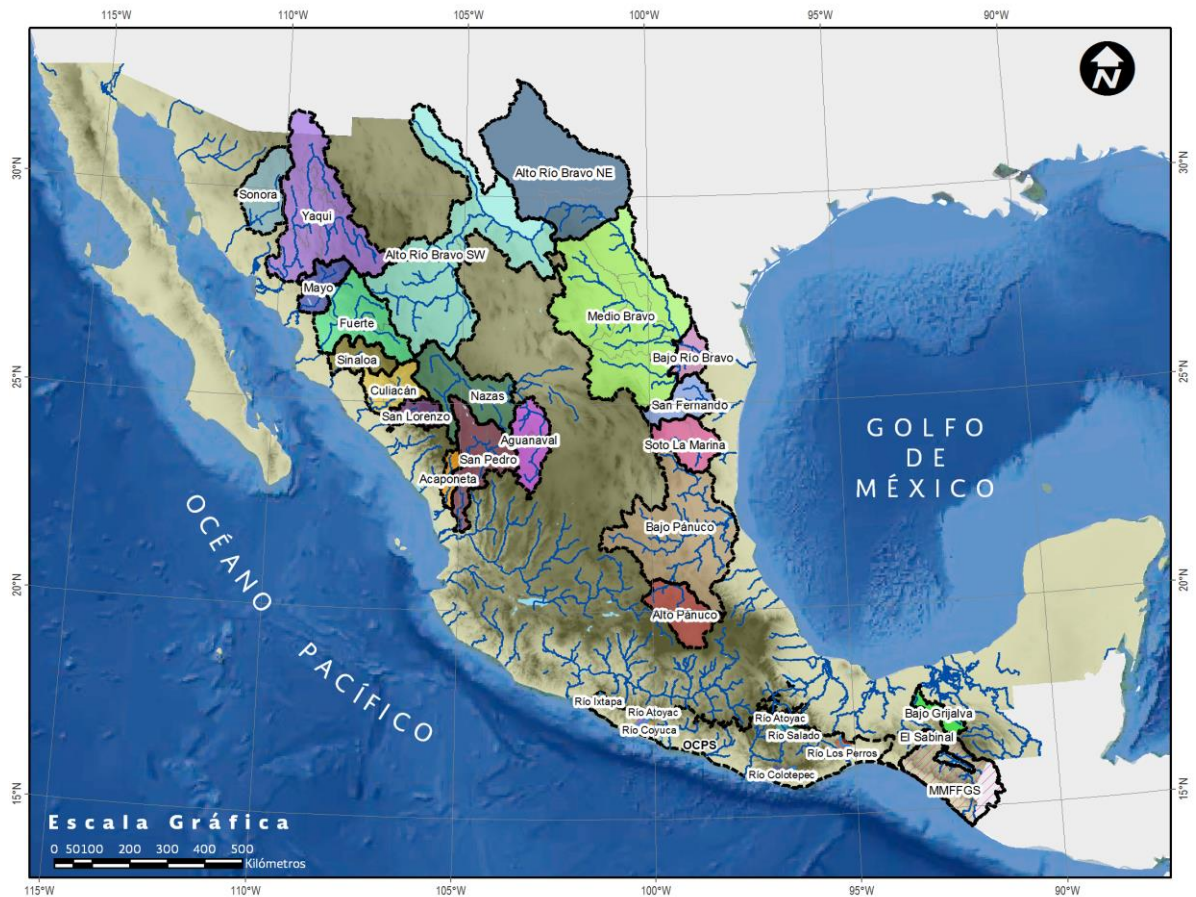


Figura 2.- Cuencas con sistema hidrológico en operación actual

Fuente: Elaboración propia

Actualmente el SPR está implementado y en operación en las principales cuencas del Norte de México, incluyendo las del río Bravo, Sonora, Yaqui, Mayo, Fuerte, Sinaloa, Culiacán, San Lorenzo, San Pedro, Acaponeta, Nazas, Aguanaval, San Fernando, Soto La Marina y Pánuco, lo que representa el 36% de la extensión total de nuestro territorio, en lo que respecta a la zona sureste del país, debido a los constantes daños causados por las inundaciones a la población y las pérdidas económicas y a la necesidad de informar a las autoridades correspondientes, de manera confiable y oportuna, la ocurrencia de

eventos extremos, se ha implementado un Sistema de Alerta Temprana (SAT) en el río El Sabinal, que abarca la zona urbana de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Dicho sistema es conocido como FEWS (por su acrónimo en inglés, que significa sistema de pronóstico de alerta temprana), el cual, opera de manera automática con la información suministrada por medios electrónicos en tiempo real, análogamente se tiene en operación otro SAT denominado: Sistema Guía de Inundaciones Repentinas México-Mozotal (MMFFGS). Recientemente se ha extendido el desarrollo del SPR a ríos del sur del país, en Guerrero y Oaxaca, como los comprendidos dentro del Organismo de Cuenca Pacífico Sur, que incluye a los ríos Ixtapa, Atoyac, Coyuca, Salado, Colotepec y Los Perros.

Pero como todas las modelaciones están basadas en ciertas consideraciones y condiciones, y debido a los cambios que han ido experimentándose en las cuencas, como ya se mencionó, que implican cambios tanto en uso de suelo, en la cobertura vegetal y en la red de medición hidrometeorológica, en algunos casos en el régimen del escurrimiento, con la construcción de presas o el desvío de cauces, se hace necesario actualizar los sistemas para la modelación hidrológica los ríos, con la información más actual, a fin de considerar dichos cambios en los modelos matemáticos empleados que intentan representar las condiciones hidrológicas e información más recientes.

Por otra parte, el desarrollo propio de una modelación hidrológica continua, nos ayudará a tener una mejor visión de las necesidades que se tienen enfocadas al pronóstico de las avenidas en los ríos y de la respuesta de las cuencas hidrológicas, y al obtener ese conocimiento, podremos mejorar los sistemas de pronóstico hidrológico.

1.1. Planteamiento del problema

Los sistemas de pronóstico hidrológico suelen ser extremadamente complejos y difíciles de cuantificar debido a que hay fenómenos en la naturaleza que quizás nunca se entiendan en su totalidad. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento acabado, pueden representarse en forma simplificada por medio de modelos conceptuales que traten de dar respuesta a cada una de las partes del sistema hidrológico. En este sentido, un sistema es un conjunto de partes interconectadas entre sí que forman un todo (Chow, et.al. 1994). Desde este punto de vista, el ciclo hidrológico puede considerarse como un todo, compuesto por precipitación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y

otras fases de este ciclo. Este sistema global a la vez puede agrupar parte de sus elementos, conformando subsistemas menores que faciliten su comprensión. El objetivo del análisis de un sistema hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir sus salidas (Chow, et al., 1988).

Una de las herramientas utilizadas en el mundo, que intentan disminuir la exposición de las personas que ocupan zonas propensas a inundaciones, son los llamados sistemas de alerta temprana, apoyados en modelos matemáticos, que simulan fenómenos hidrológicos y meteorológicos, de tal manera que se puedan estimar de manera anticipada, valores probables de las avenidas y sus niveles de agua, antes de que se rebase la capacidad del cauce y utilizar estas previsiones como elementos de apoyo a los tomadores de decisiones para emprender acciones y prevenir daños ante las amenazas de inundaciones.

Conforme a lo anterior, se pretende realizar la modelación hidrológica continua de una cuenca de México de acuerdo a la información más reciente disponible, en cuanto a la infraestructura y a la red de medición. La modelación hidrológica continua tendrá como fin el pronóstico de avenidas o crecientes en ríos que puedan afectar a la propia infraestructura y a la población en general.

Con el paso del tiempo las redes de medición hidrometeorológica, la infraestructura hidráulica para el manejo y control de los escurrimientos en las cuencas e incluso el clima, pueden variar, por lo que las modelaciones hidrológicas realizadas en cuencas, podrían dejar de ser representativas al cambiar tanto los parámetros utilizados en la modelación hidrológica, estaciones hidrometeorológicas base de medición, han sufrido cambios en los últimos años. Por lo que existe la necesidad de revisar y actualizar los sistemas de pronóstico hidrológico que actualmente se encuentran en operación, y contar con herramientas de simulación que reflejen las condiciones hidrometeorológicas más actuales que ayuden a prevenir de forma anticipada sobre la ocurrencia de avenidas en los ríos que pudieran causar afectaciones en sitios de particular interés.

1.2. Justificación

México es un país de amplia extensión territorial, y por lo mismo, con diferentes condiciones hidrometeorológicas, pues por una parte se ve expuesto a diferentes fenómenos naturales extremos, como sequías, sobre todo en la parte centro y norte y a la

incidencia de ciclones tropicales, entre otros eventos meteorológicos que propician precipitaciones intensas, haciendo que los suelos de las cuencas se saturen, favoreciendo los escurrimientos de agua, presentándose avenidas que rebasan la capacidad de los cauces, lo que repercute en inundaciones. Año con año los ríos nacionales se ven afectados por fenómenos meteorológicos extremos; si bien, dichos fenómenos no se pueden evitar, los daños que provoca su ocurrencia si se pueden disminuir, por ello se necesita del diseño, implementación, operación y mantenimiento de herramientas para detectar avenidas que puedan presentarse y con base en esto, dar alertas oportunas que eviten que los ciudadanos puedan verse afectados o aminorar los efectos que son causados por las avenidas en los ríos.

Debido a lo anterior, diversas herramientas de predicción hidrológica ya han sido desarrolladas e implementadas en el país. Originalmente, dichos sistemas respondieron a las necesidades y condiciones particulares de los lugares donde tuvieron su origen y han sido adaptados a otros ríos en otras partes del mundo. En ese sentido, por una parte se ha tomado ventaja del trabajo realizado, países como México han podido adaptar algunas de estas herramientas, pero a la vez se ha creado dependencia tecnológica con otros países y organizaciones, por todo lo que implica tener dependencia tecnológica, y debido a que las condiciones del país son muy diversas, y no todos los modelos de simulación son adaptables a todas las cuencas, se plantea diseñar un sistema de pronóstico hidrológico en una cuenca instrumentada, para comparar los resultados previstos con otro sistema ya implementado, y que con base en las condiciones hidrometeorológicas registradas en tiempo real, se puedan obtener predicciones a corto, mediano y largos plazo, de gastos y niveles en sitios definidos de una cuenca hidrológica, información que permite prever las situaciones en las que se pueden presentarse problemas de inundaciones, al comparar los resultados con las capacidades o niveles máximos, y ayudar así, a la toma de decisiones pertinentes; todo ello, en función de las características fisiográficas y el contenido de humedad del suelo en la cuenca, lo cual condiciona la respuesta de la misma, la precipitación registrada en tiempo real y la pronosticada, sobre la superficie de captación, para prevenir situaciones de emergencia. A continuación se resumen algunos puntos tomados en cuenta para definir el objetivo de este trabajo:

- Las modelaciones hidrológicas desarrolladas en décadas anteriores (1996-2000), que se encuentran en operación en el país (<http://www.conagua.gob.mx/spr>), fueron implementadas en una plataforma informática de carácter privado, la cual no se ha podido actualizar a los sistemas más actuales.
- Con el paso del tiempo, las redes de estaciones hidrometeorológicas base empleadas en la modelación han ido cambiando y difieren con las que actualmente se encuentran en operación, por lo que no representan las condiciones hidrometeorológicas más actuales.
- El formato de ingreso de datos no está sistematizado y la configuración del mismo mucho menos, por lo que, a pesar de haberse desarrollado capacidades tecnológicas (manejo de software) y de modelación hidrológica, se tiene que emplear ese formato.
- Debido a los avances en el desarrollo del software y de los sistemas de información actuales, se propone modelar hidrológicamente una cuenca instrumentada y que actualmente opera de forma continua (río Fuerte), para obtener predicciones a corto plazo, de avenidas en sitios de interés.
- Técnicas de modelación hidrológica continua, como la que se presenta en este trabajo pueden ser aplicadas a otras cuencas, o bien, pueden sentar las bases para la implementación y desarrollo de otros modelos de simulación hidrológica que se adapten mejor a los sistemas de ríos.

1.3. Objetivo general

Realizar la modelación hidrológica continua de una cuenca de México para fines de pronóstico de avenidas en ríos.

1.4. Hipótesis

- ✓ La información registrada en las estaciones puntuales, es representativa de la cuenca, por lo que se asume una distribución espacial.
- ✓ La intensidad de la precipitación en las estaciones convencionales tiene una distribución similar a la registrada de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), por lo que se considera la distribución temporal registrada en estas estaciones como representativa de la cuenca.

- ✓ La forma del hidrograma de una cuenca se puede caracterizar como hidrograma unitario para aplicarlo a otros eventos de lluvia.

1.5. Delimitación espacio-temporal

Se plantea realizar la modelación hidrológica en la cuenca del río Fuerte que ya cuenta con un sistema hidrológico continuo implementado y en operación, al tratarse de una cuenca instrumentada, con estaciones climatológicas, convencionales y automáticas e hidrométricas, y con el control de los almacenamientos en tres presas, se pueden calibrar los parámetros del modelo hidrológico que se utilice, además de validar los resultados al compararlos con los eventos ocurridos en los años anteriores.

Se podrían extender las modelaciones hidrológicas continuas y la metodología, como las propuestas en este trabajo, a otros sistemas o cuencas del país, ya sea que cuenten con un sistema hidrológico continuo, en operación e incluso a otras que aún no tengan desarrollada una modelación hidrológica continua.

1.6. Estado del Arte

La simulación hidrológica data de principios del siglo XIX, pero no fue hasta la década de los 60 del siglo XX, con la llegada también de la revolución digital, que aparecen modelos de simulación como el Standford Watershed Model-SWM de Crawford y Linsley en 1966 (Singh, 1995); sin embargo, las computadoras disponibles en ese entonces eran demasiado caras y muy lentas respecto a los estándares actuales, por lo tanto los programas eran limitados en tamaño y complejidad (Beven, 2001). Como consecuencia, la modelación hidrológica fue planteada principalmente en forma agregada (Vieux, 2004). La aparición de computadoras más potentes, la mayor disponibilidad de datos distribuidos por área, provenientes de sensores remotos y las herramientas proporcionadas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han permitido el desarrollo de este campo. Actualmente existen muchos sistemas y modelos hidrológicos para simulación en tiempo real que han sido desarrollados y documentados en la literatura universal. Sin embargo, para poder elegir alguno que pueda ser aplicado a una cuenca de México, se debe revisar que datos se requieren y, de acuerdo a sus limitaciones y características propias, tanto del modelo como de la red de datos que tenemos, tanto de infraestructura de comunicación y monitoreo mediante las redes de

observación existentes, así como de las condiciones climatológicas y meteorológicas, por lo que, dados los contrastes tan diversos que existen en las cuencas nacionales, se deberían evaluar varios modelos hidrológicos que puedan ser aplicables a nuestras condiciones y realizar una inter-comparación entre estos para elegir cual es el más adecuado a utilizar en determinada cuenca, toda vez que se haya demostrado su capacidad para el pronóstico operacional a través de su aplicación en otras cuencas con características fisiográficas y climatológicas similares.

Herramientas informáticas empleadas en la modelación hidrológica continua

Existe tanto software para la modelación hidrológica como modelos hidrológicos, el avance en el campo de la hidrología no ha sido tan significativo en las últimas décadas, pero los sistemas informáticos y de información si han tenido un gran desarrollo, por lo que las plataformas informáticas son las que han tenido un notable progreso, por lo que existe una amplia variedad de software tanto de licencia restringida como libre, que puede incluir uno o más modelos hidrológicos, a continuación se mencionan algunos ejemplos de estos tipos de plataformas que han sido y son utilizadas para la simulación hidrológica continua, sistemas que fueron desarrollados en diversas latitudes en países, como Holanda, Dinamarca, Alemania, EUA, Suecia, China, Italia, Francia, Suiza, entre otros:

- **NWSRFS-SAC-SMA, NATIONAL WEATHER SERVICE RIVER FORECAST SYSTEM - SOIL MOISTURE ACCOUNTING:** El Modelo Sacramento, desarrollado por el National Weather Service (NWS) de los EEUU, es un modelo conceptual que considera la humedad del suelo. Parametriza las características de la humedad del suelo en una forma que distribuye lógicamente la humedad aplicada en varias profundidades y estados de energía en el suelo y tiene características racionales de percolación.

<http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/homs/Components/Spanish/j04301.htm>

- **FEWS (Flood Early Warning Systems):** El Sistema de Alerta Temprana contra Inundaciones es una plataforma informática, que posee un conjunto de herramientas informáticas, elaboradas por Deltares de Holanda, en las que se provee un sistema de código abierto para el manejo de pronóstico y manejo de series de tiempo

<https://publicwiki.deltares.nl/display/FEWSDOC/Home>

- **Sistema CHPS/FEWS:** puede considerarse como la continuación del NWSRFS, de acuerdo con la página: <http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/chps/>, es una adaptación efectuada para la NWS en la plataforma FEWS, en donde se integra Modelo Sacramento
- **SHE (SYSTÈME HYDROLOGIQUE EUROPEËN):** El Sistema Hidrológico Europeo, SHE, es un sistema de modelación hidrológica de base física desarrollado en conjunto por el Instituto Danés de Hidráulica (DHI), el Instituto Británico de Hidrología y la consultora francesa SOGREAH (Abbott et al., 1986a y b). SHE simula la fase terrestre del ciclo hidrológico. Posee una arquitectura modular. Es un sistema de modelación distribuida espacialmente. Los procesos hidrológicos son modelados mediante representaciones en diferencias finitas de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento; y ecuaciones empíricas para ciertos procesos. La versión actual se denomina MIKE SHE y es comercializada por DHI, que también ha desarrollado otras herramientas de simulación hidráulica, tal como MIKE FLOOD, entre otras.

<http://www.mikebydhi.com/Products/WaterResources/MIKESHE.aspx>

- **PRMS (THE PRECIPITATION-RUNOFF MODELING SYSTEM, USGS):** PRMS es un sistema de modelación hidrológica determinístico y distribuido desarrollado para evaluar los impactos de las diversas combinaciones de precipitación, clima y uso del suelo sobre los caudales, la producción de sedimentos y la hidrología de la cuenca a escala de eventos o continua en el tiempo (Leavesley et al., 2005). Su diseño modular otorga un marco flexible para la mejora del mismo. La versión 4.0.1 y su código fuente en JAVA están disponibles en la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)

http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/SW_MoWS/PRMS.html

- **HBV :** El modelo HBV fue desarrollado en Suecia, forma parte del HBV/IHMS (Sistema Integrado de Modelización Hidrológica), es un sistema computarizado para la predicción hidrológica, la simulación de la descarga, los cómputos de crecidas para proyectos, y estudios sobre cambio climático

<https://www.wmo.int/pages/prog/hwrr/homs/Components/Spanish/j04202.htm>

- **HEC-HMS (Hydrologic Modeling System):** El Sistema de Modelación Hidrológica HMS, del US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, de los EUA, está diseñado para simular el proceso lluvia-escurrecimiento mediante diversos modelos que tiene incluidos dentro de su software, por ejemplo el método para calcular las pérdidas del SCS (Soil Conservation Service, actualmente NRCS, National Resources Conservation Service), entre otros. Es capaz de modelar diferentes sistemas de cuencas, tanto rurales como urbanas, concebido para la simulación de eventos hidrológicos aislados, principalmente; sin embargo, se puede utilizar como modelo de simulación continua mediante la utilización del modelo de pérdidas llamado: SMA (Soil Moisture Accounting), que es similar al modelo Sacramento utilizado por el NWSRFS de los EUA. La información requerida para la aplicación del modelo es la siguiente:
 - Área de la cuenca y/o subcuencas
 - Tiempo de retardo (Lag)
 - Tormentas registradas en pluviógrafos u observatorios.
 - Precipitación diaria y/o horaria correspondiente a las fechas del período a simular.
 - Gastos máximos horarios y/o diarios de la creciente que se quiere simular, para poder calibrar.

Una de las ventajas de este software es su fácil de implementación, aunque si bien, no fue diseñado para simulación continua, por lo que el ingreso de los datos puede consumir tiempo, lo que operacionalmente puede ser de poco provecho, sin embargo, mediante programas externos se pueden preparar los datos de entrada. Existen ya herramientas desarrolladas para este propósito, como el caso del HEC-DSS, el software se puede descargar desde:

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

- **CWMS (Corps Water Management System):** El Sistema de Manejo del Agua del US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, es un sistema integrado de hardware y software que inicia con la recepción de datos hidrometeorológicos, cuencas hidrográficas, y el estado del proyecto. Es un sistema más robusto que HEC-HMS, ya que incluye no solo a este, sino a otras

herramientas de modelación matemática como HEC-RAS entre otros paquetes del US Army Corps of Engineers.

<http://www.hec.usace.army.mil/cwms/cwms.aspx>

- **HYDROTEL:** es un modelo hidrológico distribuido que genera series diarias de gastos, con base en series diarias de láminas de precipitación y temperatura, así como en las características fisiográficas detalladas de las cuencas. Para este propósito, la cuenca se discretiza en función del relieve y la hidrografía en unidades hidrológicas relativamente homogéneas (UHRH), con información específica sobre uso de suelo y textura del mismo. Con este modelo se puede simular en cada UHRH el escurrimiento diario mediante seis procesos. La calibración se hace por grupos de UHRH con respecto a series hidrométricas, obteniendo el mejor ajuste posible en volumen, forma y sincronización del hidrograma, al ser un modelo hidrológico distribuido, se requiere de información espacial de detalle en tiempo real, además de la topográfica. Es factible descargar la última versión disponible del software de la siguiente liga:

<http://hydrotel.codeplex.com/documentation>

- **RS MINERVE:** herramienta de reciente desarrollo y de licencia gratuita que ayuda a la modelización hidrológica-hidráulica según un concepto semi-distribuido, que incluye varios modelos hidrológicos como el HBV y Sacramento, entre otros, disponible en la página:

<http://www.crealp.ch/fr/accueil/ressources/logiciels/rs-minerve/telechargements.html>

Los ejemplos anteriores muestran tan solo algunos casos de herramientas para modelación hidrológica continua que se han ido desarrollando, puede decirse que existe un gran número de modelos aplicados a estos procesos, pudiéndose encontrar desde modelos simples de producción o transferencias a modelos más complejos que comprenden ambos procesos, más el de tránsito de crecidas. La Organización Meteorológica Mundial, ha sido una de las principales organizaciones mundiales que se ha dado a la tarea de difundir el uso y aplicación de Sistemas de Alerta Temprana, los cuales utilizan modelos matemáticos que simulan procesos hidrológicos, hidráulicos o meteorológicos. En la **Tabla 1** se presenta el listado de modelos de predicción hidrológica

e hidráulica revisados en el taller de Intercomparación de modelos de pronóstico de avenidas en septiembre de 2011 en Koblenz, Alemania.

Tabla 1.- Revisión de Modelos Hidrológicos¹ utilizados en otros países

País	Modelo(s)	*Valoración						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
Filipinas	HBV +MikeFlood/11 HEC-HMS+HEC RAS, ANUGA	2	3	2	0	0	3	3
Reino Unido	Desarrollos propios	4	5	2	1	2	5	2
Sudáfrica	Rutina propia basada en Muskingum	5	1	1	0	0	2	5
Francia	Desarrollos propios	4	5	2	0	2	5	2,4,5
China	XinAnJiang	1	2	1	0	1	3	1,2,5
Pakistán	FEWS incluye módulos Sacramento y SOBEK	2	1	2	0	2	4	6
Holanda	FEWS River Rhine (HVB+SOBEK)	2	4	1	2	1	5	2
Italia	TOPKADI	3	3	2	2	2	4	1
Finlandia	HBV-Like	2	5	2	2	2	5	2
Bavaria (Alemania)	LARSIM+WAVOS+FLUX/FLORES	2	5	2	2	2	5	2,4
Austria	FEWS, COSERO, LARSIM; DHI MikeFLOOD, HBV, HOPI, AspS	4	5	2	2	2	5	2,4
Alemania	WAVOS	2	4	2	2	1	4	2
EEUU	CHPS/FEWS, CWMS, PRMS	2	4	1	1	5	2	2,4,5
Brasil	Conceptuales y empíricos	2	3	1	2	3	1	3
México	NWSRFS, CHPS/FEWS, FFGS	2	3	1	0	1	3	3

*Valoración (leyenda):

I.-Tipo de Modelo (1, 2, 3, 4, 5)

- 1 Agregado
- 2 Semi-distribuido
- 3 Distribuido
- 4 Combinado
- 5 Únicamente rutina hidrodinámica

¹ Workshop on Intercomparison of Flood Forecasting Models. WMO, Federal Institute of Hydrology, Koblenz, Germany, September 14-16, 2011

II.-Requerimiento de datos (1, 2, 3, 4, 5)

- 1 Precipitación/gasto de aguas arriba
- 2 Precipitación + algunos datos
- 3 Precipitación horaria, datos meteorológicos mensuales, MDE, uso de suelo
- 4 Precipitación horaria, datos meteorológicos mensuales, MDE, uso suelo, información de nieve
- 5 Precipitación horaria, datos meteorológicos mensuales, MDE, uso de suelo + información climatológica compleja de nieve

III.-Tipo de Modelo (0/1/2)

- 0 Sin modelo
- 1 Modelo hidrológico
- 2 Modelo hidráulico (Ecs. de Sain Venant, Ecs. de la Onda Cinemática)

IV.-Pronóstico Probabilístico

- 0 Sin pronóstico probabilístico
- 1 Regresión Quantil, etc.
- 2 Ensamblés

V.-Pronóstico de precipitación

- 0 Sin pronóstico de precipitación
- 1 Pronóstico de precipitación
- 2 Radar Nowcast

VI.-Esfuerzos institucionales y operacionales

- 1 Bajo
- 2
- 3 Intermedio
- 4
- 5 Alto

VII.-Situación climática (1, 2, 3, 4, 5)

- 1 Intermedia
- 2 Intermedia + nieve
- 3 Trópicos
- 4 Alpino
- 5 Semiárido a árido
- 6 Tipo Monzón

Síntesis

Como puede apreciarse en la tabla anterior, en México, se han implementado varios modelos aplicados a estos procesos de Sistemas de Alerta Temprana, entre los que podemos mencionar:

- **NWSRFS-SAC-SMA**

En 1996 la CONAGUA, a través del Programa de Modernización del Manejo del Agua (PROMMA), estableció un convenio con el National Weather Service (NOAA-NWS) de transferir el “Sistema de Pronóstico en Ríos”, (RFS por sus siglas en Inglés), utilizado en EUA en cuencas mexicanas, sistema que requería la entrada de datos hidrológicos y climatológicos en tiempo real, este sistema esta implementado en 19 cuencas del norte, noroeste y centro del país.

- **CHPS/FEWS (Flood Early Warning System):**

En la cuenca urbana del río El Sabinal, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

- **Mexico Mozotal Flash Flood Guidance System (MMFFGS):**

Sistema Guía de Avenidas Repentinas México-Mozotal, en la Costa de Chiapas y parte de la cuenca del río Grijalva.

1.7. Marco conceptual

Empleo de relaciones lluvia-escorrimento para la determinación de avenidas

Para estimar avenidas se pueden utilizar varios enfoques generales como son los métodos hidrométricos e hidrológicos. Los llamados métodos hidrológicos se constituyen por las relaciones lluvia escurrimiento.

Métodos hidrométricos

La aplicación de la llamada ecuación para el análisis hidrológico de frecuencias propuesta por Chow

$$X = \bar{X} + KS$$

Se aplica tanto al caso de gastos o lluvias máximas anuales, \bar{X} y S se refieren a la media y desviación estándar de los datos de la muestra, K se define como el factor de frecuencias y depende del tipo de Función de Distribución de Probabilidades (FDP) que se emplee; entre las más aceptadas en México se tiene: la Distribución Normal, Gumbel y Gumbel para dos poblaciones, Log Normal y Pearson tipo III, entre otras.

Su aplicación al caso de una muestra de gastos máximos anuales, queda supeditada a la existencia de medición de gastos máximos instantáneos en la corriente; método que es empleado para el diseño hidráulico, asociado a un Periodo de Retorno, a lo que se conoce como evento de diseño; para el caso que nos ocupa, si bien se cuenta con

medición hidrométrica, la modelación hidrológica continua de este trabajo tiene por objeto el poder pronosticar avenidas de manera anticipada, es decir, antes de que sean registradas en las estaciones hidrométricas, por tal motivo, se aplican relaciones lluvia-escorrimento, para que a partir de la precipitación registrada en la cuenca, y con la modelación hidrológica de la cuenca, que intenta representar el camino que sigue el agua en el ciclo hidrológico, dado que la cuenca tiene un tiempo de respuesta a la precipitación ocurrida para que se transforme en escurrimiento y que está condicionado tanto por las características fisiográficas propias de la cuenca, el contenido de humedad del suelo e intensidad de la propia precipitación.

Métodos Hidrológicos

Los métodos hidrológicos expresados en modelos y relaciones lluvia-escorrimento, comúnmente se emplean en eventos de diseño, cuando no se dispone de datos hidrométricos y que son de conceptualización simple, pero que para fines de este trabajo que persigue el poder predecir tanto la forma y gasto máximo de las avenidas, para lo cual se requieren tener registros de gastos y precipitaciones simultáneas para permitir dicho objetivo.

Con las relaciones precipitación-escorrimento, se tienen expresiones empíricas, que requieren la definición de las características fisiográficas de la cuenca, y la intensidad máxima de la precipitación, como ejemplos de estas relaciones podemos mencionar: la fórmula Racional, el Hidrograma Unitario Triangular o el Método de Chow; además de estos métodos, existen muchos otros como el método del SCS, el cual está incluido dentro del Modelo HEC-HMS, método que se emplea en el presente trabajo y que a continuación se describe:

Método del SCS²

El método se basa en la suposición de que en un evento de lluvia, toda la precipitación ocurrida antes del inicio del escurrimiento representa las abstracciones iniciales, I_a . De esa manera, la precipitación total se distribuye entre las abstracciones iniciales, I_a , el escurrimiento, Q y la infiltración, F . Los autores del método, basados en datos de

² Soil Conservation Service, actualmente NRCS (National Resources Conservation Service)

pequeñas cuencas, encontraron que $Ia = 0.2 S$, en donde S es la infiltración potencial en mm, y en consecuencia:

$$Pe = P - Ia = P - 0.2 S$$

En donde P es la lluvia total del evento. Por lo que si sabemos que $Q = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S}$

, sustituyendo y simplificando, se obtiene: $Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$

Características fisiográficas de la cuenca hidrológica

El ciclo hidrológico es el concepto fundamental de la hidrología y la “cuenca hidrológica” es su unidad básica de estudio. Con lo anterior se entiende que uno de los primeros pasos en la modelación hidrológica es la obtención de las características fisiográficas de la cuenca.

La cuenca de drenaje de una corriente es el área que contribuye al escurrimiento y que proporciona parte o todo el flujo de la corriente principal y sus tributarios. Está limitada por su parteaguas, que es una línea imaginaria que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación. El parteaguas o también llamado divisoria está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida.

El escurrimiento de agua de una cuenca depende de diversos factores siendo uno de los más importantes las características fisiográficas de la misma. Algunas de esas características son: el área de la cuenca, tipo de suelo y cobertura vegetal (que condicionan el volumen de escurrimiento); topografía, pendiente de la cuenca y cauce principal, elevación y red de drenaje, longitud del cauce principal, etc. (que condicionan la velocidad de respuesta).

Área de la cuenca

El área drenada de una cuenca es aquella en su proyección horizontal encerrada por el parteaguas. Por lo general esta área, expresada en km^2 (las áreas pequeñas a veces en

hectáreas), antiguamente se determinaban con un planímetro, pero a partir de la incorporación de los llamados Sistemas de Información Geográfica (SIG), se pueden obtener del polígono de la cuenca. Para fines de realizar la modelación hidrológica, se delimitaron las cuencas en los puntos donde convenía conocer la estimación de las avenidas, para delimitar la correspondiente área de aportación, como es el caso de las tres presas y en donde se tienen estaciones hidrométricas en operación, además para aplicar el modelo de lluvia-escurrencimiento se hizo necesario el trazo del parteaguas en la cuenca baja, resultando las subcuencas que se ilustran en la **Figura 6**.

Pendiente del cauce principal

Uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta es la pendiente del cauce principal. En general, la pendiente de un tramo de río se considera como el desnivel entre los extremos del tramo dividido, por la longitud horizontal de dicho tramo. Así

$$S = \frac{H}{L}$$

dónde:

H: desnivel entre los extremos del tramo de cauce, en m

L: longitud del tramo de cauce, en m

S: pendiente del tramo de cauce

La definición anterior se aproxima más a la pendiente real del cauce conforme disminuye la longitud del tramo por analizar. Una manera más real de valuar la pendiente de un cauce es compensándola, al aceptarla como la pendiente de una línea que se apoya en el extremo final del tramo por estudiar y cuya propiedad es contener la misma área abajo de ella como en su parte superior, respecto al perfil del cauce.

Otra forma de valuar la pendiente, y que trata de ajustarse a la pendiente real, es usando la ecuación que proponen Taylor y Schwartz, la cual se basa en considerar que el río está formado por una serie de canales con pendiente uniforme, cuyo tiempo de recorrido es igual al del río. Si se subdivide el río en estudio en *m* tramos iguales de longitud Δx , se obtiene para cada tramo su pendiente respectiva. La ecuación que proponen Taylor y Schwartz es:

$$S = \left[\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

dónde:

m : número de tramos, de igual longitud

S_m : pendiente del tramo

Análogamente, en el caso de que las longitudes de los tramos no sean iguales, como en el caso de este estudio, se tiene:

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

dónde:

L : longitud total del cauce analizado

l_m : longitud del tramo y

Esta ecuación tiende a una mayor aproximación cuanto más grande sea el número de segmentos en los cuales se subdivide el tramo del río por analizar.

Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda una partícula de agua en viajar desde el punto más alejado de la cuenca, hasta el sitio de interés.

Para definir el valor de la lámina de lluvia de diseño, de acuerdo con un modelo de tormenta planteado, se requiere conocer cuál es la duración de la tormenta más desfavorable por analizar, para ello, dado que el gasto de escurrimiento adquiere su máximo valor (gasto pico), cuando el tiempo de tránsito de escurrimiento es igual al tiempo de concentración (T_c), es común aceptar que la duración de la tormenta sea igual al T_c . En el empleo de modelos lluvia-escurrimiento, es común relacionar la duración de la llamada lluvia en exceso (D_e) con el tiempo de concentración de la cuenca, $T_c = D_e$, con lo que se obtiene el valor del gasto máximo.

En la práctica, es muy difícil calcular con precisión el tiempo que tarda el agua en escurrir por la superficie hasta llegar a los puntos de estudio; existen diversas

expresiones que permiten estimar dicho tiempo, entre ellas destacan las de Rowe, Kirpich y SCS²

Ecuación de Rowe (Fuentes y Franco, 1999)

$$T_c = \left(\frac{0.87L^3}{D} \right)^{0.385}$$

en donde:

T_c : Tiempo de concentración, en h

D : Desnivel entre el punto más alejado y la salida de la cuenca, en m

L : Longitud entre los puntos antes mencionados, en km

Ecuación de Kirpich (Aparicio 1999)

$$T_c = 0.0003245 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$$

en la que:

S : Pendiente media del cauce principal

L : Longitud del cauce principal, en m

Ecuación del Soil Conservation Service²

$$T_c = \left(\frac{L^{1.15}}{3085D^{0.38}} \right)$$

dónde:

L : Longitud del cauce principal, en m

D : Desnivel topográfico, en m

Tiempo de retraso

El tiempo de retraso, en inglés Lag, es el tiempo transcurrido desde el centro de gravedad del hietograma de precipitación efectiva hasta el gasto pico del hidrograma, existen expresiones empíricas para determinar el tiempo de retraso, valor que debe ser calibrado conforme los registros hidrométricos. Para fines prácticos y conforme a las recomendaciones generales de los libros de hidrología, se considerara como el 60% del tiempo de concentración, el tiempo de retraso de la cuenca suele expresarse en horas o minutos:

Numero escurrimiento de (N)

El número de escurrimiento N, depende del uso, tipo y composición del suelo; así como, del tratamiento, pendiente y estado de humedad del terreno (*inciso I del Apéndice*). Es importante conocer este valor porque en función de este y de la lluvia total se puede estimar la lluvia efectiva para un evento determinado.

Distribución temporal del escurrimiento (hidrograma unitario)

Una manera de obtener hidrogramas en un sitio dado, es estimar un hidrograma unitario, a partir de los registros en estaciones hidrométricas o sintéticos, conociendo las características fisiográficas y climatológicas de la cuenca.

Para la forma de los hidrogramas, se utilizó la forma del hidrograma sintético del SCS siguiente:

t / t_p	Q / Q_p
0.00	0.00
0.10	0.02
0.20	0.08
0.30	0.16
0.40	0.28
0.50	0.43
0.60	0.60
0.70	0.77
0.80	0.89
0.90	0.97
1.00	1.00
1.10	0.98
1.20	0.92
1.30	0.84
1.40	0.75
1.50	0.65
1.60	0.57
1.80	0.43
2.00	0.32
2.20	0.24
2.40	0.18
2.60	0.13
2.80	0.10
3.00	0.08
3.50	0.04
4.00	0.02
4.50	0.01
5.00	0.00

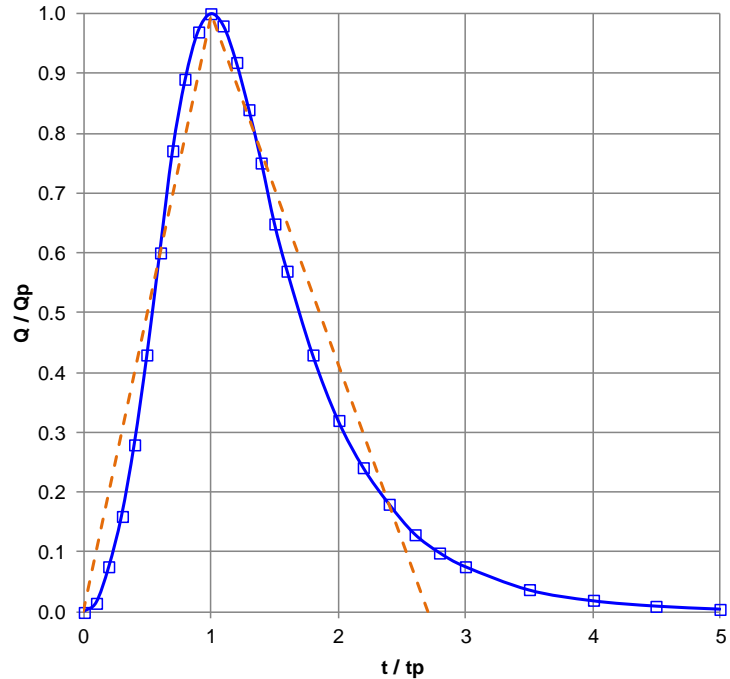


Figura 3.- Hidrograma Unitario Sintético del SCS

Modelación hidrológica

Diversos investigadores han venido desarrollando en hidrología, una técnica conocida como *modelación hidrológica*, que trata de reproducir mediante un modelo (generalmente matemático) el comportamiento de los procesos hidrológicos en un área determinada. Además de abarcar campos como los sistemas de alerta temprana contra inundaciones, control de la calidad del agua, erosión de los suelos, transporte y deposición de sedimentos, diseño y operación de sistemas de recursos hídricos, evaluación de alternativas de manejo del suelo, etc.

Con la modelación hidrológica es posible realizar la transformación de la precipitación a escurrimiento, a través de los diferentes componentes del sistema. Por tanto, es necesario tener calculada la precipitación, debido a que la magnitud y duración de esta y su distribución temporal y espacial, son factores dominantes en la determinación de la avenida resultante.

Los modelos de simulación hidrológica, según el evento que se simula, pueden ser de dos tipos:

Un modelo de eventos simula un proceso hidrológico aislado: “Con qué lámina de precipitación se produciría una avenida (hidrograma)”. Estima qué parte de la precipitación será precipitación neta, y con esta, el escurrimiento directo que se genera; el resto de la precipitación (abstracciones o pérdidas) no se considera.

Un modelo continuo intenta simular la evolución de todo el proceso hidrológico. Estima qué parte de la precipitación queda retenida superficialmente (intercepción en la vegetación y depósitos de agua), qué parte se infiltra en el suelo y qué parte genera escurrimiento superficial. Pasada la precipitación debe considerar si la que se almacenó en el suelo se evapotranspira o si se infiltra hacia los acuíferos. Finalmente, desde éstos puede perderse hacia una circulación profunda (fuera del alcance del modelo) o alimentar los cauces.

Un modelo de eventos suele trabajar desde unos minutos a varios días, mientras que en los modelos continuos son habituales a partir del día, periodos desde meses hasta varios años.

1.8. Diseño metodológico

Para la simulación en tiempo real se requiere que las condiciones hidrometeorológicas sean registradas y transmitidas continuamente a un centro de pronóstico, y de ahí procesadas en un sistema que en esencia debe de contar con los siguientes elementos metodológicos para lograr obtener los productos de gastos y niveles en los ríos:

- Definición de la cuenca de estudio
- Recopilación de información
- Análisis de datos de precipitación
- Distribución temporal del escurrimiento (hidrograma unitario)
- Tránsito hidrológico (simulación de operación de presas, en su caso tránsito hidrológico en cauces)
- Ajustes del pronóstico/actualización de las condiciones del modelo modificación de entradas y/o parámetros
- Evaluación de los resultados de la modelación con criterios estadísticos
- Informe de actividades y presentación de avances con criterios estadísticos

1.9. Método general del proceso hidrológico continuo

En este trabajo de investigación se emplearán métodos hidrológicos tanto teóricos como empíricos, que al unirse integran al sistema de pronóstico y constituyen el conjunto de procedimientos a través de las cuales se desarrollara el tema de estudio, el siguiente esquema ejemplifica de manera general el método a seguir:

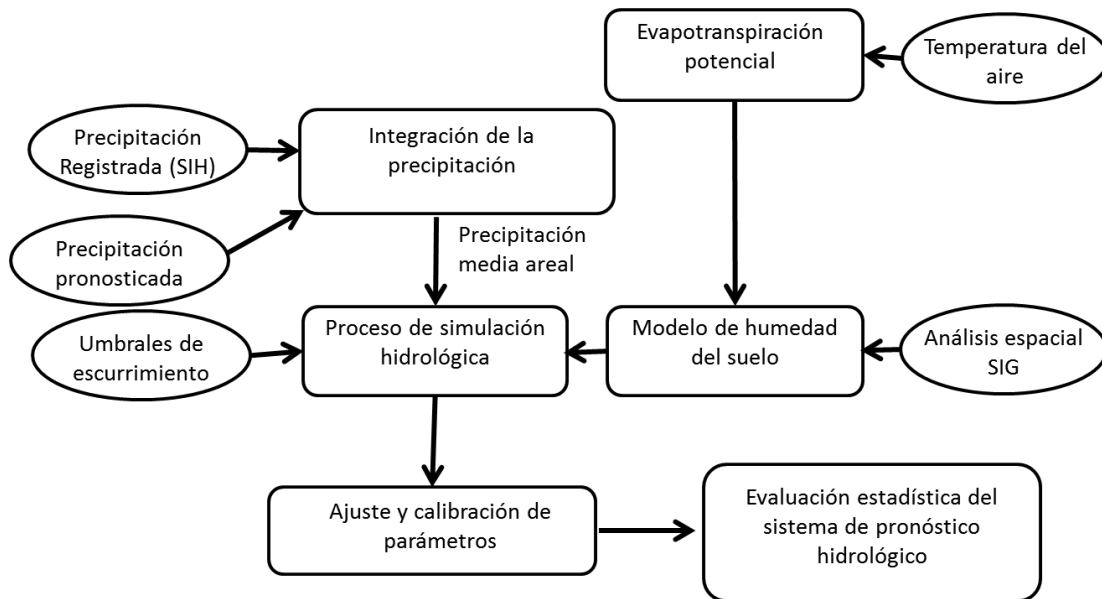


Figura 4.- Metodología de la modelación hidrológica en operación

Fuente: Elaboración propia

Herramientas utilizadas en la modelación hidrológica:

Para facilitar el proceso de cálculo en la modelación hidrológica, es conveniente utilizar algunas herramientas comúnmente empleadas en la modelación hidrológica, tales como los llamados Sistemas de Información Geográfica (SIG) y herramientas computacionales

- Empleo de SIG aplicados a la modelación hidrológica para el procesamiento de la información espacial, para ello existen softwares libre y comercial para el procesamiento de los archivos vectoriales y raster que representan alguna variable o característica hidrológica.
- Utilización de herramientas computacionales, que incluyen software, algoritmos, programas o códigos, software libre o comercial para la simulación de los siguientes procesos:
 - Simulación lluvia-escurrimiento

- Tránsito hidrológico
- Simulación de operación de presas
- Ajustes del pronóstico/actualización
- Ajuste de las simulaciones conforme a los datos observados
- Actualización de las condiciones del modelo
- Modificación de entradas o parámetros

Elementos o instrumentos adicionales

A fin de mejorar y enriquecer el conocimiento de las variables hidrometeorológicas que intervienen en la modelación hidrológica y los resultados obtenidos en esta, es importante la comunicación con los diversos grupos de trabajo involucrados en la información hidrometeorológica, empleando para ello, la información proveniente de varias fuentes tales como:

- ✓ Participación en la discusión de las condiciones meteorológicas y climáticas en la Región de la cuenca hidrológica y sus implicaciones en avenidas.
- ✓ Revisión de los productos del Sistema lluvia media areal, humedad del suelo, gastos y niveles.
- ✓ Discusión de la sustentabilidad de los productos del Sistema para las operaciones diarias y emisión de avisos de avenidas.
- ✓ Comunicación e interacción con las oficinas regionales, Organismos de Cuenca y Direcciones Locales, para la validación y mejoramiento de los productos, basados en la observación diaria en los sitios de estudio.

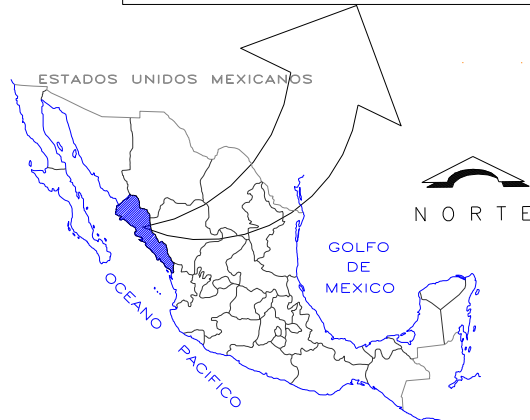
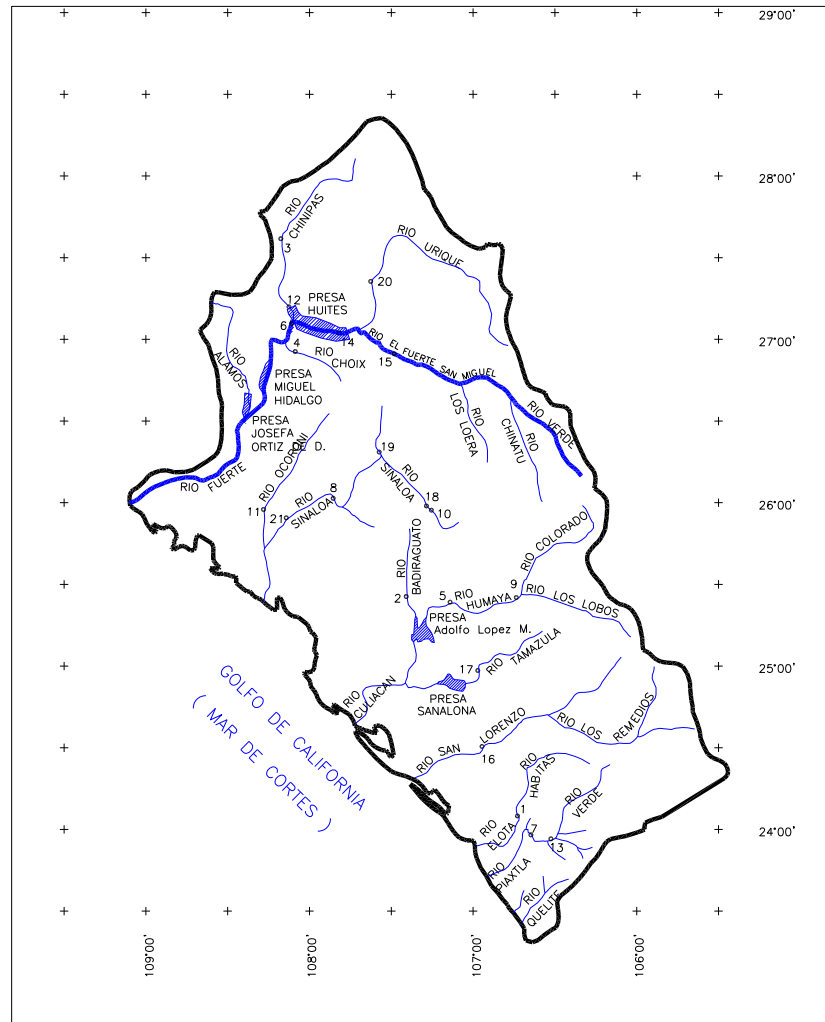
2. Descripción de la zona de estudio y datos disponibles

La corriente en estudio, el río Fuerte, forma parte de la Región Hidrológica (RH) número 10, denominada Sinaloa, que incluye a todas las corrientes que descargan en el litoral del Océano Pacífico, desde la latitud Norte 23° 25' hasta la 26° 35'. Con base en lo anterior, se consideran dentro de esta RH 10 las siguientes corrientes principales:

- Fuerte,
- Sinaloa,
- Mocorito,
- Pericos,
- Culiacán,
- San Lorenzo,
- Elota,
- Piaxtla y
- Quelite

En la siguiente figura, se muestra la ubicación de la región hidrológica número 10 y algunos de sus corrientes más importantes, entre las destaca la del río Fuerte.

REGION HIDROLOGICA No. 10 Cuenca de los Ríos:
Fuerte, Sinaloa, Culiacán, San Lorenzo, Elota y Piaxtla.



ALGUNAS ESTACIONES HIDROMETRICAS IMPORTANTES

No	N. ESTACION	No	N. ESTACION
1	ACATITAN	12	PALO DULCE
2	BADIRAGUATO	13	PIAXTLA
3	CHINIPAS	14	SAN FRANCISCO
4	CHOIX	15	SAN IGNACIO
5	GUATENIPA	16	SANTA CRUZ
6	HUITES	17	TAMAZULA
7	IXPALINO	18	TECUSIAPA
8	JAINA	19	TOHAYANA
9	LA HUERTA	20	URIQUE II
10	LOS MOLINOS	21	ZOPILOTE
11	EL NARANJO		

Figura 5.- Principales corrientes de la Región Hidrológica 10

Fuente: Elaboración propia

2.1. Descripción general de la zona de estudio

Descripción de la Región Hidrológica No 10 (RH 10), Sinaloa

En la Región Hidrológica No 10 se distribuyen corrientes importantes (ver **Figura 6**) generadas en la Sierra Madre Occidental, a conveniente distancia de sus desembocaduras para desarrollar cuencas de captación importantes que reciben lluvias considerables de 750 mm en promedio³. Esas corrientes corren en general, por zonas con desniveles adecuados para su aprovechamiento en generación de energía, con topografía propicia para la formación de vasos de almacenamiento; y, finalmente, salen de la serranía y encuentran llanuras amplias y fértiles, propicias para el desarrollo agrícola.

En paralelo al incremento que han tenido las observaciones hidrométricas, se han generado una serie importante de aprovechamientos hidráulicos.

La primera presa importante construida en la RH No 10 fue la Sanalona, que empezó su almacenamiento en el año de 1947, con una capacidad inicial total de 843 Mm³.

La RH 10 está situada hacia el noroeste del país. Todas sus corrientes vierten sus aguas al Océano Pacífico y a la parte de este que se interna formando el Golfo de California.

Geográficamente queda comprendida entre los 23° 15' y los 28° 15' de latitud norte y entre los 105° 15' y 109° 29' de longitud oeste.

El norte del paralelo 24°, el parteaguas principal de la Sierra Madre Occidental, se puede decir que es paralelo a la costa del Pacífico resulta que, en forma aproximada, la RH 10, se asemeja a un cuadrilátero ligeramente irregular con los siguientes límites:

Al Noroeste, en una línea de aproximadamente 230 km, con la Región Hidrológica No 9 (parteaguas formado por las cuencas del río Mayo y del río Yaqui).

Al noreste, aproximadamente en 190 km medidos en línea recta, con las Regiones Hidrológicas No 21 y 36 (parteaguas definidos por las cuencas de los ríos Conchos y Nazas respectivamente).

Al sureste, aproximadamente en 150 km medidos en línea recta, con la Región Hidrológica No 11 (parteaguas definido por la vertiente derecha de la cuenca del río Presidio).

Finalmente, al suroeste en 470 km medidos en línea recta, con el litoral del Océano Pacífico.

³ Fuente: Estadísticas del Agua en México 2014

La RH 10 abarca una superficie aproximada de 103,212 km², lo que la sitúa en el sexto lugar, atendiendo a la extensión de las demás regiones hidrológicas del país.

Se le puede considerar una longitud media de 480 km en dirección Sureste-Noroeste y una anchura media de 220 km, en dirección normal.

El perímetro que la limita es de 1,750 km, de los cuales corresponden 530 km a la longitud de su litoral y el resto a sus colindancias con las regiones citadas.

Como consecuencia, en la RH 10 se ha producido un desarrollo importante de observaciones hidrométricas. La primera estación que se instaló fue la de Puente Sud Pacífico, en el río Culiacán, en el año de 1924. A partir de entonces, y sólo considerando las estaciones hidrométricas instaladas en los ríos mencionados, el incremento de estaciones hidrométricas, tanto en ríos como en canales y presas ha sido, en promedio, de 1.26 por año, y de 1938 a 1980, de 1.56 por año.

División política y población

De los 103,212 km² que constituyen la Región Hidrológica No 10, se encuentra dentro del estado de Sinaloa un porcentaje mayoritario de 47.46% (48,984 km²); sigue en importancia el porcentaje del área perteneciente al estado de Chihuahua, que es de 28.42 % (29,333 km²). A continuación, en el estado de Durango de 20.73% (21,396 km²); y por último, un porcentaje mínimo de 3.39% (3,499 km²) que pertenecen al estado de Sonora.

Los principales municipios comprendidos dentro de cada uno de los estados mencionados son los siguientes:

Tabla 2.- Municipios y estados en la RH 10

Estado	Municipios
Sinaloa	Ahome, El Fuerte, Choix, Guasave, Sinaloa, Angostura, Mocorito, Badiraguato, Culiacan, Elota, Cosala, San Ignacio y Mazatlán.
Chihuahua	Chínipas, Guazapares, Bocoyna, Urique, Batopilas, Morelos, Guadalupe y Calvo y Balleza.
Durango	Guanaceví, Tamazula, Topia, Tepehuanes, Canelas, Santiago Papasquiario, Otaez y San Dimas.
Sonora	Álamos y Huatabampo.

Fuente: Boletín Hidrológico 44, tomo I

El desarrollo económico de la región ha dado lugar a incrementos notables de la población en las ciudades más importantes, algunas de las cuales acusan índices de crecimiento verdaderamente impresionantes, como en el caso de Los Mochis, Sin.

De cualquier manera, si sólo se mencionan las poblaciones más importantes, en cuanto a economía y población se refiere, en primer lugar tenemos la capital, Culiacán, centro industrial y agrícola de importancia, con aproximadamente 675,773 habitantes. Le siguen en importancia y tamaño: Mazatlán, importante destino turístico, pesquero y portuario con aproximadamente 381,583 habitantes; Los Mochis, centro agrícola, pesquero, portuario, turístico e industrial con aproximadamente 256,613 habitantes; Guasave, centro agrícola de importancia e industrial con 71,196 habitantes aproximadamente; y Guamúchil, centro agrícola e industrial con 63,743 habitantes aproximadamente. Sinaloa es el estado agrícola más importante de México; adicionalmente, cuenta con la segunda flota pesquera más grande del país. Culturalmente, es conocida a nivel nacional e incluso mundial por su música típica, la Banda o Tambora, etc.; resumiendo, de la RH 10, se pueden mencionar los siguientes municipios, como importantes de acuerdo a su población:

Tabla 3.- Poblaciones importantes en la RH 10

Estado	Población
Sinaloa	Culiacán, Los Mochis, Guasave, Guamuchil, Mocorito, Navolato, El Dorado e Higuera de Zaragoza.
Chihuahua	Guachochic, Norogachic, Toahayana.
Durango	Copalquín, Topia, Coacoyole, San Miguel Cruces, Tayoltita.
Sonora	Álamos

Fuente: Boletín Hidrológico 44, tomo I

Orografía y geología

La RH 10 está relacionada, orográficamente, con un bloque montañoso constituido principalmente por la Sierra Madre Occidental, en un tramo sensiblemente paralelo a la costa del Pacífico, comprendido, aproximadamente, entre los 23° 30' y los 27° 15' de latitud norte.

Este bloque montañoso carece de altitudes extraordinarias (ninguna superior a los 4,000 msnm) y tiene la característica especial de formar una mesa muy elevada y ancha. Por el oriente se prolonga rumbo a la sierra de Tepehuanes de tal manera que, formando parte de la Región Hidrológica No 10, existe una faja de topografía muy quebrada que en

promedio abarca una anchura de 130 km, donde se ubica la mayor parte de las fuentes y de los cursos superiores de las corrientes que pertenecen a la citada región.

Puede establecerse que el oeste del parteaguas de la Región Hidrológica No 10 corre aproximadamente paralelo a la costa, a una distancia media de 220 km. Los ríos generados en este parteaguas inician largos recorridos hacia su desembocadura en el mar, pero en su curso superior corren a altitudes muy elevadas, obligados por esa ancha faja montañosa de la que ya se describió.

Es ilustrativo de esta situación el caso del río Fuerte. En esa faja montañosa las anfractuosidades del terreno son muy numerosas y de gran irregularidad e importancia. Dentro de la región quedan algunas cuyo interés geográfico es notorio, como la Barranca del Cobre, en cuyo fondo corre el río Urique. Hacia la zona sur de la región, estos accidentes geográficos se conocen con el nombre de "quebradas" y entre estas sobresalen las de Granizo, Copalquín, Honda, etc., localizadas en la cuenca del río Humaya.

Según la carta geológica de México, recopilada por el Ing. Jorge L. Tamayo y publicada en 1962, las formaciones geológicas superficiales dominantes de la región que se describe, pertenecen al cenozoico medio volcánico en una faja longitudinal paralela a la costa, en la parte más interna de la región; y al cenozoico superior clásico en otra faja en colindancia con la primera e intermedia con otra, costera, a la que le corresponde la clasificación de pleistoceno reciente.

Se habla de fajas sólo en forma aproximada, pues ya es sabido que los límites de los contactos geológicos son enteramente irregulares, máxime en el caso particular de la Región Hidrológica No 10 que tiene numerosas partes en que las formaciones son de tipo intrusivo, del cenozoico inferior y del mesozoico metamórfico.

2.2. Hidrografía

Dentro de la Región Pacífico Norte, la zona hidrológica del río Fuerte, representa una de las cuencas más atractivas para la dinámica socioeconómica de la región, lo que motiva que su crecimiento económico y social se multiplique, lo cual agrava los problemas sobre el manejo, uso y disponibilidad del vital líquido en la zona.

El río Fuerte que forma parte de la Región Hidrológica número 10, constituye la principal corriente superficial de ésta, se forma en la Sierra Madre Occidental, su

colector principal corre en dirección general noreste-suroeste; a la altura del poblado El Fuerte, sus aguas son controladas mediante la presa Miguel Hidalgo. Aguas abajo estos escurrimientos son derivados a canales y utilizados para el riego de gran parte de la llanura costera a ambos lados del río.

La cuenca del río Fuerte, como se mencionó, es la más importante de la Región Hidrológica 10, tanto por su extensión como por los escurrimientos que en ella se generan, y las obras que se han realizado. Abarca un área de cuenca total de 33,590 km² hasta San Blas, que se desarrolla entre los meridianos 106°18' y 109°27' de longitud oeste y entre los paralelos 25°48' y 28°12' de latitud norte.

Definición de la cuenca de estudio

Debido a la importancia que tiene para la zona, y por la red de medición con que cuenta, en el presente trabajo se analizará la cuenca del río Fuerte, mediante un modelo hidrológico, de tal manera que se puedan comparar los resultados obtenidos entre el modelo actual y el que se modelará y considerar la conveniencia de la actualización de la modelación hidrológica. En la siguiente **Figura 6**, se muestra la división de cuencas que se tomaron en cuenta para el estudio, mientras que en la **Tabla 4**, se incluyen los nombres y áreas de cada subcuenca:

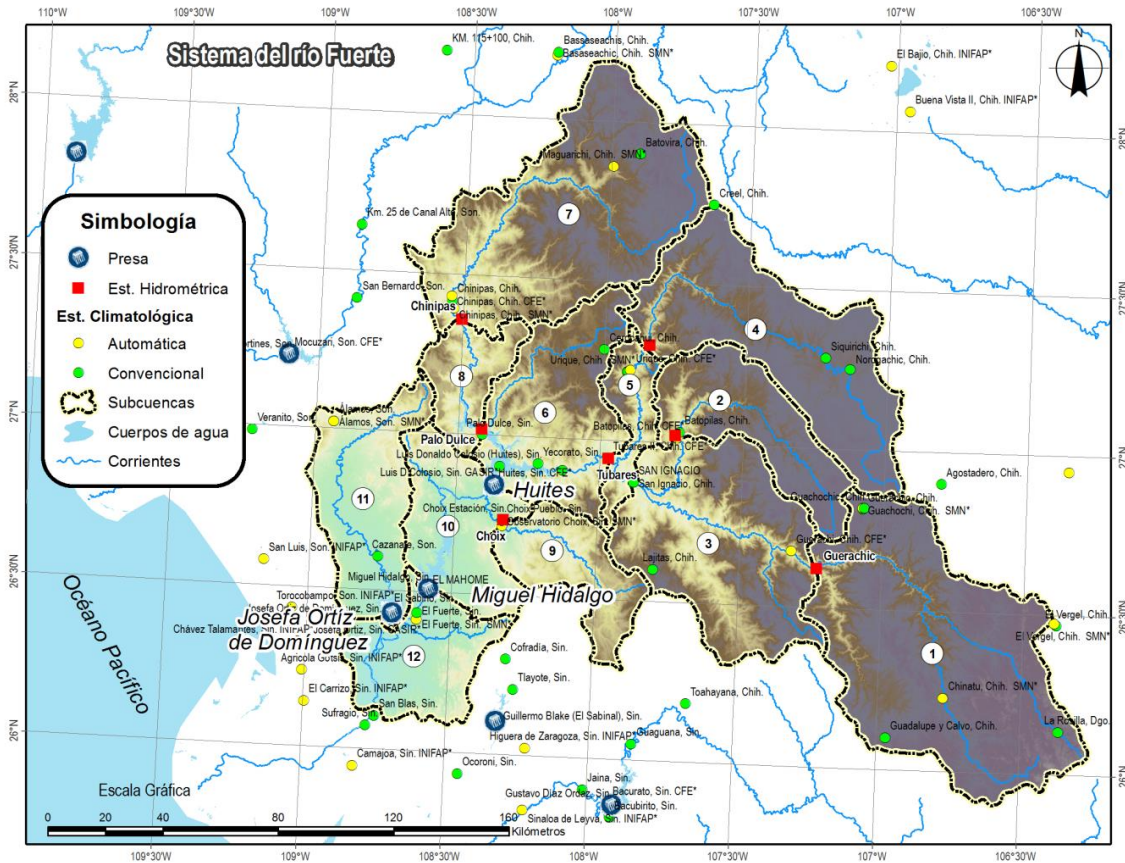


Figura 6.- Subcuencas que integran el río Fuerte
Fuente: Elaboración propia con información digital de INEGI

Tabla 4.- Subcuencas consideradas

ID	Clave	Nombre	Área (km ²)
1	GRCCH	Guerachic	6201.1
2	BTPCH	Batopilas	1995.3
3	SIGCH	San Ignacio	4127.0
4	URQCH	Urique II	4020.4
5	TBRSE	Tubares	630.5
6	HTSSI	Huites	2799.4
7	CNPCH	Chinipas	5125.5
8	PDLCH	Palo Dulce	1204.6
9	CHXSI	Choix	1572.4
10	EMHSI	El Mahone	1695.2
11	ALSSI	Alamos	2240.8
12	SBLSE	San Blas	1862.9

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y CONAGUA

3. Características fisiográficas y climatológicas

3.1. Recopilación y análisis de información

Para la delimitación de la cuenca, mostrada en la **Figura 6**, se empleó la información cartográfica publicada por INEGI, escala 1:50,000, que consta de 56 cartas topográficas a esa escala, las cuales sirvieron de base para determinar las principales características fisiográficas de las cuencas de aportación, pero también se consideraron otras cartas de tipo topográficas, edafológicas y uso del suelo y vegetación, escala 1: 250,000 disponibles, que se describen en la siguiente tabla:

Tabla 5.- Cartografía de INEGI disponible en las cuencas en estudio

I	Clave	Denominación	Escala	Tipo
1	G12-3	Cd. Obregón	1:250,000	Topográfica, Uso del Suelo, Edafología
2	G12-6	Huatabampo		
3	G13-1	San Juanito		
4	G13-4	Guachochi		

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI

En la **Figura 6** se puede observar la distribución de las estaciones climatológicas, hidrométricas y los embalses a considerar en la modelación hidrológica de la cuenca de estudio. Se cuenta con la información de lluvias acumuladas diariamente de 31 estaciones climatológicas, y horarias de 41 estaciones meteorológicas automáticas. Los datos de aforo de escurrimientos en 6 estaciones hidrométricas que operan actualmente en la cuenca y que tienen importancia para la calibración de los parámetros hidrológicos de las cuencas. Es necesario señalar que las estaciones automáticas, cuentan con registros a cada 10 minutos, valores que por conveniencia se han acumulado cada 6 horas para emplear dicha distribución temporal y obtener la precipitación distribuida en intervalos de tiempo; mientras que las 31 estaciones que cuentan con registros cada 24 horas, son las llamadas estaciones convencionales. En la **Tabla 6**, se listan los nombres de las estaciones climatológicas convencionales y en la **Tabla 7** las automáticas; así mismo, en la **Tabla 8**, se listan las estaciones hidrométricas que actualmente operan en la cuenca y que para fines de verificación en la modelación hidrológica se emplearán en el presente trabajo.

Tabla 6.- Estaciones climatológicas convencionales

ID	Clave	Nombre	Tipo	Periodo
1	BTPCH	Batopilas, Chih.	Base	1994-2014
2	BTVCH	Batovira, Chih.	Base	1994-2014
3	CZNSO	Cazanate, Son.	Base	1994-2014
4	CNDCH	Chinipas, Chih.	Base	1994-2014
5	CHXSI	Choix Estación, Sin.	Base	1994-2014
6	CRLCH	Creel, Chih.	Base	1994-2014
7	EFTSI	El Fuerte, Sin.	Base	1994-2014
8	GYCCH	Guadalupe y Calvo, Chih.	Base	1994-2014
9	GRCCH	Guarachic, Chih.	Base	1994-2014
10	JORSI	Josefa Ortiz de Domínguez, Sin.	Base	1994-2014
11	ROSDR	La Rosilla, Dgo.	Base	1994-2014
12	LDCSI	Luis Donald Colosio (Huites), Sin.	Base	1994-2014
13	PMHSI	Miguel Hidalgo, Sin.	Base	1994-2014
14	TBRSI	San Francisco, Sin.	Base	1994-2014
15	URECH	Urique estación, Chih.	Base	1994-2014
16	BACCH	Bachiniva, Chih.	Auxiliar	1994-2014
17	BSSCH	Bassaseachis, Chih.	Auxiliar	1994-2014
18	CHUCH	Chihuahua, Chih.	Auxiliar	1994-2014
19	CRRSI	El Carrizo, Sin.	Auxiliar	1994-2014
20	FIMCH	Francisco I. Madero, Chih.	Auxiliar	1994-2014
21	GNCDR	Guanacevit, Dgo.	Auxiliar	1994-2014
22	GTNSI	Guatenipa, Sin.	Auxiliar	1994-2014
23	GBESI	Guillermo Blake (El Sabinal), Sin.	Auxiliar	1994-2014
24	JNASI	Jaina, Sin.	Auxiliar	1994-2014
25	MCHSI	Los Mochis, Sin.	Auxiliar	1994-2014
26	NVISO	Navojoa, Son.	Auxiliar	1994-2014
27	PRRCH	Parral, Chih.	Auxiliar	1994-2014
28	SBNSO	San Bernardo, Son.	Auxiliar	1994-2014
29	SGBDR	San Gabriel, Dgo.	Auxiliar	1994-2014
30	VZRCH	Valle de Zaragoza, Chih.	Auxiliar	1994-2014
31	VOCDR	VILLA OCAMPO	Auxiliar	1994-2014

Fuente: Elaboración propia con información del SIH, CONAGUA

Tabla 7.- Estaciones climatológicas automáticas

Clave	Nombre	Período
BASCH	Basaseachic, Chih. SMN	1999-2014
CHICH	Chinipas, Chih. SMN	1999-2014
GCCCH	Guachochi, Chih. SMN	1999-2014
MAGCH	Maguarichi, Chih. SMN	1999-2014
ALASO	Álamos, Son. SMN	1999-2013
CHNCH	Chinatu, Chih. SMN	1999-2013
PJOSEFAORTIZ	Joséfa Ortiz, Sin. GASIR	2003-2012
PLUISDCOLOSIO	Luis D Colosio, Sin. GASIR	2003-2012

Clave	Nombre	Período
ELFUERTE	El Fuerte, Sin. SMN	2008-2014
ELVERGELSMN	El Vergel, Chih. SMN	2008-2014
27DESEPCFE	27 de Septiembre, Sin. CFE	2012-2014
AGRICOLAGOTSIS	Agricola Gotsis, Sin. INIFAP	2012-2014
BAMOA	Bamoa, Sin. INIFAP	2012-2014
BASUCHIL	Basuchil, Chih. INIFAP	2012-2014
BUENAVISTACH2	Buena Vista II, Chih. INIFAP	2012-2014
CHAVEZTALAMANTE	Chávez Talamantes, Sin. INIFAP	2012-2014
CHINIPASCFE	Chinipas, Chih. CFE	2012-2014
ELCARRIZOSI	El Carrizo, Sin. INIFAP	2012-2014
ELCUBILETE	El Cubilete, Sin. INIFAP	2012-2014
GUERACHICFE	Guerachi, Chih. CFE	2012-2014
HUITESCFE	Huites, Sin. CFE	2012-2014
JJRIOS	J. J. Ríos, Sin. INIFAP	2012-2014
LEYVASOLANO	Leyva Solano, Sin. INIFAP	2012-2014
MOCUZARICFE	Mocuzari, Son. CFE	2012-2014
PALOSBLANCOS	Palos Blancos, Sin. INIFAP	2012-2014
RUIZCORTINEZ	Ruiz Cortinez, Sin. INIFAP	2012-2014
SINALOADELEYVA	Sinaloa de Leyva, Sin. INIFAP	2012-2014
TAXTES	Taxtes, Sin. INIFAP	2012-2014
BACURATOCFE	Bacurato, Sin. CFE	2012-2013
CHOIXob	Observatorio Choix, Sin. SMN	2012-2013
HDEZARAGOZA	Higuera de Zaragoza, Sin. INIFAP	2012-2013
LAGENOVEVA	La Genoveva, Sin. INIFAP	2012-2013
MUMUNCUERA	Mumuncuera, Son. INIFAP	2012-2014
TRESCARLOS	Tres Carlos, Son. INIFAP	2012-2014
BATOPILASCFE	Batopilas, Chih. CFE	2013
TESIA	Tesia, Son. INIFAP	2014
TUBARES2CFE	Tubares II, Chih. CFE	2014
URICH	Urique, Chih. SMN	2014
URIQUECFE	Urique, Chih. CFE	2014
YC2SO	Yecora, Son. SMN	2014
ZARAGOZA	Zaragoza, Chih. INIFAP	2014

Fuente: Elaboración propia con información del SIH, CONAGUA

Tabla 8.- Estaciones hidrométricas utilizadas en el estudio

I	Clave	Estación	Río
1	10066	Choix	Choix
2	10077	Palo Dulce	Chinipas
3	10063	Batopilas	Batopilas
4	10100	Urique II	Urique
5	10064	Chinipas	Oteros
6	10102	Guerachic	Guerachic

I	Clave	Estación	Río
7	10123	Tubares	Tubares

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA

Embalses en la cuenca del río Fuerte

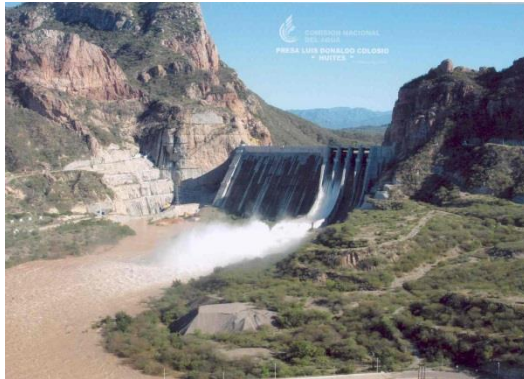
En la **Tabla 9** se listan los 3 almacenamientos más importantes con los que cuenta el sistema del río Fuerte y cuyo efecto regulador se ha considerado en la modelación hidrológica, de igual manera, en las **figuras 7 y 8**, se muestran imágenes de cada presa y las curvas elevaciones capacidades, respectivamente.

Tabla 9.- Principales presas en la cuenca de estudio

I	Presa	Río	Capacidad NAME (hm ³)	Altura máxima (m)
1	Huites	Fuerte	4658	164.75
2	Miguel Hidalgo	Fuerte	3965	81
3	Josefa Ortiz de Domínguez	Álamos	607	44

Fuente: CONAGUA

Presa Huites, Sin.



Presa Miguel Hidalgo, Sin.

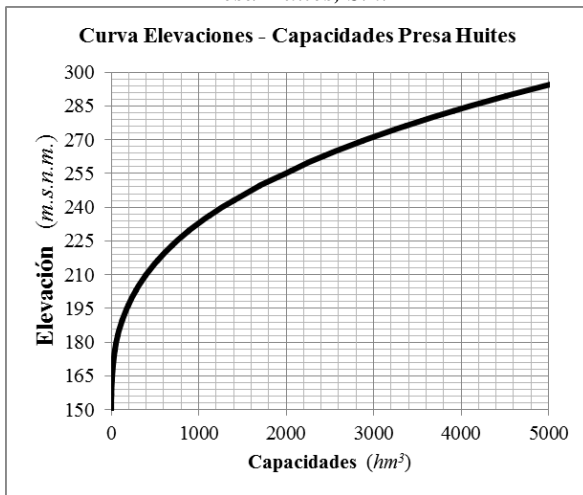


Presa Josefa Ortiz de Domínguez, Sin.

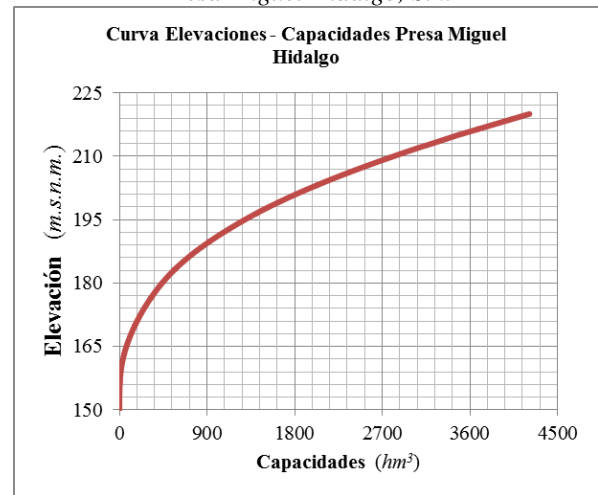


Figura 7.- Presas del río Fuerte
Fuente: Presas de México

Presa Huites, Sin.



Presa Miguel Hidalgo, Sin.



Presa Josefa Ortiz de Domínguez, Sin.

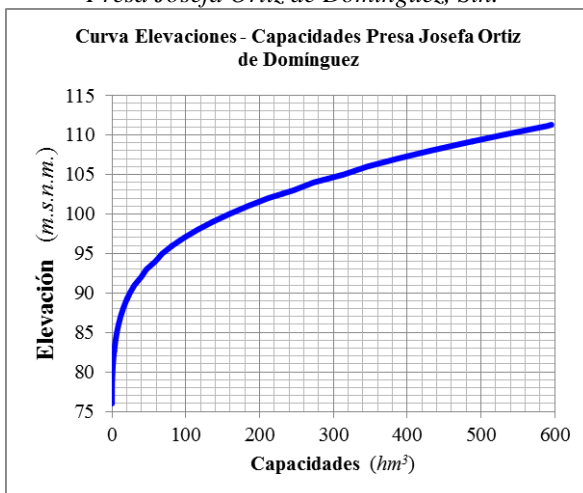


Figura 8.- Curvas Elevaciones-Capacidades
Fuente: CONAGUA

3.2. Características fisiográficas

Determinación del número escurrimiento ponderado de la cuenca, N

En la cuenca de estudio se definieron los tipos edafológicos y usos de suelo y cobertura vegetal, con base en los planos de tipo y uso de INEGI (ver Figuras 9 y 10 del Tipo edafológico de Suelos y Uso y cobertura vegetal de suelos, respectivamente).

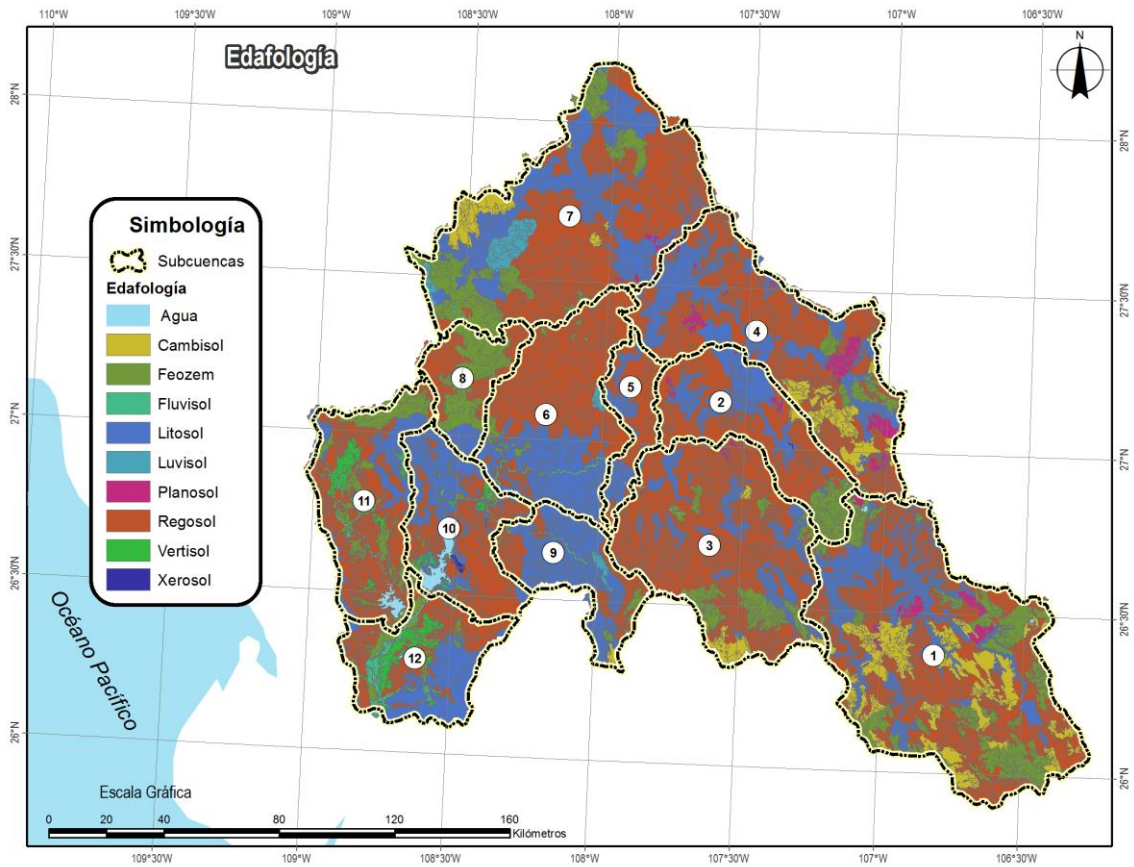


Figura 9.- Edafología de cuenca

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI

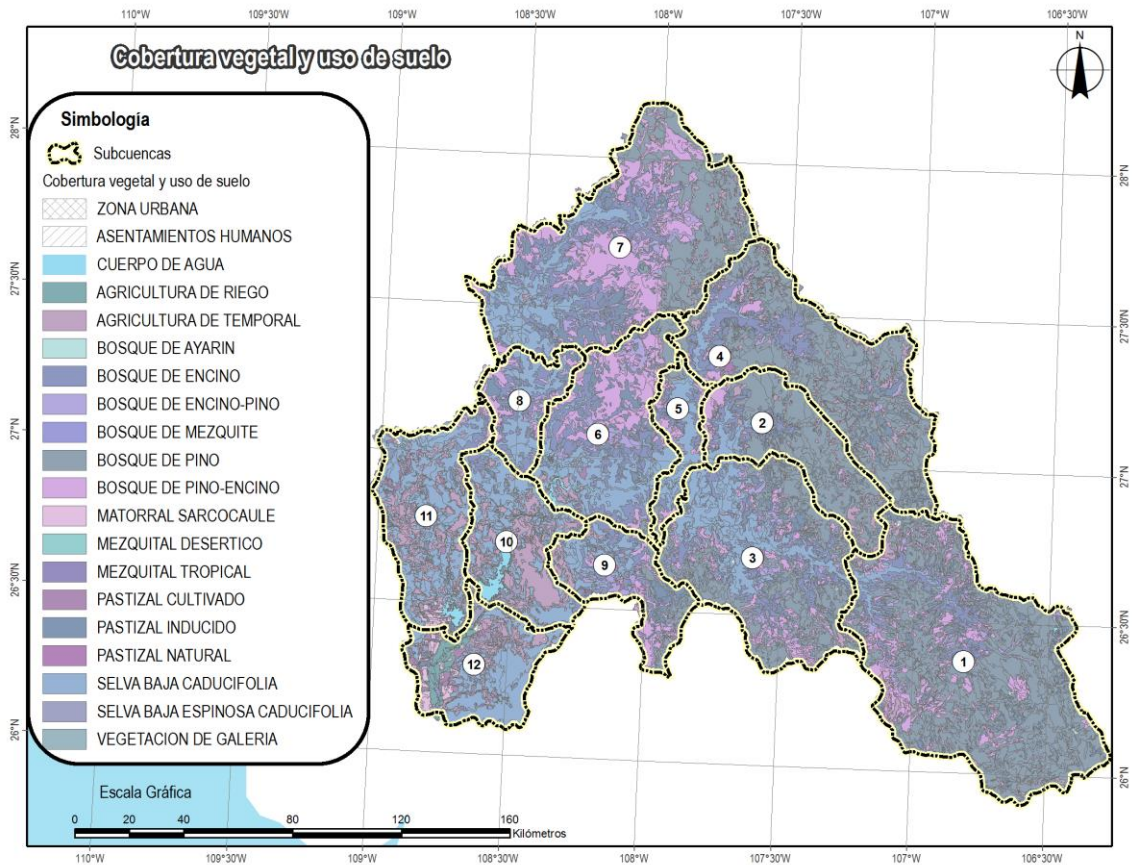


Figura 10.- Cobertura Vegetal y Uso de Suelo
 Fuente: Elaboración propia con información de INEGI

Una vez que se ha identificado el tipo de suelo y su uso, se aplica la metodología sugerida por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos de América, que establece valores del número de escurrimiento N a partir de los diversos tipos de suelo y cobertura vegetal. El tipo edafológico de suelo se obtiene en el *inciso I del Apéndice*.

Una vez identificados el tipo edafológico de suelo, y al conocer su uso podemos obtener su número de escurrimiento, lo cual se consigue con ayuda del *inciso II del Apéndice*.

El Número de Escurrimiento ponderado en cada subcuenca del estudio, se muestra en el *inciso III del Apéndice*.

En el subcapítulo 1.7 se explicó la forma de calcular las características fisiográficas de la cuenca, a continuación se presentan los valores de las características obtenidas por subcuenca:

Tabla 10.- Características fisiográficas de las cuencas

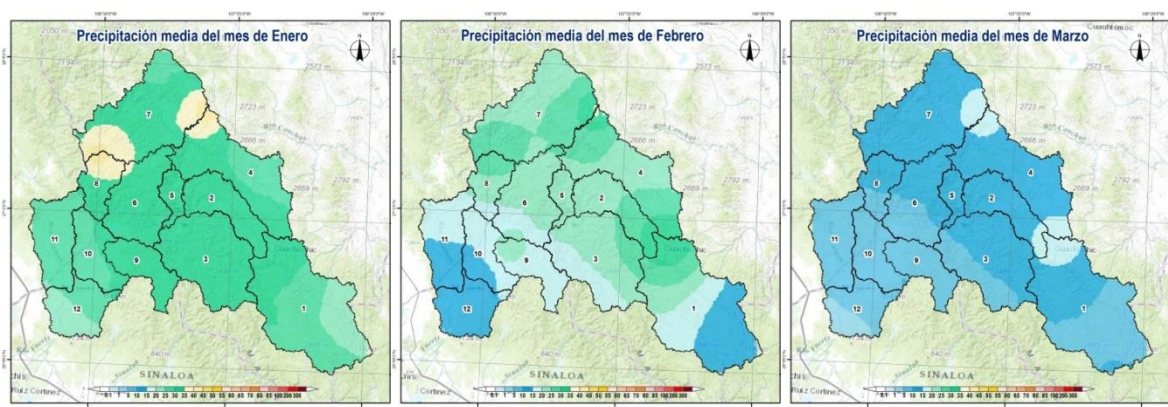
Número	Clave	Nombre	Área de aportación (km ²)	Longitud del Cauce Principal (km)	Desnivel topográfico (m)	Pendiente Media del Cauce Principal	Número de escurrimiento N	Tiempo de concentración (horas)	Tiempo de retraso (minutos)
1	GRCCH	Guerachic	6201.1	199.5	2030.0	0.0073	80.0	22.3	804.0
2	BTPCH	Batopilas	1572.4	130.5	2003.0	0.0083	78.3	13.8	495.9
3	SIGCH	San Ignacio	4127.0	167.3	2067.0	0.0037	77.6	18.1	652.1
4	URQCH	Urique II	4020.4	258.8	1862.0	0.0037	78.7	31.1	1120.2
5	TBRSI	Tubares	630.5	83.0	1816.0	0.0057	77.5	8.5	306.1
6	HTSSI	Huites	2799.4	134.2	2170.0	0.0017	76.4	13.8	496.8
7	CNPCH	Chinipas	5125.5	225.1	2013.0	0.0045	79.3	25.7	926.4
8	PDLCH	Palo Dulce	1204.6	94.3	1175.0	0.0033	79.6	11.6	417.9
9	CHXSI	Choix	1572.4	103.1	1990.0	0.0054	80.3	10.5	378.9
10	EMHSI	El Mahone	1695.2	74.0	950.0	0.0006	77.4	9.5	343.1
11	ALSSI	Alamos	2240.8	162.3	1638.0	0.0014	77.9	19.1	688.0
12	SBLSI	San Blas	1862.9	112.1	837.0	0.0018	78.5	16.1	580.2

Fuente: Elaboración propia

3.3. Características climatológicas

Precipitación media histórica en la cuenca

En la Figura 11 y 12, se muestran la distribución espacial y temporal, respectivamente, de la lámina de precipitación mensual en la cuenca del río Fuerte (período 1971-2000).



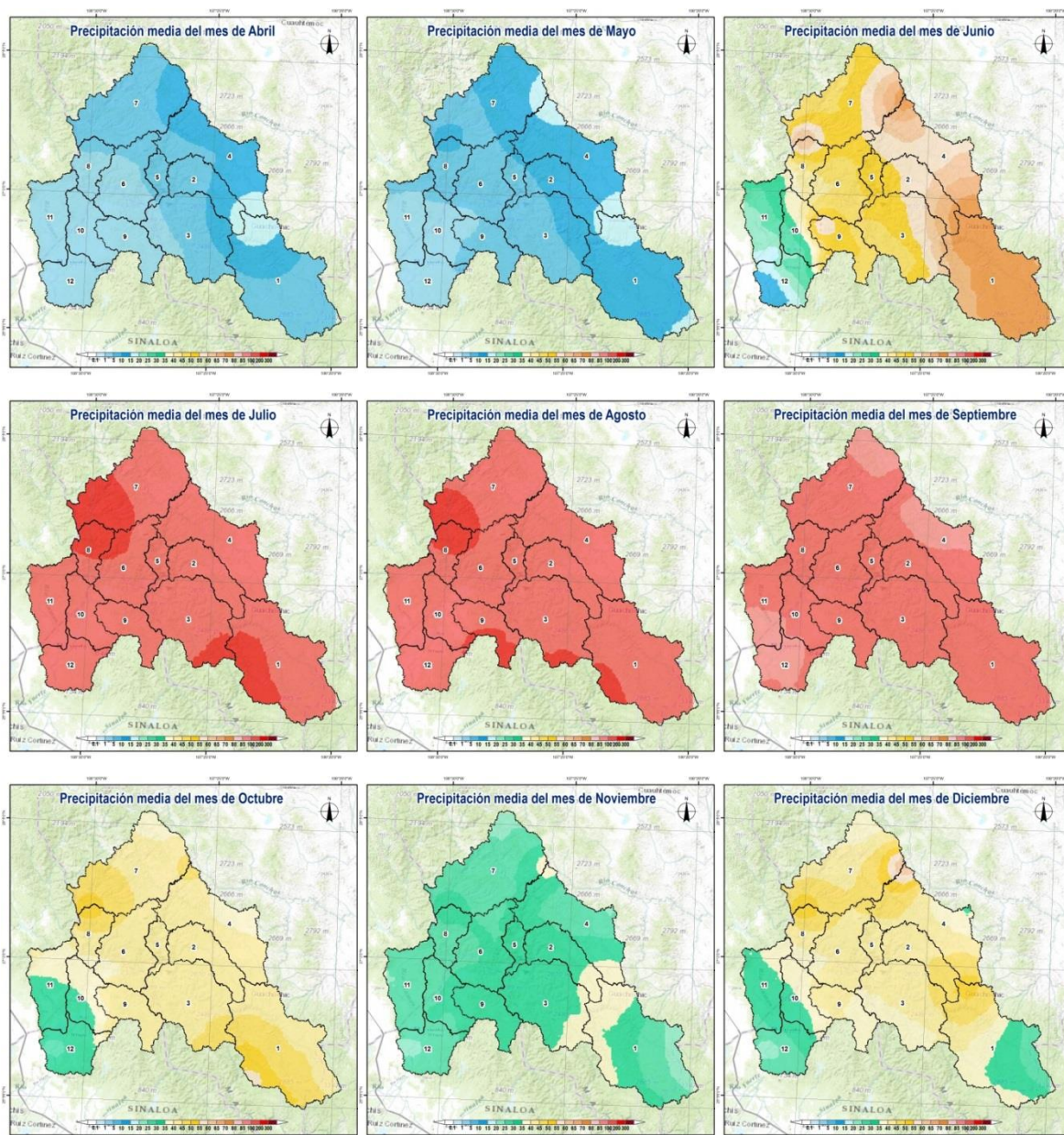


Figura 11.- Distribución espacial de la precipitación mensual (1971-2000)
Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA

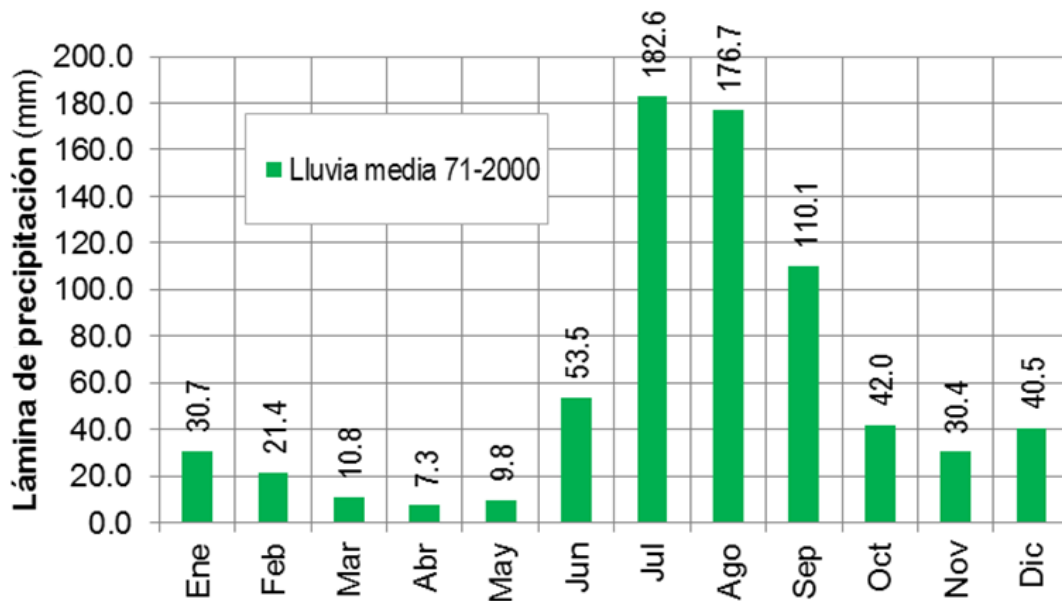


Figura 12.- Variación mensual de la precipitación (1971-2000)

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA

En las figuras anteriores se observa que de julio a septiembre, históricamente se han presentado las mayores precipitaciones acumuladas por año, en contraparte, de marzo a mayo ocurren las menores. La lámina de precipitación media anual estimada en la cuenca asciende a los 715.8 mm (1971-2000). En la **Figura 13**, se muestra la precipitación media anual por subcuenca.

Precitación Anual

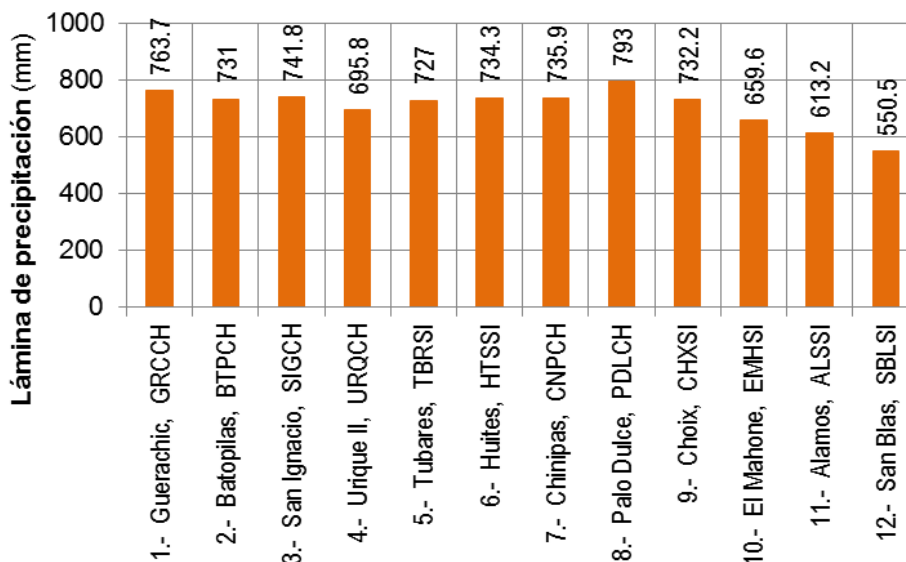


Figura 13.- Distribución anual de la Precipitación en la cuenca del río Fuerte (1971-2000)

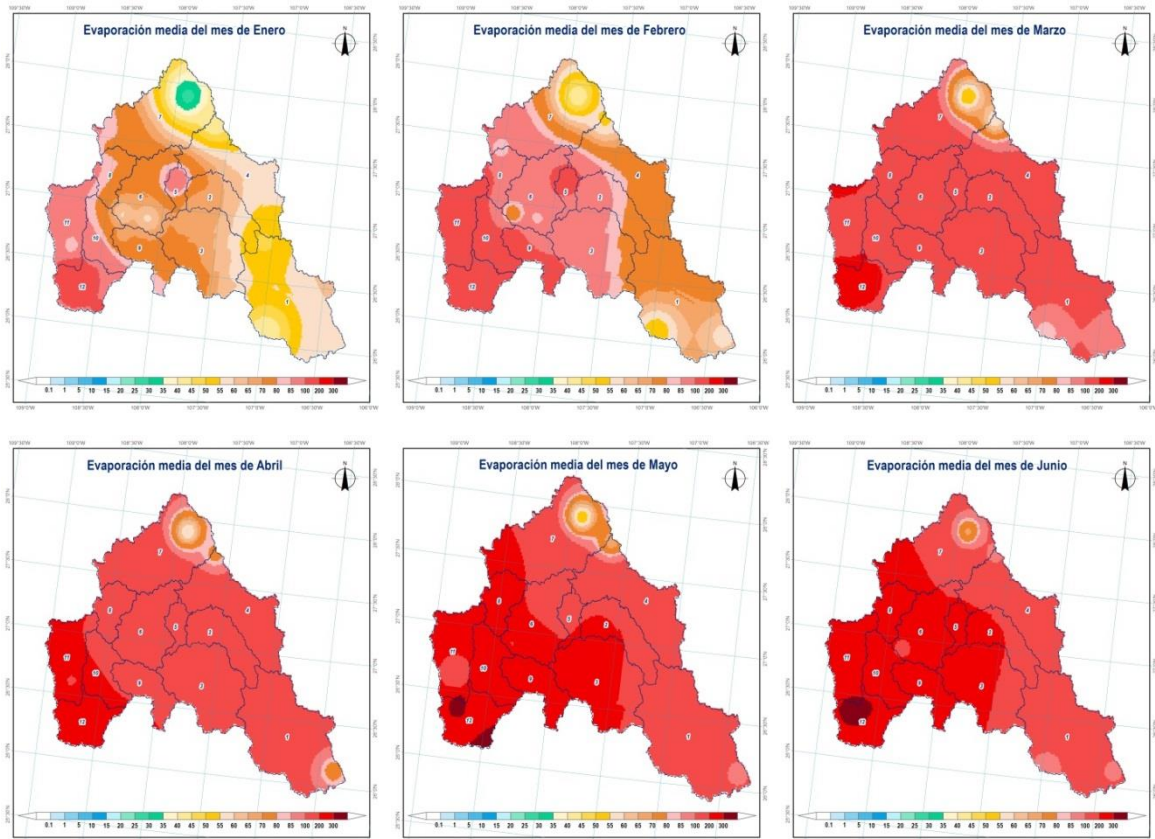
Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA

La figura anterior muestra que la subcuenca 8, Palo Dulce, tiene la lámina de precipitación mayor de toda la cuenca del río Fuerte, 793 mm, en contraparte, la subcuenca 12, San Blas, subcuenca más baja del sistema, presenta la menor lámina de precipitación anual de todo el sistema, 550.5 mm, lo cual refleja el contraste marcado de la variabilidad de la precipitación en la cuenca, ya que al revisar la lámina media de todas las subcuencas se nota que en las partes más altas ocurren en general las láminas mayores de precipitación la cuenca y en las subcuencas más bajas las menores.

Otra variable climatológica a considerar en la modelación hidrológica, además de la precipitación, es la evaporación en la cuenca, ya que su variación espacial y temporal influye en el balance general del ciclo hidrológico.

Evaporación media en la cuenca

Para considerar los valores de evaporación más reciente, se obtuvieron los valores de evaporación acumulada mensual por cuenca y subcuenca en el período 2008-2014, lo cual se muestra en las siguientes **Figura 14** y **Tabla 11**, de forma gráfica y tabular, respectivamente.



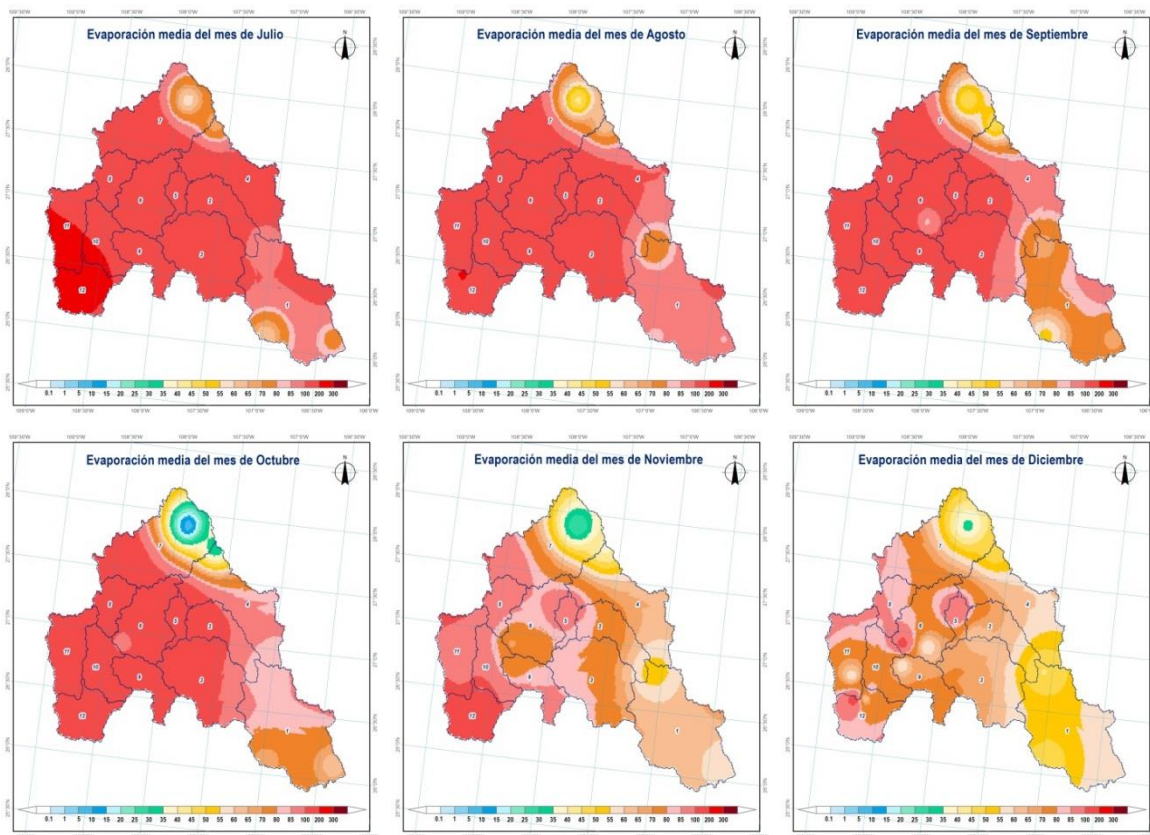


Figura 14.- Evaporación media mensual
Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA

Tabla 11.- Valores de evaporación media mensual (mm)

Subcuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1.- GRCCH.- Guerachic	53.8	67.3	104.7	123.3	154.7	137.2	91.9	91.0	75.2	78.0	61.3	52.9	1099.2
2.- BTPCH.- Batopilas	63.5	83.3	128.1	158.0	193.4	197.1	123.7	111.4	100.7	101.5	72.2	62.5	1407.4
3.- SIGCH.- San Ignacio	66.6	87.8	138.5	166.7	213.2	207.2	133.0	119.7	104.5	107.5	76.2	64.2	1494.2
4.- URQCH.- Urique II	57.7	76.0	110.1	135.3	152.8	167.2	109.4	96.7	87.3	82.4	63.3	59.7	1203.6
5.- TBRSL.- Tubares	82.1	101.4	135.9	169.5	163.0	211.0	148.0	130.4	128.4	125.6	90.6	85.3	1588.0
6.- HTSSI.- Huites	70.8	90.7	141.9	163.0	196.1	213.9	143.9	128.7	112.3	113.6	81.0	77.8	1537.8
7.- CNPCH.- Chinipas	57.4	71.5	108.2	122.0	137.1	155.9	111.8	99.9	91.1	75.8	62.8	61.3	1161.7
8.- PDLCH.- Palo Dulce	78.7	93.3	159.0	175.7	218.8	229.4	160.3	147.6	130.7	127.8	91.3	84.0	1703.7
9.- CHXSI.- Choix	74.6	102.4	163.4	179.2	237.8	232.6	160.0	140.4	121.3	120.4	82.7	69.1	1677.3
10.- EMHSL.- El Mahone	84.0	110.2	180.5	200.5	238.8	248.5	184.5	152.0	135.9	130.2	91.1	77.4	1824.5
11.- ALSSI.- Alamos	90.0	115.3	194.7	211.8	215.7	252.8	201.5	159.6	147.0	143.6	98.8	78.2	1914.0
12.- SBLSI.- San Blas	103.0	131.3	206.7	247.4	287.1	292.3	218.6	166.5	154.9	154.0	110.3	81.8	2153.4

Definición de la red de estaciones climatológicas base

Se recopiló información de lluvias diarias en las estaciones climatológicas que actualmente están operando, de acuerdo a los polígonos de Thiessen mostrados en la **Figura 15** y los porcentajes de influencia de cada estación por subcuenca, indicado en la **Tabla 12**, solo 15 de estas tuvieron influencia en la cuenca de estudio, por lo que en la **Tabla 13** se listan los nombres de dichas estaciones:

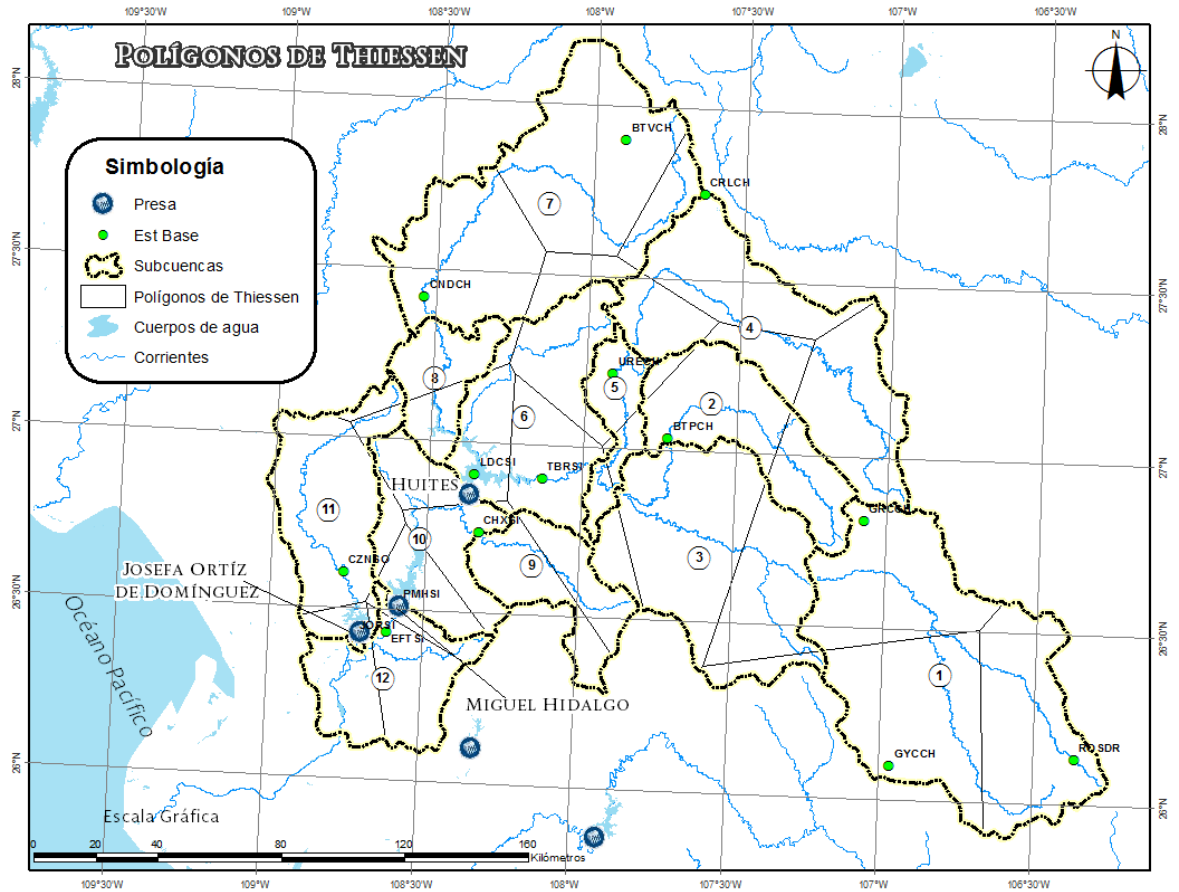


Figura 15.- Polígonos de Thiessen
Fuente: Elaboración propia

Tabla 12.- Porcentajes de influencia de las Climatológicas

Subcuenca	Clave Est.	Estación climatológica	% Área
1	GRCCH	Guerachic, Chih.	31.5%
	GYCCH	Guadalupe y Calvo, Chih.	35.2%
	ROSDR	La Rosilla, Dgo.	33.2%
2	BTPCH	Batopilas, Chih.	60.3%
	GRCCH	Guerachic, Chih.	34.6%
	URECH	Urique estación, Chih.	5.1%
3	BTPCH	Batopilas, Chih.	55.3%
	GRCCH	Guerachic, Chih.	31.9%
	GYCCH	Guadalupe y Calvo, Chih.	5.8%
	TBRSI	San Francisco, Sin.	6.9%
4	BTPCH	Batopilas, Chih.	10.7%
	CRLCH	Creel, Chih.	35.7%
	GRCCH	Guerachic, Chih.	38.5%
	URECH	Urique estación, Chih.	15.1%

Subcuenca	Clave Est.	Estación climatológica	% Área
5	BTPCH	Batopilas, Chih.	21.3%
	TBRSI	San Francisco, Sin.	21.2%
	URECH	Urique estación, Chih.	57.5%
6	BTPCH	Batopilas, Chih.	0.6%
	CHXSI	Choix Estación, Sin.	0.7%
	CNDCH	Chinipas, Chih.	2.9%
	LDCSI	Luis Donaldo Colosio (Huites), Sin.	25.2%
	TBRSI	San Francisco, Sin.	36.0%
	URECH	Urique estación, Chih.	34.7%
7	BTVCH	Batovira, Chih.	48.6%
	CNDCH	Chinipas, Chih.	35.8%
	CRLCH	Creel, Chih.	8.3%
	URECH	Urique estación, Chih.	7.3%
8	CNDCH	Chinipas, Chih.	63.9%
	LDCSI	Luis Donaldo Colosio (Huites), Sin.	36.1%
9	CHXSI	Choix Estación, Sin.	58.5%
	TBRSI	San Francisco, Sin.	41.5%
10	CHXSI	Choix Estación, Sin.	34.1%
	CZNSO	Cazanate, Son.	9.7%
	LDCSI	Luis Donaldo Colosio (Huites), Sin.	26.2%
	PMHSI	Miguel Hidalgo, Sin.	30.0%
11	CNDCH	Chinipas, Chih.	5.9%
	CZNSO	Cazanate, Son.	76.8%
	EFTSI	El Fuerte, Sin.	1.2%
	JORSI	Josefa Ortiz de Domínguez, Sin.	9.7%
	LDCSI	Luis Donaldo Colosio (Huites), Sin.	5.7%
	PMHSI	Miguel Hidalgo, Sin.	0.8%
12	CHXSI	Choix Estación, Sin.	0.1%
	EFTSI	El Fuerte, Sin.	48.1%
	JORSI	Josefa Ortiz de Domínguez, Sin.	38.7%
	PMHSI	Miguel Hidalgo, Sin.	13.1%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13.- Estaciones Climatológicas convencionales base

ID	Clave	Nombre	Periodo
1	BTPCH	Batopilas, Chih.	1994-2014
2	BTVCH	Batovira, Chih.	1994-2014
3	CZNSO	Cazanate, Son.	1994-2014
4	CNDCH	Chinipas, Chih.	1994-2014
5	CHXSI	Choix Estación, Sin.	1994-2014
6	CRLCH	Creel, Chih.	1994-2014
7	EFTSI	El Fuerte, Sin.	1994-2014
8	GYCCH	Guadalupe y Calvo, Chih.	1994-2014

ID	Clave	Nombre	Periodo
9	GRCCH	Guerachic, Chih.	1994-2014
10	JORSI	Josefa Ortiz de Domínguez, Sin.	1994-2014
11	ROSDR	La Rosilla, Dgo.	1994-2014
12	LDCSI	Luis Donald Colosio (Huites), Sin.	1994-2014
13	PMHSI	Miguel Hidalgo, Sin.	1994-2014
14	TBRSI	San Francisco, Sin.	1994-2014
15	URECH	Urique estación, Chih.	1994-2014

Fuente: Elaboración propia

Análisis de lámina de precipitación base registrada

En relación con la información climatológica de la precipitación base, se efectuó un análisis crítico de los datos recabados en las estaciones base, detectándose varios registros faltantes, los cuales se infirieron con apoyo de las estaciones vecinas o información histórica de la propia estación analizada, estos procedimientos se explican a continuación.

Inferencia de los registros diarios de la lluvia faltantes

Los datos o valores faltantes de un registro de lluvias son frecuentes y se deben a una gran variedad de causas. Por ejemplo, debido a desperfectos en el equipo de mediciones, por enfermedad o sustitución del encargado de las observaciones, por interrupciones debidas a limitaciones presupuestales, etc. En general, los datos faltantes son estimados con base en los registros de las estaciones cercanas.

Los datos faltantes de los registros diarios de lluvia han sido obtenidos con base en el método del U. S. National Weather Service (Campos, D.F. 1992; Subramanya, 1994). Este procedimiento ha sido verificado tanto teórica como empíricamente y considera que el dato faltante en una cierta estación x , puede estimarse con apoyo de los datos observados en las estaciones vecinas. Este método es aplicable en la estimación de valores diarios, mensuales o anuales faltantes.

El método consiste en ponderar los valores observados en una cantidad K , igual al recíproco del cuadrado de la distancia (L) entre cada estación vecina y la estación x . La lluvia buscada será igual a:

$$h_{px} = \frac{\sum_{i=1}^n h_{pi} K_i}{\sum_{i=1}^n K_i}$$

donde:

h_{pi} : es la precipitación observada para la fecha de la faltante, en las estaciones auxiliares circundantes, en mm. Se recomienda como mínimo dos estaciones.

$$K_i = 1/L_i^2$$

L_i : es la distancia entre cada estación circundante y la estación a inferir, en km.

Por otra parte, como alternativa en la inferencia de registros diarios de lluvia faltantes, pueden emplearse los llamados métodos de interpolación.

Prueba de consistencia de la información

Si las condiciones relevantes de medición de la estación pluviométrica han manifestado un cambio significativo durante el período de registro, la inconsistencia del mismo se manifestará en los datos de lluvia de la estación. La que podría aparecer desde el tiempo en que el cambio significativo tomó lugar.

Alguna de las causas comunes de la inconsistencia de la información son:

1. Al cambiar una estación a una nueva ubicación,
2. La región de la estación ha manifestado un cambio significativo,
3. Cambio en el ecosistema debido a calamidades, tales como incendios forestales, deslizamiento de tierras.
4. Cambio de equipo, etc.

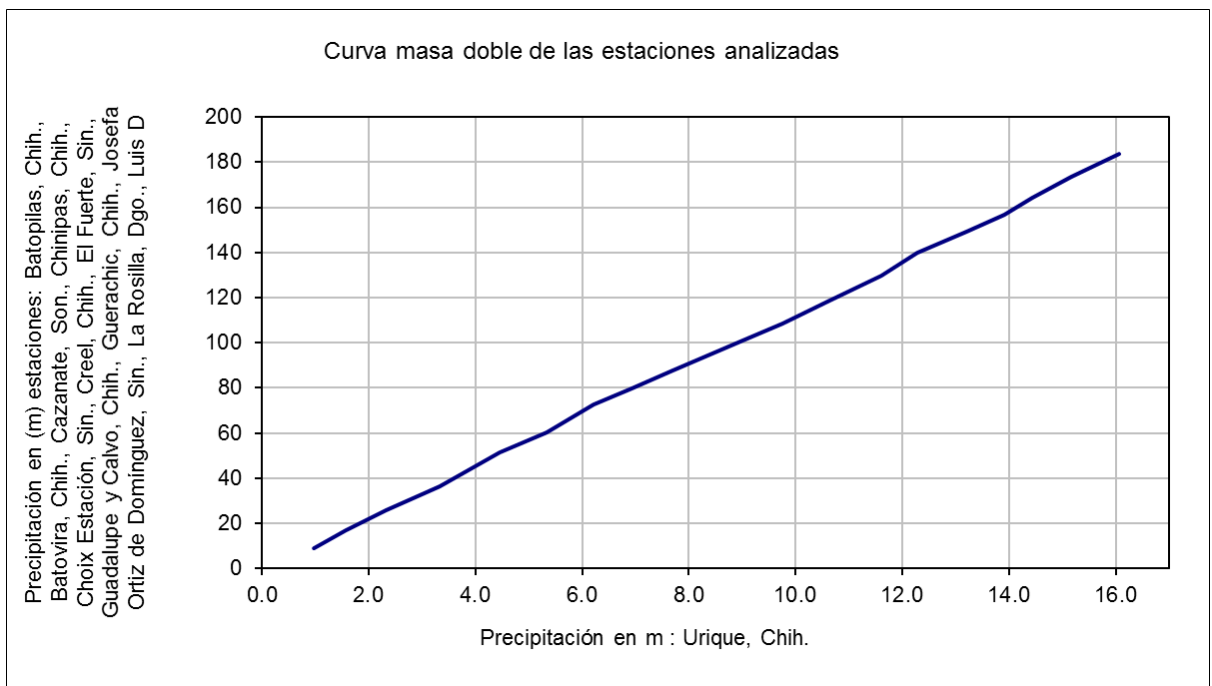


Figura 16.- Curva masa doble de las estaciones climatológicas consideradas
Fuente: Elaboración propia

La gráfica anterior muestra la consistencia de la información climatológica base que se completó del periodo diario de 1994 a 2014, en la misma se compara la información anual acumulada de la estación climatológica Urique, Chih., que se encuentra ubicada aproximadamente al centro de la cuenca, contra el grupo de estaciones a su alrededor, lo cual es un buen indicador de la calidad de la información al obtenerse prácticamente una recta.

Con base a la información diaria completada y a los porcentajes de influencia de cada estación climatológica por subcuenca, se obtuvieron las láminas diarias de precipitación, en el periodo 1998 a 2014.

Análisis de los datos de la precipitación

La distribución de la lluvia en el tiempo es variable, pudiendo ser intensa al principio, moderada al final o tender a ser uniforme en toda su duración; o también, moderada al inicio e intensa en un lapso intermedio o al final.

En cuencas de tiempo de concentración corto, la distribución primera es crítica y para cuencas de largo tiempo de concentración, prácticamente no tiene influencia la distribución. Al ser uno de los elementos más importantes en la modelación hidrológica continua, ya que de ella depende en gran medida la magnitud y forma de las avenidas

simuladas, la lámina de precipitación de la cuenca se estimó, además del método de los polígonos de Thiessen, con otros métodos. Debido a que para la estimación de la información distribuida en el espacio de una variable X basándose en datos puntuales, existen diferentes metodologías como la interpolación lineal, la ponderación de acuerdo al inverso de la distancia al cuadrado, kriging, por mencionar algunos métodos, con sus distintas consideraciones y variaciones de resultados. Todas ellas son aplicadas para tratar de estimar el valor de la variable de precipitación en todo el espacio o área de la cuenca, basándose en los datos puntuales. En la práctica diaria de la hidrología operativa se ha visto que cuando la densidad de la red pluviométrica en una cuenca es baja y dispersa, los distintos métodos entre sí arrojan resultados comparables. Por lo tanto el empleo de métodos más simples como es el caso del inverso de la distancia al cuadrado da resultados razonables. Cabe mencionar que este método se empleó de igual forma para la Inferencia de Registros Diarios de Lluvia Faltantes. De igual manera se han empleado otros métodos de interpolación de lámina de precipitación puntual para obtener la lámina representativa de la cuenca, como a continuación se señala.

Comparación de la lámina de precipitación calculada con método manual y con el programa ETISOL

Como complemento para la consulta y extracción de información del SIH, se ha desarrollado una herramienta denominada ETISOL (Carlos Cervantes et al), que estima la altura de precipitación en todo el espacio o área de una cuenca, para tal efecto, la herramienta incluye varios métodos de interpolación de los registros puntuales para transformarlos a lámina de precipitación del área de una cuenca, como es el caso del método de los Polígonos de Thiessen, Inversa a la distancia al cuadrado, de diferentes alturas, etc.; con estos métodos se estimó la lámina de precipitación por cuenca para comparar los valores de altura de precipitación y poder decidir qué información sería la más conveniente emplear en la modelación hidrológica. Una de estas comparaciones fue mediante los resultados de los acumulados totales como a continuación se muestra en el *inciso IV del Apéndice*.

En las figuras anteriores, se alcanza a apreciar que de manera general, con los métodos del programa ETISOL se obtienen valores mayores de lámina de precipitación, en particular con el método de Diferentes alturas, son más notorias estas diferencias,

mientras que con el método manual de los polígonos de Thiessen se obtienen láminas de precipitación menores.

Para poder evaluar de manera más precisa las diferencias en los resultados del método manual de polígonos de Thiessen con la de los tres métodos de interpolación de la herramienta ETISOL, se utilizó una gráfica para comparar la lluvia media estimada en cada cuenca en el periodo 2008 a 2014.

El gráfico empleado muestra en su interior las diferencias de los métodos del programa ETISOL contra el método manual de polígonos de Thiessen, así se puede apreciar la diferencia que existe entre cada estos, es decir en cada método estimado con el programa ETISOL comparado con el método manual (polígonos de Thiessen) en la siguiente figura se muestran las diferencias de la comparación de la lámina de precipitación acumulada en toda la cuenca del río Fuerte:

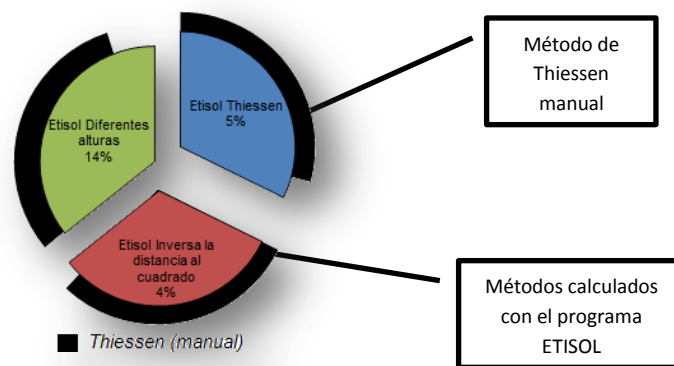


Figura 17.- Diferencias de la comparación de la precipitación media total

Fuente: Elaboración propia

La figura anterior, de comparación global de los resultados, indica, que de manera general, se obtiene una lámina de precipitación acumulada mayor con los métodos del ETISOL que con el método manual de los polígonos de Thiessen, lo que indica que tal vez se pueda estar subestimando la lámina de precipitación con el método manual; así por ejemplo, con el método de Inversa a la distancia al cuadrado del programa ETISOL, los valores de precipitación son los que más se parecen al método manual, teniendo solo 4% más de lámina de precipitación en el periodo 2008-2014; el segundo que sigue es el de polígonos de Thiessen del programa ETISOL, con el que se obtuvo una lámina

acumulada mayor del 5% comparada con el método manual; el tercer método, que es con el que hay mayores diferencias, es el de Diferentes alturas del programa ETISOL, pues resulta una diferencia de más del 14% de la lámina acumulada de precipitación en el período con respecto al método manual.

En el siguiente esquema se representa el mapa con el comportamiento para cada una de las cuencas:

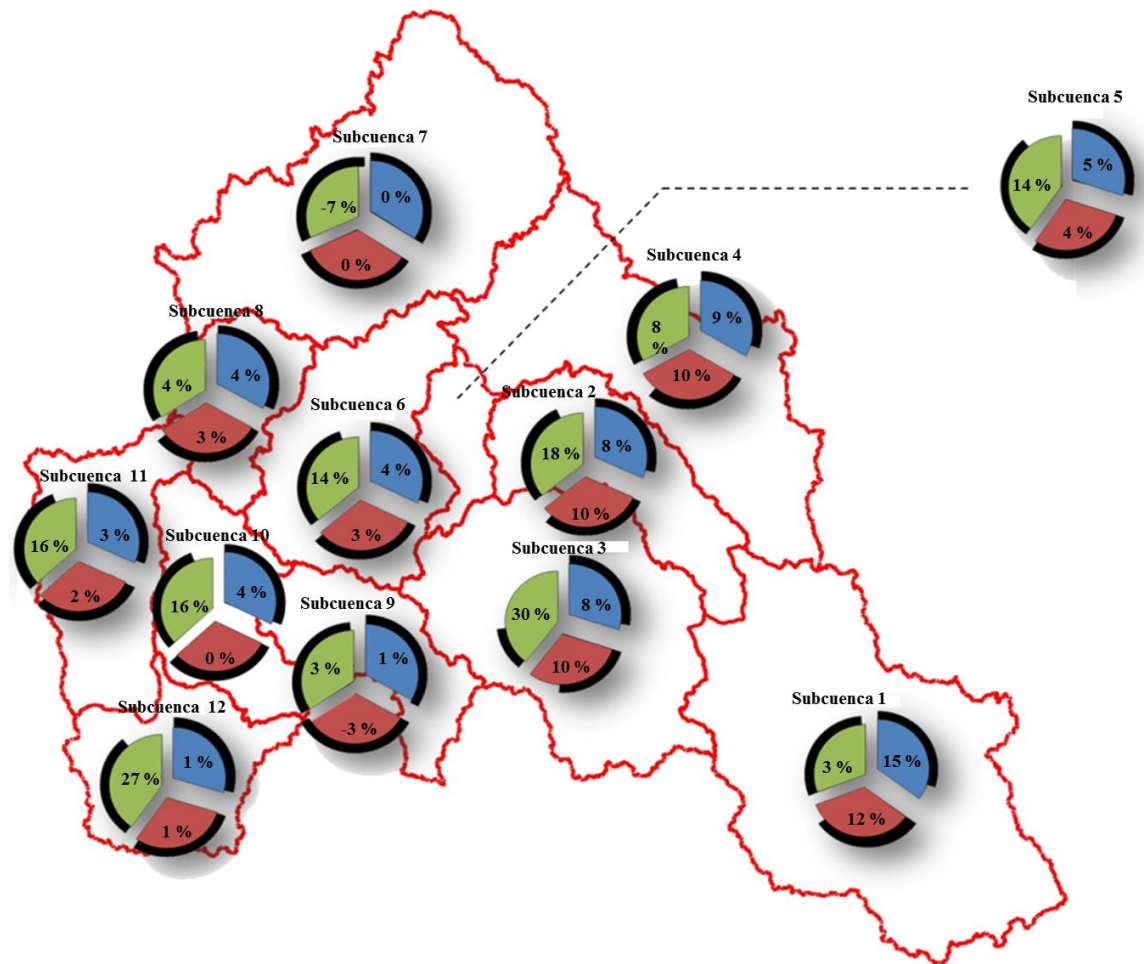


Figura 18.- Diferencias de la comparación de precipitación por subcuenca
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la siguiente figura se muestran graficados los valores acumulados en el período 2008-2014 de la lámina de precipitación con los métodos más representativos del estudio.

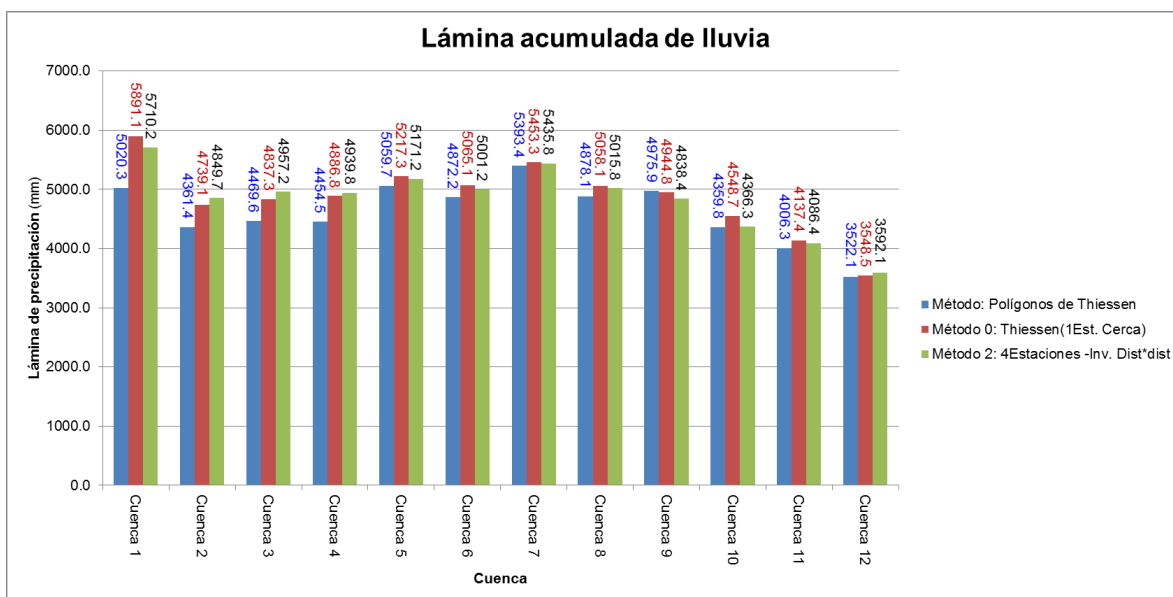


Figura 19.- Comparación de lámina de lluvia acumulada mediante diferentes métodos, incluido el método manual de los polígonos de Thiessen (mm)

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA

En la tabla siguiente se muestran los porcentajes de las diferencias de valores de lámina de precipitación acumulada.

Tabla 14.- Porcentajes de las diferencias de valores de lámina de precipitación acumulada con respecto al método manual de los polígonos de Thiessen

Método	Subcuenca												Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Método 0: Thiessen (1Est. Cerca)	17%	9%	8%	10%	3%	4%	1%	4%	-1%	4%	3%	1%	5%
Método 2: 4 Estaciones -Inv. Dist*dist	14%	11%	11%	10%	2%	3%	1%	3%	-3%	0%	2%	2%	4%

De las comparaciones anteriores, se observa que en las subcuencas 1, 2, 3 y 4, los resultados de los métodos son muy variables y con porcentajes de diferencia mayores al 8% con respecto al método manual, en especial el de diferentes alturas de ETISOL, esto tal vez sea debido a que la red de estaciones es muy dispersa. Por otra parte, en las subcuencas 5, 6, 7, 8, 10, 11, y 12 el método que más se asemeja a los resultados del método manual de polígonos de Thiessen es el de inverso a la distancia al cuadrado. En la subcuenca 9 el comportamiento fue opuesto al resto de las cuencas, el método manual de polígonos de Thiessen fue mayor hasta por un 3% que el de los métodos de polígonos de Thiessen e inversa a la distancia al cuadrado de ETISOL. Por lo anteriormente expuesto, el método del inverso a la distancia al cuadrado de ETISOL, desarrollado para el SIH, es el método con el cual se estimará la precipitación de cada subcuenca a utilizar

en la modelación hidrológica continua, cuyos valores se parecen más a los del método manual de polígonos de Thiessen, con diferencias medias alrededor del 4%; en contraparte, el método de diferentes alturas del ETISOL presenta las mayores diferencias. Otra razón para aprovechar la herramienta ETISOL para estimar la precipitación representativa de la cuenca, es que la lámina de precipitación obtenida es a partir únicamente de los valores registrados y no de valores sintéticos de las estaciones completadas, lo cual puede contribuir a reducir la incertidumbre existente en los valores de precipitación de la cuenca.

4. Metodología

A continuación se describen los métodos hidrológicos utilizados en la modelación hidrológica, para la cual se utilizó la plataforma HEC-HMS.

Modelación hidrológica con HEC-HMS

El sistema HEC-HMS fue desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, de los Estados Unidos, y es una herramienta computacional muy utilizada en la modelación hidrológica.

Las condiciones de humedad del suelo que existen en el momento de una tormenta severa, afectan significativamente el volumen de escurrimiento.

La información requerida para la modelación es la siguiente:

- Área de la cuenca y/o cuencas
- Tiempo de concentración y de retraso
- Tormentas registradas en pluviógrafos o estaciones automáticas.
- Precipitación diaria y/o horaria correspondiente a las fechas de la simulación.
- Gastos máximos horarios y/o diarios registrados en las corrientes en estudio.
- Curva Elevaciones-áreas-capacidades de los embalses
- Funcionamiento diario y/o horario de las presas correspondientes a las descargas por la obra de excedencias y elevaciones de los almacenamientos.
- Elevaciones diarias y/o horarias en los embalses, correspondientes a las fechas de la simulación en las presas.

Para facilitar en el proceso de la modelación es conveniente tener un esquema general de la interconexión del sistema de ríos, por lo cual, previo a la modelación se realizó la siguiente figura que muestra gráficamente cuáles son las cuencas de cabecera, las cuencas con embalses y los diferentes tramos de ríos y sitios de confluencia de unión de dos o más ríos para hacer integraciones para estimar la simultaneidad de avenidas.

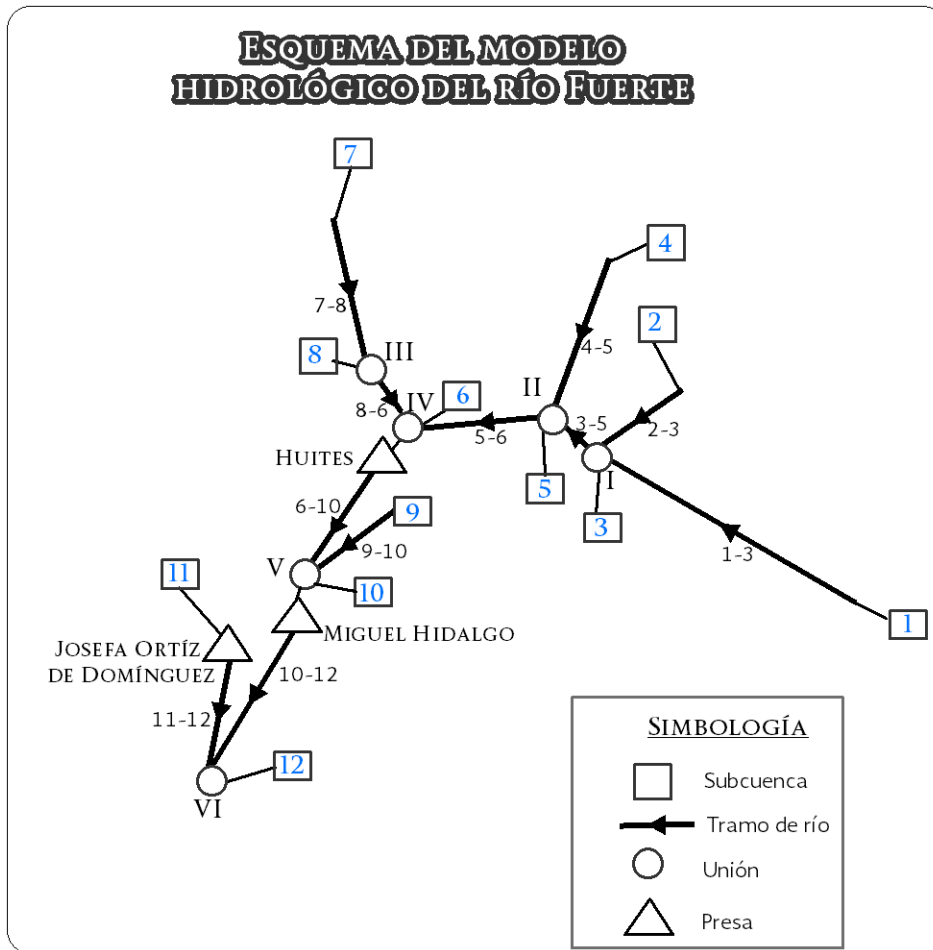


Figura 20.- Esquema del modelo hidrológico de la cuenca del río Fuerte
Fuente: Elaboración propia

El sistema HEC-HMS cuenta con una interface gráfica para el usuario (GUI), como se muestra en la siguiente figura, la cual provee los medios necesarios para introducir los respectivos datos de las componentes y para visualizar los resultados. Para dar inicio a la aplicación del sistema, primero se crea un proyecto en el menú principal del HMS, el cuál básicamente consta de tres partes o modelos:

- Modelo de cuenca (Basin Model)
- Modelo Meteorológico (Meteorologic Model)
- Especificaciones de control (Control Specifications)

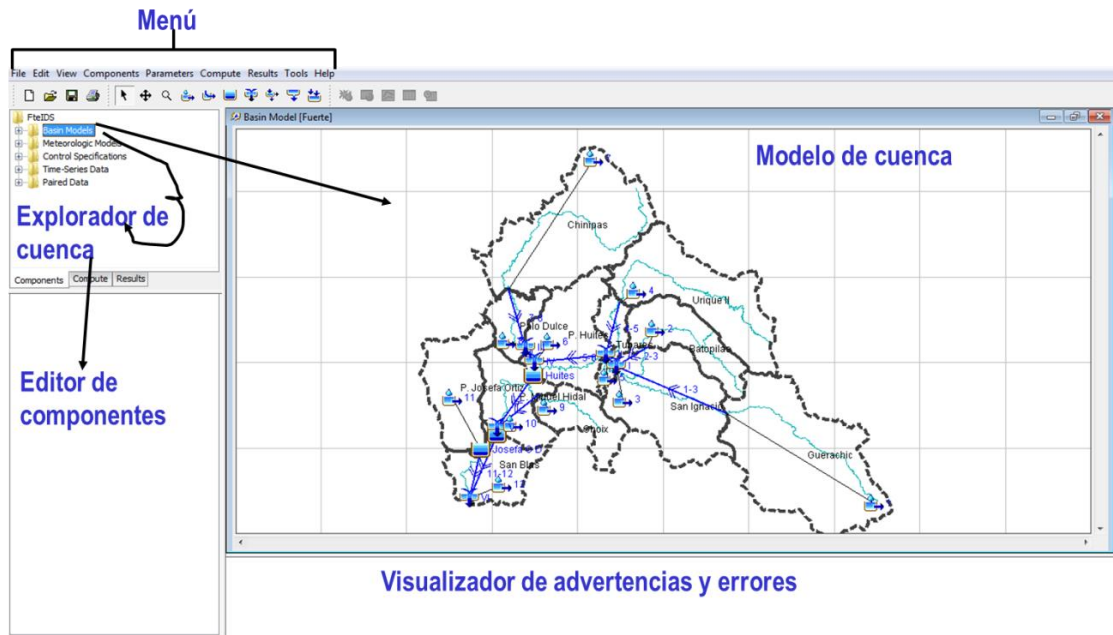


Figura 21.- Apariencia del Modelo HEC-HMS

Modelo de cuenca. En esta componente se introduce la red del sistema en estudio, con las componentes de subcuencas y tramos y elementos como presas de almacenamiento, incluyendo el nombre y características fisiográficas de cada subcuenca, además del modelo para calcular las pérdidas de precipitación (SMA⁴), el modelo para calcular el escurrimiento directo y de flujo base (Reservorio Lineal). En el Basin Model se etiquetan como “Loss Rate”, “Transform” y “Baseflow Method”, respectivamente. Es en esta parte es donde se ingresan los parámetros de cada subcuenca. En la siguiente figura se muestra el modelo de cuenca del río Fuerte:

⁴ Bennett, T.H. and Peters, J.C., “Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)”, Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000, Water Resources 2000, Rollin H. Hotchkiss, Michael Glade - Editors, July 30 – August 2, 2000, Minneapolis, Minnesota, USA

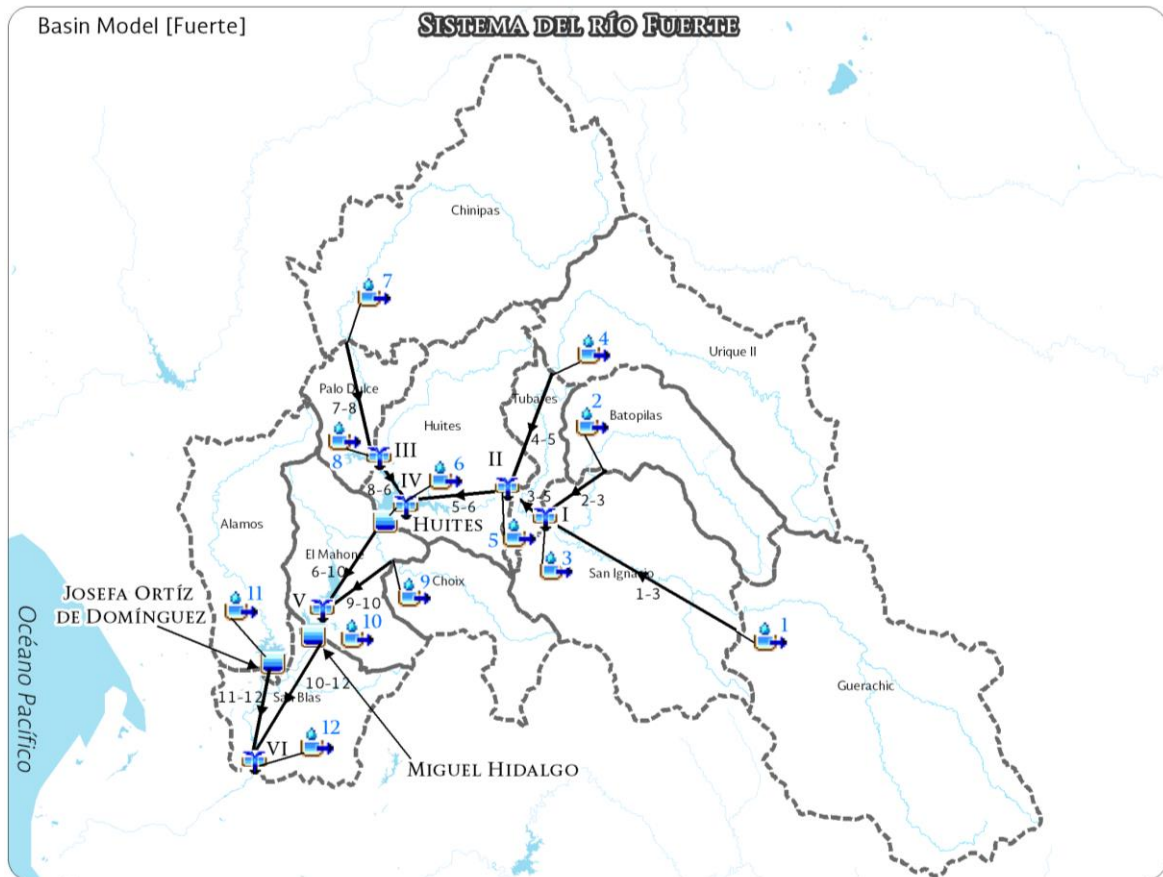


Figura 22.- Esquema general del modelo de cuenca en HEC-HMS

Modelo de humedad del suelo (SMA, Soil-moisture Accounting Model):

Al realizar la modelación hidrológica continua surge la necesidad de conocer la variación que experimentan los escurrimientos por el río en períodos largos de tiempo, incluyendo tanto períodos lluviosos como otros de ausencia de precipitaciones. Esto es la determinación del volumen de agua disponible para escurrimiento, o balance vertical. La mejor alternativa que contempla el programa HEC-HMS es la utilización del modelo SMA, en su variante de modelo semidistribuido, esto es debido al escaso conocimiento que se tiene de las características del terreno a pequeña escala.

Entre los resultados proporcionados por el modelo SMA se encuentra, en primer lugar, la precipitación en exceso, cuya transformación en hidrograma de escurrimiento superficial se realiza mediante un modelado posterior, independiente del modelo SMA. Por otro lado, se determina también el flujo subterráneo, cuya transformación

en hidrograma se realiza también mediante un modelado externo posterior. Otro de los resultados que proporciona es el relativo a la percolación profunda.

Elementos constituyentes del modelo SMA

El modelo SMA representa la cuenca mediante un conjunto de capas o depósitos, como se muestra esquemáticamente en la **figura 29**, en la que se pueden ver también las conexiones o flujos de agua existentes entre los mismos.

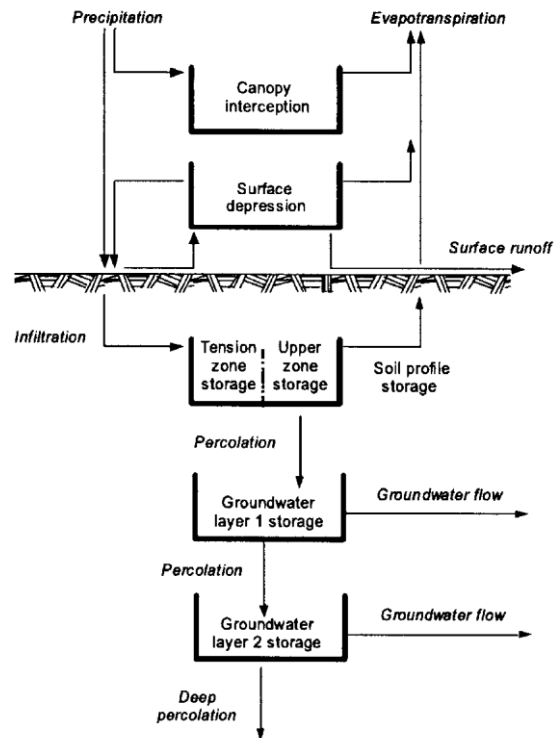


Figura 23.- Esquema conceptual del modelo SMA

Fuente: HEC-HMS Technical Reference Manual 2000

Del esquema anterior, se notan algunos conceptos o consideraciones importantes en los que está basado el SMA:

1. Simula la cuenca como una serie de almacenamientos en capas. En cada uno de los reservorios en capas se considera la tasa de gastos de ingreso o salida, las capacidades de volumen de almacenamiento y las pérdidas.
2. Los diferentes almacenamientos o reservorios del modelo son: intercepción de la vegetación, intercepción superficial, perfil de suelo no saturado, agua subterránea (acuífero capa 1 y 2)

3. Intercepción de la vegetación: Es la precipitación retenida en el follaje de los árboles, arbustos y que no llega a la superficie del suelo.
4. Intercepción superficial: Es el agua retenida en las depresiones superficiales. Es el agua que no fue retenida por intercepción elevada, además ingresan a este reservorio los excesos de la tasa de infiltración.

Las especificaciones necesarias para todas estas fases aparecen en la pestaña Loss, después de dar click en la subcuenca correspondiente. En la siguiente figura se representan los parámetros del SMA:

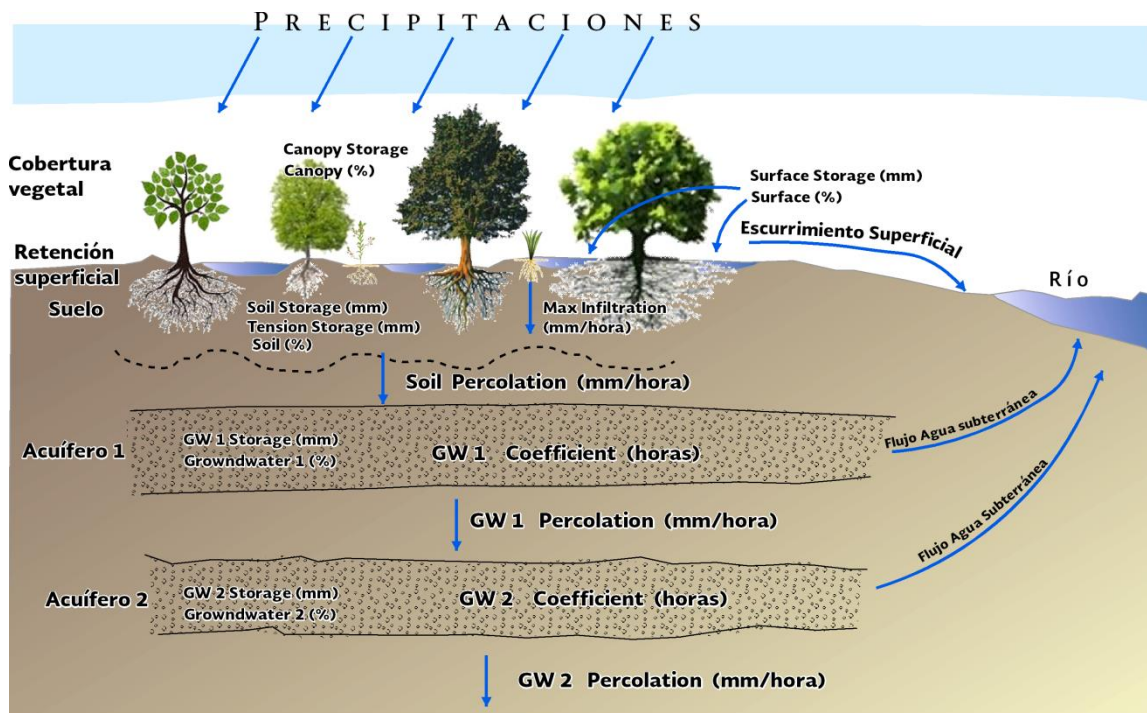


Figura 24.- Almacenamientos y Capas del modelo SMA

Fuente: Elaboración propia con base al HEC-HMS Technical Reference Manual 2000

Los parámetros de la figura que aparecen en *mm*, se refieren a la capacidad máxima de almacenamiento de cada nivel expresada como el espesor en *mm* de una lámina de agua equivalente. Los diferentes niveles o estratos, que en el suelo se diferencian como el agua susceptible de ser drenada por gravedad (*Upper zone*) y el agua solamente extraíble por Evapotranspiración (*Tension zone*). La suma de ambas, es decir, el total del agua almacenada en el suelo, se introduce en *Soil Storage (mm)* y la parte no drenable por gravedad se indica en la casilla *Tension Storage (mm)*.

Los parámetros que están en porcentaje (%) sirven para indicar el porcentaje de llenado de cada uno de los niveles (No indica la parte libre, indica la parte ocupada).

Los parámetros indicados en *mm/hora*, y asociados en la figura, se refieren al flujo máximo de agua que puede pasar de un nivel al siguiente: de las retenciones superficiales al suelo (infiltración), del suelo al primer acuífero, de este al segundo, y desde éste hacia abajo.

Los otros parámetros que son: dos coeficientes de ambos acuíferos (en *horas*) y el % de cuenca impermeable que no aparece en la figura.

El **proceso** se desarrolla de la siguiente manera: Cuando comienza la precipitación, primero se completa la capacidad de **retención de la vegetación** (Canopy Storage). La Evapotranspiración (*ET*) toma agua de este nivel antes que de los otros.

El agua no retenida por la vegetación pasa a la superficie del terreno. Desde esta **retención superficial** comienza la infiltración sin que se pueda superar la capacidad de infiltración (expresada en la casilla **Max Infiltration (mm/hora)**). La *ET* tomará agua de aquí si no la encuentra en el nivel anterior (Canopy). Si a pesar de la infiltración y de la *ET*, se excede el máximo almacenamiento que hayamos indicado en **Surface Storage (mm)**, el agua sobrante pasa al escurrimiento superficial.

El agua infiltrada llega al **suelo**; cuando el agua almacenada en el suelo supere el máximo que hayamos especificado en **Tension Storage (mm)** comenzará la percolación hacia el acuífero superficial; es decir, no es necesario que se exceda el valor máximo asignado al suelo en **Soil Storage (mm)**, sino que en cuanto exista agua gravífica, puede comenzar a percolar, sin superar el valor máximo posible indicado en **Soil Percolation (mm/hora)**.

El agua percolada desde el suelo, alimenta el **acuífero superficial** (*Groundwater 1*) hasta su capacidad máxima establecida en **GW 1 Storage (mm)**, y desde esa capa del acuífero el agua pasa a la capa inferior del acuífero (*Groundwater 2*) sin que el flujo pueda sobrepasar el máximo indicado en **GW 1 Percolation (mm/hora)**, y análogamente, desde el acuífero profundo se pierde agua por percolación sin superar el

límite indicado en **GW 2 Percolation (mm/hora)**. Desde ambos niveles del acuífero puede salir un flujo lateral que alimentará al gasto base del hidrograma final resultante.

Los coeficientes **GW 1 Coefficient (horas)** y **GW 2 Coefficient (horas)**, son el tiempo de retardo (*time lag*) que debe transcurrir para que el agua almacenada en cada uno de los niveles del acuífero salga ‘lateralmente’ y alimente al cauce como gasto base o flujo básico⁵.

Si no queremos incluir en el modelo alguna de las fases, basta con escribir cero en la casilla correspondiente al almacenamiento (*storage*) de ese nivel en *mm*.

El dato de **Impervious (%)** indica que en esa parte de la subcuenca, toda el agua precipitada se considerará precipitación neta y pasará al escurrimiento superficial.

Cálculo del gasto base (Baseflow) por el método de Linear Reservoir

Del cálculo de la fase anterior (*Loss*) para simular un proceso continuo, desde los acuíferos, puede llegar a salir un cierto flujo que llegará a alimentar el gasto base (*baseflow*) del río. Para que esos aportes se incorporen efectivamente al gasto, es necesario utilizar el método Linear Reservoir al calcular el gasto base.

Dando click en la pestaña *Baseflow* aparecen los parámetros que se le deben indicar para este método:

En la primera casilla se puede elegir entre especificar gastos (*discharge*) o gastos por km^2 (*discharge per area*). Si se dispone de aforos en periodos de estiaje, sería más lógica la primera opción, pero si se van a hacer estimaciones, puede ser más cómodo hacerlo en gasto por km^2

En las siguientes casillas indicaremos tres parámetros relativos al gasto proveniente de cada uno de los dos acuíferos considerados (*GW1* el más superficial, *GW2* el inferior):

GW Initial (m^3/s): Debemos introducir el gasto inicial (en el momento que el modelo comienza a trabajar)

GW Coefficient: Es el Groundwater Storage Coefficient (medido en horas). El acuífero actúa como un lago o embalse, que recibe y suelta agua, y como ellos, también el acuífero atenúa el gasto y lo retrasa, como en cualquier procedimiento de tránsito de

⁵ No se tiene claro cómo se distribuyen las salidas de agua de los niveles acuíferos entre la percolación hacia abajo y el flujo lateral que acabará alimentando el gasto base del río. Este flujo ‘lateral’ se puede producir cuando el almacenamiento del acuífero esté completo y la salida por percolación (*mm/hora*) no puede evacuar la entrada de agua.

avenidas. Este parámetro en horas informa al modelo del tiempo de respuesta de este depósito intermedio que es el acuífero 14⁶

GW Reservoirs. Simula cada acuífero como un número de depósitos en cadena que provocan la atenuación del gasto que comentábamos arriba. Por omisión aparece 1, que corresponde a la mínima atenuación.

Estimación inicial de parámetros

Para facilitar la calibración de parámetros en los cálculos, es recomendable que los parámetros del modelo se puedan estimar previamente y, por lo tanto, pueden tratarse como información disponible. Básicamente se trata de parámetros del suelo, por lo que basándose en la cubierta vegetal, tipo y uso de suelo, además de los parámetros geomorfológicos, podemos estimar con cierta validez los parámetros del suelo, como a continuación se explica cómo se establecieron los valores de estos parámetros para el presente problema.

Almacenamientos máximos

El almacenamiento máximo por intercepción de la vegetación (follaje), hf depende del tipo de vegetación.

- Cultivos (yerba mate): $hf = 1$ mm (asociado a cultivos agrícolas)
- Forestación: $hf = 9$ mm (asociado a bosque)
- Pastizales: $hf = 3$ mm (asociado a pradera)

De acuerdo a lo indicado en la Tabla:

Tabla 15.- Intercepción de agua por parte de la vegetación

Tipo de Vegetación	Intercepción (mm)
Bosque	9
Matorral	4
Prados	4
Urbano y baldío	0
Desnudo	0
Plantación forestal	9
Parques Urbanos	3

⁶ En la fase Loss, también se pudo haber introducido estos mismos coeficientes (GW1 Coefficient y GW2 Coefficient) con el mismo nombre y aparentemente con el mismo significado. Son coeficientes similares, por lo que podrían adjudicarse los mismos valores.

Tipo de Vegetación	Intercepción (mm)
Cultivos agrícolas	1

El almacenamiento máximo en depresiones (hd) depende del tipo de superficie del suelo (pavimentada o no) y de la pendiente. Teniendo en cuenta la Tabla siguiente, para el presente estudio se consideró $hd = 50.8$ mm, ya que la máxima pendiente en toda la cuenca es del 0.5%.

Tabla 16.- Almacenamiento máximo en depresiones del terreno

Descripción	Pendiente (%)	Alma. Sup. (mm)
Zonas Pavimentadas		3.2 - 6.4
Pendientes fuertes	>30%	1.0
Pendientes suaves	10-30%	12.7 – 6.4
Zonas llanas	0 - 5%	50.8

Para estimar el almacenamiento máximo en el suelo es necesario disponer de una representación de la variación del espesor del manto de suelo a través de la cuenca. A partir de estudios geológicos, ese espesor es del orden de los 3 m en cuencas bajas. Dado que en las cabeceras de cuenca se hacen evidentes los afloramientos de roca, el espesor se consideró prácticamente nulo en esa zona.

Adicionalmente, el cálculo del almacenamiento máximo en el suelo depende de la porosidad del medio, ya que es el factor por el que hay que multiplicar al espesor. Se consideró que el suelo pertenece al grupo hidrológico C, con lo que resulta una porosidad de 0.4 de acuerdo a la Tabla siguiente:

Tabla 17.- Porosidad y conductividad hidráulica para distintos tipos de suelo⁷

Parámetros de infiltración de Green-amp para varias clases de Suelos			
Clase de Suelo	Porosidad	Porosidad efectiva	Conductividad hidráulica (cm/hora)
Arena	0.437	0.417	11.78
Arena margosa	0.437	0.401	2.99
Marga arenosa	0.453	0.412	1.09
Marga	0.463	0.434	0.34
Marga limosa	0.501	0.486	0.65
Marga arenoarcillosa	0.398	0.330	0.15
Marga arcillosa	0.464	0.309	0.10
Marga limo-arcillosa	0.471	0.432	0.10

⁷ Ven Te Chow, "Hidrología Aplicada", Maidment, Mays, 1994

Parámetros de infiltración de Green-amp para varias clases de Suelos			
Clase de Suelo	Porosidad	Porosidad efectiva	Conductividad hidráulica (cm/hora)
Arcilla arenosa	0.430	0.321	0.06
Arcilla limosa	0.479	0.423	0.05
Arcilla	0.475	0.388	0.03

La profundidad de las raíces de los pastizales es del orden de 1 metro, mientras la correspondiente a la yerba mate y a la forestación es lo suficientemente profunda como para alcanzar el estrato basáltico, es decir, para cubrir todo el espesor de suelo.

Con respecto al almacenamiento máximo en la Zona Capilar de la capa superior de suelo, este fue estimado en 30 mm a partir de la regla de reconocimiento mostrada en la Tabla siguiente:

Tabla 18.- Almacenamiento máximo en la Zona Capilar, de acuerdo a la frecuencia observada de eventos de escurrimiento

Frecuencia de escurrimiento	Almacenamiento máximo en zona capilar (mm)
En todos los eventos	10.2 – 15.2
En eventos moderados	15.2 – 25.4
Solo en eventos largos	25.4 – 40.6
Nunca	> 40.6

Donde existe una capa subterránea (espesores de suelo mayores a los correspondientes a la Zona Superior), sólo se consideró una capa superior (en rigor, se tomó una capa inferior de espesor despreciable, sin percolación, de modo de representar la impermeabilidad del manto basáltico). Su espesor fue tomado como igual al resto del manto de suelo.

Infiltración/percolaciones máximas

En base a la Tabla siguiente, y teniendo en cuenta que se trata de suelo del grupo hidrológico C, la infiltración máxima se consideró de 2.5 mm/h.

Tabla 19.- Infiltración máxima por tipo de suelo⁸

Grupo hidrológico de suelo	Infiltración superficial (mm/hora)
A	>7.6
B	3.8 – 7.6
C	1.3 – 3.8
D	0 -1.27

La percolación máxima (desde la capa superior de suelo a la capa subterránea) se tomó igual a la conductividad hidráulica, para cuya estimación se tuvo en cuenta la Tabla siguiente. Se consideró que la infiltración es muy lenta, seleccionándose el valor de 0.6 mm/h.

Tabla 20.- Conductividad hidráulica de acuerdo a las características de filtración

Conductividad hidráulica (mm/hora)	Características de filtración
<0.8	Muy lenta
0.8 – 5	Lenta
5 – 20	Moderadamente lenta
20- 60	Moderada
60 – 120	Moderadamente rápida
120 - 180	Rápida

Con las consideraciones anteriores, se trataron de estimar los valores iniciales de los parámetros de las subcuencas, asociándolas con ciertas características físicas, lo cual puede servir de mucho a la hora de efectuar los primeros cálculos y calibraciones. De esta manera se continuó conjuntando la información básica para el *modelo de cuenca*, como se muestra en la siguiente figura:

⁸ “Urban Hydrology for Small Watersheds”, Natural Resource Conservation Service, Engineering Division, Department of Agriculture, USA, Technical Release-55, 1999.

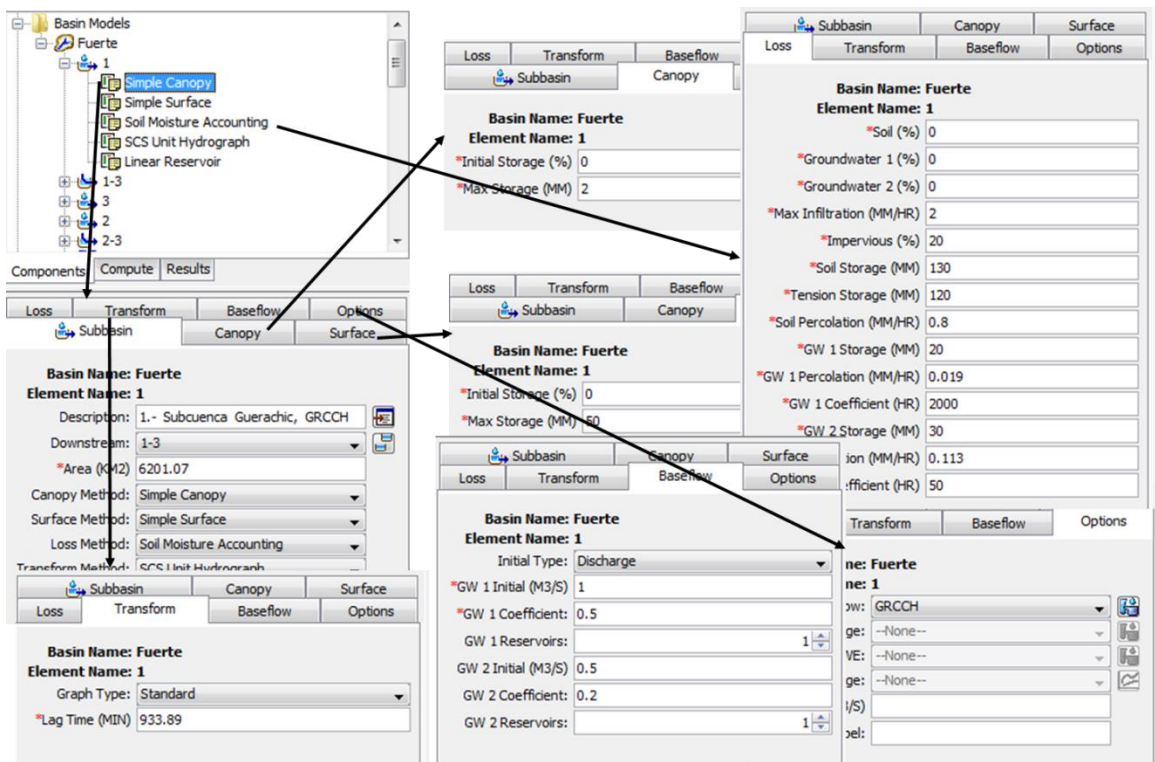


Figura 25.- Componentes del “Modelo de cuenca”

Valores iniciales de los parámetros

El rango de valores que pueden tomar los parámetros, valores mínimos y máximos, se muestran en el *inciso V del Apéndice*, y los valores iniciales de los parámetros en las subcuencas, y con los cuales se comenzaron a realizar las simulaciones para después afinarse con los registros hidrométricos, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 21.- Valores iniciales de los parámetros en la cuenca del río Fuerte

n	Parámetro	unidad	Subcuenca					
			1	2	4	5	7	9
1	Linear Reservoir - GW 1 Coefficient (1)	hora	0.08	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
2	Linear Reservoir - GW 1 Initial Discharge (1)	m3/s	2.65	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	Linear Reservoir - GW 1 Reservoirs (1)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	Linear Reservoir - GW 2 Coefficient (2)	hora	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
5	Linear Reservoir - GW 2 Reservoirs (2)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	min	3670.90	641.92	1485.85	524.73	1232.55	633.45
7	Simple Canopy - Initial Storage	%	1.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	Simple Canopy - Max Storage	mm	10.19	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
9	Simple Surface - Initial Storage	%	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	Simple Surface - Max Storage	mm	50.83	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
11	Soil Moisture Accounting -Groundwater 1 Percolation	mm/hora	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
12	Soil Moisture Accounting - Groundwater 1 Storage	mm	23.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
13	Soil Moisture Accounting -Groundwater 1 Storage Coefficient	hora	2011.30	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00
14	Soil Moisture Accounting -Groundwater 2 Percolation	mm/hora	0.02	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
15	Soil Moisture Accounting -Groundwater 2 Storage	mm	29.36	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
16	Soil Moisture Accounting -Groundwater 2 Storage Coefficient	hora	49.28	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
17	Soil Moisture Accounting - Initial Groundwater 1 Content	%	8.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	Soil Moisture Accounting - Initial Groundwater 2 Content	%	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	Soil Moisture Accounting - Initial Soil Content	%	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	Soil Moisture Accounting - Max Infiltration	mm/hora	1.90	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
21	Soil Moisture Accounting -Soil Percolation	mm/hora	0.28	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
22	Soil Moisture Accounting -Soil Storage	mm	129.76	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00
23	Soil Moisture Accounting -Tension Storage	mm	121.36	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00

A la vez de introducir los parámetros iniciales de las cuencas, también son necesarios para la modelación, información adicional, relativa a series de tiempo, tanto de precipitaciones, gastos registrados en las estaciones hidrométricas y salidas registradas en los almacenamientos, producto del funcionamiento de vasos, además de las características físicas de los embalses, esto es la curva elevaciones-almacenamientos tabulada y valores característicos del embalse del periodo en que se efectúa cada modelación.

Tránsito hidrológico

Existen dos tipos de tránsito hidrológico, el tránsito en cauces y tránsito en vasos de almacenamientos, para ambas simulaciones existen diferentes técnicas que tienen que ver con el tipo de información disponible y con la problemática que se quiera simular. En el presente trabajo se consideran ambos tipos de simulación, por un lado, el tránsito en cauces, para poder integrar la aportación de cada una de las corrientes tributarias, conforme a las subcuencas consideradas y la confluencia para el caso de dos o más corrientes; por lo que se considera la superposición de causas y efectos, hasta los sitios de confluencia de los hidrogramas en cada subcuenca previamente transitados por los tramos de cauces, con el método de Muskingum, al considerar el tiempo de recorrido de la salida de la Tramo comprendido entre la cuenca Alta y Baja, con lo cual se determina

con la información topográfica del cauce cada tramo y también la regulación de los embalses, con la simulación de tránsito de avenidas por vaso, como se explica a continuación:

Efecto regulador de presas

La presencia de presas o embalses, supone la regulación del régimen del escurrimiento, lo cual es importante considerar dentro de la simulación hidrológica de toda cuenca ya que son puntos de control del hidrograma de entrada que circula por el cauce y que pasar por estos puntos se modifica el libre flujo del agua.

Para gastos pequeños un embalse puede modificar totalmente el hidrograma del río. Pero esta modificación también puede producirse durante una avenida, debido al efecto de regulación de su almacenamiento permanente (por debajo de los vertedores) y temporal (por encima de los vertedores). Dependiendo del tamaño relativo del embalse frente al volumen de la avenida, el efecto registrado puede ser pequeño o muy importante.

Para considerar el efecto de los embalses en el presente estudio fue necesario contar, además de su localización, con las características físicas de este, dadas por las curvas que están en función de la altura de almacenamiento de agua siguientes:

- Curva elevaciones-volúmenes del embalse, que representa el volumen embalsado en función de la cota o nivel en el embalse.
- Curva de descarga, que representa los valores máximo (compuertas y válvulas abiertas) y mínimo (compuertas y válvulas cerradas) de capacidad de descarga en función de la cota en el embalse.

Simulación del embalse en HEC-HMS

La simulación de un embalse se realiza de forma diferente, dependiendo del tipo de información disponible respecto de los volúmenes, los niveles en el embalse y los gastos de salida. En la Figura siguiente se muestra de manera general las opciones disponibles en el programa para llevar a cabo esta simulación, conocida también como tránsito de avenidas en vasos.

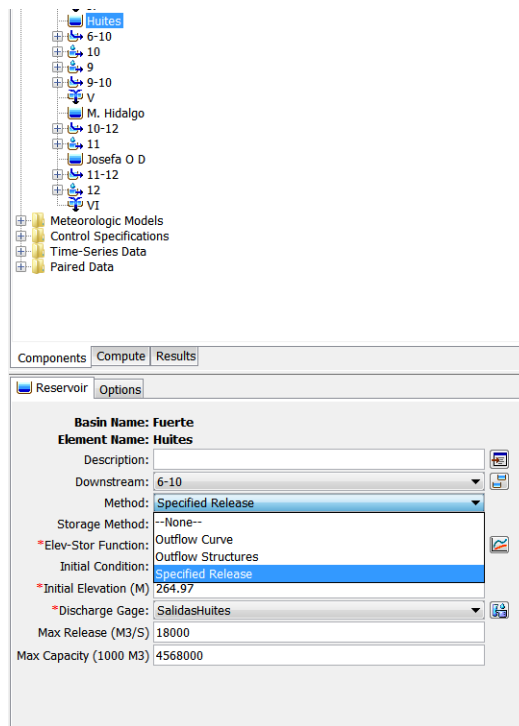


Figura 26.- Tránsito de avenidas por vaso

Para los casos de los tres embalses de la cuenca en estudio, dado que se trata de presas con vertedor controlado por compuertas, se eligió la opción *Specified Released*, la cual considera como datos de entrada las salidas registradas en el funcionamiento del vaso y las condiciones iniciales del embalse, por lo que fue como se especificó en la modelación al momento de hacer la simulaciones.

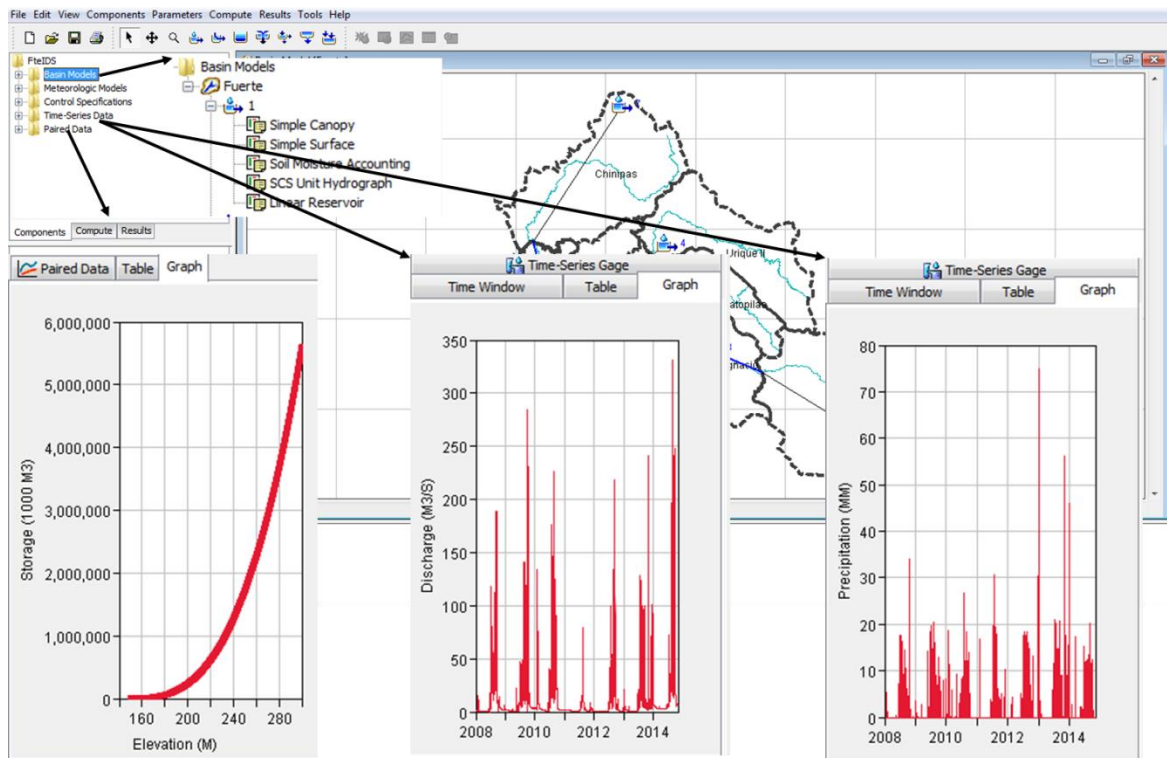


Figura 27.- Componentes de la modelación hidrológica en HEC-HMS

Modelo Meteorológico. Antes de definir el modelo meteorológico, se debe ingresar la precipitación, para asignar la representativa de cada cuenca; por conveniencia y facilidad en el proceso de cálculo, se decidió ingresarla en forma de hietograma representativo de cada subcuenca con intervalos de tiempo a cada seis horas, como series de tiempo, componente de la modelación. Para esto se utiliza la información que se mencionó anteriormente, las componentes de series de tiempo de estaciones meteorológicas, ingresadas como hietogramas para cada subcuenca, información que se ingresa como estación meteorológica, obtenida fuera del programa HEC-HMS, como ya se mencionó, mediante el método de inverso a la distancia al cuadrado del programa ETISOL del SIH. Además de la precipitación, debido a que es un modelo continuo, HEC-HMS requiere más información, por lo que es necesario introducir previamente datos de Evapotranspiración Potencial (ETP) o bien, el mismo programa puede estimarla de forma agregada por el método de Priestley-Taylor, para lo cual, requiere contar con información en series de tiempo de estaciones meteorológicas automáticas, similar a la precipitación, pero con otras variables físicas gage como temperatura, radiación, etc. por lo que, por conveniencia y facilidad en los cálculos, los valores de evapotranspiración se introducen al programa como Monthly Average, para lo cual, se introducen los valores

mensuales de la misma, pero también se pueden ingresar los valores mensuales de evaporación y proporcionar los coeficientes mensuales que relacionan la evaporación con la evapotranspiración.

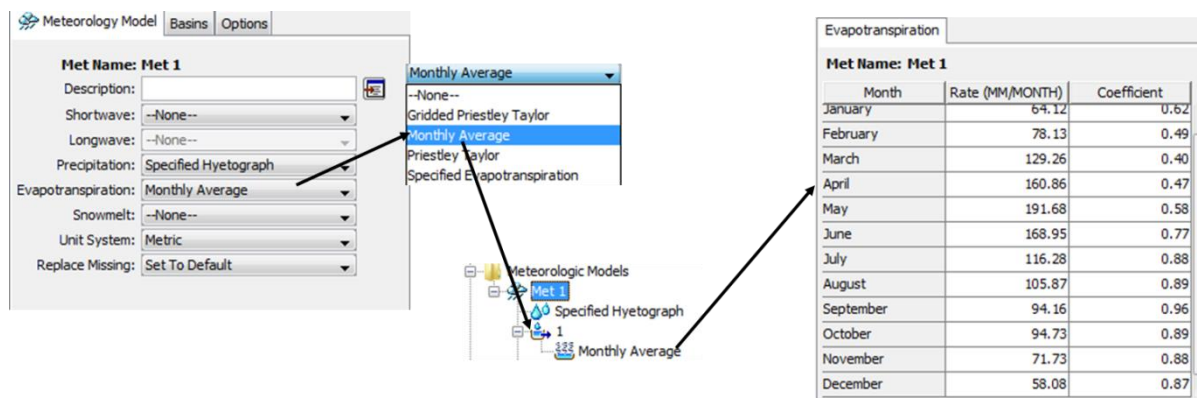


Figura 28.- Evapotranspiración en el modelo de cuenca en HEC-HMS

Del informe final entregado a la Comisión Nacional del Agua en 1998, por parte de la NWS/NOAA como parte del convenio de colaboración, se obtuvieron los porcentajes mensuales de relación evaporación-evapotranspiración en la cuenca del río Fuerte, valores mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 22.- Porcentajes mensuales medios en el río Fuerte de relaciones evaporación-evapotranspiración⁹

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Coefficiente	0.62	0.49	0.40	0.47	0.58	0.77	1.25	1.44	0.96	0.89	0.88	0.87

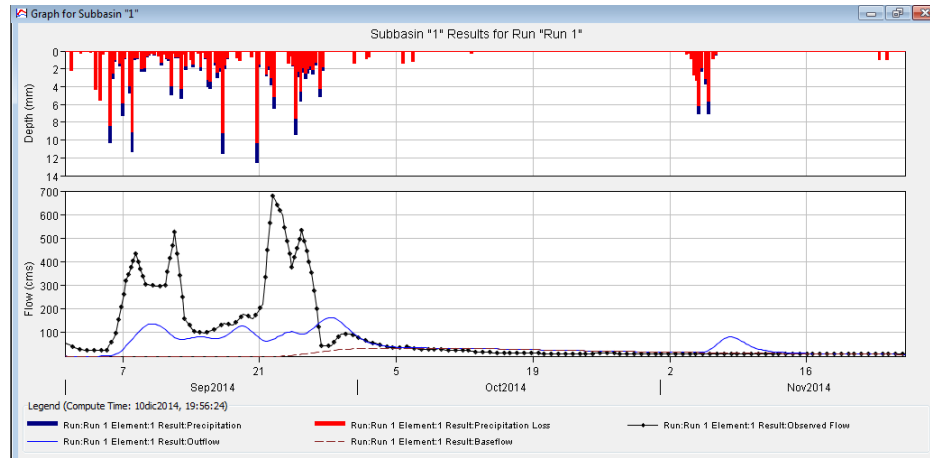
Especificaciones de control. Elemento que sirve para ingresar la fecha y hora de inicio y de fin de cada simulación, así como el intervalo de tiempo que es de 6 horas. En cada simulación se consideran 10 días de datos registrados para la fecha y hora de inicio de la simulación y 3 días de pronóstico (futuro) para el fin de la simulación del evento.

Una vez creados estos tres componentes se puede proceder a realizar las simulaciones en el modelo HEC-HMS, con lo se obtienen resultados de manera gráfica y tabular.

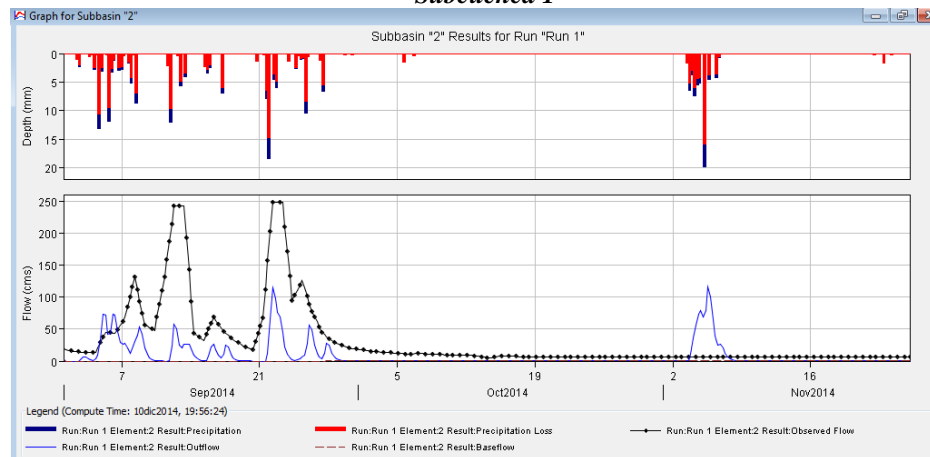
⁹ Tomada del informe “Río Fuerte Basin Forecast system”, septiembre de 1988, Table 4.8. Average Monthly Coefficients (ratio of PET over potential evaporation) in the Río Fuerte Basin

Resultados iniciales obtenidos

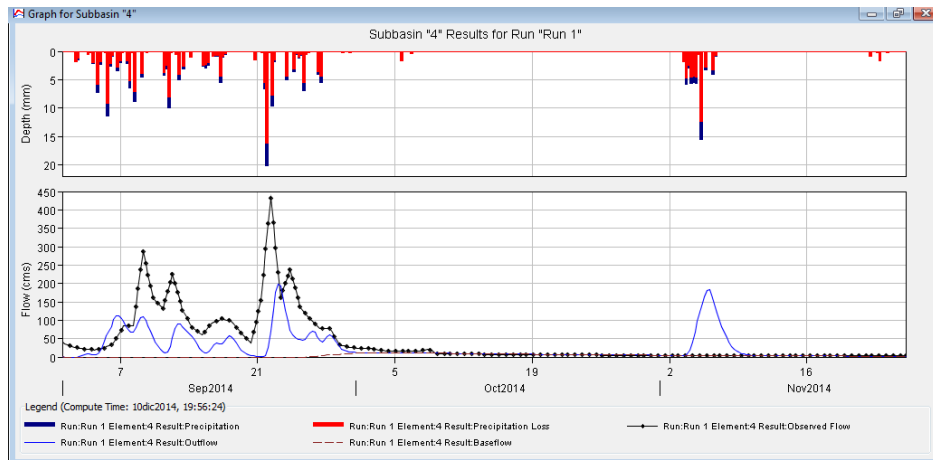
Una vez que se recabo y proceso la información, además de armar el modelo considerando los parámetros iniciales, se empezaron a realizar las simulaciones y a obtener los primeros resultados que se muestran gráficamente en las siguientes láminas, que muestran en línea continua y puntos negros, los gastos observados y en línea continua azul los hidrogramas simulados por el modelo HEC-HMS:



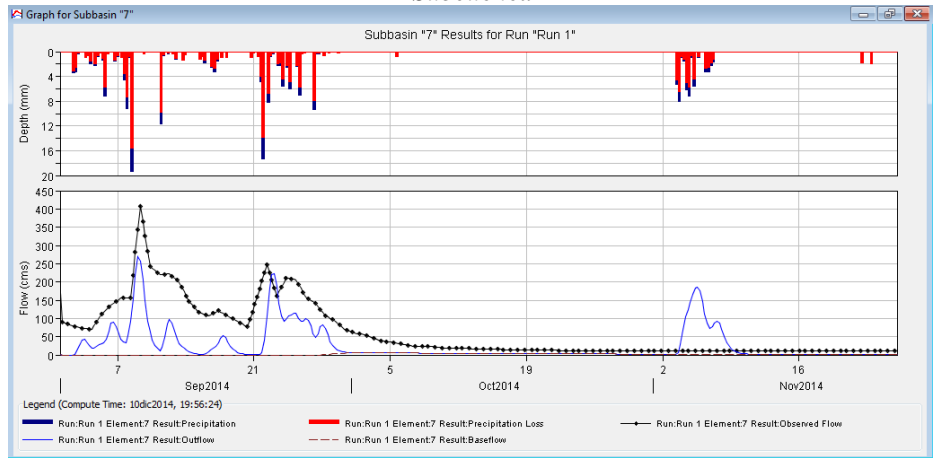
Subcuenca 1



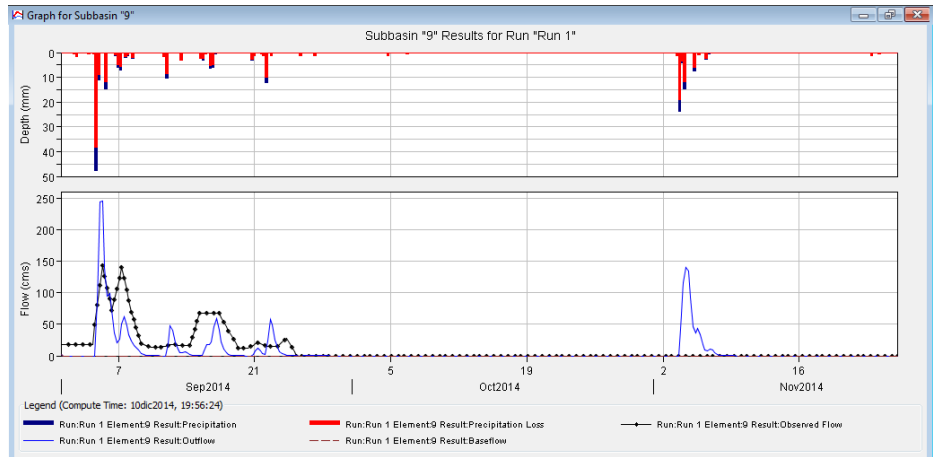
Subcuenca 2



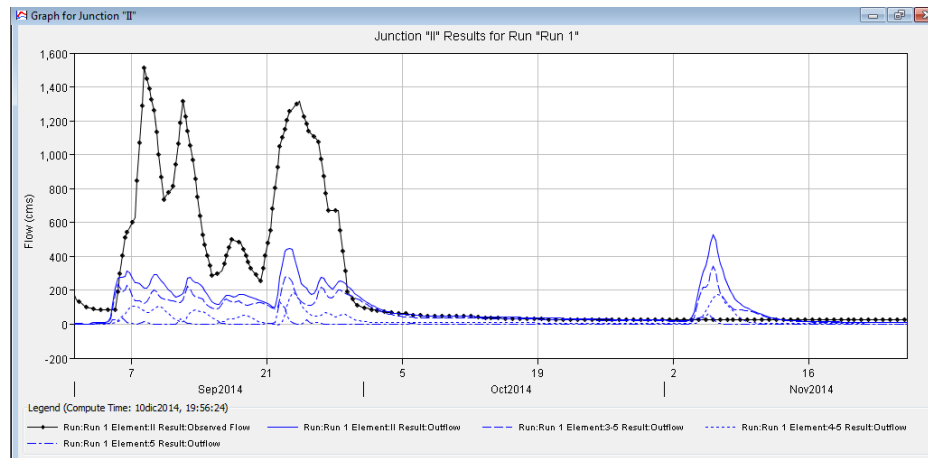
Subcuenca 4



Subcuenca 7



Subcuenca 9



Integración II (incluye Subcuenca 5)
Figura 29.- Resultados iniciales en HEC-HMS

Como se puede notar en los resultados, de la comparación de los hidrogramas simulados con los observados, estos tienen diferencias significativas y se desprende que los valores simulados pueden mejorarse, por lo que se procedió a hacer la calibración de los parámetros.

Calibración

Uno de los objetivos planteados en el presente trabajo fue: “Evaluar el impacto que se tiene en el Pronóstico de avenidas al realizar una re-calibración de los parámetros de los modelos hidrológicos ya implementados en una cuenca”, además que, para que cuenten con cierto grado de validez los resultados de las modelaciones, existe la necesidad de que los parámetros que intervienen en la definición del modelo de cuenca posean valores adecuados. Para dar inicio con la estimación de los parámetros, se ha buscado que estos tengan una relación directa con las características fisiográficas de la cuenca y del cauce. Para dejar mejor definidos esos parámetros, conviene la posibilidad de recurrir a un proceso de calibración. El citado proceso de calibración necesita disponer, a su vez, de registros de precipitación y mediciones de gastos, y consiste en la búsqueda de los valores en los parámetros que proporcionan un mejor ajuste entre el hidrograma simulado y el observado. Este proceso recibe también, a veces, el nombre de optimización de parámetros.

Proceso general

Cuando se trata de una simulación hidrológica continua, como es el caso del presente trabajo, no tiene sentido realizar la calibración sobre la totalidad del período de simulación, aunque se disponga de datos para ello, por lo que resulta más razonable elegir un período de menor duración, coincidente con el que tenga una serie de datos más confiable.

A partir de los valores iniciales de los parámetros, de acuerdo con los criterios y procedimientos expuestos anteriormente, resulta de mucha utilidad que, en cuanto más afinados sean dichos valores iniciales, más rápido será el proceso de calibración.

Un aspecto importante dentro del proceso de calibración es el establecimiento de la denominada función objetivo, que sirve para valorar la mayor o menor bondad del ajuste entre el hidrograma simulado y el observado. Lo cual tiene que ver directamente con el criterio de optimización a utilizar, que depende de la función objetivo: en algunos casos, el mejor ajuste se consigue al maximizar la función objetivo, mientras que en otros la mejor solución se obtiene al minimizar dicha función objetivo.

Dependiendo de los resultados obtenidos, según se crea conveniente, se pueden modificar los valores de los parámetros, siguiendo procedimientos manuales o automáticos, tal como se describe más adelante, repitiéndose el proceso hasta conseguir un ajuste satisfactorio.

Es interesante señalar que los valores de los parámetros así determinados dan lugar a un determinado modelo de cuenca, que está asociado a los datos considerados en el proceso de calibración. Su extrapolación a otras situaciones, es decir, su combinación con otros modelos meteorológicos, no tiene por qué producir siempre resultados acordes con el comportamiento real de la cuenca, siendo aconsejable realizar algún tipo de comprobación adicional.

Calibración manual

Es el proceso de calibración en el que las modificaciones de los valores de los parámetros se realizan, en todo momento, a criterio del usuario, lo cual da lugar a la realización de una serie de consideraciones sobre su mayor o menor idoneidad.

La aplicación de este procedimiento requiere un conocimiento profundo, por parte del usuario, del funcionamiento del programa HEC-HMS, y del modelo de cuenca en particular, así como de la sensibilidad de su respuesta ante diversas modificaciones de

los parámetros. Esta manera de calibración permite tener presente las características fisiográficas de la cuenca y del cauce, sin perder de vista el sentido físico. Como posible inconveniente, estaría la falta de un criterio claro sobre la consecución de la calibración óptima, que, en muchos casos, queda a expensas de la subjetividad del usuario.

Calibración automática

El sistema HEC-HMS contiene la posibilidad de realizar el proceso de calibrado de manera automática, basándose en las funciones objetivo y en los algoritmos de ajuste que le indique el usuario, sin que este tenga que tomar decisiones intermedias. En el presente trabajo, para el proceso automático se ha considerado el algoritmo de Nelder y Mead, que a diferencia del Gradiente Univariado, no utiliza ningún tipo de derivada en la búsqueda de la función objetivo. En su lugar, utiliza una búsqueda directa, siguiendo una estrategia basada en el conocimiento adquirido en iteraciones previas, que permite identificar las estimaciones buenas de parámetros, desechar las malas, y generar estimaciones que proporcionan mejores resultados, a partir de las consideradas como buenas.

Funciones objetivo

Son expresiones matemáticas que sirven para valorar cuantitativamente la mayor o menor bondad del ajuste entre el hidrograma simulado y el observado. El programa HEC-HMS considera cuatro posibles funciones objetivo, con la particularidad de que algunas de ellas son más adecuadas que otras en los diferentes tipos de situaciones que se pueden presentar.

Habida cuenta de sus respectivas definiciones y expresiones matemáticas, el mejor ajuste se consigue, en todos los casos, para aquella combinación de parámetros que hace mínimo el valor de la función objetivo considerada.

Para la cuenca de estudio se ha considerado la función objetivo del *Error medio cuadrático ponderado* (Peak-Weighted RMS Error), que desde el punto de vista conceptual es la más sofisticada, pues comienza por considerar el cuadrado de la diferencia de ordenadas en cada uno de los instantes utilizados para definir el hidrograma, multiplicando posteriormente cada uno de dichos valores por un coeficiente de ponderación, consiste en obtener la raíz cuadrada de la sumatoria de los valores

cuadráticos ponderados, divididos entre el número de puntos utilizados para definir el hidrograma. El resultado obtenido de este conjunto de operaciones constituye un indicador de la mayor o menor bondad del ajuste. En la siguiente figura se muestra gráficamente un esquema en que se realizó en HEC-HMS la calibración ponderada.

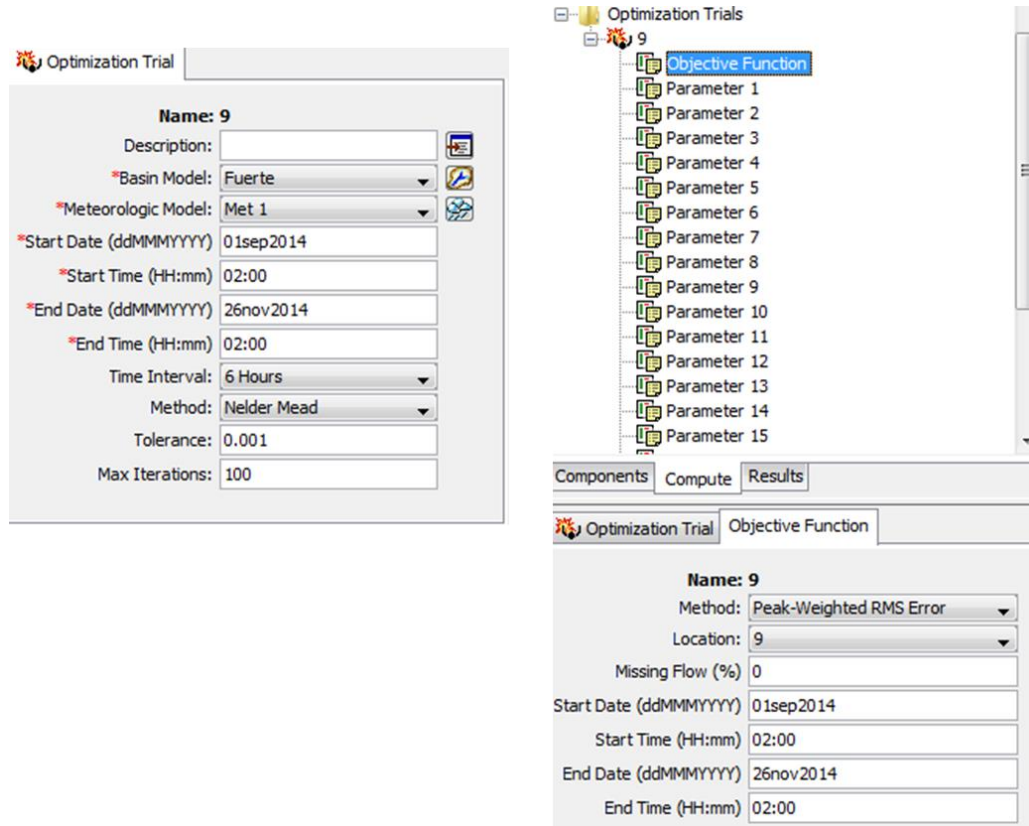


Figura 30.- Calibración automática en HEC-HMS

Aspectos considerados en la calibración

Al momento de hacer las calibraciones se trató de considerar varios aspectos, como:

- Estimar los parámetros iniciales - Gastos Observados
- Prueba y error
- Enfoque apropiado para el ajuste de los parámetros
- Optimización automática de los parámetros
- Calibrar las cuencas de cabecera menos complicadas
- Seleccionar el período de calibración
- Calibrar cuencas restantes de cabecera
- Calibrar cuencas propias e intermedias
- Efectos en el modelo causados por cambios en los parámetros

- Uso de los parámetros calibrados en el pronóstico

Valores de los parámetros calibrados

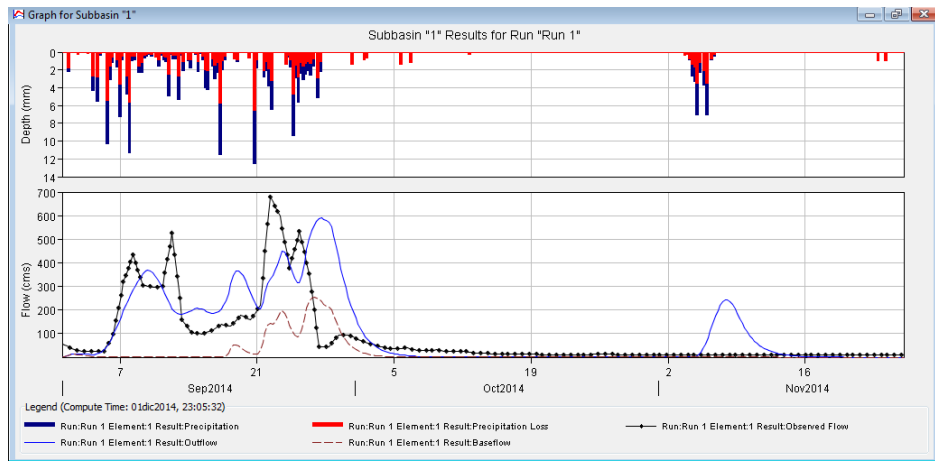
Los valores de los parámetros calibrados de las subcuencas, para el mes de noviembre de 2014, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 23.- Valores de los parámetros calibrados en las subcuencas del río Fuerte

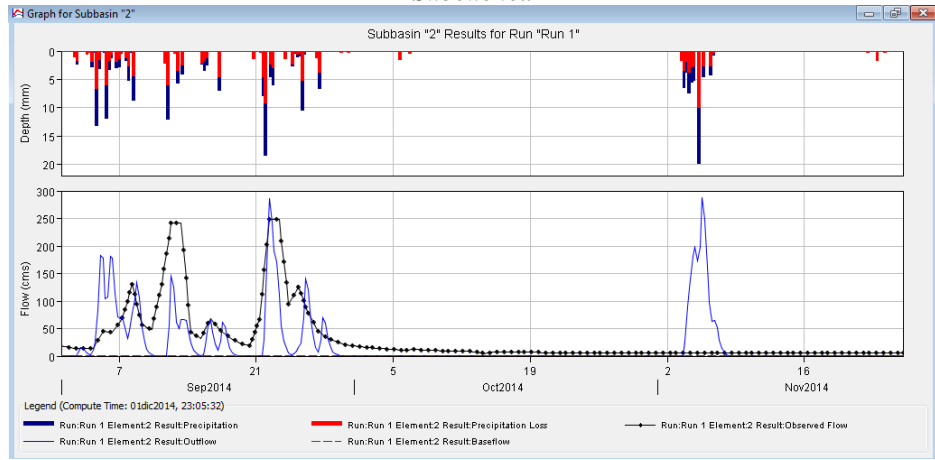
n	Parámetro	unidad	Subcuenca					
			1	2	4	5	7	9
1	Linear Reservoir - GW 1 Coefficient (1)	hora	2.39	0.56	0.56	0.46	0.42	3.73
2	Linear Reservoir - GW 1 Initial Discharge (1)	m ³ /s	1.38	1.06	1.06	0.99	0.10	4.23
3	Linear Reservoir - GW 1 Reservoirs (1)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	Linear Reservoir - GW 2 Coefficient (2)	hora	1.58	0.26	0.26	0.26	0.25	3.43
5	Linear Reservoir - GW 2 Reservoirs (2)		5.00	100.00	68.00	68.00	60.00	50.00
6	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	min	3673.60	641.98	1492.50	536.81	1228.90	636.68
7	Simple Canopy - Initial Storage	%	1.72	0.06	0.06	0.06	0.27	3.23
8	Simple Canopy - Max Storage	mm	1.45	2.06	2.06	2.06	2.98	23.62
9	Simple Surface - Initial Storage	%	3.48	0.06	0.06	0.06	0.39	3.23
10	Simple Surface - Max Storage	mm	51.57	50.06	50.06	50.06	49.73	53.23
11	Soil Moisture Accounting -Groundwater 1 Percolation	mm/hora	4.43	0.08	0.08	0.08	5.92	3.25
12	Soil Moisture Accounting - Groundwater 1 Storage	mm	20.97	20.06	20.06	20.06	29.84	23.23
13	Soil Moisture Accounting -Groundwater 1 Storage Coefficient	hora	2002.00	2000.10	2000.10	2002.00	2000.20	2003.20
14	Soil Moisture Accounting -Groundwater 2 Percolation	mm/hora	0.36	0.18	0.18	0.11	0.03	3.34
15	Soil Moisture Accounting -Groundwater 2 Storage	mm	32.57	30.06	30.06	31.00	34.35	33.23
16	Soil Moisture Accounting -Groundwater 2 Storage Coefficient	hora	51.07	50.06	50.06	50.06	43.96	53.23
17	Soil Moisture Accounting - Initial Groundwater 1 Content	%	3.51	0.06	0.42	0.42	19.79	3.23
18	Soil Moisture Accounting - Initial Groundwater 2 Content	%	1.33	0.42	0.06	0.06	16.00	3.23
19	Soil Moisture Accounting - Initial Soil Content	%	5.39	0.06	0.06	0.06	0.53	3.23
20	Soil Moisture Accounting - Max Infiltration	mm/hora	6.76	2.06	2.06	2.06	0.94	5.23
21	Soil Moisture Accounting -Soil Percolation	mm/hora	1.88	0.86	0.86	0.86	0.73	4.03
22	Soil Moisture Accounting -Soil Storage	mm	132.11	130.06	130.06	130.06	129.43	133.23
23	Soil Moisture Accounting -Tension Storage	mm	114.40	120.06	120.06	120.06	120.70	123.23

Resultados obtenidos con parámetros calibrados

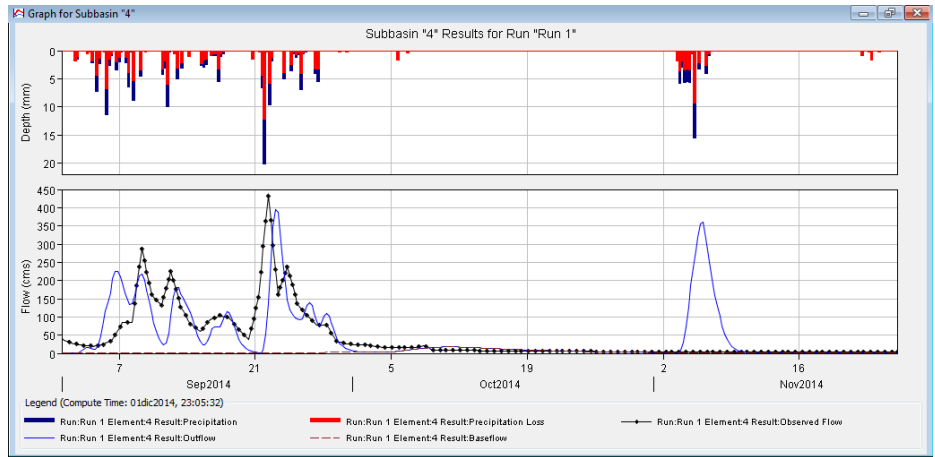
Una vez que se fueron calibrando los parámetros de la cuenca, se realizaron nuevamente las simulaciones que muestran como ejemplo los siguientes resultados, en línea continua y puntos negros, los gastos observados y en línea azul continúa los valores simulados:



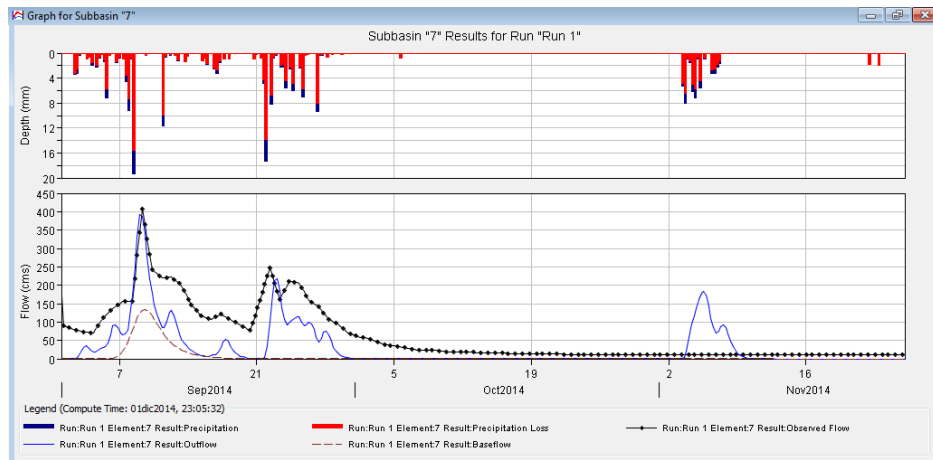
Subcuenca 1



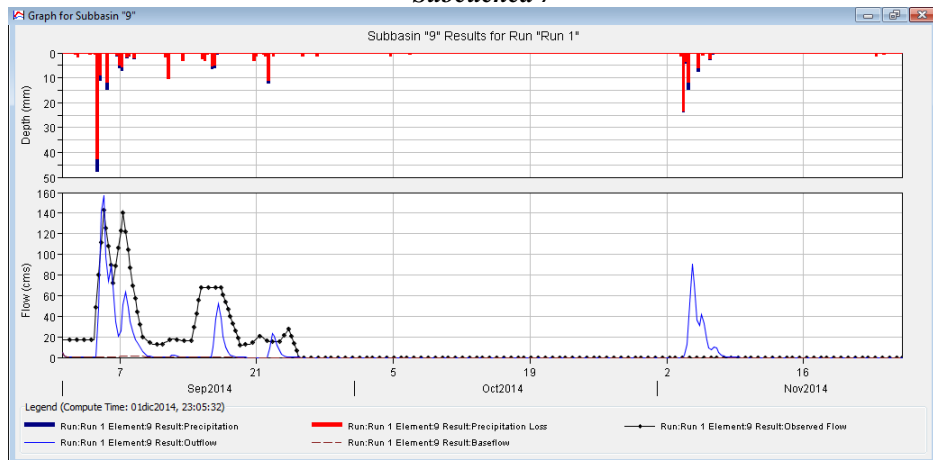
Subcuenca 2



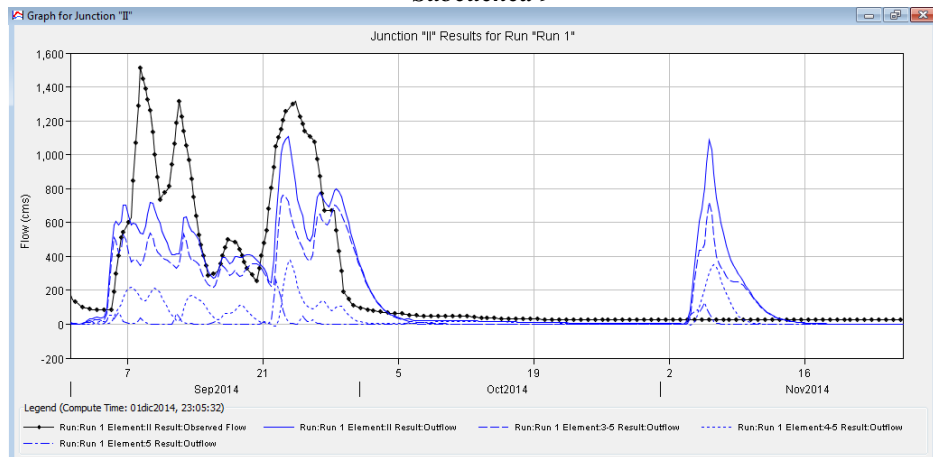
Subcuenca 4



Subcuenca 7



Subcuenca 9



Integración II (incluye Subcuenca 5)

Figura 31.- Resultados con parámetros calibrados en HEC-HMS

Los valores simulados mostrados en las figuras anteriores, ya se apegan más a los valores registrados.

Consideraciones en las simulaciones hidrológicas continuas

Una vez establecidas las modelaciones hidrológicas dentro del sistema HEC-HMS, se han considerado dos aspectos importantes para efectuar en las simulaciones posteriores:

- 1) realización de una simulación de control, con los datos observados, para buscar las condiciones de las variables de estado (calibración de los parámetros)
- 2) ejecución de la simulación de previsión: partiendo de las condiciones de las variables de estado calculadas y calibradas en 1), se estiman las previsiones hidrológicas considerando las previsiones meteorológicas.

Para esta última tarea, se consideran los valores de la previsión meteorológica, en este caso se utilizará el modelo numérico WRF de la CGSMN para 3 días de previsión y con 16 km de resolución de malla.

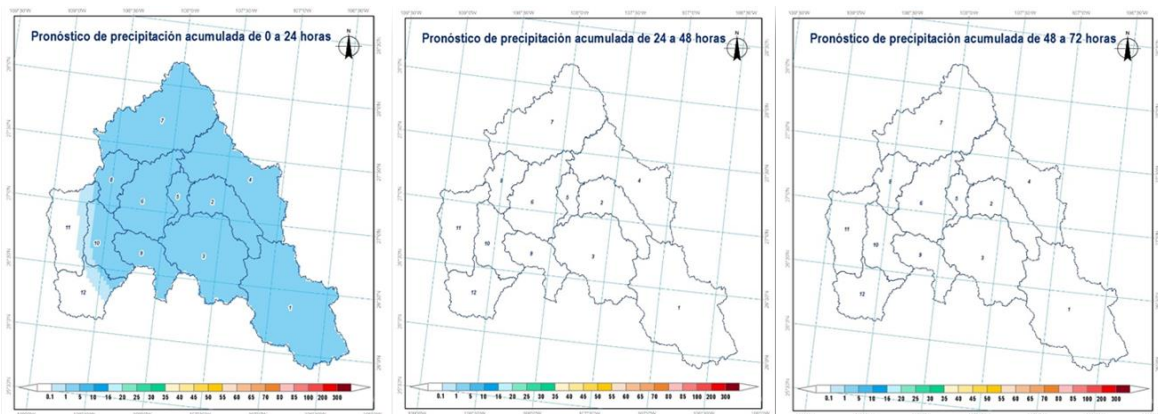
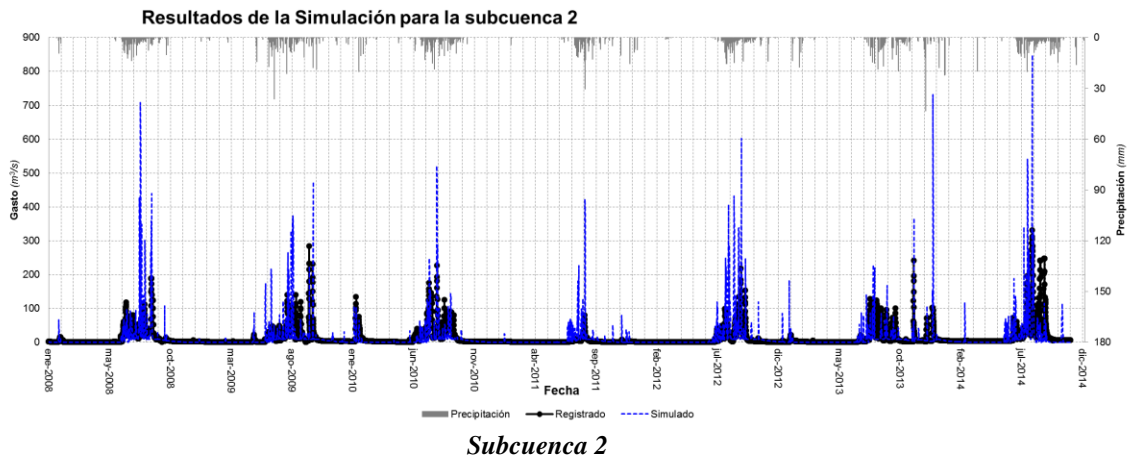
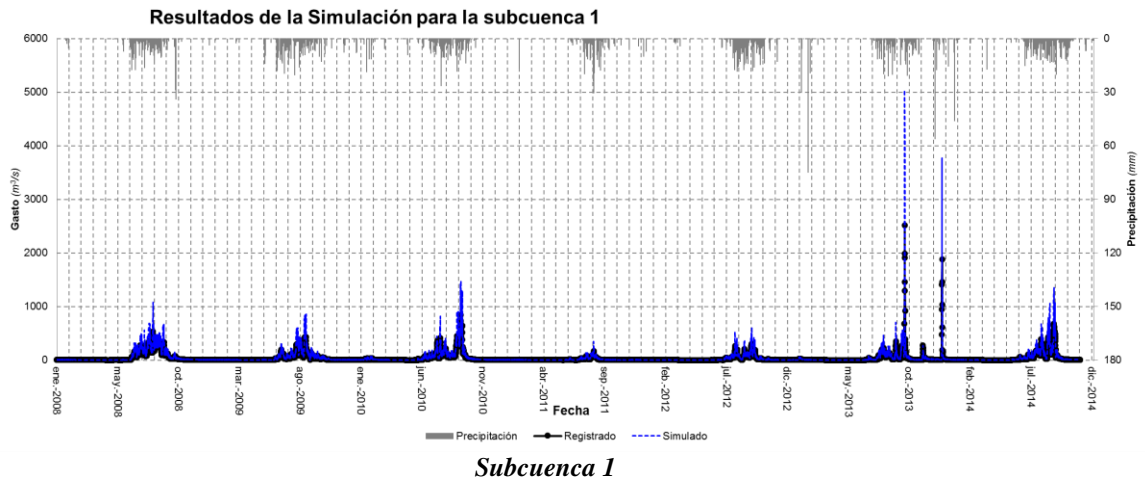


Figura 32.- Pronóstico de precipitación para 3 días
Fuente: Elaboración propia con información de la CGSMN

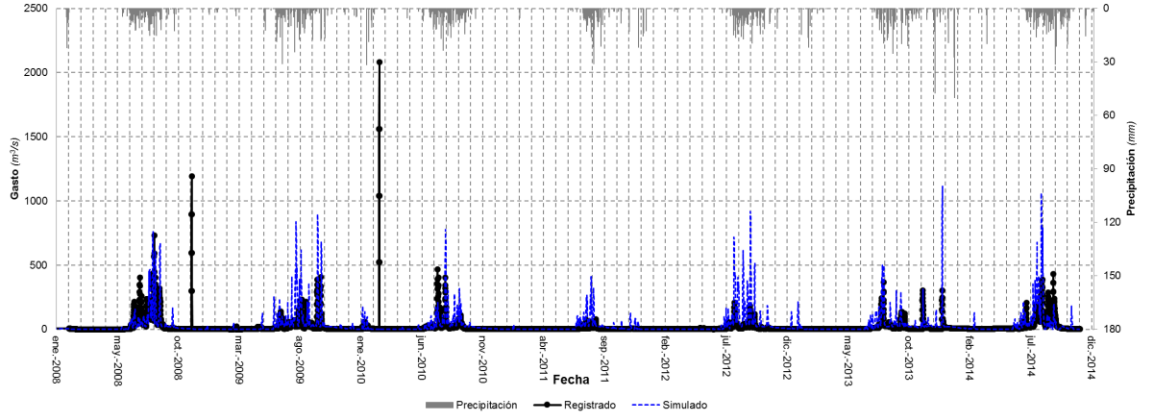
De todo lo anterior, se puede simular para 10 días de datos registrados y con los parámetros calibrados, simular 3 días adicionales con el pronóstico meteorológico (futuro), con el fin de prever en la simulación, algún evento de magnitud considerable que pudiera provocar daños a los centros de población y a la propia infraestructura aguas abajo de los sitios de pronóstico y poder realizar acciones de mitigación o prevención.

5. Resultados

El funcionamiento de un modelo hidrológico es usualmente evaluado por inspección visual de las avenidas observadas y simuladas, en la siguiente figura se muestran los resultados de la modelación hidrológica continua en el período 2008-2014 de forma diaria, simulaciones en las que se fueron actualizando los parámetros de las subcuencas de acuerdo a cada corrida y optimización, por lo que a continuación se muestran los valores de gastos simulados y registrados:

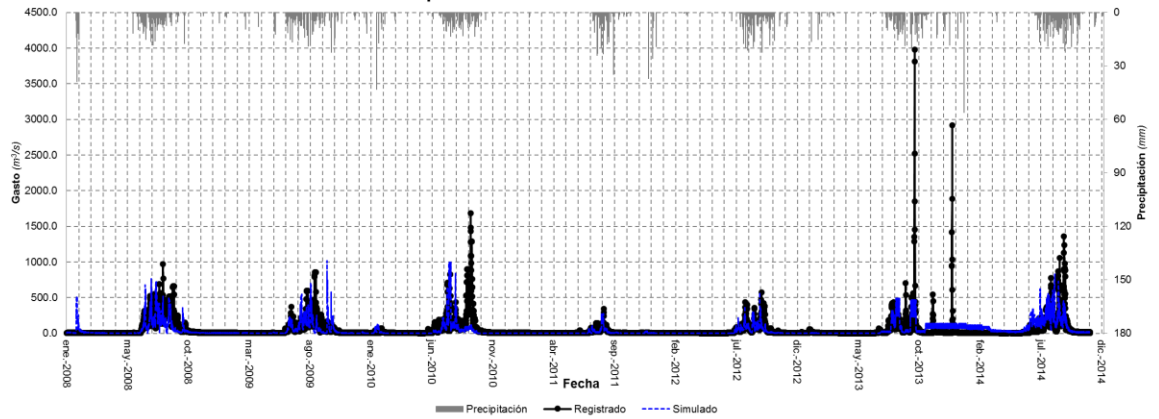


Resultados de la Simulación para la subcuenca 4



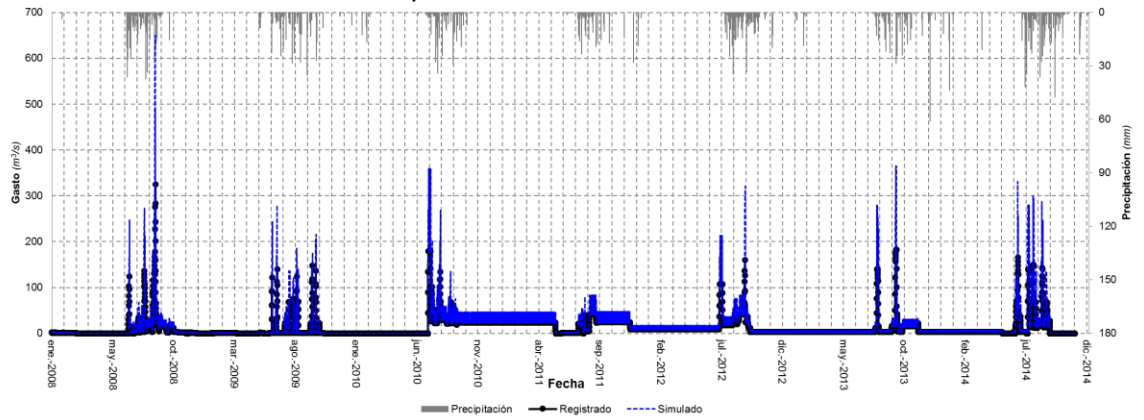
Subcuenca 4

Resultados de la Simulación para la subcuenca 7

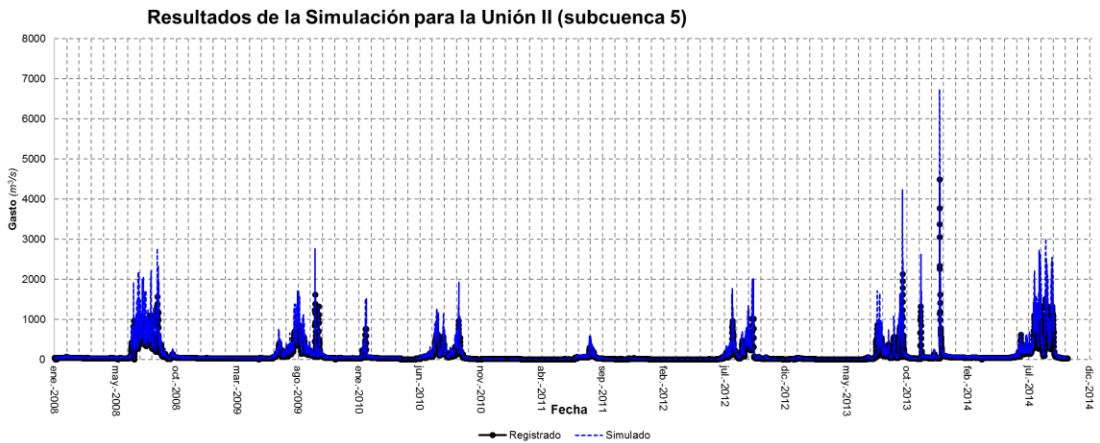


Subcuenca 7

Resultados de la Simulación para la subcuenca 9



Subcuenca 9



Integración II (incluye Subcuenca 5)
Figura 33.- Visualización de gastos simulados y registrados (2008-2014)

Viendo las gráficas de gastos simulados y registrados se nota un buen ajuste, pero existen otros criterios además de la inspección visual, como los criterios estadísticos para evaluar la precisión numérica de los resultados de la simulación. El período de validación utilizado para la verificación debería ser lo suficientemente extenso para incorporar varios eventos de avenidas, por lo que se puede necesitar de uno o más años. Entre los métodos más comunes de análisis estadísticos tenemos el criterio del Coeficiente de Nash-Sutcliffe, cuya expresión se muestra a continuación:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - \bar{Q})^2}$$

donde i = paso de tiempo, N = número total de pasos de tiempo considerados, \hat{Q}_i = gasto calculado en el paso de tiempo, Q_i = gasto observado en el paso de tiempo i , \bar{Q}_i = gasto medio observado, $\hat{\bar{Q}}$ = gasto medio calculado.

El comparar las avenidas observadas y simuladas ofrece una mejora cualitativa en la evaluación de la habilidad de simulación, con la presentación gráfica se puede hacer una rápida comparación entre los niveles simulados y los observados en un tiempo determinado. La representación de los volúmenes de las avenidas también son importantes, pues demuestran la eficiencia del modelo y su relación con las precipitaciones y de los escurrimientos con respecto a la modelación hidrológica, especialmente para previsiones en el futuro.

En la siguiente tabla se muestran los valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe, obtenido con las simulaciones en las subcuencas con hidrometría.

Tabla 24.- Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe

Subcuenca	<i>R</i>
1	0.76
2	0.74
4	0.78
7	0.76
9	0.81
II (incluye Subcuenca 5)	0.59

De lo anterior, se nota que el modelo HEC-HMS se apega bien en las cuencas de cabecera, para las cuencas intermedias (Integración II, que incluye a la Subcuenca 5) el valor del coeficiente es más bajo que en las cuencas de cabecera y por lo tanto la simulación es menos eficiente al ser más compleja la calibración en este tipo de cuencas al intervenir un mayor número de variables en la simulación hidrológica, ya que la calibración depende no solamente de los escurrimientos que se generan en cuenca propia, sino también de los provenientes de las cuencas aguas arriba.

6. Conclusiones y recomendaciones

La estimación de los parámetros en modelos continuos es mucho más compleja que en los modelos que simulan eventos aislados, ya que se necesita no solo la información continua preparada en series de tiempo, sino además la cuantificación, conforme un balance vertical del agua, para lo cual hay muchos modelos y herramientas, muchas de estas con ventajas y desventajas sobre la una o la otra, pero al final, de acuerdo a opiniones de diversos hidrólogos reconocidos, no hay mejor o peor modelo, sino que simplemente uno debe utilizar el que más conoce y en el que más confía. Para México, debido a su extenso territorio y a su amplia variedad de clima, topografía, cultura, y sobre todo, tipos de cuenca, es importante conocer y contar con diferentes herramientas en la modelación hidrológica, que puedan adaptarse a nuestras condiciones, infraestructura y que además sirvan como inter comparación entre una y otra herramienta, dependiendo de los resultados y de la facilidad, se podrá elegir el modelo que mejor se adapte para resolver un problema.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó, como herramienta el programa HEC HMS que tiene las siguientes características:

- Es un Software libre, que nos provee herramientas de implementación gratuita y universal para el equipamiento con el que se cuenta.
- El sistema utiliza un archivo de manejo e intercambio común para todas sus herramientas, denominado DSS.
- El DSS ha sido adoptado por varias agencias del gobierno de EEUU por lo que productos provenientes de estas agencias (Modelos, Herramientas, etc.) el intercambio de información sería transparente.
- El desarrollador provee herramientas para manejar las series de datos y mallas al formato DSS. El sistema se puede alimentar mediante programas basados en MS-DOS y libros de cálculo como Excel.

Dentro de las ventajas del modelo HEC-HMS tenemos:

- El sistema está en constante desarrollo y las actualizaciones serían gratuitas.

- Se está desarrollando una plataforma para 64 bits y multiprocesamiento lo que mejoraría los tiempos de procesamiento, esta mejora haría que el sistema funcionara en sistemas operativos más recientes.
- El IMTA está desarrollando un Sistema de Pronóstico en Ríos en esta misma plataforma.

La modelación continua ha permitido actualizar cada día los parámetros del modelo, lo cual consume tiempo en el proceso, como alternativa a esta situación, de los parámetros calibrados en el modelo para varios años hidrológicos (lluviosos y secos), y temporadas en donde se presentan más lluvias o menos, esos parámetros, podrían quedar fijos, según la situación meteorológica y con estos, hacer las simulaciones hidrológicas, verificar la corrida con los gastos registrados y si resultan valores simulados adecuados, mantener estos parámetros y utilizarlos en la siguiente simulación, que es la de la previsión hidrológica.

Aunado a la optimización de parámetros, el procesamiento de datos fuente para la modelación hidrológica puede mejorarse al automatizar los procesos, que tiene como principal fuente al SIH y de ahí automatizar estos procesos para no perder tanto tiempo en alimentar al sistema de información básica mediante algunas tareas como se muestra en el siguiente esquema:

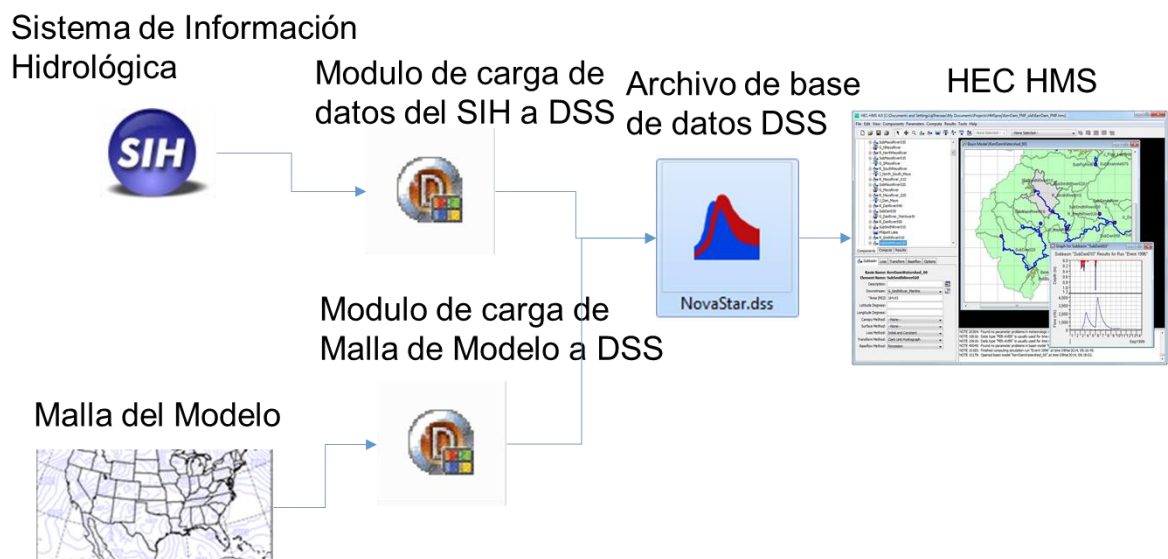


Figura 34.- Esquema de automatización de datos SIH-HEC HMS

Tratamiento de la incertidumbre y riesgo

Todas las modelaciones que intentan simular algún proceso físico, involucran un grado de incertidumbre; ya sea por la misma naturaleza del problema o por la complejidad del fenómeno físico que se intenta reproducir y que al asumirse ciertas consideraciones o idealizaciones en el planteamiento del problema, se asume también su incertidumbre asociada. De por sí las mismas mediciones o registros de las variables hidrometeorológicas base de información, al involucrar el uso de instrumentos, siempre tienen asociada una incertidumbre, que a su vez se relaciona con la precisión del instrumento de medición. En la modelación hidrológica, partimos del hecho que la información básica es precisa y confiable, pero se sabe que en todo proceso donde se combinen más de dos elementos o intervengan diferentes personas, son comunes los errores asociados. Si bien es cierto, que existen diferentes grupos de metodologías aplicadas al análisis de las incertidumbres y riesgos; además también existen límites de confianza que pueden emplearse para los cuales los valores simulados son válidos, como por ejemplo periodos de retorno para el diseño de obras hidráulicas, métodos como el de Monte Carlo o analíticos. Estos métodos pueden considerarse para tratar con los factores de la incertidumbre y de riesgo, ya sea por la operación de las obras de excedencias en las presas, errores de medición o pronóstico de las diferentes aportaciones al colector principal o bien, por la propia modelación hidrológica del río, la consideración de estos errores permite enriquecer de información a los tomadores de decisiones cuando se deben adoptar medidas en tiempo real, ya sea para la operación de una presa, cuando su capacidad se vea comprometida.

En ese sentido y para tratar de dar rangos de validez a los resultados de la modelación, se podría integrar de manera complementaria a la modelación hidrológica continua, una metodología analítica basada en la teoría de la combinación de procesos estocásticos, es decir, que tomará en cuenta los valores de orden alto en tiempo real y se modelarlos como procesos estocásticos, de esta manera se obtendría la incertidumbre parcial y con la combinación la incertidumbre de todo el proceso. El análisis de riesgo de inundación se podría realizar en una sección de control de inundación localizada aguas abajo de cada punto de pronóstico, comenzando con los embalses.

Una de las razones principales en las cuales estaría basado este análisis, es porque existen errores morfológicos, fisiográficos e hidrológicos en cada cuenca e incluso

dentro de una misma subcuenca que hacen que estos factores sean tomados en cuenta como procesos estocásticos.

Esta metodología ha sido aplicada ya en otras cuencas, como en China¹⁰, de acuerdo con el tipo de descarga se pueden ir implementando medidas de mitigación, desde colocación de sacos de arena en las márgenes con peligro de desbordamiento de los ríos y hasta el desalojo de personas y bienes. Es una metodología práctica para el análisis de riesgo en tiempo real en la sección de control de inundación aguas abajo del embalse o tramo de río, teniendo como factor principal la capacidad misma del cauce aguas abajo del embalse o tramo para la disminución o aumento del riesgo de inundación.

¹⁰ Chen, J., Zhong, P., Zhao, Y., and Xu, B. (2015). Risk analysis for the downstream control section in the real-time flood control operation of a reservoir.

7. Bibliografía

Arlen D. Feldman, (March 2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC.

Scharffenberg William A. and Flemming Matthew J. (2010). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC.

Chow, V.T. and others (1988). *Applied Hidrology*. New York, McGraw-Hill Series in Water Resources and Enviromental. Engineering

Linsley Ray K. Kohler Max A, (1986). *Hydrology for Engineers*, McGraw Hill.

Riverside Technology, Informe "Río Fuerte Basin Forecast System", septiembre de 1988. NOAA- NWS

Aparicio Mijares Francisco Javier, "Fundamentos de Hidrología de Superficie." Editorial Limusa, 1997

Todini E. et.al. (2011), *Workshop on Intercomparison of Flood Forecasting Models*. WMO, Federal Institute of Hydrology, Koblenz, Germany, September 14-16, 2011.

Díaz Herrera Pedro, (1987), *Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal*. CNA, Subdirección General de Administración del Agua, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J., (1986a). An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87: 45-59

Gao H., Tang Q., Shi, X., Zhu, C., Bohn, T., Su, F., Sheffield, J., Pan, M., Lettenmaier, D., Wood, E. F. (2009). *Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model Algorithm Theoretical Basis Document*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington. Department of Civil and Environmental Engineering, Princeton University.

Georgakakos, K.P. y otros (1990). *On improved hydrologic forecasting-Results from a WMO real-time forecasting experiment*. Amsterdam. Elsevier Science Publishers B.V. *Journal of Hydrology*

Ververs, Boot (2006) *DELFT-FEWS Configuration Guide Version 1.1*, Delft FEWS

García Hernández, J. y otros (2013), *RS MINERVE – User's manual v1.14*. RS MINERVE Group, Switzerland.

Leavesley, G.H., Markstrom, S.L., Viger, R.J., Hay, L.E., (2005). *USGS Modular Modeling System (MMS) - Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) MMS-PRMS*, in Singh, V., and Frevert, D., eds., *Watershed Models: Boca Raton, FL, CRC Press*, p. 159-177. Versión on line.

(ftp://brrftp.cr.usgs.gov/pub/mows/software/oui_and_mms_s/prms_chap.pdf)

Liu Zhiyu et.al. (2011). *Manual on Flood Forecasting and Warning*, WMO-No. 1072

Morales Flores Carlos Patricio y Rojas Valencia Roberto Alejandro, Universidad La Serena, Chile, (2010), Tesis: Análisis del manejo operacional para escenarios críticos del embalse La Paloma.

F. Javier Sánchez San Román - Dpto. Geología - Univ. Salamanca, España, Dic 2011, HEC-HMS. Manual elemental. <http://web.usal.es/javisan/hidro>

Chen, J., Zhong, P., Zhao, Y., and Xu, B. (2015). *Risk analysis for the downstream control section in the real-time flood control operation of a reservoir*. Revista: Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 10.1007/s00477-015-1032-6. Online publication date: 4-Feb-2015. Springer International Publishing AG, Part of Springer Science+Business Media

Yan, B., Guo, S., & Chen, L. (2014). *Estimation of reservoir flood control operation risks with considering inflow forecasting errors*. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 28(2), 359-368.

Boletín hidrológico No. 36, (1970), Región Hidrológica 10, Sinaloa, tomo I, Secretaría de Recursos Hidráulicos

BANDAS (1997) Banco de datos de aguas superficiales, CNA, IMTA.

Organización Meteorológica Mundial, (1994), "Guía de prácticas hidrológicas" OMM-No. 168

Apéndice

I.- Selección del número de escurrimiento, N, para condiciones de humedad media

Uso de tierra	Condición de la cobertura vegetal de la superficie	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Bosques cultivados	Ralo, baja transpiración	45	66	77	83
	Normal, transpiración media	36	60	73	79
	Espeso, alta transpiración	25	55	70	77
Caminos	De tierra	72	82	87	89
	Superficie dura	74	84	90	92
Bosques naturales	Muy ralo, muy baja transpiración	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	46	68	78	84
	Normal, transpiración media	36	55	70	77
	Espeso, alta transpiración	26	52	62	69
	Muy espeso, muy alta transpiración	15	44	54	61
Descanso, sin cultivo	Surcos rectos	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	70	80	87	90
	Surco en curva de nivel	67	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
Cereales	Surcos rectos	64	76	84	88
	Surco en curva de nivel	62	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
Leguminosas sembradas con maquinaria o al voleo	Surcos rectos	62	75	83	87
	Surco en curva de nivel	60	72	81	84
	Terrazas	57	70	78	82
Pastizal	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Curva de nivel, pobre	47	67	81	88
	Curva de nivel, normal	25	59	75	83
	Curva de nivel, bueno	6	35	70	79
Potrero permanente	Normal	30	58	71	78
Superficie impermeable		100	100	100	100

Fuente: Fundamentos de Hidrología, Aparicio Mijares

II.- Claves de Tipo Edafológico de Suelo para la obtención de N

Las unidades de suelos, están referidas a los horizontes y características diagnosticadas enfocadas al aspecto de permeabilidad y no a su uso actual, o potencial.

Clave	Unidad	Tipo
Ao	Acrisoles órticos	C
Af	Acrisoles férricos	D
Ah	Acrisoles húmicos	C
Ap	Acrisoles plínticos	C
Ag	Acrisoles gléicos	D
To	Andasoles ócricos	A-B
Tm	Andasoles mólicos	A-B
Th	Andasoles húmicos	A-B
Tr	Andasoles vítricos	A-B
Qf	Arenosoles ferrálicos	A-B
Ql	Arenosoles lúvicos	A-B
Qc	Arenosoles cámbicos	B
Qa	Arenosoles álbicos	A-B
Bd	Cambisoles dístricos	D
Be	Cambisoles eútricos	C
Bh	Cambisoles húmicos	C
Bg	Cambisoles gléicos	D
Bx	Cambisoles gélicos	D
Bk	Cambisoles cálcicos	C
Bc	Cambisoles crómicos	C
Bv	Cambisoles vétricos	D
Bf	Cambisoles ferrálicos	C
Kh	Kastanozems háplicos	C-D
Kk	Kastanozems cálcicos	C-D
Kl	Kastanozems lúvicos	C-D
Cl	Cherموzen lúvico	C
Ck	Cherموzen cálcico	B
Ch	Cherموzen háplico	B
Hh	Phaeozems háplicos	C
Hc	Phaeozems calcáreos	C
Hl	Phaeozems lúvicos	C
Hg	Phaeozems gléicos	D
Fo	Ferrasoles órticos	D

Clave	Unidad	Tipo
Oe	Histosoles eútricos	D
Od	Histosoles dístricos	D
Ox	Histosoles gélicos	D
I	Litosoles	D
Lo	Luvisoles órticos	C-D
Lc	Luvisoles crómicos	C-D
Lk	Luvisoles cálcicos	C-D
Lv	Luvisoles vétricos	C-D
Lf	Luvisoles férricos	C-D
La	Luvisoles álbicos	C-D
Lp	Luvisoles plínticos	C-D
Lg	Luvisoles gléicos	C-D
Ne	Nitsoles eútricos	C
Nd	Nitsoles dístricos	C
Nh	Nitsoles húmicos	C
Po	Podzoles órticos	A-B
Ph	Podzoles húmicos	A-B
Pp	Podzoles plácicos	A-B
Pg	Podzoles gléicos	A-B
We	Planosoles eútricos	D
Wd	Planosoles dístricos	D
Wm	Planosoles mólicos	D
Wh	Planosoles húmicos	D
Ws	Planosoles solódicos	D
Wx	Planosoles gélicos	D
Dg	Podzoluvisol gléicos	B
Dd	Podzoluvisol dístrico	B
De	Podzoluvisol eútrico	B
LL	Ranker	C
Re	Regosoles eútricos	B
Rc	Regosoles calcáreos	B
Rd	Regosoles dístricos	B
Rx	Regosoles gélicos	D
E	Rendzinas	C
Zo	Solochaks órticos	D
Zm	Solochaks mólicos	D
Zt	Solochaks	D

Fx	Ferrasoles xáticos	D	Zg	taquíricos Solochaks gléicos	D
Fr	Ferrasoles ródicos	D	So	Solonetz órticos	D
Fh	Ferrasoles húmicos	D	Sm	Solonetz mólicos	D
Fa	Ferrasoles acrícos	D	Sg	Solonetz gléicos	D
Fp	Ferrasoles plínticos	D	Sa	Solonetz álbico	D
Je	Fluvisoles eútricos	B	Vp	Vertisoles pélicos Vertisoles	C-D
Jc	Fluvisoles calcáreos	B	Vc	crómicos	C-D
Jd	Fluvisoles dístricos	B	Xh	Xerosoles háplicos	B-C
Jt	Fluvisoles tiónicos	B	Xk	Xerosoles cálcicos	B-C
Jg	Fluvisoles gléyicos	C	Xo	Xerosoles gípsicos	B-C
Ge	Gleysoles eútricos	D	Xl	Xerosoles lúvicos	D
Gc	Gleysoles calcáreos	D	Yh	Yermosoles háplicos	C
Gd	Gleysoles dístricos	D	Yk	Yermosoles cálcicos	C
Gm	Gleysoles mólicos	D	Yg	Yermosoles gípsicos	C
Gh	Gleysoles húmicos	D	Yl	Yermosoles lúvicos	D
Gp	Gleysoles plínticos	D	Yt	Yermosoles taquíricos	D

Fuente: Manual para la determinación de la avenida máxima ordinaria, CONAGUA

III.- Cálculo del Número de Escurrimiento N ponderado, para cada cuenca

1.- Subcuenca *Guerachic, GRCCH*

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	68.0	5030.4
	C	82	181.6	14894.1
	D	85	1.5	123.7
ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	84	0.8	66.6
	C	90	0.0	3.5
BOSQUE DE AYARIN	B	68	2.4	161.7
	C	78	6.3	488.4
BOSQUE DE ENCINO	B	75	143.5	10759.0
	C	86	305.6	26285.5
	D	91	3.5	317.2
BOSQUE DE ENCINO-PINO	B	75	71.6	5368.9
	C	86	103.7	8914.2
BOSQUE DE PINO	B	75	2033.0	152472.5
	C	86	2089.3	179683.0
	D	91	5.7	521.7
BOSQUE DE PINO-ENCINO	B	75	372.9	27964.0
	C	86	390.0	33541.3
	D	91	2.0	178.5
CUERPO DE AGUA	B	44	2.3	100.2
	C	54	0.4	22.3
	D	61	0.0	2.7
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	162.4	9416.5
	C	71	175.0	12425.2
	D	78	5.9	462.5
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	7.9	589.5
	C	86	115.6	9937.6
ZONA URBANA	B	84	0.2	14.5
	C	90	0.3	29.3
	D	92	2.7	245.7

N_{PONDERADA}= 79.95

2.- Subcuenca *Batopilas, BTPCH*

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	70.0	5181.7
	C	82	101.0	8280.5
	D	85	6.2	527.0
BOSQUE DE ENCINO	B	75	54.9	4115.8
	C	86	115.5	9933.6
BOSQUE DE ENCINO-PINO	B	75	8.1	606.2
BOSQUE DE PINO	B	75	760.4	57030.0
	C	86	494.9	42561.0

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
	D	91	10.8	985.8
BOSQUE DE PINO-ENCINO	B	75	110.6	8293.9
	C	86	3.0	260.1
	D	91	5.4	495.3
CUERPO DE AGUA	B	44	0.2	7.1
	C	54	0.2	10.5
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	73.8	4280.2
	C	71	49.0	3481.1
	D	78	2.6	201.4
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	100.8	7563.4
	C	86	43.5	3737.0

N_{PONDERADA}= 78.3

3.- Subcuenca San Ignacio, SIGCH

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	11.7	868.8
	C	82	38.7	3176.5
	D	85	5.3	453.6
ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	84	1.3	109.9
	C	90	0.3	22.6
BOSQUE DE ENCINO	B	75	321.8	24135.0
	C	86	189.8	16322.7
	D	91	3.7	333.5
BOSQUE DE ENCINO-PINO	B	75	185.7	13929.8
	C	86	91.6	7873.3
	D	91	0.0	2.9
BOSQUE DE PINO	B	75	1031.3	77344.6
	C	86	525.4	45185.6
	D	91	10.4	944.2
BOSQUE DE PINO-ENCINO	B	75	291.2	21839.0
	C	86	138.2	11881.8
	D	91	2.2	196.4
CUERPO DE AGUA	B	44	0.9	40.4
	C	54	0.4	22.4
	D	61	0.2	10.7
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	171.0	9917.5
	C	71	71.3	5065.1
	D	78	0.5	40.4
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	816.7	61255.7
	C	86	187.6	16135.8
	D	91	65.8	5989.9

N_{PONDERADA}= 77.6

4.- Subcuenca Urique II, URQCH

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	217.9	16121.3
	C	82	113.8	9328.8
	D	85	7.0	591.6
ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	84	0.0	0.2
	C	90	0.6	57.6
BOSQUE DE ENCINO	B	75	236.6	17747.9
	C	86	217.3	18683.5
BOSQUE DE ENCINO-PINO	B	75	46.1	3460.1
	C	86	50.3	4325.0
BOSQUE DE PINO	B	75	1482.7	111199.9
	C	86	1130.3	97201.9
	D	91	11.6	1057.1
BOSQUE DE PINO-ENCINO	B	75	94.7	7102.1
	C	86	55.7	4789.5
	D	91	0.2	15.9
CUERPO DE AGUA	B	44	0.8	37.4
	C	54	0.0	1.3
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	145.8	8457.6
	C	71	131.9	9364.3
	D	78	0.8	60.5
PASTIZAL NATURAL	B	79	15.5	1228.2
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	1.8	131.8
	C	86	86.5	7441.5
ZONA URBANA	B	84	0.2	15.4
	C	90	1.2	104.8

N_{PONDERADA}= 78.7

5.- Subcuenca Tubares, TBRSI

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	13.9	1027.8
	C	82	3.0	243.8
	D	85	3.7	318.2
BOSQUE DE ENCINO	B	75	101.9	7646.0
	C	86	44.9	3860.8
BOSQUE DE ENCINO-PINO	B	75	5.1	386.0
	C	86	13.6	1166.5
BOSQUE DE PINO	B	75	38.7	2900.6
	C	86	9.0	774.1
	D	91	2.8	258.3
BOSQUE DE PINO-ENCINO	B	75	82.3	6170.9

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
	C	86	41.6	3579.2
CUERPO DE AGUA	B	44	0.0	0.0
	D	61	0.0	0.8
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	13.2	765.9
	C	71	2.8	198.3
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	218.6	16392.2
	C	86	20.9	1795.4
	D	91	19.7	1788.3

N_{PONDERADA}= 77.5

6.- Subcuenca Huites, HTSSI

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	108.3	8013.5
	C	82	14.8	1212.7
	D	85	0.3	29.7
BOSQUE DE ENCINO	B	75	311.0	23325.2
	C	86	201.1	17295.4
BOSQUE DE ENCINO-PINO	D	91	10.7	974.1
	B	75	180.1	13505.0
	C	86	21.5	1851.5
BOSQUE DE PINO	B	75	114.3	8569.7
	C	86	5.4	467.9
	D	91	5.5	503.6
BOSQUE DE PINO-ENCINO	B	75	653.3	48997.7
	C	86	65.0	5591.1
CUERPO DE AGUA	B	44	24.3	1068.0
	C	54	6.9	375.1
PASTIZAL CULTIVADO	B	58	1.0	55.3
	C	71	9.7	685.4
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	291.8	16923.2
	C	71	30.1	2140.3
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	183.4	13754.1
	C	86	579.5	49832.9
	D	91	5.8	528.8

N_{PONDERADA}= 76.4

7.- Subcuenca Chinipas, CNPCH

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	145.4	10758.6
	C	82	31.6	2593.9
	D	85	3.0	253.3
BOSQUE DE ENCINO	B	75	279.5	20959.1

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
	C	86	431.3	37092.4
	D	91	34.6	3150.1
BOSQUE DE ENCINO-PINO	B	75	243.9	18289.3
	C	86	134.9	11602.3
	D	91	10.0	911.7
BOSQUE DE PINO	B	75	887.6	66573.7
	C	86	478.6	41163.1
	D	91	53.4	4857.0
BOSQUE DE PINO-ENCINO	B	75	733.1	54978.8
	C	86	509.6	43821.8
	D	91	87.2	7931.2
PASTIZAL CULTIVADO	C	71	0.5	33.6
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	287.5	16676.4
	C	71	126.2	8957.9
	D	78	6.2	481.3
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	34.1	2556.6
	C	86	630.3	54203.9
	D	91	13.9	1263.2

N_{PONDERADA}= 79.3

8.- Subcuenca Palo Dulce, PDLCH

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	10.1	748.2
	C	82	1.4	117.4
BOSQUE DE ENCINO	B	75	92.4	6928.2
	C	86	228.8	19678.6
BOSQUE DE ENCINO-PINO	B	75	28.6	2141.3
	C	86	20.0	1720.3
BOSQUE DE PINO	B	75	0.0	0.9
BOSQUE DE PINO-ENCINO	B	75	198.4	14882.8
	C	86	25.7	2209.4
CUERPO DE AGUA	C	54	0.2	12.4
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	115.3	6688.7
	C	71	35.4	2510.9
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	38.8	2910.3
	C	86	419.8	36102.6
ZONA URBANA	B	84	0.3	29.3
	C	90	0.1	8.3

N_{PONDERADA}= 79.6

9.- Subcuenca Choix, CHXSI

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
---------------------------	---------------	---	----------------------	-----

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	150.4	11130.7
	C	82	15.5	1269.0
	D	85	2.1	174.3
ASENTAMIENTOS HUMANOS	C	90	1.5	134.6
BOSQUE DE ENCINO	B	75	6.6	492.7
	C	86	224.5	19309.9
BOSQUE DE ENCINO-PINO	B	75	11.0	822.2
	C	86	98.2	8444.4
	D	91	0.0	2.2
BOSQUE DE PINO	B	75	101.7	7630.4
	C	86	104.8	9014.8
	D	91	9.7	883.2
BOSQUE DE PINO-ENCINO	B	75	33.8	2534.9
	C	86	189.8	16321.3
	D	91	0.2	13.8
PASTIZAL CULTIVADO	B	58	24.7	1430.3
	C	71	5.8	409.1
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	70.5	4088.8
	C	71	72.9	5172.4
PASTIZAL NATURAL	C	86	16.4	1407.6
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	153.4	11502.8
	C	86	290.3	24966.9
	D	91	2.0	180.1
ZONA URBANA	B	84	2.0	169.5

N_{PONDERADA}= 80.3

10.- Subcuenca El Mahone, EMHSI

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	466.3	34502.9
	C	82	74.1	6077.8
	D	85	2.9	245.1
BOSQUE DE ENCINO	B	75	2.0	146.4
	C	86	88.1	7575.4
BOSQUE DE ENCINO-PINO	B	75	0.0	2.3
	C	86	6.8	587.9
BOSQUE DE MEZQUITE	B	68	0.2	14.1
	C	78	1.1	85.3
BOSQUE DE PINO-ENCINO	B	75	0.1	6.6
	C	86	0.8	71.1
CUERPO DE AGUA	B	44	94.2	4145.9
	C	54	4.7	252.1
	D	61	0.5	33.2

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
PASTIZAL CULTIVADO	B	58	7.5	432.4
	C	71	2.0	140.1
	D	78	0.0	0.5
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	17.9	1036.8
	C	71	13.3	946.4
	D	78	0.2	18.6
PASTIZAL NATURAL	C	86	0.6	53.5
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	340.0	25498.4
	C	86	537.4	46214.4
	D	91	16.8	1532.5
SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	B	75	6.8	511.8
	C	86	28.0	2412.2

N_{PONDERADA}= 77.4

11.- Subcuenca Alamos, ALSSI

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	337.5	24976.4
	C	82	149.8	12287.0
BOSQUE DE ENCINO	B	75	8.2	612.7
	C	86	88.0	7563.9
BOSQUE DE ENCINO-PINO	B	75	2.6	198.3
	C	86	27.0	2319.4
BOSQUE DE PINO	B	75	4.8	359.5
	C	86	0.1	6.1
BOSQUE DE PINO-ENCINO	B	75	22.0	1646.4
	C	86	12.8	1101.5
CUERPO DE AGUA	B	44	42.0	1848.3
	C	54	0.6	32.6
MATORRAL SARCOCAULE	B	75	27.0	2024.7
	C	86	3.3	283.9
MEZQUITAL TROPICAL	B	75	6.1	458.9
PASTIZAL CULTIVADO	B	58	70.1	4064.1
	C	71	21.0	1490.6
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	17.4	1012.0
	C	71	12.9	915.3
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	720.6	54042.7
	C	86	672.2	57813.5
SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	B	75	12.2	918.5
	C	86	3.9	338.7
ZONA URBANA	B	84	2.2	180.8

N_{PONDERADA}= 77.9

12.- Subcuenca San Blas, SBLSI

Uso de Suelo y Vegetación	Clasificación	N	A (km ²)	N*A
AGRICULTURA DE RIEGO	B	72	78.1	5623.4
	C	81	82.9	6717.5
AGRICULTURA DE TEMPORAL	B	74	150.5	11134.5
	C	82	103.8	8510.8
	D	85	0.4	37.1
ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	84	0.4	35.9
	C	90	1.0	87.9
BOSQUE DE ENCINO	B	75	0.1	7.7
	C	86	3.7	316.0
BOSQUE DE MEZQUITE	B	68	15.4	1045.2
	C	78	0.0	2.8
CUERPO DE AGUA	B	44	10.9	481.2
	C	54	1.0	51.9
MATORRAL SARCOCAULE	B	75	149.8	11233.6
	C	86	35.1	3019.6
MEZQUITAL DESERTICO	B	75	1.8	133.1
	C	86	1.4	124.0
MEZQUITAL TROPICAL	B	75	3.1	233.6
	C	86	3.1	266.9
PASTIZAL CULTIVADO	B	58	65.5	3797.1
	C	71	45.3	3213.4
PASTIZAL INDUCIDO	B	58	21.4	1240.0
	C	71	4.8	339.9
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	B	75	305.5	22913.6
	C	86	546.2	46977.1
	D	91	4.6	422.4
SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	B	75	117.5	8812.3
	C	86	118.6	10199.4
VEGETACION DE GALERIA	B	44	3.8	166.5
	C	54	1.4	74.8
ZONA URBANA	B	84	3.4	283.2
	C	90	3.1	279.2

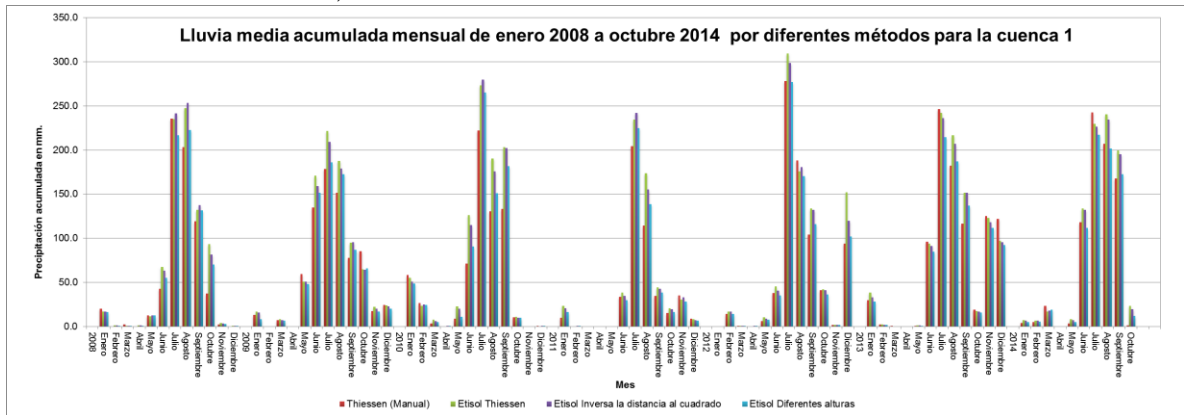
$$N_{\text{PONDERADA}} = 78.5$$

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI

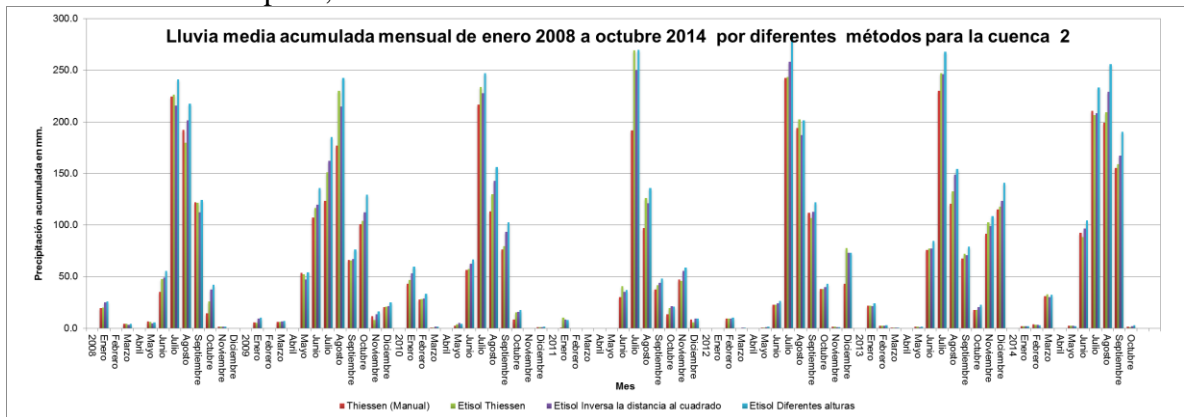
Las anteriores tablas muestran los valores ponderados del número de escurrimiento para condiciones medias de humedad en cada cuenca

IV.- Comparación mensual de la lámina de precipitación media mensual por cuenca con diferentes métodos, período 2008-2014

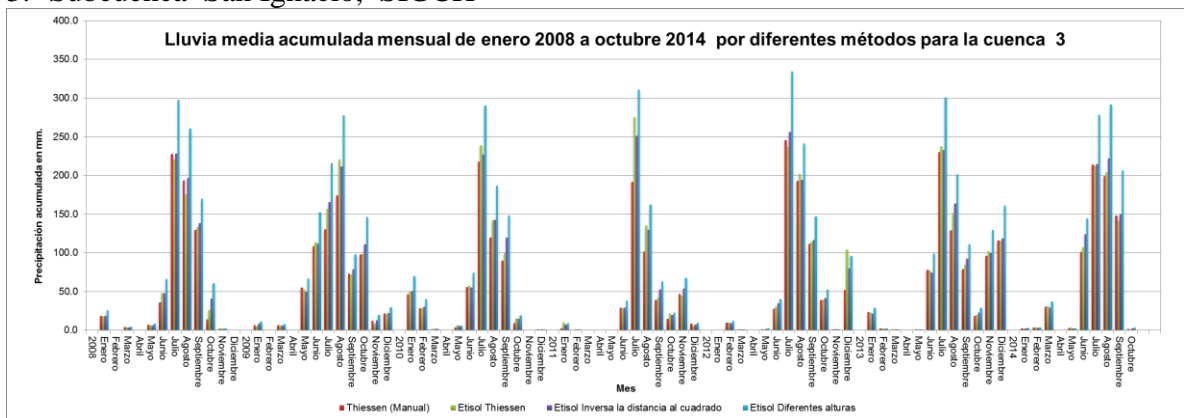
1.- Subcuenca Guerachic, GRCCH



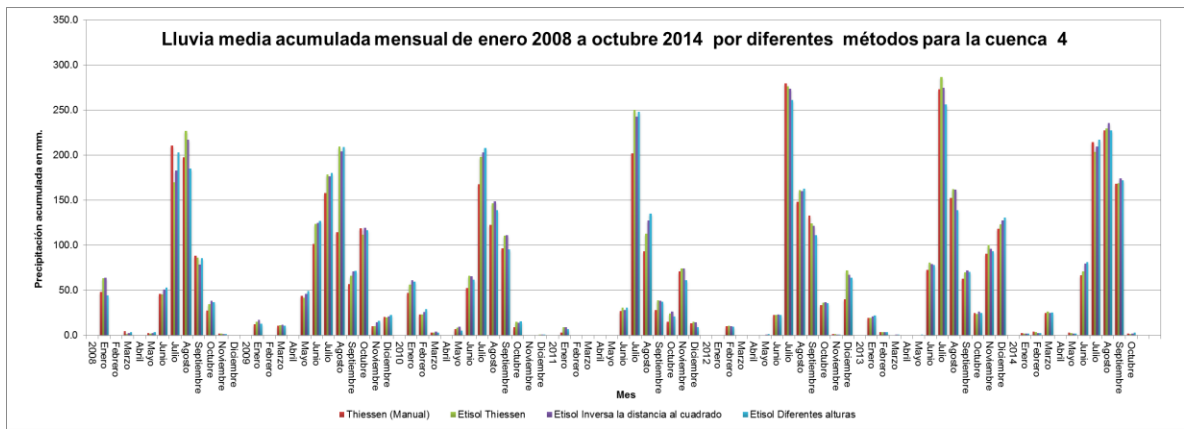
2.- Subcuenca Batopilas, BTPCH



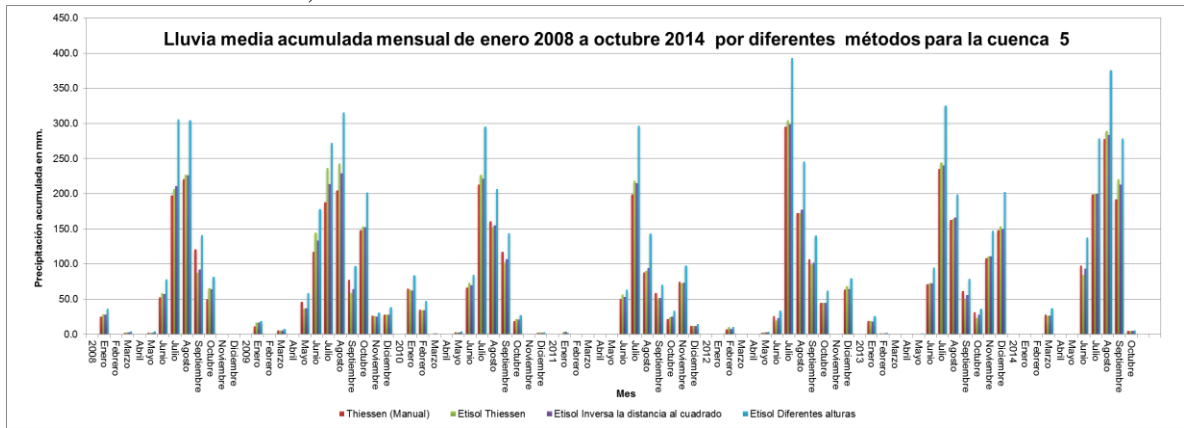
3.- Subcuenca San Ignacio, SIGCH



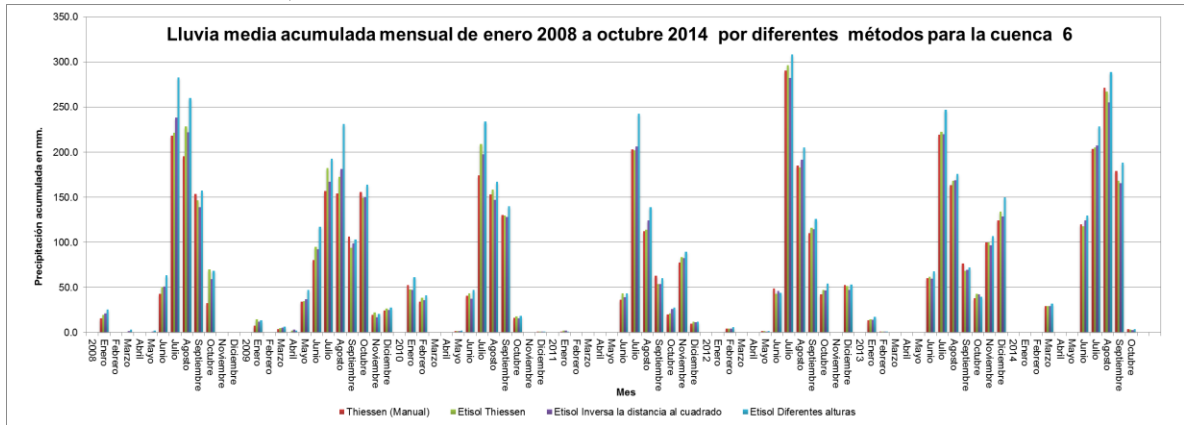
4.- Subcuenca Urique II, URQCH



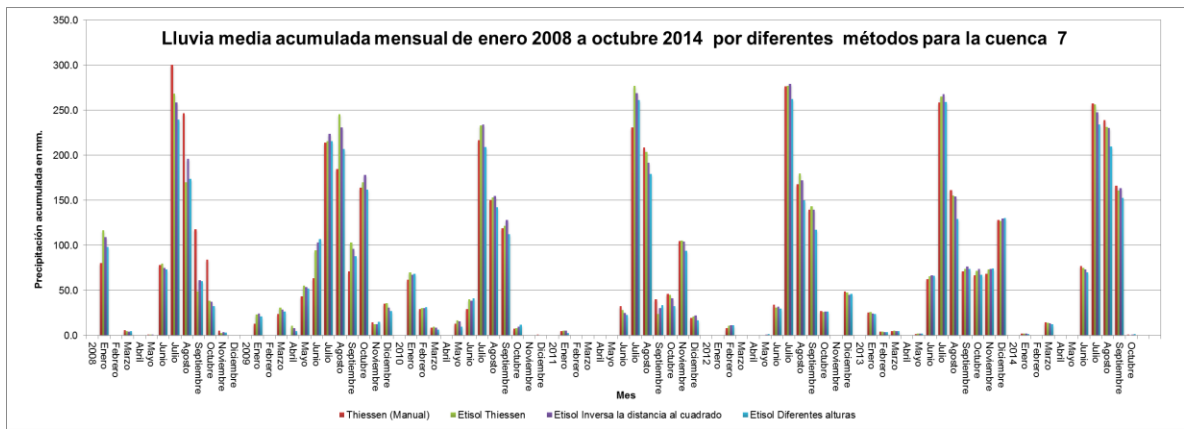
5.- Subcuenca Tubares, TBRSI



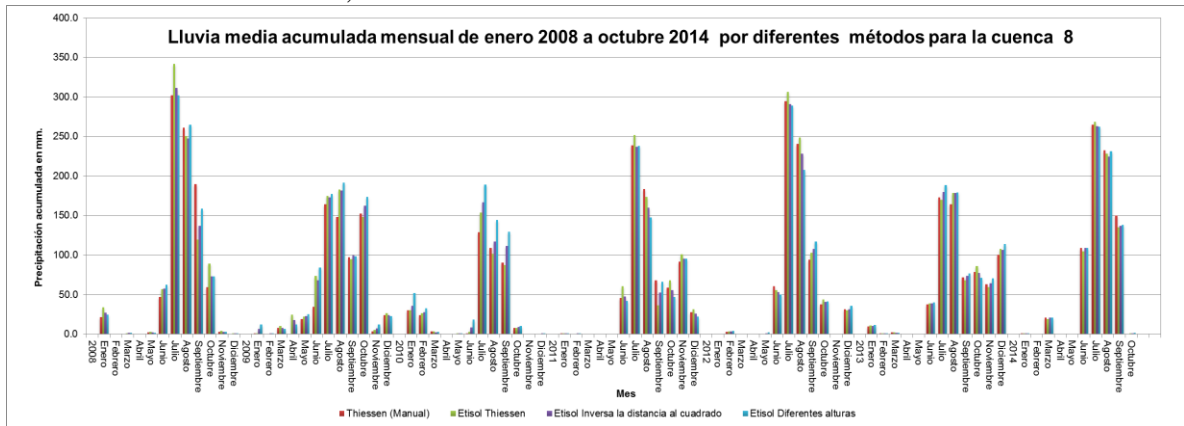
6.- Subcuenca Huites, HTSSI



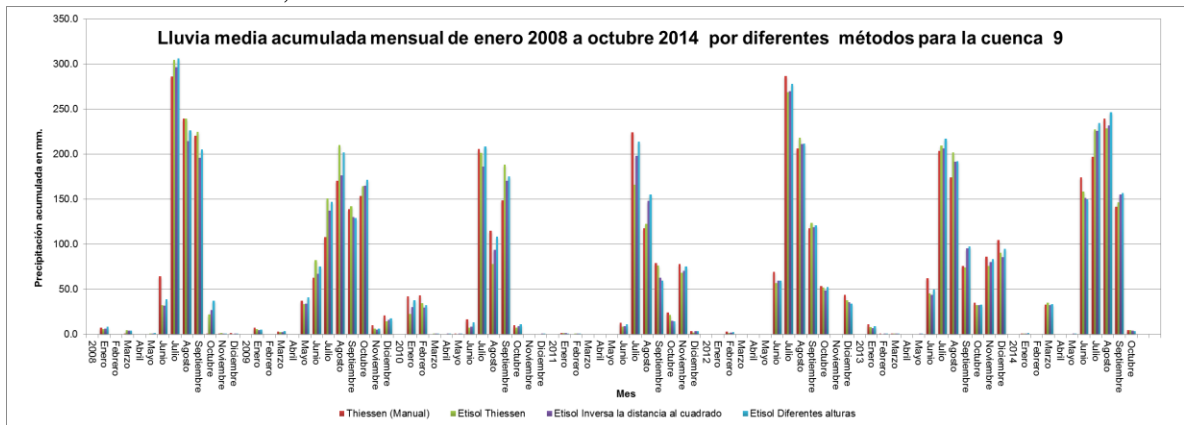
7.- Subcuenca Chinipas, CNPCH



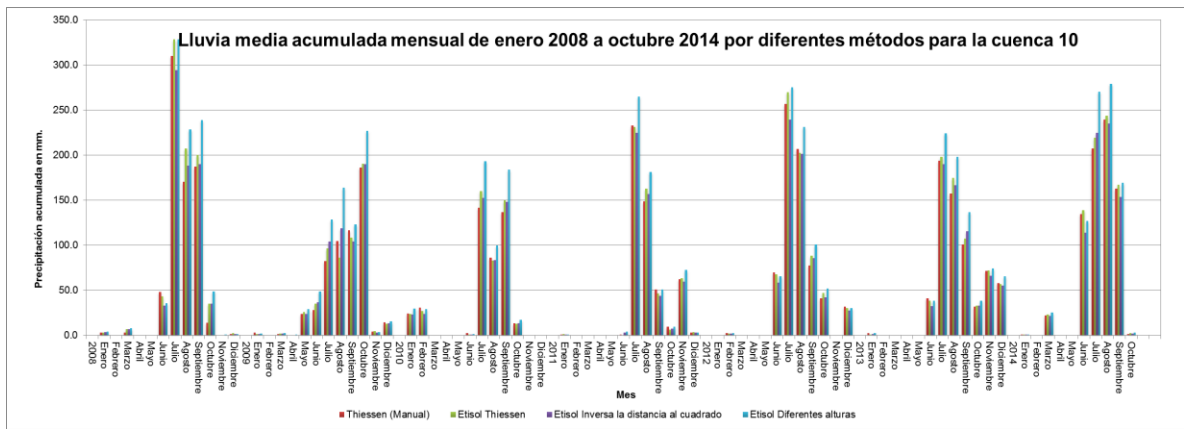
8.- Subcuenca Palo Dulce, PDLCH



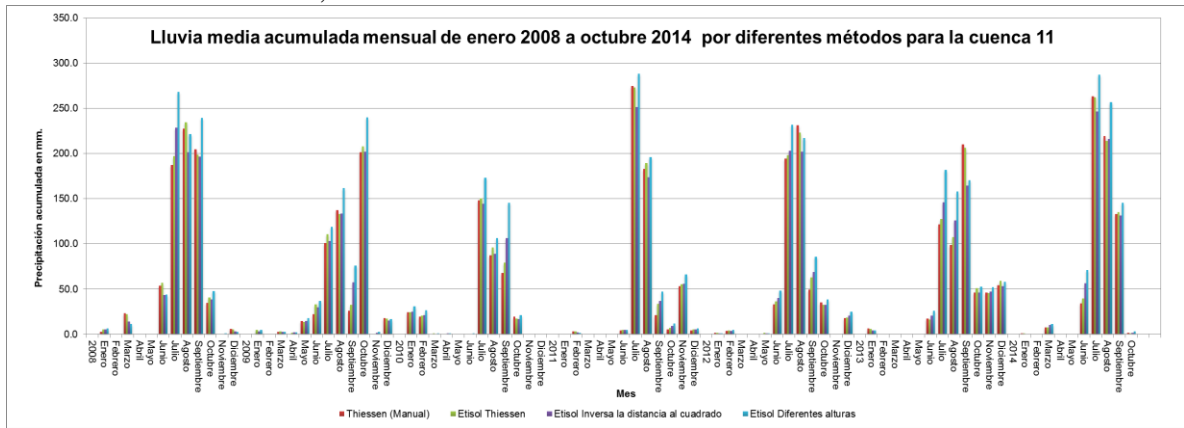
9.- Subcuenca Choix, CHXSI



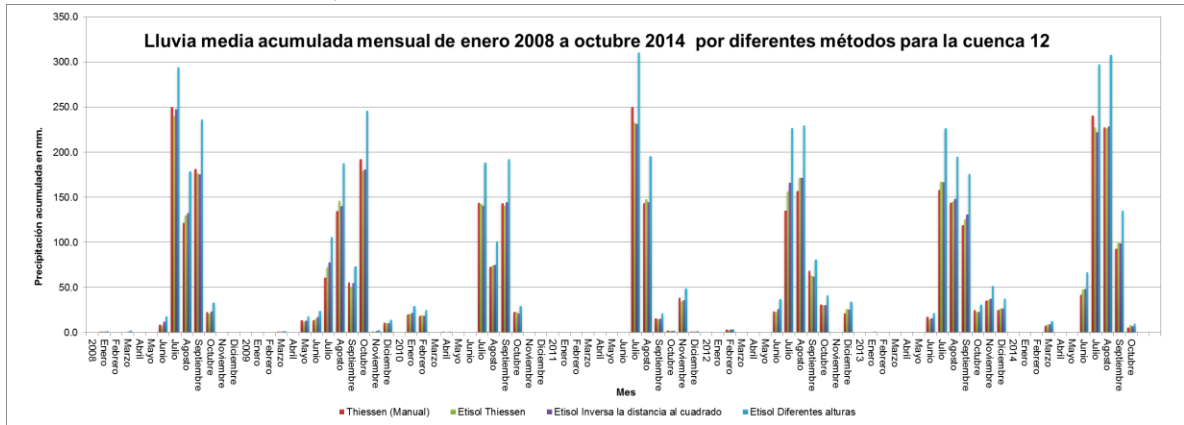
10.- Subcuenca El Mahone, EMHSI



11.- Subcuenca Alamos, ALSSI



12.- Subcuenca San Blas, SBLSI



Fuente: Elaboración propia con información del SIH, CONAGUA

V.- Rango de valores de los parámetros que pueden considerarse para la cuenca

n	Parámetro	Unidad	Valor mínimo	Valor máximo
1	Linear Reservoir - GW 1 Coefficient (1)	hora	0.01	10000
2	Linear Reservoir - GW 1 Initial Discharge (1)	m ³ /s	0	100000
3	Linear Reservoir - GW 1 Reservoirs (1)		1	100
4	Linear Reservoir - GW 2 Coefficient (2)	hora	0	10000
5	Linear Reservoir - GW 2 Reservoirs (2)		1	100
6	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	min	0.1	30000
7	Simple Canopy - Initial Storage	%	0.001	100
8	Simple Canopy - Max Storage	mm	0.001	1500
9	Simple Surface - Initial Storage	%	0.001	100
10	Simple Surface - Max Storage	mm	0.001	1500
11	Soil Moisture Accounting -Groundwater 1 Percolation	mm/hora	0.01	500
12	Soil Moisture Accounting - Groundwater 1 Storage	mm	0.01	1500
13	Soil Moisture Accounting -Groundwater 1 Storage Coefficient	hora	0.01	10000
14	Soil Moisture Accounting -Groundwater 2 Percolation	mm/hora	0.01	500
15	Soil Moisture Accounting -Groundwater 2 Storage	mm	0.01	1500
16	Soil Moisture Accounting -Groundwater 2 Storage Coefficient	hora	0.01	10000
17	Soil Moisture Accounting - Initial Groundwater 1 Content	%	0.001	100
18	Soil Moisture Accounting - Initial Groundwater 2 Content	%	0.001	100
19	Soil Moisture Accounting - Initial Soil Content	%	0.001	100
20	Soil Moisture Accounting - Max Infiltration	mm/hora	0.01	500
21	Soil Moisture Accounting -Soil Percolation	mm/hora	0.01	500
22	Soil Moisture Accounting -Soil Storage	mm	0.01	1500
23	Soil Moisture Accounting -Tension Storage	mm	0.01	1500

Glosario:

Cuenca: Extensión de terreno que recoge el agua de lluvia o manantiales, alimentando con ella el gasto de los ríos, arroyos o lagos que se encuentran dentro de él. Es un área delimitada por las partes más altas, lo que da lugar a que sea receptora de aguas de lluvia, escurrimientos y gastos de ríos que se encuentran en partes más altas. El área de la cuenca se mide en kilómetros cuadrados (km^2), pudiéndose expresar también en otras unidades como hectáreas, metros cuadrados, etc.

Elevación: Cota o altura, número que indica la elevación del agua en un punto con respecto al nivel del mar, o algún otro nivel de referencia, esta expresada en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Elevación Simulada: Es la estimación de la cota o elevación que puede alcanzar el agua en una corriente, lago o embalse, se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Elevación Observada: Medición directa o registro de la altura que alcanza la superficie del agua de una corriente, lago o embalse con respecto al nivel del mar, esta expresado en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Escala Simulada: Es la estimación de la cota o elevación que puede alcanzar el agua en un sitio o punto de pronóstico de una corriente, se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Escala Observada: Medición directa o registro de la altura que alcanza la superficie del agua en un sitio o punto de pronóstico de una corriente, con respecto al nivel del mar, esta expresado en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Estación climatológica: Conjunto de instrumentos colocados a la intemperie que permiten medir las variaciones del clima, colocados en sitios estratégicos representativos de ambientes diversos

Gasto: Conocido también como caudal, es la cantidad o volumen de agua que pasa por la sección transversal de un conducto, cauce o canal en una unidad de tiempo, se mide en metros cúbicos por segundo (m^3/s), también puede expresarse en litros por segundo, por minuto, etc.

Gasto Simulado: Es la estimación del gasto que puede pasar a través de un punto de pronóstico, se mide en metros cúbicos por segundo (m³/s).

Gasto Observado: Medición directa o evaluación del gasto registrado en un sitio o punto de pronóstico determinado, medido en metros cúbicos por segundo (m³/s).

Incertidumbre: se refiere la duda o titubeo que tiene sobre algún asunto o cuestión; en ese sentido, la incertidumbre se puede entender como un estado de duda en el que predomina el límite de la confianza o la creencia en la verdad de un determinado conocimiento; lo opuesto a la incertidumbre es la certeza.

Ingreso Simulado: Es la estimación del gasto que puede llegar a ingresar a un embalse o cuerpo de agua, se mide en metros cúbicos por segundo (m³/s).

Manantial: Sitio en el que el agua brota del suelo espontáneamente.

Modelo: Es un sistema matemático o físico que obedece a ciertas condiciones específicas y cuyo comportamiento es utilizado para entender un sistema físico, biológico o social que es análogo en determinado sentido.

Precipitación: Partículas de agua líquida o sólida que caen desde la atmósfera hacia la superficie terrestre, su unidad de medida está en milímetros (mm).

Precipitación Areal: Cuantificación de la cantidad de la precipitación media ocurrida en un área o superficie determinada en un período de tiempo (puede ser un día), representada a través de un único valor, la unidad de medida son milímetros (mm).

Precipitación Pronosticada: Es la estimación de la cantidad de precipitación que puede llegar a ocurrir sobre un área o superficie determinada en un período de tiempo, en base a las condiciones meteorológicas actuales, la unidad de medida son milímetros (mm).

Punto o sitio de pronóstico: Lugar o sitio de referencia, el cual se fija en una corriente, por ser un punto de particular interés, para evaluar y medir la variación de los niveles de agua y gastos registrados u observados, así como para poder estimar lo que puede llegar a ocurrir en ese sitio en un futuro próximo, que puede ser en uno o varios días, tomando en cuenta las condiciones actuales de la cuenca y la precipitación areal y pronosticada.

Salida Simulada: Es la estimación del gasto que puede llegar a extraerse en el funcionamiento de un embalse, ya sea por medio del conducto de su obra de toma o vertedor, o de ambos, se mide en metros cúbicos por segundo (m³/s).

Salida Observada: Medición directa o evaluación del gasto extraído en el funcionamiento de un embalse, ya sea por medio del conducto de su obra de toma o vertedor, o de ambos, medido en metros cúbicos por segundo (m³/s).

WRF: El modelo de investigación y previsión del tiempo (Weather Research and Forecasting, WRF) es un sistema de predicción numérico de mesoscala de nueva generación, diseñado para servir previsiones operacionales y necesidades de estudio de la atmósfera. Es sucesor del modelo MM5. El modelo WRF se ha desarrollado de manera colaborativa, principalmente por el National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration, los National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el Forecast Systems Laboratory (FSL), la Air Force Weather Agency (AFWA), la Naval Research Laboratory, Oklahoma University, y la Federal Aviation Administration (FAA). Si todo va bien WRF se actualiza 4 veces diarias y ofrece previsiones para 78 horas en tramos de 1 hora. Las previsiones incluyen velocidad, dirección y rafagas de viento, temperatura, nubosidad total y precipitaciones. Su resolución para las cuencas de Fronteras Sur es de 8 km, mientras que para las cuencas del SPR es de 16 km.

Sistema hidrológico: sistema de ríos, estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas. El objetivo del análisis de estos sistemas, es estudiar la operación del mismo y predecir su salida.

Sistemas de pronóstico hidrológico: Dos tipos de pronóstico hidrológico son considerados por la OMM (1983). El primero se refiere al pronóstico en tiempo real y el segundo se refiere a la predicción de cambios en el régimen hidrológico como consecuencia de posibles cambios en las características de la cuenca.

Sistemas de pronóstico hidrológico en tiempo real: El objetivo de un sistema de pronóstico hidrológico es obtener al momento que ocurre, en tiempo real, datos de precipitación y/o flujo en ríos a través de un sistema de colección y transmisión de datos,

procesarlos por medio de modelos lluvia-escorrentamiento y de tránsito de avenidas, y pronosticar gastos y niveles de agua para períodos que van desde algunas horas hasta varios días, dependiendo del tamaño y del tiempo de respuesta de la cuenca. El pronóstico de avenidas es usado para alertar a la población en áreas amenazadas por las probables inundaciones, además de alertar al personal encargado de la operación de estructuras de control de avenidas, como es la operación de vertedores controlados por compuertas en presas (Chow, V.T. et al., 1988). El pronóstico hidrológico también es utilizado en la operación de sistemas de irrigación, sistemas de abastecimiento de agua potable y plantas hidroeléctricas.

Los estudios teóricos a emplear, son los procesos y técnicas hidrológicas de transformación de lluvia en escurrimiento, el empleo del hidrograma unitario, para la distribución temporal del escurrimiento y modelos de tránsito hidrológico, en vasos y cauces para la integración de avenidas.

Lista de Acrónimos

- CFE:** Comisión Federal de Electricidad
- CGSMN:** Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional
- CLICOM:** Programa informático de climatología comparada
- CNA/CONAGUA:** Comisión Nacional del Agua
- CTOOH:** Comité Técnico de Operación de Obras Hidráulicas
- DL:** Dirección Local
- DSS:** Data Storage System, sistema de almacenamiento de datos utilizado en HEC-HMS
- ETISOL:** Programa del SIH, diseñado para obtener la precipitación en forma de malla mediante diferentes métodos de interpolación e isolíneas de igual altura de precipitación
- FTP:** Protocolo de Transferencia de Archivos
- GASIR:** Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos
- HEC HMS:** Sistema de modelación hidrológica, del US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center
- IMTA:** Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
- INEGI:** Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
- INIFAP:** Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias
- NWS:** National Weather Service de los EEUU
- NWSRFS:** National Weather Service River Forecast System
- OC:** Organismo de Cuenca
- ODBC:** Conectividad abierta de bases de datos
- OMM:** Organización Meteorológica Mundial
- PET/ETP:** Evapotranspiración potencial
- PROMMA:** Programa de mejoramiento del manejo del agua
- SMA:** Soil Moisture Accounting (modelo de humedad del suelo)

SAC-SMA: Sacramento Soil Moisture Accounting (modelo de humedad del suelo de Sacramento)

SCS: Soil Conservation Service

SIG: Sistema de Información Geográfica

SIH: Sistema de Información Hidrológica

SPR: Sistema de Pronóstico en Ríos