



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA
CUENCA DEL RIO TEPALCATEPEC, NOM-011,HBV”

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

DANIEL SALVADOR NIETO ESTRADA

Director de tesis

SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

Doctora en ingeniería de caminos, canales y puertos

Co-director de tesis

JAFET ZEMRI PÉREZ MOJICA

Maestro en ciencias en ingeniería ambiental

Morelia Michoacán a mayo de 2016



DEDICATORIA:

A Evelyn Itzel por ser mi apoyo, fuente de inspiración, por su gran apoyo en el desarrollo del presente trabajo, pero sobre todo por su amor incondicional, con todo mi amor y esfuerzo por y para ti.

-Daniel Salvador-

AGRADECIMIENTOS:

A Dios por darme el don de la vida además de salud y paciencia en este largo camino

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por permitirme estudiar en el programa de Licenciatura en Ingeniería Civil.

A la facultad de Ingeniería Civil por el apoyo y las facilidades brindadas a lo largo de estos cinco años.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe por el apoyo, sus enseñanzas, su tiempo, su dedicación, su esmero y motivación recibida de su parte.

Al maestro Jafet Zemri Pérez Mojica por su asesoría, sus conocimientos transmitidos, su tiempo y su siempre buena disposición a ayudarme.

A todos los profesores que me impartieron clases durante mi carrera profesional ya que con su trabajo me hicieron más llano el camino.

A mis padres Gabriela y Salvador por su amor y apoyo a lo largo de mi vida.

A mis hermanas Claudia, Mónica, Montserrat y María.

INDICE

RESUMEN:	10
ABSTRACT:	11
1.-INTRODUCCIÓN:	12
1.1.-Ciclo del agua	12
1.2.-Hidrología.....	16
1.3.-Concepto de cuenca.....	17
2.-MARCO TEÓRICO	19
2.1.-Modelos matemáticos	19
2.1.1.-Modelos de simulación hidrológica	20
2.1.1.1.-Modelos determinísticos	20
2.1.1.2.-Modelos estocásticos	21
2.1.1.3.-Modelos de simulación particularizada.....	21
2.1.1.4.-Modelos sintéticos	21
2.1.2.-Modelo hidrológico HBV	21
2.1.2.1.- Modulo de precipitación efectiva y humedad del suelo:.....	23
2.1.2.2.-Modulo de evapotranspiración:.....	24
2.1.2.3.-Modulo de estimación del escurrimiento:	24
2.1.3.-Herramienta de simulación: Evalhid.....	28
2.1.3.1.-Características del programa y modelos disponibles	28
2.1.4.-Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015	29
3.-HIPÓTESIS	33
4.-OBJETIVOS	34
4.1.-Objetivo general.....	34
4.2.-Objetivos particulares	34
5.-JUSTIFICACIÓN	35
6.-METODOLOGÍA	36
6.1.-Caracterización de la zona de estudio	36
6.2.-Recopilacion de datos e información.....	36
6.2.1.-Curva masa doble.....	37

6.2.2.-Método IDW	38
6.2.3.-Estaciones hidrométricas	39
6.2.4.-Banco nacional de datos de aguas superficiales (bandas):.....	40
6.3.-Análisis y validación estadística de la información	40
6.3.1.-Concepto de homogeneidad de la serie	40
6.3.2.-Prueba de Helmert.....	41
6.3.3.-Prueba de secuencias.....	42
6.3.4.-Prueba t de student	42
6.3.5.-Prueba de Cramer.....	44
6.3.6.-Prueba de independencia.....	45
6.4.- Restitución a régimen natural.....	47
6.5.- Aplicación y validación del modelo hidrológico HBV	49
6.5.1.-Eficiencia de Nash-Sutcliffe:	49
6.5.2.-Coeficiente de Nash-Sutcliffe:	50
6.5.3.- Coeficiente de correlación de Pearson (r^2):	51
6.5.4.-Coeficiente de asimetría:.....	51
6.5.5.-Algoritmo autocalibrador SCE-UA	51
6.6.- Aplicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015	52
7.-RESULTADOS	53
7.1.-Zona de estudio	53
7.1.1.-Región hidrológica 18j: cuenca del rio Tepalcatepec	53
7.1.2.-Geología.....	56
7.1.3.-Relieve	58
7.1.4.-Vegetación	59
7.1.5.-Morfoedafología	61
7.1.6.-Acuíferos.....	66
7.2.-Estaciones climatológicas	67

7.3.-Base de datos climatológica nacional (CLICOM):.....	67
7.4.-Estaciones hidrométricas	69
7.5.-Modelación hidrológica con la NOM-011-CNA-2015	71
7.6.-Modelación hidrológica con HBV.....	84
8.-CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	108
8.1.-Conclusiones:	108
8.2.-Recomendaciones y líneas futuras de investigación:	109
9.-BIBLIOGRAFÍA:	110
Anexo 1. Calculo de percentiles.	111
Anexo 2. Método de Thornthwaite.	113
Anexo 3. Polígonos de Thiessen.....	116
Anexo 4. Modelación hidrológica con el método de Témez.....	118

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1	Parámetros del modelo hidrológico HBV.	27
Tabla 2	Clasificación del tipo de suelo de acuerdo a la NOM-011-CNA-2015	30
Tabla 3	Valores de K de acuerdo con el uso de suelo, NOM-011-CNA-2015.	31
Tabla 4	Fórmula para calcular C_e de acuerdo con el valor de K.....	31
Tabla 5	Rango del número de secuencias (u) para un registro homogéneo.	42
Tabla 6	Nivel de significancia para la prueba t de student.....	43
Tabla 7	Resultados de pruebas estadísticas a estaciones climatológicas.....	47
Tabla 8	Valores de referencia en el criterio de Nash-Sutcliffe.....	50
Tabla 9	Clima en la cuenca del río Tepalcatepec.	55
Tabla 10	Municipios que abarcan la cuenca del río Tepalcatepec.	56
Tabla 11	Geología en la cuenca del río Tepalcatepec.	57
Tabla 12	Vegetación en la cuenca del río Tepalcatepec.....	59
Tabla 13	Tipo de suelo en la cuenca del río Tepalcatepec.	62
Tabla 14	Estaciones climatológicas principales.	68
Tabla 15	Estaciones hidrométricas dentro de la cuenca del río Tepalcatepec.....	70
Tabla 16	Escorrentamiento anual e infiltración de acuerdo a la NOM-011-CNA-2015.	80
Tabla 17	Escorrentamiento anual e infiltración de acuerdo a la NOM-011-CNA-2015.	81
Tabla 18	Escorrentamiento anual e infiltración de acuerdo a la NOM-011-CNA-2015.	82
Tabla 19	Escorrentamiento e infiltración anual de acuerdo a la NOM-011-CNA-2015.	83
Tabla 20	Microcuencas y sus características en la estación 18129.	86
Tabla 21	Microcuencas y sus características en la estación 18201.	88
Tabla 22	Microcuencas y sus características en la estación 18202.	91
Tabla 23	Microcuencas y sus características en la estación 18452.	93
Tabla 24	Microcuencas y sus características en la estación 18181.	96
Tabla 25	Microcuencas y sus características en la estación 18494.	98
Tabla 26	Resultados de funciones objetivas en la cuenca del río Tepalcatepec.	100
Tabla 27	Escorrentamiento anual de acuerdo a HBV	101
Tabla 28	Escorrentamientos anuales por todos los métodos.....	105
Tabla 29	Infiltraciones anuales por todos los métodos.....	107
Tabla 30	Valores de percentiles para porcentaje de llenado de datos.	112
Tabla 31	Valores de percentiles para cantidad de años con datos.....	112
Tabla 32	Valores de percentiles para datos más recientes.	112
Tabla 33	Valores de percentiles para distancias al centro de gravedad.....	112
Tabla 34	Valores de K_a de Thornthwaite.....	114
Tabla 35	Rangos para parámetros de calibración del modelo de Témez (Témez 1977).....	125
Tabla 36	Resultados de funciones objetivas en la cuenca del río Tepalcatepec.	131
Tabla 37	Parámetros de Témez en la cuenca del río Tepalcatepec.	132
Tabla 38	Escorrentamiento anual de acuerdo a Témez.....	133

INDICE DE FIGURAS:

Figura 1 Ciclo hidrológico	14
Figura 2 Distribución del agua	14
Figura 3 Usos del agua en México.	15
Figura 4 Procesos generales del modelo HBV	22
Figura 5 Idealización del depósito lineal.....	25
Figura 6 Datos de entrada y salida del programa Evalhid.....	29
Figura 7 Cuenca del río Tepalcatepec.	54
Figura 8 Climas en la cuenca del río Tepalcatepec.	55
Figura 9 Municipios que abarcan la cuenca del río Tepalcatepec.....	56
Figura 10 Geología en la cuenca del río Tepalcatepec.....	57
Figura 11 Vegetación en la cuenca del río Tepalcatepec.	59
Figura 12 Tipo de suelo en la cuenca del río Tepalcatepec.....	62
Figura 13 Acuíferos en la cuenca del río Tepalcatepec.....	66
Figura 14 Estaciones climatológicas cercanas a la cuenca del río Tepalcatepec.	68
Figura 15 Estaciones hidrométricas dentro de la cuenca del río Tepalcatepec.	70
Figura 16 Usos de suelo dentro de la cuenca del río Tepalcatepec.	71
Figura 17 Textura del suelo en la cuenca del río Tepalcatepec.....	72
Figura 18 Valores de K en la cuenca del río Tepalcatepec.	72
Figura 19 Mapa de precipitación (mm) con datos de subcuencas.....	74
Figura 20 Mapa de Evapotranspiración (mm) con datos de subcuencas.	74
Figura 21 Mapa de coeficiente de escurrimiento (adim) con datos de subcuencas.....	75
Figura 22 Mapa de lámina de agua (mm) con datos de subcuencas.	75
Figura 23 Mapa de precipitación (mm) con datos de microcuencas.	76
Figura 24 Mapa de evapotranspiración (mm) con datos de microcuencas.	76
Figura 25 Mapa de coeficiente de escurrimiento (adim) con datos de microcuencas.....	77
Figura 26 Mapa de lámina de agua (mm) con datos de microcuencas.....	77
Figura 27 Mapa de precipitación (mm) con datos de polígonos de Thiessen.	78
Figura 28 Mapa de evapotranspiración (mm) con datos de polígonos de Thiessen.....	78
Figura 29 Mapa de coeficiente de escurrimiento (adim) con datos de polígonos de Thiessen.	79
Figura 30 Mapa de lámina de agua (mm) con datos de polígonos de Thiessen.....	79
Figura 31 Delimitación de las microcuencas.	84
Figura 32 Polígonos de Thiessen para la cuenca del río Tepalcatepec.	85
Figura 33 Estación a calibrar 18129.....	86
Figura 34 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18129.	87
Figura 35 Resultados anuales de la calibración de la estación 18129.....	87
Figura 36 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18129.	87
Figura 37 Estación a calibrar 18201.....	88
Figura 38 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18201.	89
Figura 39 Resultados anuales de la calibración de la estación 18201.....	89
Figura 40 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18201.	90
Figura 41 Estación a calibrar 18202.....	90

Figura 42	Resultados mensuales de la calibración de la estación 18202.	91
Figura 43	Resultados anuales de la calibración de la estación 18202.	92
Figura 44	Resultados del año medio de la calibración de la estación 18202.	92
Figura 45	Estación a calibrar 18452.	93
Figura 46	Resultados mensuales de la calibración de la estación 18452.	94
Figura 47	Resultados anuales de la calibración de la estación 18452.	94
Figura 48	Resultados del año medio de la calibración de la estación 18452.	95
Figura 49	Estación a calibrar 18181.	95
Figura 50	Resultados mensuales de la calibración de la estación 18181.	96
Figura 51	Resultados anuales de la calibración de la estación 18181.	97
Figura 52	Resultados del año nuevo de la calibración de la estación 18181.	97
Figura 53	Estación a calibrar 18494.	98
Figura 54	Resultados mensuales de la calibración de la estación 18494.	99
Figura 55	Resultados anuales de la calibración de la estación 18494.	99
Figura 56	Resultados del año nuevo de la calibración de la estación 18494.	99
Figura 57	Escurrecimientos anuales por todos los métodos.	102
Figura 58	Infiltraciones anuales por todos los métodos.	102
Figura 59	Infiltraciones mensuales por todos los métodos.	103
Figura 60	Ciclo hidrológico simulado por Témez	118
Figura 61	Entradas y salidas del modelo Témez.	119
Figura 62	Resultados mensuales de la calibración de la estación 18129.	125
Figura 63	Resultados anuales de la calibración de la estación 18129.	125
Figura 64	Resultados del año medio de la calibración de la estación 18129.	126
Figura 65	Resultados mensuales de la calibración de la estación 18201.	126
Figura 66	Resultados anuales de la calibración de la estación 18201.	126
Figura 67	Resultados del año medio de la calibración de la estación 18201.	127
Figura 68	Resultados mensuales de la calibración de la estación 18202.	127
Figura 69	Resultados anuales de la calibración de la estación 18202.	127
Figura 70	Resultados del año medio de la calibración de la estación 18202.	128
Figura 71	Resultados mensuales de la calibración de la estación 18452.	128
Figura 72	Resultados anuales de la calibración de la estación 18452.	128
Figura 73	Resultados del año medio de la calibración de la estación 18452.	129
Figura 74	Resultados mensuales de la calibración de la estación 18181.	129
Figura 75	Resultados anuales de la calibración de la estación 18181.	129
Figura 76	Resultados del año medio de la calibración de la estación 18181.	130
Figura 77	Resultados mensuales de la calibración de la estación 18494.	130
Figura 78	Resultados anuales de la calibración de la estación 18494.	130
Figura 79	Resultados del año medio de la calibración de la estación 18494.	131

RESUMEN:

En los últimos años gracias a los avances de la tecnología en el campo de las computadoras principalmente de las computadoras personales, la introducción de métodos matemáticos en todas las ciencias se ha acelerado. Como consecuencia directa los modelos matemáticos se han convertido en una valiosa herramienta de solución de problemas en el ámbito hidrológico.

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias.

El modelo hidrológico HBV un modelo conceptual y agregado de precipitación-escurrimiento, ampliamente usado en pronósticos hidrológicos y en cálculo de balance hídrico, que ha sido probado en más de 30 países con gran éxito en sus resultados. Pertenece a la clase de modelos que intentan abarcar las partes más importantes del proceso de lluvia escurrimiento, empleando una simple estructura y relativamente pocos parámetros a calibrar.

Fue desarrollado por el instituto meteorológico e hidrológico sueco (SMHI), para predecir los escurrimientos es sus centrales hidroeléctricas en 1970, aunque se ha ido mejorando constantemente, su estructura básica no ha cambiado y en la actualidad se usa la versión HBV light desarrollado por el instituto de ingeniería hidráulica de Stuttgart en Alemania. Por su parte de NOM-015-CNA-2015 establece un método para la determinación del agua media anual que escurre en la superficie del área de estudio y esta se puede aplicar en cuencas no aforadas, por lo cual en el presente trabajo se hará una comparación con el método HBV ampliamente probado en muchos países.

Palabras clave: hidrología, recursos hídricos, escurrimiento, balance hídrico, cuenca.

ABSTRACT:

In the last years thanks of the advances in technology in the field of computers mainly in personal computers, the introduction of mathematical methods in all the science it has accelerated. As a direct result the mathematical models they have become in a valious problem solving tool in the hydrogeological ambit.

Hydrologic modeling is an important tool for the study of avenues that has spread worldwide, mainly in developed countries. Today, with the use of these models , analysis and flood prevention is done ; Besides, you can handle realistic enough or predictable scenarios that offer a degree of confidence for decision making , whether on land use around rivers or demanding design criteria of works and infrastructure capable of supporting and function properly in Emergency situations. Even alerting the civil protection services and establish protocols to potentially dangerous situations by heavy rains.

The HBV hydrological model and added a conceptual rainfall-runoff model, widely used in hydrological forecasting and calculating water balance, which has been tested in more than 30 countries with great success in their results. It belongs to the class of models that try to cover the most important parts of rain runoff process using a simple structure and relatively few parameters to be calibrated.

It was developed by the meteorological and hydrological Swedish Institute (SMHI), to predict runoff in its hydroelectric plants in 1970, although it has been improving steadily , its basic structure has not changed and today the HBV light version developed is used by the hydraulic engineering institute of Stuttgart in Germany.

Meanwhile NOM - 015- CNA- 2015 establishes a method for determining the annual average water running on the surface of the study area and this can be applied in Ungauged basins, so in this work there will be a method compared to the HBV extensively tested in many countries.

Keywords: Hidrology, water resources, runoff, hydric balance, basin.

1.-INTRODUCCIÓN:

Los recursos hídricos destacan entre los demás recursos naturales, ya que el agua es vital para la vida en la tierra, es esencial para el desarrollo social y económico de la sociedad actual ya que el aumento en las actividades sociales, industriales y agrícolas así como la mejora en la calidad de vida exigen una mayor cantidad de agua lo que la vuelve un bien escaso y costoso. Además la multifuncionalidad del agua provoca intereses confrontados al ser con frecuencia contradictorios y competitivos los objetivos que se persiguen, a todo esto sumamos condicionantes políticos, socioeconómicos, legales e incluso institucionales.

En México la mayor parte de agua que se usa para satisfacer las demandas de agua se obtiene de fuentes superficiales es aquí donde radica la importancia de cuantificar de manera eficiente los recursos hídricos.

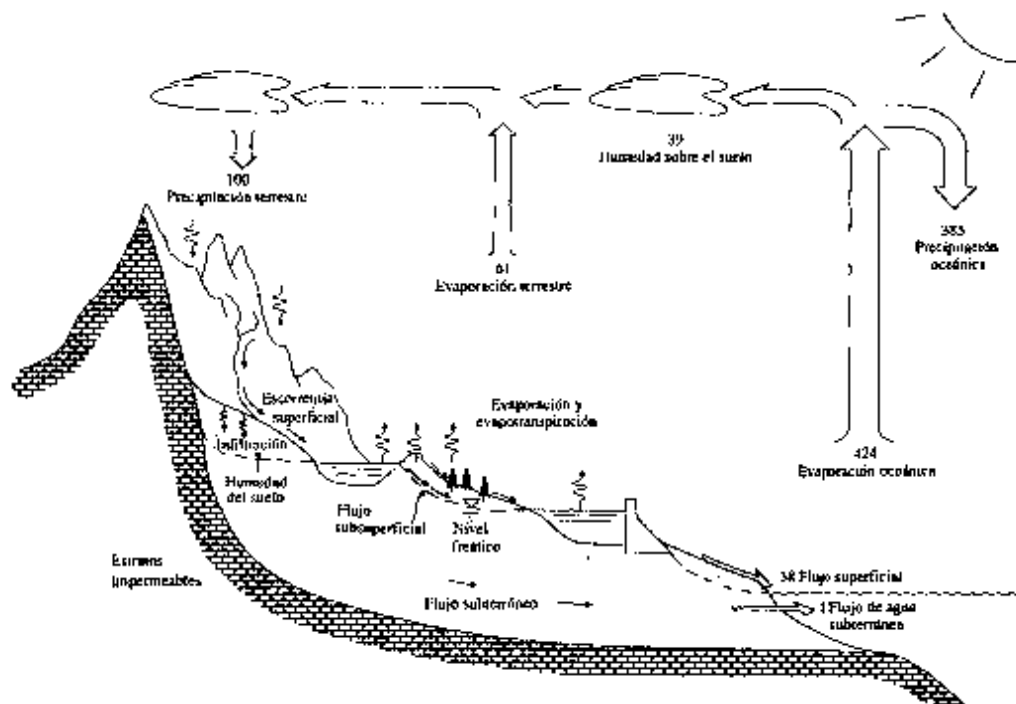
A principios de este milenio el gobierno mexicano declaro el tema del agua como un problema de interés nacional, aunque en términos absolutos el país no carezca de agua, la desigualdad en la repartición de este recurso en el territorio, su contaminación y la falta de mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas son responsables de su escasez.

Por todo lo anterior es imprescindible la mejora del conocimiento de los recursos hídricos así como la eficiencia en la gestión de los mismos, esto ha llevado a los expertos en el tema a desarrollar nuevas herramientas que traten de reproducir lo más aproximado posible los efectos que se producen en la tierra por el fenómeno lluvia-escurrimiento.

1.1.-Ciclo del agua

El ciclo hidrológico es concepto fundamental en la hidrología, se considera que el ciclo hidrológico no tiene un principio ni un fin y su descripción puede comenzar en cualquier parte de este proceso, el agua superficial o que se encuentra más próxima a la superficie de la tierra se evapora bajo el efecto de la radiación que ejerce el sol a los cuerpos de agua terrestres, el vapor de agua que se genera se eleva y transporta a la atmosfera terrestre en

forma de nubes y se condensa, posteriormente tiende a caer de nuevo a la tierra en forma de precipitación o lo que comúnmente conocemos como lluvia, en su camino a la superficie terrestre las gotas de agua pueden caer de nuevo a algún cuerpo de agua, pueden ser interceptadas por plantas o construcciones luego fluye por la superficie hasta llegar a las corrientes o se infiltra, el agua que es interceptada y una parte de la que se infiltra es evaporada de nuevo, una parte de la que corre superficialmente llega hasta los mares y océanos o los grandes cuerpos de agua como lagos o presas y otra se evapora, del agua que se infiltra una parte es absorbida por las plantas y después es transpirada hacia a la



atmósfera, la otra parte del agua infiltrada llega masas de agua subterráneas donde puede pasar mucho tiempo hasta que llegue a los océanos (Aparicio 1992).

Figura 1 Ciclo hidrológico

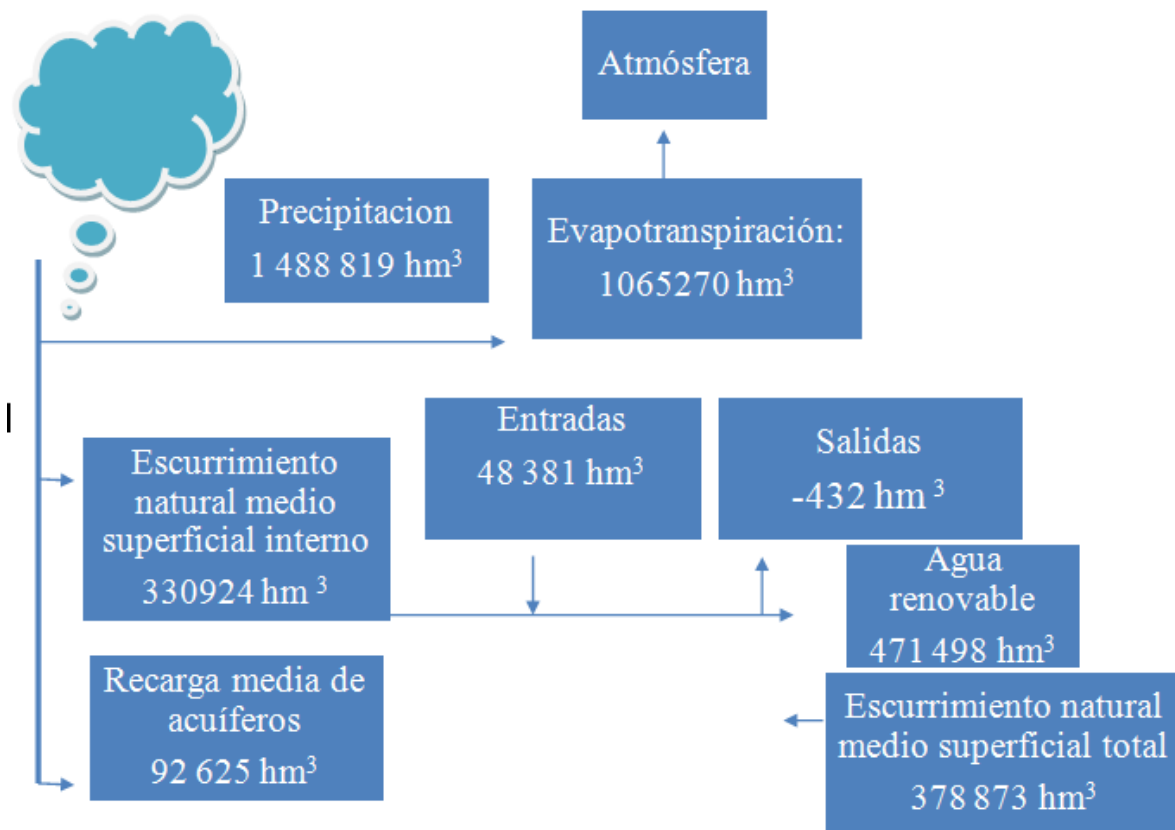


Figura 2 Distribución del agua

El agua es la fuente de toda la vida en la Tierra. Su distribución es muy variable: en algunas regiones es muy abundante, mientras que en otras escasea. Sin embargo, contrario a lo que muchas personas creen, la cantidad total de agua en el planeta no cambia.

El 97.5% del agua en la tierra se encuentra en los océanos y mares de agua salada, únicamente el restante 2.5% es agua dulce. Del total de agua dulce en el mundo, 69% se encuentra en los polos y en las cumbres de las montañas más altas y se encuentra en un estado sólido.

El 30% del agua dulce del mundo, se encuentra en la humedad del suelo y en los acuíferos profundos.

Solo el 1% del agua dulce en el mundo, escurre por las cuencas hidrográficas en forma de arroyos y ríos y se depositan en lagos, lagunas y en otros cuerpos superficiales de agua y en acuíferos. Esta es agua que se repone regularmente a través del ciclo hidrológico.

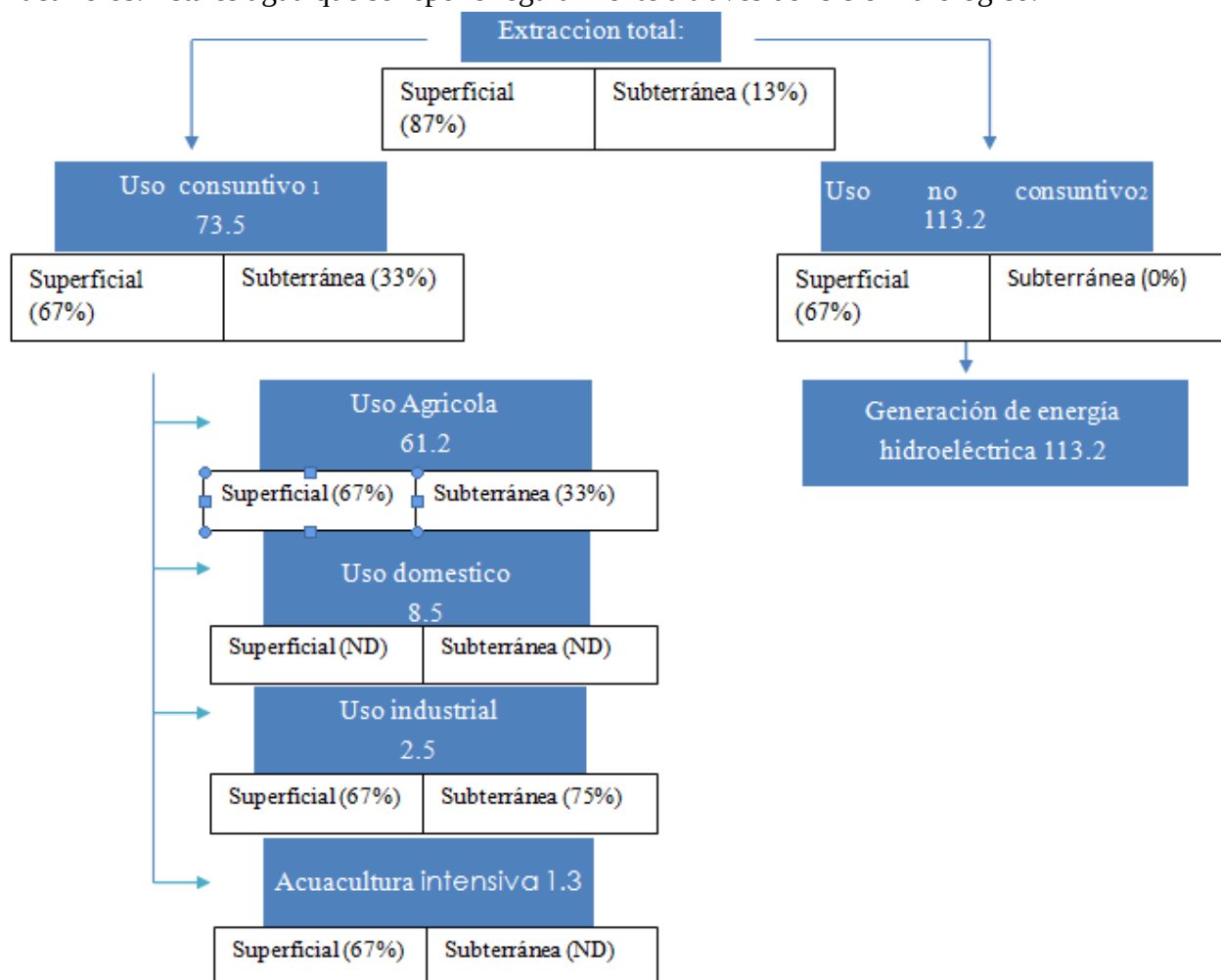


Figura 3 Usos del agua en México.

1.2.-Hidrología

La definición más sencilla de hidrología la encontramos al buscar su origen etimológico, es una palabra de origen griego compuesta de dos partes: “hidros” que significa agua y “logos” que se traduce como tratado o ciencia de lo cual podemos deducir que la hidrología es la ciencia del agua.

Para ser más preciso la hidrología es la ciencia que estudia el agua en la tierra, es decir, su ocurrencia, su circulación y distribución, sus propiedades físicas y químicas así como su interacción con el medio ambiente (Aparicio 1992).

La hidrología por su carácter amplio y complejo se ha tenido que dividir en varias ramas científicas en función del estudio del agua en ciertas etapas del ciclo hidrológico las cuales se describen brevemente a continuación:

1.-OCEANOGRFÍA: se encarga de estudiar los mares y océanos.

2.-METEOROLOGÍA: estudio del agua en la atmosfera.

3.-HIDROLOGÍA SUPERFICIAL: estudio del agua continental.

4.-HIDROMETEOROLOGIA: estudio de manera conjunta de la problemática que abarcan los campos de la hidrología y la meteorología.

5.-LIMNOLOGÍA: estudio de los lagos.

6.-POMATOLOGÍA: estudio de los ríos.

7.-GEOHIDROLOGÍA: estudio de las aguas subterráneas.

8.-CRIOLOGÍA: estudio del agua solida (hielo y nieve).

La hidrología se relaciona con otras ciencias que estudian algún componente de la naturaleza y por su enfoque y sus técnicas de trabajo está en la conexión con las matemáticas, a continuación se presenta las ciencias que tienen incidencia en la hidrología (Campos Aranda 1992).

1.-Geografía física.

2.-Hidráulica.

3.-Topografía y cartografía.

4.-Geomorfología.

5.-Geología.

6.-Edafología.

7.-Ecología.

8.-Matemáticas.

9.-Probabilidad y estadística.

10.-Física.

11.-Química.

12.-Biología.

1.3.-Concepto de cuenca

Una cuenca es una unidad básica de estudio en hidrología, una cuenca superficial es una parte delimitada por las partes más altas del terreno (parteaguas) que si fuera impermeable todas las gotas de agua que caigan sobre ella serian transportadas por las corrientes hasta un mismo punto de salida, cabe resaltar que a cada cuenca superficial corresponde una subterránea cuya forma en planta es igual a la superficial.

Las cuencas por su punto de salida se clasifican en: exorreicas y endorreicas, en las primeras tienen su punto de salida en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar, y las segundas tienen su punto de salida dentro de sus límites y este puede ser un lago (Aparicio 1992).

La precipitación dentro de la cuenca se puede tomar como un estímulo que esta recibe y al cual reacciona con un escurrimiento a su salida, y entre estos dos fenómenos se llevan a cabo otros como: evapotranspiración, infiltración por nombrar algunos los cuales siempre

están ahí, sin embargo los modelos matemáticos solo estudian algunos y estos los delimitan en función de cual modelo se quiera emplear.

2.-MARCO TEÓRICO

2.1.-Modelos matemáticos

Un modelo es una representación simplificada de un sistema complejo. Por ejemplo un modelo matemático es aquel que trata de representar el comportamiento de un sistema, expresándolo por un juego de ecuaciones, que juntamente con la lógica expresan relaciones entre variables y parámetros (INSIVUMEH 1982).

Los modelos matemáticos son pues una herramienta muy poderosa para el investigador. Pueden ser utilizados en cualquier ciencia y resultan ser grandes auxiliares para el desarrollo de la misma.

Dentro del campo de la hidrología, el uso de la modelación matemática se ha vuelto una herramienta de gran utilidad, con la modelación de los sistemas hidrológicos se busca su cuantificación e identificación.

Los modelos matemáticos se clasifican en diferentes categorías; según la información de entrada, según el tipo de representación, según la aplicación y según la aleatoriedad.

Según la información de entrada se clasifican en:

- Empíricos: Utilizan información de observaciones o de experimentos.
- Heurísticos: Se basan en explicaciones del fenómeno en estudio.

Según el tipo de representación se clasifican en:

- Cualitativos o conceptuales: Usan figuras, gráficos o descripciones matemáticas.
- Cuantitativos o numéricos: Utilizan números y algoritmos matemáticos.

Según la aplicación se clasifican 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, estos se clasifican en dos grandes grupos, los determinísticos y estocásticos. En los modelos determinísticos, las variables son determinadas mediante las leyes de la física, los cuales se pueden considerar como exactas, por el otro lado, en los modelos estocásticos, las variables se determinan por las leyes del azar, por lo que son modelos caracterizados en términos de probabilidad.

2.1.1.-Modelos de simulación hidrológica

En hidrología los modelos matemáticos pretenden representar una versión idealizada y simplificada de los fenómenos hidrológicos, fundamentalmente existen dos tipos de modelos; aquellos que tienden a representar algún proceso, o combinación de procesos en una de las fases del ciclo hidrológico y aquellos que tratan de condensar una serie de estadísticas la mayor cantidad de información contenida en las series de tiempo de los registros hidrológicos. Entre los primeros están aquellos que pretenden en su estructura, explicar el comportamiento físico de los procesos modelados y aquellos también llamados “caja negra” que pretenden únicamente modelar la respuesta adecuada del sistema ante un estímulo e insumo dado, pueden también los modelos ser estocásticos o determinísticos, según contemplen o no consideraciones probabilísticas (INSIVUMEH 1982).

2.1.1.1.-Modelos determinísticos

Los modelos determinísticos son aquellos en que, una vez fijados los valores de sus parámetros y demás componentes, la respuesta del modelo a un estímulo dado, puede predecirse con certeza.

Los primeros modelos matemáticos usados en hidrología fueron modelos paramétricos simples de precipitación, es decir, modelos calibrados con la información proveniente de los registros de datos existentes. Estos primeros modelos usualmente usaban ecuaciones empíricas y procedimientos sencillos para obtener la información deseada. Con el tiempo los modelos empleados fueron más complejos y por consiguiente, se hizo necesario el uso de computadoras (INSIVUMEH 1982).

2.1.1.2.-Modelos estocásticos

Modelos estocásticos son aquellos mediante los cuales no puede predecirse un resultado sino que indican la probabilidad de que este sea obtenido. Es decir, que su objetivo principal es hacer una simulación, a través de la matemática, de la respuesta del sistema.

La utilización de un modelo estocástico implica escoger el modelo apropiado para describir el fenómeno, estimar la distribución probabilística de los datos de entrada, estimar los parámetros y la distribución probabilística del sistema y la distribución de entrada son conocidos.

Los modelos estocásticos generalmente se han utilizado para la simulación de series de tiempo hidrológico, cuya probabilidad de ocurrencia sea igual a la de la serie histórica observada (INSIVUMEH 1982).

2.1.1.3.-Modelos de simulación particularizada

Estos tipos de modelos tratan en base a una serie de observaciones experimentales (y modelos analíticos que sirven como auxiliares) simular los procesos hidrológicos que se verifican en la cuenca hidrográfica y de unirlos sucesivamente entre ellas mediante relaciones a manera de obtener una evaluación cuantitativa particularizada del fenómeno de transformación hidrológica (INSIVUMEH 1982).

2.1.1.4.-Modelos sintéticos

Al contrario de los anteriores tales modelos no reproducen necesariamente ni la estructura como tampoco el comportamiento de los varios componentes del sistema prototipo (cuenca), y correlacionan entre ellos magnitudes simples sin describir el proceso real de transformación. La mayoría de estos son deducidos específicamente para una región (INSIVUMEH 1982).

2.1.2.-Modelo hidrológico HBV

El modelo consta de cuatro módulos: 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 trabajarse a escala diaria o mensual y los datos que necesita son: archivo de precipitación, archivo de evapotranspiración y de en nuestro caso de gastos observados.

En la siguiente figura se observa los procesos generales que utiliza la versión que usaremos del HBV y como conceptualiza para simplificar el modelo, en dos tanques, el superior donde se efectúa el flujo superficial y el flujo subsuperficial, en el segundo tanque se simula el flujo subterráneo que es el producto del agua que se infiltra al subsuelo.

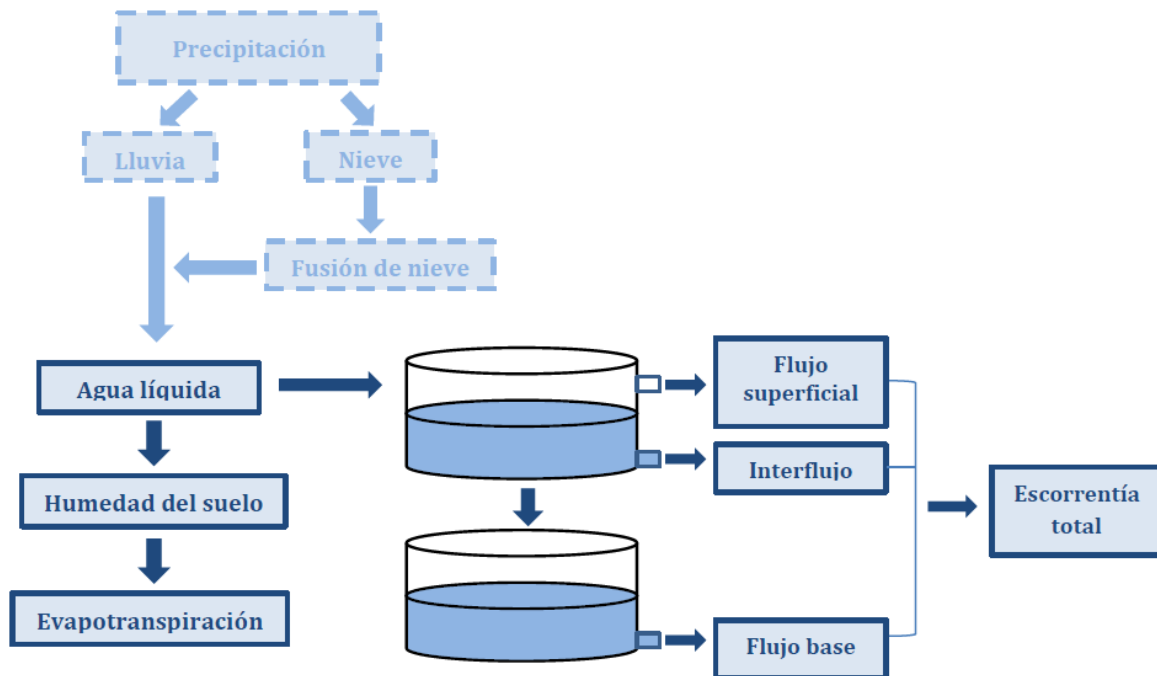


Figura 4 Procesos generales del modelo HBV.

La lluvia y la nieve (si existe) son procesadas en el módulo de humedad de suelo en donde en base a la capacidad del campo y la humedad del suelo se determina la cantidad de agua de escurrir, la parte restante de la precipitación influye en la humedad del suelo, que a su vez puede evaporarse siempre y cuando la humedad que contiene el suelo sea la suficientemente grande como para que este fenómeno ocurra.

2.1.2.1.- Modulo de precipitación efectiva y humedad del suelo:

Usualmente la lluvia o precipitación que cae en la cuenca se distribuye de dos maneras: una parte aporta al escurrimiento superficial y la restante a la infiltración, la primera componente se calcula conociendo la humedad del suelo (SM) justo antes de la precipitación y la capacidad del campo (FC) del suelo de la zona en estudio, este último parámetro nos describe la capacidad máxima del suelo de almacenar agua entre sus espacios, normalmente cuanto más alto sea el contenido de humedad del suelo, mayor será la aportación de agua al escurrimiento superficial, cuando el contenido de humedad se aproxima a la capacidad de campo la infiltración de agua al subsuelo se reduce aun mas, cabe resaltar que la humedad del suelo siempre será menor que la capacidad de campo. La siguiente ecuación sirve para calcular la precipitación efectiva en función de la humedad del suelo existente:

$$P_{eff} = \left[\frac{SM}{FC} \right]^{\beta} P \quad (\text{Ec.1})$$

DONDE:

P_{eff} : precipitación efectiva que escurre (L).

SM: humedad del suelo (L).

FC: capacidad de campo (L).

P: precipitación diaria o mensual (L).

β : Parámetro de forma de la cuenca (-).

2.1.2.2.-Modulo de evapotranspiración:

El módulo de evapotranspiración se relaciona con la humedad del suelo y con la evapotranspiración potencial (que es la que se ingresa al programa), mediante el punto de marchitez permanente del suelo (PWP) que es un parámetro a calibrar en el modelo.

$$ETr = ETP \frac{SM}{PWP} \quad \text{Si } SM < PWP \quad (\text{Ec.2})$$

$$ETr = ETP \quad \text{si } SM > PWP \quad (\text{Ec.3})$$

El punto de marchitez permanente es un límite de humedad del suelo para la evapotranspiración, de lo cual podemos deducir que la evapotranspiración se reduce debido a la pérdida de disponibilidad de humedad del suelo por debajo del PWP.

2.1.2.3.-Modulo de estimación del escurrimiento:

El flujo superficial se puede modelar mediante la teoría del depósito lineal, por lo cual el almacenamiento del depósito (S) representaría la humedad actual del suelo, la altura del depósito representaría la capacidad de campo y la capacidad del depósito, la capacidad de retención.

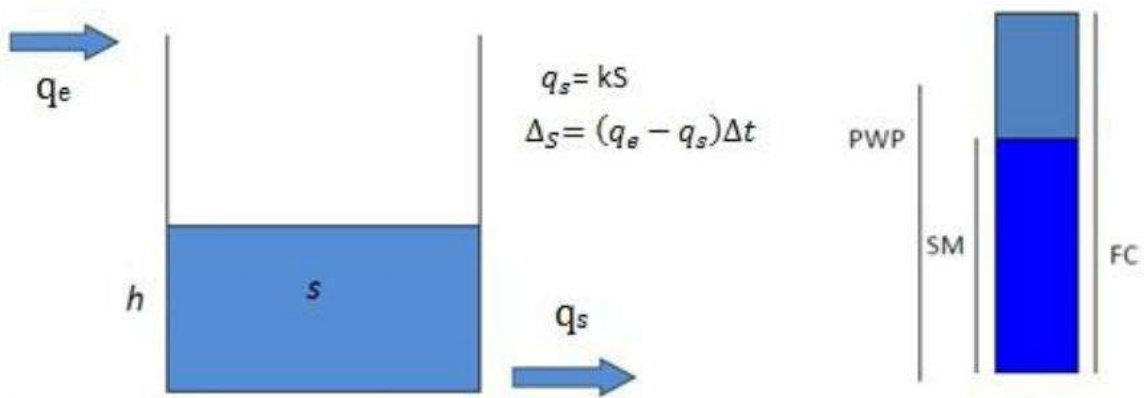


Figura 5 Idealización del depósito lineal.

El sistema cuenta con dos depósitos uno arriba de otro, el primero (el de arriba) ahí se modela el flujo próximo a la superficie (tanto el flujo superficial como el flujo subsuperficial) en el segundo depósito se modela el flujo subterráneo o base, los dos tanques se encuentran conectados mutuamente mediante una constante de infiltración, como podemos ver en la figura en el tanque superior se encuentran dos salidas y en el inferior solo una, en el tanque superior el nivel de agua sobrepasa el umbral máximo (L_{max}) se produce flujo subsuperficial de manera muy rápida, la respuesta de las otras dos salidas es relativamente más lenta, K_0 , K_1 y K_2 son factores que nos muestran la respuesta de las tres salidas, como regla general y para que se cumpla que el Q_0 siempre será el más rápido el valor de k_0 siempre debe ser mayor que K_1 . La respuesta en el tercer punto (Q_2) de salida debe de ser más lenta que la segunda salida (Q_1) por lo cual K_2 siempre debe ser menor que K_1 estos tres coeficientes y el del percolación son parámetros a calibrar en el modelo.

$$Q_0 = K_0(S_u - L)A \quad \text{si } S_1 > L \quad (\text{Ec.4})$$

$$Q_0 = 0 \quad \text{si } S_1 < L \quad (\text{Ec.5})$$

$$Q_1 = K_1 * S_1 * A \quad (\text{Ec.6})$$

$$Q_{perc} = K_{perc} * S_1 * A \quad (\text{Ec.7})$$

$$Q_2=K_2*S_2*A \quad (Ec.8)$$

DONDE:

Q_0 : Flujo cercano a la superficie (L^3T^{-1}).

Q_1 : Interfujo (L^3T^{-1}).

Q_2 : Flujo base (L^3T^{-1}).

Q_{perc} : Coeficiente de infiltración (L^3T^{-1}).

K_0 : Coeficiente de recesión (T^{-1}).

K_1 : Coeficiente de recesión (T^{-1}).

K_2 : Coeficiente de recesión (T^{-1}).

S_1 : Nivel de agua en el tanque superior (L).

S_2 : Nivel de agua en el tanque inferior (L).

L_{max} : Umbral de flujo subsuperficial (L).

A : Área de la cuenca (L^2).

El escurrimiento total simulado Q_s se obtiene sumando las salidas del primer y segundo tanque.

$$Q_s=Q_0+Q_1+Q_2 \quad (Ec.9)$$

La siguiente tabla muestra un resumen de los parámetros del modelo y los rangos entre los que éstos pueden oscilar. Las condiciones iniciales necesarias para el funcionamiento del modelo son la humedad inicial del suelo (H_0) los almacenamientos iniciales de ambos tanques (S_{10} y S_{20}).

Parámetro	Descripción	Unidades	Rango
L_{max}	Umbral de flujo subsuperficial	mm	0-100
K_0	Coeficiente de recesión (tanque superior)	dia-1	0.05-0.5
K_1	Coeficiente de recesión (tanque superior)	dia-1	0.01-0.4
K_2	Coeficiente de recesión (tanque inferior)	dia-1	0-0.15
K_{perc}	Coeficiente de infiltración	dia-1	0-2
PWP	Punto de marchitez permanente del suelo	mm	30-650
FC	Capacidad de campo	mm	50-650
β	Coeficiente de forma	-	1-5

Tabla 1 Parámetros del modelo hidrológico HBV.

Del modelo podemos intuir que hay parámetros que afectan más a determinados procesos, como en las series de flujos elevados y otros afectan al volumen total del balance, L_{max} , K_0 y K_1 afectan directamente al flujo superficial y al interflujo, el parámetro K_2 controla el flujo subterráneo, Cuanto menor es el valor de K_2 , mayor es el volumen que permanece en el acuífero profundo y que contribuye al sistema de flujo subterráneo regional del mismo, K_2 y K_{perc} actúan de manera conjunta un alto valor de K_2 permite que haya una mayor cantidad de agua en el tanque superior y por lo tanto también en el tanque inferior, combinado con valores altos o bajos de K_2 determina el error en series de caudales bajos (caudales de estiaje).

El parámetro K_0 controla el escurrimiento superficial formada cuando la precipitación efectiva que escurre sobrepasa el umbral L_{max} , en el modelo la capacidad de campo (FC) juega un papel importante en cómo se distribuye la precipitación efectiva y la infiltración, un valor bajo de capacidad de campo implica que la capacidad de almacenamiento el suelo es baja también y por lo tanto solo una pequeña cantidad de agua estará disponible para evapotranspirarse. Como β es el exponente del cociente entre la humedad del suelo (SM) y la capacidad de campo (FC), afecta también a la división de la lluvia neta en escorrentía y recarga de humedad del suelo. La cantidad de agua que se encuentra disponible para que se produzca evapotranspiración depende de este exponente y de aquí el fuerte efecto de éste parámetro en el error de volumen. Por tanto, cabe decir que FC y β son los parámetros del modelo dominantes en el control del error en el volumen total.

2.1.3.-Herramienta de simulación: Evalhid

La evaluación del recurso hídrico es un aspecto fundamental de la planificación y gestión de recursos hídricos. Básicamente existen dos metodologías para evaluar el recurso hídrico: la restitución a régimen natural y la modelación precipitación-escorrentía. Ambas metodologías suelen ser complementarias y necesarias. El programa EVALuación de los recursos HÍDricos (EVALHID) es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía (MPE) en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semidistribuida. Este programa está integrado dentro del Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL para el desarrollo de modelos relativos a la planificación y gestión de recursos hídricos.

2.1.3.1.-Características del programa y modelos disponibles

Como se ha comentado el modelo que se plantea es conceptual agregado de aplicación semidistribuida. Esto quiere decir que una cuenca que quiera ser modelada se subdivide en subcuencas y en cada subcuenca se plantea uno de los modelos disponibles en el programa. Para cada subcuenca a modelar es necesario datos de series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y la superficie de la subcuenca. Si se quiere desarrollar un modelo de nieve es necesario disponer de series temporales de la temperatura del aire. Como es obvio las series temporales deben de ser del mismo período. En general, también es necesaria la disponibilidad de datos aforados, restituidos a régimen natural, que permitan la calibración de los parámetros del modelo. Estos datos observados no son indispensables para la simulación del modelo.

En resumen, las características principales del programa son las siguientes:

- Disponibilidad de diferentes MPE aplicables según diferentes factores.
- También cuenta con varios modelos para estimar la escorrentía nival.

- Permite el desarrollo de modelos para grandes cuencas y sistemas complejos.
- Escala temporal configurable y definida por el usuario.
- Posibilidad de modelar, para las subcuencas seleccionadas, exclusivamente la parte superficial estimando la infiltración como una salida del programa.
- Acople con el modelo de simulación de la gestión SIMGES y uso del mismo para la modelación de la parte subterránea.

En el siguiente grafico se puede ver de manera simplificada el funcionamiento del programa:

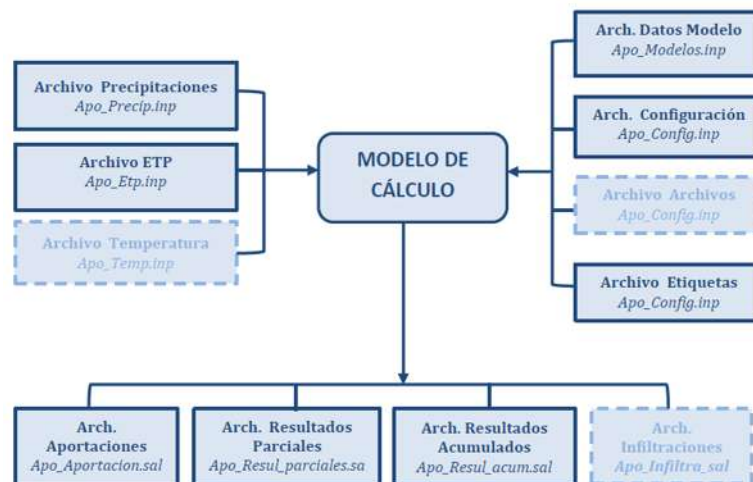


Figura 6 Datos de entrada y salida del programa Evalhid.

2.1.4.-Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015

De acuerdo al diario oficial de la federación esta norma nos permite determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales tanto en cuencas hidrológicas como en acuíferos, este método es un requerimiento técnico mínimo, también se nos dice que no se excluye el uso de métodos más complejos, exactos y robustos. También se recomienda que en cuencas grandes (mayores a 3000 km²) se deba subdividir en cuencas más pequeñas, en función de la problemática regional que enfrenta el recurso, de la importancia de sus acuíferos, localización de sus diferentes usuarios e información hidrométrica y climatológica disponible.

El volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca en estudio se calculará con ayuda de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO DE LA CUENCA HACIA AGUAS ABAJO} &= \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO DESDE LA CUENCA AGUAS ARRIBA} + \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL} + \text{VOLUMEN ANUAL DE RETORNOS} \\
 &+ \text{VOLUMEN ANUAL DE IMPORTACIONES} - \text{VOLUMEN ANUAL DE EXPORTACIONES} - \text{VOLUMEN ANUAL DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL} \\
 &- \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE EVAPORACIÓN EN EMBALSES} - \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO EN EMBALSES}
 \end{aligned}$$

Para el cálculo del volumen medio anual se necesita conocer el coeficiente de escurrimiento (Ce) que describiremos a continuación:

Calculo del coeficiente de escurrimiento:

El coeficiente de escurrimiento se calcula en función del uso de suelo, vegetación y de la edafología de la zona en estudio, con ayuda de las tablas proporcionadas por esta norma que se presentan a continuación:

Tipo de suelo	Características
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas

Tabla 2 Clasificación del tipo de suelo de acuerdo a la NOM-011-CNA-2015

Uso de suelo	Tipo de suelo		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos			
En hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal:			
% de suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75%-poco	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75%-regular	0.20	0.24	0.30
Menos del 50%-excesivo	0.24	0.28	0.30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

Tabla 3 Valores de K acuerdo con el uso de suelo, NOM-011-CNC-2015.

K parámetro que dependo del tipo y uso del suelo	Coefficiente de escurrimiento anual (Ce)
Si K resulta menor o igual que 0.15	$Ce = K(P-250)/2000$
si k es mayor que 0.15	$Ce = K(P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5$

Tabla 4 Fórmula para calcular Ce de acuerdo con el valor de K.

Una vez conocido el coeficiente de escurrimiento se procede a multiplicarlo por la precipitación media anual y el área de la cuenca y así se obtiene el volumen medio anual de escurrimiento.

$$\text{Lámina de agua anual de escurrimiento} = Ce * Pma \quad (Ec.10)$$

Donde:

Ce: coeficiente de escurrimiento (adim).

Pma: Precipitación media anual (mm).

Para obtener el volumen media anual se debe multiplicar la lámina anual de agua por el área total de la cuenca en estudio.

$$\text{Volumen de escurrimiento} = \text{Lae} * \text{Ac} \quad (\text{Ec.11})$$

Donde:

Lae: Lámina de agua anual de escurrimiento (m).

Ac: Area de la cuenca (m²).

3.-HIPÓTESIS

La cuantificación de los recursos hídricos no instrumentada en una cuenca en México obtenida usando la NOM-011-CONAGUA-2015, es mejorable usando el método HBV.

4.-OBJETIVOS

4.1.-Objetivo general

Hacer una comparación de los resultados obtenidos por la Norma Oficial Mexicana para la determinación de los recursos hídricos (NOM-011-CNA-2015) con los resultados del método HBV.

4.2.-Objetivos particulares

Analizar un “nuevo” modelo hidrológico como lo es el HBV para ver las ventajas y desventajas de utilizarlo en una cuenca mexicana.

Hacer una comparativa entre la metodología oficial establecida en México y dicho modelo hidrológico, con el fin de proponer su uso como herramienta fiable en los estudios de este tipo.

Aplicar la norma oficial mexicana de maneras distintas, ver los resultados que obtenemos y así poder tomar una decisión optima de cual caso nos arroja los mejores resultados.

Determinar los parámetros HBV en la cuenca del rio Tepalcatepec y así poder predecir con ayuda de métodos estadísticos, los caudales que pueden transitar en determinado tiempo y así poder hacer un uso más eficiente del agua a corto y largo plazo.

5.-JUSTIFICACIÓN

En México el crecimiento económico no ha tomado en cuenta las señales de escasez del agua. La concentración de la población y la actividad económica han creado zonas de alta escasez; no sólo en las regiones de baja precipitación pluvial sino también en zonas donde hasta ahora no se percibía como un problema.

El crecimiento poblacional y económico han ejercido mayor presión sobre las reservas de agua en México, al punto que el volumen demandado es mayor que el suministrado en algunas regiones del país, lo que obliga al gobierno decidir a quién dejar sin este recurso. La competencia ha causado conflictos de diferente intensidad presentándose entre comunidades, municipios y estados.

Es por lo anterior la gran importancia de implementar nuevas herramientas para la determinación de la disponibilidad del recurso hídrico, para hacerlo de manera más precisa y así hacer un uso más eficiente del agua para evitar problemas graves de escases en la cuenca del río Tepalcatepec.

6.-METODOLOGÍA

La metodología a seguir para realizar esta investigación consta de varias etapas que se describen a continuación.

6.1.-Caracterización de la zona de estudio

Esta etapa consiste en realizar un análisis geográfico de la zona en estudio, la delimitación y descripción de la misma. El reconocimiento de la zona en estudio es importante, para tener en mente las características propias del lugar y tomar decisiones adecuadas de ser necesario, además puede orientar al modelador en el análisis de los resultados que se obtengan y pudiendo comparar estos con resultados obtenidos en estudios realizados anteriormente.

6.2.-Recopilación de datos e información

Para llevar a cabo este trabajo es necesario llevar a cabo la recolección de la información y datos necesarios para todo el proceso, para lograrlo se requiere analizar qué es lo que se necesita llevar a cabo el estudio y como o de donde obtenerse. A continuación se hace un listado de la información que fue necesaria para este proyecto y una breve explicación de donde se obtuvo.

- Datos de precipitación y temperatura. Estos datos se obtienen a partir de las estaciones climatológicas. Ubicadas en las cercanías de la cuenca o dentro de ella. Para obtener estos datos se recurrió a la base de datos de clima computarizado (CLICOM).
- Las series de evapotranspiración se calcularon con los datos mensuales de precipitación y temperatura utilizando el método de thornthwaite.
- Capas de cobertura vegetal y uso de suelo. Son mapas en formato vectorial obtenidos del sitio de internet del instituto nacional de estadística y geografía (INEGI). Después de tener seleccionadas las estaciones primarias y secundarias se procede al llenado de datos mediante el método del inverso de la distancia euclidiana al cuadrado (IDW) cabe señalar que en este método se utilizaron las estaciones primarias y secundarias, este es un método aceptado por la CNA.

6.2.1.-Curva masa doble

Después de haber aplicado las pruebas de homogeneidad y consistencia previamente explicadas, se decidió evaluar estaciones que no cumplían las pruebas pero que por su ubicación espacial pudieran ser de utilidad, el método de la curva masa doble consiste en comparar las series pluviométricas de dos estaciones, una estación base y la estación problema (Campos Aranda 1992).

Sean :

- $b_1, b_2, \dots, b_n$ los datos de precipitación para la estación base, correspondiente a los años 1, 2, ..., 3.
- $x_1, x_2, \dots, x_n$ los datos obtenidos del pluviómetro de la estación problema para los mismos años.

Se representan en los ejes de coordenadas cartesianas las parejas de puntos.

$$(x_1, b_1)$$

$$(x_1+x_2, b_1, b_2)$$

.....

.....

.....

$$(x_1+\dots+x_n, b_n+\dots+b_n)$$

Si esta nube de puntos se alinea según una recta, los datos de la estación problema se consideran válidos y confiables, cambios en la pendiente de la recta indican la aparición o desaparición de un error sistemático, tal como el cambio del pluviómetro o cambio del personal que realiza las mediciones, cambio en la horizontalidad del pluviómetro, entre otros. Detectada la causa es fácil corregir el error, para lograr una recta de pendiente uniforme.

Una nube de puntos a la cual no se le puede ajustar una línea recta implica errores aleatorios y se procede a desechar los datos de esta estación.

6.2.2.-Método IDW

También conocido como método del inverso de la distancia al cuadrado, es una manera de interpolación, en nuestro caso lo usamos para conocer los datos vacíos en las series de precipitación.

En el proceso de selección de estaciones se identificarán estaciones primarias, que serán aquellas que tengan influencia dentro de nuestra zona en estudio, esto se determinará por medio de polígonos de Thiessen cuyo proceso se describirá más adelante y además de tener la mayor cantidad de datos, las estaciones secundarias se utilizarán para el llenado de las estaciones primarias.

Antes de comenzar con el llenado de datos se determina la matriz de distancia euclidiana, de todas las estaciones preseleccionadas en la zona de estudio, la distancia euclidiana se deduce del teorema de Pitágoras, para calcular la distancia se requiere las coordenadas de cada una de las estaciones (X, Y y Z) la ecuación de la distancia euclidiana es la siguiente:

$$\sqrt{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]} \quad (\text{Ec.12})$$

Siendo:

x_i = Coordenada x estación i; x_j = Coordenada x estación j

y_i = Coordenada y estación i; y_j = Coordenada y estación j

z_i = Elevación estación i; z_j = Elevación estación j

Ya que tenemos la matriz de la distancia, ahora calcularemos la matriz del inverso de la distancia al cuadrado para manejar la información de manera más efectiva. Para obtener resultados más cercanos a la realidad, los datos faltantes de una estación solo podrán ser llenados por otra estación que tenga un coeficiente de correlación mayor a 0.80.

Se procede a determinar la ecuación de llenado para cada intervalo de datos faltantes a llenar de la estación principal, hay que cuidar que las estaciones seleccionadas para llenar contengan datos para el dato o intervalo de datos faltantes.

La ecuación para el llenado del dato faltante de cada estación requiere el cálculo del peso de la estación, entiéndase como el peso de una estación sobre otra como el porcentaje de influencia que tiene sobre esta, y para este método está en función de la distancia, Este peso requiere el cálculo de suma del inverso de la distancia Euclidiana al cuadrado, de las estaciones útiles a llenar el intervalo de datos faltantes (es decir cuentan con información en el intervalo faltante de la estación a llenar). Se obtiene el peso de cada estación útil en el llenado, dividiendo el inverso de la distancia euclidiana al cuadrado de la estación a utilizar para llenar entre la suma del inverso de la distancia euclidiana al cuadrado. Este peso se multiplicará por el valor de la precipitación en dicho periodo. Y sumando el peso obtenido de las otras estaciones, se obtendrá el valor estimado de uno.

$$\text{Peso de la estación } i = \frac{(\text{Inv. Dist. euclidiana est. } i)^2}{\sum_{i=1}^n (\text{Inv. Dist. euclidiana})^2} \quad (\text{Ec.13})$$

Y por último el dato faltante se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Dato faltante} = \sum_{i=1}^n (\text{peso de la estación } i * \text{precipitación } i) \quad (\text{Ec.14})$$

6.2.3.-Estaciones hidrométricas

Las estaciones hidrométricas miden la cantidad de agua que fluye en ríos, canales, tuberías y a la salida de las presas, por lo que sirven para conocer la cantidad disponible del recurso. El caudal es generado originalmente por la precipitación pluvial así como por la entrada de agua subterránea a los canales superficiales. También deben considerarse las descargas asociadas a los diversos usos del agua. En ocasiones los cauces y por consiguiente los flujos de agua están regulados por presas y otras obras de control operadas por el hombre.

6.2.4.-Banco nacional de datos de aguas superficiales (bandas):

Banco de datos que contiene la información de ríos y de vasos de almacenamiento de la red hidrométrica de México.

La operación de este banco de información se realiza a través del software SIAS, actualmente en su versión 2.

Bandas contiene: 2248 estaciones y 180 vasos de almacenamiento, Registros hidrométricos desde los años veinte (por ejemplo Yurécuaro y Maravatío, Michoacán. desde 1922), Registros de presas desde los años treinta (por ejemplo presas Venustiano Carranza, Coahuila; Plutarco Elías Calles, Aguascalientes; La Boquilla, Chihuahua.)

Una vez obtenida la lista de estaciones, se seleccionan las estaciones principales, procurando que estas cubran el total de la superficie de la cuenca. Para la selección se utiliza un método de discretización de acuerdo a las estaciones con mejor información, para ello se empleó el método de percentiles, esto solo sirve como apoyo ya que el principal criterio para elegir las estaciones será la ubicación y la calidad de datos que se tenga en las estaciones climatológicas.

6.3.-Análisis y validación estadística de la información

La información recopilada debe cumplir con ciertos requisitos para que pueda considerarse como estadísticamente válida. Para ello se realiza en esta etapa, utilizar este tipo de datos debemos de estar seguros de la confiabilidad de los mismos ya que de ello dependerá en gran medida la calidad de los resultados obtenidos.

6.3.1.-Concepto de homogeneidad de la serie

Se puede llamar homogénea a una serie de datos si toda la muestra provienen del mismo conjunto de datos, si la serie es inhomogénea se le deben de hacer ajustes para hacerla homogénea, se puede perder homogeneidad en los datos por muchas causas, se pueden diferenciar en dos grupos: debido a cambios físicos en la propia estación pluviométrica y

las originadas por modificaciones o cambios en el medio ambiente. A continuación se resumen las causas más comunes de pérdida de homogeneidad en los registros históricos:

- 1.-Cambio de localización del pluviómetro.
- 2.-Cambio de la forma de exposición, o reposición del aparato.
- 3.-Cambio del procedimiento de observación, o cambio de operador.
- 4.-Construcción de embalses en las cercanías.
- 5.-Deforestaciones y reforestaciones en la zona.
- 6.-Desecación de pantanos.
- 7.-Apertura de nuevas áreas de cultivo en los alrededores.
- 8.-Industrialización de áreas circundantes.

Para detectar inhomogeneidades en las series de precipitación con las cuales vamos a trabajar en la realización del presente trabajo, se eligieron los métodos de Helmert, secuencias, t de student y Cramer, los cuales se desarrollan a continuación:

6.3.2.-Prueba de Helmert

Esta prueba se usa para verificar la homogeneidad de una serie de precipitación, es decir que la variación de los datos evaluando la media en este caso, sea mínima, y en general la podemos aplicar para cualquier serie climatológica. Es muy sencilla en su aplicación, evalúa las desviaciones de los valores de cada evento con respecto a la media de la serie.

Si una desviación de cierto signo es seguida por otra del mismo signo se creará una secuencia (S), en caso contrario si una desviación de cierto signo es seguida por una del signo opuesto, un cambio (C) será registrado, en cada año, mes o día de la serie a analizar se registrará una secuencia o cambio a excepción del primer dato (Campos Aranda 1992).

Para que la serie sea homogénea la diferencia de secuencias y cambios debe ser igual a cero:

$$S - C = 0 \quad (\text{Ec.15})$$

O bien mantenerse dentro del límite de un error probable:

$$S - C = \pm \sqrt{n - 1} \quad (\text{Ec.16})$$

6.3.3.-Prueba de secuencias

Esta prueba es bastante sensitiva, consiste en contar el número de secuencias o rachas (u) ya sea arriba o debajo de la mediana, la mediana se obtiene ordenando los datos de acuerdo a su magnitud y seleccionando el valor central en caso de que el número de datos sea impar, caso contrario se procede a tomar los dos valores centrales y calcular su media. Si el dato resulta ser mayor que la mediana se le asigna la letra A, si es menor la letra asignada será B, enseguida se cuenta el número de secuencias, para que el registro de datos sea homogéneo el número de secuencias deberá de estar dentro de un rango de valores en función del número de datos del registro analizado (Campos Aranda 1992).

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

Tabla 5 Rango del número de secuencias (u) para un registro homogéneo.

6.3.4.-Prueba t de student

Cuando sea probable que la causa de la perdida de homogeneidad sea un cambio abrupto en la media, esta prueba es la adecuada para detectarla, pero cuando la longitud de los dos periodos a seleccionados para comparación de sus medias son diferentes.

Esta prueba es poderosa y robusta, es decir que es insensible a la forma de distribución de probabilidades, debido a esto se recomienda usar t de student a los valores de n_1 y n_2 , que sus correspondientes medias ($\bar{X}_1$ y $\bar{X}_2$) sean similares (Campos Aranda 1992).

La prueba estadística t de student está definida por la siguiente fórmula:

$$td = \frac{x_1 - x_2}{\left(\left(\frac{(n_1 s_1)^2 + (n_2 s_2)^2}{n_1 + n_2 - 2} \right) * \left(\frac{1}{n_1} \right) + \left(\frac{1}{n_2} \right) \right)^{0.5}} \quad (\text{Ec.17})$$

Siendo s_1^2 y s_2^2 las varianzas de x_i en los dos periodos de registro respectivamente.

El valor absoluto de td se compara con el nivel de significancia para una cola y dos colas lo cual se muestra en la siguiente tabla.

grados de libertad	nivel de significancia		grados de libertad	nivel de significancia	
	5% *	5% **		5% *	5% **
1	6.314	12.706	18	1.734	2.101
2	2.920	4.303	19	1.729	2.093
3	2.353	3.182	20	1.725	2.086
4	2.132	2.776	21	1.721	2.080
5	2.015	2.571	22	1.717	2.074
6	1.943	2.447	23	1.714	2.069
7	1.895	2.365	24	1.711	2.064
8	1.860	2.306	25	1.708	2.060
9	1.833	2.262	26	1.706	2.056
10	1.812	2.228	27	1.703	2.052
11	1.796	2.201	28	1.701	2.048
12	1.782	2.179	29	1.699	2.046
13	1.771	2.160	30	1.697	2.042
14	1.761	2.145	40	1.684	2.021
15	1.753	2.131	60	1.671	2.000
16	1.746	2.120	120	1.658	1.980
17	1.740	2.110	∞	1.645	1.960

Tabla 6 Nivel de significancia para la prueba t de student

*prueba para una cola

**prueba para dos colas

Si y solo si, el valor de absoluto de t_d es mayor que el t se concluye que la diferencia entre las medias, es evidencia de inconsistencia o falta de homogeneidad (Aranda, 1984).

6.3.5.-Prueba de Cramer

A veces es mejor comparar la media de toda la serie con la media de una parte del registro, para determinar su homogeneidad, para tal propósito esta prueba bastante útil y además es complementaria a la prueba t de student y es recomendable usar cuando n_1 y n_2 no son iguales (Campos Aranda 1992).

En la prueba de cramer x y s son respectivamente la media y la desviación típica del registro total de n valores definidas por las siguientes ecuaciones:

$$x_k = \frac{\sum_{i=k+1}^{i=k+n} x_i}{n} \quad (\text{Ec.18})$$

Definiéndose

$$T_k = \frac{(X_k - x)}{s} \quad (\text{Ec.19})$$

Y finalmente

$$T_k = \left(\frac{n'(n-2)}{n - n'[1 + T_k]^2} \right)^{0.5} \quad (\text{Ec.20})$$

6.3.6.-Prueba de independencia

Para que se pueda llevar a cabo el análisis de frecuencias se requiere que la muestra Q_i^j de la serie j para $i=1, 2, \dots, n_j$, esté compuesta por variables aleatorias. Para probarlo se aplica la prueba de independencia de Anderson, la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_j^k para diferentes tiempos de retraso k . Si se analiza un solo registro, entonces $j=1$ (Campos Aranda 1992).

La expresión para obtener el coeficiente de auto correlación serial de retraso k es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - Qmed^j)(Q_{i+k}^j - Qmed^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - Qmed^j)^2} \quad (Ec.21)$$

Para $r_0^j=1$ y $k= 1,2,\dots,\frac{n_j}{3}$

Donde

$$Qmed_j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j} \quad (Ec.22)$$

Además de los límites al 95% de confianza r_k^j se pueden obtener de la siguiente manera

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{(n_j - k - 1)}}{(n_j - k)} \quad (Ec.23)$$

La gráfica de los valores estimados para r_j^k (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas), junto con sus correspondientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra. Si y solo si, el 10% de los valores r_j^k sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie Q_j^k es independiente y por lo tanto es una variable que sigue las leyes de la probabilidad.

DATOS ANUALES							
			cumple:				
ID	Codigo	Nombre	Helmert	secuencias	t student	Cramer	Anderson
85	16006	ANTUNEZ	No	No	Si	Si	Si
86	16007	APATZINGAN SMN	Si	No	Si	Si	Si
105	16039	PIEDRAS BLANCAS	Si	Si	Si	Si	Si
165	16158	EL CAJON	Si	Si	Si	Si	Si
196	16228	ACAHUATO	Si	Si	Si	Si	Si
37	14034	CONTLA	Si	Si	Si	Si	Si
51	14118	QUITO	Si	Si	Si	Si	Si
75	14336	EL GUAYABO	Si	Si	Si	Si	Si
44	14092	OLIVOS CFE	No	No	Si	Si	Si
54	14124	SAN DIEGO	Si	Si	Si	Si	Si
65	14180	QUITUPAN	Si	Si	Si	Si	Si
77	14348	JILOTLAN	Si	No	Si	Si	Si
89	16011	BUENAVISTA I	Si	Si	Si	Si	Si
97	16025	COTIJA	Si	No	Si	Si	Si
103	16037	EL CAJON CFE	Si	No	Si	Si	Si
106	16043	EL PUERTO	Si	Si	Si	Si	Si
111	16053	SAN SEBASTIAN	Si	Si	Si	Si	Si
119	16065	LA PIEDAD DE CABADAS DGE	Si	No	Si	Si	Si
131	16085	PARACUARO	Si	Si	Si	Si	Si
139	16101	PUNTA DE AGUA	Si	Si	Si	Si	Si
164	16157	CHILA	Si	Si	Si	Si	Si
34	14029	CONCEPCION DE BUENOS A.	No	No	Si	Si	Si
43	14086	LA MANZANILLA DE LA PAZ	Si	No	Si	Si	Si
46	14099	MAZAMITLA	No	No	Si	Si	Si
56	14141	INGENIO TAMAZULA	Si	No	Si	Si	Si
72	14322	TECALITLAN	No	No	Si	Si	Si
138	16095	PRESA JARIPO	Si	Si	Si	Si	Si
141	16106	SAN ANGEL	Si	Si	Si	Si	Si
149	16137	UREPETIRO	Si	Si	Si	Si	Si
168	16164	URUAPAN SMN	Si	Si	Si	Si	Si
206	16259	TZINDIO	Si	Si	Si	Si	Si
113	16056	JICALAN CFE	Si	Si	Si	Si	Si
45	14095	MANUEL M DIEGUEZ CFE	Si	No	Si	Si	Si
52	14119	QUITUPAN CFE	Si	Si	Si	Si	Si
64	14177	OLIVOS	Si	Si	Si	Si	Si
69	14191	VALLE DE JUAREZ SMN	Si	No	Si	Si	Si
104	16038	EL CARRIZO	Si	Si	Si	Si	Si
123	16072	CHORROS DEL VARAL CFE	Si	Si	Si	Si	Si

127	16077	REYES	No	No	Si	Si	Si
133	16088	PERIBAN	Si	No	Si	Si	Si
135	16090	PIEDRAS BLANCAS CFE	Si	Si	Si	Si	Si
147	16128	TEPACALTEPEC	Si	Si	Si	Si	Si
182	16194	ETA 039 TOCUMBO	Si	Si	Si	Si	Si
29	14005	AHUIJULLO	Si	No	Si	Si	Si
67	14189	TIZAPAN EL ALTO DGE	Si	Si	Si	Si	Si
91	16014	CAMECUARO	Si	Si	Si	Si	Si
98	16026	CUATRO CAMINOS	Si	Si	Si	Si	Si
101	16031	CHAPARACO	No	Si	Si	Si	Si
110	16048	ZAMORA DGE	Si	Si	Si	Si	Si
117	16063	LA PALMA	Si	No	Si	Si	Si
121	16067	LA RAYA	No	No	Si	Si	Si
122	16068	LAS FUENTES	Si	No	Si	Si	Si
125	16074	PANCHES CFE	Si	Si	Si	Si	Si
137	16094	PRESA GUARACHA	Si	Si	Si	Si	Si
144	16125	TANGANCICUARO	Si	Si	Si	Si	Si
146	16127	TARETAN CFE	Si	Si	Si	Si	Si
153	16143	ZAMORA OBS	No	No	Si	Si	Si
156	16147	ZIRITZICUARO	Si	Si	Si	Si	Si
160	16153	COALCOMAN DGE	No	No	Si	Si	Si
167	16162	ORANDINO	Si	Si	Si	Si	Si
175	16178	ENG F URUAPAN	Si	Si	Si	Si	Si
203	16251	PATAMBAN	Si	No	Si	Si	Si
204	16253	TANACO	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 7 Resultados de pruebas estadísticas a estaciones climatológicas.

6.4.- Restitución a régimen natural

La restitución a régimen natural es un proceso que corresponde a la estimación de los caudales naturales en un cauce a partir de los caudales alterados que son los que pueden observarse y medirse.

Desde el punto de vista conceptual, la restitución a régimen natural de los caudales en un río no ofrece dificultad alguna. De hecho, es poco frecuente encontrar alguna explicación en textos especializados en hidrología.

Para calcular el caudal en cada periodo, bastaría con añadir a los caudales aforados en el punto del río a restituir, los caudales derivados a través de tomas efectuadas en los tramos superiores y los detraídos por la extracción en los acuíferos, restar los caudales incorporados por vertidos a través de otras cuencas o alimentación subterránea debida a la recarga no natural del acuífero.

La ecuación general para la restitución a régimen natural es la siguiente:

$$N = A + T + B - V - Q - R + E \pm S \quad (\text{Ec.24})$$

Donde:

N= Caudal a régimen natural

A= Caudal aforado

T= Caudal derivado transvasado aguas arriba

B= Caudal detraído por bombeo de acuíferos

V= Retornos de aguas arriba

Q=Caudal de transvase de otras cuencas

R= Caudal aportado por recarga en acuíferos

E= Caudal evaporado en embalses

S= Caudal almacenado o liberado en embalses

Cada caso de restitución a régimen natural es un planteamiento diferente, ya que hay que conocer cómo funciona el sistema de recursos hídricos para poder ejecutar las sumas y restas adecuadas en los puntos de balance correctos.

6.5.- Aplicación y validación del modelo hidrológico HBV

Existen en todo el mundo una gran variedad de modelos hidrológicos del tipo lluvia escurrimiento, los cuales pueden ser usados en México, pero se deben de tomar las consideraciones necesarias y ver si se cuenta con la información de entrada de necesitan estos.

En esta parte del trabajo se aplicara el modelo hidrológico HBV en la cuenca del rio Tepalcatepec, cabe resaltar que es un modelos agregado que de acuerdo aunque la información con la que se cuenta es pobre se puede aplicar.

La aplicación de este modelo implica varias etapas que son de vital importancia para que este funcione de manera correcta.

- Calibración del modelo. Para obtener resultados confiables del modelo lluvia escurrimiento, y que simule verdaderamente las situaciones que ocurren en la cuenca, es necesario llevar a cabo la calibración del mismo, ajustando los parámetros de calibración del mismo de acuerdo de la sensibilidad de cada uno con estos en los modelos.
- Validación del modelo. Una vez calibrado el modelo se toma un periodo de tiempo al azar y se procede a calibrar, esto para verificar los resultados obtenidos anteriormente y poder tomarlos como buenos.
- Obtención de los escurrimientos. Una vez que ya se calibro y valido se precede a calcular los caudales con los parámetros que se encontraron y con las series históricas de precipitación y evapotranspiración, esto para poder realizar las comparaciones pertinentes.

6.5.1.-Eficiencia de Nash-Sutcliffe:

Esta función objetivo es un error cuadrático medio que da un mayor peso a los errores grandes, el valor de este indicador varía desde -1 a 1. Un valor de 1 significa que el ajuste es perfecto. Un valor de cero nos indica que el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados, por lo que la media de los datos observados tendría una capacidad de predecir similar a la del modelo. Valores menores que cero implican que la media de los datos observados tiene una mayor capacidad de predicción a la del modelo.

$$F1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{prom})^2} \quad (\text{Ec.25})$$

Donde

N= numero de meses de la calibración

Q_{sim} = flujo simulado en el intervalo de tiempo t

Q_i = flujo observado en el intervalo de tiempo t

Q_{prom} = flujo observado medio

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Tabla 8 Valores de referencia en el criterio de Nash-Sutcliffe

Cabe señalar que esta función objetivo tiene la propiedad de ajustarse de una mejor manera a las cúspides, o a los datos de valores superiores, por lo cual se puede decir que esta función nos dice que tanto el modelo se ajusta a fenómenos extremos.

6.5.2.-Coeficiente de Nash-Sutcliffe:

Cuando los valores de la variable son demasiados grandes se recomienda usar la eficiencia logarítmica de Nash-sutcliffe, que se representa mediante la siguiente ecuación:

$$F2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Log}(Q_{sim}) - (\text{Log})Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n ((\text{Log}Q_i) - (\text{Log}Q_{prom}))^2} \quad (\text{Ec.26})$$

Esta función objetivo se ajusta mejor a valores medios, además de dar mayor peso a los errores en los flujos escasos, este método se desarrolló con el fin de reducir el problema de las diferencias cuadráticas y por consecuencia la mayor sensibilidad a los valores extremos.

6.5.3.- Coeficiente de correlación de Pearson (r^2):

Mide la covariabilidad de los valores observados y simulados sin tomar en cuenta el sesgo, los valores fluctúan de 1 a -1, siendo uno una correlación completa positiva, es decir si graficamos los valores tendremos una línea recta con pendiente positiva. El coeficiente de correlación de Pearson se calcula con ayuda de la siguiente ecuación:

$$F3 = \frac{\sum_{i=0}^n (Qsim - Qsimp)(Qobs - Qobsp)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Qsim - Qsimp)^2 \sum_{i=1}^n (Qobs - Qosbp)^2}} \quad (Ec.27)$$

6.5.4.-Coeficiente de asimetría:

Es una medida de la simetría del ajuste de la media de los datos observados y la media de los datos simulados, los valores cercanos a 1 nos indican un ajuste casi perfecto, se calcula con la siguiente ecuación:

$$F4 = 1 - \left[1 - \left(\frac{Qobs}{Qsim}; \frac{Qsim}{Qobs} - 1 \right) \right]^2 \quad (Ec.28)$$

6.5.5.-Algoritmo autocalibrador SCE-UA

El algoritmo SCE-UA fue desarrollado por Duan et al. (1992) y ha sido utilizado con éxito para la resolución de problemas no lineales en numerosas aplicaciones en el ámbito de la calibración de modelos hidrológicos de cuenca.

El funcionamiento básico del algoritmo SCE-UA está inspirado en los principios de la selección natural y la genética y es una combinación y es una combinación de procedimientos deterministas y aleatorios. Se parte de diferentes puntos de búsqueda (individuos) que se organizan por equipos (complex). De esta manera la búsqueda de la solución global optima se plantea como un proceso evolutivo (evolution) basado en la reproducción (cruce, mutación, recombinación) existiendo, además mezcla de equipos (shuffled).

6.6.- Aplicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015

La determinación de la disponibilidad hídrica media anual para una cuenca en México puede obtenerse a través de la metodología establecida en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015. La información que se requiere para su aplicación forma parte de los requerimientos en los modelos hidrológicos.

Esta etapa permite obtener los escurrimientos naturales en la cuenca del río Tepalcatepec a través de la metodología oficial de nuestro país.

7.-RESULTADOS

7.1.-Zona de estudio

7.1.1.-Región hidrológica 18j: cuenca del río Tepalcatepec

La cuenca del río Tepalcatepec tiene una superficie aproximada de 11659 Km² y se encuentra entre los estados de Jalisco y Michoacán entre los 18°36' latitud norte, 103°10' longitud oeste, y 20°0' latitud norte, 101°35' longitud oeste. El río Tepalcatepec constituye el segundo curso fluvial más importante en la región hidrológica del río Balsas.

La delimitación de la cuenca fue una de las primeras actividades durante la caracterización fisicogeográfica. El INE (2003) realizó un ejercicio de delimitación de las grandes cuencas del país, a partir de datos planialtimétricos y rasgos hidrográficos a escala 1:250 000. Este marco sirvió de base para el parteaguas que se ajustó utilizando datos en formato digital a escala 1:50000.

Los principales rasgos fisiográficos de la cuenca son el valle del río Tepalcatepec, la Sierra de Jalmich, el Sistema Volcánico Transversal con el Pico de Tancítaro y la Sierra Madre del Sur. La altitud en la cuenca varía entre 160 y 3 840 msnm, pero 90.5% de su superficie se ubica entre los 200 y 2 300 m. Este gradiente altitudinal, aunado a la conexión entre la Sierra Madre del Sur y el Sistema Volcánico Transversal, así como la relación biogeográfica entre las regiones Neártica y Neotropical, explican la intrincada y compleja gama de condiciones fisiográficas, climáticas y culturales que influyen en la distribución de los diversos componentes de los paisajes, sobre todo el relieve, los suelos y las coberturas vegetales y usos del suelo.

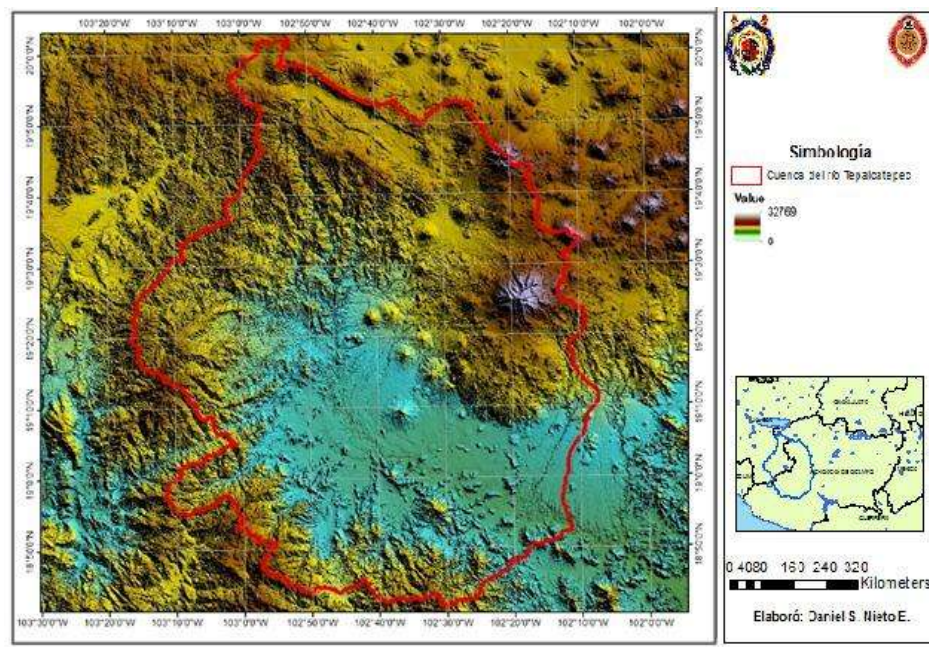


Figura 7 Cuenca del río Tepalcatepec.

El clima de la cuenca está influido por la altitud. En las porciones más altas es más frío y húmedo, en tanto la parte más baja, ubicada en una banda en la parte central, entre las sierras mencionadas, constituye la zona más caliente y seca, de tipo semiárido. Alrededor de esta banda, que asciende ligeramente, aumentan las lluvias y se presentan, como franjas concéntricas más angostas los climas cálidos subhúmedos. En la parte norte de la cuenca los climas cálidos cambian a semicálidos y se extienden a todo lo largo de las faldas del Sistema Volcánico Transversal y parte de la Sierra de Jalmich. A mayor altitud, se presenta una amplia franja de clima templado que cubre todo el norte, hasta el parteaguas.

En resumen, casi la cuarta parte de la cuenca (21.1%) cuenta con clima semiárido caliente, más de una tercera parte (39.47%) tiene climas cálidos subhúmedos, casi otra cuarta parte (26.09%) está representada por los tipos semicálidos subhúmedos y sólo casi una décima parte de la cuenca (10.45%) corresponde a tipos climáticos templados subhúmedos.

Clima	Supercifie en km2	Superficie en %
Templado subhumedo	1219.77	10.45
Cálido subhumedo	4606.28	39.47
Semicálido Subhumedo	3043.86	26.09
Semifrío Subhumedo	20.79	0.18
Templado Humedo	280.48	2.40
Semiárido calido	2451.13	21.01
Semifrío humedo	46.68	0.40
Total	11669	100

Tabla 9 Clima en la cuenca del río Tepalcatepec.

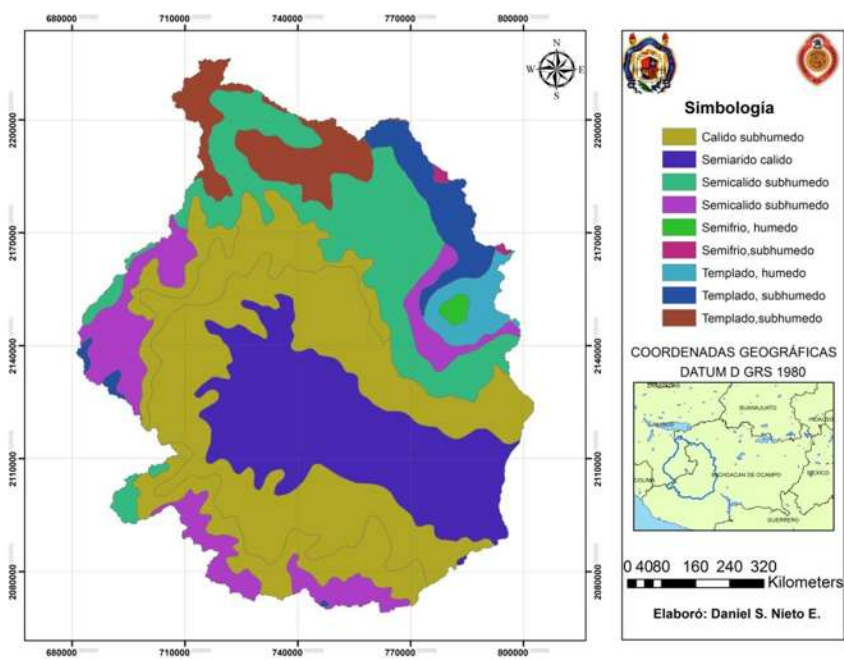


Figura 8 Climas en la cuenca del río Tepalcatepec.

En el aspecto administrativo la cuenca comprende 9 municipios completos y 16 de manera parcial. De estos 25 municipios, 7 pertenecen a Jalisco y 18 a Michoacán.

Michoacán	Jalisco
abarca completamente estos municipios	
Cotija	Quitupan
Tepalcatepec	Santa María del Oro
Buenvista	Jilotlán de los Dolores
Tancítaro	
Periban	
Tocumbo	
abarca parcialmente estos municipios	

metamórficas con un 1.33%.El restante 9.44% lo constituyen materiales aluviales, localizados al fondo de la cuenca, en las partes planas de la misma, alrededor del río Tepalcatepec.

Clase de rocas	Superficie en Km ²	Superficie en %
Ignea extrusiva	6374.61	54.63
Sedimentaria	2180.90	18.69
Ignea intrusiva	1857.13	15.92
Matamorfica	154.93	1.33
Materiales aluviales	1101.42	9.44

Total	11669	100
-------	-------	-----

Tabla 11 Geología en la cuenca del río Tepalcatepec.

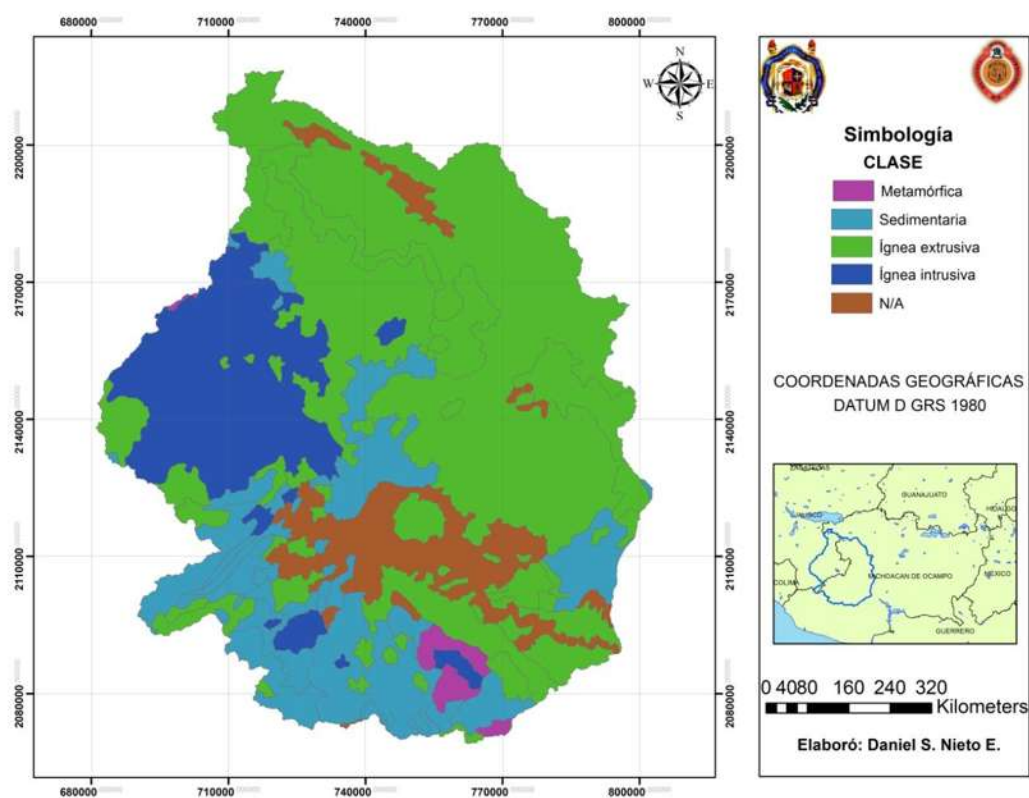


Figura 10 Geología en la cuenca del río Tepalcatepec.

Los diferentes tipos de rocas se pueden dividir, según su origen, en tres grandes grupos:

- **ÍGNEAS:** formadas a partir del enfriamiento de rocas fundidas (magmas). Los magmas pueden enfriar de manera rápida en la superficie de la Tierra mediante la actividad volcánica o cristalizar lentamente en el interior, originando grandes masas de rocas llamadas plutónicas. Cuando cristalizan en grietas de la corteza forman las rocas ígneas filonianas.
- **METAMÓRFICAS:** formadas a partir de otras rocas que, sin llegar a fundirse, han estado sometidas a grandes presiones y temperaturas y se han transformado, generalmente este proceso se lleva cabo debajo de la corteza terrestre.
- **SEDIMENTARIAS:** formadas en zonas superficiales de la corteza terrestre a partir de materiales que se depositan formando capas o estratos. Son detríticas si se originan a partir de trozos de otras rocas. Químicas y orgánicas si se forman a partir de precipitación de compuestos químicos o acumulación de restos de seres vivos.

7.1.3.-Relieve

El relieve es el factor principal para delimitar un paisaje. Por tanto, su análisis es fundamental para segmentar las unidades de paisaje de un territorio y constituye, por ello, la base de la regionalización geomorfoedafológica y, después, de la de los paisajes. El análisis morfoestructural del relieve se ocupa de las formas de las laderas, como unidades básicas de segmentación del territorio. El análisis morfodinámico se centra en los procesos funcionales a los que están sujetas las laderas (erosión, remoción en masa, etc.), y el análisis morfogenético se refiere al material parental y los procesos que dan origen a las formas del relieve actual. Estos tres niveles de aproximación permiten, junto con otros atributos del medio físico, formular la regionalización geomorfoedafológica. Las características que distinguen a las unidades de relieve son:

1. La litología. El sustrato rocoso en el que se desarrolla el relieve está íntimamente ligado al origen de las formas y los procesos que las modelan.
2. La pendiente. La inclinación del relieve permite distinguir las diferentes formas de modelado y los procesos en que se desarrollan.

3. Los tipos de suelos. La génesis de los suelos está estrechamente relacionada con la forma del relieve en la que se desarrollan debido a que la roca o sedimento que constituye el sustrato o roca madre se transforma por procesos exógenos (intemperismo) y la presencia de diferentes pendientes da lugar a diversos procesos pedogenéticos.

7.1.4.-Vegetación

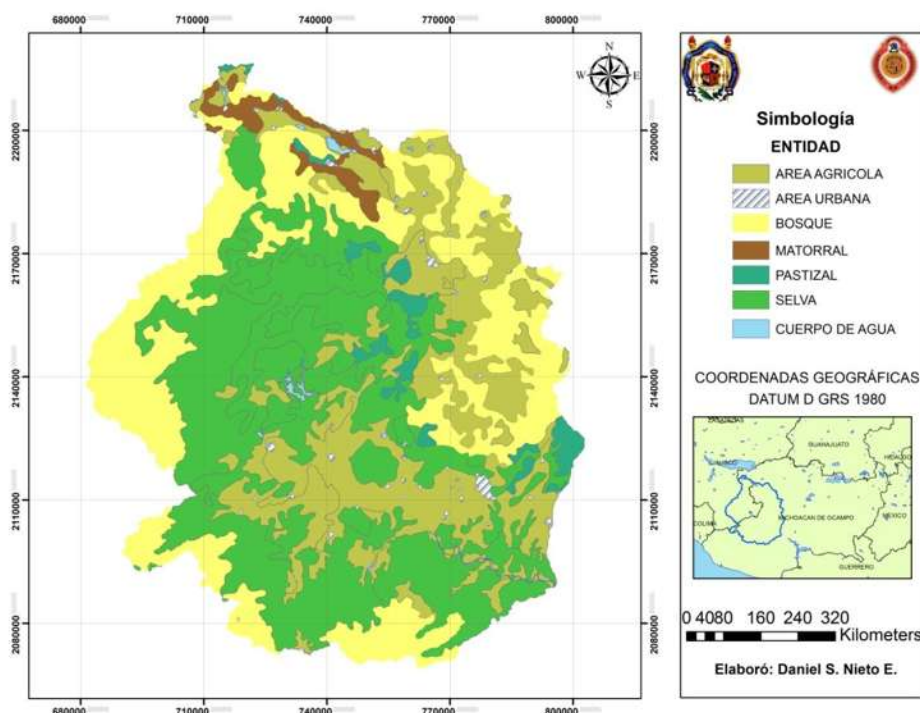


Figura 11 Vegetación en la cuenca del río Tepalcatepec.

Uso de suelo	Superficie en km2	Superficie %
Área agrícola	3008.16	25.78
Área urbana	75.86	0.65
Selva	4822.06	41.32
Bosque	3141.75	26.92
Pastizal	319.60	2.74
Matorral	261.84	2.24
Cuerpo de agua	39.72	0.34

Total	11669	100
-------	-------	-----

Tabla 12 Vegetación en la cuenca del río Tepalcatepec.

Área agrícola: son áreas de producción de cultivos que son obtenidos para su utilización por el ser humano ya sea como alimentos, forrajes, ornamental o industrial.

En este concepto se agrupan los diferentes tipos de agricultura:

1. Agricultura de Temporal
2. Agricultura de Riego
3. Agricultura de Humedad
4. Pastizal Cultivado

Área urbana: La definición de “urbano” cambia de un país a otro y, con las reclasificaciones periódicas, también puede variar a lo largo del tiempo dentro de un mismo país, lo que dificulta las comparaciones directas. Una zona urbana se puede definir por medio de uno o más de los siguientes factores: criterios administrativos o fronteras políticas (como formar parte de la jurisdicción de un municipio o comité de la ciudad); el tamaño de la población (cuando el número mínimo de habitantes en los asentamientos urbanos de la región es de 2.000, aunque puede oscilar entre 200 y 50.000); la densidad demográfica; la función económica (por ejemplo, cuando la actividad primordial de una gran mayoría de los habitantes no es la agricultura, o cuando existe empleo de sobra); y la existencia de características urbanas (como calles pavimentadas, alumbrado público o alcantarillado). En 2010 vivían en zonas clasificadas como urbanas 3.500 millones de personas.

Selva caducifolia: estas formaciones vegetales de origen tropical y árido se caracterizan porque más del 75% de las especies que las integran pierden sus hojas en la época seca del año.

Bosque de encino: comunidades vegetales constituidas por el género *Quercus* (encinos, robles) que en México, salvo condiciones muy áridas se encuentran prácticamente desde el nivel del mar, hasta los 2 800 msnm. Se encuentra muy relacionado con los bosques de pino, formando una serie de bosques mixtos con especies de ambos géneros.

Pastizal: estos ecosistemas están constituidos por comunidades herbáceas en las que predominan las gramíneas y las graminoides, en algunos casos son de origen natural, pero en otros, obedece a condiciones de perturbación por sobrepastoreo.

Matorral Xerófilo: este ecosistema vegetal es propio de las zonas áridas y semiáridas de México

y está constituida básicamente por comunidades arbustivas micrófilas y espinosas.

Cuerpos de agua: en nuestro caso nos referimos a las aguas superficiales y se pueden definir como todas aquellas que comprenden o integran las aguas de los ríos, lagos, lagunas, estanques, etc. Estas provienen del agua de las lluvias que caen en una determinada cuenca hidrográfica o cuenca receptora correspondiente.

7.1.5.-Morfoedafología

La morfoedafología es el resultado de la integración de la información sobre rocas, relieve y suelos. Debido a sus características morfológicas, morfométricas, litológicas, estructurales y edáficas, las unidades morfoedafológicas, junto con la vegetación, juegan un papel decisivo en la conservación de los distintos bienes y servicios ambientales de la cuenca, tales como recarga de acuíferos, descarga y almacenamiento de aguas subterráneas, contención de inundaciones, desarrollo de suelos, etcétera. En términos generales, los suelos predominantes son: andosoles con 22%, que se ubican en la porción norte de la cuenca; vertisoles con 19%, los cuales se presentan en la porción más baja de la cuenca, luvisoles con 14%, dispersos en las porciones montañosas de la cuenca, y feozem con 12%, localizado sobre todo al sur de la cuenca, en la Sierra Madre del Sur (cuadro 4, mapa 10). Las unidades morfoedafológicas predominantes son las laderas graníticas y volcánicas con regosol, feozem y cambisol que cubren 10% de la cuenca y se ubican en la porción suroeste de la cuenca en la Sierra Madre del Sur; los conos volcánicos y derrames lávicos ligeros a moderadamente inclinados cubiertos por piroclastos con andosol, luvisol y regosol, que ocupan 8% y se localizan en la zona norte de la cuenca; el piedemonte de flujos piroclásticos con vertisol y feozem, el cual tiene una superficie de 8% y se localiza en la

porción baja y central de la cuenca, al pie del Sistema Volcánico Transversal, y los derrames lávicos suave a moderadamente inclinados cubiertos por piroclastos con andosol, feozem y luvisol que ocupan 5% de la cuenca y se ubican en el extremo este de la misma.

Tipo de suelo	Superficie en km2	Superficie en %
Vertisol	2304.91	19.75
Feozem	897.49	7.69
Andosol	1792.67	15.36
Cambisol	2085.48	17.87
Luvisol	1154.23	9.89
Regosol	3271.87	28.04
Acrisol	9.88	0.08
Litosol	116.58	1.00
NA	35.87	0.31

Total	11669	100
-------	-------	-----

Tabla 13 Tipo de suelo en la cuenca del río Tepalcatepec.

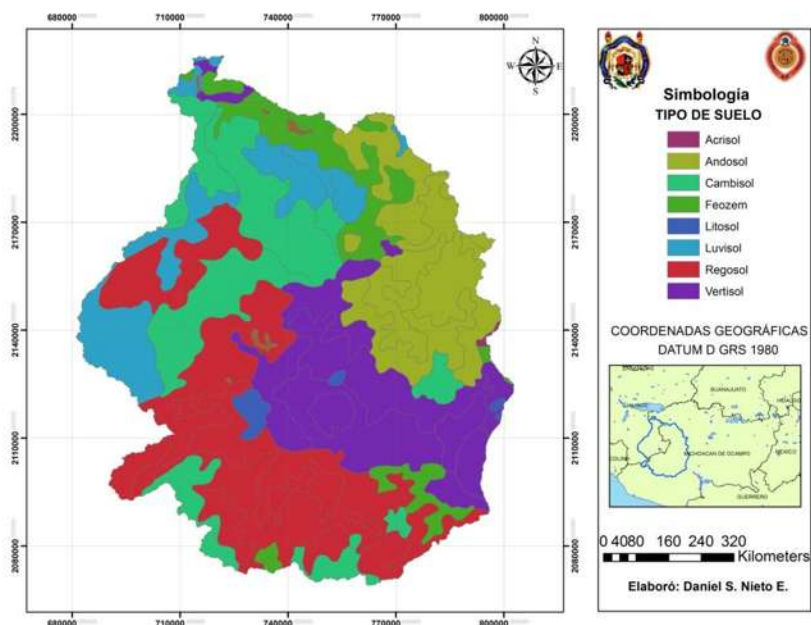


Figura 12 Tipo de suelo en la cuenca del río Tepalcatepec.

Vertisol: Del latín *vertere*, voltear. Literalmente, suelo que se revuelve o que se voltea. Suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Se caracterizan por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla, la cual es expandible en

húmedo formando superficies de deslizamiento llamadas facetas y que por ser colapsables en seco pueden formar grietas en la superficie o a determinada profundidad. Su color más común es el negro o gris oscuro en la zona centro a oriente de México y de color café rojizo hacia el norte del país. Su uso agrícola es muy extenso, variado y productivo. Ocupan gran parte de importantes distritos de riego en Sinaloa, Sonora, Guanajuato, Jalisco, Tamaulipas y Veracruz. Son muy fértiles pero su dureza dificulta la labranza. En estos suelos se produce la mayor parte de caña, cereales, hortalizas y algodón. Tienen baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización. Su símbolo es (V).

Feozem: Del griego *phaeo*: pardo; y del ruso *zemljá*: tierra. Literalmente, tierra parda. Suelos que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Es el cuarto tipo de suelo más abundante en el país. Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes, semejante a las capas superficiales de los Chernozems y los Castañozems, pero sin presentar las capas ricas en cal con las que cuentan estos dos tipos de suelos. Los Feozems son de profundidad muy variable. Cuando son profundos se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para la agricultura de riego o temporal, de granos, legumbres u hortalizas, con rendimientos altos. Los Feozems menos profundos, situados en laderas o pendientes, presentan como principal limitante la roca o alguna cementación muy fuerte en el suelo, tienen rendimientos más bajos y se erosionan con más facilidad, sin embargo, pueden utilizarse para el pastoreo o la ganadería con resultados aceptables. El uso óptimo de estos suelos depende en muchas ocasiones de otras características del terreno y sobretodo de la disponibilidad de agua para riego. Su símbolo en la carta edafológica es (H).

Andosol: De las palabras japonesas *an*: oscuro; y *do*: tierra. Literalmente, tierra negra. Suelos de origen volcánico, constituídos principalmente de ceniza, la cual contiene alto contenido de alófono, que le confiere ligereza y untuosidad al suelo. Se extienden territorialmente en las regiones de Mil Cumbres y la Neovolcánica Tarasca, en el estado de Michoacán, en las Sierras Neovolcánicas Nayaritas, Sierra de los Tuxtlas en Veracruz y en

la región de Lagos y Volcanes de Anáhuac, en el centro del país. Son generalmente de colores oscuros y tienen alta capacidad de retención de humedad. En condiciones naturales presentan vegetación de bosque o selva. Tienen generalmente bajos rendimientos agrícolas debido a que retienen considerablemente el fósforo y éste no puede ser absorbido por las plantas. Sin embargo, con programas adecuados de fertilización, muchas regiones aguacateras de Michoacán, por ejemplo, consiguen rendimientos muy altos. Tienen también uso pecuario especialmente ovino; el uso más favorable para su conservación es el forestal. Son muy susceptibles a la erosión eólica y su símbolo es (T).

Cambisol: Del latín *cambiare*: cambiar. Literalmente, suelo que cambia. Estos suelos son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en los de zonas áridas. Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso. También pertenecen a esta unidad algunos suelos muy delgados que están colocados directamente encima de un tepetate. Son muy abundantes, se destinan a muchos usos y sus rendimientos son variables pues dependen del clima donde se encuentre el suelo. Son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión. Su símbolo es (B).

Luvisol: Del latín *luvi, luo*: lavar. Literalmente, suelo con acumulación de arcilla. Son suelos que se encuentran en zonas templadas o tropicales lluviosas como los Altos de Chiapas y el extremo sur de la Sierra Madre Occidental, en los estados de Durango y Nayarit, aunque en algunas ocasiones también pueden encontrarse en climas más secos como los Altos de Jalisco o los Valles Centrales de Oaxaca. La vegetación es generalmente de bosque o selva y se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. Son frecuentemente rojos o amarillentos, aunque también presentan tonos pardos, que no llegan a ser oscuros. Se destinan principalmente a la agricultura con rendimientos moderados. En algunos cultivos de café y frutales en zonas tropicales, de aguacate en zonas templadas, donde registran rendimientos muy favorables. Con pastizales cultivados o inducidos pueden dar

buenas utilidades en la ganadería. Los aserraderos más importantes del país se encuentran en zonas de Luvisoles, sin embargo, debe tenerse en cuenta que son suelos con alta susceptibilidad a la erosión. En México 4 de cada 100 hectáreas está ocupada por Luvisoles. El símbolo para su representación cartográfica es (L).

Regosol: Del griego *reghos*: manto, cobija o capa de material suelto que cubre a la roca. Suelos ubicados en muy diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general son claros o pobres en materia orgánica, se parecen bastante a la roca que les da origen. En México constituyen el segundo tipo de suelo más importante por su extensión (19.2%). Muchas veces están asociados con Litosoles y con afloramientos de roca o tepetate. Frecuentemente son someros, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad. Se incluyen en este grupo los suelos arenosos costeros y que son empleados para el cultivo de coco y sandía con buenos rendimientos. En Jalisco y otros estados del centro se cultivan granos con resultados de moderados a bajos. Para uso forestal y pecuario tienen rendimientos variables. El símbolo cartográfico para su representación es (R).

Acrisol: Del latín *acris*: agrio, ácido; y *solum*: suelo. Literalmente, suelo ácido. Son suelos que se encuentran en zonas tropicales o templadas muy lluviosas como las sierras orientales de Oaxaca, llanura costera veracruzana, sierra lacandona y Altos de Chiapas. En condiciones naturales tienen vegetación de selva o bosque. Se caracterizan por tener acumulación de arcilla en el subsuelo, muy ácida y pobre en nutrientes. En México se usan en la agricultura con rendimientos muy bajos, salvo los frutales tropicales como cacao, café o piña, en cuyo caso se obtienen rendimientos de medios a altos; también se usan en la ganadería con pastos inducidos o cultivados; sin embargo, el uso más adecuado para la conservación de estos suelos es el forestal. Son moderadamente susceptibles a la erosión y su símbolo en la carta es (A).

Litosol: Del griego *lithos*: piedra. Literalmente, suelo de piedra. Son los suelos más abundantes del país pues ocupan 22 de cada 100 hectáreas de suelo. Se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, en todas las sierras de México, barrancas, lamerías y en algunos terrenos planos. Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión son muy variables dependiendo de otros factores ambientales. El uso de estos suelos depende principalmente de la vegetación que los cubre. En bosques y selvas su uso es forestal; cuando hay matorrales o pastizales se puede llevar a cabo un pastoreo más o menos limitado y en algunos casos se destinan a la agricultura, en especial al cultivo de maíz o el nopal, condicionado a la presencia de suficiente agua. No tiene subunidades y su símbolo es (1).

7.1.6.-Acuíferos

Dentro del parteaguas de la cuenca en estudio se encuentran los acuíferos de Cotija, Apatzingán, Colomos, Quitupán y Valle de Juárez.

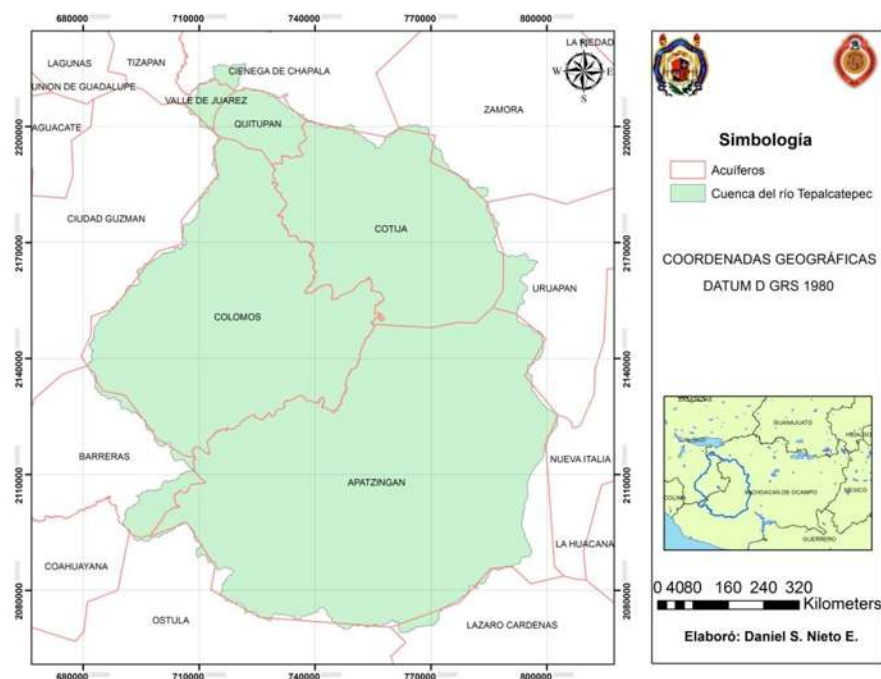


Figura 13 Acuíferos en la cuenca del río Tepalcatepec.

7.2.-Estaciones climatológicas

Las estaciones climatológicas miden la temperatura, precipitación pluvial, evaporación, velocidad y dirección del viento. Estas variables climatológicas varían geográficamente y temporalmente, por lo que su medición resulta relevante para la planeación de los recursos hídricos y los estudios hidrológicos.

7.3.-Base de datos climatológica nacional (CLICOM):

Es una base de datos administrada por el servicio meteorológico nacional (SMN), CLICOM es un software de manejo de datos meteorológicos desarrollado por las naciones unidas, y significa climate computing proyect, las observaciones son llevadas a cabo de manera diaria, y cada una de las estaciones del país cuentan con datos históricos de diferentes periodos, pero en general el periodo que abarcan los datos son de 1920 a 2011.

Están herramienta permite ver gráficos de series mensuales o anuales de diferentes datos como: temperaturas, precipitación, evaporación y unidades de calor, además de descargar los datos de diferentes maneras como: promedios diarios, promedios mensuales, promedios anuales, datos diarios y datos mensuales.

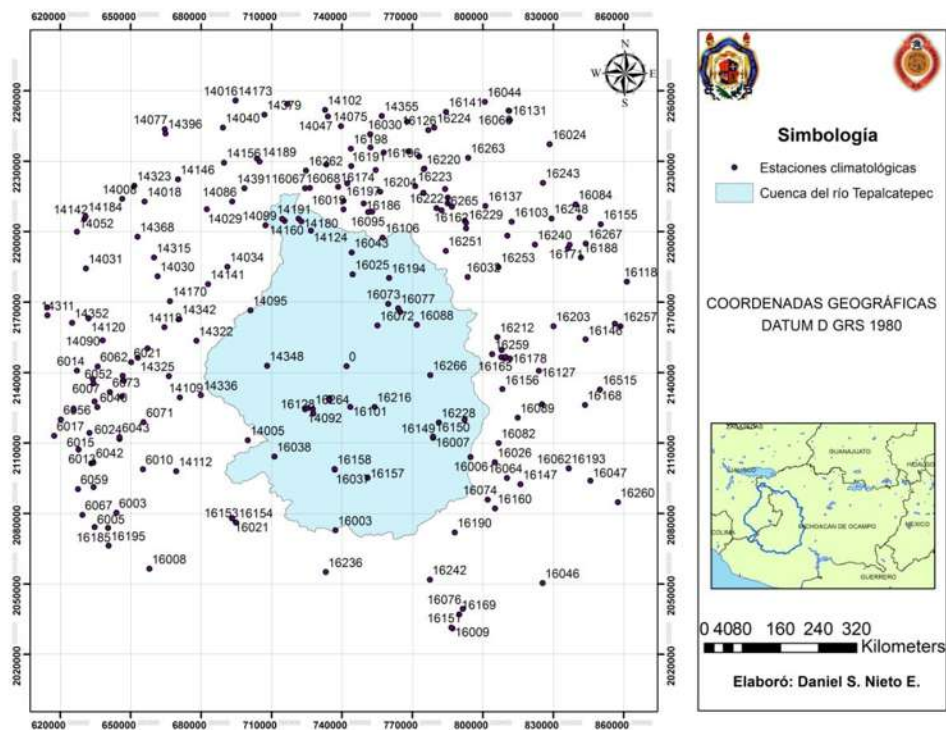


Figura 14 Estaciones climatológicas cercanas a la cuenca del río Tepalcatepec.

Código	Nombre	Código	Nombre
16006	ANTUNEZ	14099	MAZAMITLA
16007	APATZINGAN SMN	16095	PRESA JARIPO
16039	PIEDRAS BLANCAS	16106	SAN ANGEL
16158	EL CAJON	16259	TZINDIO
16228	ACAHUATO	14095	MANUEL M DIEGUEZ CFE
14336	EL GUAYABO	14119	QUITUPAN CFE
14092	OLIVOS CFE	14177	OLIVOS
14124	SAN DIEGO	14191	VALLE DE JUAREZ SMN
14180	QUITUPAN	16038	EL CARRIZO
14348	JILOTLAN	16072	CHORROS DEL VARAL CFE
16011	BUENAVISTA I	16088	PERIBAN
16025	COTIJA	16090	PIEDRAS BLANCAS CFE
16037	EL CAJON CFE	16128	TEPACALTEPEC
16043	EL PUERTO	16194	ETA 039 TOCUMBO
16053	SAN SEBASTIAN	14005	AHUIJULLO
16085	PARACUARO	16074	PANCHES CFE
16101	PUNTA DE AGUA	16153	COALCOMAN DGE
16157	CHILA		

Tabla 14 Estaciones climatológicas principales.

7.4.-Estaciones hidrométricas

La información que se puede encontrar de cada estación hidrométrica es:

- Valores diarios: Gasto medio diario (m^3/s) día 1 a día 29-31.
- Valores mensuales: Se incluyen la hora y el día del gasto máximo y el gasto mínimo (m^3/s). Además de la lectura de volumen máximo y medio de escurrimientos (miles de m^3), sedimentos (miles de m^3) y la lectura del día y hora de las escalas para el gasto mínimo, medio y máximo.
- Valores anuales: Menciona el mes, día y hora en que ocurre el gasto máximo y gasto mínimo (m^3/s). La lectura de escala para el gasto máximo y mínimo (m), además del volumen anual de escurrimientos (miles de m^3), gasto medio anual (m^3/s) y volumen anual de sedimentos (miles de m^3).
- Hidrograma: Incluye la fecha en que ocurre el gasto, Hora en que ocurre el gasto y Gasto instantáneo (m^3/s).
- Limnigrama: Muestra la fecha de lectura, hora de lectura y lectura de escala (m).
- Sedimentos: Se incluye la fecha de lectura, hora de lectura y porcentaje de sedimento.

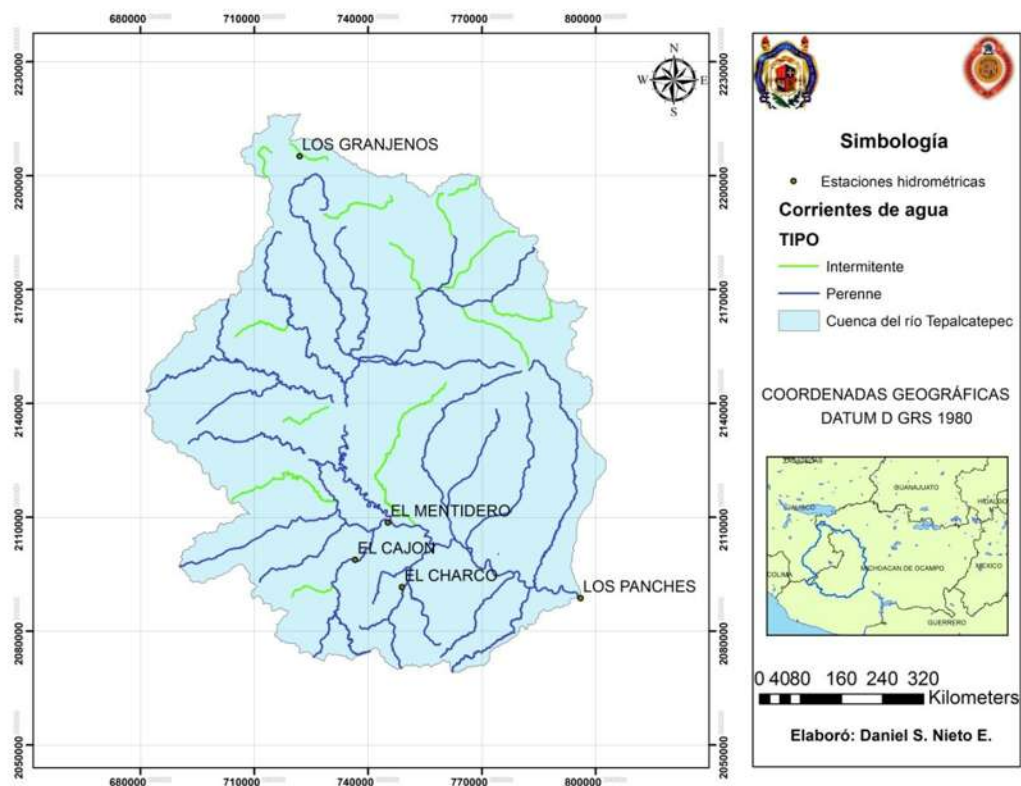


Figura 15 Estaciones hidrométricas dentro de la cuenca del río Tepalcatepec.

Código	Nombre	Corriente	Cuenca	Estado
18129	LOS GRANJENOS	RIO QUITUPAN	RIO TEPALCATEPEC	JALISCO
18452	EL CHARCO	RIO CHILA	RIO TEPALCATEPEC	MICHOACAN
18201	EL CAJON	RIO EL CAJON	RIO TEPALCATEPEC	MICHOACAN
18202	EL MENTIDERO	RIO EL CAJON	RIO TEPALCATEPEC	MICHOACAN
18494	LOS PANCHES	CANAL TEPALCATEPEC	RIO TEPALCATEPEC	MICHOACAN
18181	PIEDRAS BLANCAS	RIO TEPALCATEPEC	RIO BALSAS	MICHOACAN

Tabla 15 Estaciones hidrométricas dentro de la cuenca del río Tepalcatepec.

7.5.-Modelación hidrológica con la NOM-011-CNA-2015

La metodología establecida por la Norma Oficial Mexicana, establece la forma en que debe de calcularse el escurrimiento media anual para una cuenca hidrológica. Este es precisamente el que se ha venido haciendo con los modelos lluvia-escurrimiento.

Sin embargo conviene ejecutar la metodología con la Norma para poder comparar los resultados que se obtienen de cada uno de los procesos.

Esta metodología se basa principalmente en el uso y tipo de suelo que se tenga en la zona de estudio. Con base a estas características determina un coeficiente de escurrimiento que al ser multiplicado por la precipitación anual de la cuenca y el area de la misma se obtiene el escurrimiento anual de la cuenca.

A su vez el coeficiente de escurrimiento depende de un parámetro k , que toma en cuenta las características del suelo y la textura que tiene el mismo (CONAGUA 2015).

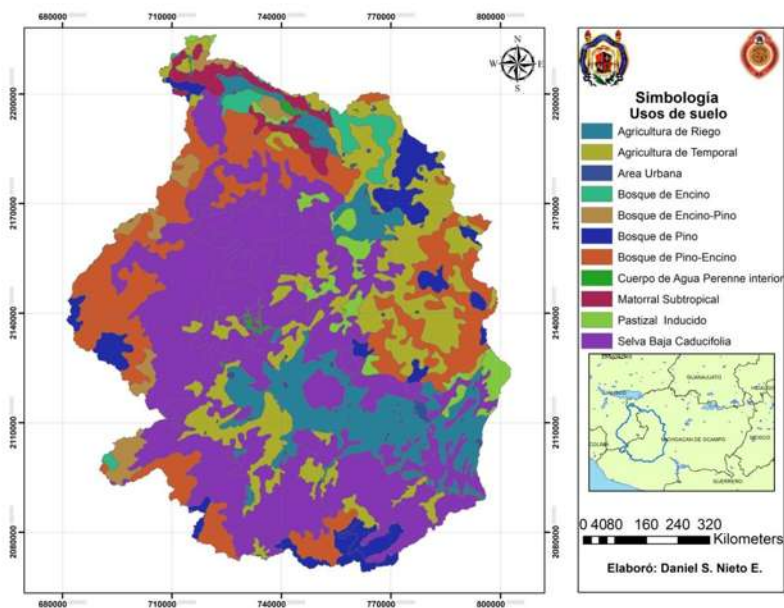


Figura 16 Usos de suelo dentro de la cuenca del río Tepalcatepec.

Para calcular el coeficiente también se necesita definir la textura del suelo de la cuenca, que van desde valores de 1 a suelos con textura gruesa, 2 para los suelos con textura media y finalmente 3 para los suelos con textura fina.

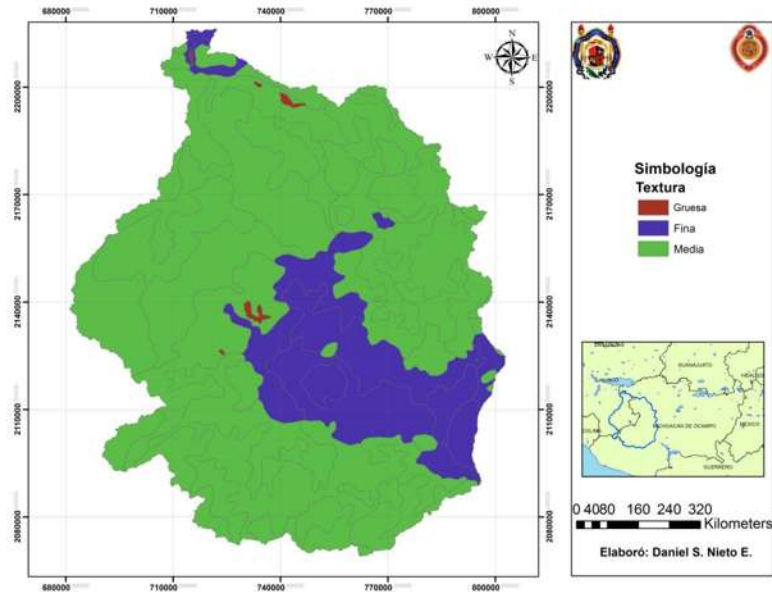


Figura 17 Textura del suelo en la cuenca del río Tepalcatepec.

Con estos elementos mostrados en los mapas anteriores se calcula el parámetro k para cada una de las microcuencas, subcuencas, cuencas generadas por polígonos de Thiessen y de manera global en la cuenca del río Tepalcatepec. Con ayuda de los sistemas de información geográfica (SIG) en este caso de arcgis v10.1 se obtuvo el mapa de K de la cuenca.

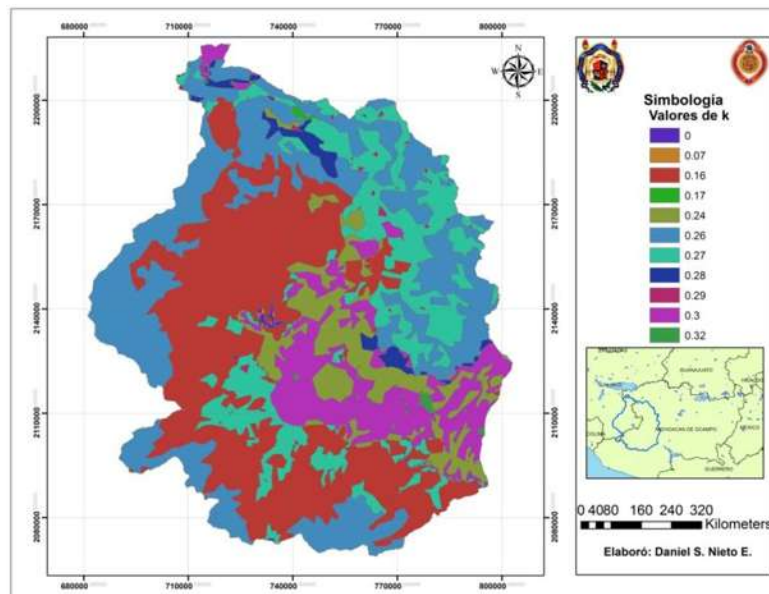


Figura 18 Valores de K en la cuenca del río Tepalcatepec.

Para determinar la precipitación anual de la cuenca, se dibujaron isoyetas en la cuenca utilizando la información meteorológica disponible para la zona en estudio misma que ha sido tratada y validada estadísticamente en este trabajo.

Haciendo uso de la siguiente expresión se puede determinar el escurrimiento natural medio para cada subcuenca.

$$V_{esc} = P_{ac} * A_c * C_{esc}$$

Donde:

V_{esc} : Volumen anual de escurrimiento

P_{ac} : Precipitación anual de la cuenca

A_c : Área de la cuenca

C_{esc} : Coeficiente de escurrimiento

La precipitación y el área se ingresan en metros y metros cuadrados respectivamente, mientras que el coeficiente de escurrimiento es adimensional.

Cabe resaltar que en este trabajo se analizó la Norma Oficial Mexicana de cuatro maneras distintas para poder observar la distribución espacial tanto de los datos meteorológicos así como los resultados y a continuación se describen.

Por subcuencas: estas se generaron a partir de la distribución espacial de las estaciones hidrométricas, hacia aguas arriba, para cada una de estas se generó una estación ficticia de precipitación y evapotranspiración al centro de gravedad de cada subcuenca, en total en la cuenca se generaron 6 subcuencas.

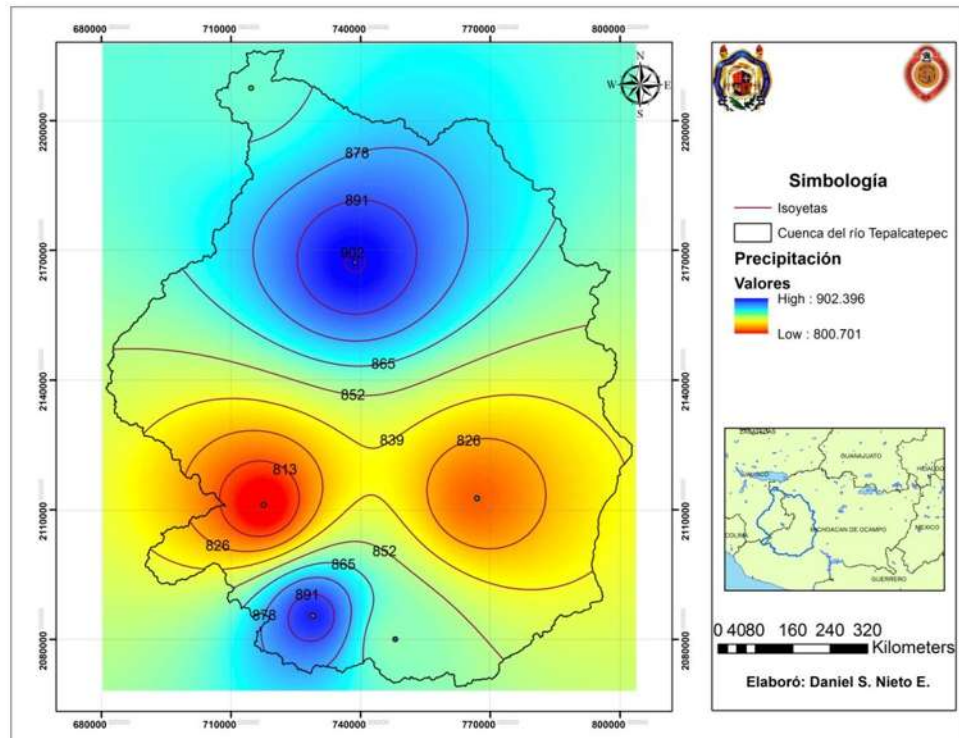


Figura 19 Mapa de precipitación (mm) con datos de subcuencas.

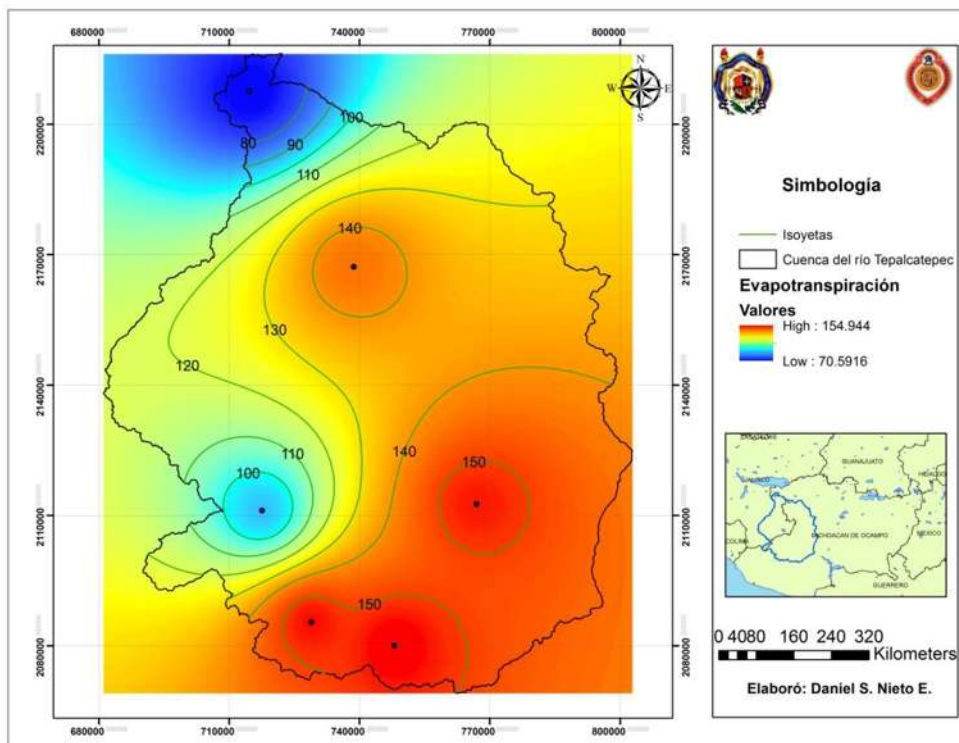


Figura 20 Mapa de Evapotranspiración (mm) con datos de subcuencas.

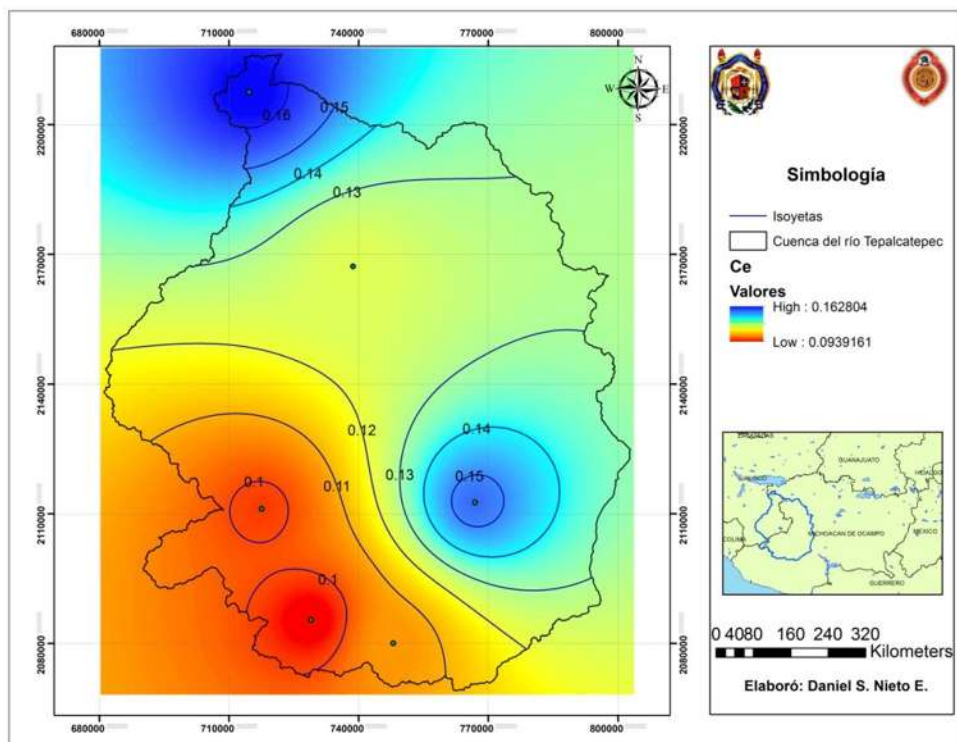


Figura 21 Mapa de coeficiente de escurrimiento (adim) con datos de subcuencas.

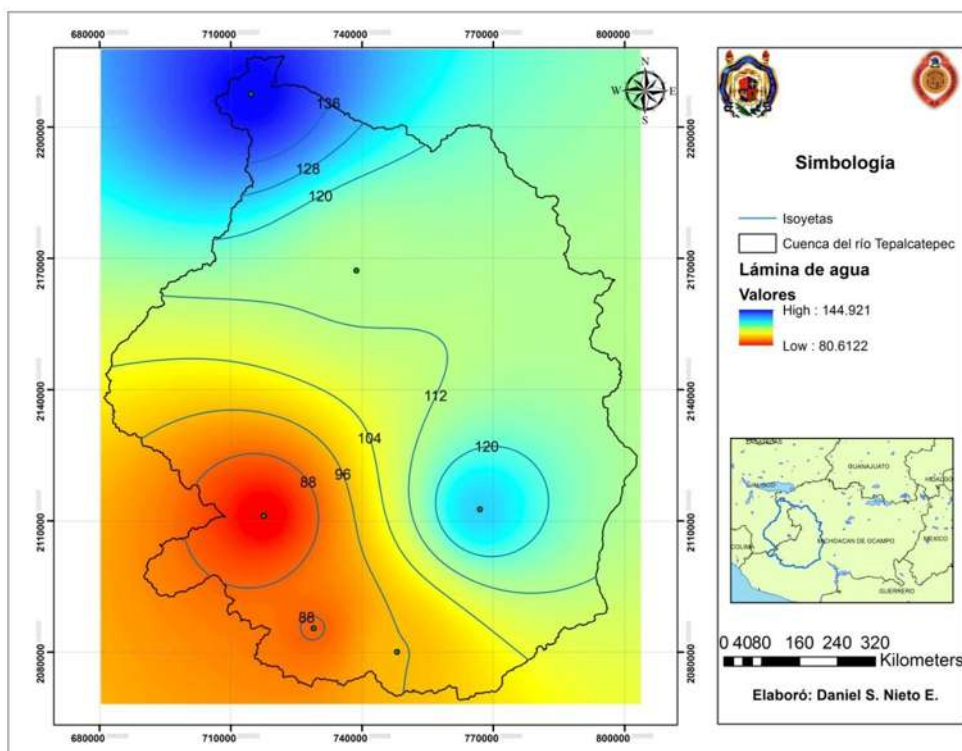


Figura 22 Mapa de lámina de agua (mm) con datos de subcuencas.

Por microcuencas: de estas se generaron 104 en total en la cuenca y para cada una de ellas del mismo modo se generó una estación ficticia con datos de precipitación y evapotranspiración.

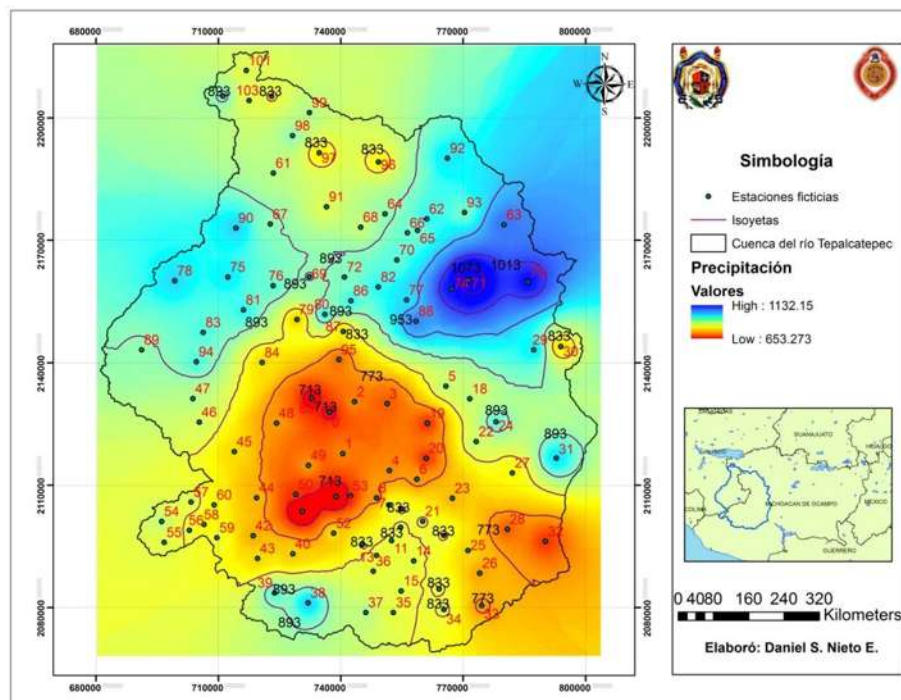


Figura 23 Mapa de precipitación (mm) con datos de microcuencas.

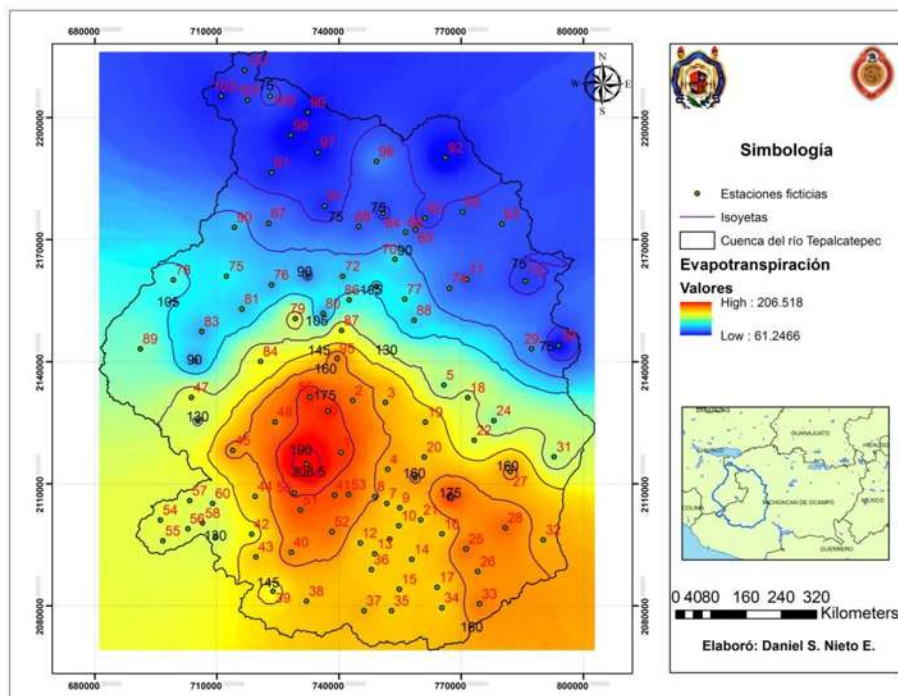


Figura 24 Mapa de evapotranspiración (mm) con datos de microcuencas.

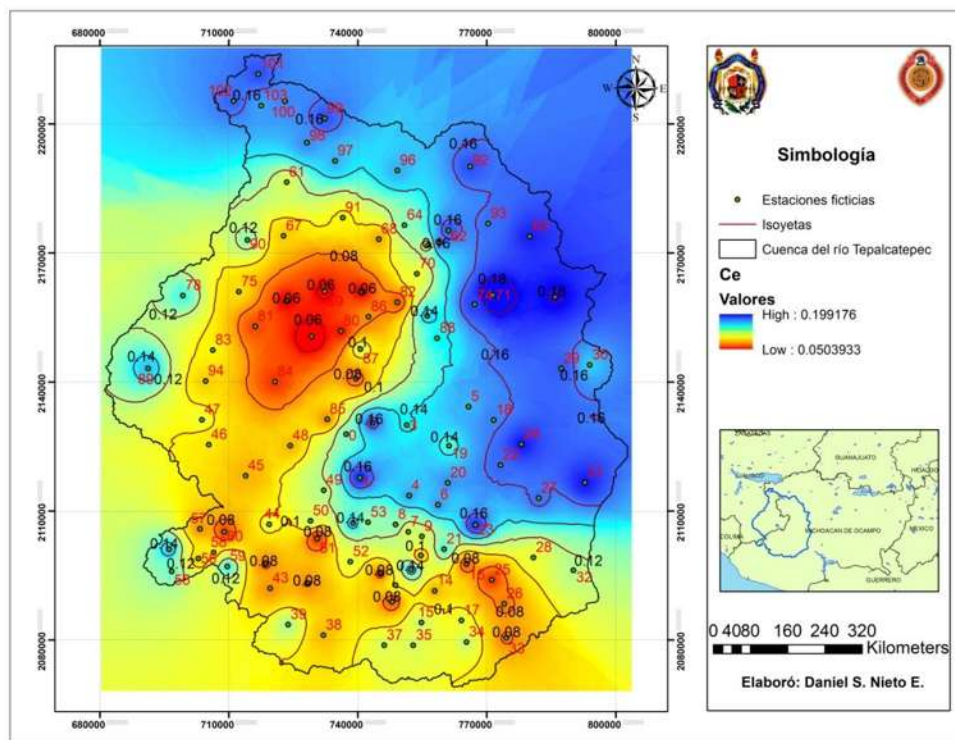


Figura 25 Mapa de coeficiente de escurrimiento (adim) con datos de microcuencas.

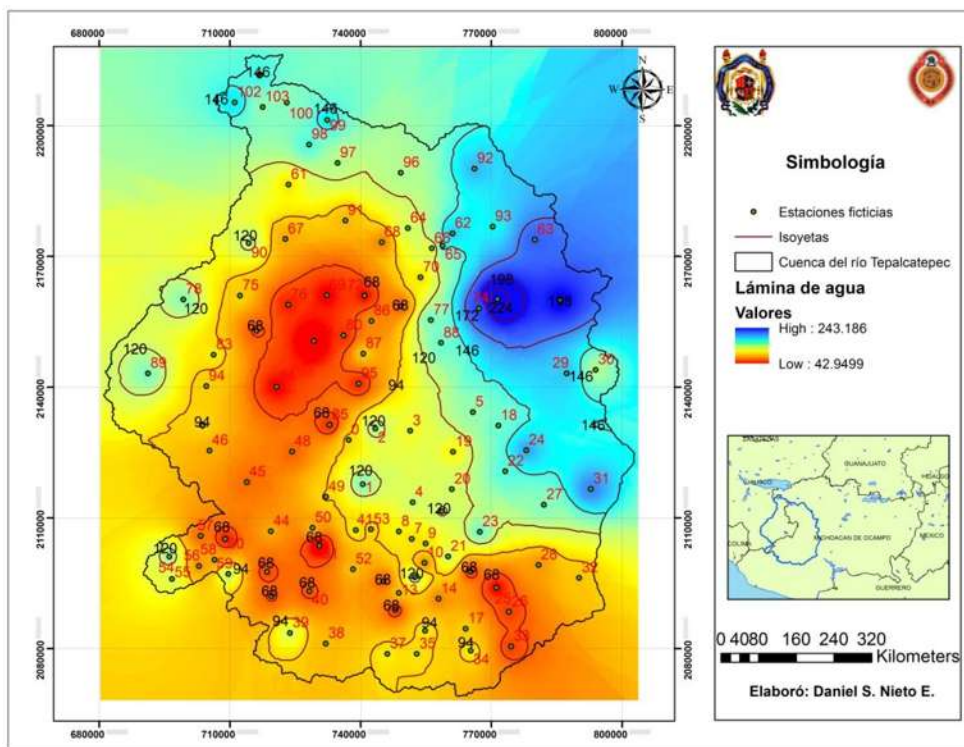


Figura 26 Mapa de lámina de agua (mm) con datos de microcuencas.

Por polígonos de Thiessen: para esta división se usaron las estaciones climatológicas principales y su información ya llena por el método del inverso de la distancia euclidiana al cuadrado (IDW).

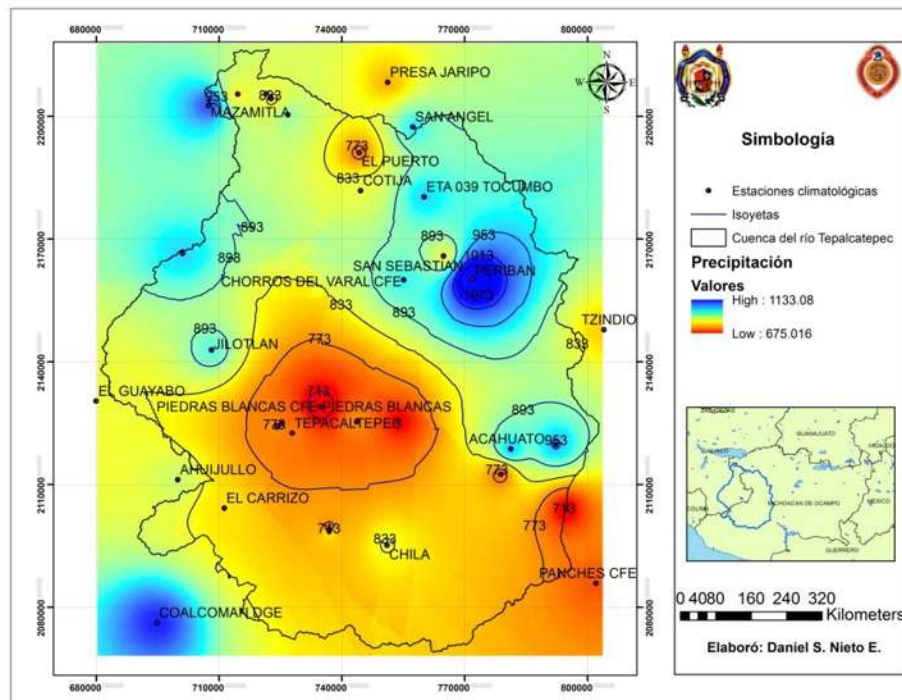


Figura 27 Mapa de precipitación (mm) con datos de polígonos de Thiessen.

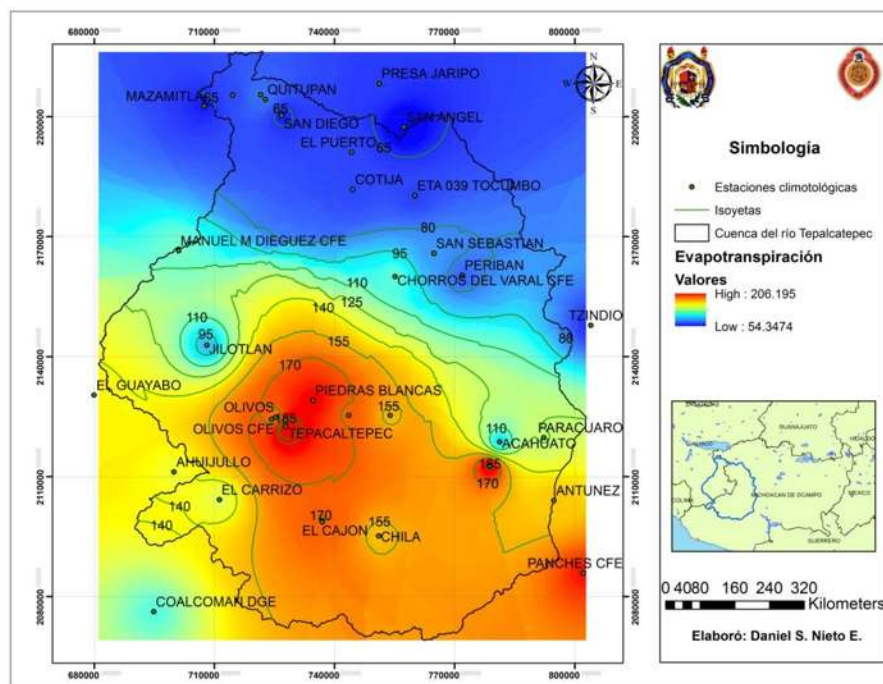


Figura 28 Mapa de evapotranspiración (mm) con datos de polígonos de Thiessen.

De manera global: para esto se calculó un promedio ponderado de precipitación y evapotranspiración, esto dándole mayor peso a las estaciones climatológicas que tienen mayor área de influencia dentro de la cuenca.

Microcuencas					
Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que infiltra Hm ³	Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que infiltra Hm ³
1951	1057.16	1208.93	1981	1616.63	2086.70
1952	1321.66	1694.18	1982	873.47	781.73
1953	882.32	936.36	1983	1669.33	2160.10
1954	1324.76	1648.57	1984	1724.99	3134.63
1955	1886.91	3527.45	1985	1368.36	2470.33
1956	1167.58	1272.51	1986	1265.09	1578.62
1957	688.10	784.26	1987	1128.15	2017.70
1958	1848.33	2010.80	1988	1365.00	2628.99
1959	1864.66	1969.60	1989	961.36	1436.07
1960	825.14	1193.86	1990	1437.15	1866.35
1961	943.85	1493.04	1991	1296.95	1539.99
1962	1121.80	1596.05	1992	2182.53	3776.28
1963	1251.16	1588.63	1993	1179.12	1655.47
1964	914.62	1345.79	1994	917.11	1309.31
1965	995.98	1568.65	1995	1748.08	2620.09
1966	1350.16	1486.60	1996	1433.93	1756.66
1967	2059.53	3196.97	1997	1115.23	1143.45
1968	1521.24	1786.01	1998	1305.49	2486.04
1969	1214.63	2517.89	1999	974.84	1635.93
1970	1606.76	3207.15	2000	866.81	972.88
1971	1379.18	2347.88	2001	1122.27	1755.98
1972	1477.28	2326.06	2002	1385.21	1802.73
1973	1731.62	2728.84	2003	1130.30	1960.66
1974	1307.58	1810.64	2004	1399.77	1970.90
1975	1406.76	2635.54	2005	708.20	1090.36
1976	1853.38	3109.37	2006	1082.49	1481.29
1977	1183.53	1701.11	2007	1192.10	1802.09
1978	1270.94	2079.21	2008	1143.69	2130.76
1979	829.13	1197.81	2009	754.84	803.89
1980	1389.87	1951.39	2010	1567.98	2896.05

Tabla 16 Esguerrimiento anual e infiltración de acuerdo a la NOM-011-CNA-2015.

Subcuencas					
Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que infiltra Hm ³	Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que infiltra Hm ³
1951	930.38	948.50	1981	1454.03	1656.65
1952	1209.04	1371.16	1982	774.65	385.73
1953	822.45	599.21	1983	1512.82	1784.64
1954	1229.67	1351.27	1984	1523.63	2687.48
1955	1755.45	3212.72	1985	1200.10	1879.69
1956	1100.09	1048.26	1986	1142.38	1195.67
1957	649.13	642.44	1987	999.45	1531.02
1958	1708.18	1668.39	1988	1245.10	2281.38
1959	1747.45	1689.93	1989	878.38	1212.63
1960	772.67	943.37	1990	1318.26	1612.71
1961	867.44	1291.34	1991	1152.51	1011.13
1962	1037.48	1274.37	1992	1979.45	3175.50
1963	1164.29	1213.58	1993	1006.27	1117.75
1964	842.08	1104.80	1994	751.00	631.84
1965	927.31	1327.54	1995	1469.81	2153.86
1966	1247.95	1036.48	1996	1173.18	1325.92
1967	1904.56	2766.09	1997	963.51	545.13
1968	1398.50	1333.00	1998	1164.60	1808.19
1969	1120.18	2049.46	1999	898.97	1329.87
1970	1490.64	2864.94	2000	806.91	616.20
1971	1254.56	2009.77	2001	1037.43	1458.28
1972	1348.84	1987.73	2002	1301.86	1391.85
1973	1603.75	2322.95	2003	1031.39	1624.17
1974	1181.40	1572.68	2004	1295.99	1634.70
1975	1259.07	2400.17	2005	638.63	862.91
1976	1723.93	2727.80	2006	1002.05	1145.83
1977	1091.62	1289.30	2007	1091.75	1459.64
1978	1179.34	1699.21	2008	1031.48	1753.35
1979	781.40	1018.48	2009	707.07	556.36
1980	1286.70	1621.97	2010	1401.73	2534.64

Tabla 17 Esguerrimiento anual e infiltración de acuerdo a la NOM-011-CNA-2015.

Poligonos de Thiessen					
Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que infiltra Hm ³	Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que infiltra Hm ³
1951	1063.31	1446.09	1981	1619.40	2459.07
1952	1301.60	1950.80	1982	882.02	1051.08
1953	870.07	1123.35	1983	1703.08	2588.90
1954	1310.00	1937.05	1984	1791.56	3651.40
1955	1857.36	3695.38	1985	1399.12	2894.25
1956	1151.97	1577.07	1986	1271.74	1944.10
1957	682.80	1017.58	1987	1129.20	2318.36
1958	1887.81	2360.42	1988	1379.06	3003.40
1959	1845.52	2348.36	1989	976.20	1751.87
1960	820.45	1465.58	1990	1461.67	2316.09
1961	950.92	1688.27	1991	1318.28	1956.96
1962	1115.78	1836.50	1992	2208.21	4197.37
1963	1255.94	1896.60	1993	1233.62	2049.39
1964	921.19	1672.43	1994	1015.59	1680.90
1965	991.93	1758.75	1995	1891.43	2991.43
1966	1342.57	1841.90	1996	1593.06	2136.02
1967	2070.94	3612.32	1997	1158.64	1488.61
1968	1513.98	2145.17	1998	1318.64	2851.88
1969	1242.22	2980.13	1999	971.49	1947.17
1970	1631.91	3603.29	2000	860.36	1299.22
1971	1419.06	2699.84	2001	1111.22	2150.73
1972	1519.29	2705.07	2002	1367.26	2117.54
1973	1747.04	3204.02	2003	1121.06	2281.46
1974	1354.90	2160.02	2004	1388.70	2321.40
1975	1465.91	3003.50	2005	702.61	1317.17
1976	1864.78	3508.54	2006	1068.24	1808.04
1977	1184.53	2135.08	2007	1172.08	2070.18
1978	1269.15	2534.92	2008	1141.63	2448.49
1979	833.57	1557.92	2009	753.23	1102.17
1980	1399.61	2400.48	2010	1566.23	3133.03

Tabla 18 Esguerrimiento anual e infiltración de acuerdo a la NOM-011-CNA-2015.

Cuenca completa					
Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que infiltra Hm ³	Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que infiltra Hm ³
1951	985.63	847.81	1981	1584.03	1732.30
1952	1287.21	1386.19	1982	838.09	356.15
1953	871.12	446.71	1983	1660.26	2080.05
1954	1311.55	1178.72	1984	1693.03	3116.23
1955	1855.59	3388.77	1985	1309.27	2105.64
1956	1170.86	709.39	1986	1228.41	805.92
1957	690.76	420.13	1987	1070.40	1731.42
1958	1817.23	1308.75	1988	1352.78	2597.56
1959	1856.35	1405.85	1989	962.99	1299.85
1960	814.43	799.30	1990	1429.82	1361.86
1961	916.47	874.96	1991	1242.74	876.23
1962	1110.79	1278.32	1992	2150.56	3390.51
1963	1245.94	852.94	1993	1100.69	1026.29
1964	906.55	952.07	1994	831.03	517.59
1965	971.07	1065.00	1995	1634.85	2394.49
1966	1322.93	818.92	1996	1308.18	1032.17
1967	2030.92	2586.51	1997	1049.78	320.67
1968	1500.49	1407.25	1998	1264.67	1824.15
1969	1228.96	2446.97	1999	962.24	986.01
1970	1623.30	3214.18	2000	870.66	330.27
1971	1354.82	1873.36	2001	1103.04	1292.22
1972	1464.80	1946.67	2002	1375.39	1274.97
1973	1725.60	2134.19	2003	1110.30	1473.33
1974	1272.86	1092.88	2004	1375.68	1240.59
1975	1354.65	2338.43	2005	680.05	693.49
1976	1860.07	2789.80	2006	1067.55	968.45
1977	1180.58	1030.37	2007	1157.33	1531.87
1978	1273.63	1536.73	2008	1094.02	1903.57
1979	838.17	478.73	2009	748.11	240.47
1980	1384.13	1481.95	2010	1489.42	2881.98

Tabla 19 Esguerrimiento e infiltración anual de acuerdo a la NOM-011-CNA-2015.

7.6.-Modelación hidrológica con HBV

Para alcanzar mejores resultados en las calibraciones además de tratar de emular un modelo hidrológico semidistribuido se decidió dividir cada subcuenca a calibrar en microcuencas.

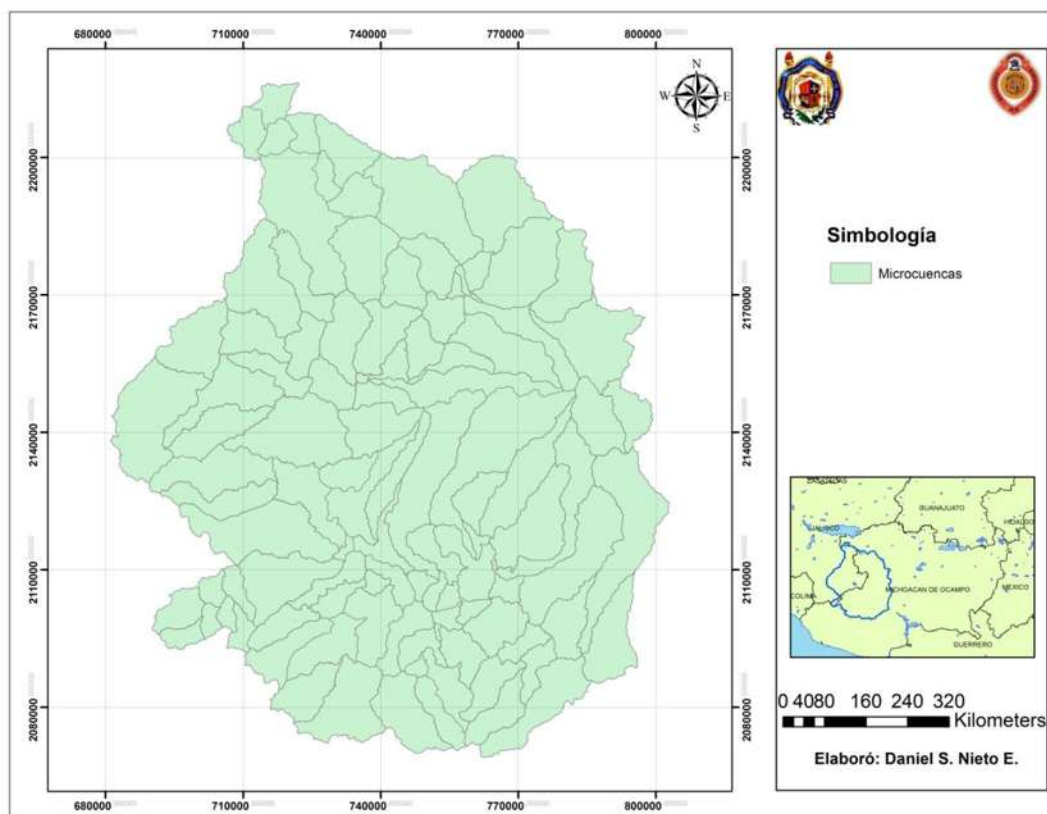


Figura 31 Delimitación de las microcuencas.

Estas microcuencas se definieron en función de la topografía y la red de drenaje de la zona de estudio.

Definidas la microcuencas, se establecieron putos de aforo que se tienen en la zona, mismos que definen los puntos de calibración para el modelo. Para el caso de la cuenca del río Tepalcatepec, se tienen tres estaciones hidrométricas con claves 18129, 18201, 18202, 18452, 18181, 18494.

Estos puntos definen las zonas de calibración del modelo, para este caso al tenerse seis puntos de aforo también se definieron seis subcuencas o zonas de calibración.

Conociendo las áreas de influencia de cada estación climatológica y teniendo establecidas las seis zonas de calibración, se determina que estación climatológica tiene influencia sobre cada microcuenca de calibración. Cuando una microcuenca está afectada por dos o más estaciones, se construye una estación ficticia al centro de gravedad de la microcuenca, la cual se crea con los datos de las estaciones reales que influyen sobre la superficie de la misma, el método para la construcción de las estaciones ficticias fue el mismo método para la estimación de datos faltantes en la series climatológicas originales, es decir el inverso de la distancia euclidiana al cuadrado, el cual define un peso distinto para cada estación involucrada dependiendo de la influencia que esta ejerza sobre la zona de estudio.

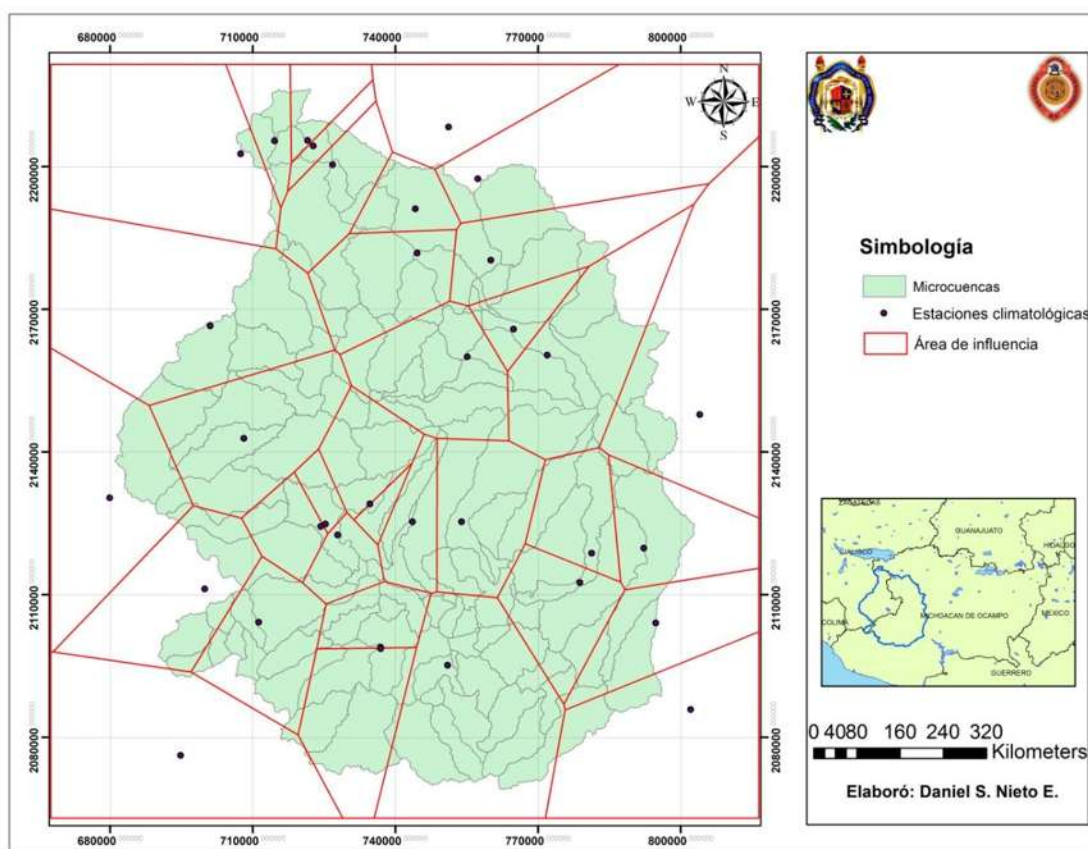


Figura 32 Polígonos de Thiessen para la cuenca del río Tepalcatepec.

Estación Los granjenos:

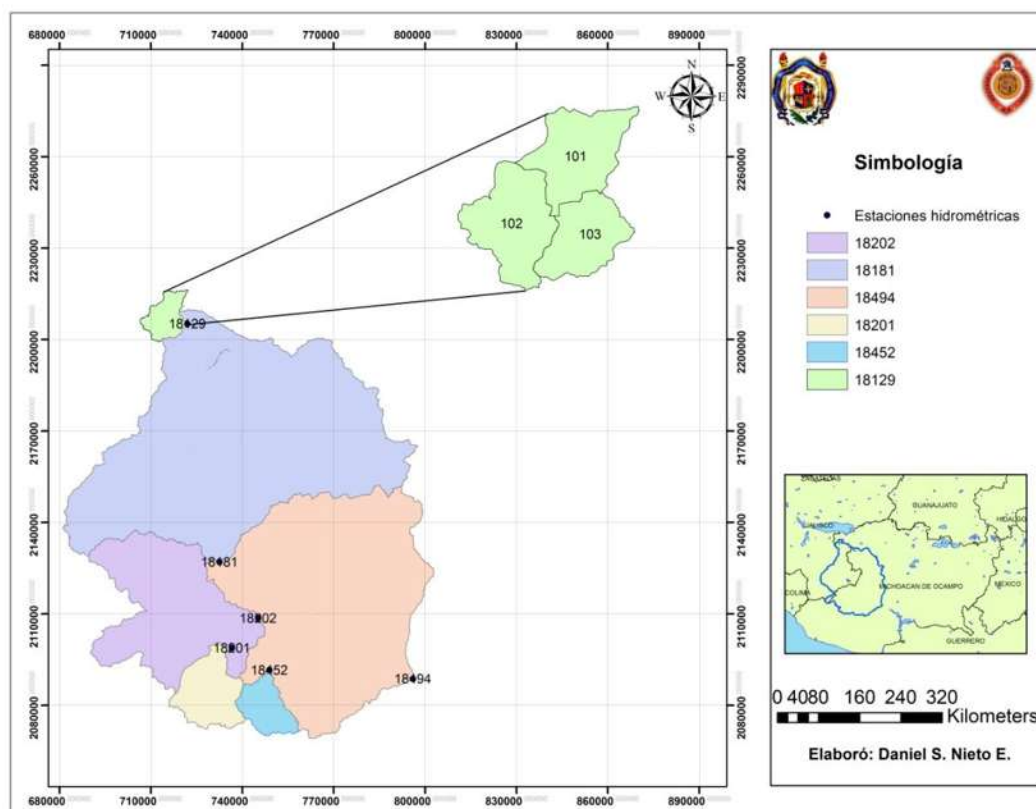


Figura 33 Estación a calibrar 18129.

Microcuenca	Área (Km ²)	Centro de gravedad	
		x	y
101	54.27	716829.77	2211621.09
102	59.90	711096.90	2205340.86
103	42.83	717512.73	2204291.07

Tabla 20 Microcuencas y sus características en la estación 18129.

1.- Estación 18129:

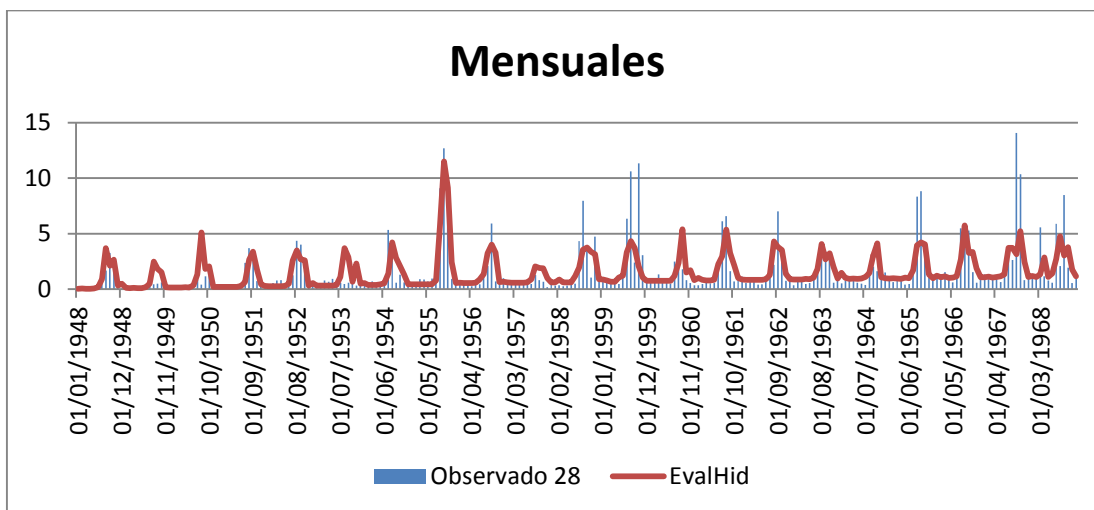


Figura 34 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18129.

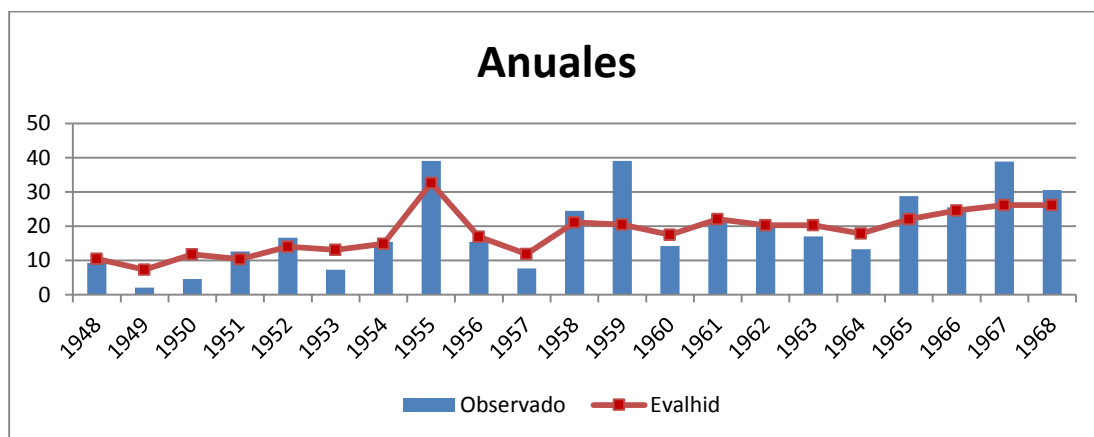


Figura 35 Resultados anuales de la calibración de la estación 18129.

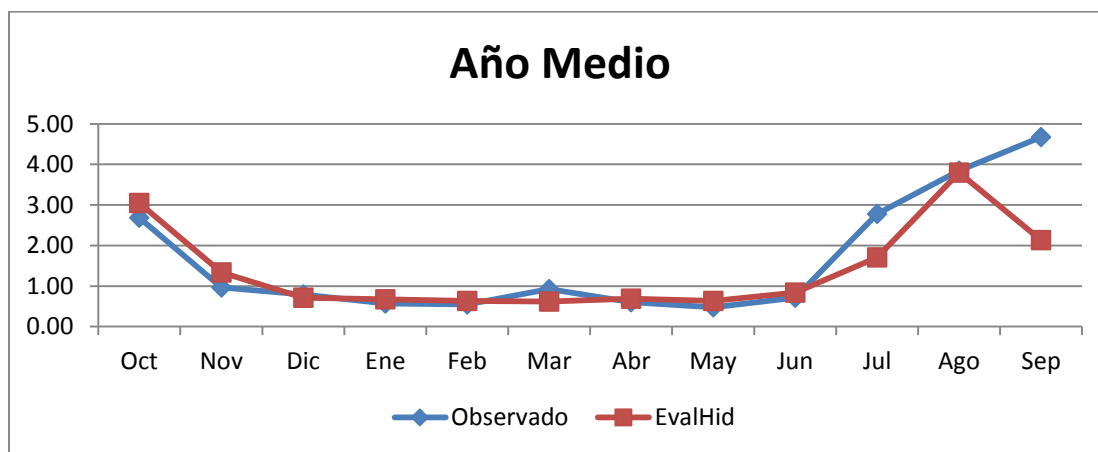


Figura 36 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18129.

Estación El cajón:

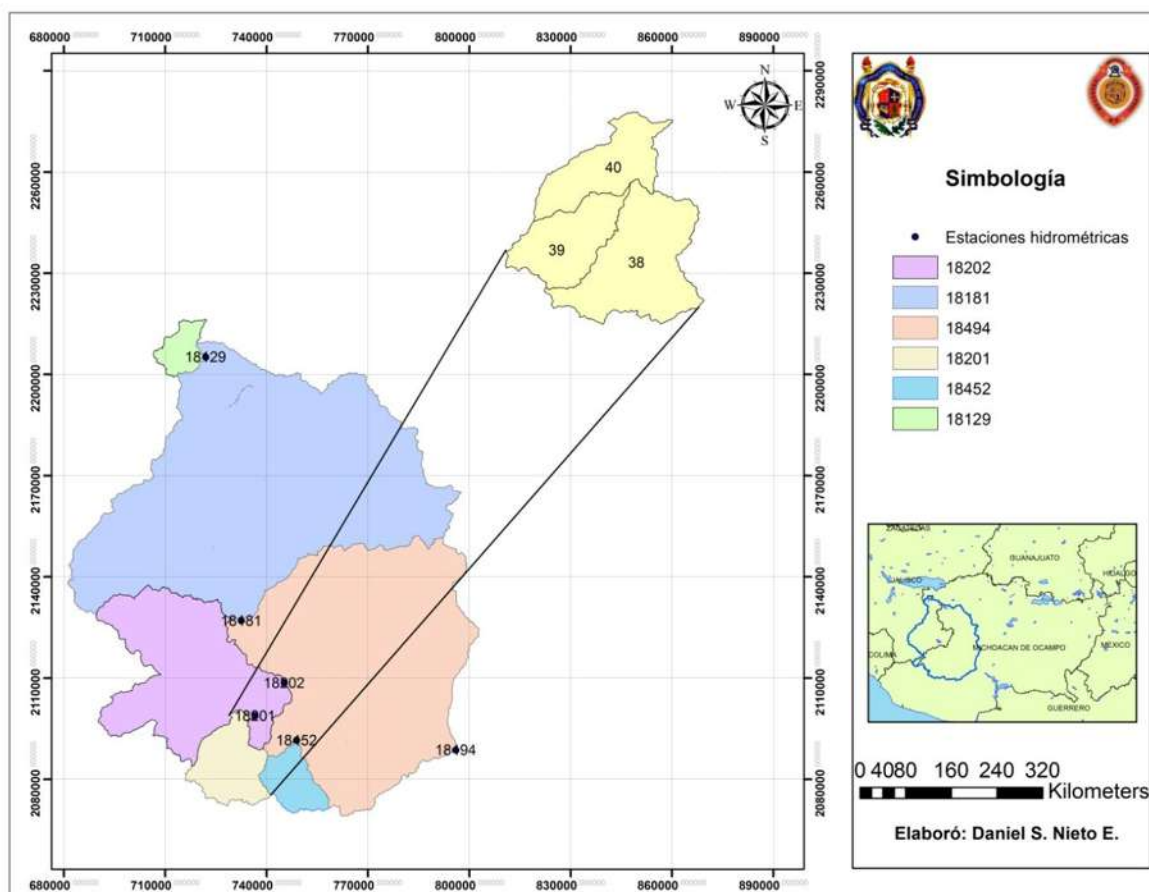


Figura 37 Estación a calibrar 18201.

Microcuenca	Área (Km ²)	Centro de gravedad	
		x	y
38	200.51	731998.51	2081153.21
39	110.37	723780.67	2083562.56
40	113.88	728242.98	2093152.13

Tabla 21 Microcuencas y sus características en la estación 18201.

2.- Estación 18201:

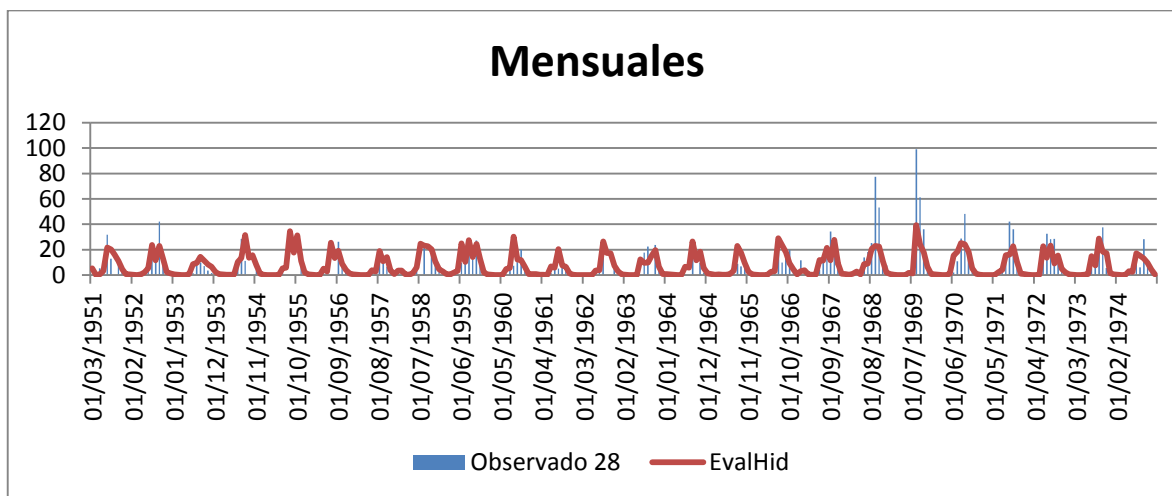


Figura 38 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18201.

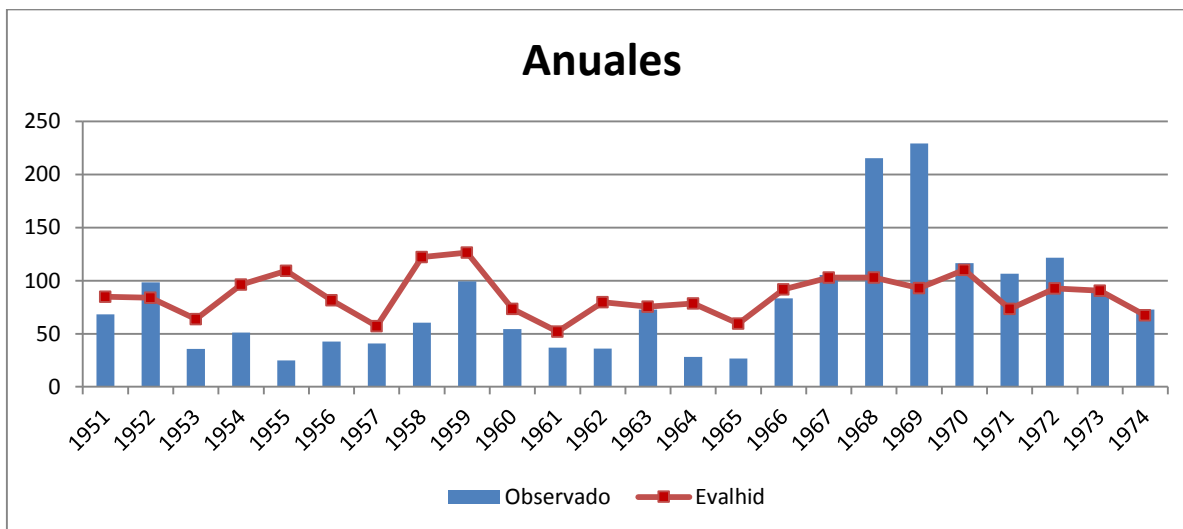


Figura 39 Resultados anuales de la calibración de la estación 18201.

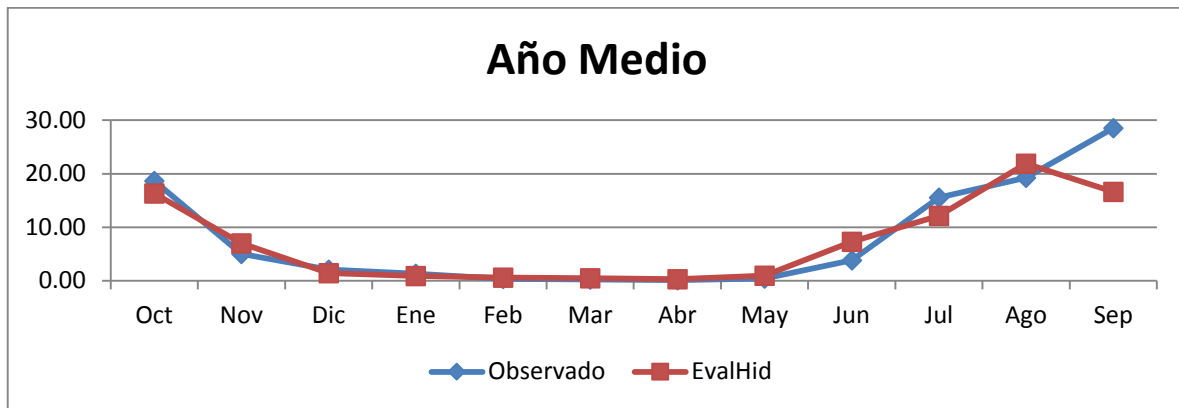


Figura 40 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18201.

Estación El mentidero:

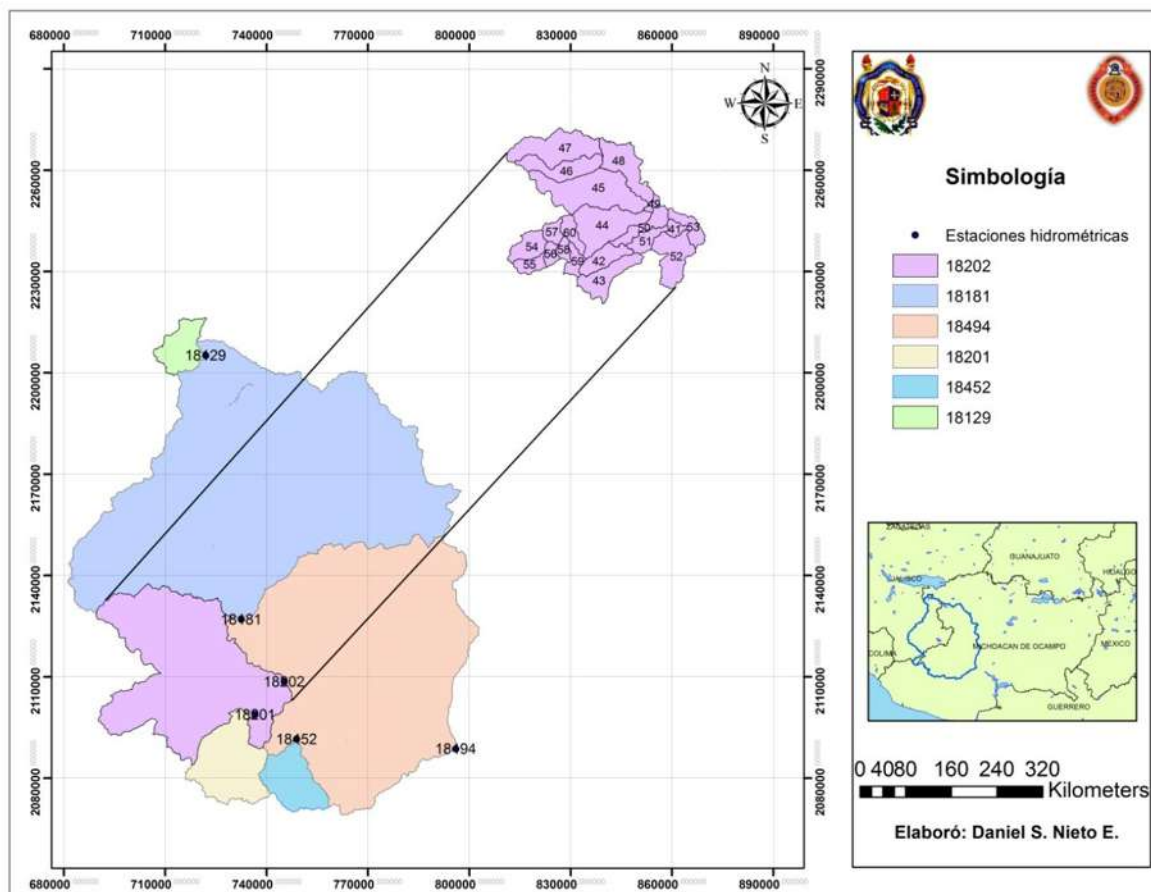


Figura 41 Estación a calibrar 18202.

Microcuenca	Área (Km ²)	Centro de gravedad		Microcuenca	Área (Km ²)	Centro de gravedad	
		x	y			x	y
41	20.58	738912.40	2107192.25	51	46.76	730544.87	2103566.50
42	74.27	718546.67	2097591.93	52	130.79	738270.42	2098220.38
43	103.42	719590.47	2092011.66	53	51.18	742369.72	2107369.42
44	194.67	719405.60	2106902.59	54	69.47	696107.33	2101091.67
45	279.28	714232.09	2118207.10	55	35.94	696725.20	2095952.12
46	112.73	705313.24	2125432.25	56	24.44	702902.04	2098920.00
47	190.38	703736.65	2131219.19	57	32.22	703310.64	2105831.89
48	135.11	724280.47	21.25187.10	58	22.23	706481.04	2100339.00
49	11.84	732062.59	2114818.49	59	28.28	709627.18	2097099.86
50	65.42	728988.21	2107727.38	60	41.76	708965.87	2105158.60

Tabla 22 Microcuencas y sus características en la estación 18202.

3.- Estación 18202:

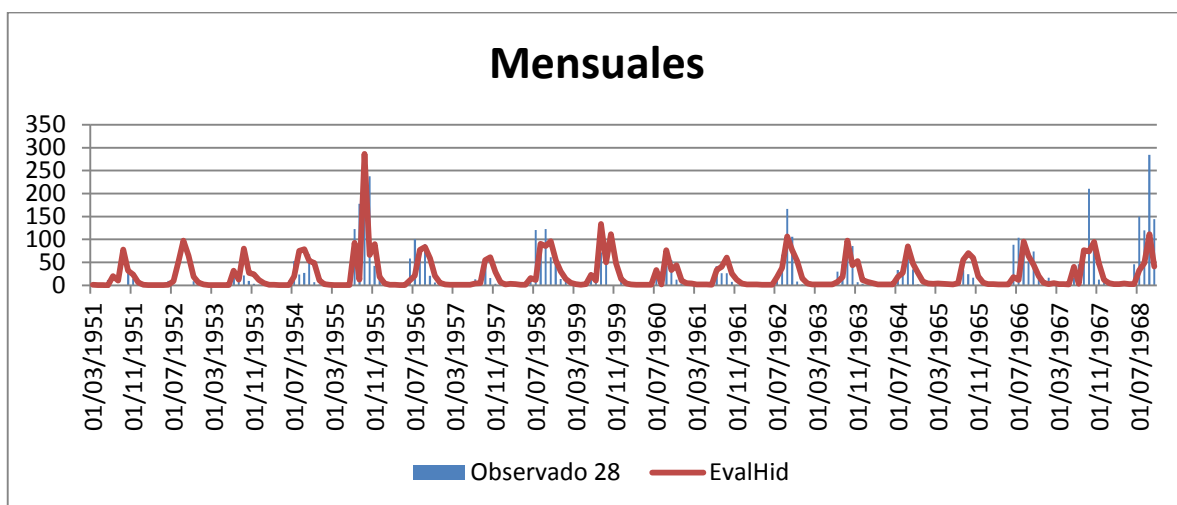


Figura 42 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18202.

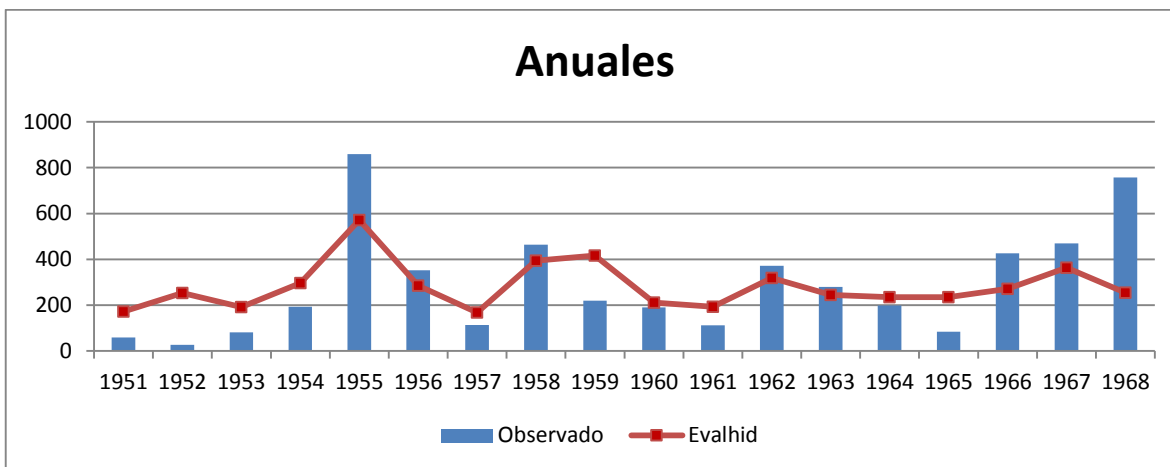


Figura 43 Resultados anuales de la calibración de la estación 18202.

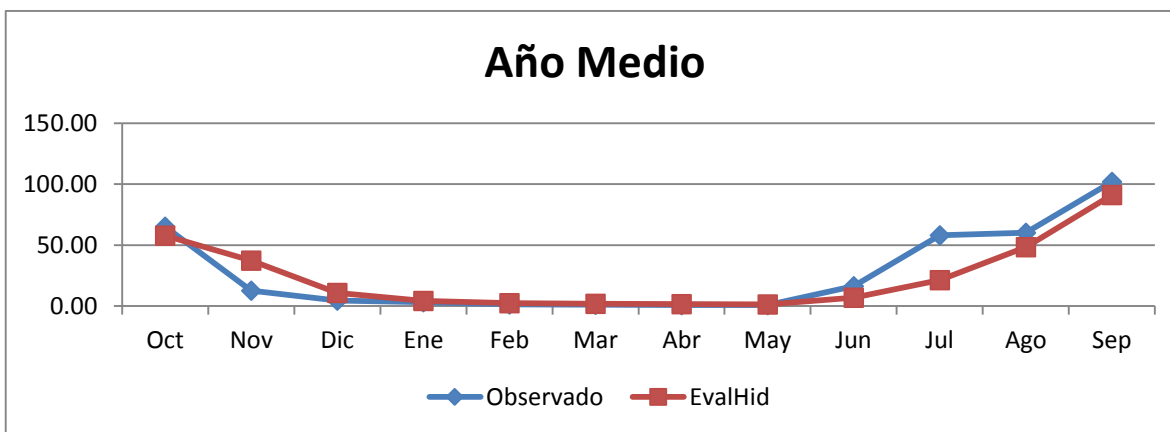


Figura 44 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18202.

Estación El charco:

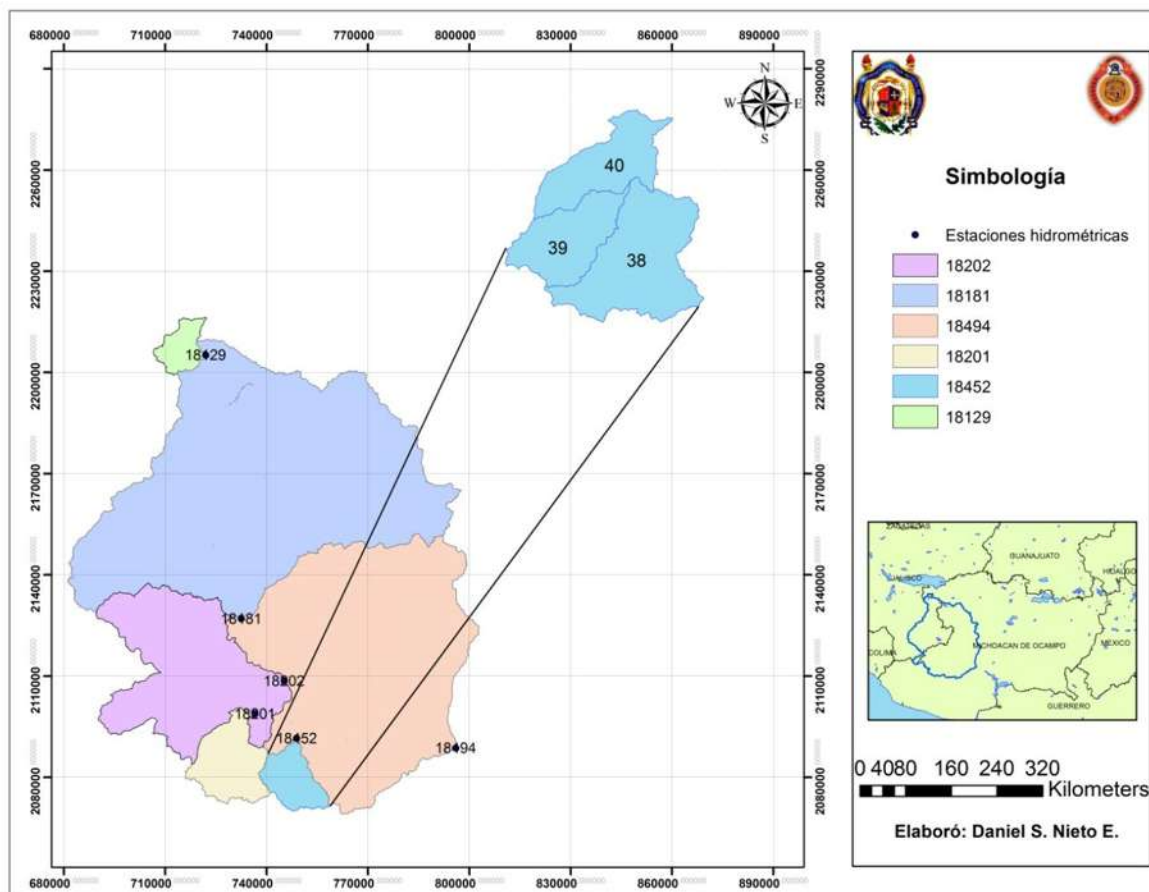


Figura 45 Estación a calibrar 18452.

Microcuenca	Área	Centro de gravedad	
		X	Y
38	200.51	711998.51	2081153.21
39	110.37	723780.67	2083562.56
40	113.88	728242.98	2093152.13

Tabla 23 Microcuencas y sus características en la estación 18452.

4.- Estación 18452:

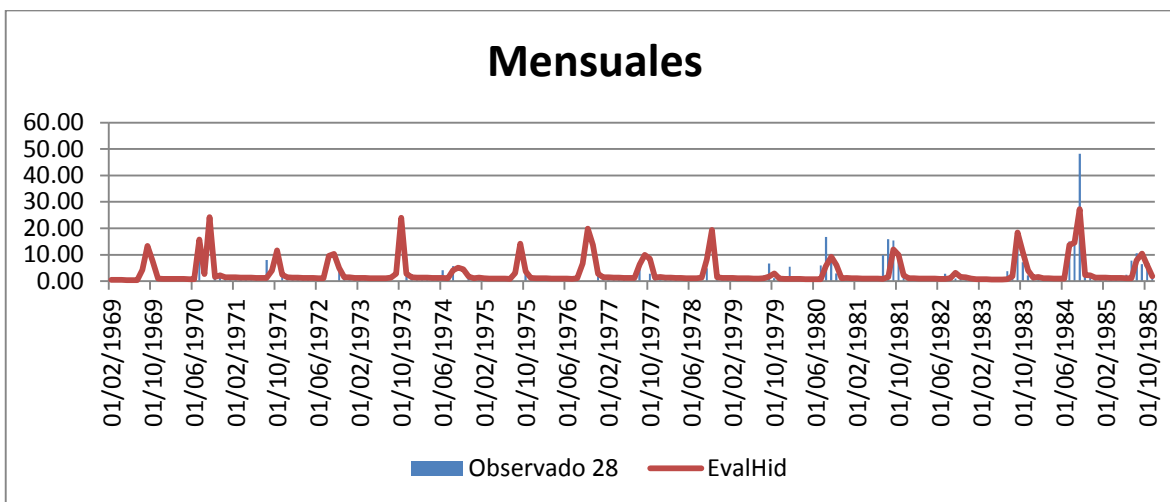


Figura 46 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18452.

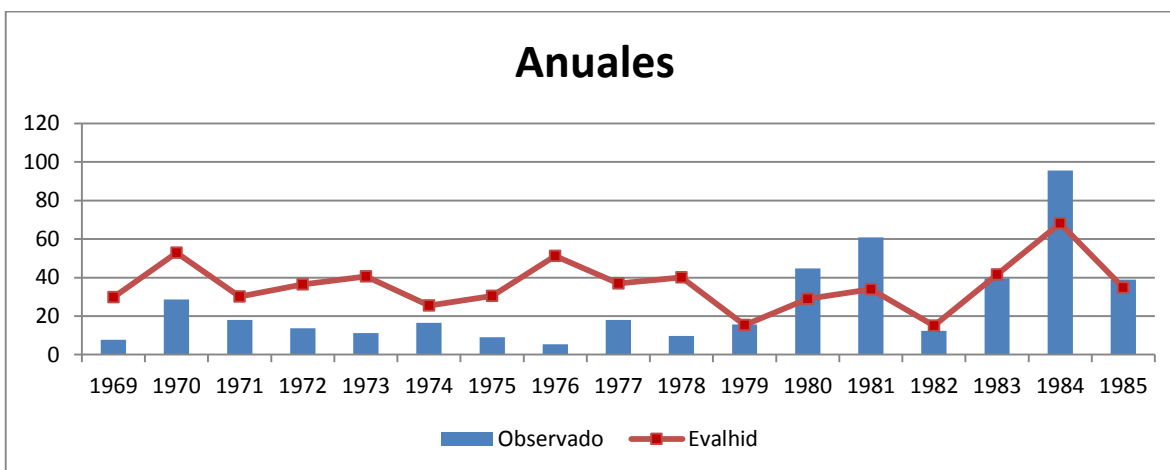


Figura 47 Resultados anuales de la calibración de la estación 18452.

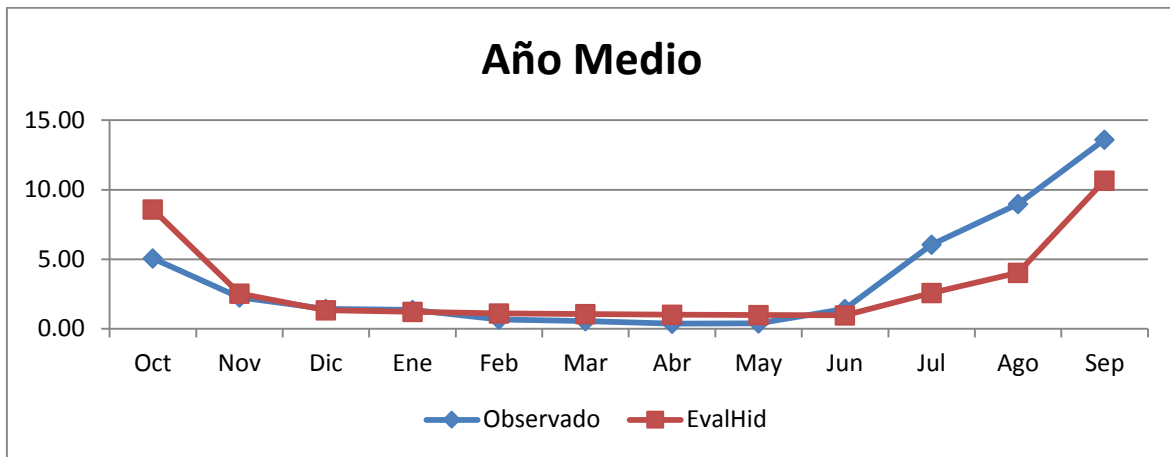


Figura 48 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18452.

Estación Piedras blancas:

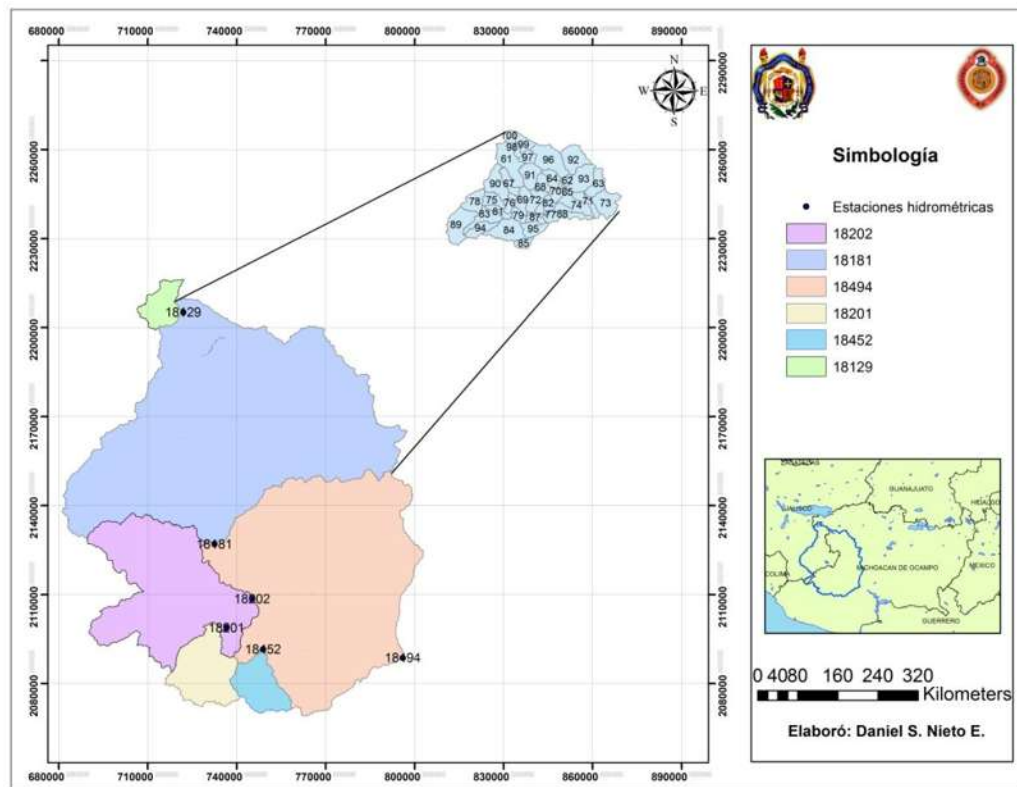


Figura 49 Estación a calibrar 18181.

Microcuenca	Área	Centro de gravedad		Microcuenca	Área	Centro de gravedad	
		X	Y			X	Y
61	334.43	723458.56	2186473.56	81	72.81	716145.28	2152945.22
62	37.22	761077.35	2175275.10	82	72.68	749199.03	2158555.03
63	153.04	780011.74	2173849.29	83	172.51	706259.73	2147436.01
64	100.25	750844.99	2176468.51	84	276.72	720741.76	2140079.10
65	11.22	758826.49	2172470.50	85	67.38	732883.16	2131345.47
66	11.84	756332.42	2171831.01	86	39.72	742460.17	2155176.27
67	108.35	722717.70	2173984.03	87	56.81	740590.22	2147667.90
68	96.98	744862.00	2173241.74	88	165.74	758442.71	2150184.71
69	131.69	732271.06	2161085.87	89	309.37	691172.80	2143151.51
70	71.47	753754.11	2165194.31	90	230.76	714307.35	2173029.49
71	121.77	771412.75	2160234.37	91	183.09	736498.96	2178241.39
72	131.96	740902.07	2160993.77	92	242.90	766148.45	2190136.51
73	244.98	785855.32	2159808.63	93	249.94	770317.27	2176832.83
74	175.45	767131.52	2158061.08	94	133.36	704598.18	2140232.12
75	111.57	712320.47	2161006.46	95	140.77	739550.13	2140794.83
76	81.56	723400.06	2158898.45	96	331.40	749231.97	2189209.32
77	58.33	756125.32	2155370.28	97	79.14	734718.58	2191438.46
78	162.02	699306.90	2160100.12	98	39.22	728154.35	2195681.49
79	74.39	729281.58	2150586.43	99	105.06	732322.39	2201295.39
80	5.33	736101.16	2151867.72	100	47.98	723066.85	2205298.37

Tabla 24 Microcuencas y sus características en la estación 18181.

5.- Estación 18181:

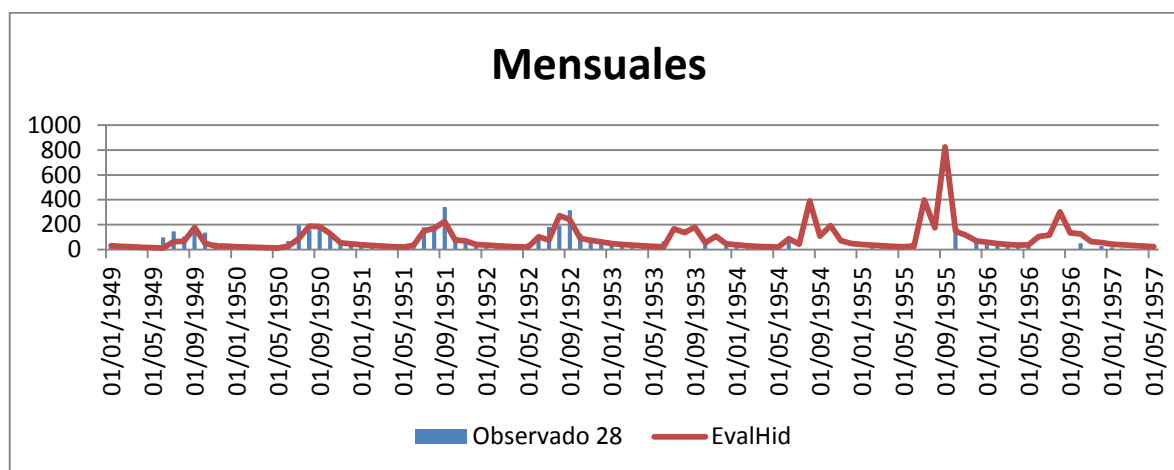


Figura 50 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18181.

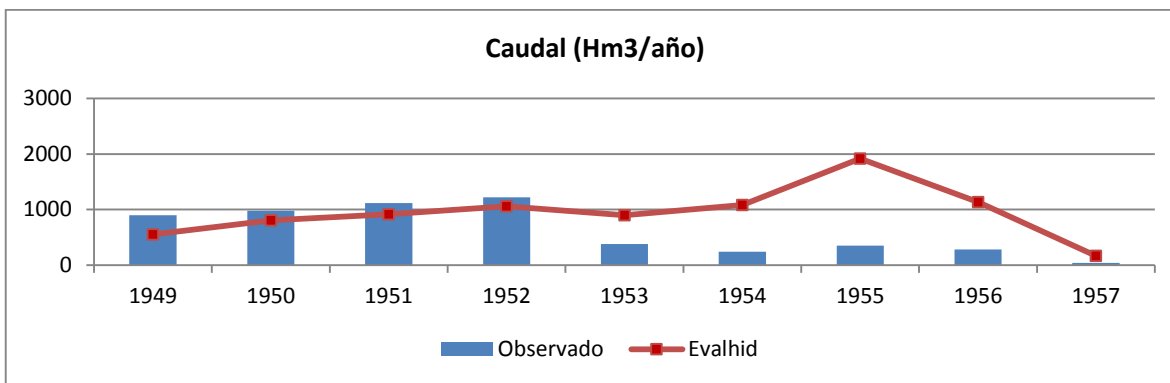


Figura 51 Resultados anuales de la calibración de la estación 18181.

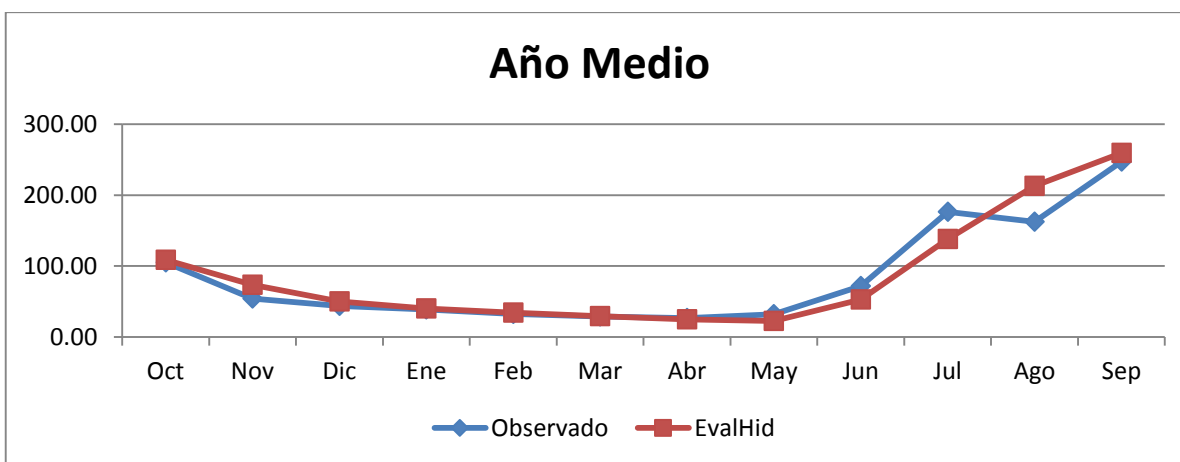


Figura 52 Resultados del año nuevo de la calibración de la estación 18181.

Estación Los panches:

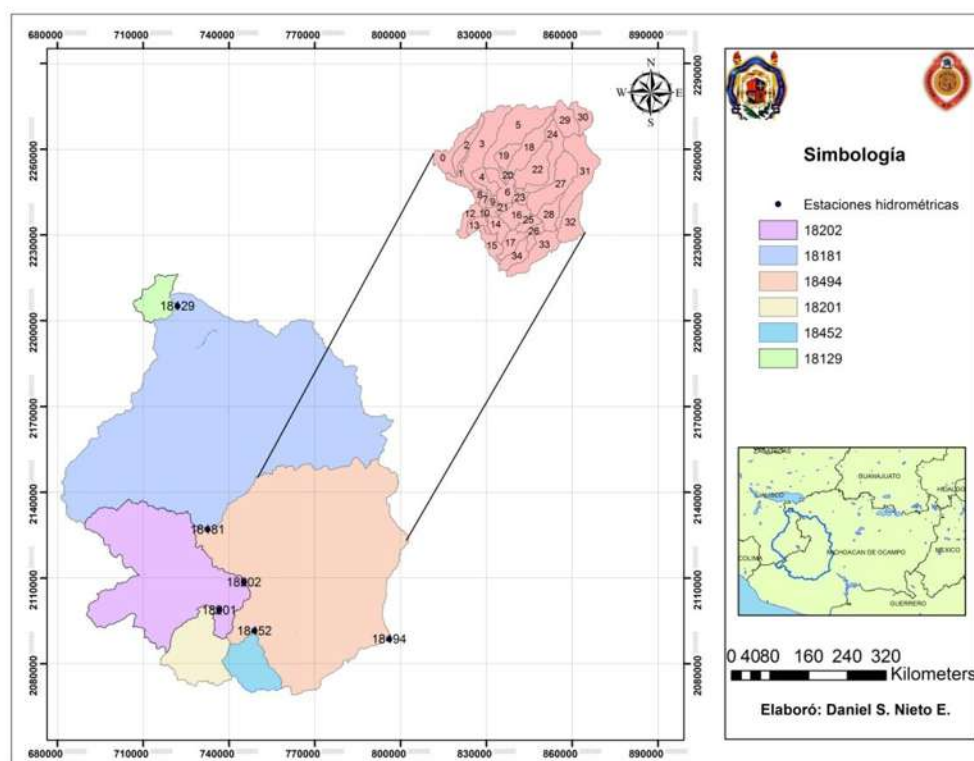


Figura 53 Estación a calibrar 18494.

Microcuenca	Área	Centro de gravedad		Microcuenca	Área	Centro de gravedad	
		X	Y			X	Y
0	131.25	737285.99	2127874.62	18	184.68	771609.23	2131173.53
1	64.48	740483.91	2117730.42	19	80.02	761226.14	2125136.25
2	90.28	743356.77	2130484.92	20	16.64	760912.17	2116565.86
3	304.40	751364.29	2129967.14	21	24.24	760058.41	2101132.55
4	68.58	751946.66	2113560.77	22	210.20	773191.11	2120684.40
5	364.96	765770.35	2134272.82	23	34.50	767343.12	2106783.64
6	111.91	758668.61	2111439.89	24	172.46	778024.32	2125502.44
7	23.82	751748.67	2105157.22	25	46.77	771155.95	2093974.65
8	24.98	748787.51	2106849.16	26	54.41	774078.19	2088419.14
9	22.12	754911.21	2104107.50	27	267.46	782071.58	2113008.81
10	24.23	754688.09	2099661.91	28	105.14	780846.91	2099170.12
11	4.03	752430.69	2096356.82	29	127.90	787298.26	2143146.47
12	79.52	745238.08	2095420.27	30	80.86	793943.91	2143959.72
13	54.32	748781.36	2092775.43	31	312.28	792824.72	2116634.06
14	78.58	757887.36	2091429.13	32	158.16	790168.40	2096228.17
15	82.81	754784.27	2084064.31	33	180.82	774533.96	2080479.98
16	109.36	765265.86	2097654.91	34	93.15	765288.00	2079498.48
17	87.74	764097.39	2084548.48				

Tabla 25 Microcuencas y sus características en la estación 18494.

6.- Estación 18494:

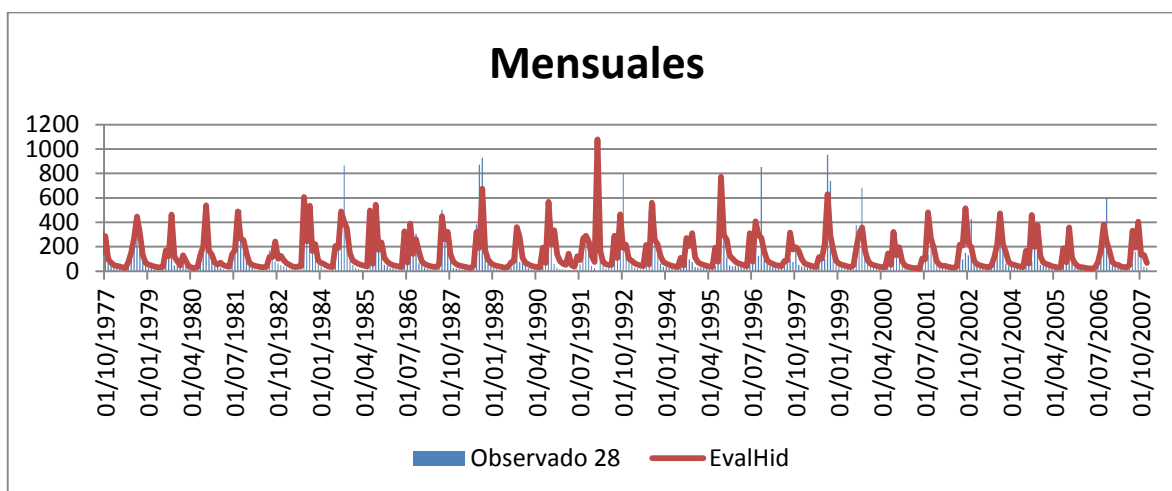


Figura 54 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18494.

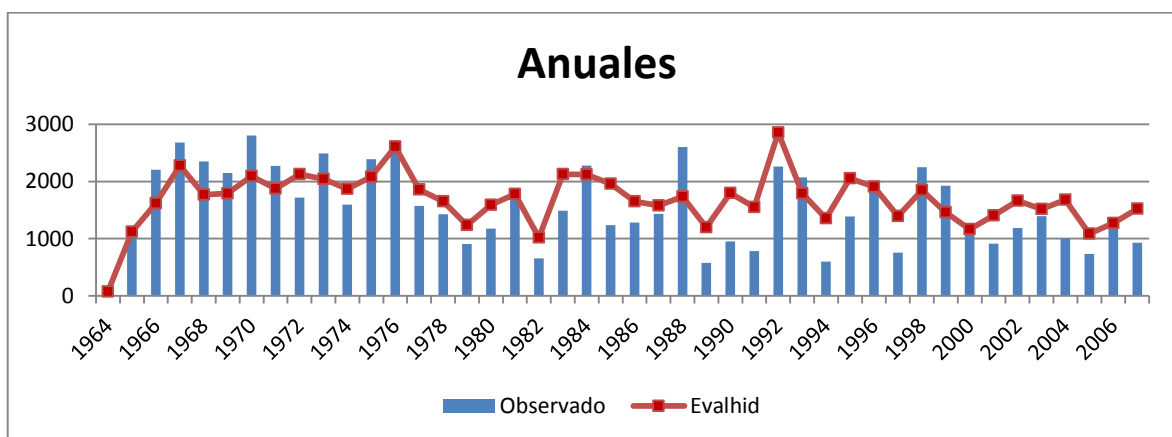


Figura 55 Resultados anuales de la calibración de la estación 18494.

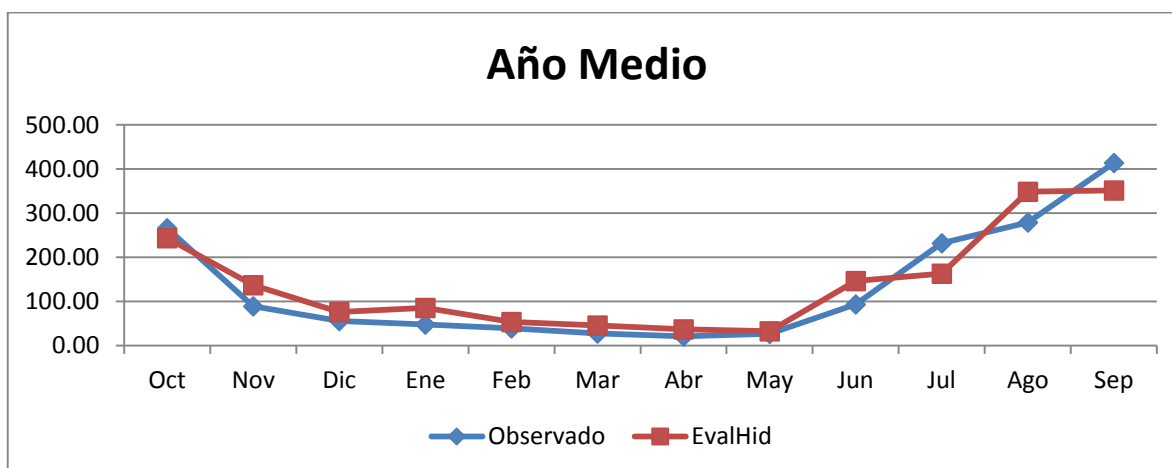


Figura 56 Resultados del año nuevo de la calibración de la estación 18494.

Estación	Función objetivo	Valor obtenido	Criterio de Molnar
18129	F1	0.72	Muy bueno
	F2	0.71	Muy bueno
	F3	0.70	Muy bueno
	F4	1.00	Excelente
18201	F1	0.56	Bueno
	F2	0.82	Excelente
	F3	0.75	Muy bueno
	F4	1.00	Excelente
18202	F1	0.49	Bueno
	F2	0.78	Muy bueno
	F3	0.70	Muy bueno
	F4	0.99	Excelente
18452	F1	0.67	Muy bueno
	F2	0.63	Muy bueno
	F3	0.82	Excelente
	F4	0.99	Excelente
18181	F1	0.70	Muy bueno
	F2	0.50	Bueno
	F3	0.77	Muy bueno
	F4	0.94	Excelente
18494	F1	0.46	Bueno
	F2	0.70	Muy bueno
	F3	0.70	Muy bueno
	F4	0.99	Excelente

Tabla 26 Resultados de funciones objetivos en la cuenca del río Tepalcatepec.

Estación	Beta	FC	PWP	Lmax	k0	k1	k2	kperc
18129	1.85	306.65	642.12	39.94	0.13	0.05	0.00	1.00
18201	1.19	51.67	620.78	35.82	0.29	0.13	0.07	0.43
18202	4.99	275.50	608.95	0.25	0.30	0.19	0.00	0.33
18452	5.00	476.91	628.90	0.06	0.26	0.33	0.03	0.94
18181	5.00	295.82	539.30	99.44	0.07	0.31	0.15	0.99
18494	5.00	641.66	34.76	61.21	0.33	0.28	0.00	0.75

Tabla 7.19 Parámetros de HBV en la cuenca del río Tepalcatepec.

HBV			
Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³
1951	1873.81	1981	2636.63
1952	2014.32	1982	1378.23
1953	1506.80	1983	3720.78
1954	1923.54	1984	4053.04
1955	4202.06	1985	5013.83
1956	2160.10	1986	3130.90
1957	1121.45	1987	3811.62
1958	2318.54	1988	4198.58
1959	2598.82	1989	1989.40
1960	1996.84	1990	2943.20
1961	1778.22	1991	2170.33
1962	1675.18	1992	3008.24
1963	1832.71	1993	4238.83
1964	1460.77	1994	3603.32
1965	1671.19	1995	6323.71
1966	2042.93	1996	18483.35
1967	3849.81	1997	9760.90
1968	2370.55	1998	3812.85
1969	2975.30	1999	2134.93
1970	3629.78	2000	1317.23
1971	2745.70	2001	1919.90
1972	3895.88	2002	2007.85
1973	3430.03	2003	1914.64
1974	3242.41	2004	2166.84
1975	5972.29	2005	1227.38
1976	6959.86	2006	1598.92
1977	3806.45	2007	2286.24
1978	2431.73	2008	2459.67
1979	1683.81	2009	1493.37
1980	1972.54	2010	2873.42

Tabla 27 Escurrimiento anual de acuerdo a HBV

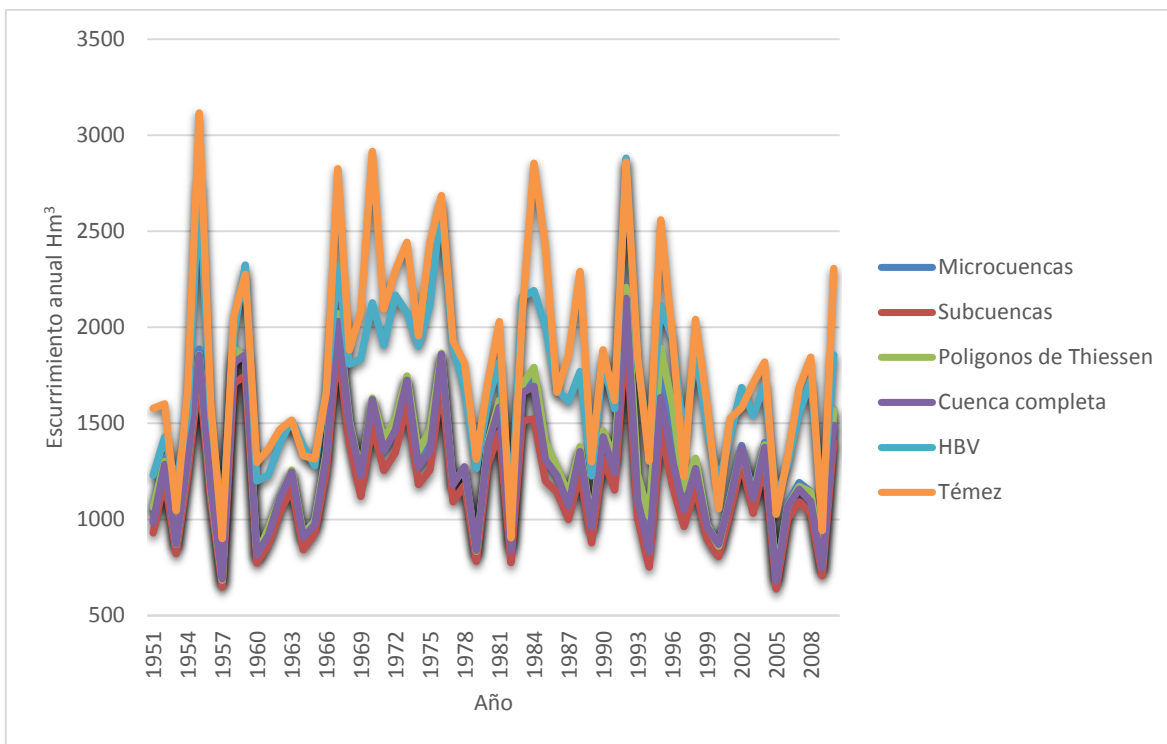


Figura 57 Escurrecimientos anuales por todos los métodos.

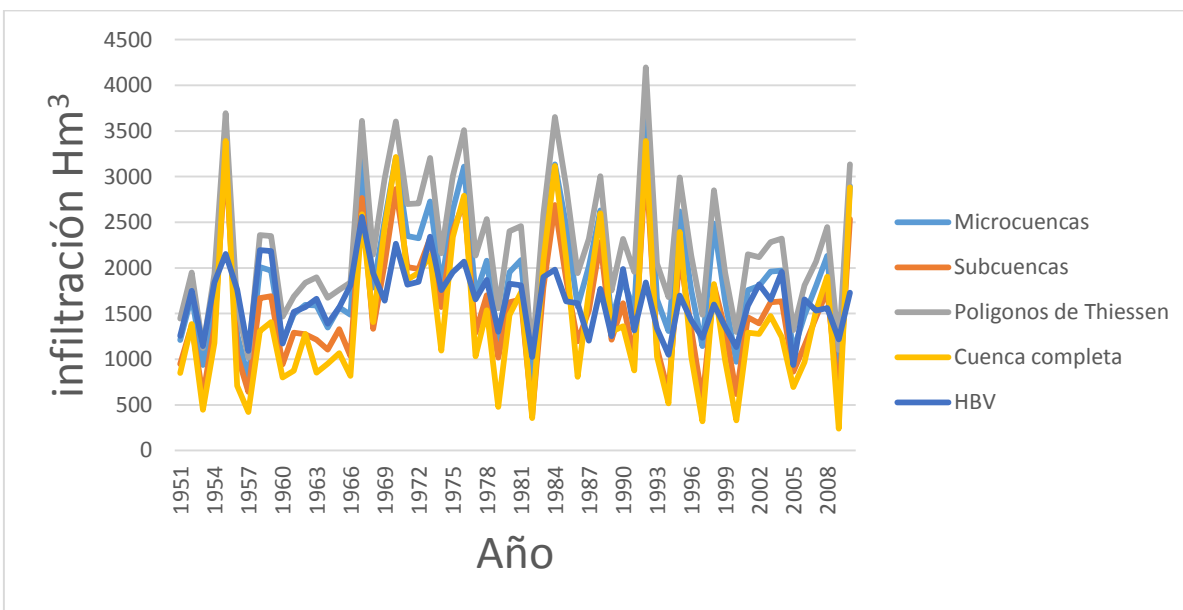


Figura 58 Infiltraciones anuales por todos los métodos.

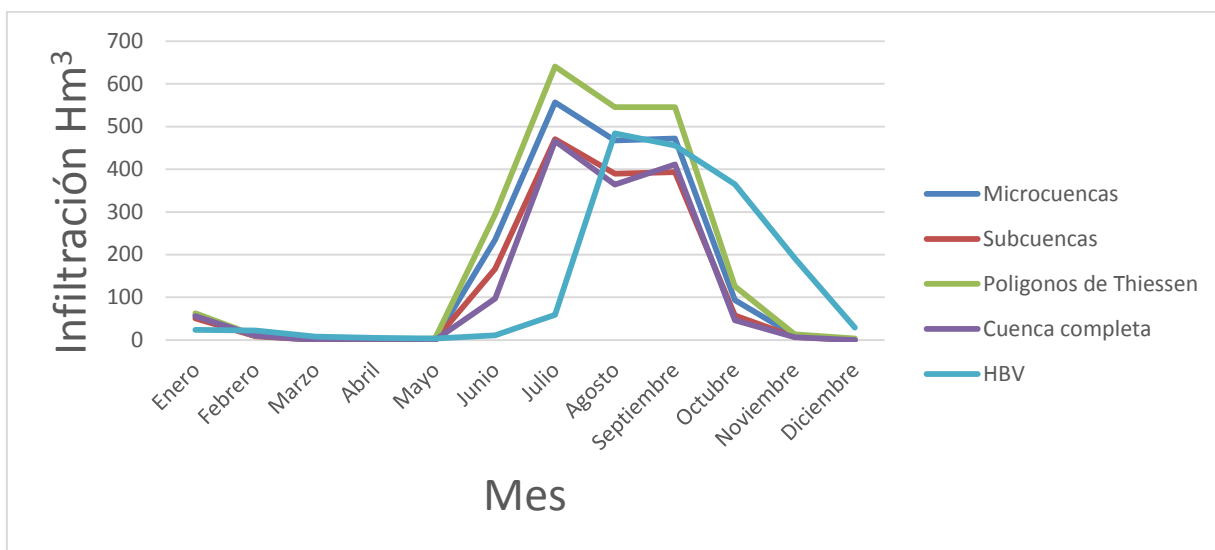


Figura 59 Infiltraciones mensuales por todos los métodos.

	Microcuencas	Subcuencas	Polígonos de Thiessen	Cuenca completa	HBV	Témez
Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³
1951	1057.16	930.38	1063.31	985.63	1229.62	1577.98
1952	1321.66	1209.04	1301.6	1287.21	1427.67	1601.17
1953	882.32	822.45	870.07	871.12	1184.55	1044.38
1954	1324.76	1229.67	1310	1311.55	1544.37	1678.87
1955	1886.91	1755.45	1857.36	1855.59	2746.85	3115.37
1956	1167.58	1100.09	1151.97	1170.86	1545.11	1602.75
1957	688.1	649.13	682.8	690.76	972.59	899.45
1958	1848.33	1708.18	1887.81	1817.23	1964.69	2056.73
1959	1864.66	1747.45	1845.52	1856.35	2324.48	2276.09
1960	825.14	772.67	820.45	814.43	1199.56	1296.57
1961	943.85	867.44	950.92	916.47	1229.92	1366.17
1962	1121.8	1037.48	1115.78	1110.79	1396.18	1468.3
1963	1251.16	1164.29	1255.94	1245.94	1515.55	1516.52
1964	914.62	842.08	921.19	906.55	1382.58	1330.85
1965	995.98	927.31	991.93	971.07	1277.83	1314.87
1966	1350.16	1247.95	1342.57	1322.93	1673.93	1661.72
1967	2059.53	1904.56	2070.94	2030.92	2321.48	2826.22
1968	1521.24	1398.5	1513.98	1500.49	1808.48	1880.61
1969	1214.63	1120.18	1242.22	1228.96	1835.37	2082.5
1970	1606.76	1490.64	1631.91	1623.3	2128.38	2916.16
1971	1379.18	1254.56	1419.06	1354.82	1906.74	2094.9
1972	1477.28	1348.84	1519.29	1464.8	2167.75	2296.65
1973	1731.62	1603.75	1747.04	1725.6	2076.95	2442.76
1974	1307.58	1181.4	1354.9	1272.86	1902.37	1956.93
1975	1406.76	1259.07	1465.91	1354.65	2117.55	2442.03
1976	1853.38	1723.93	1864.78	1860.07	2643.15	2686.3
1977	1183.53	1091.62	1184.53	1180.58	1895.92	1929.94
1978	1270.94	1179.34	1269.15	1273.63	1677.82	1813.34
1979	829.13	781.4	833.57	838.17	1265.54	1312.7
1980	1389.87	1286.7	1399.61	1384.13	1615.91	1715.65

	Microcuencas	Subcuencas	Polígonos de Thiessen	Cuenca completa	HBV	Témez
Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³
1981	1616.63	1454.03	1619.4	1584.03	1820.15	2029.94
1982	873.47	774.65	882.02	838.09	1046.02	903.18
1983	1669.33	1512.82	1703.08	1660.26	2159.39	2083.1
1984	1724.99	1523.63	1791.56	1693.03	2191.27	2854.31
1985	1368.36	1200.1	1399.12	1309.27	2000.62	2417.3
1986	1265.09	1142.38	1271.74	1228.41	1677.74	1662.14
1987	1128.15	999.45	1129.2	1070.4	1612.58	1854.11
1988	1365	1245.1	1379.06	1352.78	1770.36	2291.36
1989	961.36	878.38	976.2	962.99	1225.89	1299.81
1990	1437.15	1318.26	1461.67	1429.82	1826.18	1883.48
1991	1296.95	1152.51	1318.28	1242.74	1575.03	1618.06
1992	2182.53	1979.45	2208.21	2150.56	2881.93	2861.45
1993	1179.12	1006.27	1233.62	1100.69	1820.94	1845.9
1994	917.11	751	1015.59	831.03	1380.77	1303.31
1995	1748.08	1469.81	1891.43	1634.85	2113.53	2559.28
1996	1433.93	1173.18	1593.06	1308.18	1940.77	1952.3
1997	1115.23	963.51	1158.64	1049.78	1416.8	1224.05
1998	1305.49	1164.6	1318.64	1264.67	1870.72	2040.7
1999	974.84	898.97	971.49	962.24	1483.93	1595.14
2000	866.81	806.91	860.36	870.66	1185.82	1055.43
2001	1122.27	1037.43	1111.22	1103.04	1431.6	1524.04
2002	1385.21	1301.86	1367.26	1375.39	1687.24	1581.58
2003	1130.3	1031.39	1121.06	1110.3	1539.96	1709.65
2004	1399.77	1295.99	1388.7	1375.68	1705.98	1819.16
2005	708.2	638.63	702.61	680.05	1105.56	1026.18
2006	1082.49	1002.05	1068.24	1067.55	1289.93	1322.7
2007	1192.1	1091.75	1172.08	1157.33	1554.7	1687.7
2008	1143.69	1031.48	1141.63	1094.02	1724.9	1845
2009	754.84	707.07	753.23	748.11	1065.18	941.3
2010	1567.98	1401.73	1566.23	1489.42	1855.99	2305.5

Tabla 28 Escurrimientos anuales por todos los métodos.

	Microcuencas	Subcuencas	Polígonos de Thiessen	Cuenca completa	HBV
Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³
1951	1208.93	948.5	1446.09	847.81	1257.29162
1952	1694.18	1371.16	1950.8	1386.19	1750.09562
1953	936.36	599.21	1123.35	446.71	1144.26561
1954	1648.57	1351.27	1937.05	1178.72	1839.78819
1955	3527.45	3212.72	3695.38	3388.77	2152.26049
1956	1272.51	1048.26	1577.07	709.39	1764.93137
1957	784.26	642.44	1017.58	420.13	1089.65741
1958	2010.8	1668.39	2360.42	1308.75	2194.55702
1959	1969.6	1689.93	2348.36	1405.85	2186.09444
1960	1193.86	943.37	1465.58	799.3	1171.9901
1961	1493.04	1291.34	1688.27	874.96	1517.49798
1962	1596.05	1274.37	1836.5	1278.32	1570.70511
1963	1588.63	1213.58	1896.6	852.94	1662.73713
1964	1345.79	1104.8	1672.43	952.07	1389.45731
1965	1568.65	1327.54	1758.75	1065	1568.91795
1966	1486.6	1036.48	1841.9	818.92	1808.55593
1967	3196.97	2766.09	3612.32	2586.51	2557.75732
1968	1786.01	1333	2145.17	1407.25	1941.52945
1969	2517.89	2049.46	2980.13	2446.97	1641.04019
1970	3207.15	2864.94	3603.29	3214.18	2264.30015
1971	2347.88	2009.77	2699.84	1873.36	1815.69564
1972	2326.06	1987.73	2705.07	1946.67	1847.18473
1973	2728.84	2322.95	3204.02	2134.19	2340.50349
1974	1810.64	1572.68	2160.02	1092.88	1757.40978
1975	2635.54	2400.17	3003.5	2338.43	1952.92686
1976	3109.37	2727.8	3508.54	2789.8	2070.02302
1977	1701.11	1289.3	2135.08	1030.37	1653.95528
1978	2079.21	1699.21	2534.92	1536.73	1869.10354
1979	1197.81	1018.48	1557.92	478.73	1301.8607
1980	1951.39	1621.97	2400.48	1481.95	1827.26113

	Microcuencas	Subcuencas	Poligonos de Thiessen	Cuenca completa	HBV
Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Volumen total de agua que escurre Hm ³
1981	2086.7	1656.65	2459.07	1732.3	1809.79224
1982	781.73	385.73	1051.08	356.15	1023.06172
1983	2160.1	1784.64	2588.9	2080.05	1901.10738
1984	3134.63	2687.48	3651.4	3116.23	1981.03662
1985	2470.33	1879.69	2894.25	2105.64	1633.11752
1986	1578.62	1195.67	1944.1	805.92	1612.36619
1987	2017.7	1531.02	2318.36	1731.42	1203.25221
1988	2628.99	2281.38	3003.4	2597.56	1771.24293
1989	1436.07	1212.63	1751.87	1299.85	1252.90354
1990	1866.35	1612.71	2316.09	1361.86	1988.17825
1991	1539.99	1011.13	1956.96	876.23	1315.21497
1992	3776.28	3175.5	4197.37	3390.51	1840.94262
1993	1655.47	1117.75	2049.39	1026.29	1337.08035
1994	1309.31	631.84	1680.9	517.59	1048.07052
1995	2620.09	2153.86	2991.43	2394.49	1697.85567
1996	1756.66	1325.92	2136.02	1032.17	1425.79462
1997	1143.45	545.13	1488.61	320.67	1234.81636
1998	2486.04	1808.19	2851.88	1824.15	1597.7394
1999	1635.93	1329.87	1947.17	986.01	1353.84606
2000	972.88	616.2	1299.22	330.27	1132.09642
2001	1755.98	1458.28	2150.73	1292.22	1584.28428
2002	1802.73	1391.85	2117.54	1274.97	1820.56657
2003	1960.66	1624.17	2281.46	1473.33	1650.48823
2004	1970.9	1634.7	2321.4	1240.59	1957.32225
2005	1090.36	862.91	1317.17	693.49	936.11331
2006	1481.29	1145.83	1808.04	968.45	1653.88686
2007	1802.09	1459.64	2070.18	1531.87	1534.25507
2008	2130.76	1753.35	2448.49	1903.57	1560.60873
2009	803.89	556.36	1102.17	240.47	1218.4732
2010	2896.05	2534.64	3133.03	2881.98	1727.30243

Tabla 29 Infiltraciones anuales por todos los métodos.

8.-CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

8.1.-Conclusiones:

Existen muchos modelos hidrológicos disponibles, cada uno con características distintas a los demás que lo hacen un modelo más complejo o en su defecto menos complejo que los demás, la parte medular de esto es que tengamos la capacidad de elegir el modelo adecuado para la zona de estudio en función primero a las características de esta, y segundo en función de los datos disponibles.

La etapa del tratamiento estadístico de los datos es de vital importancia, ya que de ello depende ampliamente la fiabilidad de los resultados obtenidos en la modelación hidrológica, es por esto que hay que poner énfasis en esta etapa y aplicar las pruebas pertinentes para la correcta validación de la información con la que se trabajara posteriormente.

La red de información tanto meteorológica como hidrométrica es bastante pobre en nuestro país, esto limita mucho desde trabajar con estos datos hasta la obtención de mejores resultados, por lo anterior es importante poner al alcance de todo el público una red de datos actualizada y con datos fiables.

La parte de la calibración es la parte más importante de todo el proceso, por ende la que requiere más tiempo y atención del modelador, es importante que la calidad de los resultados obtenidos sea verificada con el uso de indicadores de calidad.

La normatividad usada para la determinación media de los escurrimientos (NOM-011-CNA-2015) es sugerida para cuencas no aforadas y de gran tamaño, es una herramienta válida en esta situación, pero si se cuenta con mejor información así como con más recursos técnicos, como los modelos hidrológicos que nos pueden a llegar a resultados más apegados a la realidad.

Los modelos hidrológicos aplicados en este trabajo (HBV y Témez) nos arrojaron resultados parecidos entre sí, (con algunas ligeras discrepancias), que de acuerdo a la

exactitud requerida en los resultados nos podremos decantar por alguno, en este trabajo se ha demostrado que se pueden aplicar a cuencas mexicanas con buenos resultados.

La herramienta EVALHID es de gran ayuda y sencilla de utilizar, cuenta con una interfaz sencilla de entender y analizar además de contar con la ventaja de que cuenta con varios modelos hidrológicos disponibles.

8.2.-Recomendaciones y líneas futuras de investigación:

Estas son las futuras líneas de investigación que se desprenden del presente trabajo:

- Debido al cambio climático, es importante incluirlo en futuros estudios sobre recursos hídricos.
- Emplear nuevos modelos hidrológicos en cuencas mexicanas y observar los resultados obtenidos.
- Trabajar conjuntamente con la calidad del agua, ya que actualmente los problemas más fuertes de nuestro país respecto al agua son en cuanto a calidad de esta.

Con base a la experiencia obtenida en este trabajo se hacen las siguientes recomendaciones:

- Desarrollar una base de datos meteorológicos más amplia, esto debido a que los datos disponibles son muy pocos, con la existencia de más datos y de calidad nos ayudara a tener mejores resultados y más apegados a la realidad.
- Tener una base de datos hidrométricos más amplia, ya que la actual cuentan con muy pocos datos.
- Capacitar personal que sea el encargado de operar tanto estaciones meteorológicas como también las estaciones hidrométricas, además de dotarla con la tecnología necesaria para obtener mediciones más precisas.
- Hacer un mejor uso el uso de agua en el sector agrícola, esto principalmente implementando técnicas que irrigación en las que se haga un uso más eficiente del agua.
- Con lo que respecta al sector industrial tener una mejor regulación de los volúmenes concesionados.

9.-BIBLIOGRAFÍA:

- 1.- Aparicio F. **Fundamentos de hidrología de superficie**. 1992. Limusa. México, Venezuela, España.
- 2.- Chow V. T., Maidment D., Mays L. **Hidrología aplicada**. 1994. McGraw-Hill.
- 3.- Campos Aranda D. **Procesos del ciclo hidrológico**. 1992. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- 4.-Mendoza M., Velázquez A., Larrazábal A., Toledo A. **Atlas fisicogeográfico de la cuenca del Tepalcatepec**. 2007. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- 5.- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. **Guía para la interpretación de cartografía, uso de suelo y vegetación Serie III**. 2009. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- 6.-CLICOM. **Climating Computing Program**. 2010. Base de datos meteorológicos. Servicio Meteorológico Nacional. México.
- 7.-BANDAS. **Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales**. 2012. Sitio web: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20> (consulta octubre 2015).
- 8.- Mojica, P. J. **Evaluación del riesgo de sequía en la cuenca del río Tepalcatepec RH18j**, México, Tesis de maestría, UMSNH.
- 9.- García, R. L. **Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan, Michoacán**. México, Tesis de maestría, UMSNH.
- 10.-Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) **aplicación de modelos matemáticos hidrológicos para la determinación de hidrógramas de diseño**, 1982, Guatemala.

Anexo 1. Calculo de percentiles.

Los percentiles son los 99 valores que dividen en 100 partes iguales la serie de datos, y se aplicaron en el presente trabajo para determinar que estaciones de las descargadas de la base de datos de Clicom tienen la mejor y más completa información, los datos que evaluamos en cada una de las series fueron: el porcentaje de llenado de datos, número de años efectivos con datos, distancia al centro de gravedad y fecha ultima de medición.

Se consideró aceptable trabajar con el percentil de 80, es decir el valor debajo del cual se encuentra del 80 al 100% de la mejor información, esto para hacer una preselección de las estaciones con las cuales trabajaríamos.

Para calcular el percentil, primero hay que saber en qué rango de la tabla de frecuencias acumuladas se encuentra el percentil buscado, mediante la siguiente fórmula:

$$C = \frac{K * N}{100} \quad (\text{Ec.29})$$

Donde:

C=Valor dentro de la clase que se encuentra el percentil buscado.

N=total de numero de datos.

K= percentil que se desea calcular.

$$Pk = Li + \left(\frac{C - Fi - 1}{fi} \right) * ai \quad (\text{Ec.30})$$

Donde:

L_i =es el límite inferior de la clase donde se encuentra el percentil.

F_{i-1} es la frecuencia acumulada anterior a la clase del percentil.

a_i =es la amplitud de la clase.

Percentiles del porcentaje de llenado de datos				
P20	P40	P60	P80	P100
70	81.56	91.89	95.94	100

Tabla 30 Valores de percentiles para porcentaje de llenado de datos.

Percentiles de la cantidad de años con datos				
P20	P40	P60	P80	P100
15.83	30.28	42.50	57.31	100

Tabla 31 Valores de percentiles para cantidad de años con datos.

Percentil de los datos más recientes				
P20	P40	P60	P80	P100
1986.50	1996.18	2005.99	2008.99	2012.00

Tabla 32 Valores de percentiles para datos más recientes.

Percentiles de distancias al centro de gravedad				
P20	P40	P60	P80	P100
66.49	82.00	99.32	115.63	130

Tabla 33 Valores de percentiles para distancias al centro de gravedad.

Anexo 2. Método de Thornthwaite.

Este método determina la evapotranspiración o uso consuntivo, fue desarrollado en 1944, es usado para calcular el uso consuntivo mensual a través de temperaturas medias mensuales, con las formulas siguientes:

$$U_j = 1.6K_a \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a \quad (\text{Ec.31})$$

Donde:

U_j : uso consuntivo en el mes j, en cm.

T_j : temperatura media en el mes j, en oC.

a, I: constantes.

K_a : constante que depende de la latitud y el mes del año (tabla).

La constante I (índice de eficiencia y temperatura) se calcula de la siguiente manera:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (\text{Ec.32})$$

Donde:

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad (\text{Ec.33})$$

Latitud, grados	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Tabla 34 Valores de Ka de Thornthwaite.

Anexo 3. Polígonos de Thiessen.

Los polígonos de Thiessen es una manera de ver gráficamente el área de influencia de cada estación con respecto a la cuenca en estudio, con el propósito de posteriormente calcular la precipitación sobre la cuenca, mediante una media ponderada.

Para el primer paso es necesario localizar espacialmente las estaciones dentro y a los alrededores de la cuenca en estudio, enseguida hay que unir mediante triángulos las estaciones, como recomendación hay que evitar las esquinas que se forman con ángulos muy pequeños ya que dificultan el trabajo posterior. La triangulación queda en función de la persona que la realice y la experiencia y sensibilidad con la que cuente.

Enseguida y para cada triángulo hay que trazar la mediatriz, de cada uno de sus lados extendiéndolos hasta que se intercepten, este punto de intercepción se unirá con el de los triángulos cercanos, formándose así áreas de influencia alrededor de cada estación.

Como se mencionó se puede conocer la lluvia ponderada en nuestra zona de estudio, para esto se necesita conocer el valor exacto del área de influencia, para realizarlo nos ayudaremos de sistemas de información geográfica, para nuestro caso de arcgis en su versión 10.1.

La precipitación ponderada es un cálculo muy sencillo que se realizara con ayuda de la siguiente fórmula:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (\text{Ec.34})$$

Donde:

P= precipitación ponderada de la cuenca.

P_i = precipitación para cada estación i (mm).

A_i = área de influencia de cada estación i (km²).

N = número de estaciones.

Anexo 4. Modelación hidrológica con el método de Témez.

El modelo de Témez (Témez, 1977) pertenece al grupo de los denominados modelos agregados de simulación de cuencas (Estrela, 1992). El modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos de transporte de agua que tienen lugar en un sistema hidrológico durante las diferentes fases del ciclo hidrológico. Todo el proceso está gobernado por el principio de continuidad y de balance de masas, y regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance.

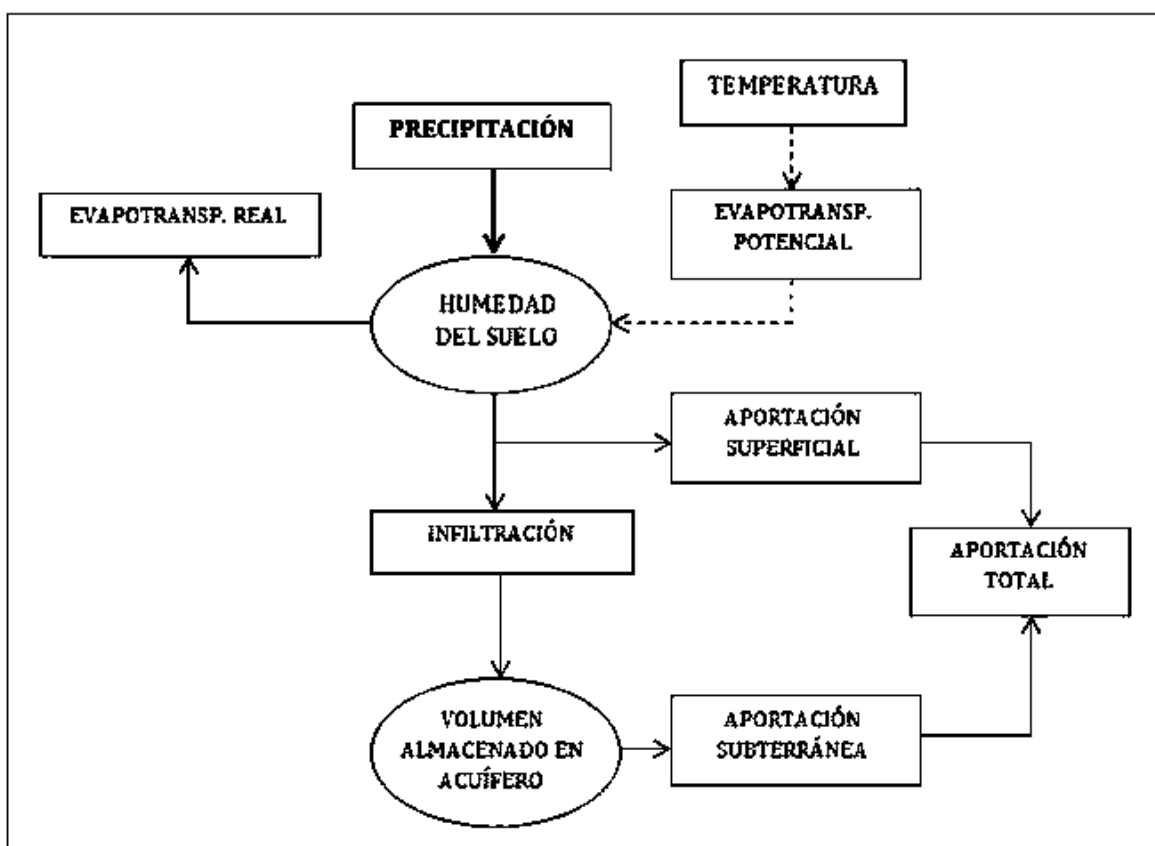


Figura 60 Ciclo hidrológico simulado por Témez

El modelo realiza una valoración global, ya que no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos, que se sustituyen por un valor medio, por lo que se limita su aplicación a cuencas pequeñas o intermedias en las que existe cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica. Para su aplicación en cuencas de

mayor tamaño es necesario realizar una subdivisión en cuencas más pequeñas, por lo que el modelo puede funcionar como modelo semiagregado.

El intervalo temporal más empleado es el mensual, aunque como el desarrollo teórico del modelo es de índole general, en principio éste puede aplicarse a cualquier intervalo de tiempo (horario, diario, mensual, anual), debiéndose verificar que los períodos temporales empleados proporcionen una respuesta coherente con la realidad física del sistema.

El modelo considera el terreno dividido en dos zonas:

- Una zona superior, no saturada, en cuyos poros coexisten agua y aire, y su contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo.
- Una zona inferior o acuífero, la cual se encuentra saturada y funciona como un almacenamiento subterráneo que desagua a la red de drenaje superficial.

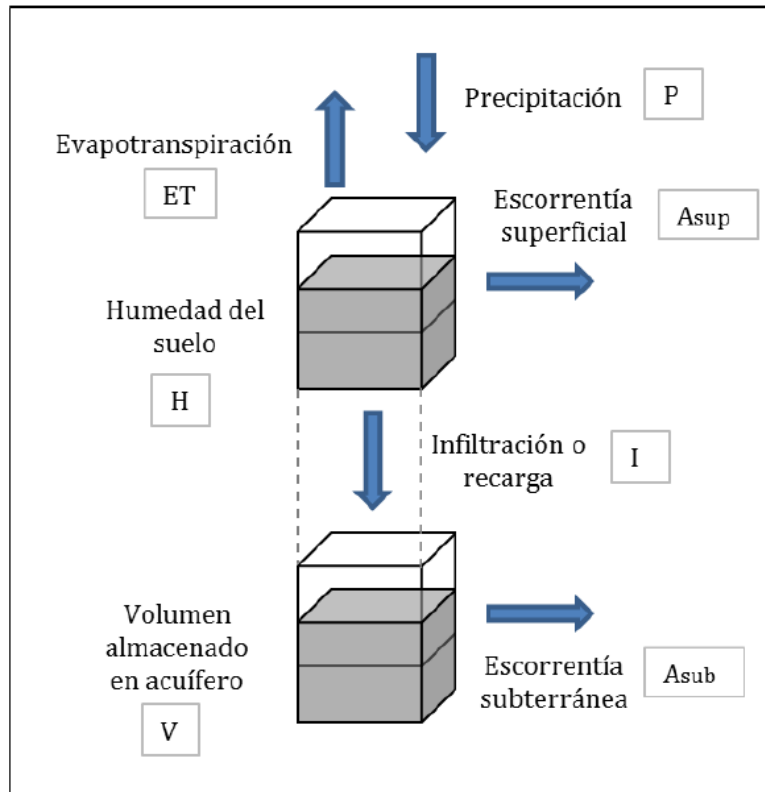


Figura 61 Entradas y salidas del modelo Témez.

- Flujos de entrada: la precipitación (P)
- Flujos de salida: la evapotranspiración real (E), la aportación superficial (A_{sup}) y la aportación de origen subterráneo (A_{sub})
- Flujos intermedios: únicamente la infiltración (I), 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 " (R_t).
- Almacenamientos intermedios: la humedad del suelo (H_t), y el volumen almacenado en el acuífero (V_t)

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 (H_{maxt})

A continuación se desarrollan las ecuaciones de estado del modelo, ecuaciones que regulan los procesos de transferencia hídrica, y del resto del ciclo hidrológico (Témez, 1977).

Cálculo del excedente

Se considera que una fracción del agua que precipita sobre el terreno (P_t) es almacenada en la zona superior del suelo (H_t), y que el resto, el excedente (T_t), se distribuye entre la aportación de origen superficial ($Asupt$) y la infiltración hacia el acuífero (It) o recarga (R_t).

El excedente total (T_t) se calcula mediante las siguientes expresiones:

$$T_t = 0 \quad \text{Si } P_t \leq P_0 \quad (\text{Ec. 35})$$

$$T_t = \frac{(P_t - P_0)^2}{P_t + \delta t - 2P_0} \quad \text{Si } P_t > P_0 \quad (\text{Ec. 36})$$

Donde:

$$\delta = H_{max} - H_{t-1} + ETP_t \quad (\text{Ec.37})$$

$$P_0 = C(H_{max} - H_{i-1}) \quad (\text{Ec.38})$$

Donde:

- H_{max} la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm), que depende de la textura, pendiente del terreno y espesor de la franja de suelo donde tiene lugar la evapotranspiración. El valor de H_{max} aumenta conforme lo hacen aquellos factores que facilitan la retención superficial de agua (poca pendiente, presencia de vegetación, cultivos en surcos o bancales) - H_{t-1} el almacenamiento de agua en el suelo (mm) en el instante $t-1$
 - EPT_t la evapotranspiración potencial (mm) en el intervalo de tiempo t . Es la máxima evapotranspiración que se produciría en condiciones óptimas de humedad.

- C el coeficiente de inicio de excedente. Un factor adimensional, que toma valores en torno a 0.30 (Témez, 1977) y permite obtener el valor umbral de precipitación P_0 a partir del déficit de humedad del suelo ($H_{max}-H_t-1$).

De este modo, cuando la cantidad de lluvia es inferior a P_0 toda el agua de lluvia de almacena como humedad del suelo, siendo susceptible a transformarse en evapotranspiración y el excedente total es nulo. De las ecuaciones se observa que, cuanto menor sea la humedad antecedente, mayor será el umbral P_{0t} , lo que significa que mayor será la capacidad del suelo para retener agua y para no producir excedente.

Calculo del almacenamiento superficial e infiltración:

Una vez calculado el excedente (T_t), la humedad del suelo al final de cada mes se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$H_t = H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t \quad (\text{Ec.39})$$

La humedad final en el suelo para el mes deseado es igual a la humedad existente en el mes “t-1” más la precipitación del mes “t” y menos el excedente calculado anteriormente, también se le resta la evapotranspiración del mes. Si el resultado de las operaciones anteriores sale negativo se tomara el valor de 0, lo anterior indica que la evapotranspiración potencial no se ha desarrollado en su totalidad y por lo tanto la humedad del suelo al final de este mes es nula.

Para obtener la evapotranspiración real que se produce (ET_t), se utiliza la siguiente expresión:

$$ET_t = H_{t-1} + P_i + T_i \quad (\text{Ec.40})$$

La evapotranspiración real será el menor valor entre el resultado de la ecuación anterior y el valor de la evapotranspiración potencial, ya que la evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la evapotranspiración potencial siempre y cuando exista la humedad suficiente en el suelo.

Como ya se mencionó anteriormente, la infiltración está en función del excedente así como de la cantidad máxima de agua que puede infiltrarse en el terreno en un mes, esto se expresa como sigue:

$$I_t = I_{maxt} \frac{T_t}{T_t + I_{maxt}} \quad (\text{Ec.41})$$

De la ecuación anterior se deduce que mientras incrementa el excedente también incrementa la infiltración y, si no existe excedente tampoco existirá infiltración. La infiltración máxima I_{max} depende, además de las características del terreno, de la intensidad y concentración de las precipitaciones. La infiltración suele tomar valores de entre 100 y 400 mm/mes, dependiendo de si la lluvia es esporádica o persistente (Témez 1997).

Del excedente, una parte se infiltra y el resto escurre superficialmente al final de mes “t” y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$A_{subt} = T_t - I_t \quad (\text{Ec.42})$$

Para realizar la simulación del acuífero se utiliza un modelo unicelular, basado en la hipótesis de proporcionalidad entre el volumen almacenado en el acuífero (V_t) y el caudal cedido a la red superficial (Q_t) el volumen se relaciona con el caudal mediante la siguiente expresión:

$$Q_t = \alpha V_t \quad (\text{Ec.43})$$

Donde α es una constante (T^{-1})

Aplicando la ecuación de balance de masa (diferencial ordinaria) al acuífero tenemos lo siguiente:

$$I_t - Q_t = \frac{dV_t}{dt} \quad (\text{Ec.44})$$

Donde:

$I(t)$ = Entradas al acuífero en el tiempo “t” (recargas).

$O(t)$ = Salidas del acuífero en el tiempo “t” (extracciones).

$V(t)$ = Volumen almacenado en el acuífero en el tiempo “t”.

Sustituyendo la ecuación (43) en la ecuación (44) tenemos lo siguiente:

$$I_t - \alpha * V_t = \frac{dV_t}{dt} \quad (\text{Ec.45})$$

Considerando $R(t)$ como el caudal de recarga neta del acuífero en el tiempo ¡t! se tiene:

$$R_t - \alpha * V_t = \frac{dV_t}{dt} \quad (\text{Ec.46})$$

Al resolver la ecuación diferencial, para un volumen inicial del acuífero V_0 y para un caudal de recarga constante, tenemos:

$$V_t = V_{t-1}e^{-\alpha*t} + \frac{R}{\alpha}(1 - e^{-\alpha*t}) \quad (\text{Ec.47})$$

Al expresar el volumen como una función del caudal y haciendo $R=0$ se obtiene la ecuación que representa la curva de agotamiento del acuífero:

$$Q_t = Q_0e^{-\alpha*t} \quad (\text{Ec.48})$$

La recarga R se puede expresar como $R=S*It$ (donde S es la superficie de la cuenca), puesto que la recarga está formada por el agua infiltrada en el acuífero, por tanto la ecuacion para determinar el volumen del acuífero en el mes “t” sería la siguiente:

$$Q_t = Q_0e^{-\alpha*t} \quad (\text{Ec.48})$$

Los rangos entre los que pueden oscilar los parámetros de Témez se concentran en la tabla 5.

Parámetro	Descripción	Unidades	Rango
H_{max}	Capacidad máxima de almacenamiento del suelo	mm	50-250
C	Coeficiente de inicio de excedente	-	0.2-1
I_{max}	Máxima cantidad de agua que infiltra	mm/mes	10-150
Alfa	Constante	Dia ⁻¹	0.001-008

Tabla 35 Rangos para parámetros de calibración del modelo de Témez (Témez 1977)

1.- Estación 18129:

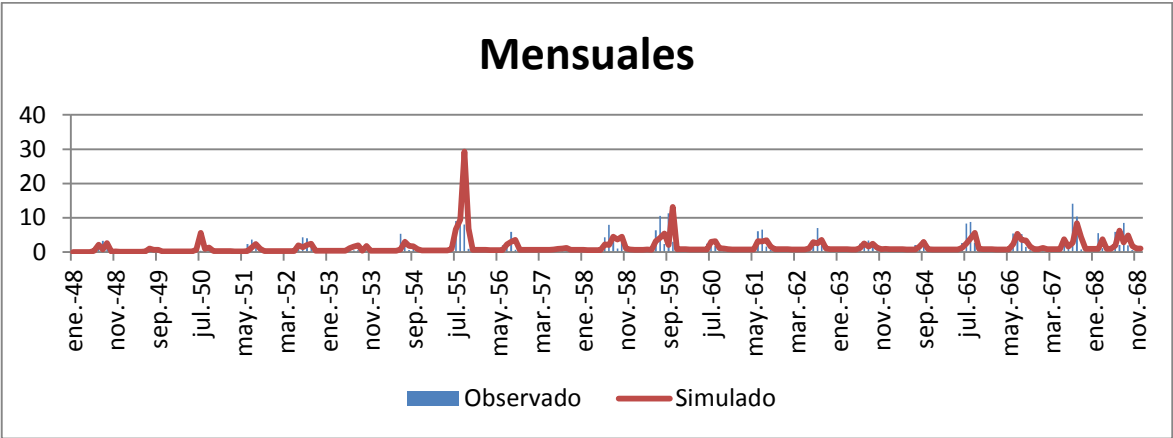


Figura 62 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18129.

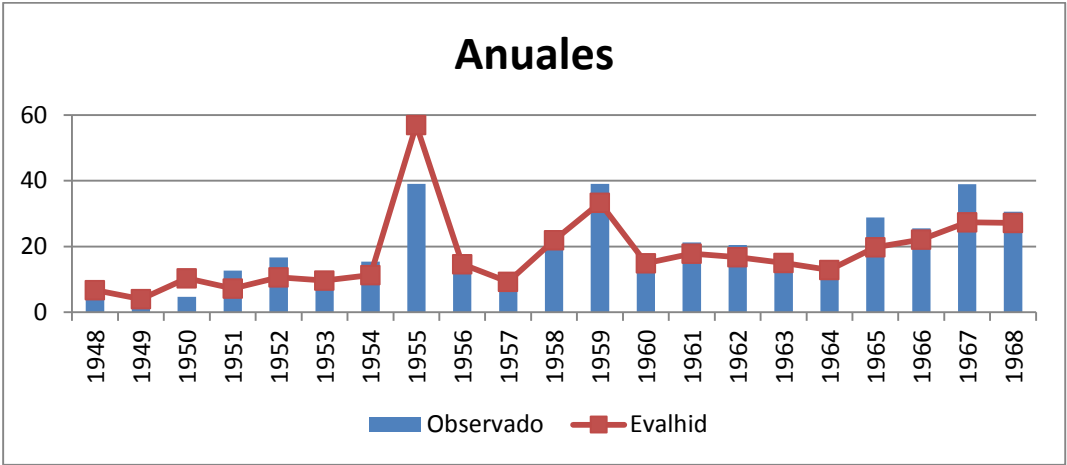


Figura 63 Resultados anuales de la calibración de la estación 18129.

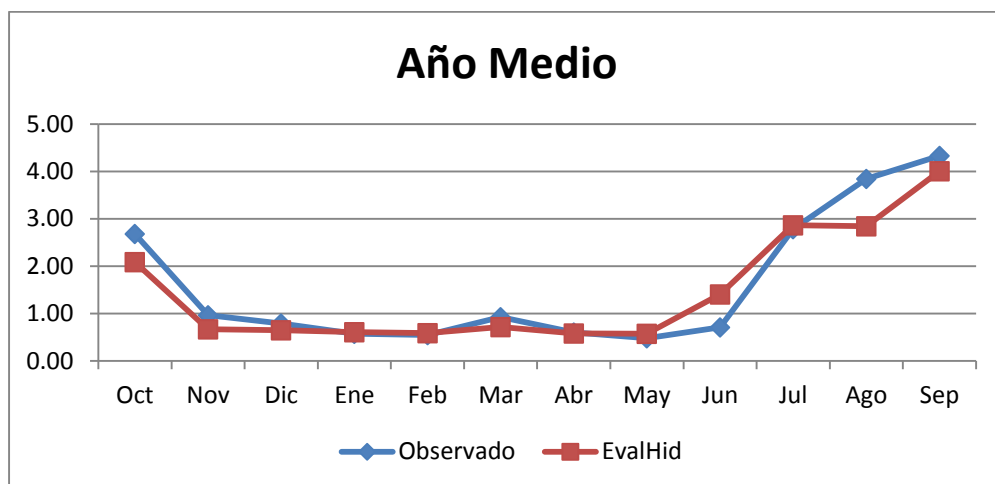


Figura 64 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18129.

2.- Estación 18201:

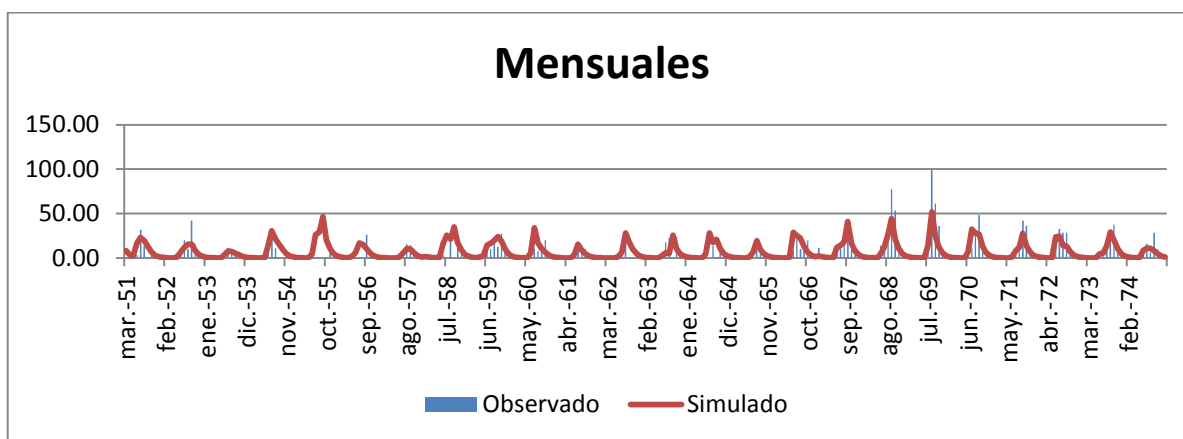


Figura 65 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18201.

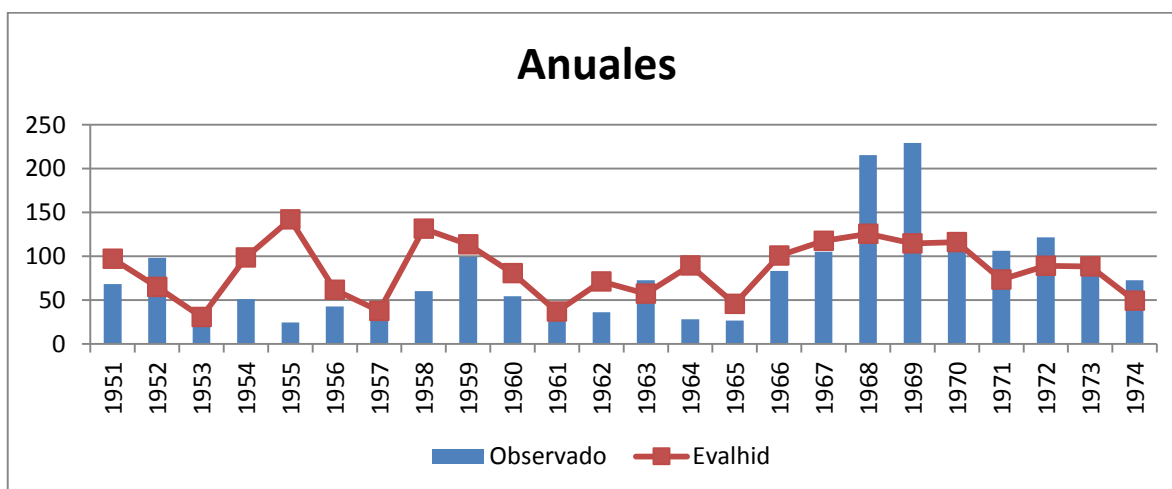


Figura 66 Resultados anuales de la calibración de la estación 18201.

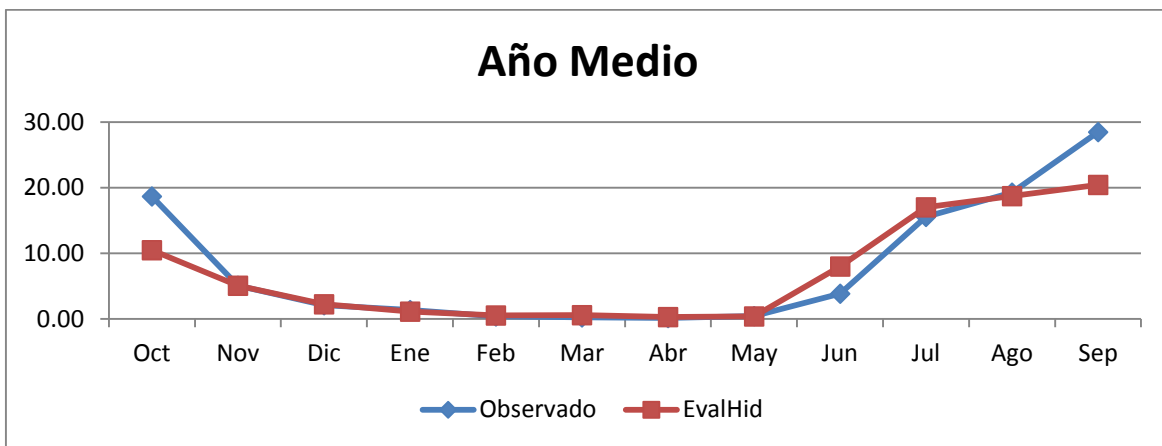


Figura 67 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18201.

3.- Estación 18202:

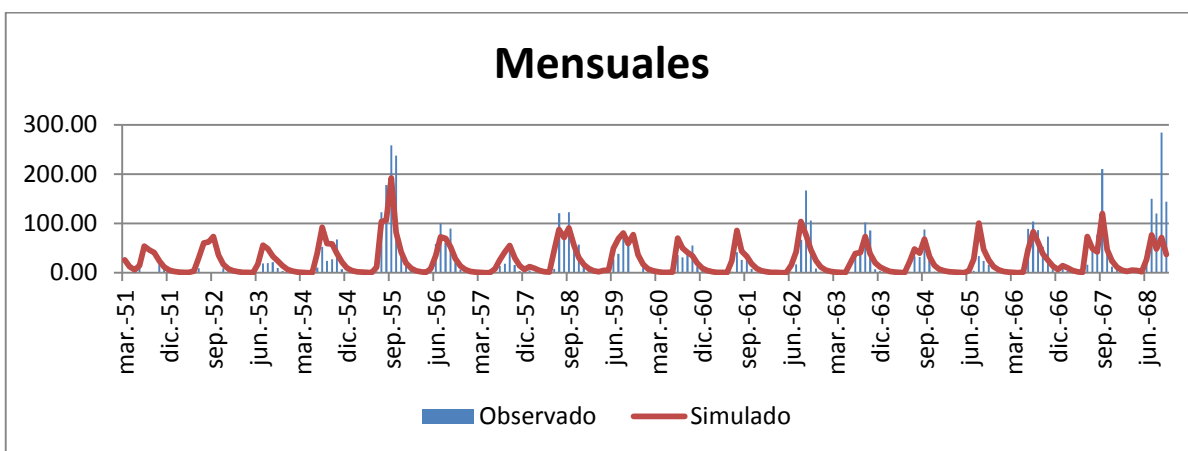


Figura 68 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18202.

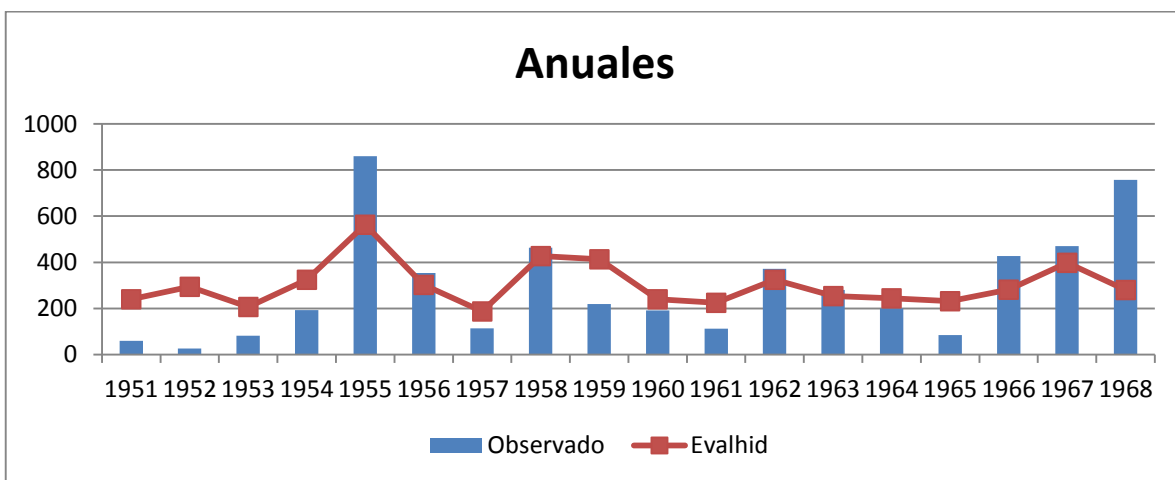


Figura 69 Resultados anuales de la calibración de la estación 18202.

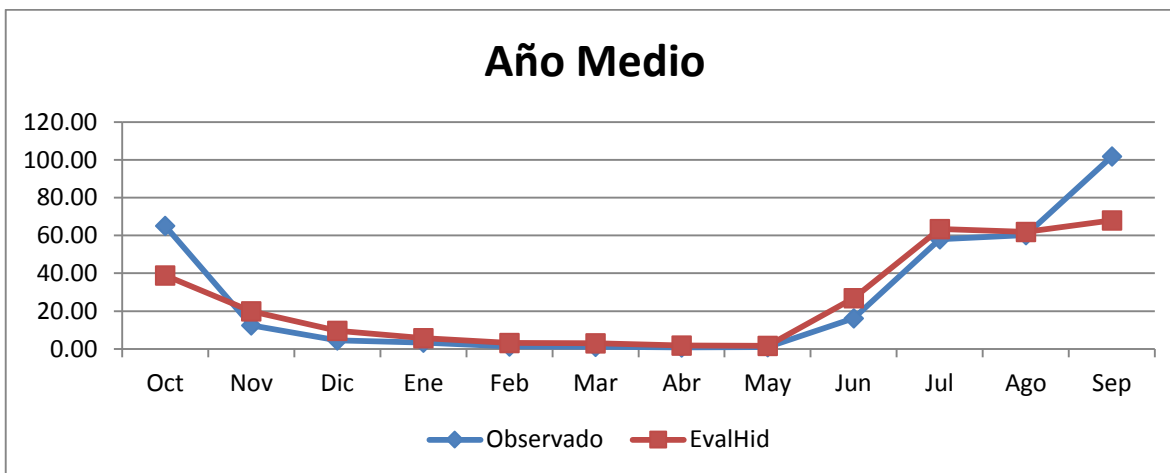


Figura 70 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18202.

4.- Estación 18452:

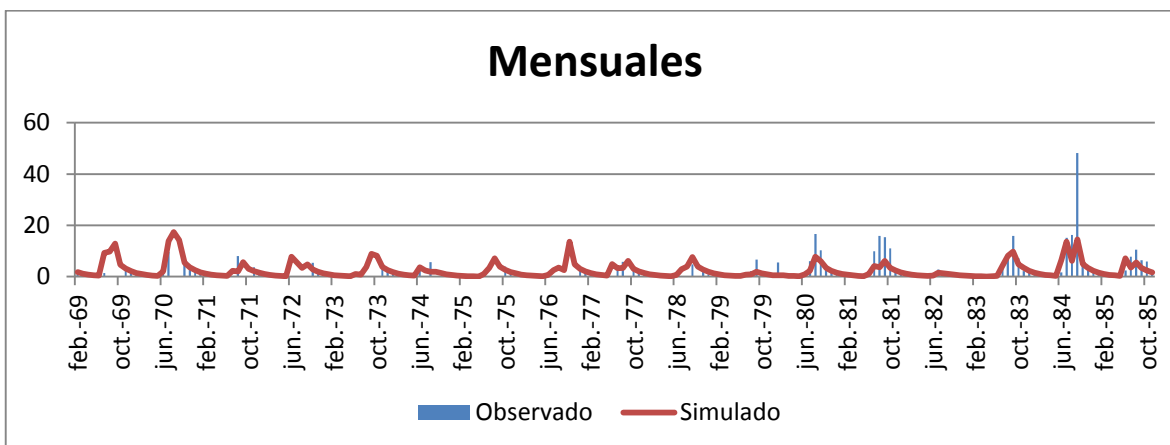


Figura 71 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18452.

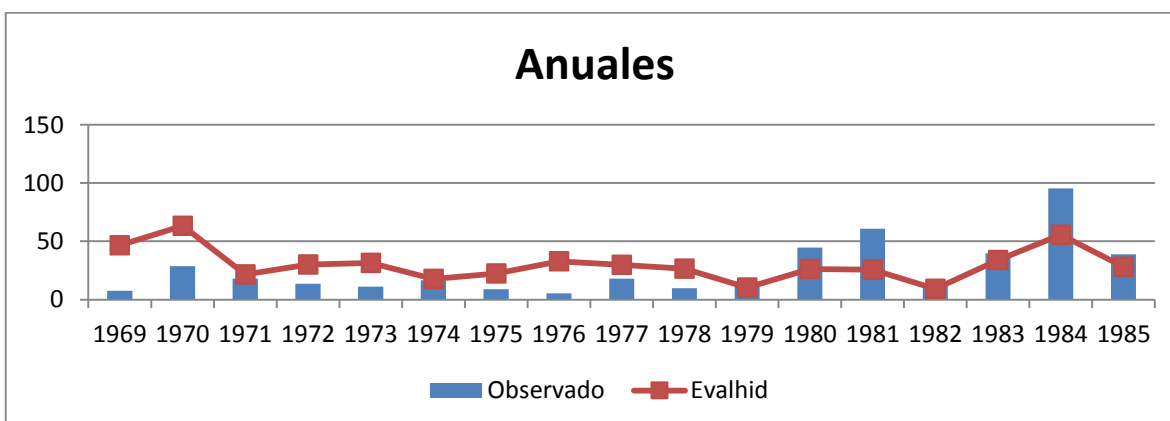


Figura 72 Resultados anuales de la calibración de la estación 18452.

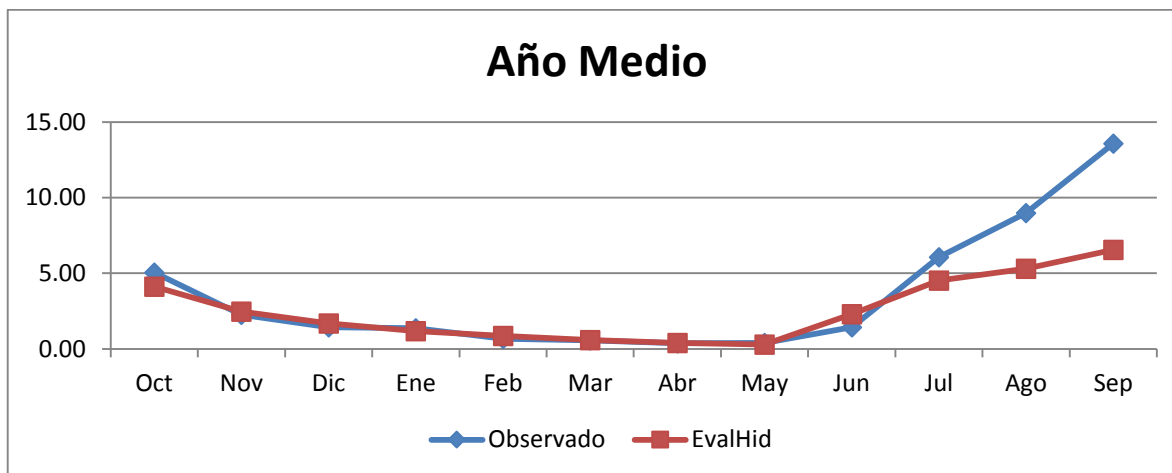


Figura 73 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18452.

5.- Estación 18181:

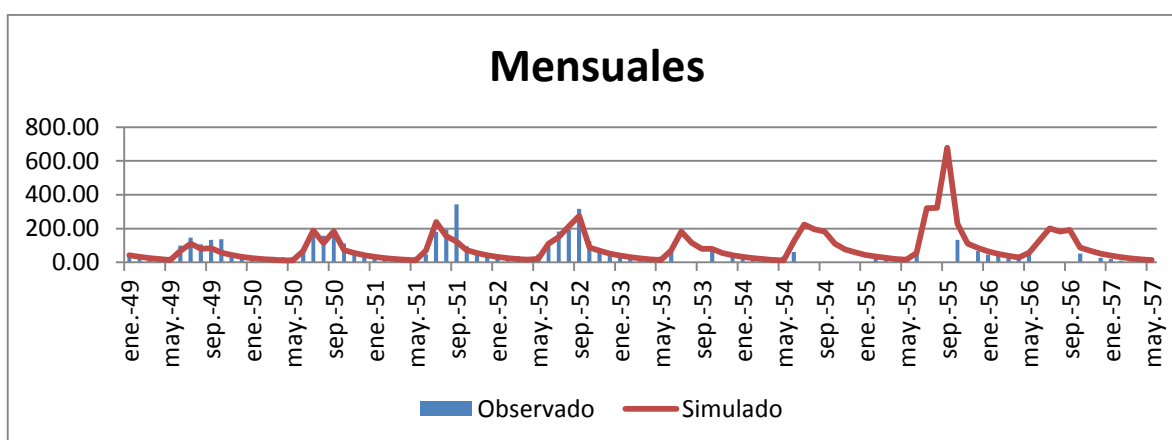


Figura 74 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18181.

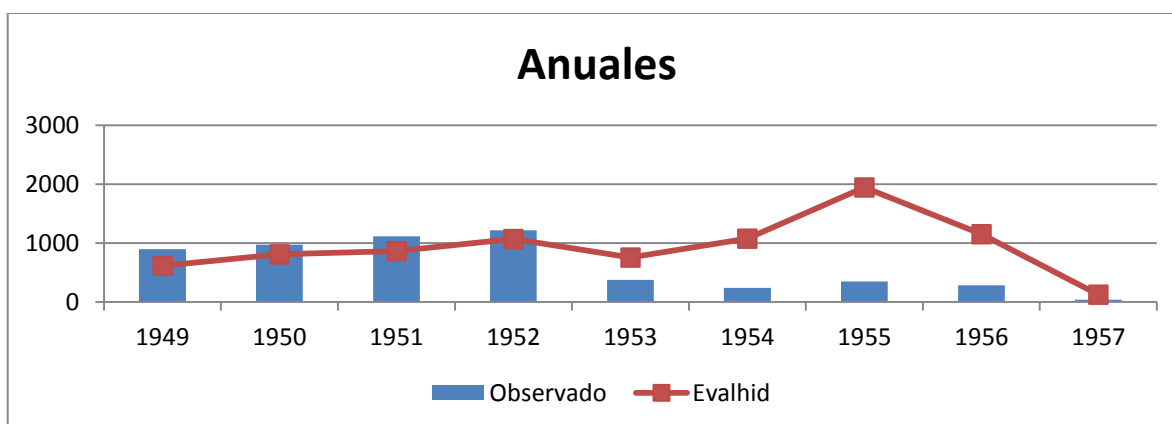


Figura 75 Resultados anuales de la calibración de la estación 18181.

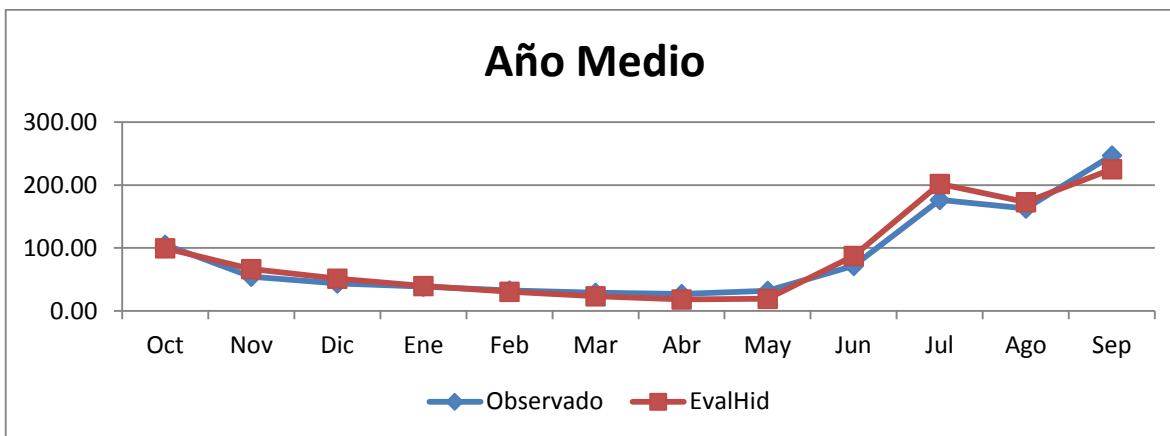


Figura 76 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18181.

5.- Estación 18494:

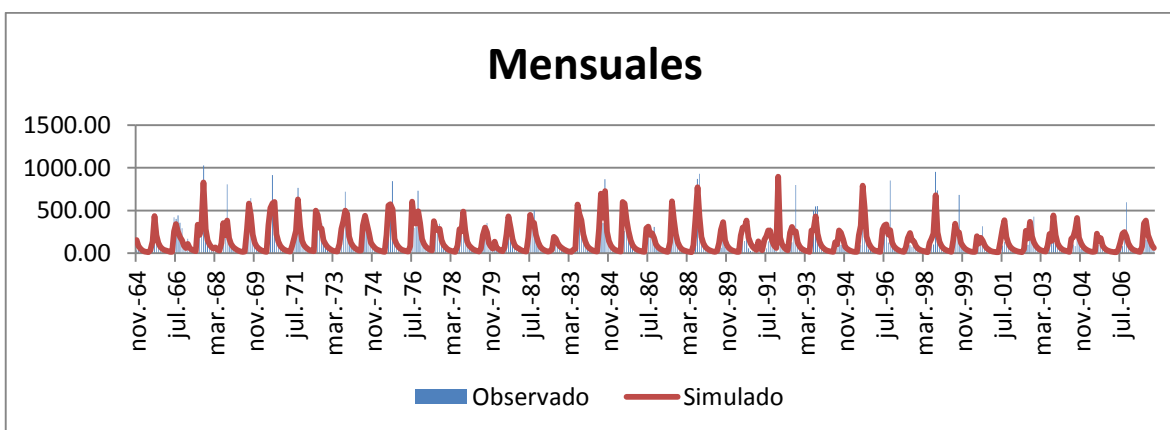


Figura 77 Resultados mensuales de la calibración de la estación 18494.

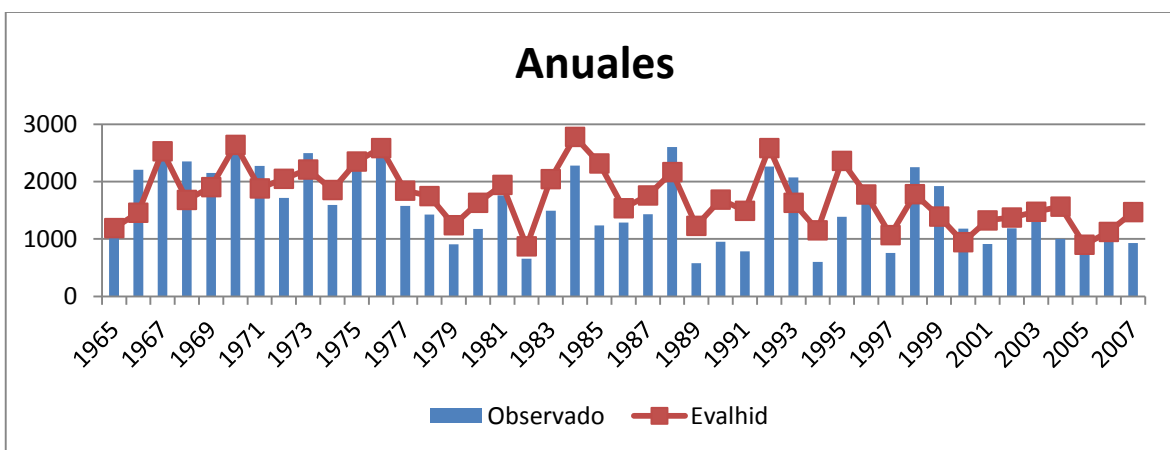


Figura 78 Resultados anuales de la calibración de la estación 18494.

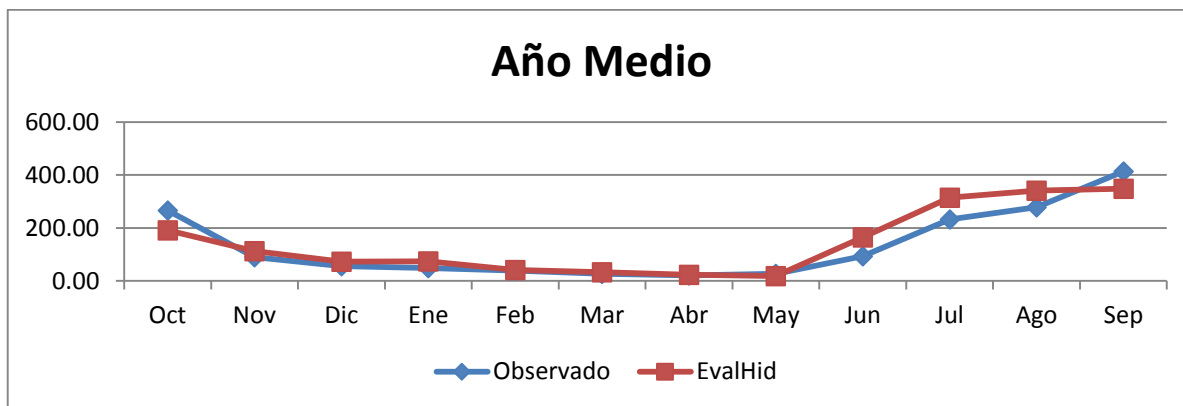


Figura 79 Resultados del año medio de la calibración de la estación 18494.

Estación	Función objetivo	Valor obtenido	Criterio de Molnar
18129	F1	0.50	Bueno
	F2	0.76	Muy bueno
	F3	0.77	Muy bueno
	F4	0.99	Excelente
18201	F1	0.64	Muy bueno
	F2	0.88	Excelente
	F3	0.81	Excelente
	F4	1.00	Excelente
18202	F1	0.62	Muy bueno
	F2	0.81	Excelente
	F3	0.81	Excelente
	F4	1.00	Excelente
18452	F1	0.50	Bueno
	F2	0.80	Excelente
	F3	0.71	Muy bueno
	F4	0.94	Excelente
18181	F1	0.71	Muy bueno
	F2	0.61	Muy bueno
	F3	0.79	Muy bueno
	F4	0.95	Excelente
18494	F1	0.67	Muy bueno
	F2	0.79	Muy bueno
	F3	0.82	Excelente
	F4	0.99	Excelente

Tabla 36 Resultados de funciones objetivos en la cuenca del río Tepalcatepec.

Estación	Hmax	C	Imax	Alfa
18129	341.24	0.26	61.84	0.01
18201	192.42	0.26	149.94	0.82
18202	113.02	0.26	149.97	0.76
18452	499.83	0.12	149.99	0.38
18181	330.37	0.10	63.45	0.27
18494	499.92	0.26	149.93	0.86

Tabla 37 Parámetros de Témez en la cuenca del río Tepalcatepec.

Témez			
Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³	Año	Volumen total de agua que escurre Hm ³
1951	1577.98	1981	2029.94
1952	1601.17	1982	903.18
1953	1044.38	1983	2083.10
1954	1678.87	1984	2854.31
1955	3115.37	1985	2417.30
1956	1602.75	1986	1662.14
1957	899.45	1987	1854.11
1958	2056.73	1988	2291.36
1959	2276.09	1989	1299.81
1960	1296.57	1990	1883.48
1961	1366.17	1991	1618.06
1962	1468.30	1992	2861.45
1963	1516.52	1993	1845.90
1964	1330.85	1994	1303.31
1965	1314.87	1995	2559.28
1966	1661.72	1996	1952.30
1967	2826.22	1997	1224.05
1968	1880.61	1998	2040.70
1969	2082.50	1999	1595.14
1970	2916.16	2000	1055.43
1971	2094.90	2001	1524.04
1972	2296.65	2002	1581.58
1973	2442.76	2003	1709.65
1974	1956.93	2004	1819.16
1975	2442.03	2005	1026.18
1976	2686.30	2006	1322.70

1977	1929.94	2007	1687.70
1978	1813.34	2008	1845.00
1979	1312.70	2009	941.30
1980	1715.65	2010	2305.50

Tabla 38 Esguerrimiento anual de acuerdo a Témez.