



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



MCIA
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

FACULTAD DE BIOLOGÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS HIDROLÓGICOS PARA LA EVALUACIÓN
DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO**

TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

ING. LUIS DANIEL OSEGUERA TOLEDO

ASESOR:

DR. JULIO CÉSAR ORANTES ÁVALOS

Doctor en Ingeniería de Procesos

CO-ASESOR:

DR. CONSTANTINO DOMÍNGUEZ SÁNCHEZ

Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

MORELIA, MICH. OCTUBRE DE 2018

DEDICATORIA

**A MIS PADRES POR TODO EL APOYO, LA PACIENCIA Y LA CONFIANZA EN
ESTE CAMINO QUE DECIDÍ EMPRENDER Y SIEMPRE CONTAR CON PALABRAS
DE ALIENTO PARA ALCANZAR LAS METAS QUE ME HE PROPUESTO.**

AGRADECIMIENTOS

Al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por abrirme las puertas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico recibido para la realización de mis estudios de maestría y su apoyo para realizar una estancia de Investigación en el extranjero.

A la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) por recibirme en el Instituto de Ingeniería y Medio Ambiente (IIAMA) para realizar mi estancia de investigación.

Al Dr. Julio César Orantes Ávalos por su gran labor como tutor, paciencia y aporte de conocimientos durante mis estudios.

A la Dra. Sonia Sánchez Quispe por su aporte de conocimientos y realizar los acercamientos necesarios para la realización de la estancia.

Al Dr. Ricardo Rangel Segura y al Dr. Juan Manuel Ortega Rodríguez quienes además de ser revisores de este proyecto, fueron mis profesores y mentores, siempre al pendiente de mis avances y desempeño en este programa de maestría.

Al Dr. Javier Paredes Arquiola y al Dr. Abel Solera Solera quienes estuvieron al pendiente de mis avances durante mi estancia en la UPV.

A José Jaime Madrigal Barrera, Liliana García Romero y a todos los miembros del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la UPV por tanto apoyo durante mi estancia y por su amistad.

A la Asociación Mexicana de Hidráulica y a todos los profesionistas y miembros de la misma que me apoyaron durante esta etapa y tuvieron a bien compartir parte de su experiencia en el campo profesional.

A mis compañeros de la maestría y amigos Iván González Arreguín, Omar Lucas Urbina y María del Mar Navarro Farfán por su apoyo y amistad en todo momento.

En especial a mis padres Carlos Oseguera Rivera y Alma Rosa Toledo Landa, quienes me han apoyado en cualquier decisión que he tomado y que pasan por un momento muy complicado en la terminación de esta etapa.

A mi novia Sandra Manzo Valencia por su apoyo incondicional y comprensión.

RESUMEN

El uso de la modelación matemática para la simulación del proceso lluvia-escurrimiento se ha vuelto una herramienta indispensable para el análisis de sistemas de recursos hídricos.

La presente investigación incluye un análisis de los modelos hidrológicos con mayor aceptación en el ámbito global, de los cuales (i) Témez, (ii) Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), (iii) Sacramento, (iv) Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), (v) Ecuación del equilibrio del agua de la Herramienta para la evaluación del Suelo y el agua de una cuenca hidrográfica, (vi) Método del Coeficiente Simple y (vii) Método de Humedad del Suelo fueron seleccionados por tratarse de modelos distribuidos o semi-distribuidos, basado en datos hidrometeorológicos, de simulación continua y tienen la particularidad de poder ser acoplados en un modelo integral de gestión de recursos hídricos.

La zona de estudio será la Subcuenca de Cointzio, la cual forma parte de la Cuenca del lago de Cuitzeo, debido a que es una cuenca de cabecera (Régimen Natural) que ha sido ampliamente estudiada debido a la gran importancia que tiene para el estado de Michoacán, por lo que se cuenta con información hidrometeorológica suficiente y, por el franco deterioro ambiental que presenta.

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones, se realizó el análisis comparativo de los índices estadísticos (coeficiente de nash-sutcliffe, nash-sutcliffe modificado, coeficiente de correlación de Pearson, la eficiencia volumétrica y el sesgo porcentual) obtenidos de cada simulación de forma cuantitativa, además de incluir el análisis cualitativo; donde se incorporaron aspectos como la estructura del modelo, la volatilidad de los parámetros y el proceso de calibración. Con ello se logró una clara distinción entre los modelos analizados proponiendo así una metodología para comparación de modelos hidrológicos.

Palabras clave: Modelación matemática, modelos hidrológicos distribuidos, comparación.

ABSTRACT

The use of mathematical modeling for the simulation of the rain-runoff process has become an indispensable tool for the analysis of water resources systems.

The present investigation includes an analysis of hydrological models with greater acceptance in the global scope, of which (i) the Témez model, (ii) the Hydrologiska Bryans Vattenbalansavdelning model (HBV), (iii) the Sacramento model, (iv) the Génie Rural à 4 paramètres Journalier model (GR4J), (v) the Water balance equation of the tool for the evaluation of soil and water in a river basin (SWAT), (vi) the simple coefficient method and (vii) the soil moisture method were selected because they were treated of distributed or semi-distributed models, based on hydrometeorological data, of continuous simulation and have the particularity of being able to be coupled in an integral model of water resources management.

The study area will be the Cointzio Sub-basin, which is part of the Lake Cuitzeo Basin, because it is a headwater basin (Natural Regime) that has been widely studied due to the great importance it has for the state of Michoacán, for which sufficient hydrometeorological information is available and due to the environmental deterioration that it presents.

Once the results of the simulations were obtained, a comparative analysis of the statistical indexes (nash-sutcliffe coefficient, modified nash-sutcliffe, Pearson correlation coefficient, volumetric efficiency and percentage bias) obtained from each simulation was performed quantitative, in addition to including the qualitative analysis; where aspects such as the structure of the model, the volatility of the parameters and the calibration process were incorporated. With this, a clear distinction was made between the models analyzed, thus proposing a methodology for comparing hydrological models.

Keywords: Mathematical modeling, distributed hydrological models, comparison.

Contenido

I.	INTRODUCCIÓN	- 1 -
II.	OBJETIVO GENERAL	- 4 -
A.	OBJETIVOS PARTICULARES	- 4 -
III.	HIPÓTESIS	- 5 -
IV.	JUSTIFICACIÓN	- 6 -
V.	ANTECEDENTES	- 7 -
A.	HISTÓRICOS	- 7 -
B.	CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS.	- 16 -
C.	USO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	- 21 -
D.	MODELACIÓN HIDROLÓGICA	- 23 -
E.	ANÁLISIS COMPARATIVOS	- 26 -
1.	<i>Proceso Analítico Jerárquico</i>	- 26 -
VI.	METODOLOGÍA	- 31 -
A.	DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	- 31 -
B.	ESQUEMA METODOLÓGICO	- 33 -
1.	<i>Información Meteorológica e Hidrométrica actualizada</i>	- 34 -
2.	<i>Actualización de la Información de la Cuenca del Lago de Cuitzeo</i>	- 36 -
3.	<i>Análisis y validación estadística de los datos</i>	- 37 -
4.	<i>Catalogación de la información cartográfica</i>	- 40 -
5.	<i>Selección y Aplicación de modelos hidrológicos</i>	- 41 -
6.	<i>Metodología de Comparación</i>	- 71 -
7.	<i>Análisis estadístico</i>	- 72 -
8.	<i>Aplicación de la metodología de comparación</i>	- 75 -
9.	<i>Modelo Seleccionado.</i>	- 75 -
C.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	- 76 -
1.	<i>Selección de Estaciones Climatológicas</i>	- 76 -
2.	<i>Actualización de Información Meteorológica e Hidrométrica</i>	- 77 -
3.	<i>Pruebas de Homogeneidad e Independencia</i>	- 79 -
4.	<i>Llenado de datos</i>	- 80 -
5.	<i>Modelación Hidrológica</i>	- 82 -
6.	<i>Análisis Comparativo</i>	- 97 -

7.	<i>Discusión de resultados</i>	- 108 -
VII.	CONCLUSIONES	- 112 -
VIII.	BIBLIOGRAFÍA	- 113 -

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1. PROCESOS DEL AGUA.....	- 7 -
FIGURA 2. CLASIFICACIÓN DE MODELOS. SINGH, V. P. (1988).....	- 17 -
FIGURA 3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	- 32 -
FIGURA 4. ESQUEMA METODOLÓGICO.....	- 33 -
FIGURA 5. MODELO CONCEPTUAL PROPUESTO POR TÉMEZ	- 42 -
FIGURA 6. ESQUEMA GENERAL DEL MODELO HBV	- 45 -
FIGURA 7. ESQUEMA DEL MODELO DE SACRAMENTO.....	- 49 -
FIGURA 8. ESQUEMA DETALLADO DE LOS PROCESOS Y PARÁMETROS DE CONTROL DEL MODELO DE SACRAMENTO	- 49 -
FIGURA 9. MODELO CONCEPTUAL GR4J	- 58 -
FIGURA 10. MODELO CONCEPTUAL DE SWAT	- 65 -
FIGURA 11. VARIABLES Y PARÁMETROS DEL SMM	- 68 -
FIGURA 12. MODELO CONCEPTUAL DEL SMM	- 70 -
FIGURA 13. SELECCIÓN ESPACIAL DE ESTACIONES	- 76 -
FIGURA 14. ESTACIONES FINALES.....	- 81 -
FIGURA 15. SUBCUENCAS DEL LAGO DE CUITZEO.....	- 82 -
FIGURA 16. UBICACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS.	- 84 -
FIGURA 17. SIMULACIÓN HISTÓRICA Y ANUAL MODELO DE TÉMEZ	- 85 -
FIGURA 18. SERIE HISTÓRICA Y ANUAL MODELO HBV	- 87 -
FIGURA 19. SERIE HISTÓRICA MENSUAL Y ANUAL DEL MODELO SACRAMENTO	- 89 -
FIGURA 20. SERIE HISTÓRICA MENSUAL Y ANUAL DEL MODELO GR4J	- 91 -
FIGURA 21. SERIE HISTÓRICA MENSUAL Y ANUAL DEL MODELO DEL COEFICIENTE SIMPLE.....	- 92 -
FIGURA 22. SERIE HISTÓRICA MENSUAL Y ANUAL DEL MODELO DE HUMEDAD DEL SUELO	- 93 -
FIGURA 23. HRU'S DEFINIDAS CON EL PROGRAMA SWAT	- 95 -
FIGURA 24. CALIBRACIÓN DEL MODELO SWAT CON EL ALGORITMO SUFI-2.....	- 96 -
FIGURA 25. ANÁLISIS DE CAJA Y BIGOTES MEDIO MENSUAL	- 98 -
FIGURA 26. ANÁLISIS DE CAJA Y BIGOTES POR ESTACIÓN DEL AÑO	- 99 -
FIGURA 27. ANÁLISIS DE PORCENTAJE DE SUPERACIÓN DE EXCEDENCIA DE CAUDALES	- 101 -
FIGURA 28. CORRELACIÓN LINEAL DATOS SIMULADOS VS OBSERVADOS	- 102 -
FIGURA 29. ESQUEMA DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO	- 105 -
FIGURA 30. GRÁFICA DE BARRAS DE LA PONDERACIÓN POR CRITERIO DE LAS ALTERNATIVAS	- 107 -

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. RANGO DEL NÚMERO DE SECUENCIAS (U) PARA UN REGISTRO HOMOGÉNEO. FUENTE: CAMPOS ARANDA, PROCESOS DEL CICLO HIDROLÓGICO (1998)	- 38 -
TABLA 2. LISTA DE PARÁMETROS Y CONDICIONES INICIALES DEL MODELO GR4J.....	- 59 -
TABLA 3. LISTADO DE ESTACIONES	- 77 -
TABLA 4. PRUEBAS DE CONSISTENCIA.....	- 79 -
TABLA 5. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS.....	- 83 -
TABLA 6. SUBDIVISIÓN DE LA CUENCA DE CUITZEO PARA EL PROCESO DE CALIBRACIÓN.....	- 83 -
TABLA 7. LÍMITES Y CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO DE TÉMEZ	- 86 -
TABLA 8. LÍMITES Y CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO HBV	- 88 -
TABLA 9. LÍMITES Y CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO HBV	- 90 -
TABLA 10. LÍMITES Y CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO GR4J	- 91 -
TABLA 11. LÍMITES Y CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO DE HUMEDAD DEL SUELO	- 94 -
TABLA 12. ESCALA DE ÍNDICES DE BONDAD DE AJUSTE (MORIASI, 2007)	- 103 -
TABLA 13. ÍNDICES DE BONDAD DE AJUSTE OBTENIDOS.....	- 103 -
TABLA 14. PONDERACIÓN COMPARATIVA DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS	- 104 -
TABLA 15. PONDERACIÓN DE CRITERIOS EN EL PAJ	- 106 -
TABLA 16. EIGENVECTOR DE CRITERIOS.....	- 106 -
TABLA 17. CLASIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS.....	- 107 -

I. Introducción

En la actualidad el tema del agua es uno de los más importantes en la agenda ambiental mundial. Además de su importancia para el funcionamiento de los ecosistemas y mantenimiento de la biodiversidad se relaciona con aspectos fundamentales como la salud, seguridad alimentaria y el desarrollo socioeconómico.

Antiguamente el agua se visualizaba como un recurso de importancia estratégica sólo en aquellas regiones en las que, por sus condiciones físicas naturales, era muy escasa. Sin embargo, el interés del ser humano en aprovechar este recurso ha provocado su desperdicio y contaminación. El crecimiento de la población y, en consecuencia, de la demanda de agua para satisfacer sus necesidades ha llevado a muchos lugares del planeta a enfrentar conflictos hídricos entre los diferentes sectores que la aprovechan.

Es por ello que se deben establecer las medidas adecuadas de control para normar el aprovechamiento de este recurso. Una de estas medidas es la estimación de la disponibilidad hídrica media anual. La disponibilidad hídrica o escurrimiento natural es el volumen medio anual de agua superficial que se capta por la red de drenaje de la cuenca hidrológica (CONAGUA, 2015).

El escurrimiento superficial se define como aquella parte de la precipitación, del deshielo y/o agua de irrigación que no llega a infiltrarse en el suelo, sino que fluye hacia un cauce fluvial desplazándose sobre la superficie. La escorrentía también incluye el agua que llega al cauce fluvial justo debajo de la superficie, denominado flujo subsuperficial o interflujo.

El uso de la modelación matemática para la simulación del proceso lluvia-escurrimiento se ha vuelto una herramienta indispensable para el análisis de sistemas de recursos hídricos. Un modelo hidrológico a nivel de cuenca es un conjunto de

descripciones matemáticas de componentes del ciclo hidrológico que utilizan principios físicos básicos y datos experimentales, los cuales surgen como respuesta a la necesidad de obtener herramientas para la gestión de los recursos hídricos que proporcionen una caracterización precisa de los procesos hidrológicos (Tellez, 2016).

Existen diversas metodologías que son empleadas en México y el mundo para conocer el escurrimiento superficial en las cuencas, algunas de ellas son muy complejas por la cantidad de variables y parámetros que requieren, así como por las ecuaciones necesarias para obtener el escurrimiento superficial; sin embargo, existen algunas más sencillas, es decir que requieren menos variables y parámetros. No obstante, para la aplicación de estas metodologías es necesario que se cuente con la información necesaria para su uso.

En México la NOM-011-CONAGUA-2015 es la metodología que se presenta para obtener la disponibilidad de las aguas nacionales y se considera como el requerimiento técnico mínimo obligatorio. Esta metodología utiliza un método indirecto denominado precipitación-escurrimiento. Las variables que intervienen en esta metodología son la precipitación, el coeficiente de escurrimiento, el área de la cuenca, uso y tipo de suelo, así como la evapotranspiración (CONAGUA, 2015).

El uso de los sistemas de información geográfica como herramienta de soporte para el uso de modelos más complejos conlleva a una representación espacio-temporal más tangible y precisa de los recursos hídricos. Esto ha sido observado y aplicado a los modelos hidrológicos lo cual brinda una amplia gama de herramientas para la obtención de la disponibilidad hídrica. Sin embargo, muchas veces los modelos cuentan con restricciones o no son aplicables a todas las regiones; por ello la comparación de modelos hidrológicos se ha convertido en un tema de interés.

En este trabajo se centra en un tipo específico de esos modelos, los denominados modelos conceptuales de balance hídrico o de lluvia-escurrimiento, que simulan de forma

agregada la respuesta hidrológica de una cuenca (sus caudales generados) a partir de las precipitaciones producidas.

Para ello se hará un análisis y comparación de los siguientes modelos hidrológicos: ((i) Témez, (ii) Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), (iii) Sacramento, (iv) Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), (v) Ecuación del equilibrio del agua de la Herramienta para la evaluación del Suelo y el agua de una cuenca hidrográfica, (vi) Método del Coeficiente Simple y (vii) Método de Humedad del Suelo fueron seleccionados por tratarse de modelos lluvia escurrimiento, distribuidos o semi-distribuidos, de base física, de simulación continua y tienen la particularidad de servir de base para un modelo de gestión de recursos hídricos simulando de manera agregada la respuesta de la cuenca.

En el análisis comparativo se introducirán las variables, parámetros, el grado de complejidad de la calibración, índices estadísticos como el coeficiente de nash-sutcliffe, nash-sutcliffe modificado, el coeficiente Pearson, la eficiencia volumétrica y el sesgo porcentual; así como la experiencia obtenida al utilizar cada uno de los modelos introduciendo la complejidad de la elaboración del modelo, el proceso de calibración, la facilidad de uso de la interfaz de usuario y el tiempo requerido para obtener resultados satisfactorios como una variable cualitativa de los modelos.

II. Objetivo General

Comparar diferentes modelos hidrológicos para seleccionar el modelo que permita la mejor evaluación de los recursos hídricos superficiales, integrando elementos cualitativos y cuantitativos, en la subcuenca de cabecera de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

A. Objetivos Particulares

- Analizar los modelos con mayor aplicación y aceptación en el ámbito de la gestión integral de recursos hídricos para la determinación de los escurrimientos medios mensuales.
- Comparar cuantitativa y cualitativamente los modelos hidrológicos: (i) Témez, (ii) Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), (iii) Sacramento, (iv) Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), (v) Ecuación del equilibrio del agua de la Herramienta para la evaluación del Suelo y el agua de una cuenca hidrográfica, (vi) Método del Coeficiente Simple y (vii) Método de Humedad del Suelo, aplicando una compensación entre la bondad de ajuste y la complejidad del modelo
- Identificar los parámetros de mayor sensibilidad a la respuesta, en cada uno de los modelos.
- Establecer criterios para la selección de un modelo hidrológico

III. Hipótesis

La comparación de modelos hidrológicos, mediante elementos cualitativos y cuantitativos, permitirá la selección adecuada de un modelo hidrológico para la evaluación mensual de los recursos hídricos superficiales.

IV. Justificación

La escases de datos y la falta de instrumentación de las cuencas en México limitan la factibilidad de usar cualquier modelo hidrológico para la estimación del escurrimiento superficial medio. Actualmente la estimación de la disponibilidad hídrica media anual en las distintas dependencias de gobierno se realiza mediante la NOM-011-CONAGUA-2015, la cual presenta algunas limitantes: (i) no hace referencia a los datos observados en las cuencas, (ii) sólo es aplicable en cuencas grandes (mayor a 3000 km²), con rangos de precipitación de 350 a 2150 mm anuales, además de no contemplar dentro la norma la reducción de la escala temporal a un análisis mensual.

La subcuenca de Cointzio se encuentra dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo, la cual es de gran importancia para el estado de Michoacán ya que es el cuerpo de agua con mayor superficie y contribuye a regular el clima de la cuenca. Además de que beneficia económicamente a la región como soporte de la agricultura, ganadería, piscicultura, el aprovechamiento forestal y actividades industriales. Por ello conocer la disponibilidad hídrica es fundamental para la sostenibilidad de éste sistema de recursos hídricos.

Existen muy pocos trabajos que realicen un análisis comparativo de modelos hidrológicos para proporcionar a los tomadores de decisiones (Gestores de cuencas) una alternativa para estimar el escurrimiento superficial, de manera que se incorporen los datos observados en estaciones hidrométricas para su validación y tengan un rango de aplicación mayor que el de la NOM-011. Mientras que los análisis comparativos, permiten incorporar elementos de análisis cuantitativos y cualitativos de los modelos hidrológicos, por lo que proporciona una base más sólida para la elaboración de un modelo integrado de gestión de recursos hídricos de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

V. Antecedentes

A. Históricos

La cantidad global de agua en la Tierra es prácticamente constante, pero sufre continuas transformaciones de un estado a otro bajo la acción energética solar, en un complejo conjunto de procesos y subprocesos anidados e interrelacionados entre sí, y operando a diversas escalas espacio-temporales. Dado que los procesos relacionados con el agua que tienen lugar en el planeta son sumamente diversos, se interpreta la hidrología, en un sentido más restringido, como la parte de los ciclos naturales del agua que tienen lugar en la tierra, dejando fuera de su alcance los procesos atmosféricos (meteorología) y los marinos (oceanografía). Centrando la atención únicamente en los procesos terrestres, existe a su vez una gran diversidad de procesos que conduce a otras subdivisiones o perspectivas, tal y como se muestra en la figura 1:



Figura 1. Procesos del Agua.

Entre las primeras descripciones completas del ciclo hidrológico, con todos los procesos asociados, está la formulada por Robert Elmer Horton, considerado uno de los padres de la moderna hidrología, en la década de 1930. Desde entonces se han realizado numerosas representaciones del ciclo, según la perspectiva adoptada.

Los procesos básicos, o transferencias o flujos entre almacenamientos, que incluye el ciclo hidrológico son:

- Precipitación (líquida/sólida)
- Evaporación
- Evapotranspiración
- Sublimación
- Fusión
- Interceptación
- Flujo a través de la vegetación
- Infiltración
- Exfiltración
- Redistribución
- Percolación
- Recarga
- Elevación por capilaridad
- Escorrentía directa
- Escorrentía subsuperficial
- Escorrentía subterránea
- Propagación

La precipitación es la caída del agua desde la atmósfera a la superficie de la tierra (cubierta vegetativa y suelo), bien en forma líquida (lluvia) o sólida (nieve).

La evaporación es el retorno a la atmósfera del agua líquida desde una superficie de agua (ríos, lagos, mares, entre otros). Si se produce desde el agua almacenada en el suelo, sin transpiración de las plantas, por ejemplo, en suelos desnudos, se le denomina exfiltración. La evapotranspiración es el efecto conjunto que se produce a través de la evaporación del agua presente en la superficie terrestre y en los mares, ríos y lagos, y la transpiración procedente de la tierra a través de los seres vivos, en especial de las plantas. Esta evapotranspiración determina la formación de vapor atmosférico que, al condensarse bajo determinadas condiciones, retorna en parte a la superficie continental en forma de precipitación líquida o sólida.

Una parte de esa precipitación se infiltra en el suelo, donde se redistribuye (cambios del perfil de humedad tras el aguacero) y desde donde o bien se vuelve a evapotranspirar o bien percola (desciende por efecto gravitatorio al superarse la capacidad de campo) en el subsuelo, y otra parte de la precipitación queda interceptada por la vegetación o retenida en pequeños almacenamientos superficiales o escurre superficialmente por la red de drenaje (escorrentía superficial directa) hasta alcanzar la red fluvial.

El agua infiltrada en el subsuelo, y que no es evapotranspirada, descende por la zona no saturada, desde la que puede lateralmente surgir a la superficie en forma de flujo hipodérmico o subsuperficial, o percolar hasta alcanzar los niveles de las aguas subterráneas saturadas o niveles piezométricos de los acuíferos (proceso de recarga), que son las formaciones geológicas que tienen capacidad para almacenar y transmitir el agua.

La parte del agua que mediante la percolación recarga los acuíferos y vuelve a salir, diferida en el tiempo, a la red fluvial mediante los manantiales o en los tramos fluviales drenantes de acuíferos, se denomina agua subterránea y su circulación en el subsuelo es la escorrentía o flujo subterráneo. Es frecuente asociar la escorrentía subterránea al denominado flujo base de los ríos, aunque puede haber otras componentes del caudal con variabilidad temporal relativamente lenta, como la fusión de

nieves, y cabe asimismo distinguir un flujo de fondo o base de otros flujos más rápidos en la descarga de los manantiales, siendo ambos escorrentía subterránea. En los acuíferos costeros el agua subterránea puede salir directamente al mar, en parte o en su totalidad. Una vez que el agua alcanza los cauces fluviales, se propaga hacia aguas abajo reduciendo su caudal punta (efecto de laminación).

Se define como aportación de un río en un punto de la red fluvial el volumen de agua que pasa por él durante un periodo de tiempo (la suma de los caudales circulantes). En el régimen natural esta aportación comprenderá, pues, la suma de escorrentía superficial directa de toda la cuenca situada aguas arriba, y la escorrentía subterránea que se incorpora a los cauces aguas arriba de ese punto. La aportación total generada en un territorio dividida por su área es la aportación específica.

Por lo tanto, se podría considerar una fase atmosférica, con los procesos del agua en la atmósfera, una fase terrestre, con los procesos de infiltración, percolación y flujo subterráneo, y una fase de agua, con los procesos de escorrentías y propagación de caudales en la red fluvial o las masas de agua. De igual modo cabe hablar conceptualmente de subsistemas superficial, subsuperficial y subterráneo, atendiendo a la generación y contribución de caudales a la red fluvial.

El ciclo de agua (escorrentía y propagación en superficie) es mucho más rápido que el ciclo terrestre o subsuperficial (infiltración, percolación, recarga, escorrentía subterránea). Estas diferencias temporales son una característica fundamental para entender la dinámica del ciclo global.

El concepto del ciclo es muy simple, pero los fenómenos que intervienen son extraordinariamente complejos e intrincados. En realidad, como se ha señalado, no se trata de un ciclo, sino de muchos subciclos interrelacionados a las escalas continental, regional y local. Además, la escala espacial puede ser la de una cuenca hidrográfica o la de un área cualquiera del territorio. La diferencia básica estriba en que la cuenca no tiene

intercambios externos significativos con sus cuencas vecinas, mientras que un territorio puede tenerlos de cualquier magnitud relativa.

Por otra parte, la escala temporal es crucial para determinar la importancia relativa de los procesos intervinientes. Así, por ejemplo, la evapotranspiración es irrelevante en una crecida de un río, pero es fundamental en el balance a largo plazo de su cuenca.

Además de las escalas espacio-temporales, cabe también hablar de una escala informacional, referida a la cantidad de información hidrológica de que se dispone en cada caso. El conocimiento físico actual de los componentes del ciclo suele ser muy superior a los datos de que se dispone, por lo que es frecuente que la conceptualización de los problemas se lleve a cabo no conforme a la teoría física subyacente sino conforme a representaciones simplificadas compatibles con la información y observaciones disponibles en la práctica.

Únicamente en situaciones especiales (cuencas experimentales debidamente instrumentadas) se dispone de información suficientemente detallada como para aplicar modelos numéricos basados en los sistemas de ecuaciones diferenciales que gobiernan los procesos hidrológicos, por lo que lo usual es emplear modelos conceptuales simplificados que, inspirados en las leyes físicas subyacentes, reproducen los comportamientos observados de forma consistente con la información disponible.

Así, la disponibilidad de datos es un elemento determinante para el análisis hidrológico. Debe recordarse que las dificultades de cálculo no permitían, hasta el último tercio del siglo XX, el manejo eficiente de toda la información hidrológica disponible. Hoy la situación se ha invertido y la capacidad de cómputo supera ampliamente la disponibilidad de datos hidrológicos. Tal disponibilidad de datos es ahora el factor limitante para nuevos avances, lo que conduce a la necesidad de implantar redes de observación cada vez más extensas y completas. En definitiva, es el conjunto de definición espacial, temporal e informacional el que determina el tipo de modelo que se puede aplicar en cada caso concreto.

El agua ha sido siempre un elemento imprescindible para el desarrollo de la civilización, y el hombre ha avanzado en este desarrollo modificando el régimen de los flujos y almacenamientos naturales del agua en el ciclo hidrológico. Así, el establecimiento de las ciudades, o la producción de alimentos mediante la agricultura de regadío, o la producción de energía, han exigido derivar las aguas de sus lugares naturales (ríos, lagos o acuíferos) y aplicarlas a estos usos, modificando así la circulación que habrían tenido de no mediar intervención humana.

En muchas regiones del planeta, y en particular en nuestro país, estas intervenciones locales han sido muy intensas, y han dado lugar a una circulación del ciclo que resulta, en muchos casos, absolutamente distinta de la que se produciría en el régimen natural. Esta circulación real, resultante de los flujos y almacenamientos naturales modificados por las acciones antrópicas, constituye el ciclo hidrológico en régimen alterado.

La restitución de los caudales de los ríos y drenajes de acuíferos consiste en estimar su régimen natural, que es el que define los recursos existentes, a partir del régimen alterado, que es el que puede observarse y medirse. Para estimar ese régimen natural es preciso conocer las detracciones de agua de los ríos y acuíferos, los retornos al río, la gestión de los embalses, así como las evaporaciones y filtraciones que en ellos puedan producirse, las transferencias artificiales entre cuencas, etc. En suma, se necesita disponer de información sobre la evolución en el tiempo de todas las intervenciones humanas significativas que se han producido en la cuenca.

En general no se conocen de forma satisfactoria los usos y derivaciones del agua. Lógicamente, este conocimiento es mayor en aquellas zonas donde la escasez ha exigido mayores controles e intervenciones públicas para la distribución de las aguas, pero, en todo caso, y de forma general, resulta imprescindible promover avances fundamentales en esta dirección, que solo pueden venir de la intensificación y potenciación de las redes de medición.

Los retornos del agua derivada, que son aún menos conocidos cuantitativamente, dependen del tipo de uso y de la distancia del punto de utilización a los de toma y retorno. El retorno de agua superficial a los ríos se produce con un desfase respecto a la toma usualmente de horas o días, pero que puede llegar a ser del orden de un mes. Si el retorno se produce a través de los acuíferos, el desfase suele ser mucho mayor, incluso de años. Esto es importante a la hora de interpretar los datos de caudales históricos registrados en las estaciones de aforo de los ríos y, en particular, los de caudales bajos cuando están influidos por derivaciones de riego de cuantía desconocida. Lo mismo sucede cuando se producen bombeos de agua subterránea de cuantía y distribución temporal desconocida en acuíferos aluviales pequeños, que pueden influir de forma rápida en los caudales del río.

En definitiva, el nivel de alteración antrópica es a veces tan intenso y complejo que resulta prácticamente imposible restituir los caudales naturales, con cierta fiabilidad, a partir del imperfecto conocimiento de las afecciones producidas. En estos casos, frecuentes en los cursos bajos de los ríos, puede recurrirse a modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía que, razonablemente calibrados, permitan estimar las condiciones naturales de la cuenca. Una adecuada combinación de distintos métodos y aproximaciones, según las circunstancias de cada caso, será la clave del éxito para atacar el problema de forma satisfactoria.

La modelación hidrológica se define como la descripción matemática de la respuesta de una cuenca ante la ocurrencia de una serie de eventos de precipitación. Estos modelos permiten la generación de hidrogramas en sitios en que no hay estaciones fluviográficas (Viessman, Knapp y Lewis, 1989).

Diversos autores que trabajan el ambiente de modelos hidrológicos reconocen que, en general, la utilidad de los modelos es que nos permiten comprender mejor cómo funciona y hacer predicciones del comportamiento del sistema que se estudia. Si se conoce mejor el sistema y se predice su comportamiento, se podrá tener un mejor control y operación de este (Dooge, 1986; Ponce, 1989; Dingman, 2002).

Los orígenes de la modelación lluvia – escurrimiento, en un sentido amplio, pueden encontrarse en la segunda mitad del siglo XIX, surgiendo en respuesta a tres tipos de problemas de ingeniería: diseño de alcantarillas urbanas, diseño de sistemas de drenaje para recuperación de suelos y diseño de vertedores en embalse. En todos ellos, el gasto de diseño era el parámetro de mayor interés (Todini, 1988). El origen de la modelación matemática se remonta al desarrollo del método racional por Mulvany (1851), y un modelo de evento por Imbeau (1892) para relacionar el pico de escurrimiento de una tormenta con la intensidad de la lluvia (Singh & Woolhiser, 2002). Para la década de los años 20, y ante la necesidad de desarrollar estudios en cuencas de mayor tamaño, se creó el “método racional modificado”, al considerar la distribución no uniforme, en espacio y tiempo, de la lluvia y las características de la cuenca (Kampf & Burges, 2007).

Sherman (1932) introduce el concepto de hidrograma unitario para relacionar el escurrimiento directo a la lluvia exceso. Horton (1933) desarrolló la teoría de infiltración para estimar la lluvia exceso y mejorar las técnicas de separación del hidrograma.

En la década de los cincuenta se dio un salto cualitativo muy importante, al incorporarse el enfoque de métodos para el análisis de sistemas dinámicos complejos. Este fue el periodo de origen de los modelos conceptuales. Autores como Nash, Prasad, Delleur, Wiener, Tikhonov, Eagleson, Natale, Amorocho, Orlob, Todini y Wallis, durante la década de los sesenta y setenta, centran sus esfuerzos en la derivación del hidrograma unitario en su forma discretizada de datos muestreados (Todini, 1988).

La hidrología proporciona información relevante que es requerida como dato para el análisis de sistemas complejos de recursos hídricos.

- **Hidrología: ciclo natural**

- Recursos hídricos naturales. Flujos y almacenamientos
- Condiciones de calidad
- Agua disponible para el medio ambiente y los distintos usos
- Entradas al sistema de utilización

- **Sistema de utilización**

- Necesidades y demandas. Requisitos de calidad
- Afecciones antrópicas al sistema natural
- Restricciones sociopolíticas o ambientales

- **Planificación**

- Sistemas de recursos hídricos
- Análisis de sistemas. Optimización/simulación
- Gestión integrada
- Consideraciones económicas e institucionales

En las últimas décadas se han propuesto numerosos modelos para abordar el análisis y optimización de los sistemas de recursos hídricos, con diferentes objetivos y niveles de complejidad. Estos modelos, en su nivel de abstracción y generalización más alto, se orientan al análisis de grandes sistemas de recursos hídricos para su simulación, optimización técnico económica, diseño de estrategias de gestión, garantías de suministro, planificación de sequías o análisis de disponibilidades. Existen numerosos desarrollos de este tipo de modelos tanto en España (p.e. AQUATOOL, Andreu, J. et al., 1995, Solera A. et al., 2007) como en otros países (MODSIM, SIM-V, WEAP, HEC-PRM, etc.).

B. Clasificación de los Modelos Hidrológicos.

Tradicionalmente, los modelos hidrológicos se agrupan en modelos basados en procesos físicos y modelos conceptuales (Bergström, 1991). Los modelos conceptuales son aquellos que manifiestan el entendimiento de un proceso; este modelo puede ser representado por un modelo matemático o físico. Los modelos físicos describen el sistema natural con base en la elaboración de un prototipo, que puede tener una representación matemática utilizando las leyes de conservación de masa, momento y varias formas de energía. Desde el punto de vista matemático, los modelos pueden ser empíricos y teóricos, y con solución analógica o numérica. Si las variables presentan un comportamiento aleatorio o no, pueden ser clasificados como estocásticos o determinísticos (Brooks, 1992).

La evaluación del recurso agua es un aspecto fundamental de la planificación y gestión de los recursos hídricos. Básicamente existen dos metodologías para evaluar este recurso: la restitución a régimen natural y la modelación precipitación-escurrimiento. Ambas metodologías suelen ser complementarias y necesarias; ya que nos ayudan a comprender, explorar y analizar estos procesos y cómo evaluar opciones de gestión sostenibles. Los resultados que se derivan de los modelos constituyen una información muy valiosa para la toma de decisiones estratégicas o en tiempo real.

Los modelos de simulación hidrológica se clasifican en diferentes categorías (Figura 2); según la naturaleza de su algoritmo, según su representación espacial y según su escala temporal.

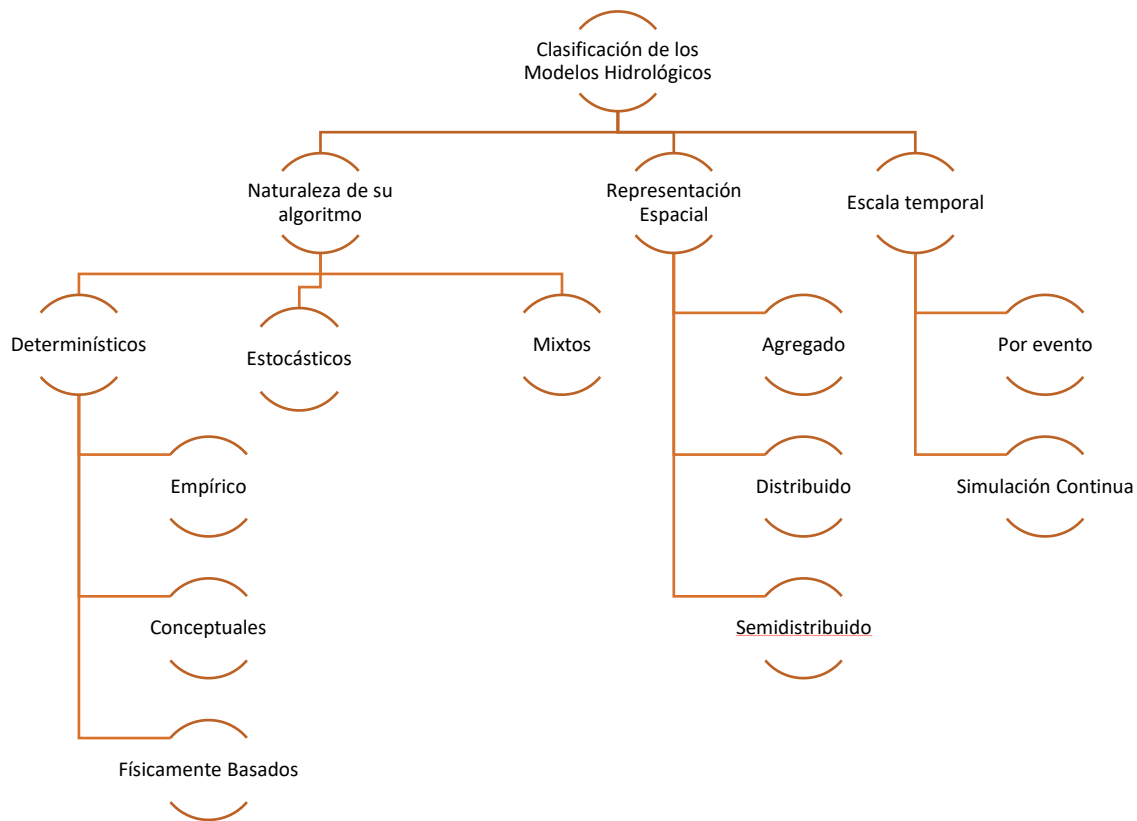


Figura 2. Clasificación de Modelos. Singh, V. P. (1988).

Según

Ponce (1989) la información de entrada se clasifican en:

- **Paramétricos o empíricos.** son los más simples de todas las propuestas de modelado. Como su nombre indica, el énfasis de los modelos paramétricos está en los parámetros empíricos en los que está basada la solución. Usualmente, un modelo paramétrico consiste en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico. La aplicabilidad de los modelos paramétricos está restringida al rango de datos utilizados en la determinación de los valores de los parámetros. Los modelos paramétricos son útiles cuando los modelos conceptuales, determinísticos o probabilísticos no son prácticos o son demasiado caros.

- **Heurísticos.** - Se basan en explicaciones del fenómeno en estudio.

Según el tipo de representación se clasifican en:

- **Cualitativos o Conceptuales.** - Son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas (ya sean en forma algebraica o por ecuaciones diferenciales ordinarias), que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales. El uso extensivo de los modelos conceptuales en la ingeniería hidrológica refleja la complejidad inherente del fenómeno y la incapacidad práctica de considerar los componentes determinísticos en todas las instancias. De allí que los modelos conceptuales son sustitutos útiles y prácticos para los modelos determinísticos.
- **Cuantitativos o Numéricos.** –Son formulados siguiendo fórmulas de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales. Un modelo determinístico es formulado en términos de un grupo de variables y parámetros y ecuaciones relacionadas a ellos. Un modelo determinístico implica una relación causa-efecto entre los valores de los parámetros elegidos y los resultados obtenidos de la aplicación de las ecuaciones. Idealmente, un modelo determinístico debería proveer el mejor detalle en la simulación de los procesos físicos o químicos. En la práctica, sin embargo, la aplicación de modelos determinísticos está asociada frecuentemente a la incapacidad del modelo o del modelador de resolver la variabilidad temporal y espacial del fenómeno natural en incrementos suficientemente pequeños.

Según la aplicación se dividen en:

- **Modelos de Simulación.** - Predice que sucederá en una situación específica.

- **Modelos de Optimización.** - Determinan como resolver problemáticas administrativas o de producción.

Según la aleatoriedad de los modelos, éstos se dividen en dos grandes grupos; los determinísticos y los probabilísticos. En los modelos determinísticos, las variables son determinadas mediante leyes de la física, las cuales se pueden considerar como exactas; por otro lado, en los modelos probabilísticos, las variables se determinan por las leyes del azar, por lo que son modelos caracterizados en términos de probabilidad. Los modelos probabilísticos son de dos tipos: (1) estadísticos, y (2) estocásticos. Los modelos estadísticos tratan con ejemplos observados, mientras que los modelos estocásticos con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales - por ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas de tamaño medio. El desarrollo de modelos estadísticos requieren invariablemente el uso de datos; los modelos estocásticos enfatizan sobre las características estocásticas de los procesos hidrológicos (Singh, 1988).

La gran variedad de modelos hidrológicos presenta la incógnita de cuál será el modelo óptimo para la obtención de la disponibilidad hídrica media anual. Por ello surge la necesidad de evaluar su desempeño y eficacia. La selección objetiva del modelo es un paso crucial en la modelación para predecir con exactitud caudales y otras variables y entender las respuestas de las cuencas hidrográficas (Clark, et al., 2008). Para un análisis de caso en particular, el propósito del estudio, el modelo y la disponibilidad de datos son los factores que determinan la selección (Xu & Singh, 2004). Por ejemplo, los modelos de balance, precipitación-escorrentía se han aplicado para evaluar la gestión de recursos hídricos a escala regional, mientras que los conceptuales de parámetro globalizado se han utilizado en la evaluación detallada del flujo superficial (Xu & Singh, 2004). Por otra parte, los modelos distribuidos son necesarios para la simulación de los patrones espaciales de respuesta hidrológica dentro de una cuenca (Beven, 1989).

Existen 3 tipos de problemas que pueden solucionarse en función de la relación de entradas y salidas del modelo, definiendo así 3 tipologías estructurales: Predicción, Identificación y Detección.

La **predicción** o simulación del sistema es la obtención de salidas a partir de entradas y parámetros conocidos. También se le denomina el problema directo.

La **identificación** o calibración consiste en encontrar los parámetros del modelo que proporcionen la mayor concordancia entre las salidas calculadas y las observadas.

La **detección** o problema inverso consiste en estimar las entradas que han dado lugar a las salidas observadas, conocidos los parámetros del sistema. En hidrogeología es usual denominar problema inverso al aquí llamado de calibración, es decir, encontrar los parámetros del acuífero a partir del conocimiento de sus bombeos y el comportamiento observado de sus variaciones piezométricas.

Para la selección de un modelo es de suma importancia definir primeramente la finalidad con la que se está realizando la modelación, ello nos llevará a reducir la amplia gama de opciones que se tienen para este fin. También es importante saber que partes del ciclo del agua se necesita obtener para definir el proceso lluvia-escurrimiento; mientras más partes se necesiten simular, la simplificación de los modelos se va perdiendo y la complejidad de las ecuaciones que los gobiernan, así como los mecanismos de solución va aumentando.

Otro aspecto importante para definir qué modelo se debe emplear es conocer detalladamente la información disponible para el análisis de la cuenca, mientras más información requiera el modelo, más complejo será el proceso de modelación por el tratamiento previo que se necesite para validar la información disponible y además como es el caso de México, si se dispone con poca información o series temporales con vacíos, la selección de un modelo que se ajuste a dichas condiciones es crucial.

C. Uso de los Sistemas de Información Geográfica

Entre las herramientas de apoyo en México, disponibles de forma gratuita, que permitieron dar los primeros pasos en modelar los escurrimientos sobre una cuenca, se pueden mencionar las siguientes: modelo digital de elevación (MDE), cartas digitales edafológicas, y cartas de uso de suelo para diversos años, cubriendo todo el territorio nacional; hechas disponibles a través del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Actualmente, los MDE están disponibles para cualquier cuenca en México a través del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0), con una resolución de 15m (INEGI, 2017).

Otro tipo de información de entrada para modelar en México es, desde luego, la información climatológica histórica, diaria y por evento, disponible directamente en la página web del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, SMN, 2017). La climatológica diaria histórica está disponible desde años tan remotos como 1925, para algunas estaciones, pero la climatológica por evento, es relativamente joven. Se pudiera decir que la climatológica por evento, reportada por la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), se puede encontrar más o menos a partir del 2007.

La información de escurrimientos y sedimentos mensuales, e incluso hidrogramas detallados para algunas estaciones de aforo mexicanas se encuentran disponibles en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), la cual se encuentra disponible gratuitamente en el sitio web de la Comisión Nacional del Agua (BANDAS, 2017).

Finalmente, otra herramienta muy útil en México y en todo el mundo, ha sido el desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG). Los SIG proporcionan un medio eficaz para generar, almacenar, analizar y visualizar datos espacialmente distribuidos.

Los datos referenciados geográficamente pueden estar en forma de mapas temáticos mostrando información muy diversa tal como: elevación del terreno, tipos de suelo, vegetación, hidrografía, o bien resultados provenientes de modelos de simulación de procesos ambientales. Una característica de los SIG es que permiten al usuario sobreponer capas de mapas digitales a partir de los cuales se puede visualizar y analizar la información a gran escala.

La mayor aplicación de SIG en Hidrología ha sido el campo de la modelización de cuencas, esto es comprensible ya que los modelos informáticos de hidrología de cuencas están compuestos de muchos datos y los SIG son la tecnología idónea para procesar grandes volúmenes de datos (Martínez Menchón & Alonso Sarría, 2005)

D. Modelación Hidrológica

Existen muchos paquetes informáticos específicos para la modelación de sistemas de recursos hídricos. Estas herramientas de modelación pueden clasificarse en función de diferentes criterios como pueden ser: programas para optimizar o simular, redes de flujo u otro tipo de programación matemática, programas específicos o herramientas para la modelación de cualquier sistema, programas o sistemas de soporte a la decisión. A continuación, se presenta una breve compilación de los mismos:

IRIS. Interactive River System Simulation Program (Loucks *et al.*, 1990), principalmente utilizado para el suministro y la producción de energía hidroeléctrica.

STELLA. System Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation (Karpack y Palmer, 1992), el cual incluye herramientas gráficas y ha sido utilizado para la modelación de diversas cuencas en el estado de Washington en los Estados Unidos.

MIKE-BASIN (DHI, 2003), es un modelo de simulación a escala diaria con una interfaz gráfica desarrollada en el sistema de información geográfica Arcview.

MODSIM (Labadie, 1995), puede utilizarse a escala mensual o semanal. Además, restricciones no lineales pueden incorporarse a través del lenguaje de programación PEARL.

WEAP (Grigg, 1996), para la evaluación de la planificación de cuencas hidrológicas. Este modelo realiza el balance de agua mediante el uso de redes de flujo y puede incorporar diferentes elementos como embalses, ríos y demandas. Permite incluir modelos de acuíferos del tipo rectangular conectados con ríos.

CALSIM Water Resources Simulation Model (DWRC, 2000), desarrollado por el California Department of Water Resources que a diferencia de los anteriores sirve para simular un sistema de recursos hídricos: El Proyecto Federal del Valle Central de

California, Su principal característica es su flexibilidad para la incorporación de diferentes tipos de reglas de operación y restricciones.

AQUATOOL (Andreu et al., 1996), es un sistema de soporte a la decisión para la modelación de sistemas de recursos hídricos en diferentes aspectos como son la optimización, simulación, aguas subterráneas, calidad de aguas, etc. Todos los módulos están gestionados mediante una única interfaz con capacidades gráficas que permiten crear, editar y visualizar resultados de los modelos de una forma sencilla y amigable. Los módulos principales son los modelos de simulación y optimización de sistemas de recursos hídricos. En el entorno de AQUATOOL existen los modelos OPTIGES, AQUIVAL y SIMGES

El modelo OPTIGES (Andreu, 1992) es un programa informático para la optimización de sistemas de recursos hídricos que permite la optimización de largos períodos de sistemas concebidos mediante un conjunto de elementos como son embalses, conducciones, demandas, retornos, etc.

El modelo AQUIVAL (Andreu y Capilla, 1996) para el preproceso y simulación de acuíferos por el método de los autovalores. Este módulo permite la integración de un modelo distribuido de flujo de un acuífero en un modelo de simulación del uso conjunto desarrollado con SIMGES. El método de los autovalores resuelve directa y explícitamente en cada paso de tiempo la ecuación diferencial de flujo y puede proporcionar de forma explícita y directa alturas en una serie de puntos elegidos previamente y los intercambios de caudal río acuífero.

El departamento de Hidráulica de la Universidad Michoacana en los últimos años se ha preocupado por la gestión integral de los recursos hídricos elaborando proyectos con el fin de mejorar el conocimiento acerca del cambio climático y sus efectos en los recursos hídricos (superficial, subterráneos, distritos de riego, conjuntos). A continuación, se describen algunas publicaciones y trabajos realizados.

- **Evaluación del cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos (en la cuenca del río Grande de Morelia).** Este trabajo desarrollado por Hernández *et al.*, (2010) con el objetivo primordial de analizar de manera integral cuantitativa el efecto del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos, y conocer el efecto en los cambios en las demandas urbanas y agrícolas, en la disponibilidad del agua superficial y subterránea, en las aportaciones de la cuenca, en las recargas al acuífero, en la evaporación (embalse) y evapotranspiración (cuenca y módulos de riego). Mediante un modelo de gestión en el cual se evaluaron las garantías y los fallos que se producen en las demandas agrícolas, urbanas e industriales, así el análisis de la evolución del acuífero y los embalses que permitieron observar el estado general de los recursos hídricos.
- **Modelación hidrológica distribuida subterránea incluyendo aspectos medioambientales.** Correa *et al.*, (2012). Obtuvo la evolución de nitrógeno en la cuenca del río grande de Morelia y en el acuífero Morelia Queréndaro; también realizó la modelación del acuífero Morelia-Queréndaro con el objetivo de calibrar los niveles piezométricos en los años 1980-2007.
- **Obtención de escurrimientos con efecto del cambio climático en la cuenca del río Grande de Morelia.** García *et al.*, (2012). El objetivo principal fue la obtención de los escurrimientos analizando el modelo de cambio climático que represente mejor las características para la cuenca del río Grande de Morelia y obtener los escurrimientos superficiales.
- **Gestión integrada de recursos hídricos en la cuenca del lago de Cuitzeo ante el efecto del Cambio Climático.** Pardo *et al* (2016). El objetivo principal fue la obtención de un modelo de gestión de los recursos hídricos de la cuenca del lago de Cuitzeo aplicando índices de cambio climático para observar el comportamiento de los escurrimientos superficiales ante distintos escenarios.

E. Análisis comparativos

Las comparaciones existentes son puramente cuantitativas y sólo hacen referencia al porcentaje del escurrimiento superficial que es representado por cada modelo, así como al uso de parámetros estadísticos como el coeficiente de Nash-Sutcliffe, de Nash-Sutcliffe modificado, el de Pearson y la eficiencia volumétrica, los cuales ajustan las medias anuales o los picos máximos y mínimos de las series y hacen referencia a los resultados obtenidos de la simulación en sí no al modelo empleado (Cisneros y Pelczer, 2007).

La variedad de modelos existentes es muy amplia por lo que no se pretende elaborar una comparación exhaustiva, limitándonos a describir algunos tipos fundamentales, de empleo frecuente en la práctica. Más concretamente, nos limitaremos a la descripción detallada de algunos modelos con pocos parámetros (3-6), frente a los que tienen un número de parámetros mucho mayor (10-20), que se expondrán de forma somera. La razón es que esta mayor complejidad paramétrica acarrea con frecuencia serios problemas de identificabilidad estructural, sin aportar mejoras sustanciales en las aplicaciones prácticas, por lo que la necesidad de su empleo frente a otros modelos más simples ha sido muy cuestionada.

1. Proceso Analítico Jerárquico

El proceso de análisis jerárquico (PAJ), desarrollado por Thomas L. Saaty (The Analytical Hierchy Process, 1980) está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma decisiones proporciones evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que especifique su preferencia respecto de cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio. El resultado del PAJ es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global de cada una de las alternativas de decisión.

El PAJ permite de una manera eficiente y gráfica organizar la información respecto de un problema, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizar. El PAJ trata de desmenuzar un problema y luego unir las soluciones de subproblemas en una conclusión.

El PAJ se fundamenta en:

- La estructuración del modelo jerárquico (representación del problema mediante identificación de meta, criterios, subcriterios y alternativas).
- Priorización de los elementos del modelo jerárquico.
- Comparaciones binarias entre los elementos.
- Evaluación de los elementos mediante asignación de “pesos”.
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados.
- Síntesis.
- Análisis de Sensibilidad.

El PAJ es una herramienta metodológica que ha sido aplicada en varios países para incorporar las preferencias de actores involucrados en un conflicto y/o proceso participativo de toma de decisión.

Algunas de las ventajas del PAJ frente a otros métodos de decisión multicriterio son:

- Presentar un sustento matemático.
- Permitir desglosar y analizar un problema por partes.
- Permitir medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común.
- Incluir la participación de diferentes personas o grupos de interés y generar un consenso.
- Permitir verificar el índice de consistencia y hacer las correcciones, si es el caso.
- Generar una síntesis y dar la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad.
- Es de fácil uso y permite que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

El primer paso es determinar un conjunto de elementos que consiste en alternativas y criterios que deseamos considerar. El siguiente paso es formar el conjunto en una estructura jerárquica que consiste en los criterios y alternativas mencionados. Al definir ese conjunto, comenzamos a desarrollar el modelo matemático mediante el cual calculamos las prioridades (peso, importancia) de los elementos en el mismo nivel en la estructura jerárquica.

El proceso completo del método AHP se puede describir en varios pasos:

- El desarrollo del modelo jerárquico del problema de toma de decisiones mediante la definición de objetivos, criterios y soluciones alternativas.
- En cada nivel del modelo jerárquico, los elementos del modelo se comparan entre sí en pares, y las preferencias del tomador de decisiones se expresan con el uso de la escala de Saaty.

En la literatura científica, esta escala se describe con mayor precisión como una escala de cinco niveles y cuatro niveles intermedios de intensidades verbalmente descritas y los valores numéricos correspondientes para ellos en la escala del 1 al 9.

Importancia/ preferencia	Intensidad	Significado
1	Igual importancia. Igual o diferente a...	Al comparar un elemento con otro no hay diferencia entre ellos.
3	Importancia moderada. Ligeramente más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero es ligeramente más importante o preferido que el segundo.
5	Importancia fuerte. Más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera más importante o preferido que el segundo.
7	Importancia muy fuerte. Mucho más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho más importante o preferido que el segundo.
9	Extrema importancia. de un elemento sobre otro. Absolutamente o muchísimo más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.

El primer paso sería definir un conjunto en el que enumeramos los elementos de la selección, el conjunto de alternativas entre los que deseamos elegir el mejor para nosotros. Luego definimos los criterios que usaremos para comparar esas alternativas.

Si n es el número de criterios o alternativas cuyo peso (prioridad, importancia) debe definirse en función de la evaluación de los valores de sus relaciones $a_{ij} = w_i / w_j$. Si formamos una matriz A a partir de la relación de su importancia relevante a_{ij} , en caso de evaluaciones consistentes equivalentes a $a_{ij} = a_{ik} * a_{kj}$, corresponderá a la ecuación $Aw = nw$

La matriz A tiene características especiales (todas sus filas son proporcionales a la primera fila, todas son positivas y $a_{ij} = 1 / a_{ji}$ es precisa, lo que hace que solo uno de sus valores propios sea diferente de 0 e igual a n . Si la matriz tiene cambios inconsistentes el vector de importancia w puede calcularse resolviendo la ecuación $(A - \lambda I)w = 0$

La condición: $\sum w_i = 1$ es verdadera, donde λ_{max} es el mayor valor propio de la matriz A .

Debido a las características de la matriz $\lambda_{max} \geq n$, y la resta $\lambda_{max} - n$ se utiliza en la medición de la consistencia de la evaluación. Con un índice de consistencia $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ calculamos la relación de consistencia $CR = CI / RI$ donde RI es un índice aleatorio (índice de consistencia para las matrices de n filas de comparaciones generadas aleatoriamente en pares: una tabla. Con los valores calculados se aplica.

Si $CR \leq 0,1000$ es cierto para la matriz A , las evaluaciones de la importancia relativa de los criterios (prioridades alternativas) se consideran aceptables. Por el contrario, las razones por las cuales la inconsistencia de la evaluación es aceptablemente alta deben investigarse.

A menudo ocurrirá que la relación de consistencia exceda de 0,1000. Eso solo debe tenerse en cuenta como un indicador del nivel de inconsistencia de su selección. A pesar de la inconsistencia, obtendrá una sugerencia de la mejor alternativa. Ese es el valor de este método. Siempre puede revisar las intensidades de importancia elegidas y verificar qué alternativa es la mejor y en qué medida en comparación con la siguiente.

VI. Metodología

A. Definición del Área de estudio

La cuenca cerrada del lago de Cuitzeo está situada en la parte sur de la Altiplanicie Mexicana. está rodeada al sur por elevaciones que forman parte del Eje Volcánico en su porción de las sierras Tarasca y Oztumatlán; al sureste por las de Mil Cumbres y Ucareo; y al norte limita con la región del Bajío regada por el río Lerma. Se localiza al sur del paralelo 20° Norte, en la zona intertropical.

El lago ocupa la porción más baja de la cuenca, se localiza entre los paralelos 19°53'15" y 20°04'30" de latitud norte y los meridianos 100°50'20" y 101°19'30" de longitud oeste, a una altitud aproximada de 1,830 msnm. Pertenecce al sistema hidrológico (RH-12) Lerma-Chapala, que es los más importantes del país (Pardo, 2016).

La cuenca se encuentra ubicada en los límites de los estados de Michoacán y Guanajuato. La extensión es de aproximadamente 4,000 km², de los cuales la mayor parte corresponde a Michoacán. La superficie promedio del lago, incluyendo zonas de inundación, es de aproximadamente 400 km²(Bravo y Barrera, 2012).

Para los fines de la comparación de modelos hidrológicos se seleccionó la subcuenca de Cabecera de Cointzio, ya que se considera que al ser la menos afectada por la actividad del hombre, se consideró su funcionamiento a régimen natural.

En la figura 3 se muestra la localización de la cuenca del lago de Cuitzeo junto con los municipios del estado de Michoacán y Guanajuato que se encuentran dentro de la misma.

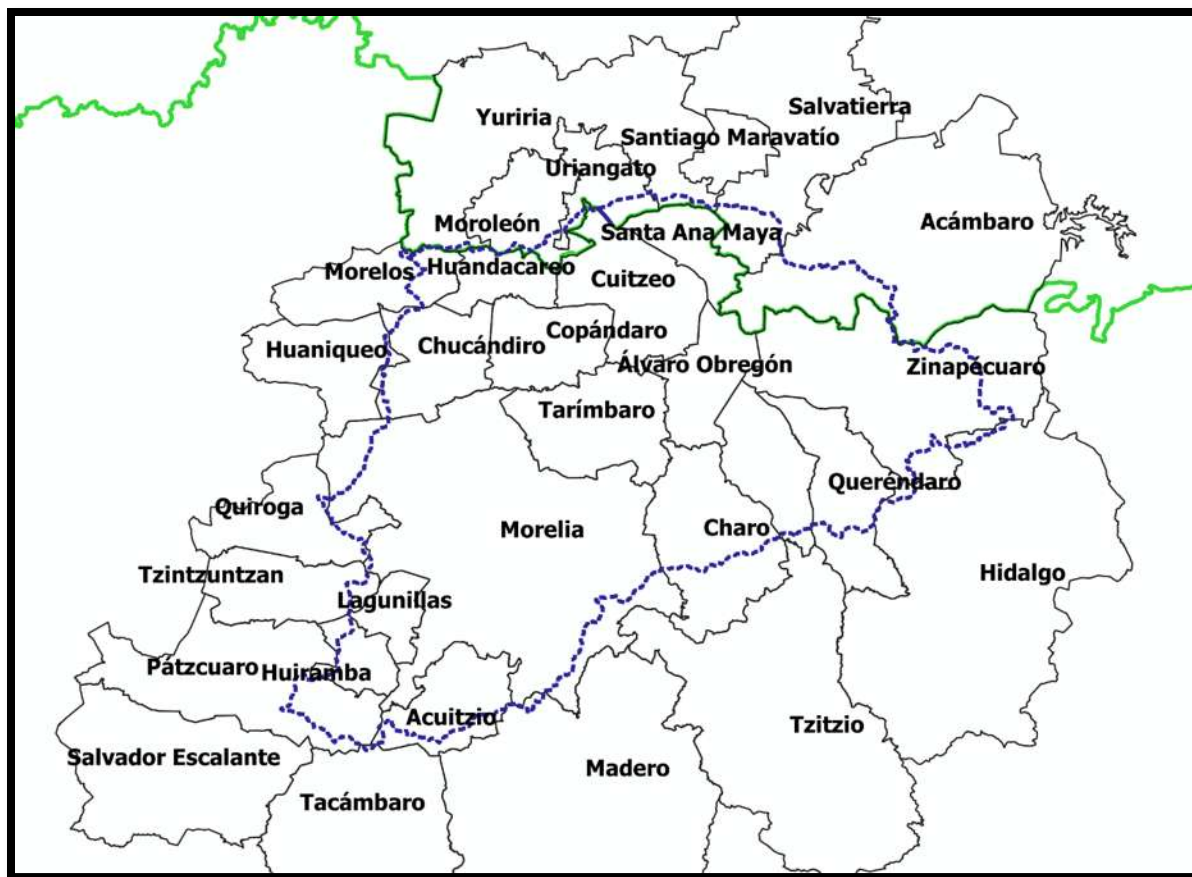


Figura 3. Localización Geográfica

B. Esquema metodológico

La metodología propuesta para el presente proyecto de investigación es la siguiente;

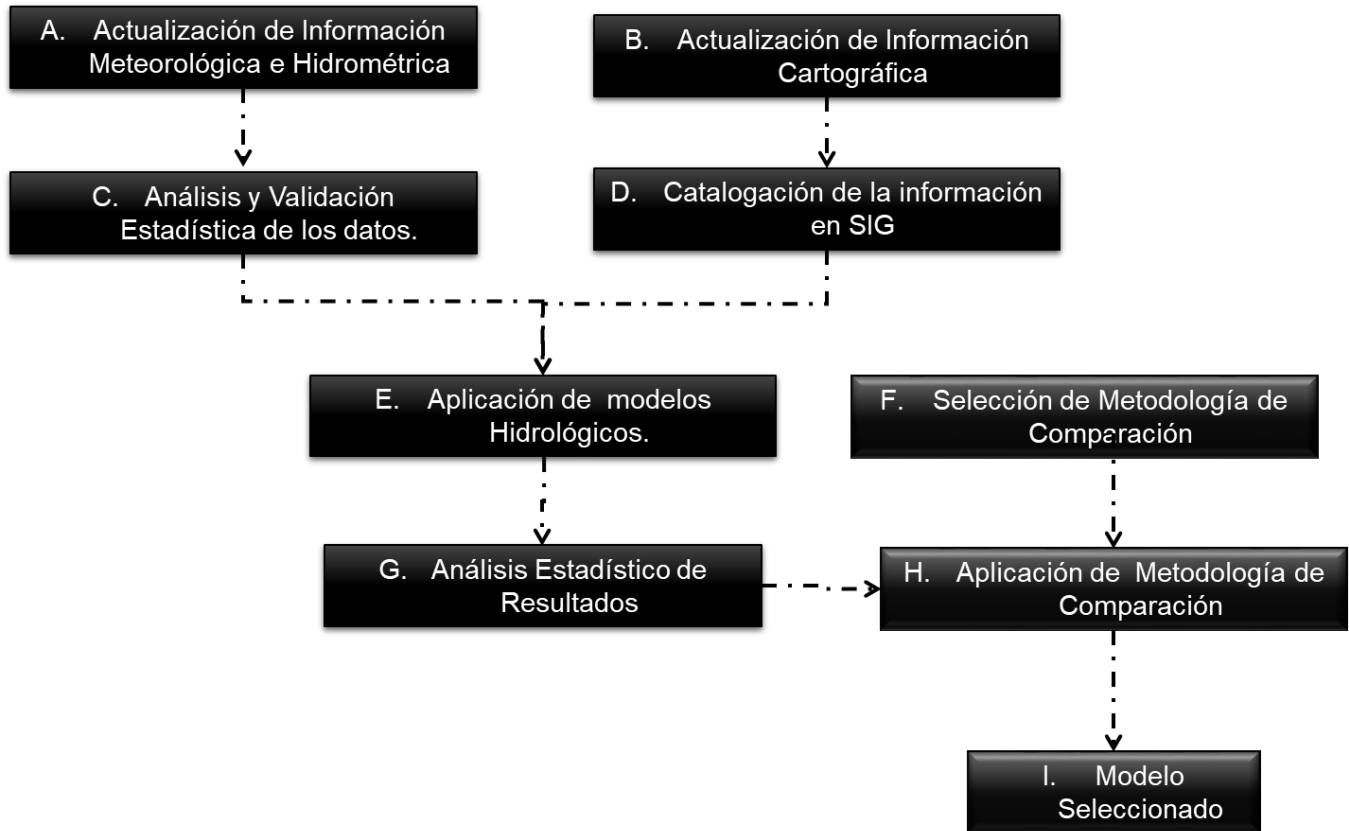


Figura 4. Esquema Metodológico

1. Información Meteorológica e Hidrométrica actualizada

Para conocer la disponibilidad hídrica media anual es necesario contar con una cantidad suficiente de información hidrometeorológica actualizada, así como evaluar la calidad y confiabilidad de la información, por medio de una o varias pruebas de consistencia e independencia de los datos. Los datos requeridos son:

a) *Datos de Precipitación y temperatura*

Estos datos se obtuvieron a través del portal del Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (INAI), mediante una solicitud elaborada en la Plataforma Nacional de Transparencia Gobierno Federal con folio 1610100233816 dirigida a la Comisión Nacional del Agua (INAI, 2016).

b) *Evapotranspiración*

Las series de evapotranspiración se calcularán a partir de los datos de precipitación y temperatura obtenidos anteriormente, utilizando el método de Thornthwaite ya que únicamente se requiere la información de la temperatura media mensual y la latitud geográfica (Aparicio M., 1989).

La fórmula de Thornthwaite es la siguiente:

$$\text{ECUACIÓN 1. } ETP = 1.6 K_a * (10T_j/I)^a$$

Donde:

ETP: evapotranspiración en mm.

T: temperatura media mensual (no normal) en °C

a: exponente empírico

$$ECUACIÓN 2. \quad a = 675 \times 10^{-8} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 179 \times 10^{-4} I + 0.49239$$

Donde:

I: índice calórico, constante para la región dada y es la suma de 12 índices mensuales i .

$$ECUACIÓN 3. \quad I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

Donde:

i es función de la temperatura media normal mensual

$$ECUACIÓN 4. \quad i_j = (t/5)^{1.514}$$

c) **Datos Hidrométricos**

Los datos hidrométricos se obtuvieron del portal del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Se seleccionaron las estaciones ubicadas en el interior del parteaguas de la cuenca del lago de Cuitzeo para obtener las series de caudales observados y calibrar los modelos de simulación hidrológica.

Las estaciones principales son aquellas que estén registrando información de una corriente natural sobre el cauce principal de la cuenca. Por otro lado, las estaciones que registren información de canales u otras obras de regulación serán utilizadas para la restitución a régimen natural de las estaciones principales.

La información que se puede encontrar de cada estación hidrométrica es: valores diarios, mensuales, anuales, hidrograma, limnigrama y sedimentos.

2. Actualización de la Información de la Cuenca del Lago de Cuitzeo

Los modelos digitales de elevación (MDE), cartas digitales edafológicas, y cartas de uso de suelo se obtuvieron a través del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Actualmente, los MDE están disponibles para cualquier cuenca en México a través del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0), con una resolución máxima de 15 m y escala 1:50,000 (INEGI, 2017). En el caso de las cartas edafológicas y de uso de suelo únicamente se encuentran disponibles en formato SHP en escala 1:250,000 por lo que se procederá a utilizar la información más reciente que proporciona INEGI.

3. Análisis y validación estadística de los datos

Cuando los registros de lluvia, temperaturas o escurrimientos mensuales o anuales son utilizados para la simulación y obtención de parámetros del ciclo hidrológico, tales series deben ser analizadas y validadas estadísticamente a través de la etapa conocida como consistencia de datos y así garantizar que dichas estimaciones son confiables. En resumen se requiere que las series sean homogéneas o consistentes, independientes y que se hayan generado por un proceso estocástico, cuya componente aleatoria siga una determinada función de distribución de probabilidades (Adeloye & Montaseri, 2002).

Las pruebas que se aplicaron a las series históricas fueron las siguientes:

a) *Límites de Anderson*

La prueba de independencia de Anderson (Salas y otros, 1988), consiste en la elaboración de un autocorrelograma para diferentes desfases temporales. Primeramente, se determinan los coeficientes de autocorrelación (r_k):

$$ECUACIÓN 5. \quad r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (X_i^j - \bar{X}^j) (X_{i+k}^j - \bar{X}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (X_i^j - \bar{X}^j)^2}$$

Donde:

j	muestra de datos
k	desfase (años)
n	número de datos de la muestra
X	Precipitación media anual

Una vez obtenidos los valores de autocorrelación para desfases desde 1 hasta $n/3$, se obtienen los límites de Anderson para un límite de confianza del 95% con la expresión:

$$\text{ECUACIÓN 6.} \quad r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n_j - k - 1}}{n_j - k}$$

b) **Prueba de Secuencias**

El procedimiento consiste en definir la mediana de la serie que se analiza, para lo cual los datos se ordenan según su magnitud, si el número de valores (n) es impar, la mediana es el valor central; si n es par corresponde a la media aritmética de las dos magnitudes centrales. Con base en la mediana se marca en la serie original con (+) si el dato es mayor y con (-) si es menor; las secuencias o sucesión (u) de los valores de (+) o (-) son contabilizadas y se concluye que la serie es homogénea si u está en el intervalo que se muestra en la tabla 2 de acuerdo al tamaño de la muestra (n). Si se obtiene un alto valor de u , la no homogeneidad se puede deber a un exceso de oscilación de la serie, en cambio si u es reducido puede haber tendencia o cambio en la media.

Tabla 1. Rango del número de secuencias (u) para un registro homogéneo. Fuente: Campos Aranda, Procesos del Ciclo Hidrológico (1998)

n	U	N	u	n	u	n	u
12	5 a 8	22	9 a 14	32	13 a 20	50	22 a 30
14	5 a 10	24	9 a 16	34	14 a 21	60	26 a 36
16	6 a 11	26	10 a 17	36	15 a 22	70	31 a 41
18	7 a 12	28	11 a 18	38	16 a 23	80	35 a 47
20	8 a 13	30	12 a 19	40	16 a 25	100	45 a 57

c) **Prueba de Helmer**

La prueba de Helmer (Escalante, Reyes, 2002) es bastante simple, consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada dato de la serie original con respecto a su media. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, una secuencia (S) se ha formado. Por el contrario, si una desviación es seguida por otra de

signo contrario, un cambio (C) será registrado. La serie es homogénea cuando la diferencia entre el número de secuencias y el de cambios es cero, o bien será dentro de unos límites debidos a un error probable, los cuales dependen de la longitud del registro, es decir;

$$ECUACIÓN 7. \quad (S - C) = 0 \pm \sqrt{n - 1}$$

d) **Llenado de datos**

Para el llenado de datos se utilizó la metodología propuesta por el US National Wheeler Service (Campos Aranda, 1984)

$$ECUACIÓN 8. \quad P_x = \frac{\sum(P_i W_i)}{\sum(W_i)}$$

Donde

P_x Dato perdido para el día, mes o año en la estación x

P_i Dato existente en la estación auxiliar i, donde: $i = 1, 2, \dots, n$ (mínimo $n=2$) para el mismo día, mes o año.

$$ECUACIÓN 9. \quad W_i = \frac{1}{D_i^2}$$

Siendo D_i la distancia entre cada estación circundante auxiliar y la estación del dato perdido.

4. Catalogación de la información cartográfica

Para efectuar una modelación hidrológica distribuida es necesaria contar con información discretizada en pixeles ya que los cálculos se hacen pixel a pixel. En esta etapa se elaborarán las bases de datos espacio-temporales de las series de precipitación y temperatura, además de convertir a formato RASTER la información de edafología, uso de suelo (1:250000) y topografía (1:50000).

La proyección de la información se realizó en el *World Geodetic System 1984* (WGS 84) con el sistema de coordenadas *Universal Transverse Mercator* (UTM) correspondiente a la zona 14 Norte. Las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros únicamente al nivel del mar, que es la base de la proyección del elipsoide de referencia.

La información recopilada que fue necesaria para la elaboración de este proyecto fue la siguiente:

- División Política Estatal y Municipal
- Hidrología
- Topografía
- Uso del suelo
- Tipo de suelo
- Delimitación de cuencas hidrográficas
- Delimitación de cuencas hidrológicas administrativas
- Pendientes del terreno
- Climatología

5. Selección y Aplicación de modelos hidrológicos

Los modelos: (i) Témez, (ii) Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), (iii) Sacramento, (iv) Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), (v) Ecuación del equilibrio del agua de la Herramienta para la evaluación del Suelo y el agua de una cuenca hidrográfica, (vi) Método del Coeficiente Simple y (vii) Método de Humedad del Suelo fueron seleccionados por tratarse de modelos distribuidos o semi-distribuidos, de base física, de simulación continua y tienen la particularidad de poder ser acoplados en un modelo integral de gestión de recursos hídricos.

a) **Modelo de Témez**

Es un modelo agregado de simulación de cuencas del tipo lluvia-escorrentamiento. Este modelo no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos y que se sustituyen por valores medios. Debido a esta simplificación, el modelo de Témez se utiliza solo para cuencas pequeñas e intermedias cuando éstas tienen cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica, para cuencas de gran tamaño es necesario realizar divisiones en cuencas más pequeñas, funcionando, así como un modelo semi-agregado (Témez, 1977).

Es un modelo de pocos parámetros y el balance de humedad está constituido por el flujo de entrada (precipitación), el cual se reparte en flujos salientes, intermedios y de almacenamiento intermedio.

Los componentes de este modelo son los siguientes:

- Flujos de entrada: la precipitación
- Flujos de salida: la evapotranspiración real, la aportación superficial y la aportación de origen subterráneo
- Flujos intermedios: únicamente la infiltración, agua que pasa de la parte superior del suelo a la zona inferior o acuífero, donde se considera que el tiempo de paso

de este flujo por el suelo es inferior al tiempo de simulación (el mes), por lo que la infiltración se identifica con la recarga al acuífero durante el mes “t”.

- Almacenamientos intermedios: la humedad del suelo, y el volumen almacenado en el acuífero.

La siguiente figura representa el ciclo hidrológico simulado:

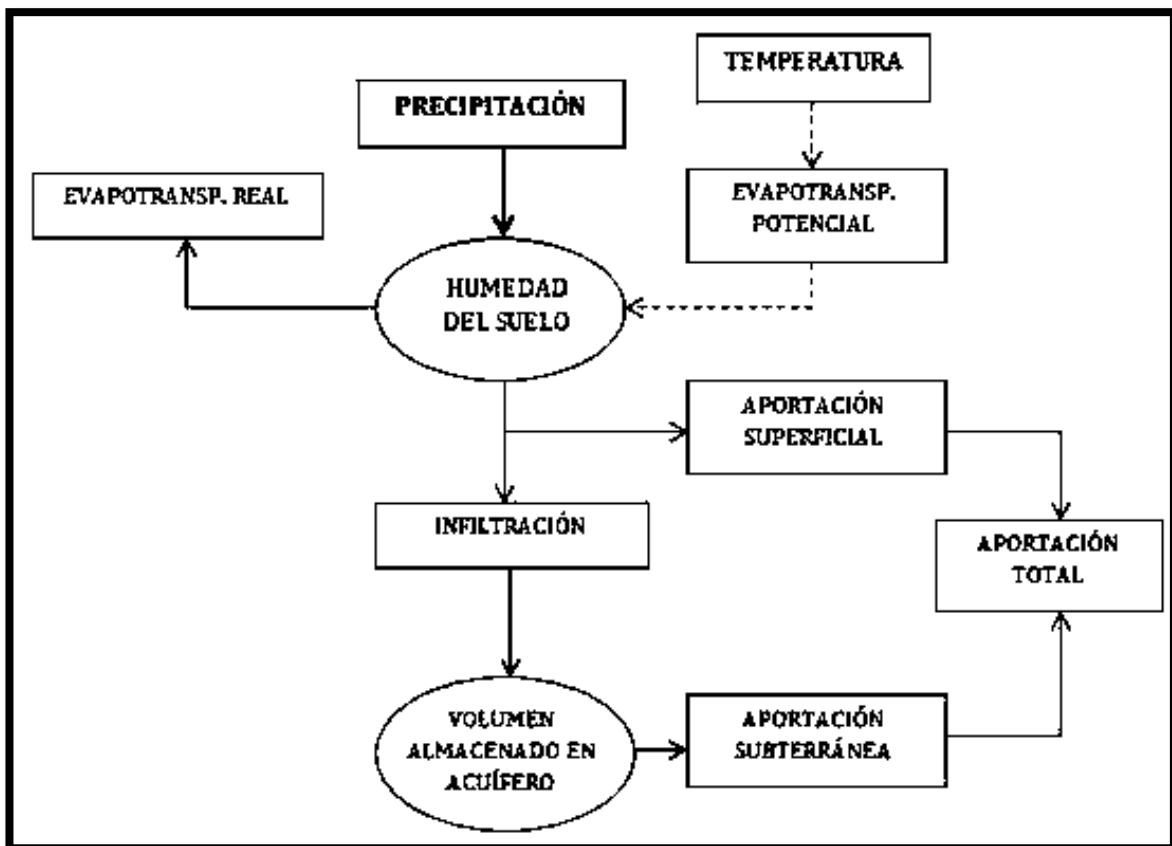


Figura 5. Modelo conceptual propuesto por Témez

En el modelo de Témez, el agua que procede de la precipitación (P) se distribuye de tres formas diferentes: El excedente (T), que a su vez se descompone en un flujo de infiltración al acuífero desde la zona superior del suelo (I_t), y en un flujo que discurre superficialmente (A_{sup}). Este flujo superficial se evacua a través del cauce dentro del período presente de simulación. Parte del agua almacenada en la zona inferior o

acuífero desagua en el intervalo de tiempo presente (A_{subt}) y la otra parte permanece dicho almacenamiento subterráneo para salir en meses posteriores. La evapotranspiración real (E_t) de una parte o de toda la humedad almacenada en la zona superior del suelo (H_t). La humedad del suelo (H_t) que se almacena en la zona superior del suelo, cuyo límite es la capacidad máxima de almacenamiento hídrico del suelo (H_{maxt}).

La formulación del modelo de Témez se representa en el siguiente esquema recuperado de (Solera, Paredes, & Andreu, 2012)

Las fórmulas empleadas para el cálculo del escurrimiento superficial son:

$$\text{ECUACIÓN 10.} \quad E_t = S(T_t - I_t)$$

Donde:

T_t =Excedente de lluvia

I_t =Infiltración subterránea

S = Superficie de la Cuenca

$$\text{ECUACIÓN 11.} \quad I_t = I_{\text{max}} \frac{T_t}{I_{\text{max}} + T_t}$$

Donde:

I_{max} =Máxima capacidad de infiltración del suelo

Si

$$\text{ECUACIÓN 12.} \quad P_t \leq P_o \rightarrow T_t = 0$$

Ó

$$ECUACIÓN 13. \quad P_t > P_o \rightarrow T_t = \frac{(P_t - P_o)^2}{P_t + DL - 2P_o}$$

Donde:

P_t = Precipitación durante el periodo

P_o = Umbral de inicio de la escorrentía

DL = Hueco disponible en cada mes para almacenamiento de agua en el suelo

$$ECUACIÓN 14. \quad P_o = c. (H_{max} - H_{t-1})$$

$$ECUACIÓN 15. \quad DL = H_{max} + H_{t-1} - ETP_t$$

Donde:

c = coeficiente adimensional de inicio de la escorrentía

H_{max} = Máxima capacidad de humedad en el suelo

ETP_t = Evapotranspiración potencial en el periodo t

H_{t-1} = Humedad contenida en el suelo al final del periodo anterior

b) **Modelo hydrologiska bryans Vattenbalansavdelning (HBV)**

El modelo hidrológico HBV es un modelo conceptual y agregado de precipitación escorrentía ampliamente empleado en previsiones hidrológicas y en estudios de balance hídrico, que ha sido aplicado en más de 30 países. Pertenece a la clase de modelos que tratan de abarcar los procesos más importantes de generación de escorrentía empleando una estructura simple y robusta, y un pequeño número de parámetros.

Fue originariamente desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para predecir la escorrentía a centrales hidroeléctricas en 1970 (Bergström, 1976;

Bergström, 1995), pero el alcance de sus aplicaciones se ha ido incrementando continuamente. El modelo ha estado sujeto a modificaciones a lo largo del tiempo y, aunque su filosofía básica no ha cambiado, existen nuevos códigos que se encuentran en constante desarrollo por diferentes grupos y que varían en su complejidad.

El modelo consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de escorrentía. El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual y los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual.

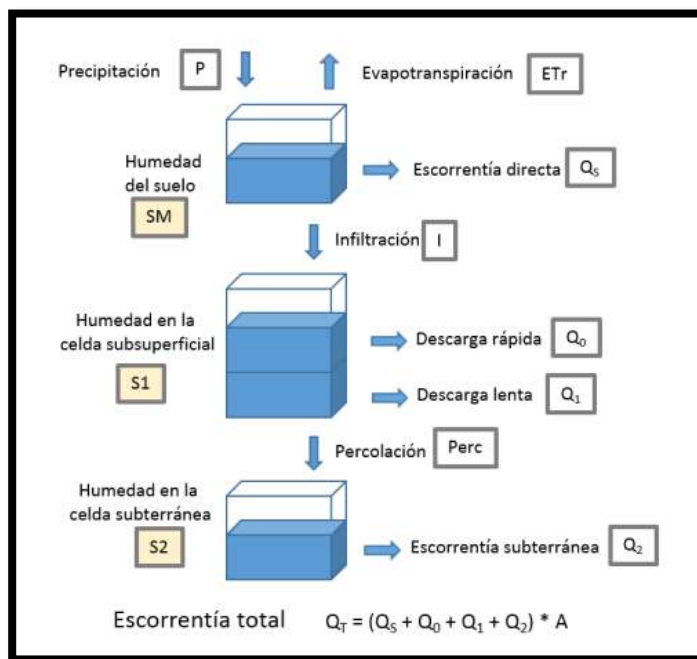


Figura 6. Esquema General del Modelo HBV

La precipitación caída sobre una cuenca se divide en dos componentes: La primera componente constituye el almacenamiento como humedad en el suelo del agua capilar disponible para evapotranspiración (SM); la segunda contribuye a la escorrentía

subterránea. Esta segunda componente (infiltración) es estimada basándose en el contenido de humedad del suelo en el momento en que se produce la precipitación.

Para este proceso se define dos parámetros: la capacidad de campo (FC) es el parámetro que limita el contenido máximo de humedad en el suelo en la zona superficial; el segundo parámetro (β) es un parámetro adimensional que modifica el porcentaje de filtración para el mismo grado de humedad relativa en el suelo.

La siguiente ecuación calcula la precipitación efectiva en función del contenido existente de humedad del suelo.

$$\text{ECUACIÓN 16.} \quad Inf_t = \left(\frac{SM_{t-1}}{FC}\right)^\beta P_t$$

Dado un déficit de humedad del suelo (medido por la ratio SM/FC), el parámetro β controla la cantidad de agua que contribuye a la esorrentía. Siendo el coeficiente de filtración el cociente entre la filtración calculada y la precipitación (Inf/P). Para una determinada humedad del suelo, cuanto mayor es β , menor es el coeficiente de filtración.

En el módulo de evapotranspiración se calcula esta en base a la humedad en el suelo y la evapotranspiración potencial. La evapotranspiración real será igual a la potencial o un valor reducido calculado mediante el parámetro de punto de marchitez del suelo (PWP).

$$\text{ECUACIÓN 17.} \quad ETr_t = ETP_t \left(\frac{SM_t}{PWP}\right) \quad \text{si } SM_t < PWP$$

$$\text{ECUACIÓN 18.} \quad ETr_t = ETP_t \quad \text{si } SM_t > PWP$$

El punto de marchitez es un límite de humedad del suelo por debajo del cual la evapotranspiración real es menor que la potencial con una reducción en el desarrollo de las plantas. PWP ha de tener un valor inferior a FC para que tenga un sentido físico. La humedad en el suelo resultante (SM) después de incorporar la precipitación y descontar la filtración y la evapotranspiración.

$$\text{ECUACIÓN 19.} \quad SM_t = SM_{t-1} + P_t - ETr_t - Inf_t$$

Si la precipitación P_t fuera muy elevada, este balance podría dar como resultado un valor de SM superior a FC. En este caso el exceso se asigna como escorrentía directa.

$$\text{ECUACIÓN 20.} \quad Si \quad SM_t > FC \quad \left| \begin{array}{l} Qs_t = SM_t - FC \\ SM_t = FC \end{array} \right.$$

Donde:

Qs representa la escorrentía directa.

c) **Modelo de Sacramento**

El modelo hidrológico Sacramento, denominado en muchos casos SAC-SMA model, fue desarrollado por Burnash y Ferral en la década de los 70. Según se indica en el documento de explicación del modelo, el modelo Sacramento es un intento de parametrizar las características de humedad en el suelo tal que: se distribuya la humedad en varios niveles de forma lógica, tenga unas características de percolación racionales y permita una efectiva simulación del caudal del río.

Este modelo permite la estimación de la escorrentía de una cuenca a partir de la precipitación, la evapotranspiración potencial, la superficie de la cuenca y un conjunto de parámetros. Además, como sistema conceptual que es, intenta representar en detalle el ciclo hidrológico mediante la división del terreno en diferentes compartimentos, o

estanques, que representan diferentes procesos del ciclo. Dentro de los modelos precipitación escurrientía el modelo Sacramento se puede clasificar como conceptual, continuo, determinístico, de entradas agrupadas, número alto de parámetros y sólo cuantitativo.

La modelación precipitación escurrientía no es sencilla y suele ser complicado la calibración de diversos parámetros sobre todo cuando los datos son escasos o poco fiables.

El modelo Sacramento está basado en procesos físicos siendo sus parámetros representativos de estos procesos. Una distorsión de los mismos en aras de una mejora del proceso de calibración puede hacer que se pierda el sentido físico del modelo y aunque el ajuste sea bueno debido a mecanismos de compensación, esto puede destruir cualquier tipo de confianza en la etapa de simulación del modelo.

El modelo divide el ciclo hidrológico en el terreno en dos grandes zonas: la superior y la inferior. La zona superior está dividida en dos áreas representando el agua disponible para la evapotranspiración y la que no. La zona inferior se divide en tres áreas, siendo la entrada a las mismas por percolación de la parte superior.

Una de ellas permite la evapotranspiración y las otras no. Estas últimas se han subdividido para poder modelar el flujo base de una forma más completa.

Las entradas, almacenamientos y salidas de las diferentes áreas (depósitos) se controlan por una serie de parámetros.

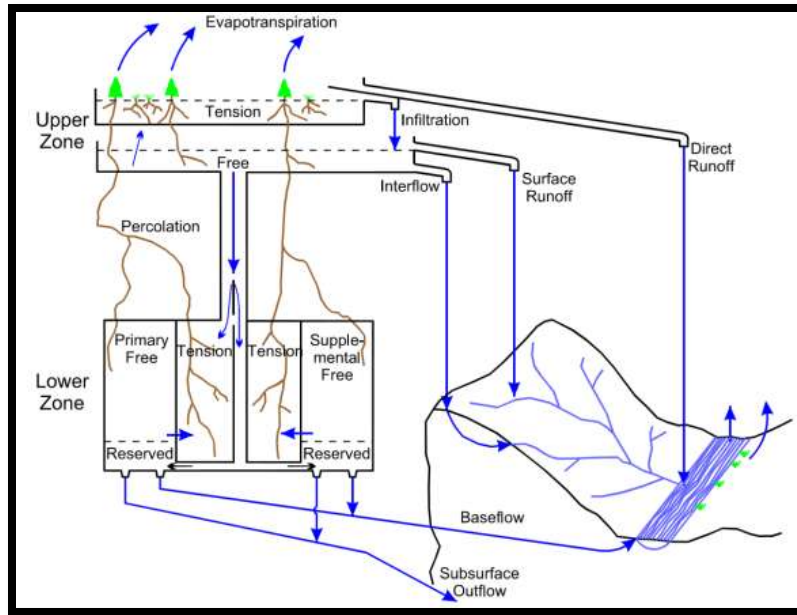


Figura 7. Esquema del modelo de Sacramento

Los datos que se ingresan son de evapotranspiración potencial. La evapotranspiración potencial corresponde a la evaporación desde superficies de agua y de suelo, más la transpiración de la vegetación, suponiendo una total disponibilidad de agua. Este valor se expresa como EDMD.

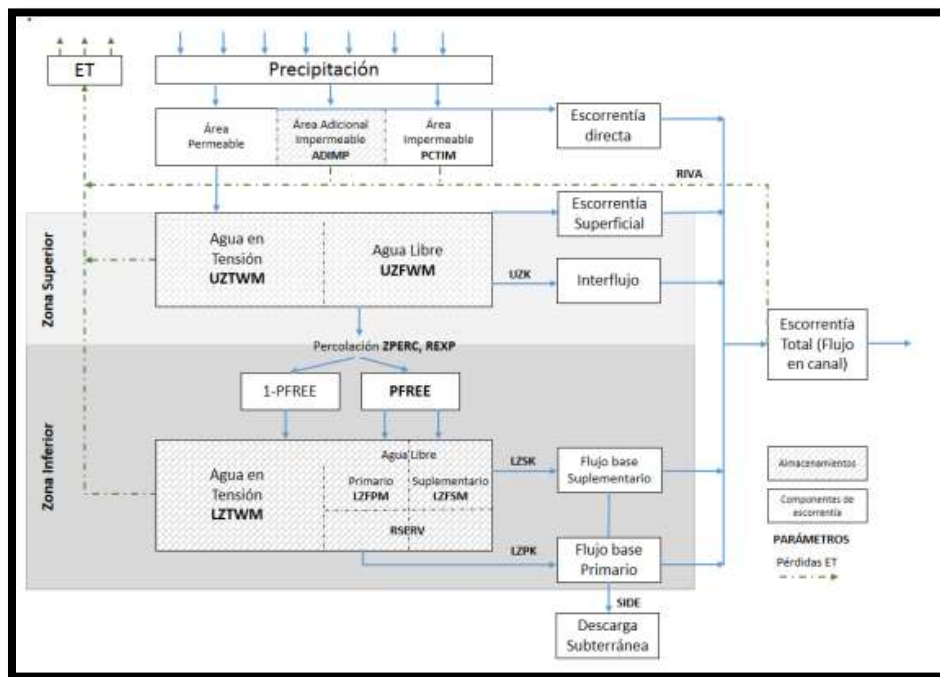


Figura 8. Esquema detallado de los procesos y parámetros de control del modelo de Sacramento

A continuación, se detalla la evaluación de la evapotranspiración real de cada uno de los estanques de agua en tensión, las transferencias desde los estanques de agua libre a agua en tensión en cada zona, la transpiración de la vegetación ribereña, y la evapotranspiración desde las áreas impermeables, estas son:

E1: Evapotranspiración real desde el agua en tensión de la zona alta.

Ésta, por definición, es igual a la evapotranspiración potencial cuando este estanque está lleno. Si no está lleno, evapotranspira proporcionalmente respecto a su contenido. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$\text{ECUACIÓN 21.} \quad E1 = EDMD \frac{UZTWC}{UZTWM} \leq UZTWC$$

Donde UZTWC y UZTWM corresponden al contenido y a la capacidad de agua en tensión de la zona alta respectivamente. También se calcula la demanda de evapotranspiración remanente RED, de la siguiente manera:

$$\text{ECUACIÓN 22.} \quad RED = EDMD - E1$$

Y el contenido restante de agua en el estanque.

$$\text{ECUACIÓN 23.} \quad UZTWC = UZTWC - E1$$

E2: Evapotranspiración desde el estanque de agua libre de la zona alta.

Esta evapotranspiración E2 es igual al remanente RED dejado por el estanque en tensión si está disponible, o a su contenido en caso contrario:

$$\text{ECUACIÓN 24.} \quad E2 = \min\{RED, UZTWC\}$$

Donde UZFWC es el contenido de humedad en esta celda. Este contenido está limitado también por un máximo UZFWM.

Si RED es mayor que UZTWC quedará un remanente de evapotranspiración potencial que es factible de evapotranspirar desde la zona baja es:

$$\text{ECUACIÓN 25.} \quad \text{REDLZ} = \text{RED} - E2$$

Y se actualiza el contenido de agua en el tanque de agua libre:

$$\text{ECUACIÓN 26.} \quad \text{UZFWC} = \text{UZFWC} - E2$$

A continuación, si el contenido proporcional de agua libre es superior al contenido de agua en tensión hay un paso de agua libre a tensión. Su cálculo es el siguiente:

$$\text{ECUACIÓN 27.} \quad \text{Si} \left(\frac{\text{UZTWC}}{\text{UZTWM}} < \frac{\text{UZFWC}}{\text{UZFWM}} \right) \left\{ \begin{array}{l} (\text{UZTWC} + \text{UZFWC}) / (\text{UZTWM} + \text{UZFWM}) \\ \text{UZTWC} = \text{UZTWM} * \text{UZRAT} \\ \text{UZFWC} = \text{UZFWM} * \text{UZRAT} \end{array} \right.$$

E3: Evapotranspiración desde el estanque de agua en tensión de la zona baja.

La demanda de agua para evapotranspirar desde el estanque de agua en tensión de la zona baja, corresponde a la deficiencia de evapotranspiración potencial dejada por la zona alta REDLZ. La evapotranspiración desde este estanque es proporcional a la evapotranspiración remanente, y al contenido relativo de agua en tensión de la zona baja, con respecto a la capacidad de los dos estanques de agua en tensión. Por lo tanto, E3 se evalúa de la siguiente manera:

$$\text{ECUACIÓN 28.} \quad E3 = \text{REDLZ} \frac{\text{LZTWC}}{\text{UZTWM} + \text{LZTWM}} \leq \text{LZTWC}$$

Donde LZTWC es el contenido de agua en tensión en la zona baja y LZWWM el es máximo admitido para este valor.

A continuación, se actualiza el contenido de agua en el estanque:

$$\text{ECUACIÓN 29.} \quad LZWTC = LZWTC - E3$$

Como en el caso de la celda superior hay un aporte de agua desde las celdas saturadas del acuífero a la celda en tensión. Su cálculo es el siguiente:

$$\text{ECUACIÓN 30.} \quad RATLZT = \frac{LZWTC}{LZWWM}$$

$$\text{ECUACIÓN 31.} \quad RATLZ = \frac{LZWTC + LZFPC + LZFSC - SAVED}{LZWWM + LZFPM + LZFSM - SAVED}$$

$$\text{ECUACIÓN 32.} \quad Si \ (RATLZT < RATLZ) \left\{ \begin{array}{l} DEL = (RATLZ - RATLZT) * LZWWM \\ LZWTC = LZWTC + DEL \\ LZFSC = LZFSC - DEL \end{array} \right.$$

Donde:

RATLZ y RATLZT son el contenido relativo de agua en la zona en tensión y en la zona libre con respecto a su máximo.

Para el cálculo de RATLZT se descuenta una cantidad de agua no disponible para transferir que se denomina SAVED y se calcula como $[SAVED = RSERV * (LZFSM + LZFPM)]$ En este cálculo se emplea el parámetro RSERV que se entiende como el porcentaje de agua subterránea no disponible para evapotranspiración.

LZFPC, LZFSC representan los contenidos de humedad en las celdas libre profundas primaria y secundaria.

LZFPM y LZFSM son los parámetros que indican el máximo contenido de humedad permitido en las celdas libre profundas primaria y secundaria. Esta transferencia se descuenta del estanque secundario.

En caso de no haber suficiente agua en este, lo faltante lo cede el primario.

E4: Evapotranspiración desde la porción de la cuenca cubierta por vegetación ribereña.

La vegetación ribereña absorbe desde el lecho del río el déficit de evapotranspiración potencial dejado por las zonas alta y baja, es decir:

$$\text{ECUACIÓN 33.} \quad E4 = (EDMD - E1 - E2 - E3) * RIVA$$

Donde RIVA es un parámetro que representa el porcentaje de superficie ocupado por vegetación de ribera. Ésta consume desde el lecho del río, el déficit de evapotranspiración potencial que deja la zona alta.

Este cálculo se realiza con posterioridad a los cálculos de distribución de la precipitación entre las diferentes celdas.

E5: Evapotranspiración desde la fracción de la cuenca impermeable.

El suelo situado bajo las superficies impermeables también es susceptible de ceder agua para evapotranspiración. Esta se calcula de la siguiente forma:

$$\text{ECUACIÓN 34.} \quad E5 = E1 + (RED + E2) \frac{ADIMC - (UZTWC + E1)}{UZTWM + LZTWM}$$

Siendo (ADIMC -UZTWC) el contenido de agua en tensión en la zona baja de la fracción ADIMP. ADIMP y ADIMC se describe en el apartado de “zona impermeable” y define el contenido de agua bajo la zona impermeable:

$$\text{ECUACIÓN 35.} \quad ADIMC = UZTWC_{ADIMP} + LZTWC_{ADIMP}$$

Esta expresión E5 se evalúa después de haber modificado la variable de estado en los cálculos de E1, E2 y E3.

El valor de E5 calculado se descuenta a continuación de la variable de estado ADIMC. Si E5 es mayor que ADIMC, ADIMC se hace 0 y E5 se reduce al valor previo de ADIMC.

El volumen de agua evapotranspirada se expresa como columna de agua, suponiendo un área igual a la de la cuenca total. Debido a esto, es necesario reducir cada valor de evapotranspiración según la porción de la cuenca en que actúan. El valor final de E5 se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{ECUACIÓN 36.} \quad E5 = E5 * ADIMP$$

Siendo ADIMP el parámetro que define la proporción de cuenca impermeable.

Cálculo de la evapotranspiración total.

Después de finalizados los cálculos de distribución del agua de lluvia que se describen más adelante se procede a evaluar el total de agua evapotranspirada de la siguiente forma:

$$\text{ECUACIÓN 37.}$$

$$EUSED = (E1 + E2 + E3) * PAREA + E4 * RIVA + E5 * (PCTIM + ADIMP)$$

En que:

$$\text{ECUACIÓN 38.} \quad PAREA = 1 - (PCTIM + ADIMP): \text{Porción permeable de la cuenca}$$

Cálculo de la escorrentía y almacenamiento.

Una vez finalizados los cálculos de E1, E2, E3 y E5 se procede a realizar el cálculo de la distribución del agua de lluvia en el suelo y al cálculo de la escorrentía.

Escorrentía en el área impermeable.

En primer lugar, se calcula la generación de escorrentía en el área impermeable aplicando la proporción de agua impermeable a la precipitación:

$$\text{ECUACIÓN 39.} \quad ROIMP = PXV * PCTIM$$

Y el remanente de precipitación:

$$\text{ECUACIÓN 40.} \quad PXV = PXV - ROIMP$$

Celda de agua en tensión en la capa superior.

La precipitación pasa en primer lugar a saturar el espacio de agua en tensión en la capa superior:

$$\text{ECUACIÓN 41.} \quad UZTWC = \min \left\{ \begin{array}{l} PXV + UZTWC \\ UZTWM \end{array} \right.$$

Si hay un excedente, este se asigna a la variable TWX que se utilizará a continuación para distribuir entre el resto de celdas. El agua de lluvia acumulada en esta celda también se acumula a la variable ADIMC:

$$\text{ECUACIÓN 42.} \quad ADIMC = ADIMC + (PXV - TWX)$$

Celdas de agua libre de la zona baja.

Estos estanques drenan a diferentes tasas, y representan el flujo base. El flujo suplementario tiene una tasa de recesión mayor, con lo que su flujo cesa más rápidamente. Se definen los siguientes parámetros:

- LZFPM: Capacidad del estanque de agua libre primario de la zona baja.
- LZFSM: Capacidad del estanque de agua libre suplementario de la zona baja.
- LZPK: Porción de agua libre del estanque primario que drena como flujo base en un día. Corresponde a la tasa de recesión diaria del embalse primario.
- LZSK: Porción de agua libre del estanque suplementario que drena como flujo base en un día.

Las variables de estado que describen los estados de almacenamiento de estos estanques son:

- LZFPC: Contenido de agua libre primaria en un instante dado.
- LZFSC: Contenido de agua libre suplementaria en un instante dado.

Los flujos desde cada celda se calculan de la siguiente manera:

$$\text{ECUACIÓN 43.} \quad \text{Flujo Primario} = \text{LZPK} * \text{LZFPC}$$

$$\text{ECUACIÓN 44.} \quad \text{Flujo Suplementario} = \text{LZSK} * \text{LZFSC}$$

$$\text{ECUACIÓN 45.} \quad \text{Flujo Primario} + \text{Flujo Suplementario}$$

Percolación

Tras calcular el flujo base se obtiene el valor resultante de agua en las celdas profundas LZFPC y LZFSC. Con estos valores se calcula el déficit de humedad en la zona baja como:

$$ECUACIÓN 46. \quad DEFR = 1 - \frac{LZTWC + LZFPC + LZFSC}{LZTWM + LZFPM + LZFSM}$$

Y una demanda de percolación a la zona baja como:

$$ECUACIÓN 47. \quad PERC = PERCM \frac{UZFWC}{UZFWM} (1 + ZPERC * DEFR^{REXP})$$

Donde:

PERCM es la máxima demanda de percolación que se obtiene como:

$$ECUACIÓN 48. \quad PERCM = LZFPM * LZPK + LZFSM * LZSK$$

ZPERC corresponde al aumento relativo de percolación al cambiar las condiciones saturadas por secas que puede ser un parámetro o en algunas referencias viene calculado como:

$$ECUACIÓN 49. \quad ZPERC = (LZTWM + LZFSM + LZDPM - PERCM) / PERCM$$

REXP es un parámetro que define la forma de la curva de percolación entre los valores extremos fijos dados por DEFR=0 y DEFR=1.

d) **Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J)**

El modelo GR4J es un modelo hidrológico global con cuatro parámetros desarrollado por Perrin, 2003. Se trata de un modelo empírico pero su estructura es similar a los modelos conceptuales (Figura 9). Tiene en cuenta la humedad y está compuesto por dos depósitos (producción y de enrutamiento). Los hidrogramas unitarios también se asocian para tener en cuenta el comportamiento hidrológico de la cuenca.

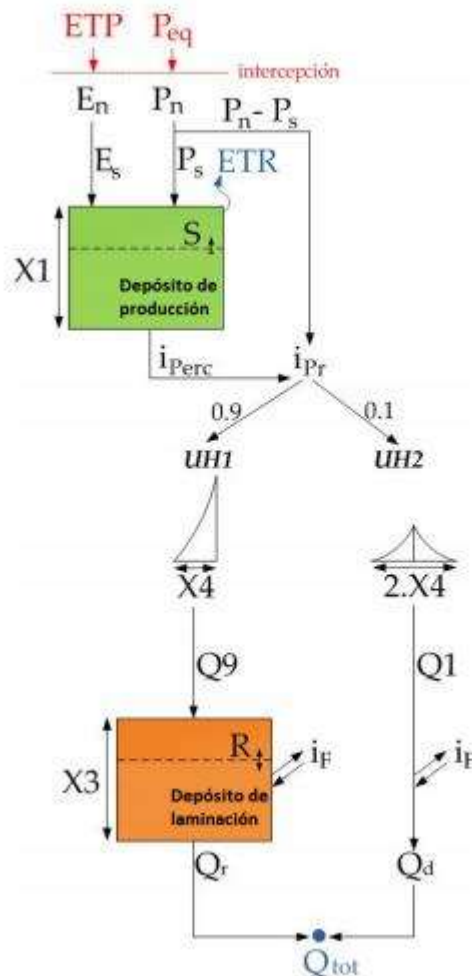


Figura 9. Modelo Conceptual GR4J

Tabla 2. Lista de parámetros y condiciones iniciales del modelo GR4J

Objeto	Nombre	Unidades	Descripción	Rango Normal
GR4J	A	m ²	Superficie de la cuenca	>0
	X1	mm	Capacidad del depósito de producción	100 a 1200
	X2	mm	Coeficiente de intercambio de agua	-5 a 3
	X3	mm	Capacidad del depósito de laminación	20 a 300
	X4	d	Tiempo base del Hidrograma Unitario	1.1 a 2.9
	S _{ini}	m	Contenido inicial de agua en el depósito de producción	-
	R _{ini}	m	Nivel de agua inicial en el depósito de laminación	-

El primer cálculo es la neutralización de P_{eq} por ETP para determinar una intensidad neta (P_n) y una evapotranspiración neta (E_n) según las ecuaciones 51 y 52.

Si $P \geq ETP$

$$ECUACIÓN 50. \quad P_n = P_{eq} - ETP$$

$$E_n = 0$$

$$P_n = 0$$

Si $P < ETP$

$$ECUACIÓN 51. \quad E_n = ETP - P_{eq}$$

Con P_n : intensidad neta de lluvia [L / T]; P_{eq} : precipitación equivalente [L / T]; ETP evapotranspiración potencial [L / T] y E_n : evapotranspiración neta [L / T].

Cuando P_n no es cero, una parte (P_s) de P_n alimenta al depósito de producción (S) tal como se presenta en la ecuación 52. Del mismo modo, cuando S_p no es cero, una evapotranspiración (E_s) desde el depósito de producción se calcula en función del nivel de agua en el depósito de producción tal como se describe en la ecuación 53.

$$ECUACIÓN 52. \quad P_s = \frac{d}{dt} \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n \cdot dt}{X_1} \right)}{1 + \left(\frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{P_n \cdot dt}{X_1} \right)}$$

$$ECUACIÓN 53. \quad E_s = \frac{d}{dt} \frac{S \left(2 - \frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n \cdot dt}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n \cdot dt}{X_1} \right)}$$

Con P_s : intensidad de la lluvia alimentando el embalse de producción [L / T]; X_1 : capacidad máxima del depósito de producción S [L], S : contenido de agua en el depósito de producción [L], E_s : evapotranspiración del depósito de producción [L / T].

La percolación ($iPerc$) que fluye desde el depósito de producción se calcula entonces de la siguiente manera:

$$ECUACIÓN 54. \quad iPerc = \frac{d}{dt} (S + (P_s - E_s)dt) \cdot \left(1 - \left(1 + \left(\frac{4}{9} \cdot \frac{(S + (P_s - E_s) \cdot dt)}{X_1} \right)^4 \right)^{\frac{1}{4}} \right)$$

Con $iPerc$: intensidad de percolación [L/T].

Finalmente, se obtiene la variación en el depósito de producción S de acuerdo con la ecuación 55:

$$ECUACIÓN 55. \quad dS/dt = P_s - E_s - iPerc$$

Con iPr : intensidad que fluye al depósito de laminación [L/T].

Después, para el cálculo de hidrogramas unitarios, el iPr se divide en dos componentes de flujo: el 90% se laminan con un hidrograma unitario (HU1) y un depósito

de laminación, y el 10% en un hidrograma unitario simétrico (HU2). HU1 y HU2 dependen del parámetro X_4 , que es el tiempo base. Las ordenadas de los hidrogramas se calculan a partir de curvas SH1 y SH2, que corresponden al hidrograma acumulado. SH1 y SH2 se definen en función de la etapa de tiempo t tal como se presenta en la ecuación 56 y 57. Las ordenadas de HU1 y HU2 se calculan a continuación:

$$\begin{aligned} & \text{Si } t \leq 0 \quad SH1_t = 0 \\ \text{ECUACIÓN 56.} \quad & \text{Si } 0 < t < X_4 \quad SH1_t = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \\ & \text{Si } t > X_4 \quad SH1_t = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Si } t \leq 0 \quad SH2_t = 0 \\ \text{ECUACIÓN 57.} \quad & \text{Si } 0 < t < X_4 \quad SH2_t = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \\ & \text{Si } X_4 < t < 2 * X_4 \quad SH2_t = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \\ & \text{Si } t > 2 * X_4 \quad SH2_t = 1 \end{aligned}$$

$$\text{ECUACIÓN 58.} \quad HU1_j = SH1_j - SH1_{j-1}$$

$$\text{ECUACIÓN 58.} \quad HU2_j = SH2_j - SH2_{j-1}$$

Con SH1: hidrograma 1 de S [-], SH2: hidrograma 2 de S [-], t : paso de tiempo [T]; X_4 : tiempo base [T]; HU1: hidrograma de SH1 [-]; HU2: hidrograma de SH2 [-].

Luego, en cada paso de tiempo k , las salidas Q_1 y Q_9 de los dos hidrogramas corresponden a la convolución de las intensidades anteriores de acuerdo con el reparto previsto por el hidrograma discretizado y se calcula como se presenta en las ecuaciones 59 y 60.

$$\text{ECUACIÓN 59.} \quad Q_9 = 0.9 * \sum (HU1_j * iPr_{k-j-t})$$

$$ECUACIÓN 60. \quad Q1 = 0.1 * \sum (HU2_j * iPr_{k-j-t})$$

Con Q9: Caudal Unitario del hidrograma HU1; [L / T]; Q1: caudal unitario del hidrograma HU2 [L / T], M j: día (entero) [T]; l = valor entero de X4 + 1 [T], m = valor entero de 2 * X4 + 1 [T].

A continuación, una función de intercambio (iF) produce una salida de agua subterránea de acuerdo a la ecuación 61 (la interpretación física de esta función no es directa). Entonces, el depósito de laminación (R) se vacía por una descarga de laminación (Qr') como se describe en la ecuación 62.

$$ECUACIÓN 61. \quad iF = \frac{d}{dt} X_2 * \left(\frac{R}{X_3} \right)^{\frac{7}{2}}$$

$$ECUACIÓN 62. \quad Qr' = \frac{d}{dt} (R + (Q9 + iF) * dt) * \left(1 - \left(1 + \left(\frac{R + (Q9 + iF) * dt}{X_3} \right)^4 \right)^{\frac{1}{4}} \right)$$

Con iF: función de intercambio [L / T]; X2: coeficiente de intercambio de agua, para las contribuciones positivas, negativas para las pérdidas por infiltración o cero cuando no se produce ningún intercambio [L]; R: El nivel del agua en el embalse de laminación [L]; X3: un día de capacidad del depósito de laminación [L]; Qr': salida unitaria del depósito de laminación [L / T].

La variación del nivel de agua en el depósito de laminación es:

$$ECUACIÓN 63. \quad \begin{aligned} dR/dt &= Q9 - iF - Qr \\ R &\geq 0 \end{aligned}$$

La salida Q1 del hidrograma HU2 tiene también el mismo intercambio al proporcionar el flujo complementario Qd':

$$\text{ECUACIÓN 64.} \quad Qd' = Q1 + iF$$

Con Qd': flujo unitario complementario [L/T]. Por último, se calculan los modelos de flujos de salida tal como se presenta en las ecuaciones 65 y 66 y el caudal total a la salida, Qtot, tal como se presenta en la ecuación 67:

$$\text{ECUACIÓN 65.} \quad Qr = Qr' * A$$

$$\text{ECUACIÓN 66.} \quad Qd = Qd' * A$$

$$\text{ECUACIÓN 67.} \quad Qtot = Qr + Qd$$

Con Qr: flujo de salida desde el depósito de laminación; A: superficie de la cuenca [L²]; Qd: salidas complementarias [L³ /T]; Qtot : salida total [L³ /T].

Las variables asociadas a este modelo son S_{ini} y R_{ini}. Los parámetros a ajustar son X1, X2, X3 y X4. El parámetro A se supone que es constante después de su cálculo. Las entradas del modelo son la precipitación equivalente (Peq) y la evapotranspiración potencial (ETP). La salida es la descarga total en la salida del modelo (Qtot).

e) ***El Soil and Water Assessment Tool (SWAT)***

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un programa de modelación hidrológica diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas (Arnold y col, 1990). Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que

en la calidad del agua tienen las prácticas agrícolas por el uso de pesticidas y fertilizantes.

El SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para la simulación, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. Adicionalmente el SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo (textura), con el uso y cobertura del suelo. La simulación de la hidrología de la cuenca puede separarse en dos grandes divisiones: la primera división es la fase terrestre del ciclo hidrológico que controla la cantidad de agua, sedimento y pesticidas transportados al canal principal por cada subcuenca y la segunda es la del agua o la fase de tránsito la cual puede definirse como el movimiento del agua, sedimentos, etc., a través de la red del canal hasta el sitio de descarga de la cuenca.

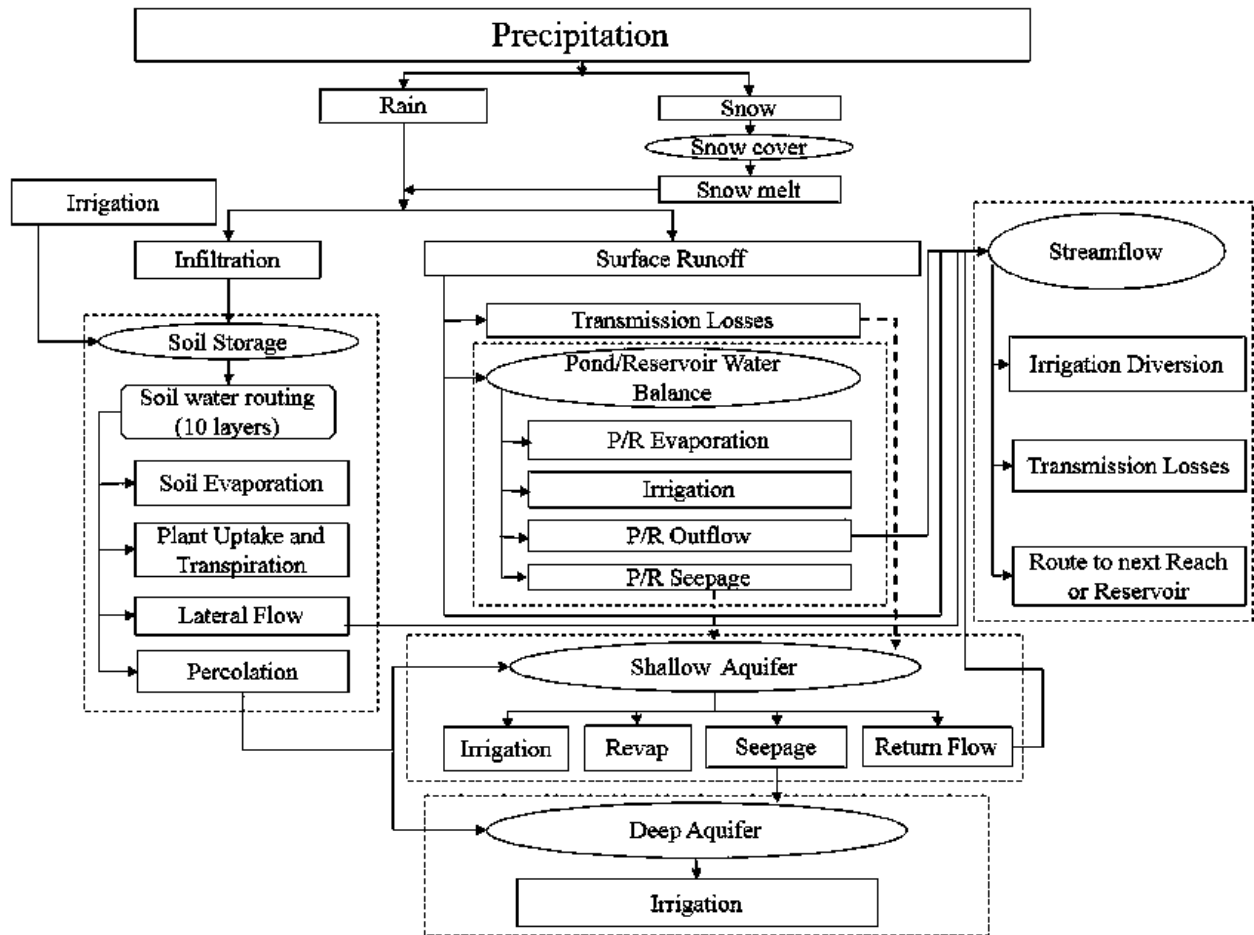


Figura 10. Modelo Conceptual de SWAT

El ciclo hidrológico simulado por SWAT está basado en la ecuación del balance hídrico:

$$\text{ECUACIÓN 68. } SW_t = SW + \sum (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde,

SW_t es la cantidad final de contenido de agua en el suelo (mm),

SW es la cantidad inicial de contenido de agua en el suelo (mm),

t es el tiempo en días, R_i es la cantidad de lluvia caída en el período de análisis (mm),

Q_i es la cantidad de escorrentía (mm),

ET_i evapotranspiración (mm),
 P_i percolación (mm),
 QR_i flujo de retorno (mm).

f) ***Water Evaluation and Planning (WEAP)***

WEAP es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas. Incluye demandas de agua con prioridades asociadas y usa escenarios para evaluar diferentes esquemas de distribución del recurso. Además contiene un módulo para el análisis hidrológico, así como varios módulos que permiten integrar WEAP con el modelo de agua subterránea MODFLOW y con el modelo de calidad del agua QUAL2K (Stockholm Environment, 2009).

El desarrollo de un modelo WEAP incluye generalmente las siguientes etapas:

- **Definición del estudio:** En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
- **Búsqueda de información:** En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.
- **Desarrollo del modelo:** En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.
- **Calibración:** Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.

- **Uso del modelo, generación de escenarios:** Una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las 8 políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación.

(1) Método del coeficiente simplificado

El método del coeficiente simplificado determina la evapotranspiración para cultivos irrigados y de temporal usando coeficientes de cultivo. El resto de las lluvias no consumidas por la evapotranspiración se simula como la escorrentía a un río, o puede ser distribuido entre la escorrentía a un río y fluir al agua subterránea a través de enlaces de escorrentía-infiltración.

Los requerimientos de cultivos se calculan suponiendo un sitio de demanda con procesos simplificados hidrológicos y agro hidrológicos tales como precipitación, evapotranspiración y crecimiento de cultivos que enfatizan la agricultura irrigada y de temporal. También se pueden incluir los usos de suelo no agrícolas. Las siguientes ecuaciones se usaron para implementar este enfoque, donde los subíndices LC son cobertura suelo, HU es hidro-unidad, TS es paso de tiempo (por ejemplo, mes), I es irrigada y NI no tiene riego:

$$\text{ECUACIÓN 69. } \text{PrecipAvailableForET}_{LC} = \text{Precip}_{HU} * \text{Area}_{LC} * 10^{-5} * \text{PrecipEffective}_{LC}$$

$$\text{ECUACIÓN 70. } \text{ETpotential}_{LC} = \text{ETreference}_{HU} * K_{LC} * \text{Area}_{LC} * 10^{-5}$$

$$\text{ECUACIÓN 71. } \text{PrecipShortfall}_{LC,I} = \text{Max} (0, \text{ETpotential}_{LC,I} - \text{PrecipAvailableForET}_{LC,I})$$

$$\text{ECUACIÓN 72. } \text{SupplyRequirement}_{LC,I} = (1 / \text{IrrFrac}_{LC,I}) * \text{PrecipShortfall}_{LC,I}$$

ECUACIÓN 73. $SupplyRequirement_{HU} = \sum_{LC,I} SupplyRequirement_{LC,I}$

(2) Método de humedad del suelo

El método de humedad del suelo es más complejo, representa la cuenca con dos tanques de suelo, así como el potencial de acumulación de nieve. En la capa superior del suelo, simula la evapotranspiración considerando las precipitaciones y el riego en tierras agrícolas y no agrícolas, la escorrentía y el flujo subsuperficial y los cambios en la humedad del suelo. Este método permite la caracterización del uso de la tierra y/o el impacto del tipo de suelo en estos procesos. El encauzamiento del flujo de base al río y los cambios de humedad del suelo se simulan en la capa inferior del suelo. En consecuencia, el método de humedad del suelo requiere una parametrización más extensa del suelo y el clima para simular estos procesos.

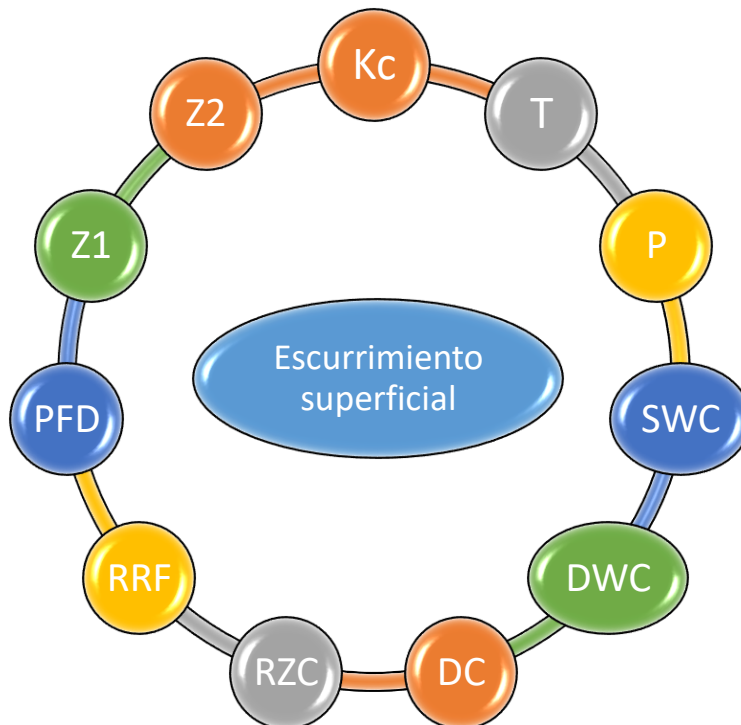


Figura 11. Variables y Parámetros del SMM

Este modelo unidimensional de 2 compartimientos (o "tanques") de humedad del suelo se basa en funciones empíricas que describen evapotranspiración, escorrentía

superficial, escorrentía subsuperficial (interflujo) y percolación profunda para una unidad de cuenca (Figura 11). Este método permite la caracterización del uso de la tierra y/o el impacto del tipo de suelo en estos procesos. La infiltración profunda dentro de la unidad de cuenca hidrográfica puede transmitirse a un cuerpo de agua superficial como caudal base o directamente al almacenamiento de agua subterránea si se establece el enlace apropiado entre el nodo de la unidad de cuenca y un nodo de agua subterránea.

Una unidad de cuenca hidrográfica se puede dividir en N áreas fraccionales que representan diferentes usos de la tierra / tipos de suelo, y se calcula un balance de agua para cada área fraccional, j de N. El clima se supone uniforme sobre cada subcuenca, y el balance hídrico se calcula con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{ECUACIÓN 74. } SWC_j \frac{dz_{1,j}}{dt} \\ = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRFj} - PFD_jk_{s,j}z_{1,j}^2 - (1 \\ - PFD_j)k_{s,j}z_{1,j}^2 \end{aligned}$$

El cálculo de la evapotranspiración potencial, PET, se realiza utilizando la ecuación de Penman-Monteith modificada para una cosecha de hierba estandarizada, de 0,12 m de altura y con una resistencia superficial de 69 s / m. En esta implementación se hicieron dos modificaciones a la ecuación: el albedo varía en un rango de 0.15 a 0.25 en función de la capa de nieve, y el término de flujo de calor del suelo, G, ha sido ignorado.

El $k_{c,j}$ es el coeficiente de cultivo / planta para cada cobertura de suelo fraccional. El tercer término representa la escorrentía superficial, donde RRF_j es el Factor de resistencia a la escorrentía de la cubierta terrestre. Los valores más altos de RRF_j conducen a menos escorrentía superficial. Los términos cuarto y quinto son los términos interflujo y de percolación profunda, respectivamente, donde el parámetro $k_{s,j}$ es una estimación de la conductividad saturada de la zona raíz (mm / tiempo) y f_j es un

coeficiente de partición relacionado con el suelo, tipo de cobertura del suelo y topografía que fracciona fraccionalmente el agua tanto horizontal como verticalmente. Por lo tanto, la escorrentía total de superficie e interflujo, Ro , de cada subcuenca en el tiempo t es:

$$ECUACIÓN 75. Ro(t) = \sum_{j=1}^N A_j \left(P_e(t) z_{1,j}^{RRF_j} + PFD_j k_{s,j} z_{1,j}^2 \right)$$

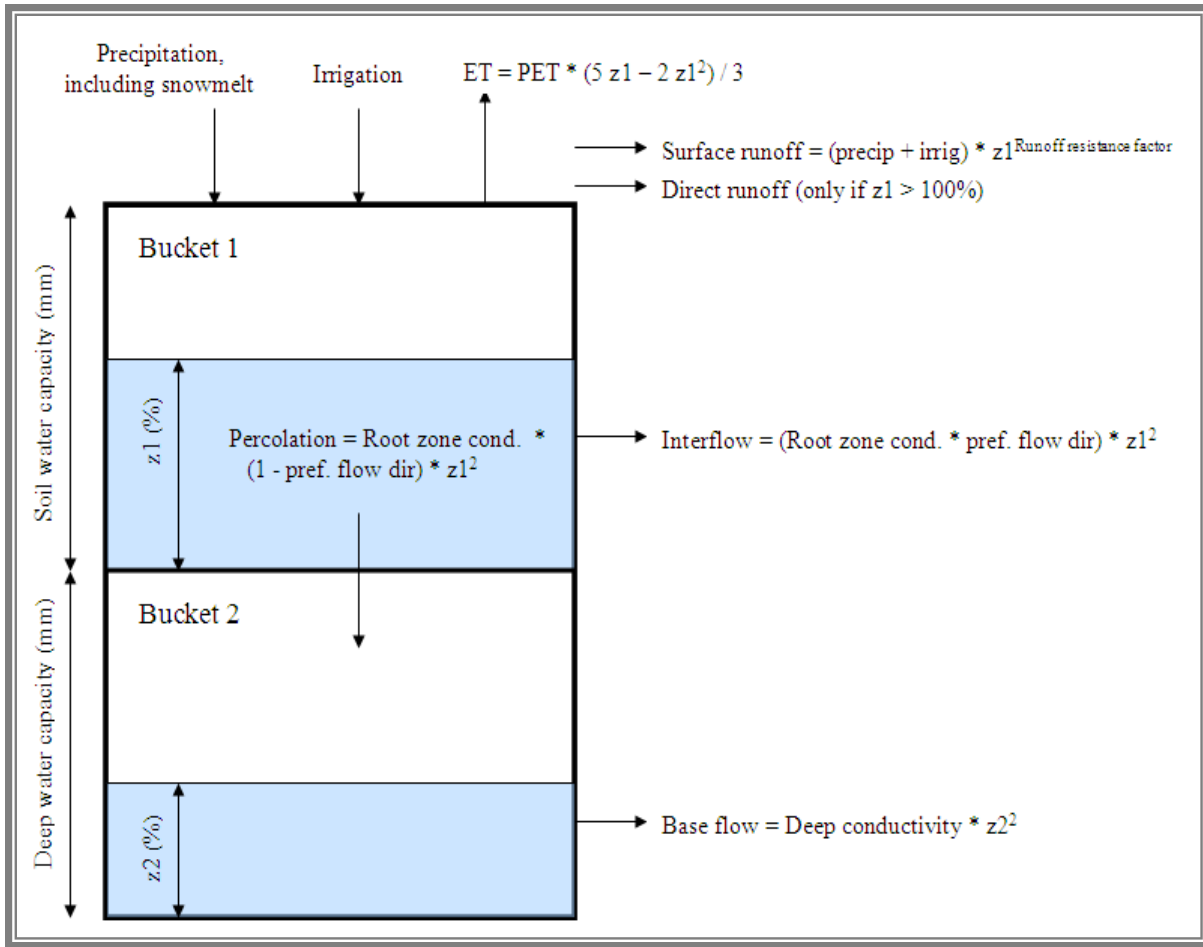


Figura 12. Modelo Conceptual del SMM

6. Metodología de Comparación

Para la comparación de los modelos hidrológicos seleccionados se empleó un análisis estadístico además de incluir una valoración cualitativa debida: al número de parámetros necesarios para el proceso de calibración de los modelos, al número de variables de entrada, la forma en la que se lleva a cabo el proceso de calibración, al número de iteraciones necesarias para lograr la mejor calibración; así como a la complejidad de construir los modelos y manejar la interfaz de usuario de los programas que engloban lo modelos estudiados.

7. Análisis estadístico

El análisis estadístico servirá para extraer información sobre la eficiencia y precisión de las modelaciones realizadas con cada uno de los modelos empleados (D. N. Moriasi, 2007). Para este análisis se emplearán los siguientes estadísticos:

a) *Eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE)*

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la varianza de los datos observados ("Estaciones Hidrométricas") (Nash, 1970). NSE indica qué tan bien la gráfica de datos observados versus simulados se ajusta a la línea 1: 1. NSE se calcula como se muestra en la ecuación:

$$\text{ECUACIÓN 76.} \quad NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{prom})^2} \right]$$

b) *Eficiencia de Nash-Sutcliffe Modificada (MNSE)*

Legates y McCabe (1999) sugirieron un NSE modificado que es menos sensible a los valores extremos altos debido a las diferencias al cuadrado. El uso del logaritmo de los flujos tiene el efecto de reducir la sensibilidad de la métrica a los flujos altos y aumentar la sensibilidad a los flujos de rango bajo y medio. Por esta razón, MNSE se usa a menudo para la calibración del modelo cuando el rendimiento de bajo flujo es importante.

$$\text{ECUACIÓN 77.} \quad MNSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Log} Q_i^{obs} - \text{Log} Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (\text{Log} Q_i^{obs} - \text{Log} Q_i^{prom})^2} \right]$$

c) **Coeficiente de correlación de Pearson ®**

El coeficiente de correlación de Pearson (r), que va de -1 a 1, es un índice del grado de relación lineal entre los datos observados y simulados.

Si $r = 0$, no existe relación lineal.

Si $r = 1$ o -1 , existe una relación lineal positiva o negativa perfecta.

$$\text{ECUACIÓN 78.} \quad r = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obs,prom}) ((Q_i^{sim} - Q_i^{sim,prom}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obs,prom})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{sim,prom})^2}} \right]$$

d) **Eficiencia Volumétrica**

Define de manera la diferencia total que existen entre los valores observados y simulados.

$$\text{ECUACIÓN 79.} \quad SIM = 1 - \left(MAX \left(\frac{Q^{sim}}{Q^{obs}}, \frac{Q^{obs}}{Q^{sim}} \right) - 1 \right)^2$$

e) **Eficiencia de Kling Gupta**

Esta medida de bondad de ajuste fue desarrollada por Gupta et al. (2009) para proporcionar un diagnóstico de la descomposición de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (y por lo tanto MSE), lo que facilita el análisis de la importancia relativa de sus diferentes componentes (correlación, sesgo y variabilidad) en el contexto del modelado hidrológico.

f) **Criterio de Información de Akaike**

El criterio de información de Akaike (AIC) es una medida de la calidad relativa de un modelo estadístico, para un conjunto dado de datos. Como tal, el AIC proporciona un medio para la selección del modelo.

AIC maneja una compensación entre la bondad de ajuste del modelo y la complejidad del modelo. Se basa en la entropía de información: se ofrece una estimación relativa de la información perdida cuando se utiliza un modelo determinado para representar el proceso que genera los datos.

AIC no proporciona una prueba de un modelo en el sentido de probar una hipótesis nula, es decir AIC puede decir nada acerca de la calidad del modelo en un sentido absoluto. Si todos los modelos candidatos encajan mal, AIC no dará ningún aviso de ello.

En el caso general, el AIC es

$$\text{ECUACIÓN 80.} \quad AIC = 2k - 2\ln(L)$$

donde k es el número de parámetros en el modelo estadístico, y L es el máximo valor de la función de verosimilitud para el modelo estimado.

Dado un conjunto de modelos candidatos para los datos, el modelo preferido es el que tiene el valor mínimo en el AIC. Por lo tanto, AIC no sólo recompensa la bondad de ajuste, sino también incluye una penalidad, que es una función creciente del número de parámetros estimados. Esta penalización desalienta el sobreajuste (aumentando el número de parámetros libres en el modelo mejora la bondad del ajuste, sin importar el número de parámetros libres en el proceso de generación de datos).

8. Aplicación de la metodología de comparación

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, el análisis estadístico, la experiencia propia al realizar las modelaciones y la consulta con otros hidrólogos que han utilizado éstos u otros modelos se aplicará el proceso analítico jerárquico en función de los criterios seleccionados para la comparación de los modelos hidrológicos los cuales son: Precisión en la simulación de meses húmedos, precisión en la modelación de meses secos, variables de entrada necesarias para la simulación, variables de estado necesarias para la simulación, cantidad de parámetros para calibrar el modelo, complejidad en la estructura del modelo, facilidad de calibración y los resultados del análisis estadístico.

9. Modelo Seleccionado.

Una vez establecida la metodología de comparación y teniendo los resultados de los modelos de simulación hidrológica, así como el análisis estadístico de los resultados se podrá seleccionar el modelo de mejor ajuste utilizando tanto la metodología de comparación como los resultados del análisis estadístico.

C. Resultados y Discusiones

1. Selección de Estaciones Climatológicas

Se realizó primeramente un a selección espacial de las estaciones climatológicas que se encuentran dentro de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, así como aquellas que se encuentran en las cercanías a su frontera y además de aquellas que tenían influencia sobre éstas últimas.

En la figura 12 se puede observar las estaciones seleccionadas para la elaboración de esta investigación, destacando que este primer análisis tomo en cuenta únicamente la influencia que mostraron las estaciones sobre la cuenca con polígonos de Thiessen.

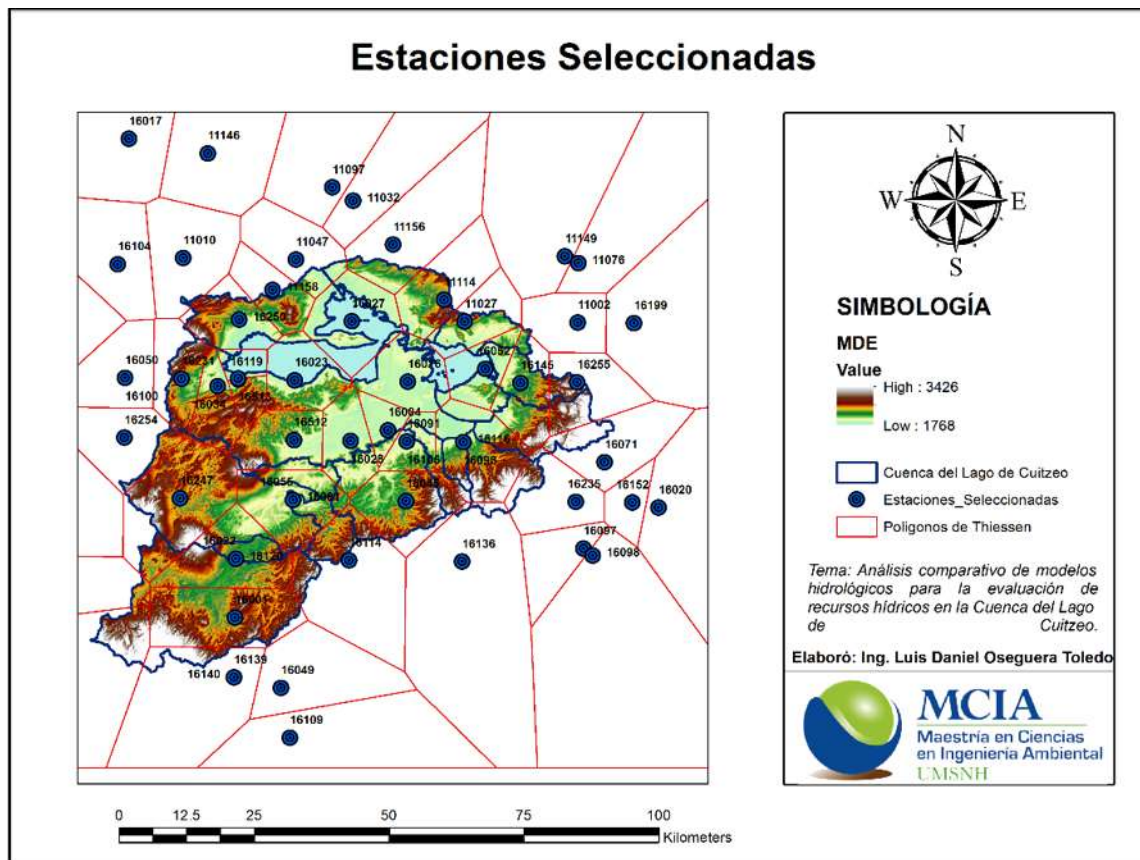


Figura 13. Selección Espacial de Estaciones

2. Actualización de Información Meteorológica e Hidrométrica

La información obtenida de CONAGUA a través del portal del INAI permitió obtener una ampliación la información con la que se contaba de estudios previos, pasando de tener datos del 2008 hasta 2015, contando en algunos casos con información desde 1923. En la tabla 3 se muestra el listado de las estaciones seleccionadas espacialmente, así como información representativa de los periodos en los que cuenta con datos y el porcentaje de vacíos.

Tabla 3. Listado de Estaciones

CLAVE	ESTACIÓN	PERIODO		% de Vacíos	LONGITUD	LATITUD	Z
		INICIO	FIN				
16001	ACUITZIO DEL CANJE, ACUITZIO	1961	2015	28.64%	-101.30	19.50	2200
16004	ALVARO OBREGON (SMN)	1964	2015	31.73%	-101.03	19.82	590
16016	CARRILLO PUERTO, ALVARO	1969	2014	7.97%	-101.00	19.90	1840
16017	CASA BLANCA, JOSE SIXTO	1949	2009	8.47%	-101.5	20.30	1694
16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	1959	2006	3.13%	-100.55	19.69	2060
16022	COINTZIO, MORELIA	1940	2006	9.33%	-101.30	19.60	2096
16023	COPANDARO DE GALEANA	1969	2001	11.62%	-101.2	19.90	1840
16027	CUITZEO, CUITZEO	1923	2015	10.39%	-101.10	20.00	1831
16028	CUITZILLO GRANDE, TARIMBARO	1969	2007	5.34%	-101.10	19.80	1987
16034	EL JACAL (SMN)	1969	1987	21.93%	-101.34	19.89	1875
16045	EL TEMAZCAL, CHARO	1965	2014	2.00%	-101.00	19.70	2220
16049	ETUCUARO	1944	1988	8.15%	-101.22	19.38	1690
16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	1948	2014	2.61%	-101.50	19.90	2040
16052	HUINGO	1941	2015	2.22%	-100.86	19.92	1921
16055	JESUS DEL MONTE, MORELIA	1935	2015	3.60%	-101.20	19.70	2180
16071	LOS AZUFRES	1964	1997	30.88%	-100.65	19.77	2953
16080	MORELIA (OBS)	1986	2015	6.67%	-101.18	19.70	1912.7
16081	MORELIA, MORELIA	1947	2015	1.93%	-101.20	19.70	1908

16087	PATZCUARO, PATZCUARO	1969	2015	13.65%	-101.6	19.50	2140
16091	ALVARO OBREGON (DGE), AL	1966	2015	6.17%	-101.00	19.80	1840
16096	PRESA MALPAIS, QUERENDAR	1944	2015	16.44%	-100.90	19.80	1859
16097	PRESA PUCUATO	1950	2015	10.98%	-100.69	19.62	2490
16098	PRESA SABANETA	1952	2015	4.17%	-100.67	19.61	2510
16100	PUENTE SAN ISIDRO, HUANI	1947	1993	3.37%	-101.50	19.90	2022
16104	PURUANDIRO	1942	2015	32.66%	-101.52	20.09	2012
16105	QUIRIO, INDAPARAPEO	1963	2015	5.97%	-101.0	19.80	1858
16109	SAN DIEGO CURUPATZEO	1923	2015	2.69%	-101.20	19.30	1444
16114	SAN MIGUEL DEL MONTE	1963	2015	22.17%	-101.10	19.60	1965
16116	SAN SEBASTIAN, QUERENDARO	1969	1991	2.54%	-100.90	19.80	1836
16118	SANTA FE, QUIROGA	1963	2014	10.58%	-101.60	19.7	2203
16119	SANTA RITA, COPANDARO	1964	2015	37.34%	-101.30	19.90	1880
16120	SANTIAGO UNDAMEO, MORELI	1954	2007	1.52%	-101.30	19.60	2130
16124	TEMASCALES, CONTEPEC	1943	2015	2.17%	-100.10	20.10	2409
16136	TZITZIO, TZITZIO	1969	2015	13.83%	-100.90	19.60	1565
16139	VILLA MADERO	1943	1984	2.18%	-101.30	19.40	2097
16140	VILLA MADERO (CFE)	1961	1994	7.84%	-101.30	19.40	2182
16145	ZINAPECUARO, ZINAPECUARO	1923	2015	11.20%	-100.8	19.90	1880
16152	CIUDAD HIDALGO (SMN)	1923	1988	0.88%	-100.60	19.70	2327
16155	COPANDARO (CFE), JIMENEZ	1969	2010	17.46%	-101.70	19.90	1980
16199	SAN MIGUEL CURINHUATO	1975	2015	12.20%	-100.60	20.00	2020
16221	FRUTICULTORES, ZINAPECUARO	1980	2005	53.21%	-100.8	19.90	1986
16225	VILLA JIMENEZ II, JIMENEZ	1981	2015	12.38%	-101.70	19.90	2000
16231	LAS CRUCES BARRERAS	1982	2015	29.66%	-101.4	19.90	2408
16234	GALEANA	1981	2015	18.81%	-101.60	20.00	1935
16235	HUAJUMBARO	1980	2015	10.65%	-100.70	19.70	2285
16247	CAPULA, MORELIA	1981	2007	32.72%	-101.40	19.7	2097
16250	HUANDACAREO, HUANDACAREO	1982	2014	18.43%	-101.30	20.00	1851
16254	TEREMENDO, MORELIA	1982	2015	1.23%	-101.5	19.80	2188
16255	UCAREO	1981	2015	8.10%	-100.70	19.90	2554

16257	SANTA ISABEL DE AJUNO	1982	1988	33.33%	-101.60	19.50	2250
16512	EL COLEGIO, TARIMBARO	1986	2015	10.83%	-101.20	19.80	1880
16513	EL JACAL (DGE)	1981	2015	29.76%	-101.30	19.90	1874
11002	ACAMBARO	1932	2015	4.22%	-100.70	20.00	1860
11010	CERANO	1962	2015	6.33%	-101.40	20.10	1909
11027	IRAMUCO	1923	2015	10.39%	-100.90	20.00	1840
11032	SANTA CRUZ JUVENTINO ROSAS (DGE)	1986	2015	44.44%	-101.10	20.20	1761
11047	MOROLEON	1923	2015	45.16%	-101.20	20.10	1812
11076	PRESA SOLIS	1961	2015	5.00%	-100.70	20.10	1901
11097	SANTA MARIA (SMN)	1926	1965	5.63%	-101.14	20.22	1751
11114	EL REFUGIO	1975	1992	14.35%	-100.94	20.04	2040
11146	LAS JICAMAS	1979	2015	7.66%	-101.36	20.28	1859
11149	PARACUARO	1979	2015	1.72%	-100.72	20.11	1890
11156	EL DORMIDO	1980	2015	8.33%	-101.03	20.13	1907
11158	PIÑICUARO	1981	2015	14.29%	-101.24	20.05	2130

3. Pruebas de Homogeneidad e Independencia

A todas las estaciones seleccionadas espacialmente se les aplicaron las pruebas de secuencias, Helmert y límites de Anderson para verificar que las series históricas cumplieran con los requisitos de homogeneidad e independencia para que de esta manera pudieran emplearse en el llenado de datos y en la modelación hidrológica.

Los resultados de estas pruebas se muestran en la siguiente tabla 4:

Tabla 4. Pruebas de Consistencia.

CLAVE	ESTACIÓN	SECUENCIAS	HELMERT	ANDERSON
16001	ACUITZIO DEL CANJE, ACUITZIO	NO PASA	NO PASA	PASA
16004	ALVARO OBREGON (SMN)	PASA	NO PASA	PASA
16016	CARRILLO PUERTO, ALVARO	PASA	PASA	PASA
16017	CASA BLANCA, JOSE SIXTO	NO HAY DATOS SUFICIENTES		
16023	COPANDARO DE GALEANA	NO PASA	PASA	PASA
16027	CUITZEO, CUITZEO	PASA	PASA	PASA
16028	CUITZILLO GRANDE, TARIMBARO	PASA	PASA	PASA
16034	EL JACAL (SMN)	DATOS INSUFICIENTES		
16045	EL TEMAZCAL, CHARO	NO PASA	PASA	PASA
16052	HUINGO	PASA	PASA	PASA

16055	JESUS DEL MONTE, MORELIA	NO PASA	PASA	PASA
16071	LOS AZUFRES	DATOS INSUFICIENTES		
16080	MORELIA (OBS)	DATOS INSUFICIENTES		
16081	MORELIA, MORELIA	NO PASA	PASA	PASA
16087	PATZCUARO, PATZCUARO	NO	PASA	PASA
16105	QUIRIO, INDAPARAPEO	PASA	PASA	PASA
16109	SAN DIEGO CURUPATZEO	PASA	PASA	PASA
16114	SAN MIGUEL DEL MONTE	NO PASA	NO PASA	PASA
16116	SAN SEBASTIAN, QUERENDARO	NO PASA	NO PASA	PASA
16119	SANTA RITA, COPANDARO	DATOS INSUFICIENTES		
16120	SANTIAGO UNDAMEO, MORELI	PASA	NO PASA	PASA
16136	TZITZIO, TZITZIO	NO PASA	NO PASA	PASA
16139	VILLA MADERO	NO PASA	PASA	PASA
16140	VILLA MADERO (CFE)	NO PASA	NO PASA	PASA
16145	ZINAPECUARO, ZINAPECUARO	NO PASA	NO PASA	PASA
16152	CIUDAD HIDALGO (SMN)	PASA	PASA	PASA
16199	SAN MIGUEL CURINHUATO	NO PASA	PASA	NO PASA
16231	LAS CRUCES BARRERAS	NO PASA	NO PASA	PASA
16235	HUAJUMBARO	PASA	PASA	PASA
16247	CAPULA, MORELIA	NO PASA	PASA	PASA
16250	HUANDACAREO, HUANDACAREO	NO PASA	NO PASA	NO PASA
16254	TEREMENDO, MORELIA	NO PASA	NO PASA	PASA
16255	UCAREO	NO PASA	PASA	PASA
16257	SANTA ISABEL DE AJUNO	PASA	PASA	HELMERT
16512	EL COLEGIO, TARIMBARO	NO PASA	PASA	PASA
16513	EL JACAL (DGE)	DATOS INSUFICIENTES		
11002	ACAMBARO	NO PASA	PASA	PASA
11010	CERANO	NO PASA	PASA	PASA
11027	IRAMUCO	PASA	PASA	PASA
11047	MOROLEON	PASA	PASA	PASA
11076	PRESA SOLIS	PASA	PASA	PASA
11114	EL REFUGIO	NO PASA	PASA	PASA
11156	EL DORMIDO	PASA	PASA	PASA
11158	PIÑICUARO	NO PASA	PASA	PASA

4. Llenado de datos

Para llenar los vacíos de las estaciones se procedió a realizar una matriz de correlación entre todas las estaciones, aceptando aquellas estaciones con valores

superiores a 0.6, además de esto, se tomó en cuenta un criterio que señala que las estaciones solo podían ser llenadas con aquellas que estuvieran en un rango de $\pm 10\%$ la precipitación media anual de la estación a llenar; esto con la finalidad de no agregar variabilidad a la media.

Posteriormente se realizó una matriz binaria para conocer cuáles eran las estaciones que cumplían ambos requisitos y así proceder a aplicar la ecuación del método del US National Weather Service.

Finalizado el llenado de datos de precipitaciones se procedió a trasladar la información al centroide de las subcuencas empleando el mismo método del US National Weather Service, tomando en cuenta solo las estaciones que pasaron al menos las pruebas de Límites de Anderson y que por medio de polígonos de Thiessen presentaban influencia (figura 13).

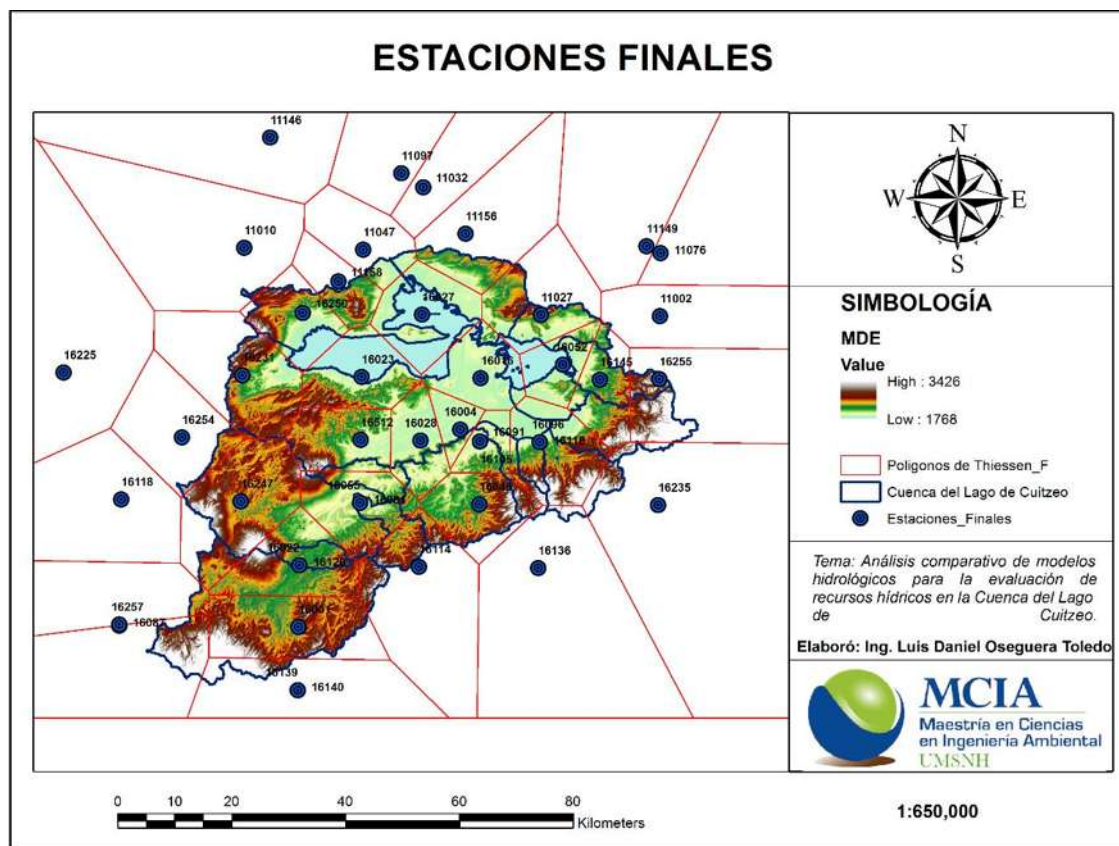


Figura 14. Estaciones Finales

5. Modelación Hidrológica

Para realizar la modelación hidrológica se utilizó el programa EvalHID el cual contiene los tres primeros modelos: Témez, HBV y Sacramento. Estos modelos realizan el balance hídrico de la cuenca a partir de los datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración. Devolviendo series de escurrimientos naturales que posteriormente fueron comparadas con las series históricas de las estaciones hidrométricas.

Se hizo una subdivisión de la cuenca en 17 subcuencas propuesta por Pardo, J. en 2016 en un estudio previo de la Cuenca del Lago de Cuitzeo (figura 14).

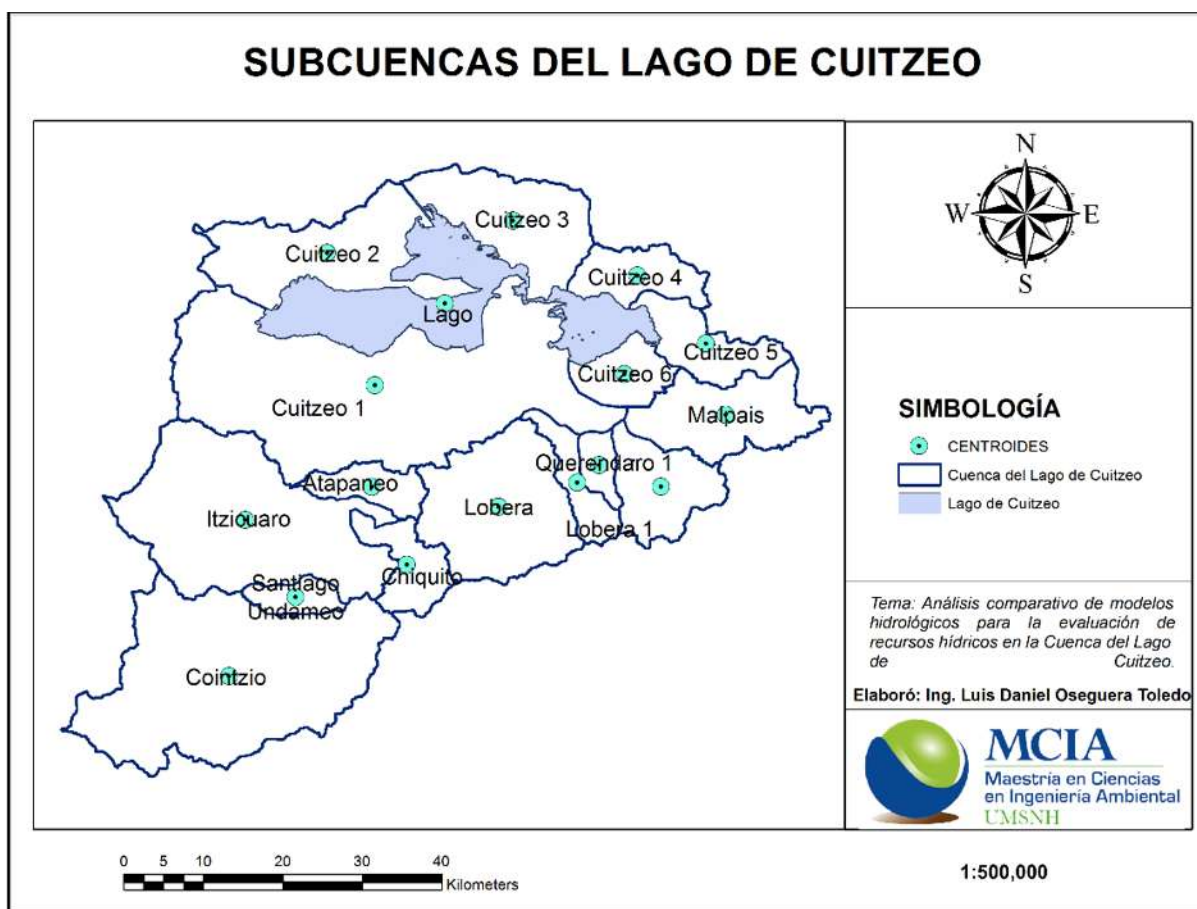


Figura 15. Subcuencas del Lago de Cuitzeo

Posteriormente se ubicaron las estaciones hidrométricas disponibles para ser utilizadas como medio de comparación en el proceso de calibración, siendo seleccionadas las siguientes:

Tabla 5. Estaciones Hidrométricas

Est. Hidrométrica	Código	Inicio	Fin	Total
Cointzio	12219	1927	2011	84
Atapaneo	12221	1927	2001	74
Chiquito	12224	1927	1989	62
Querendaro	12314	1936	1996	60
Salidas Malpaís	12323	1960	2002	42
Santiago Undameo	12347	1939	2002	63
El Plan	12588	1956	2014	58

Posteriormente se realizó la división de las subcuencas en 8 (Una más que el número de estaciones hidrométricas), las cuales fueron la base para la calibración de los modelos quedando de la siguiente forma:

Tabla 6. Subdivisión de la Cuenca de Cuitzeo para el proceso de Calibración

No.	Subcuencas	Estación Hidrométrica
1	Cointzio	Santiago Undameo
2	Chiquito	Chiquito
3	Malpais	Salidas Malpais
4	Querendaro	Querendaro
	Querendaro 1	
5	Cointzio	Cointzio
	Santiago Undameo	
6	Itzicuarro	Atapaneo
	Chiquito	
	Santiago Undameo	
	Cointzio	
7	Lobera	El plan
	Lobera 1	
	Atapaneo	
	Itzicuarro	
	Chiquito	

	Santiago Undameo	
	Cointzio	
8	Todas	El lago

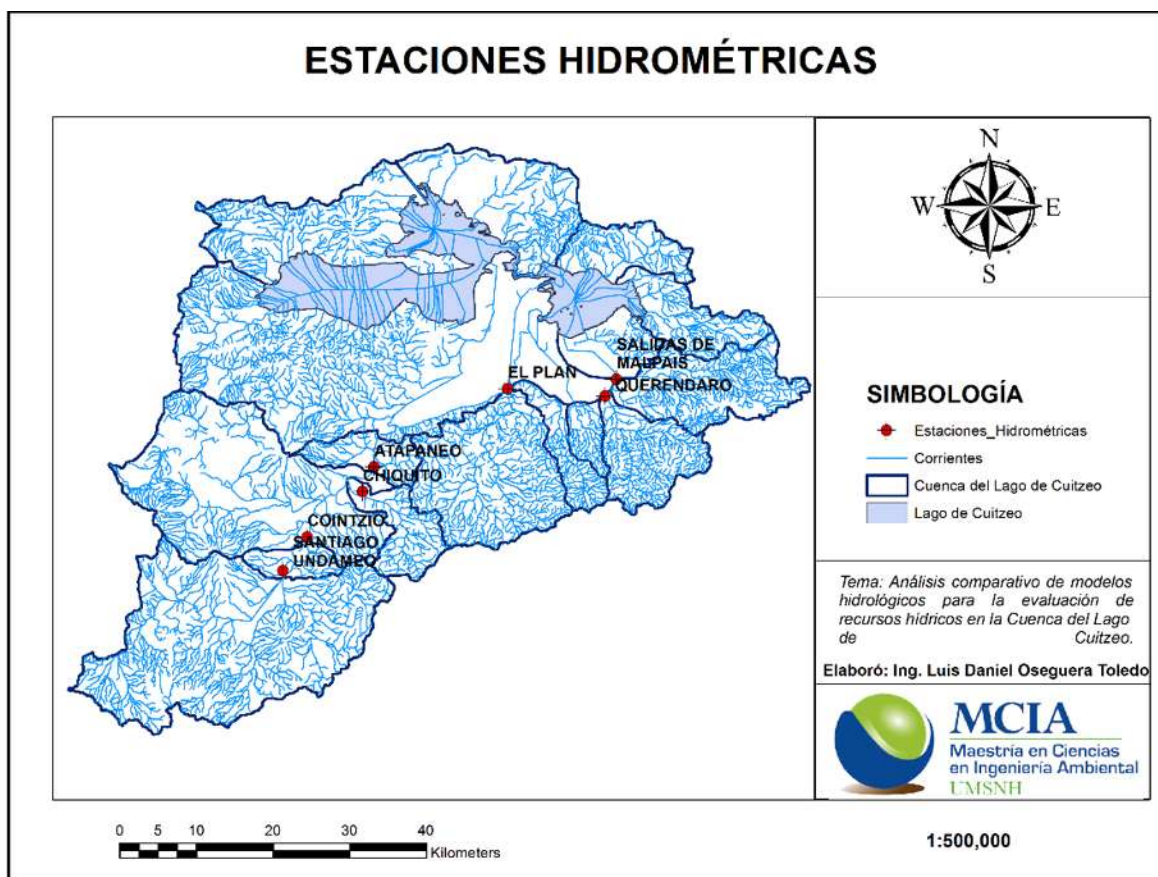


Figura 16. Ubicación espacial de las Estaciones Hidrométricas.

a) **Modelo de Témez**

El modelo de Témez es uno de los más usados en la actualidad debido a la gran simplificación que hace del proceso lluvia escurrimiento, contando únicamente con 4 parámetros para su calibración y de los cuales dos de ellos (H_{max} y C) pueden ser fijados por las características físicas del suelo o calculándola con otra metodología, pudiendo dejar libres a la calibración I_{max} y α que dependen más de las características propias de la hidrogeología y procesos más complejos que en la simplificación propia del modelo se pierden.

En la figura 17 podemos observar los resultados de la simulación contra los datos observados, así como algunos indicadores de la bondad de ajuste del modelo.

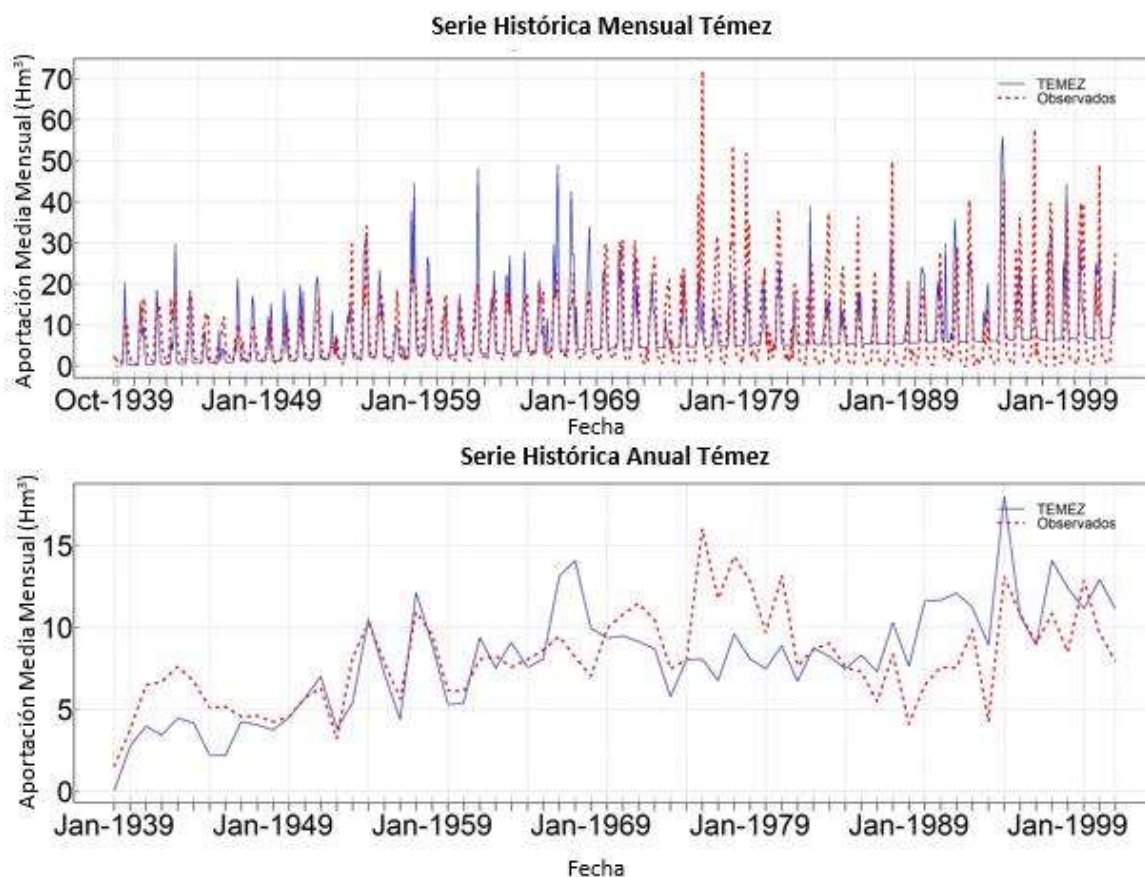


Figura 17. Simulación histórica y anual modelo de Témez

Se puede apreciar que conforme pasa el tiempo de simulación la parte subterránea presenta problemáticas ya que el caudal base proveniente de la interacción río-acuífero va aumentando lo que sugiere que el modelo de Témez no es capaz de representar adecuadamente los procesos que se llevan a cabo en la parte subterránea.

Por otro lado observando los indicadores de ajuste, se observa tanto en el análisis histórico como en el anual que el error medio y el sesgo tienen valores muy bajos, lo cual indica que la calibración con el modelo de Témez, sin embargo Moriasi en el 2012 hizo una recopilación de los indicadores más utilizados para el uso, calibración y validación de modelos hidrológicos en donde se puede observar que el coeficiente de Nash y el coeficiente de correlación de Pearson también tienen gran importancia al momento de evaluar modelos, ya que verifican la capacidad del modelo para representar máximos y mínimos así como la tendencia media. En este caso se observa que en el caso de la serie histórica con el coeficiente de Nash y su logaritmo se alcanzan valores aceptables sin embargo ya en el análisis anual la evaluación con estos indicadores es mala, no así con el coeficiente de correlación que en ambos se considera un valor bueno.

Haciendo un análisis de sensibilidad de los parámetros se observó que el parámetro “alfa”, el cual representa la relación del cambio del volumen almacenado en el segundo tanque (acuífero) en el tiempo, es el que mayor sensibilidad aporta al sistema ya que es directamente proporcional a la aportación.

Tabla 7. Límites y calibración de Parámetros del modelo de Témez

Parámetro		Mínimo	Máximo	Calibración
Hmax	Humedad máxima	220	350	307.3686898
Imax	Infiltración máxima	200	275	230.6201272
C	Coeficiente de escurrimiento	0	0.3	0.001408801
α	Factor alfa	0.0001	0.001	0.000973586

b) **Modelo HBV**

El modelo HBV aplicado en más de 30 países fue desarrollado de manera que sea capaz de representar los procesos más importantes en el proceso lluvia-escurrimiento considerado aún como un modelo de pocos parámetros.

Se observa en la figura que el modelo HBV no alcanza a representar de manera adecuada los caudales bajos haciendo que el error medio y el sesgo porcentual sean más altos que en el modelo de Témez. Sin embargo, Bergström en 2012 señala que la estructura del modelo HBV fue diseñada para datos diarios, usando para esta investigación datos mensuales, lo cual pudo disminuir la eficiencia del modelo.

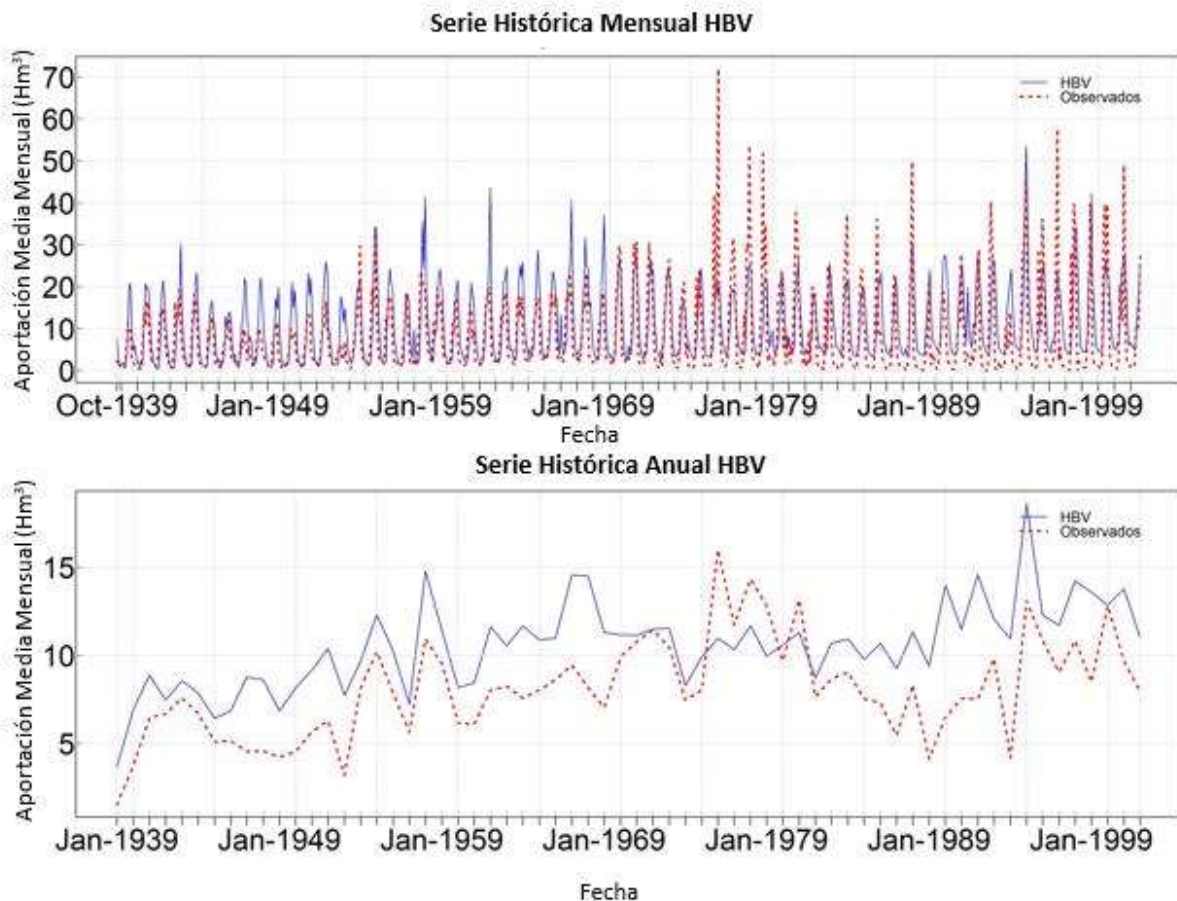


Figura 18. Serie histórica y anual modelo HBV

Tabla 8. Límites y calibración de los parámetros del modelo HBV

Parámetro		Mínimo	Máximo	Calibración
Beta	Coeficiente de forma para la infiltración	0.1	0.5	0.255028
FC	Capacidad de Campo	300	750	603.9447
PWP	Punto de Marchitez de la Vegetación	200	400	254.8127
Lmax	Umbral de descarga rápida	220	300	221.8765
K0	Coeficiente de descarga rápida	0.15	0.47	0.33696
K1	Coeficiente de recesión tanque superior	0	0.35	0.175592
K2	Coeficiente de recesión tanque inferior	0	0.08	0.000266
Kperc	Coeficiente de percolación	0	0.5	0.5

c) **Modelo de Sacramento**

El modelo de sacramento al igual que el modelo HBV se recomienda que sea empleado con datos diarios, sin embargo, como se puede observar en la figura 17 se logró un buen desempeño global con la simulación mensual. Además, se puede observar que en los caudales bajos como en los eventos extremos, finalmente se logra realizar un buen ajuste obteniendo valores más altos en los indicadores de bondad de ajuste y menores errores. Sin embargo, cabe señalar que el modelo de Sacramento ya se considera un modelo de muchos parámetros (17) aunque para el proceso de calibración se tomaron únicamente 11.

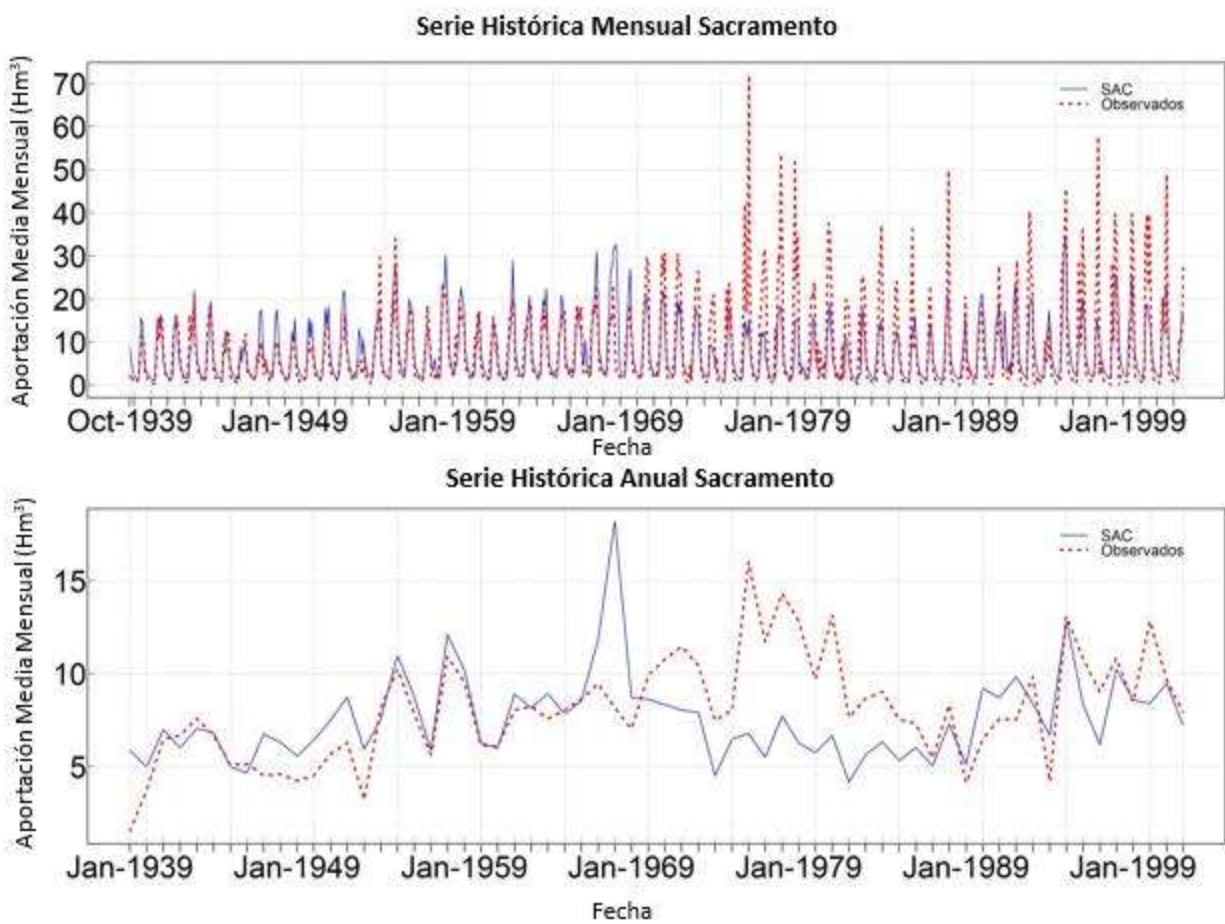


Figura 19. Serie histórica mensual y anual del modelo Sacramento

Tabla 9. Límites y calibración de los parámetros del modelo HBV

Parámetro		Mínimo	Máximo	Calibración
UZTWM	Humedad máxima retenida en tensión en el suelo	20	150	41.924
UZFWM	Humedad máxima admitida en la zona libre del suelo	10	150	106.654
UZK	Coefficiente de descarga superficial desde el suelo	0.1	0.9	0.495
ZPERC	Parámetro que modifica la filtración desde la zona de suelo a la profunda	1.5	3.5	2.741
REXP		1.5	3.5	1.795
LZTWM	Humedad máxima retenida en tensión en la zona profunda	100	300	188.301
LZFSM	Humedad máxima almacenable en la zona libre secundaria profunda	5	450	439.140
LZFPM	Humedad máxima almacenable en la zona libre primaria profunda	5	300	299.496
LZSK	Coefficiente de descarga superficial de la zona secundaria profunda	0.01	0.97	0.473
LZPK	Coefficiente de descarga superficial de la zona primaria profunda	0.01	0.2	0.045
PFREE	Coefficiente de reparto de la filtración entre las celdas en tensión y libre	0.01	0.6	0.184

d) **Modelo GR4J**

El modelo GR4J ha reportado un buen desempeño para la simulación de eventos extremos con pasos de tiempo diarios o subdiarios, sin embargo, fue diseñado para la simulación de eventos extremos no para la simulación continua. En la figura 18 se puede observar que al tratarse de datos mensuales simula adecuadamente los gastos máximos en el periodo histórico, aunque se cuenta con valores insatisfactorios en los indicadores NSE y ln NSE debido a que el modelo tiende a sobreestimar los valores pico.

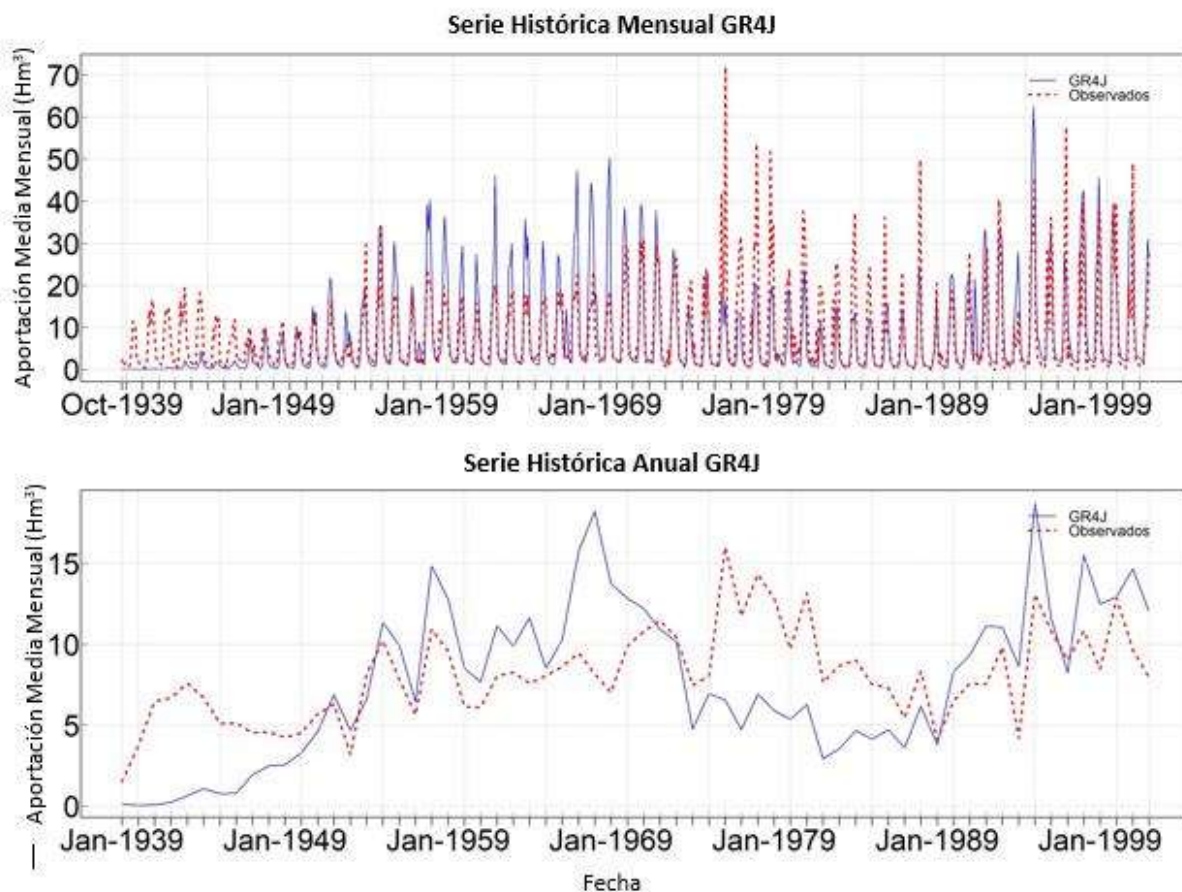


Figura 20. Serie histórica mensual y anual del modelo GR4J

Dado que el modelo GR4J funciona únicamente con datos diarios se realizó el ajuste de unidades necesario en los parámetros del modelo para poder realizar la calibración.

Tabla 10. Límites y calibración de Parámetros del modelo GR4J

Parámetro		Mínimo	Máximo	Calibración
X1	Capacidad del depósito de producción	220	350	307.3686898
X2	Coeficiente de intercambio de agua	200	275	230.6201272
X3	Capacidad del depósito de laminación	0	0.3	0.001408801
X4	Tiempo base del Hidrograma Unitario	0.0001	0.001	0.000973586

e) **Modelo del Coeficiente Simple**

Este modelo requiere para su calibración únicamente una serie histórica de evapotranspiración y el cálculo de un caudal base, en la figura 21 el ajuste del caudal base fue muy buena, sin embargo, dado que el único parámetro a calibrar es la evapotranspiración se decidió realizar una curva anual para facilitar el proceso de calibración, pero al unificar el comportamiento de la evapotranspiración en la serie histórica se sacrificó la precisión en la simulación de los caudales máximos.

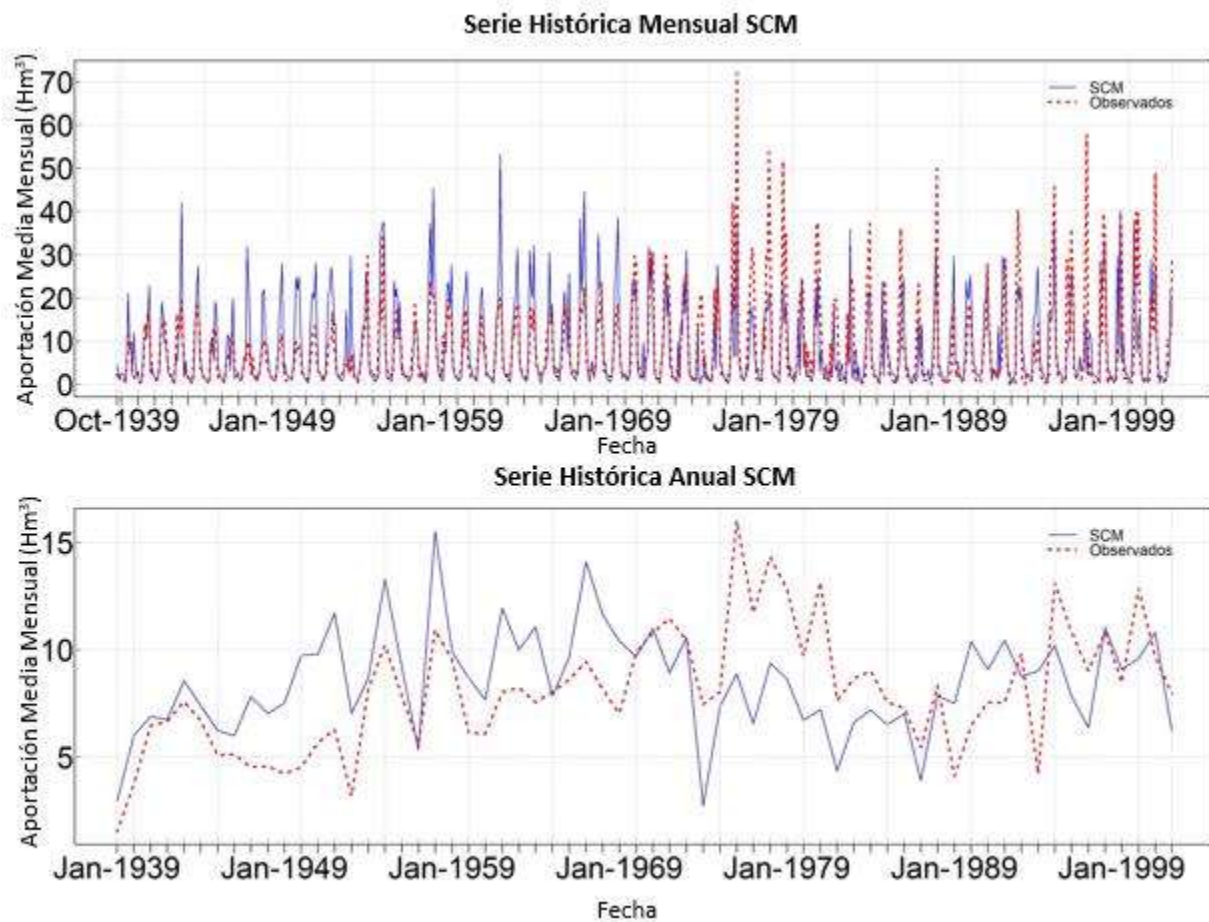


Figura 21. Serie histórica mensual y anual del modelo del coeficiente simple

f) **Método de humedad del suelo**

Los resultados del SMM arrojaron un mejor desempeño global a lo largo de la serie histórica y anual como se observa en la figura 22. El modelo ha sido empleado para la simulación del proceso lluvia escurrimiento (Silva, 2017) logrando obtener muy buenas calibraciones a pesar de contar con un número similar de parámetros que el modelo HBV y de no contar con un algoritmo de calibración automática.

También se puede observar que para estabilizar el primer tanque del suelo se requirieron 10 años de la simulación.

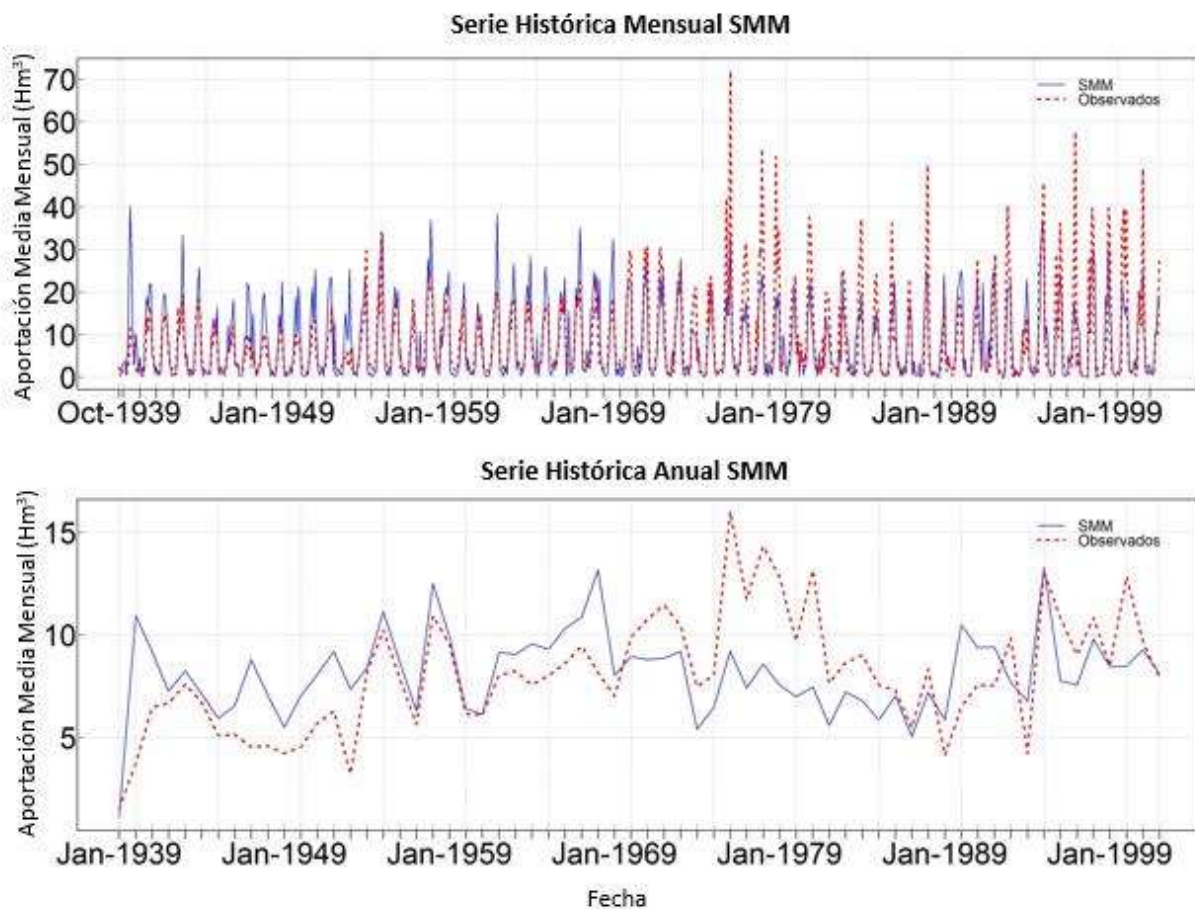


Figura 22. Serie histórica mensual y anual del modelo de humedad del suelo

Para la calibración del SMM se realizó un análisis de sensibilidad para observar los parámetros que mayor influencia tienen en el proceso lluvia escurrimiento encontrando que el factor de resistencia al escurrimiento es el que mayor influencia tiene dentro del modelo seguido por la capacidad de humedad del suelo el cual dicta el proceso de infiltración.

Tabla 11.Límites y calibración de Parámetros del modelo de Humedad del Suelo

Parámetro		Mínimo	Máximo	Calibración
SWC	Capacidad de humedad del suelo	0	4000	1000
RZC	Capacidad de la zona radicular	0	200	20
RRF	Factor de resistencia al escurrimiento	0.001	5	0.2
DWC	Capacidad de almacenamiento de la celda profunda	0	4000	1000
DC	Conductividad Hidráulica	0	1000	20
PFD	Dirección preferencial del Flujo	0	1	0.15

g) **SWAT**

El modelo SWAT fue el más complicado de construir ya que no solamente requiere de los datos históricos de Precipitación, temperatura máxima y mínima, sino que también se requieren archivos tipo raster de la clasificación del suelo, uso de suelo y pendientes de la zona de estudio; además de eso se requiere una reclasificación de los raster para que tenga concordancia con la base de datos del modelo SWAT. Como resultado de la reclasificación el modelo SWAT arrojó la subdivisión de la cuenca de Cointzio en 33 unidades de respuesta hidrológica (HRU'S) como se muestra en la figura 21 para su calibración.

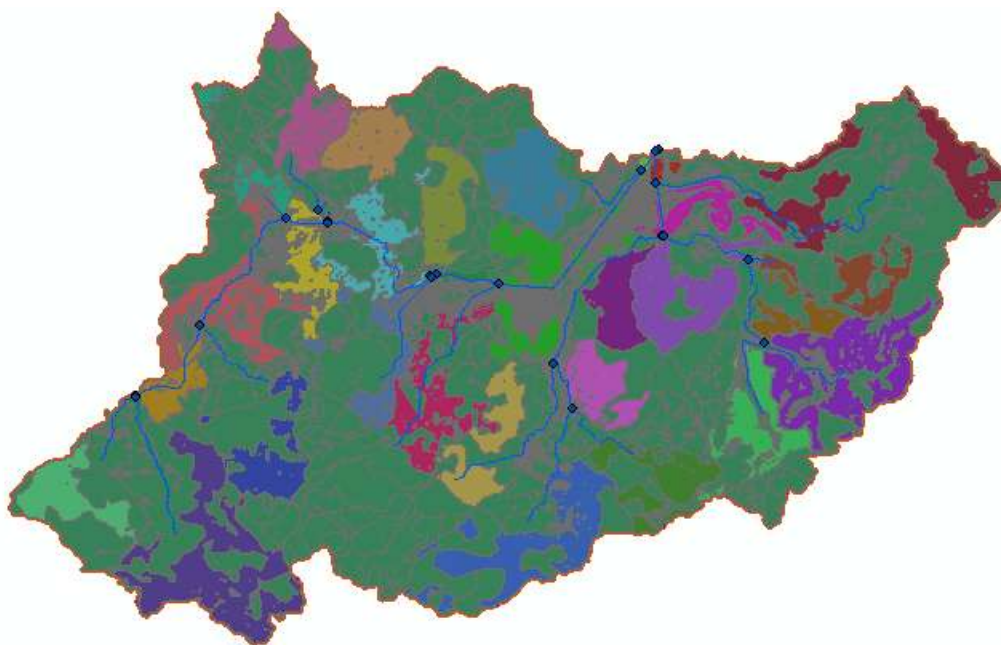


Figura 23. HRU'S definidas con el programa SWAT

Definidas la HRU'S se procedió a la calibración del modelo a través del programa SWAT-CUP con el algoritmo SUFI-2, sin embargo, al tratarse de un modelo semidistribuido requiere el ajuste los parámetros para cada una de las 33 HRU'S de manera individual. Abbaspour en 2015 reportó un análisis de los parámetros a calibrar para básicamente se reducen a 7, sin embargo, dentro del programa SWAT- CUP se sugiere la calibración de más de 20 parámetros relacionados con los procesos de generación del escurrimiento y los procesos de evaporación, infiltración y percolación; dejando de lado los procesos de transporte de sedimentos y calidad del agua.

En la figura 24 se observa la mejor calibración obtenida, no resultando como se esperaba. Poniendo en desventaja al modelo SWAT respecto a los demás analizados se decidió no colocarlo en la comparación ya que tanto cualitativa como cuantitativamente representa un proceso más complejo para su construcción y calibración sin mencionar el tiempo necesario para su elaboración.

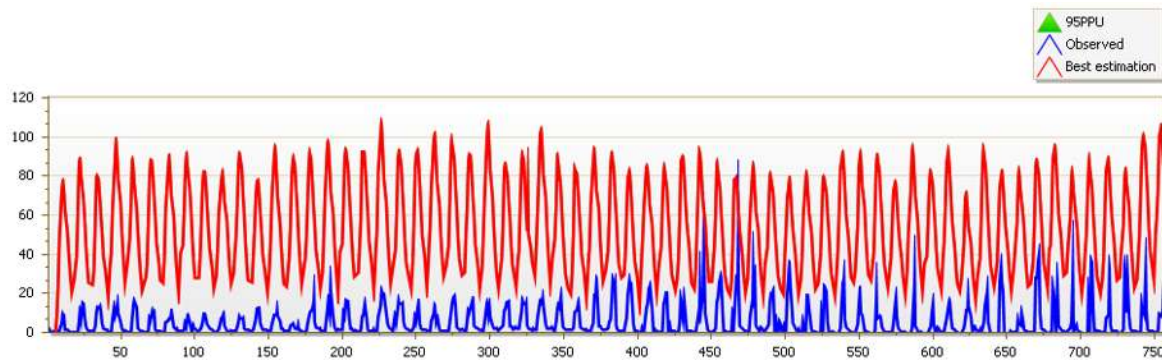


Figura 24. Calibración del modelo SWAT con el algoritmo SUFI-2

En general se puede distinguir claramente un periodo en el cual los 6 modelos coinciden (1975-1981) donde los caudales observados son superiores a los observados lo cual nos indica que en ese periodo hubo alguna alteración en las mediciones o en la generación de caudales en la cuenca ya sea por algún evento climatológico o alguna alteración en la operación usual de la cuenca.

6. Análisis Comparativo

En la figura 25 se observa claramente que en general los 6 modelos analizados cumplen con el objetivo general de la modelación que es la simulación del escurrimiento medio mensual. Difiriendo únicamente en la dispersión de los datos, afectando la desviación estándar de los caudales simulados-caudales observados.

También se observa que en los meses húmedos (junio, julio, agosto, septiembre y octubre) se obtiene una buena simulación con 5 de los modelos; el modelo HBV sobrepasa los límites del $\pm 5\%$ de confianza con los que se realizó el notch a la caja de caudales observados. Los modelos de Témez, Sacramento, SCM y SMM fueron los que se ajustaron mejor en los meses húmedos.

En los meses secos es donde se observan mayores diferencias significativas como ya se había comentado en el análisis individual de cada modelo. Los caudales bajos son los que representan un mayor reto en la simulación. Dado que el SCM requiere de la calibración de un caudal base se puede observar que es el modelo que mejor ajusta en los meses secos.

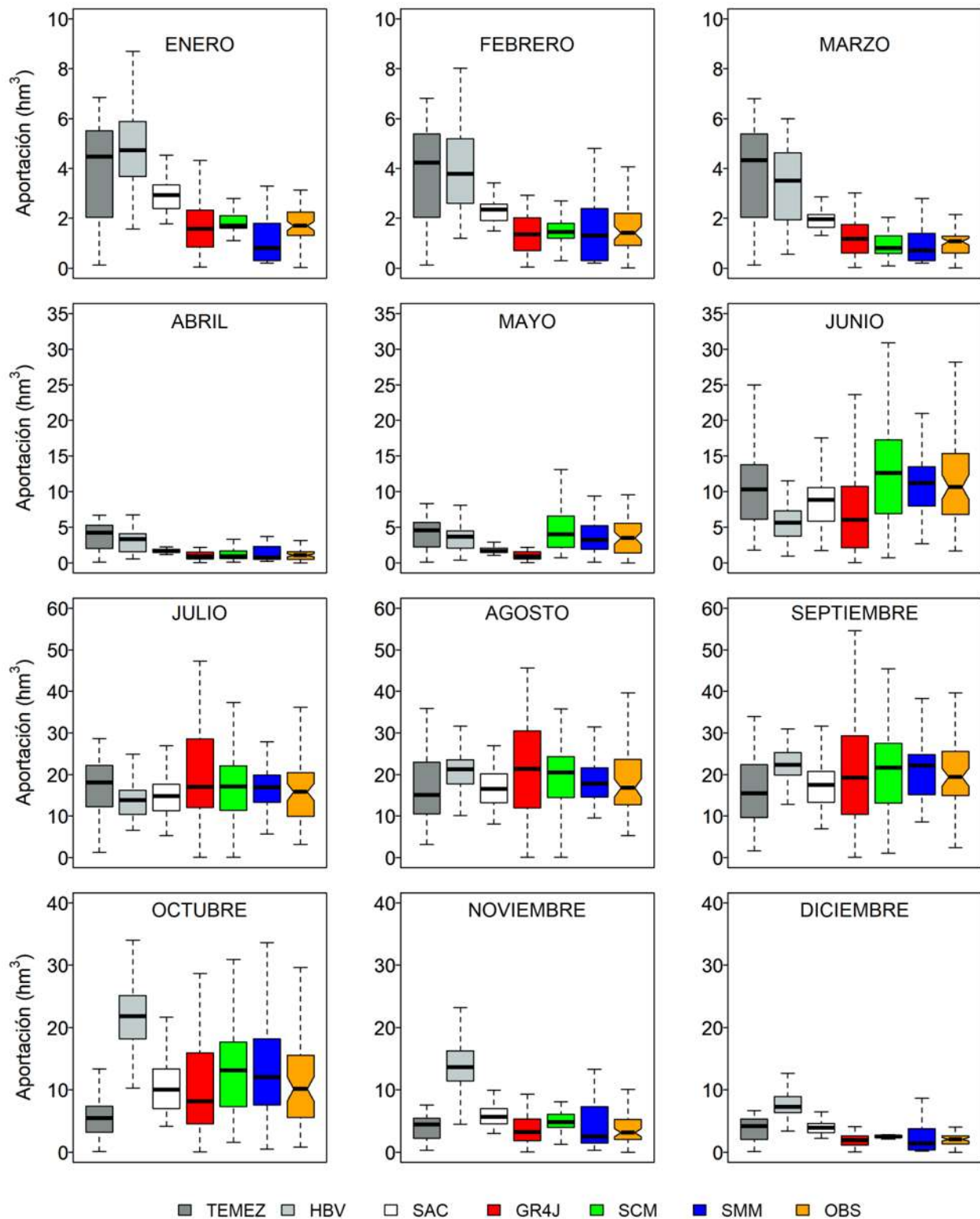


Figura 25. Análisis de caja y bigotes medio mensual

Para corroborar el análisis del año medio se realizó la acumulación de los datos por estaciones del año, en la figura 26 se pueden apreciar más claramente las diferencias entre los modelos y en los meses húmedos y secos.

En invierno se puede observar la mayor variabilidad, dejando fuera del rango aceptable al modelo HBV que en general tiende a estar por encima de la media.

En primavera los modelos de Témez, HBV y Sacramento quedan fuera del rango aceptable ya que tienden a estar por encima de la media.

En verano, cuando inicia el periodo de lluvias, los modelos de Témez, SCM y SMM son los que logran hacer un mejor desempeño en cuanto a la tendencia a la media, no así en modelo de Témez en la dispersión de los datos.

En otoño es cuando se presentan los mayores caudales, siendo los modelos de Témez, Sacramento, SCM y SMM los que están dentro de la media.

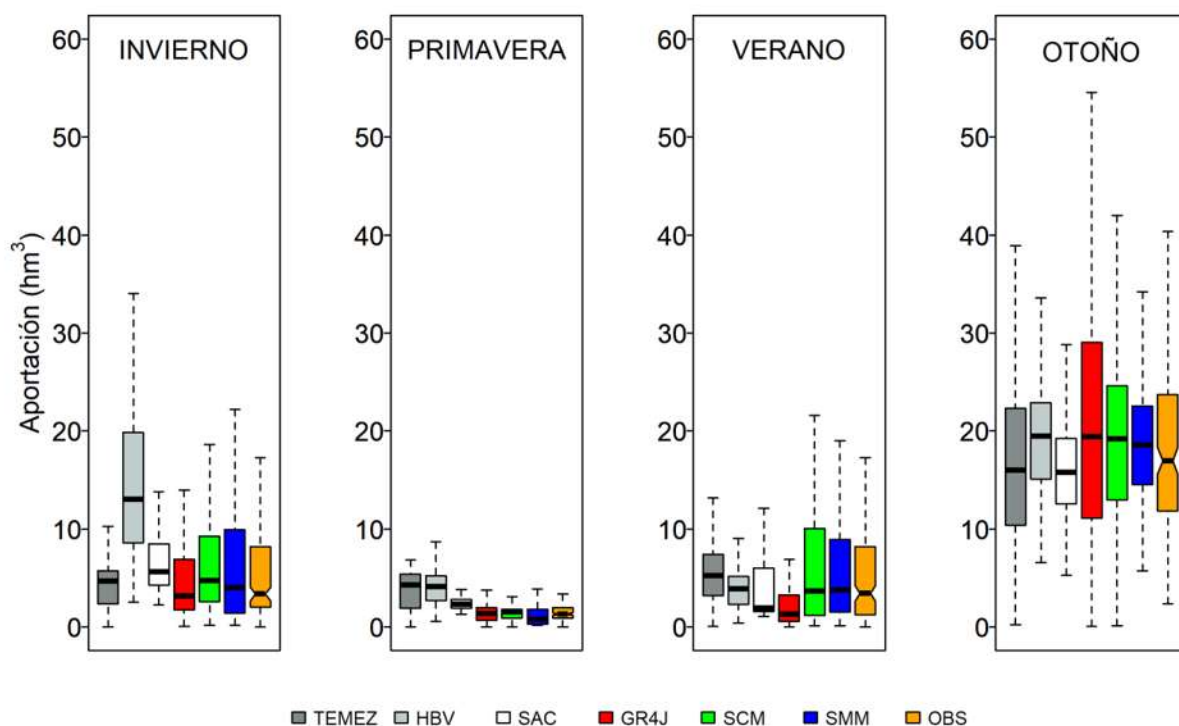


Figura 26. Análisis de caja y bigotes por estación del año

En la figura 27 se realizó un análisis de la probabilidad de superación de caudales, en el cual se encontró que existe un 50% o más de probabilidad de que caudales menores a 5 hm³ sean superados a excepción del SMM y Témez.

En general para caudales que se encuentran dentro del rango de 0-25 hm³ se observa una gran probabilidad de fallo, siendo los modelos GR4J y SMM los que tienen un mejor desempeño en este rango.

Y finalmente para los caudales máximos podemos observar que los modelos GR4J, SCM y SMM son los que logran alcanzar estos valores, los demás modelos tienen solo alcanzan los 40 hm³ muy por debajo de los observados.

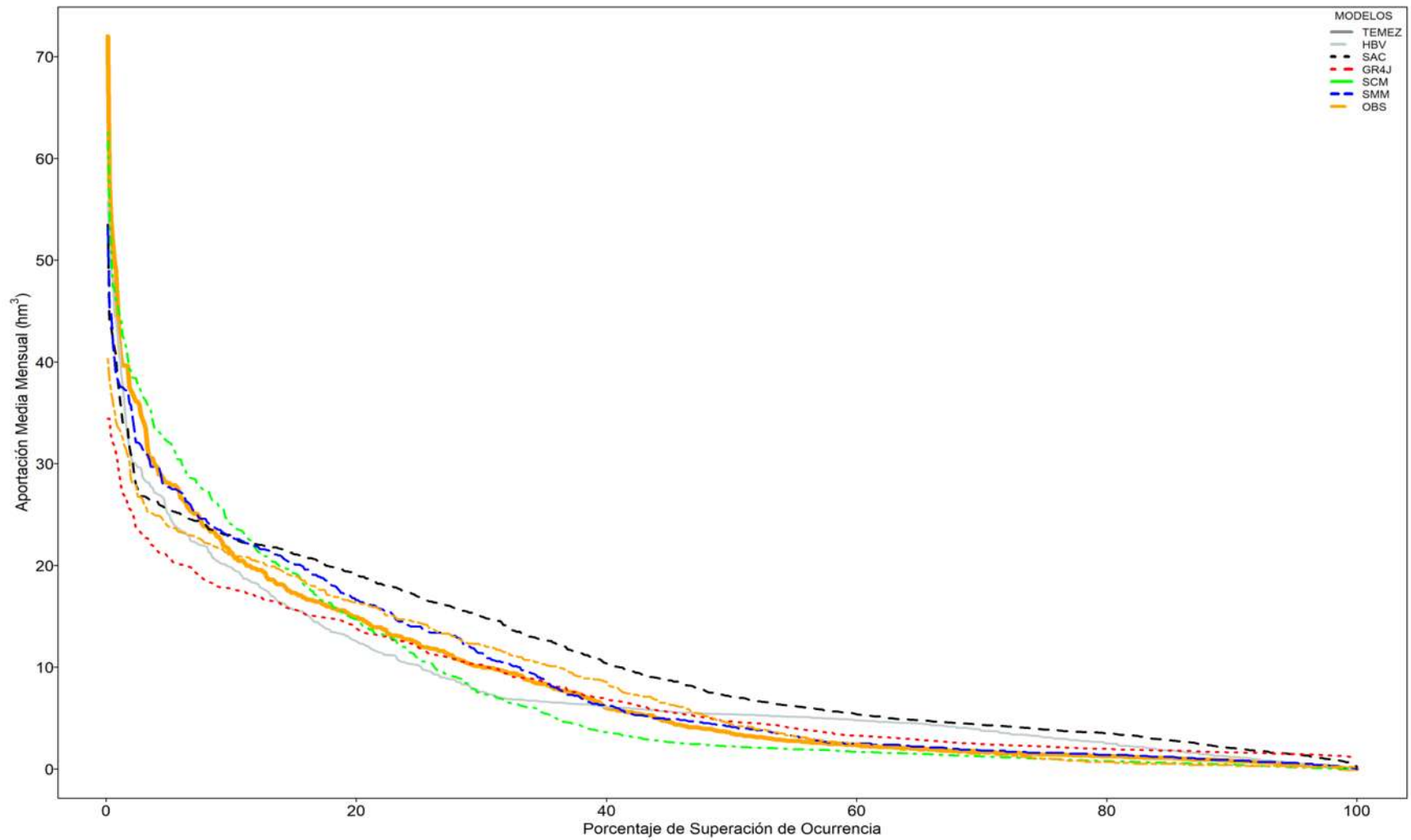


Figura 27. Análisis de porcentaje de superación de excedencia de caudales

En la figura 28 se hace un análisis de correlación lineal simple en donde encontramos que los modelos que tienen una menor dispersión son Sacramento y SMM, además se corrobora que los caudales bajos son los que tienden a presentar un mayor sesgo respecto a los valores observados.

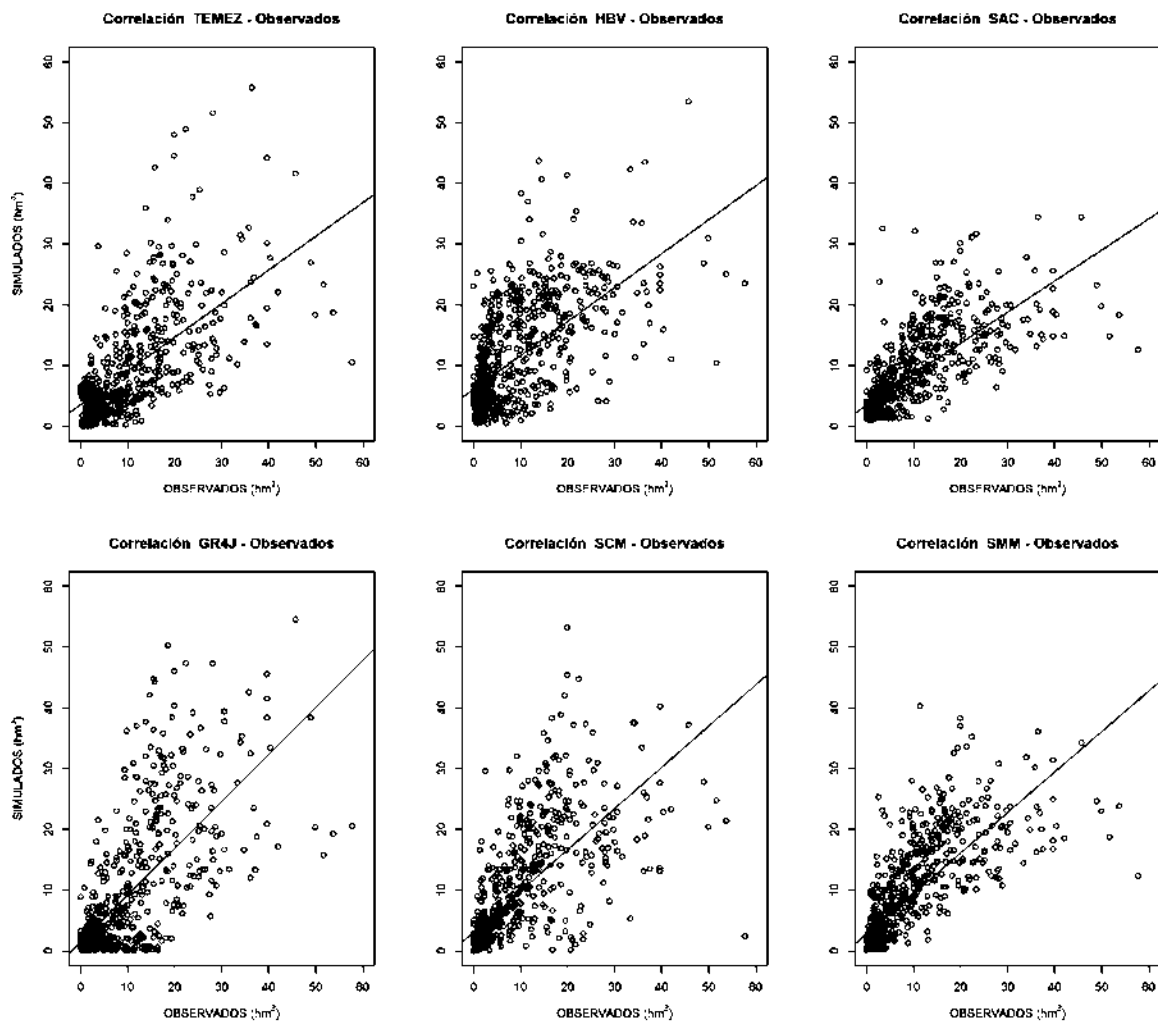


Figura 28. Correlación lineal datos simulados vs observados

Para continuar el análisis comparativo se pasó a la evaluación de los índices de bondad de ajuste haciendo referencia únicamente a los sugeridos por Moriasi en 2007.

Tabla 12. Escala de Índices de Bondad de Ajuste (Moriasi, 2007)

CALIBRACIÓN	ÍNDICE DE BONDAD DE AJUSTE					
	NSE	ln NSE	r	BIAS	RSR	KGE
MUY BUENA	$0.75 < X \leq 1.00$	$0.75 < X \leq 1.00$	$0.90 < X \leq 1.00$	$X \leq \pm 10$	$0.00 \leq X \leq 0.50$	$0.90 < X \leq 1.00$
BUENA	$0.65 < X \leq 0.75$	$0.65 < X \leq 0.75$	$0.75 < X \leq 0.90$	$\pm 10 < X \leq \pm 15$	$0.50 < X \leq 0.60$	$0.75 < X \leq 0.90$
SATISFACTORIA	$0.50 < X \leq 0.65$	$0.50 < X \leq 0.65$	$0.50 < X \leq 0.75$	$\pm 15 < X \leq \pm 25$	$0.60 < X \leq 0.70$	$0.50 < X \leq 0.75$
INSATISFACTORIA	$X \leq 0.50$	$X \leq 0.50$	$-1.00 < X \leq 0.50$	$X \geq \pm 25$	$X \geq 0.70$	$-\text{inf} < X \leq 0.50$

En la tabla 13 tenemos la evaluación de los índices obtenidos con cada uno de los modelos, siendo el SMM el que mejor desempeño presenta estadísticamente. Cabe señalar que los datos presentados corresponden a un periodo continuo de 64 años por lo que obtener calibraciones satisfactorias se considera un muy buen resultado.

Así mismo en la Guía para calibrar, validar y evaluar modelos hidrológicos de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y Biológicos donde se han encontrado algunos trabajos donde se emplean escalas distintas a la de Moriasi 2007, siendo ésta la más rígida para la evaluación de modelos.

Tabla 13. Índices de bondad de ajuste obtenidos

MODELO	ÍNDICE DE BONDAD DE AJUSTE					
	NSE	ln NSE	r	BIAS	RSR	KGE
TEMEZ	0.4	0.3	0.7	-1	0.76	0.6
HBV	0.3	0.2	0.6	29.9	0.84	0.5
SAC	0.54	0.5	0.7	-6.8	0.67	0.6
GR4J	0.4	0.4	0.7	-5.7	0.79	0.7
SCM	0.4	0.4	0.7	5.3	0.76	0.7
SMM	0.58	0.5	0.8	0.7	0.65	0.7

Tabla 14. Ponderación comparativa de los modelos hidrológicos

MODELO	Precisión		Variables Entrada	Variables de estado	Parámetros	Calibrador	Complejidad	Análisis Estadístico
	Meses Húmedos	Meses Secos						
TEMEZ	5/6	2/6	2	2	4	SCEUA	1	5
HBV	2/6	1/6	2	3	8	SCEUA	3	2
SAC	4/6	5/6	2	5	16 (11)	SCEUA	4	8
GR4J	5/6	4/6	2	2	4	SCEUA	1	5
SWAT	-	-	5	0	20	SUFI-2	5	-
SCM	4/6	6/6	2	0	2	Manual	1	5
SMM	6/6	5/6	3	2	6 (2)	Manual	2	9

Los análisis estadísticos, así como la experiencia adquirida en el proceso de estudio de los 7 modelos seleccionados para esta comparación se pueden observar en la tabla 14 en la cual se puede observar claramente el comportamiento de los modelos.

Posteriormente se aplicó el proceso analítico jerárquico (PAJ) para la comparación integral de todos los aspectos considerados en la tabla 14, lo cual nos permitirá definir una jerarquía para la selección del modelo hidrológico observando las fortalezas y debilidades de cada uno de los modelos seleccionados según los criterios analizados en la presente investigación.

Para el PAJ se empleó el esquema que se muestra en la figura 29 como estructura principal para realizar la priorización y ponderación de los criterios y alternativas para alcanzar el objetivo.

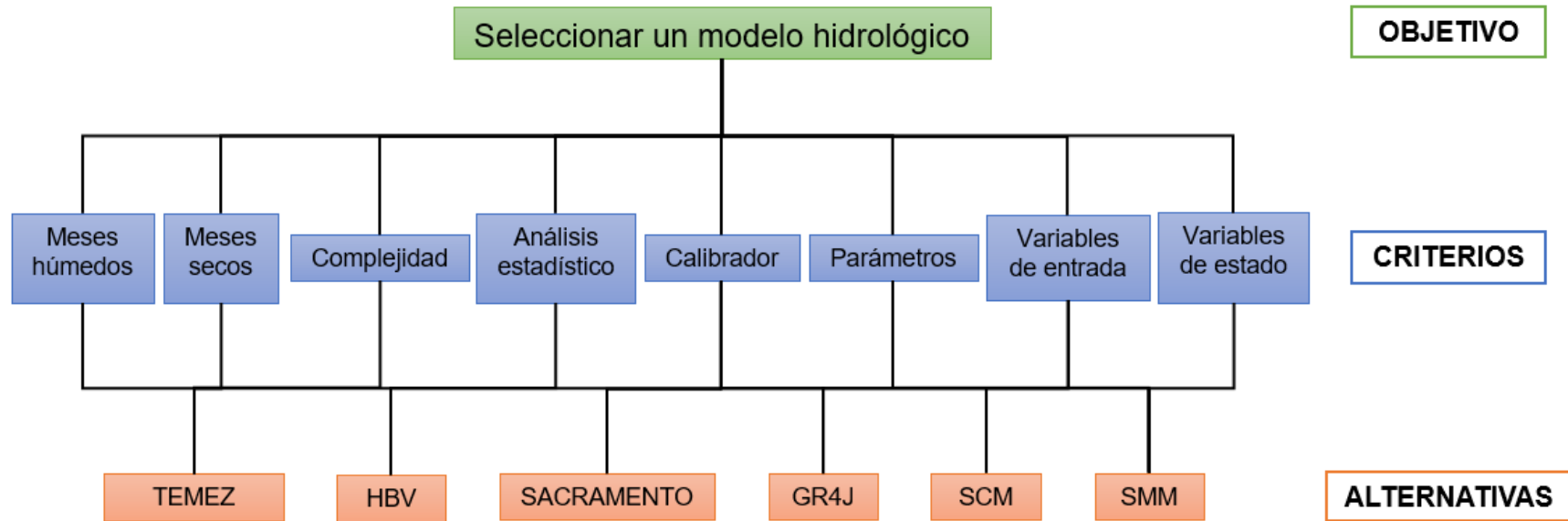


Figura 29. Esquema del Proceso Analítico Jerárquico

Tabla 15. Ponderación de criterios en el PAJ

CRITERIOS	Meses húmedos	Meses secos	Complejidad	Análisis estadístico	Calibrador	Parámetros	Variables de entrada	Variables de estado
Meses húmedos	1	3	2	1	3	2	2	2
Meses secos	1/3	1	1/2	1/3	½	1/3	1/2	1/2
Complejidad	1/2	2	1	1/3	½	1	1/3	1/2
Análisis estadístico	1	3	3	1	3	3	3	2
Calibrador	1/3	2	2	1/3	1	1	1/3	1/2
Parámetros	1/2	3	1	1/3	1	1	3	2
Variables de entrada	1/2	2	3	1/3	3	1/3	1	1
Variables de estado	1/2	2	2	1/2	2	1/2	1	1

En la tabla 15 se muestra la ponderación de criterios a partir de la cual se obtuvo el eigenvector para observar la importancia de cada uno de los criterios seleccionados con respecto al objetivo de la comparación, siendo el elemento de mayor importancia el análisis estadístico seguido por la precisión de la simulación de los meses húmedos como se observa en la tabla 15

Tabla 16. Eigenvector de Criterios

Clasificación de Criterios	Resultado (Eigenvector)
Meses húmedos	0,1977
Meses secos	0,05
Complejidad	0,0723
Análisis estadístico	0,2358
Calibrador	0,0817
Parámetros	0,138
Variables de entrada	0,1176
Variables de estado	0,1069

Posteriormente se realizó la ponderación de cada uno de los criterios con respecto de las alternativas, con un radio de consistencia de 0.0507, para finalmente obtener como resultado la tabla 17 y la figura 30, en las cuales se reafirma según los resultados anteriores que el SMM es el que obtiene una mejor ponderación.

Tabla 17. Clasificación de Alternativas

Clasificación de Alternativas	Meses húmedos	Meses secos	Complejidad	Análisis estadístico	Calibrador	Parámetros	Variables de entrada	Variables de estado	Resultado
Temez	0,0377	0,0029	0,0175	0,0212	0,0123	0,0286	0,0166	0,0168	0,1536
HBV	0,0099	0,0020	0,0060	0,0074	0,0069	0,0083	0,0210	0,0098	0,0714
Sacramento	0,0222	0,0105	0,0039	0,0767	0,0183	0,0030	0,0210	0,0043	0,1599
GR4J	0,0393	0,0060	0,0175	0,0212	0,0087	0,0286	0,0210	0,0168	0,1591
SCM	0,0222	0,0177	0,0175	0,0212	0,0167	0,0563	0,0210	0,0300	0,2027
SMM	0,0664	0,0110	0,0099	0,0883	0,0187	0,0130	0,0170	0,0291	0,2533

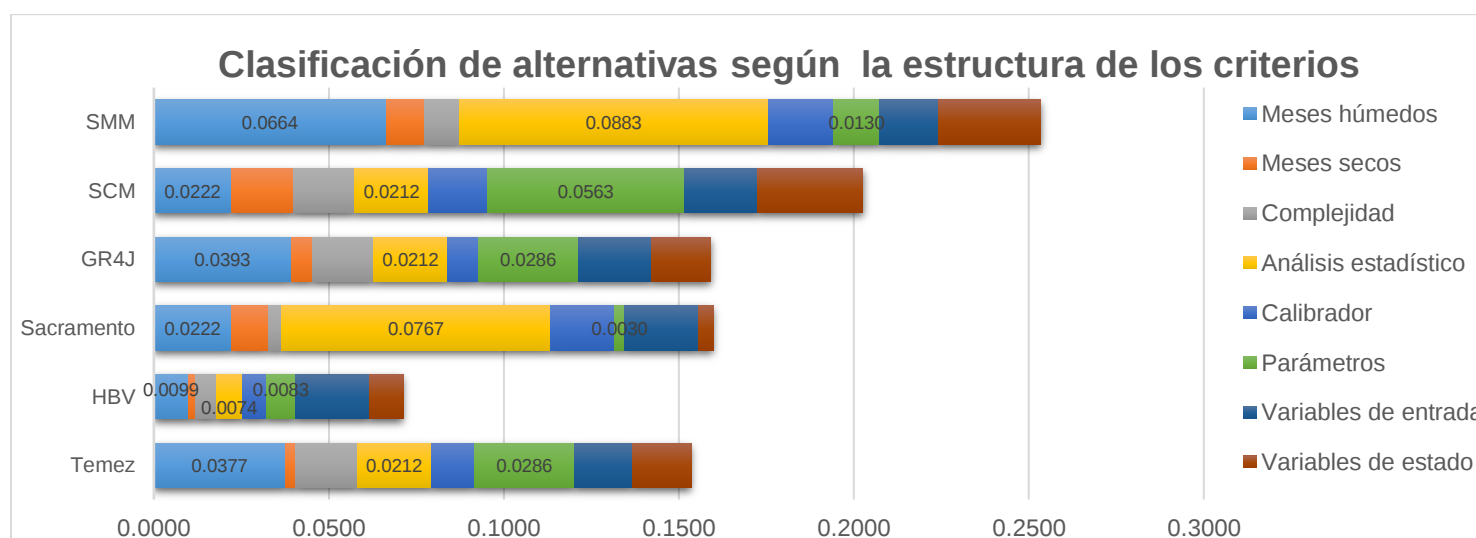


Figura 30. Gráfica de barras de la ponderación por criterio de las alternativas

7. Discusión de resultados

En 2013 Ocampo y Vélez plantearon un análisis multimodelo para capturar la incertidumbre asociada con la modelación mediante la aplicación de 7 modelos (Tetis, ABCD, ARMA (1,1), Témez, T, P); evaluando los parámetros estadísticos PBIAS, NSE y RSR. Siendo los modelos TETIS, abcd y ARMA (1,1) los que arrojaron mejores resultados, sin embargo, todos los modelos fueron calibrados satisfactoriamente.

Es de anotar que el modelo Témez presentó un menor error en la modelación de los caudales máximos; sin embargo, tuvo limitaciones para la modelación de los mínimos y la dispersión es mayor, lo cual explica el resultado no satisfactorio del período de simulación.

Coincidiendo con algunos de los estadísticos seleccionados para el presente trabajo.

En junio 2016, Ricaldi, realizó una comparación de modelos hidrológicos para la simulación de caudales medios mensuales en la cuenca del río Tomayapo. Se compararon los modelos que utilizan el coeficiente “c” de escorrentía: los modelos Témez y Thomas, de los resultados obtenidos se puede evidenciar que el modelo Témez se ajusta mejor a las condiciones hidrológicas de esta zona ya que los caudales simulados tienen mucha semejanza con los reales aforados tanto para años lluviosos como para años poco lluviosos; resulta muy aplicable para zonas con mucha variación pluviométrica. La diferencia principal con la zona de estudio del presente trabajo radica en la diferencia en las pendientes de la cuenca, el río Tomayapo

En septiembre de 2016, Astorayme, *et al*, propusieron la adecuación de cuatro modelos lluvia-escorrentía en la cuenca del río Chillón: Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), Soil Contribution (SOCONT), Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) y Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC). Los modelos presentan una resolución temporal y espacial, diaria y semidistribuida respectivamente. El periodo de simulación comprende de Sep/04 a Feb/14 siendo

evaluados por medio de indicadores estadísticos de desempeño. Al respecto los modelos HBV y SAC han sido los de mejor respuesta presentando un mejor desempeño en avenidas ($Nash > 0.8$) y los menores errores ($RRMSE < 0.51$). Sin embargo, la respuesta de los modelos GR4J y SOCONT no presentan gran variación en sus indicadores estadísticos de desempeño ($Nash > 0.73$ y $RRMSE < 0.65$). Los resultados obtenidos nos hacen pensar en el uso de más de un modelo para tomar decisiones. Nuevamente se coincide que el índice de Nash es uno de los más recomendados para la evaluación estadística de los modelos y se emplea solamente el análisis estadístico,

González (2018) muestra en su modelación superficial que el modelo de Témez presenta ciertas limitaciones para simular correctamente los cálculos en meses secos; como es notorio en los resultados arrojados en el presente estudio.

En la actualidad los sistemas computacionales están en constante desarrollo y facilitan el trabajo del hidrólogo gracias a la existencia de algoritmos de calibración como lo es el algoritmo evolutivo desarrollado por la universidad de Arizona empleado para la calibración de 4 de los modelos analizados. Por lo tanto, el hecho de que se cuente con un algoritmo que facilite la calibración del modelo seleccionado es de gran importancia ya que reduce el tiempo que el hidrólogo dedica a este procedimiento.

El SCM y el SMM estadísticamente arrojaron resultados muy similares, sin embargo, siguiendo el Criterio de Akaike el SMM tendría una menor calidad relativa con respecto al SCM, sin embargo existe una gran diferencia en la cantidad de partes del ciclo del agua que representa cada uno. Mientras el SCM únicamente representa la infiltración y el escurrimiento, el SMM representa la infiltración, el interflujo o flujo subsuperficial, la percolación, y el flujo base.

El modelo SWAT por su complejidad de construcción y calibración queda completamente descartado por la facilidad de armado y relativamente poca información de entrada necesaria para la construcción de los otros 6 modelos. El modelo HBV mostró poca precisión en la simulación de los escurrimientos tanto en los meses húmedos como

en los meses secos debido a las restricciones que tiene el mismo modelo en los parámetros de la celda subsuperficial y del acuífero.

El modelo de Témez a pesar de no tener un buen desempeño en la simulación del escurrimiento en los meses secos debido a la simplificación de los procesos de infiltración y comportamiento del acuífero, proporciona una muy buena representación de los meses húmedos, siendo uno de los modelos con mayor uso a nivel global por su bajo grado de complejidad y poca información requerida, es aceptable su uso en cuencas donde los volúmenes en época de secas no sean muy representativos, de esta manera se podría realizar una buena gestión de los recursos hídricos.

El modelo HBV presenta una gran variabilidad y un desempeño global regular, debido principalmente a que la modelación se realizó con series mensuales, siendo este recomendado para series diarias, sin embargo, al no contar con los datos suficientes tanto de entrada como de caudales diarios para la validación de la simulación, los parámetros se ajustaron para su funcionamiento con datos mensuales. Este modelo sería recomendado siempre y cuando se cuente con información diaria ya que a diferencia del modelo de Témez hace una mejor distribución del agua en el proceso lluvia escurrimiento.

El modelo de Sacramento fue uno de los que mejores resultados arrojó sin embargo al contar con 17 parámetros (simplificación a 11 para el presente trabajo) reduce la facilidad de calibración y aumenta la incertidumbre del modelo. Este modelo al igual que HBV es recomendado para información diaria, sin embargo, a diferencia de HBV tuvo un buen desempeño con datos mensuales.

El modelo GR4J se ha empleado para la simulación continua a pesar de haber sido diseñado para la modelación de eventos extremos, pero para este caso en particular de una serie histórica muy grande no arrojó los resultados esperados. Siendo un modelo de 4 parámetros al igual que Témez, los gastos máximos los simuló de manera satisfactoria, no así los caudales mínimos.

El SCM a pesar de arrojar buenos resultados requiere de la calibración de un caudal base que se considera constante a lo largo de todo periodo de simulación. También por otra parte requiere de su calibración modificando únicamente la evapotranspiración, lo cual simplifica demasiado el ciclo del agua, restando importancia a otras partes del ciclo del agua. Por ello y a pesar de obtener buenos resultados este modelo no es recomendable para su empleo en la gestión de sistemas de recursos hídricos.

Los análisis estadísticos que se realizaron no muestran diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes modelos, sin embargo la aplicación del PAJ, que permite comparar, ampliar y priorizar las diferencias entre los diversos criterios de selección de un modelo hidrológico. Adicionalmente el valor respuesta del método no solo consiste en encontrar el resultado final óptimo, sino que distinguen claramente los pasos intermedios y permite identificar los elementos que más contribuyen al resultado.

Por otro lado, la interfaz gráfica que ofrece WEAP, programa para la gestión integral de los recursos hídricos en el cual se encuentra incorporado el modelo SMM ofrece la oportunidad de realizar automáticamente la clasificación de usos de suelo de la zona de estudio lo cual es de gran ayuda para la parametrización de la misma, dando la oportunidad de establecer parámetros por uso de suelo de manera más sencilla en vez de un solo parámetro general para toda la zona de estudio y dada la gran diversidad de usos de suelo en la cuenca del Lago de Cuitzeo, este modelo permite parametrizar mejor y obtener mejores resultados.

VII. Conclusiones

El análisis comparativo permite concluir que el SMM fue el modelo que arrojó mejores resultados, simulando la mayor parte del ciclo del agua con 6 parámetros de los cuales solo 2 de ellos (RRF para calibrar los meses húmedos y RZC para los meses secos) son los que aportan mayor variabilidad al modelo según lo observado en el análisis de sensibilidad del modelo. Por lo tanto, fueron los únicos empleados para la calibración de modelo.

VIII. Bibliografía

- Adeloye, A., & Montaseri, M. (2002). Preliminary streamflow data analyses prior to water resources study. *Hidrologycal Sciences Journal*, 679-692.
- Andreu, J. (2007). *Aquival, Modulo para el pre proceso y simulación de Acuíferos*. (U. P. Valencia, Ed.) Valencia, España: Departamento de Ingeniería y Medio Ambiente.
- Andreu, J., Capilla, J., & S., S. (1995). *Sistema de Soporte a la Decisión para la Planificación de Recursos Hídricos. AQUATOOL*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Aparicio M., F. J. (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.
- Arnold, J. G., Williams, J., Nicks, A. D., & Sammons, N. B. (1990). *A basin scale simulation model for soil and water resources management*. Texas A&M University Press.
- Bergström, S. (1991). Principles and confidence in hydrological modelling. *Hydrology Research*, 123-136.
- Beven, K. (1989). Changes ideas in hydrology- The case of physically based models. *Journal of Hydrology*, 157-162.
- Bravo, M., & Barrera, G. (2012). *Contribuciones para el desarrollo sostenible de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán*. INIFAP-UNAM.
- Brooks, K. N. (1992). *Surface hydrology*. University of Minnesota Press.
- Cisneros, H., & Pelczar, I. (2007). Comparación de la eficacia de tres modelos para escurrimientos en una cuenca rural. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXII(1), 31-45.
- Clark, M. P., Slater, A. G., Rupp, D. E., Woods, R. A., Vrugt, J. A., Gupta, H. V., . . . Hay, L. E. (2008). Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models. *Water Resources Research*, 1-14.
- CLICOM. (19 de octubre de 2016). (S. M. NAcional, Productor)
- CLICOM. (2016). *Servicio Meteorológico Nacional*. Obtenido de <http://clicom-mex.cicese.mx>

- CONABIO. (2016). Recuperado el 2016 de octubre de 19, de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (2013). Estadísticas del Agua en México. México D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2015). NOM-011-CONAGUA-2015. Conservación del recurso agua. Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2016). BANDAS. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx>
- CONAGUA. (2016). INAI. Recuperado el 26 de Septiembre de 2016, de <https://www.infomex.org.mx>
- CONAGUA. (2017). BANDAS. Recuperado el 2 de Enero de 2017, de <http://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- CONAGUA. (2017). SMN. Recuperado el 2 de Enero de 2017, de www.smn.cna.gob.mx
- D. N. Moriasi, J. G. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 885-900.
- Dávila R., M. (s.f.). Introducción a los Sistemas Expertos.
- DHI, 2003, MIKE BASIN: Rainfall-Runoff Modeling Reference Manual, Danish Hydraulic Institute, Copenhagen, Dinamarca.
- Dingman, S. L. (2002). Physical Hydrology. Waveland Press Inc. Long Grove, Illinois.
- Dooge, J. C. (1986). Looking for hydrologic laws. Water Resources Research, 46S-58S.
- DWRC. 2000. CALSIM Water Resources Simulation Model. Department of Water Resources, BayDelta Office, California
- García R., 2011. Simulación numérica del transporte de contaminantes, en el Río Grande de Morelia. Tesis de Maestría. México. D.F.
- Horton, R. E. (1933). The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle. Eos Transactions American Geophysical Union, 446-460.
- Imbeau, M. E. (1892). La Durance: Regime, crues et inondations. Annual Ponts Chaussees. Serbia.
- INEGI. (2017). Recuperado el 17 de Enero de 2017, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.inegi.org.mx/>

- Kampf, S. K., & Burges, S. J. (2007). A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models. *Water Resources Research*, 43(5).
- Legates, D. R. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 233-241.
- Martínez Menchón, M., & Alonso Sarría, F. (2005). Validación de la extracción automática de cauces y cuencas con SIG. Obtención del umbral de área óptimo. Universidad de Murcia.
- Moriasi, D. N.-M. (2012). Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1241-1247.
- Mulvany, T. J. (1851). On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rain fall and of flood discharges in a given catchment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 18–33.
- Nash, J. E. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hidrology*, 282-290.
- Ocampo, O., & Vélez, J. (2015). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43-58. doi:<https://doi.org/10.22395/rium.v13n24a3>
- Pardo, J. (2016). Gestión integrada de recursos hídricos en la cuenca del lago de Cuitzeo, ante el efecto del cambio climático. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Pérez Mójica, J. Z. (2016). Evaluación del Riesgo de sequía en la cuenca del Río Tepalcatepec RH18J. Morelia, Mich.: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Perrin, C. M. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279, 275-289.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall.
- Rolston, D. W. (1988). *Principios de inteligencia artificial y sistemas expertos*. McGraw Hill.
- Saaty, T. (1980). *The Analytical Hierchy Process*. USA: Mc Graw Hill.

- Sherman, L. (Abril de 1932). Stream-flow from rainfall by the unit-graph. Eng. News-Rec., 108, 501-505.
- Silva, F. &. (2017). Sensitivity analysis of the water balance components of the weap model for the high rio verde grande basin. IV Inovagri International Meeting.
- Singh, V. P. (1988). Hydrologic Systems. Volume 1: Rainfall runoff modelling. New Jersey: Prentice Hall.
- Solera, A. P. (2007). Aquatool DMA SSD para la planificación de cuencas: Manual de Usuario. Valencia, España.
- Solera, A., Paredes, J., & Andreu, J. (2012). Capítulo IV. Datos Hidrológicos.
- Stockholm Environment, I. (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Boston.
- Tellez, A. F. (2016). Modelación hidrológica del sistema de explotación Gallégo-Cinca de la Confederación Hidrográfica del Ebro mediante el modelo de precipitación-escorrentía HBV (Vol. Tesis de Maestría). Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Témez, J. (1977). Modelo matemático de transformación precipitación aportación.
- Todini, E. (1988). Rainfall-runoff modeling – Past, present and future. Journal of Hydrology, 341–352.
- Viessman, W., Knapp, J., & Lewis, G. (1989). Introduction to Hydrology. New York: Harper and Row Publishers.
- Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2004). Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. Water Resources Management, 591-612.