



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

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD
Y CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES.

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

PRESENTA:
FABIAN DARÍO GONZÁLEZ ESCALONA

TUTOR PRINCIPAL
DR. JOSÉ LUIS ARAGÓN HERNÁNDEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. SEPTIEMBRE 2019

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ESCALANTE SANDOVAL CARLOS AGUSTIN

Secretario: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

Vocal: DR. JOSÉ LUIS ARAGÓN HERNÁNDEZ

1^{er.} Suplente: DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

2^{do.} Suplente: DR. MOISES BEREZOSWKI VERDUZCO

Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México

Instituto Flumen, UPC, Barcelona, España

TUTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ LUIS ARAGÓN HERNÁNDEZ

FIRMA

Agradecimientos:

Esta tesis está completamente dedicada a mis padres Dario y Rosa, quienes siempre me han apoyado para poder cumplir mis objetivos y puesto todo el cariño en cada una de las cosas que han hecho por mí. A mi hermana Tania que siempre está ahí con una palabra de aliento y por todo el amor que día con día me da.

A tres personas que son sumamente importantes en mi vida, Sixta, Pierre y Laura, por estar conmigo en momentos difíciles y de alegría, por siempre brindarme apoyo, amor, cariño y amistad, el mismo que yo también estoy dispuesto a darles a ustedes.

Especial agradecimiento al Dr. Jose Luis Aragón, a quien tuve la oportunidad de conocer de manera familiar y por casualidad. Una de las personas que me alentó a ingresar al posgrado y con quien tuve la fortuna de poder desarrollar esta tesis, algunas investigaciones, artículos, proyectos y de quien además de lo académico he aprendido que no debemos estancarnos y continuar trabajando.

Modelación hidrológica distribuida. Análisis de sensibilidad y calibración de los parámetros más importantes.

Resumen

El cálculo del proceso lluvia escurrimiento se realiza comúnmente a través de modelos hidrológicos agregados que emplean ecuaciones empíricas. Aunque este enfoque es aceptado, actualmente se puede realizar a través de modelos distribuidos que emplean ecuaciones que involucran la física del fenómeno.

En un modelo hidrológico distribuido, se añaden zonas de aportación de flujo a las zonas de propagación del modelo hidráulico, donde las pequeñas láminas de lluvia se acumulan, escurren y para ello requieren de coeficientes de fricción más elevados que los valores comúnmente empleados en modelos hidráulicos. Este tipo de modelos se integran, en un solo modelo hidrológico-hidráulico, que permite conocer las variables hidráulicas de cualquier sección de corriente del modelo y en diferentes instantes.

En este estudio se analizó una cuenca del sur de México, en ella se realizó el cálculo del proceso lluvia-escurrimiento con el hidrograma unitario sintético adimensional y posteriormente se realizó a través del modelo hidrológico-hidráulico de Iber. Ambos resultados fueron validados con los caudales registrados en la estación hidrométrica del río, ubicada en el punto de salida de la cuenca.

El modelo empleó una malla de cálculo con diferentes tamaños de elementos, la cual requirió una distribución de los coeficientes de fricción de Manning de tipo hidrológico, empleando un mapa de uso de suelo y sistemas de información geográfica. La lluvia también fue distribuida con respecto a la ubicación de las estaciones climatológicas y la influencia que tienen sobre la cuenca. La topografía del modelo fue asignada en cada vértice de la malla de cálculo, en la cual se pudieron distinguir zonas de aportación y de propagación de flujo del modelo.

Finalmente, se realizó una evaluación de la sensibilidad del tamaño de la malla, así como de la variación de los coeficientes de rugosidad de Manning de tipo hidrológico. Los resultados obtenidos fueron analizados, encontrando errores bajos en caudales punta. Se presenta una breve discusión sobre la manera en que la distribución de la lluvia, los coeficientes de fricción y el tamaño de la malla afectaron a los resultados finales.

Índice

| | |
|---|------|
| Resumen | 1-1 |
| Índice | 1-2 |
| Índice de ilustraciones..... | 1-5 |
| Índice de tablas | 1-9 |
| 1 Introducción | 1-11 |
| Justificación..... | 1-17 |
| Objetivo principal | 1-17 |
| Objetivos secundarios..... | 1-17 |
| Alcances | 1-18 |
| 2 Zona de estudio..... | 2-19 |
| 2.1 Localización..... | 2-19 |
| 2.2 Fisiografía | 2-20 |
| 3 Análisis de datos y aplicación..... | 3-25 |
| 3.1 Hidrometría | 3-25 |
| 3.1.1 Distribuciones de probabilidad..... | 3-27 |
| 3.1.2 Mayoración de avenidas | 3-29 |
| 3.2 Climatología | 3-31 |
| 3.2.1 Distribuciones de probabilidad | 3-35 |
| 3.2.2 Curvas i-d-t..... | 3-36 |
| 3.2.3 Hietogramas de diseño..... | 3-42 |

| | | |
|-------|---|-------|
| 3.3 | Modelo agregado..... | 3-50 |
| 3.4 | Modelo distribuido | 3-57 |
| 3.4.1 | Iber..... | 3-57 |
| 3.4.2 | Caracterización del dominio de cálculo..... | 3-59 |
| 3.4.3 | Distribución de la lluvia..... | 3-59 |
| 3.4.4 | Tamaño de malla..... | 3-61 |
| 3.4.5 | Usos de suelo..... | 3-62 |
| 3.4.6 | Coefficientes de fricción de Manning..... | 3-77 |
| 3.4.7 | Consideraciones de cálculo | 3-86 |
| 4 | Análisis de resultados | 4-87 |
| 5 | Conclusiones..... | 5-99 |
| 6 | Referencias..... | 6-103 |

Índice de ilustraciones

| | |
|--|------|
| Ilustración 1. Ubicación geográfica de la cuenca de estudio. | 2-19 |
| Ilustración 2. Inundaciones en Marquelia provocadas por el desbordamiento del río el 18/octubre/2014..... | 2-20 |
| Ilustración 3. Cuenca del río Marquelia | 2-22 |
| Ilustración 4. Elevaciones topográficas. | 2-23 |
| Ilustración 5. Cuencas de las estaciones hidrométricas de la región. | 3-25 |
| Ilustración 6. Distribución de mejor ajuste para la estación 20018 Marquelia. | 3-29 |
| Ilustración 7. Hidrogramas registrados en la estación hidrométrica 20018 Marquelia. | 3-29 |
| Ilustración 8. Hidrograma unitario para la estación 20018 Marquelia. | 3-30 |
| Ilustración 9. Hidrogramas obtenidos para la estación 20018 Marquelia..... | 3-30 |
| Ilustración 10. Ubicación de la estación hidrométrica, estaciones climatológicas y sus polígonos de Thiessen.. | 3-31 |
| Ilustración 11. Distribución espacial de la lluvia. | 3-34 |
| Ilustración 12. Factor de conectividad (Labrada 2018)..... | 3-37 |
| Ilustración 13. Curvas i-d-t para la estación 12012 Ayutla. | 3-38 |
| Ilustración 14. Curvas i-d-t para la estación 12107 Ayutla CFE..... | 3-38 |
| Ilustración 15. Curvas i-d-t para la estación 12013 Azoyu. | 3-39 |
| Ilustración 16. Curvas i-d-t para la estación 12214 Coacoyulichan. | 3-39 |
| Ilustración 17. Curvas i-d-t para la estación 12022 Copala..... | 3-40 |
| Ilustración 18. Curvas i-d-t para la estación 12173 Marquelia. | 3-40 |
| Ilustración 19. Curvas i-d-t para la estación 12205 Pueblo Hidalgo. | 3-41 |
| Ilustración 20. Curvas i-d-t para la estación 12068 San Luis Acatlán. | 3-41 |
| Ilustración 21. Curvas i-d-t para la cuenca del río Marquelia. | 3-42 |
| Ilustración 22. Número de curva. | 3-44 |
| Ilustración 23. Hietograma de diseño de la cuenca Marquelia, para $Tr=50$ años..... | 3-45 |
| Ilustración 24. Hietograma de diseño de la estación Ayutla, para $Tr=50$ años..... | 3-45 |
| Ilustración 25. Hietograma de diseño de la estación Ayutla CFE, para $Tr=50$ años. | 3-46 |
| Ilustración 26. Hietograma de diseño de la estación Azoyu, para $Tr=50$ años..... | 3-46 |
| Ilustración 27. Hietograma de diseño de la estación Coacoyulichan, para $Tr=50$ años. | 3-47 |
| Ilustración 28. Hietograma de diseño de la estación Copala, para $Tr=50$ años..... | 3-47 |
| Ilustración 29. Hietograma de diseño de la estación Marquelia, para $Tr=50$ años..... | 3-48 |
| Ilustración 30. Hietograma de diseño de la estación Pueblo Hidalgo, para $Tr=50$ años..... | 3-48 |
| Ilustración 31. Hietograma de diseño de la estación San Luis Acatlán, para $Tr=50$ años..... | 3-49 |
| Ilustración 32. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 2$ años. | 3-51 |
| Ilustración 33. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 5$ años. | 3-51 |
| Ilustración 34. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 10$ años..... | 3-52 |
| Ilustración 35. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 20$ años..... | 3-52 |
| Ilustración 36. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 50$ años..... | 3-53 |

| | |
|--|------|
| Ilustración 37. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 100$ años..... | 3-53 |
| Ilustración 38. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 200$ años..... | 3-54 |
| Ilustración 39. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 500$ años..... | 3-54 |
| Ilustración 40. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 1,000$ años..... | 3-55 |
| Ilustración 41. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 2,000$ años..... | 3-55 |
| Ilustración 42. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 5,000$ años..... | 3-56 |
| Ilustración 43. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 10,000$ años..... | 3-56 |
| Ilustración 44. Geometría del modelo Iber: cauce principal, cauces secundarios y polígonos de Thiessen..... | 3-60 |
| Ilustración 45. Tamaños de malla..... | 3-61 |
| Ilustración 46. Malla de cálculo..... | 3-62 |
| Ilustración 47. Usos de suelo de la cuenca, serie VI (INEGI 2016)..... | 3-63 |
| Ilustración 48. Edafología de la cuenca (INEGI 2014)..... | 3-64 |
| Ilustración 49. Bosque de pino-encino, Techalutla Jalisco (INEGI 2017)..... | 3-66 |
| Ilustración 50. Bosque de Encino-Pino. Huimilpan, Querétaro (INEGI 2017)..... | 3-67 |
| Ilustración 51. Pastizal, Cuatro Ciénegas, Coahuila (INEGI 2017)..... | 3-67 |
| Ilustración 52. Pastizal inducido, Matamoros, Tamaulipas (INEGI 2017)..... | 3-68 |
| Ilustración 53. Agricultura de temporal, Laguna Guerrero, Quintana Roo (INEGI 2017)..... | 3-69 |
| Ilustración 54. Vegetación secundaria arbustiva de selva mediana caducifolia, Maxcanú, Yucatán (INEGI 2017). | 3-70 |
| Ilustración 55. Vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa caducifolia, Quiriego, Sonora (INEGI 2017). | 3-70 |
| Ilustración 56. Vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subcaducifolia, Santa María Tonameca, Oaxaca (INEGI 2017)..... | 3-71 |
| Ilustración 57. Selva Baja Caducifolia, Ciudad Valles, San Luis Potosí (INEGI 2017)..... | 3-72 |
| Ilustración 58. Vegetación Sabanoide, San Dionisio del mar, Oaxaca (INEGI 2017)..... | 3-73 |
| Ilustración 59. Ubicación de las fotografías de diversos sitios de la cuenca (Google, 2019)..... | 3-74 |
| Ilustración 60. A) Fotografía del tramo final del Rio Marquelia (Google, 2019)..... | 3-74 |
| Ilustración 61. B) Fotografía zona de cascada, Rio Marquelia (Google, 2019)..... | 3-75 |
| Ilustración 62. C) Fotografía de pueblo de Yoloxochitl, San Luis Acatlán (Google, 2019)..... | 3-75 |
| Ilustración 63. D) Fotografía de zona de río, San Luis Acatlán (Google, 2019)..... | 3-75 |
| Ilustración 64. E) Fotografía de Poza Santa, San Luis Acatlán (Google, 2019)..... | 3-76 |
| Ilustración 65. F) Fotografía panorámica, Pueblo Hidalgo (Google, 2019)..... | 3-76 |
| Ilustración 66. G) Fotografía panorámica, Pueblo Hidalgo (Google, 2019)..... | 3-76 |
| Ilustración 67. Zonas de aportación y zonas de propagación..... | 3-77 |
| Ilustración 68. Usos de suelo empleados en el modelo distribuido..... | 3-84 |
| Ilustración 69. Distribución de los coeficientes de fricción..... | 3-85 |
| Ilustración 70. Comparación de hidrogramas, $Tr=2$ años..... | 4-87 |
| Ilustración 71. Comparación de hidrogramas, $Tr=5$ años..... | 4-87 |

| | |
|---|------|
| Ilustración 72. Comparación de hidrogramas, $T_r=10$ años..... | 4-88 |
| Ilustración 73. Comparación de hidrogramas, $T_r=20$ años..... | 4-88 |
| Ilustración 74. Comparación de hidrogramas, $T_r=50$ años..... | 4-89 |
| Ilustración 75. Comparación de hidrogramas, $T_r=100$ años | 4-89 |
| Ilustración 76. Comparación de hidrogramas, $T_r= 200$ años. | 4-90 |
| Ilustración 77. Comparación de hidrogramas, $T_r= 500$ años. | 4-90 |
| Ilustración 78. Comparación de hidrogramas, $T_r= 1,000$ años. | 4-91 |
| Ilustración 79. Comparación de hidrogramas, $T_r=2,000$ años. | 4-91 |
| Ilustración 80. Comparación de hidrogramas, $T_r= 5,000$ años. | 4-92 |
| Ilustración 81. Comparación de hidrogramas, $T_r= 10,000$ años. | 4-92 |
| Ilustración 82. Comparación de caudales pico, Cuenca del río Marquelia..... | 4-93 |
| Ilustración 83. Comparación de volumen de escurrimiento directo, Cuenca del río Marquelia. | 4-94 |
| Ilustración 84. Cantidad de elementos de la malla – Caudal punta. | 4-96 |
| Ilustración 85. Hidrogramas para $T_r= 50$ años, calculados con diferentes coeficientes de rugosidad..... | 4-97 |

Índice de tablas

| | |
|---|------|
| Tabla 1. Características fisiográficas de las estaciones hidrométricas. | 3-26 |
| Tabla 2. Caudales máximos anuales de las estaciones hidrométricas..... | 3-26 |
| Tabla 3. Funciones de distribución de probabilidad ajustadas para la estación 20018, Marquelia..... | 3-27 |
| Tabla 4. Nombre, clave y coordenadas de las estaciones climatológicas | 3-32 |
| Tabla 5. Precipitación máxima anual en 24 horas mm, registrada en las estaciones climatológicas. | 3-32 |
| Tabla 6. Funciones de distribución de probabilidad en mm, para las estaciones climatológicas. | 3-35 |
| Tabla 7. Cociente de precipitación-frecuencia y factor de convectividad de las estaciones climatológicas..... | 3-37 |
| Tabla 8. Usos de suelo de la cuenca, serie VI (INEGI 2016). | 3-65 |
| Tabla 9. Coeficientes de fricción de Manning para corrientes naturales (Chow 2004)..... | 3-80 |
| Tabla 10. Valores de resistencia al flujo sobre el terreno (Campos-Aranda 2010). | 3-81 |
| Tabla 11. Coeficientes de fricción obtenidos por inspección visual (Kalyanapu et al. 2009). | 3-82 |
| Tabla 12. Coeficientes de fricción de Manning obtenidos por SIG y mapas de uso de suelo (Kalyanapu et al. 2009). | 3-82 |
| Tabla 13. Uso de suelo, influencia y coeficiente de fricción empleados en la cuenca del río Marquelia..... | 3-83 |
| Tabla 14. Variación de los tamaños de malla. | 4-95 |
| Tabla 15. Variación de los coeficientes de rugosidad. | 4-97 |
| Tabla 16. Error relativo del modelo agregado y distribuido con respecto del caudal observado en la estación hidrométrica. | 4-94 |
| Tabla 17. Error relativo del modelo agregado y distribuido con respecto del volumen observado en la estación hidrométrica. | 4-95 |

1 Introducción

La modelación hidrológica, es útil para determinar los hidrogramas de diseño a la salida de una cuenca hidrológica empleando distintas técnicas (Campos-Aranda 1998). Es empleada para contar con parámetros de diseño hidráulico en obras de drenaje, protección, dimensionamiento de puentes y carreteras, etc., esta debe ser confiable, ya que la diversidad de métodos de cálculo es vasta, y el empleo de ciertas ecuaciones y coeficientes, suelen ser datos particulares que han sido elaborados para alguna región específica. Estos aspectos son importantes, debido que elegir la ecuación de más reciente aplicación empleando los coeficientes erróneos, puede llevar a un sub o sobredimensionamiento de la obra, que podría resultar; por ejemplo, en un asunto de carácter económico para la construcción de una obra con un sobre coste innecesario, o en una catástrofe asociada a un evento extraordinario que no ha sido previsto apropiadamente.

En la modelación hidrológica el proceso de transformación de lluvia en escurrimiento suele tratarse en dos etapas (Domínguez et al. 2008):

1. **Modelos de producción.** Se realiza el cálculo de la cantidad de lluvia que se infiltra o evapora con métodos como el número de curva, coeficiente de infiltración o el índice de infiltración para separar la cantidad de lluvia que no escurre de la que si lo hace.
2. **Modelos de transferencia.** Se realiza el tránsito del escurrimiento o el cálculo del hidrograma obtenido en la salida de la cuenca, en esta etapa podremos conocer el volumen bajo la curva y su caudal punta, con métodos diversos como el método del hidrograma unitario.

Los modelos hidrológicos pueden clasificarse de la siguiente manera (Cabezas 2015):

- a) **Modelos agregados.** Son métodos de cálculo basados en ecuaciones empíricas, en ellos la unidad de cálculo es la cuenca en su totalidad. Dependiendo del autor, existen diferentes metodologías, los más comunes son: el método racional, empleado en cuencas de tamaño pequeño y en las cuales solo se tiene como valor de salida al caudal máximo de cada evento y el hidrograma unitario, que puede emplearse en cuencas de mayor tamaño en que podemos atribuir una forma al hidrograma de salida.

Existen otros métodos más, principalmente para hidrogramas unitarios como el de Snyder, SCS, Clark, triangular de la DGC, entre otros (Nanía y Gomez Valentín 2006). Para su cálculo, los modelos más comunes en México son SWMM y HEC-HMS, ambos de uso libre y disponibles en internet.

b) **Modelos semidistribuidos.** Son metodologías de reciente uso, gracias a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), toman en cuenta el impulso generado por las subcuencas ubicadas aguas arriba y la respuesta ocasionada en el punto de salida (Caro 2015).

La cuenca es dividida en subcuencas, y cada una tiene su propio proceso de transformación de lluvia en escurrimiento y se debe aplicar algún modelo agregado. En la unión de dos o más subcuencas, se aplica el teorema de convolución (Chow et al. 1994). Cuando las subcuencas convergen hacia otra, se debe aplicar un modelo de tránsito de avenidas de dicha convolución. La subcuenca en la cual ocurre la descarga, funciona como un depósito y al realizar el tránsito de la avenida, existe una atenuación y desplazamiento del hidrograma. Finalmente, los efectos causados por la división en subcuencas realizada aguas arriba del punto de cálculo de la cuenca, deben verse reflejados en el hidrograma.

c) **Modelos distribuidos.** En este caso, la cuenca es discretizada en tantos elementos como resultados se deseen obtener (García-Marin et al. 2014). Cada uno de estos elementos interactúa con elementos vecinos para distribuir el escurrimiento hasta llegar a los cauces principales. Emplean ecuaciones con la física del fenómeno, en este caso de la transformación de lluvia en escurrimiento. Para completar las ecuaciones y poder efectuar un cálculo, se requiere indicar las condiciones iniciales, de frontera y los parámetros de cálculo del problema. El empleo de este tipo de modelos es escaso debido a que generalmente, requieren que el usuario indique ciertas instrucciones de código, además de que el tiempo de cálculo de estos suele ser tardado y no siempre con resultados satisfactorios.

Un modelo distribuido requiere de una discretización tanto espacial como temporal de los elementos y parámetros, con la ventaja de poder solicitar resultados en cualquier punto del dominio de cálculo aunque no se trate de un sitio previamente aforado.

En muchas ocasiones al emplear parámetros para la aplicación de fórmulas empíricas en un modelo agregado o semidistribuido, se obtienen resultados que no tienen coherencia o

relación con el problema a resolver, no es el caso de un modelo distribuido, en este, a mayor detalle del dominio, este problema de escala disminuye notablemente. Sin embargo, la mayor dificultad de un modelo distribuido, es la obtención de los parámetros de entrada del modelo, y ellos en muchas ocasiones deben ser calibrados solo contra un valor observado de caudal en el punto de salida de la cuenca (García-Marin et al. 2014).

Físicamente, en el proceso de lluvia-escorrentía deben ser bien distinguidas, las zonas de aportación, donde el agua es colectada (en las laderas, partes altas de las montañas, amplias planicies, zonas de bosque, selva, etc.) de las zonas de propagación, donde el agua proveniente de los sitios anteriores escurre acumulándose en cantidades mayores y donde la profundidad será mucho mayor que en las zonas de aportación. Por lo tanto, una lámina de agua en zonas de aportación, será mayormente propensa a los efectos de secado por infiltración o evaporación (Caro y Bladé, 2005), además de que tendrá mayor dificultad en escurrir a través de los obstáculos naturales que presenta la vegetación, y adicionalmente se debe considerar que la lámina se comienza a acumular a partir de pequeñas profundidades.

De acuerdo con lo anterior, el efecto del coeficiente de rugosidad de Manning es importante para zonas de aportación, en estas para librar los efectos de los obstáculos como arbustos, matorrales, arboles e incluso casas y edificios en láminas pequeñas de agua, deben considerarse superficies más rugosas o con mayor fricción y en consecuencia valores más elevados que los utilizados en zonas de propagación del flujo. Algunos valores pueden ir desde 0.15 para césped y pasto pequeño, hasta 0.4 empleados para distintos tipos de bosque (Kalyanapu et al. 2009).

Cuando son considerados los cambios de rugosidad en un modelo hidrológico e hidráulico durante el proceso de escurrimiento, al pasar de pequeñas laminas a profundidades más altas, podría considerarse un efecto de cambio en el valor de la rugosidad y considerarse como un valor variable (Caro y Bladé, 2005), ya que la modelización a largo plazo debe tomar en cuenta los efectos de infiltración, evaporación y por lo tanto los cambios de profundidad, con lo cual se representaría de mejor manera la hidrodinámica del modelo hidrológico.

Chow (2004) define valores para corrientes naturales con una breve descripción, estos coeficientes de fricción de Manning, son valores comunes y empleados principalmente para zonas de propagación, sin embargo, se encuentran algunos valores un poco más altos y que coinciden con la abundancia de vegetación que comienza a existir en las planicies de

inundación así como en zonas con mucha vegetación. Campos (2010) muestra una tabla con una descripción muy general de coeficientes de resistencia que son equivalentes a los coeficientes de rugosidad de Manning, planteando valores más elevados que son fácilmente aplicados para calcular el flujo en planicies de inundación. Finalmente Kalyanapu (2009) propone varias técnicas para la asignación de un coeficiente de fricción y algunos valores, sin embargo aunque carecen de una descripción detallada, proponen valores más aproximados con los sugeridos en este estudio.

La asignación del coeficiente de rugosidad de Manning puede realizarse a través de diferentes metodologías que pueden clasificarse dentro de 4 grupos (Kalyanapu et al. 2009):

1. **Inspección visual.** Se realizan visitas al sitio de estudio, pueden añadirse fotos de diversas zonas, y depende mucho del criterio del ingeniero.
2. **Base física.** Se realizan experimentos en campo o laboratorio con las mismas características del sitio.
3. **Técnicas de optimización.** Se plantea una función objetivo a resolver, mediante parámetros obtenidos en campo, tales como profundidades, pendientes, medición de altura de maleza, grado de sumergencia, etc.
4. **Sistemas de información geográfica.** Es el más recomendado para cuencas con superficies muy extensas; debe adquirirse la cartografía de uso y tipo de suelo para poder ser manipulada mediante un SIG.

Aunque algunos métodos no son recomendados para ser empleados en cuencas con gran extensión, se puede realizar una combinación de diversas técnicas para converger en un criterio más apropiado.

Los modelos hidráulicos son generalmente empleados para realizar tránsito de avenidas, elaboración de mapas de inundación, etc. La tecnología en la modelización hidráulica, ha permitido la incorporación de un modelo topográfico al cálculo, debido a esto los modelos en dos dimensiones (2D) son cada vez más comunes, varían un poco en los esquemas numéricos de cada uno; sin embargo, la calibración, validación y evaluación de estos es fundamental. Debido a la simplicidad con que son manipulados, actualmente el uso inapropiado de ellos ha ido en crecimiento, y debe ponerse especial atención en los resultados obtenidos.

La adición de la topografía en estos modelos, convierte el modelo hidráulico en un

modelo robusto, que también depende de la resolución y cantidad de datos y por lo tanto el coste computacional se ve afectado.

En la elaboración modelos de hidrodinámica bidimensional, es necesario identificar tres aspectos fundamentales (Hunter et al. 2007):

- i) **Topografía.** La topografía se emplea para elaborar un modelo geométrico que representa la fisiografía del sitio de estudio. Suele conseguirse mediante levantamientos de campo, fotogrametría o con mapas nacionales. Los primeros métodos son muy costosos, y los mapas carecen de una buena resolución generalmente en el fondo del cauce. Actualmente la tecnología LiDAR, puede proveer de una resolución de hasta un metro con una precisión de hasta 0.15 m. Dependiendo del tipo de modelo o del objetivo del estudio deberá elegirse la opción que mejor se adapte a la necesidad.
- ii) **Coefficientes de resistencia del flujo.** Se requiere identificar en cada región del modelo con un valor de coeficiente de rugosidad, que debe ser capaz de reproducir la pérdida de energía que en realidad ocurre en el sitio. En muchas ocasiones, estos valores son propuestos y calibrados hasta lograr las condiciones en que se cuenta con datos observados.
- iii) **Condiciones en las fronteras.** Deben ser definidos valores de cálculo para asignar en las fronteras del modelo. Las estaciones de aforo pueden proveer datos de campo para poder contar con parámetros de frontera del modelo. Pueden ser valores de cota de agua, series de tiempo, valores puntuales de caudal o hidrogramas, curvas de elevación-gasto, etc.

Actualmente existe una gran variedad de modelos en dos dimensiones que son capaces de calcular la hidrodinámica, algunos de ellos pueden también ser empleados en modelación hidrológica. TRIBS-OFM (Kim et al. 2012) usa mallas no estructuradas generadas a partir de una red irregular de triángulos (TIN), con ella realiza una distribución espacial de la información. Este modelo puede acoplar el cálculo hidráulico con el hidrológico mediante superficies parcialmente mojadas o con pequeñas profundidades. La base física del programa es capaz de simular el flujo superficial y el flujo subsuperficial, ya que alguno de los modelos de este tipo descuidan componentes hidrológicos como evaporación, evapotranspiración, intercepción, infiltración, y flujo subterráneo. Adicionalmente pueden visualizarse saltos hidráulicos, oleaje, estructuras de control etc., y puede combinarse con ciencias de la tierra en la interacción de fenómenos meteorológicos e hidrológicos.

Existen otras herramientas que también son capaces de realizar modelación hidrológica distribuida, tales como Hec-Ras 2D, InfoWorks, Telemac 2D, Iber, etc.; no obstante su empleo no es tan común en esta rama, ya que para realizar modelos distribuidos de lluvia, se requiere de la calibración de varios parámetros, como tiempo de concentración, infiltración y principalmente determinación y distribución de los coeficientes de fricción. Al emplear estas variables debería incrementar la precisión en los resultados, pero son modelos de mayor complejidad que los modelos agregados o semiagregados.

La herramienta más usada actualmente en México para calcular la hidrodinámica en ríos y canales, es Iber (Bladé et al. 2014) ya que es un software de uso libre y de mucha simplicidad para la elaboración de modelos de hidráulica. También se requiere contar con los parámetros antes mencionados para su correcta elaboración y poder calcular resultados lógicos.

En México, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (De Luna-Cruz et al. 2019) desarrollaron FluBiDi, un software para cálculo de flujo bidimensional capaz de simular los procesos de transformación de lluvia en escurrimiento y la propagación del mismo, en este caso los valores de entrada serán los datos de lluvia y los de salida podrán ser evaporación, infiltración y escurrimiento, simulados en plazos de algunos segundos, o incluso meses. El cálculo de pérdidas por infiltración se realiza por medio del número de curva del SCS, considerando que no toda la lluvia escurre y para el cálculo de la evaporación, se considera que después de cada evento el suelo se ha secado por completo y posteriormente la diferencia se transforma en escurrimiento hasta llegar al punto de cálculo. De esta manera, es posible conocer la superficie de inundación, los niveles y las velocidades alcanzadas. Para resolver el problema, ya que se trata de la resolución de ecuaciones diferenciales a través del método de diferencias finitas, es necesario conocer parámetros iniciales y asignar condiciones de entrada y salida del modelo. Se emplea un cálculo en dos direcciones, en los cuales la componente de velocidad será un valor promediado en la vertical. Este modelo ha sido calibrado y evaluado en el cálculo de zonas de inundación en diferentes sitios de México.

En el mismo Instituto (Domínguez et al. 2008) también se desarrolló MPE, el cual es un software para modelación hidrológica basado en la distribución de la lluvia a través de una malla, en la cual se calcula en cada celda el escurrimiento, siguiendo la trayectoria de la topografía de la cuenca. Emplea sistemas de información geográfica y herramientas de preproceso para realizar el armado del modelo. El modelo MPE calcula la precipitación efectiva con el método del número de curva (CN) del SCS, el tránsito del escurrimiento se

realiza a través del método del hidrograma de Clark modificado y adicionalmente calcula la evaporación al considerar el secado de los elementos para el cálculo de tormentas subsecuentes.

Justificación

Hoy en día se utiliza una gran diversidad de modelos de cálculo de tipo hidrológico de parámetros agregados, y la mayoría de ellos se fundamentan con una base empírica. En los últimos años se inició el uso de modelos distribuidos con cierta incertidumbre en su empleo, es por ello que en este estudio se propone que al realizar cálculo con modelos distribuidos de tipo hidráulico-hidrológico como el de Iber, en el que se simulará el comportamiento físico del fenómeno de manera general, para poder concluir en resultados con una mejor aproximación. En este modelo se asume que las láminas de lluvia escurren hasta poder convertirse en un río caudaloso, sin embargo, las consideraciones que deben tomarse en cuenta son los puntos principales a discutir en este trabajo.

Objetivo principal

Calibrar y validar un modelo de tipo hidrológico, es decir, realizar la comparación y ajuste de resultados de cálculo con respecto de la medición de datos existentes, en este caso empleando datos registrados en una estación de aforo, para simular el proceso lluvia-escorrimento a través de una distribución propuesta de tamaños de malla, lluvia y coeficientes de fricción de Manning.

Objetivos secundarios

Para complementar el objetivo principal, se plantearon los objetivos secundarios siguientes:

Emplear un método para modelación hidrológica, tal como la transformación de lluvia en escurrimiento que se realiza a través del método del hidrograma unitario sintético adimensional.

Calibrar y validar el método del hidrograma unitario sintético adimensional (HUSA), en el proceso de transformación de lluvia en escurrimiento.

Realizar una comparación de los resultados obtenidos tanto como por el método del hidrograma unitario, como de los cálculos realizados con el modelo distribuido hidrológico-

hidráulico que propone Iber.

Alcances

Para desarrollar el análisis, se eligió una zona de estudio situada al sur de México, en la cual se cuenta con una estación de aforo en el punto de salida de la cuenca, cuyos datos dan validez al análisis realizado por los dos modelos empleados.

Ambos modelos requirieron contar con información de lluvia de toda la zona de estudio, para realizar análisis estadísticos y probabilísticos necesarios, previos al proceso de transformación de lluvia en escurrimiento, que consiste en realizar las pruebas de calidad y consistencia, así como el cálculo de diversas funciones de distribución probabilísticas (Escalante y Reyes 2002), y elegir la que menor error estándar de ajuste presente, así como hacer uso del criterio ingenieril que se adquiere con la experiencia; emplear los factores de conectividad de la región apropiados para el trazo correcto de curvas i-d-t, los cuales se encuentran en una base de datos recientemente actualizada (Labrada 2018). La precipitación efectiva es calculada con el método del número de curva del SCS, apoyando en la cartografía disponible en los sitios que proporciona INEGI.

El modelo agregado empleado es el hidrograma unitario del SCS. Este modelo requiere realizar el cálculo apropiado del tiempo de concentración de la cuenca; en México suele emplearse la fórmula de Kirpich como una metodología válida (Escalante y Reyes 2014), así como una calibración coherente del número de curva, y con esta información poder obtener una tormenta representativa de los eventos del sitio.

El modelo distribuido se realiza con Iber. Debe definirse un tamaño de malla apropiado y congruente con el tamaño de la cuenca a calcular, así como con el MDT empleado. La distribución de la lluvia puede ser planteada de diferentes maneras (idw, kriging, etc), no obstante en este análisis se propone una distribución de Thiessen. Los valores coeficientes de fricción de Manning de tipo hidrológico, son uno de los puntos más importantes a tratar en la evaluación del modelo, y en este caso son asignados en función de las características físicas del sitio y del uso de suelo.

2 Zona de estudio

México debido a su gran extensión territorial, cuenta con una vasta diversidad geográfica, orográfica, hidrográfica y climática. Por ejemplo, el norte se caracteriza por temperaturas elevadas y temporadas de sequía, las sierras con zonas frías y vientos fuertes, la zona cercana al Golfo de México es propensa a inundaciones, igual que la zona metropolitana de la Ciudad de México, las costas por climas tropicales y propensas a temporadas de huracanes, etc., por lo tanto, ya que cada región puede contar con características propias, el sitio de estudio fue elegido en este caso en la cuenca del río Marquelia, con la salvedad de contar con la información necesaria.

2.1 Localización

La cuenca del río Marquelia, se ubica en el estado de Guerrero, México (Ilustración 1); la salida de la misma coincide con la cabecera municipal de Marquelia y descarga en el Océano Pacífico. Marquelia es un poblado en crecimiento que se encuentra asentado en la margen izquierda del río con el mismo nombre, en cotas comprendidas entre 8 y 12 m.s.n.m. y a escasos 4 km de la línea de costa. A la altura de la población, el cauce del río Marquelia tiene una pendiente baja, ancho de superficie libre del agua de hasta 180 m y transporta caudales importantes. La cuenca se encuentra muy cerca de los límites de los estados de Guerrero y Oaxaca y aproximadamente a 100 km del puerto de Acapulco.



Ilustración 1. Ubicación geográfica de la cuenca de estudio.

Igual que en otros sitios de México, la población se estableció cerca de las márgenes del río, y con el paso del tiempo su demografía y urbanización crecieron junto con una escasa planificación, por lo que es susceptible a inundaciones fluviales como consecuencia del desbordamiento del mismo (Ilustración 2). Para conocer la magnitud de este fenómeno, son necesarios estudios hidrológicos e hidráulicos.



Ilustración 2. Inundaciones en Marquelia provocadas por el desbordamiento del río el 18/octubre/2014.

2.2 Fisiografía

Alunas características fisiográficas de la cuenca se obtuvieron con un modelo digital de terreno (INEGI 2013) con resolución de 15 m (Ilustración 3), mediante el cual, a partir de la salida de la cuenca se obtuvo:

- Área de cuenca: $A = 1,016.5 \text{ km}^2$
- Longitud de cauce principal: $L = 77.3 \text{ km}$
- Pendiente (*Taylor-Schwartz*): $S = 0.00751$

$$s = \left[\frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\sqrt{s_i}}} \right]^2 \quad 1$$

Tiempo de concentración (Kirpich): $t_c = 12.41 \text{ h}$

$$t_c = 0.0663 \left(\frac{L}{\sqrt{s}} \right)^{0.77} \quad 2$$

Tiempo de retraso: $t_r = 7.43 \text{ h}$

$$t_r = 0.6t_c \quad 3$$

donde:

L es la longitud del cauce principal en m

l_i es la longitud de cada subtramo del cauce principal en m

s_i es la pendiente de cada subtramo del cauce principal en m/m

La ubicación y características fisiográficas principales de la cuenca, se muestran en la Ilustración 3, tales como: parteaguas, cauce principal y redes secundarias; mientras que las elevaciones topográficas de la cuenca se muestran en la Ilustración 4, con intervalos de elevación de 100 m.



Ilustración 3. Cuenca del río Marquelia

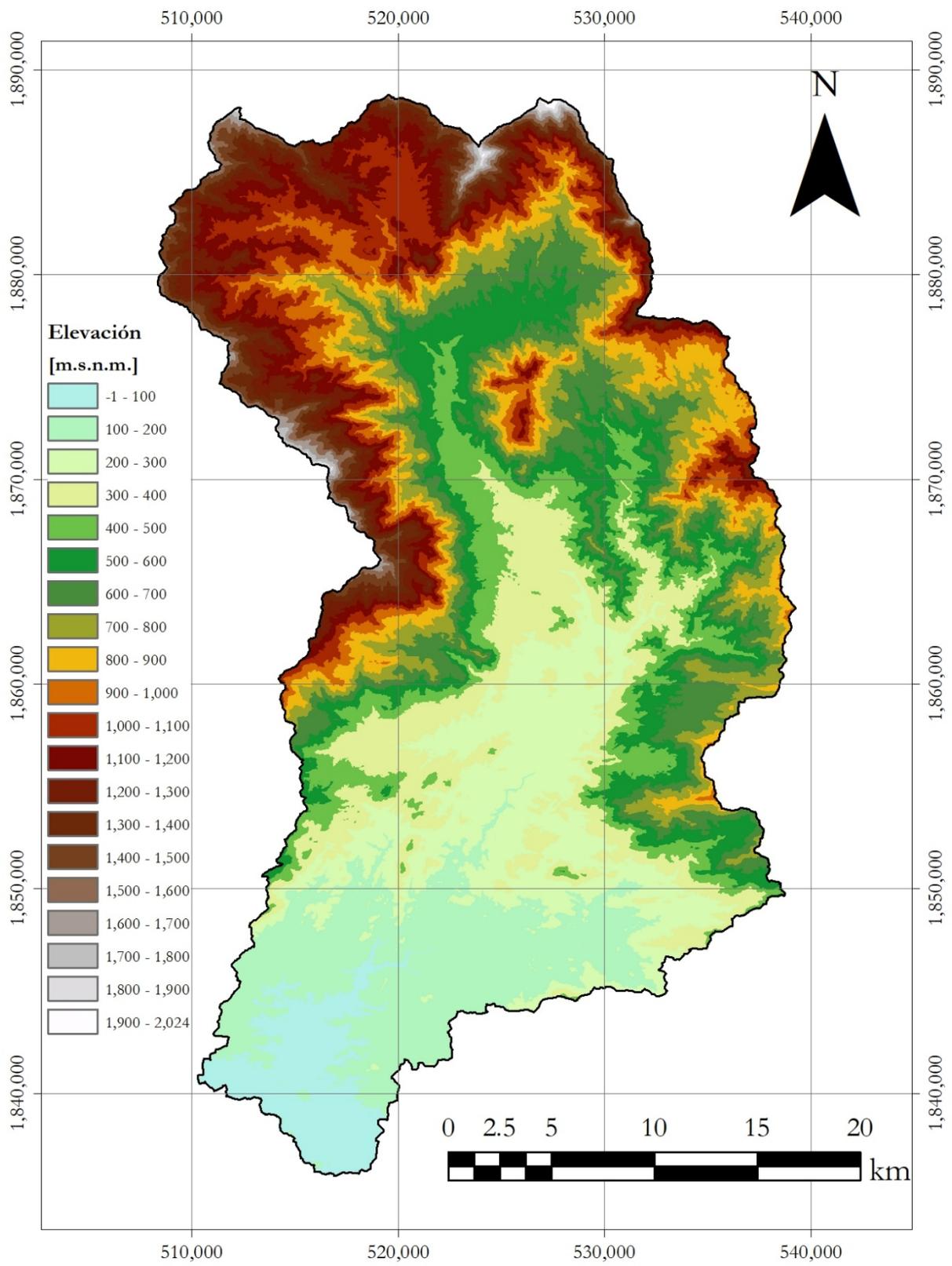


Ilustración 4. Elevaciones topográficas.

3 Análisis de datos y aplicación

La aplicación del modelo concentrado y distribuido en el proceso de lluvia-escorrentamiento en la zona de estudio, requirió el análisis de información hidrométrica y climatológica. Dicha información, así como la metodología empleada para realizar ambos análisis, es descrita en los siguientes apartados, mencionando las consideraciones de mayor relevancia.

3.1 Hidrometría

A la salida de la cuenca del río Marquelia, se encuentra la estación hidrométrica “Marquelia” con clave 20018, dispone de los caudales históricos de un periodo de años aceptable. Adicionalmente, existen 3 estaciones hidrométricas próximas al sitio de estudio (Ilustración 5).

Las estaciones hidrométricas fueron consideradas dentro de una región homogénea, (Escalante y Reyes 2014), las cuales cuentan con características fisiográficas similares y suficientes para realizar el análisis hidrométrico (Tabla 1 y Tabla 2).

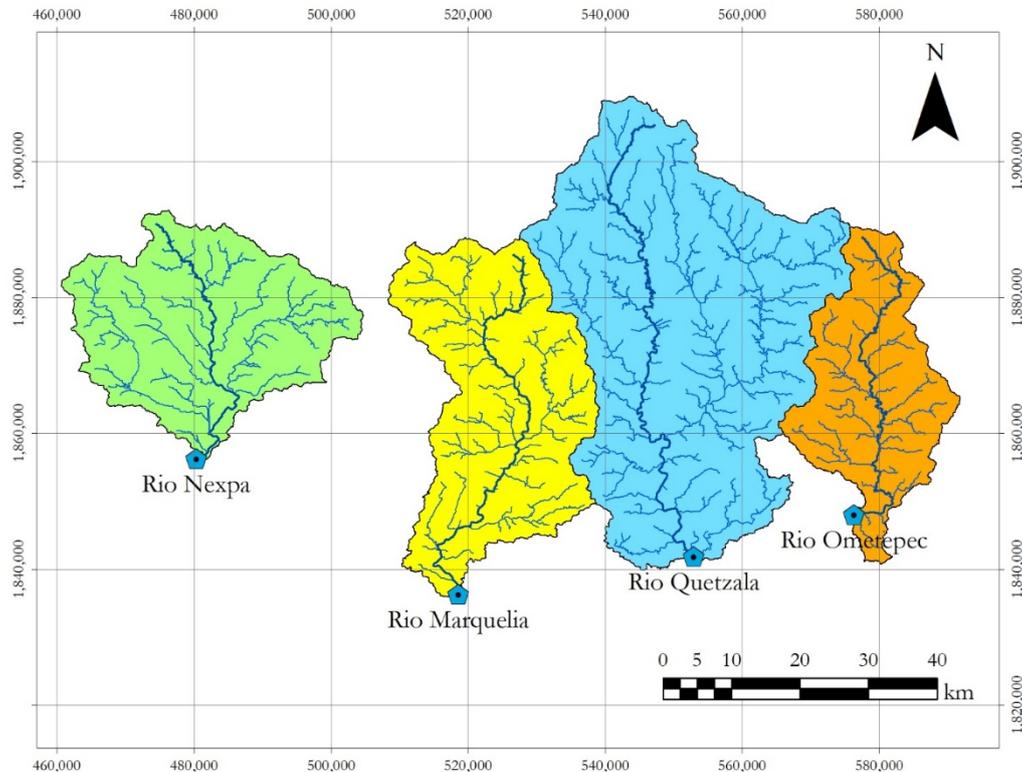


Ilustración 5. Cuencas de las estaciones hidrométricas de la región.

Tabla 1. Características fisiográficas de las estaciones hidrométricas.

| Nombre | Río Quetzala | Río Marquelia | Río Nexpa | Río Ometepec |
|---|--------------|---------------|-----------|--------------|
| Clave | 20016 | 20018 | 20019 | 20025 |
| Ac km ² | 1,970.7 | 1,016.5 | 913.8 | 638.8 |
| Pt km | 258.2 | 193.6 | 168.5 | 160.7 |
| Lcp km | 111.0 | 077.3 | 056.5 | 070.6 |
| So | 0.01126 | 0.00751 | 0.00346 | 0.00549 |
| Tc h | 14.02 | 12.41 | 13.14 | 13.05 |
| Mp | 1.640 | 1.713 | 1.572 | 1.793 |
| Pf | 0.131 | 0.190 | 0.184 | 0.252 |
| Amed km | 7.6 | 5.2 | 5.4 | 4.0 |
| Zmed m | 1,490.5 | 1,011.0 | 827.5 | 1,143.5 |
| Dc <i>corrientes</i> /km ² | 0.095 | 0.407 | 0.383 | 0.949 |
| Dd <i>km-corriente</i> /km ² | 0.153 | 0.429 | 0.510 | 1.457 |
| Orden | 5 | 5 | 5 | 4 |
| Ntc | 188 | 414 | 350 | 606 |
| Lcu km | 68.3 | 52.3 | 36.4 | 49.4 |
| Amax km | 48.0 | 26.4 | 42.6 | 26.7 |
| H m | 2,024.0 | 1,091.0 | 567.0 | 1,049.4 |
| Lt km | 302.2 | 436.1 | 465.6 | 930.5 |
| Ks | 1.741 | 1.677 | 1.616 | 1.729 |

Tabla 2. Caudales máximos anuales de las estaciones hidrométricas.

| Nombre | Río Quetzala | Río Marquelia | Río Nexpa | Río Ometepec |
|-----------|--------------|---------------|-----------|--------------|
| Año\Clave | 20016 | 20018 | 20019 | 20025 |
| 1960 | 657.7 | 250.3 | 519.3 | 543.0 |
| 1961 | 445.0 | 563.7 | 417.2 | 765.0 |
| 1962 | 875.0 | 306.3 | 615.7 | 825.0 |
| 1963 | 904.0 | 108.7 | 474.7 | 636.0 |
| 1964 | 703.3 | 265.4 | 639.0 | 887.0 |
| 1965 | 1080.2 | 620.0 | 552.0 | 691.0 |
| 1966 | 1079.2 | 544.0 | 402.5 | 728.0 |
| 1967 | 2218.2 | 1480.0 | 2306.0 | 439.1 |
| 1968 | 853.9 | 270.0 | 524.0 | 713.0 |
| 1969 | 1900.0 | 1020.0 | 1892.0 | 818.5 |
| 1970 | 1375.0 | 1109.6 | 811.4 | 986.5 |
| 1971 | 530.0 | 929.0 | 127.7 | 685.2 |
| 1972 | 1091.9 | 576.5 | 335.3 | 573.2 |
| 1973 | 1028.0 | 976.6 | 1159.0 | 604.2 |
| 1974 | 3675.0 | 3500.0 | 1796.6 | 1605.3 |
| 1975 | 887.4 | 3996.0 | 243.4 | 732.8 |
| 1976 | 1847.0 | 1133.3 | 777.4 | 657.5 |

| Nombre | Río Quetzala | Río Marquelia | Río Nexpa | Río Ometepec |
|------------------------------------|--------------|---------------|-----------|--------------|
| Año \ Clave | 20016 | 20018 | 20019 | 20025 |
| 1977 | 564.7 | 340.2 | 199.8 | 492.0 |
| 1978 | 1250.0 | 1760.0 | 528.5 | 639.0 |
| 1979 | 1138.8 | 2000.0 | 854.6 | 671.0 |
| 1980 | 1099.2 | 539.0 | 565.0 | 874.0 |
| 1981 | 1780.0 | 730.0 | 1142.8 | 1033.3 |
| 1982 | 734.0 | 401.3 | 326.9 | 449.0 |
| 1983 | 638.7 | 333.2 | 697.5 | 672.0 |
| 1984 | 1196.3 | 634.0 | 649.9 | 610.4 |
| 1985 | 695.6 | 442.6 | 276.8 | 521.9 |
| 1986 | 849.0 | 478.7 | 87.6 | 625.3 |
| 1987 | 986.8 | 240.5 | 62.1 | 625.3 |
| 1988 | 1818.0 | 1069.5 | 755.0 | 933.4 |
| 1989 | 3942.6 | 2437.1 | 408.3 | 1693.7 |
| 1990 | 1134.0 | 1341.4 | 109.0 | 633.7 |
| 1991 | 1587.4 | 1318.2 | 160.0 | 620.0 |
| Q _{med} m ³ /s | 1267.7 | 991.1 | 638.0 | 749.5 |
| Q _{max} m ³ /s | 3942.6 | 3996.0 | 2306.0 | 1693.7 |
| Q _{min} m ³ /s | 445.0 | 108.7 | 62.1 | 439.1 |
| N | 32 | 32 | 32 | 32 |

3.1.1 Distribuciones de probabilidad

Se aplicaron diferentes pruebas de calidad e independencia de eventos a los caudales máximos anuales de la estación hidrométrica, concluyendo que se trató de una serie independiente y homogénea. Posteriormente fueron ajustados a diferentes distribuciones de probabilidad, algunas de ellas fueron descartadas debido a que no extrapolaron series con valores congruentes, es decir, para datos existentes se ajustó el inicio de la serie con valores negativos (*no disponibles en Tabla 3*) o para periodos de retorno altos la serie ajustó con valores muy elevados para la zona de estudio (Tabla 3). Posteriormente se calculó el error estándar (EEA) de cada distribución para encontrar la que contó con un mejor ajuste.

Tabla 3. Funciones de distribución de probabilidad ajustadas para la estación 20018, Marquelia.

| Tr | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 | 5000 | 10000 | EE | Notas |
|-------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-----|----------------|
| Nor-2P-M | 992 | 1762 | 2165 | 2498 | 2873 | 3122 | 3351 | 3627 | 3821 | 4005 | 4233 | 4397 | 451 | Fuera de rango |
| Nor-2P-ML | 992 | 1667 | 2021 | 2313 | 2641 | 2860 | 3060 | 3303 | 3473 | 3634 | 3834 | 3978 | 453 | Fuera de rango |
| LogNor-2P-M | 707 | 1431 | 2071 | 2809 | 3958 | 4975 | 6132 | 7901 | 9438 | 11164 | 13761 | 15987 | 215 | Fuera de rango |
| LogNor-3P-M | 777 | 1559 | 2136 | 2729 | 3555 | 4217 | 4916 | 5902 | 6697 | 7538 | 8723 | 9678 | 261 | Fuera de rango |
| LogNor- | 978 | 1736 | 2141 | 2480 | 2866 | 3126 | 3366 | 3660 | 3867 | 4064 | 4311 | 4490 | 444 | Fuera de |

| Tr | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 | 5000 | 10000 | EE | Notas |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-----|----------------|
| 3P-MV | | | | | | | | | | | | | | rango |
| Gamma 2P-M | 737 | 1568 | 2181 | 2794 | 3610 | 4234 | 4864 | 5708 | 6354 | 7008 | 7883 | 8554 | 233 | |
| Gamma 2P-MV | 802 | 1517 | 2020 | 2511 | 3151 | 3634 | 4116 | 4755 | 5241 | 5729 | 6378 | 6873 | 315 | |
| Gamma 2P-ML | 753 | 1558 | 2146 | 2730 | 3505 | 4095 | 4690 | 5485 | 6093 | 6707 | 7527 | 8155 | 250 | |
| Gamma 3P-M | 723 | 1547 | 2170 | 2799 | 3645 | 4296 | 4957 | 5845 | 6529 | 7222 | 8153 | 8867 | 230 | |
| Gamma 3P-MV | 741 | 1519 | 2105 | 2696 | 3488 | 4098 | 4716 | 5546 | 6184 | 6831 | 7699 | 8365 | 257 | |
| Gumbel-2P-M | 841 | 1648 | 2182 | 2694 | 3357 | 3854 | 4349 | 5002 | 5496 | 5989 | 6642 | 7135 | 307 | Fuera de rango |
| Gumbel 2P-MV | 1026 | 1731 | 2198 | 2646 | 3226 | 3660 | 4093 | 4664 | 5095 | 5527 | 6097 | 6528 | 370 | |
| Gumbel 2P-ML | 854 | 1592 | 2081 | 2550 | 3157 | 3612 | 4065 | 4663 | 5115 | 5567 | 6164 | 6615 | 327 | Fuera de rango |
| Gumbel-Gumbel | 659 | 1563 | 2133 | 2648 | 3299 | 3781 | 4260 | 4890 | 5365 | 5841 | 6469 | 6944 | 282 | |
| GVE-3P-M | 799 | 1560 | 2113 | 2686 | 3491 | 4147 | 4847 | 5851 | 6674 | 7556 | 8822 | 9861 | 277 | Fuera de rango |
| GVE-3P-ML | 701 | 1364 | 1966 | 2706 | 3976 | 5228 | 6807 | 9550 | 12268 | 15706 | 21683 | 27611 | 246 | Fuera de rango |
| GVE-3P-MV | 998 | 1716 | 2100 | 2414 | 2752 | 2964 | 3145 | 3344 | 3470 | 3578 | 3698 | 3773 | 434 | Fuera de rango |

La distribución Gamma de 3 parámetros por el método de momentos, fue la función de distribución de probabilidad que mejor ajustó a los datos aforados de acuerdo con el EE calculado. El resultado se muestra en la Ilustración 6, en ella se presentan datos medidos (color naranja) y datos extrapolados (línea verde).

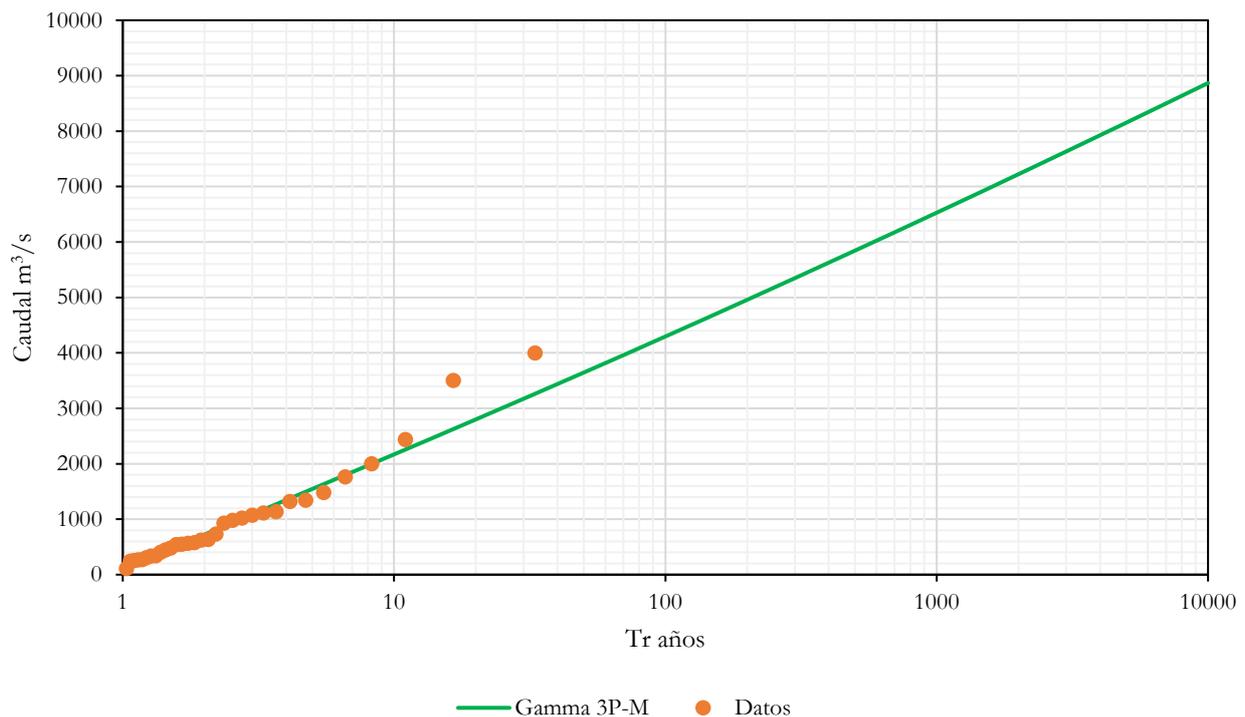


Ilustración 6. Distribución de mejor ajuste para la estación 20018 Marquelia.

3.1.2 Mayoración de avenidas

Debido al tamaño de la cuenca, fue difícil suponer un patrón constante de comportamiento de la lluvia, ya que esta puede moverse en diferentes direcciones y tomar lugar en diferente tiempo y espacio. Estos factores tuvieron como consecuencia diferentes formas de hidrogramas de escurrimiento (Ilustración 7). Algunos de ellos se muestran a continuación:

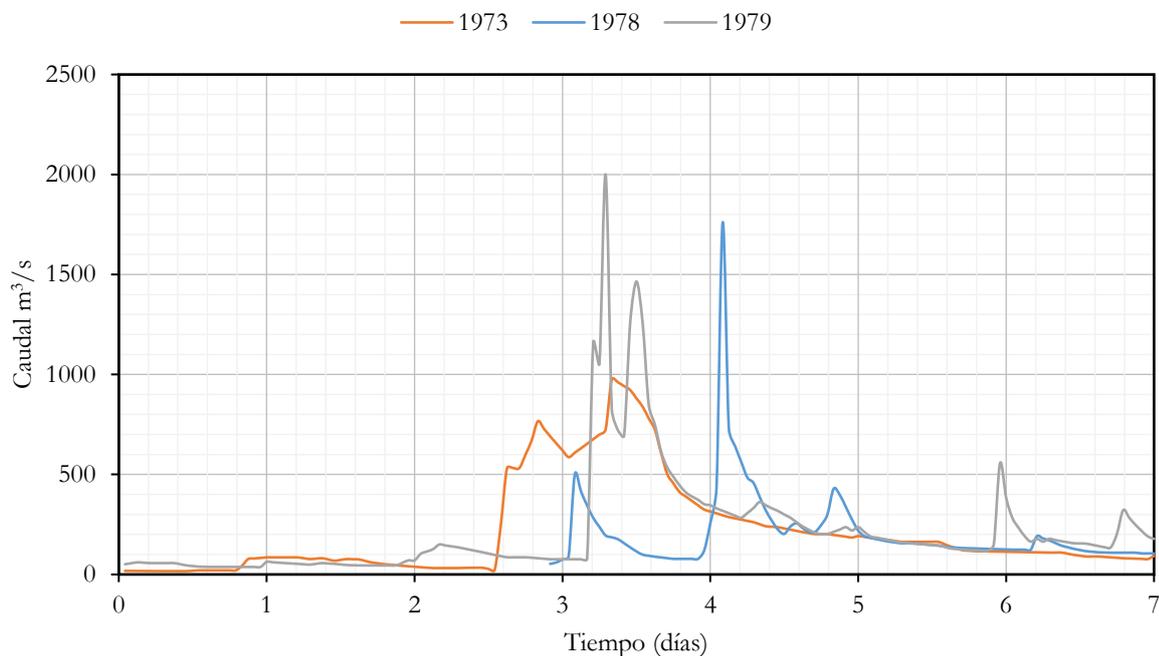


Ilustración 7. Hidrogramas registrados en la estación hidrométrica 20018 Marquelia.

La estación hidrométrica contiene información de caudal a cada hora, con esta información a partir uno de los eventos más caudalosos de la serie registrado en junio de 1989, se construyó un hidrograma unitario (Ilustración 8), posteriormente empleando la técnica de mayoración de avenidas (Escalante y Reyes 2002), se obtuvieron los hidrogramas para diferentes periodos de retorno (Ilustración 9) empleando los caudales punta obtenidos a través del análisis estadístico. Los caudales y volúmenes de escurrimiento directo producto de esta técnica son discutidos en el apartado 4.

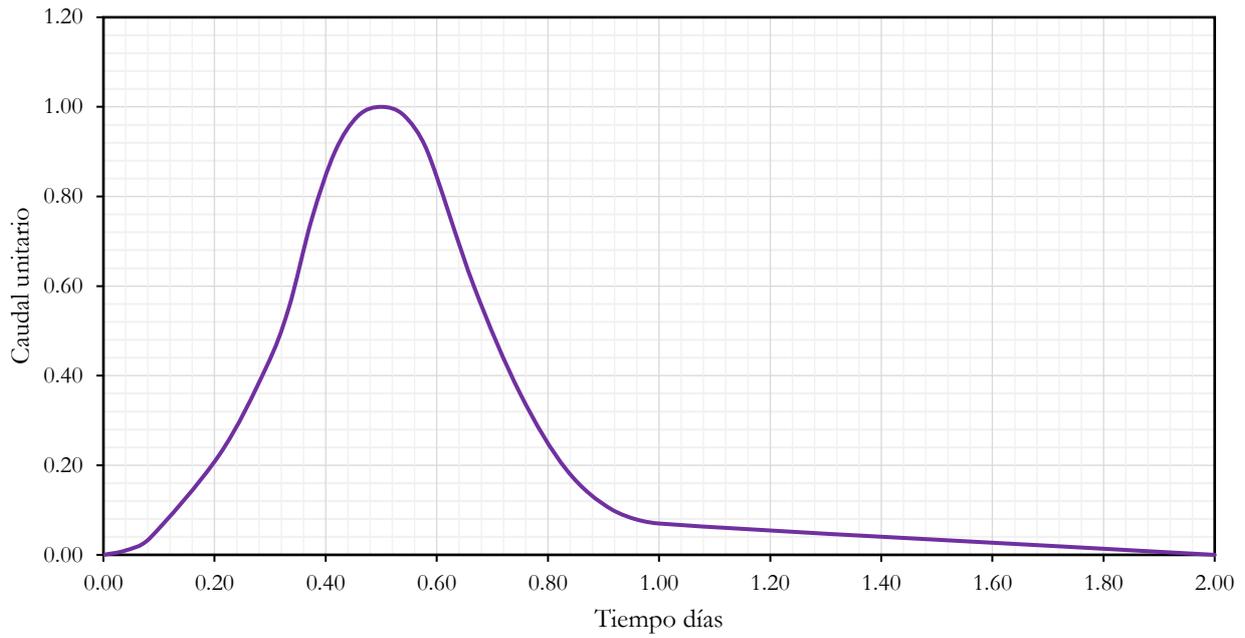


Ilustración 8. Hidrograma unitario para la estación 20018 Marquelia.

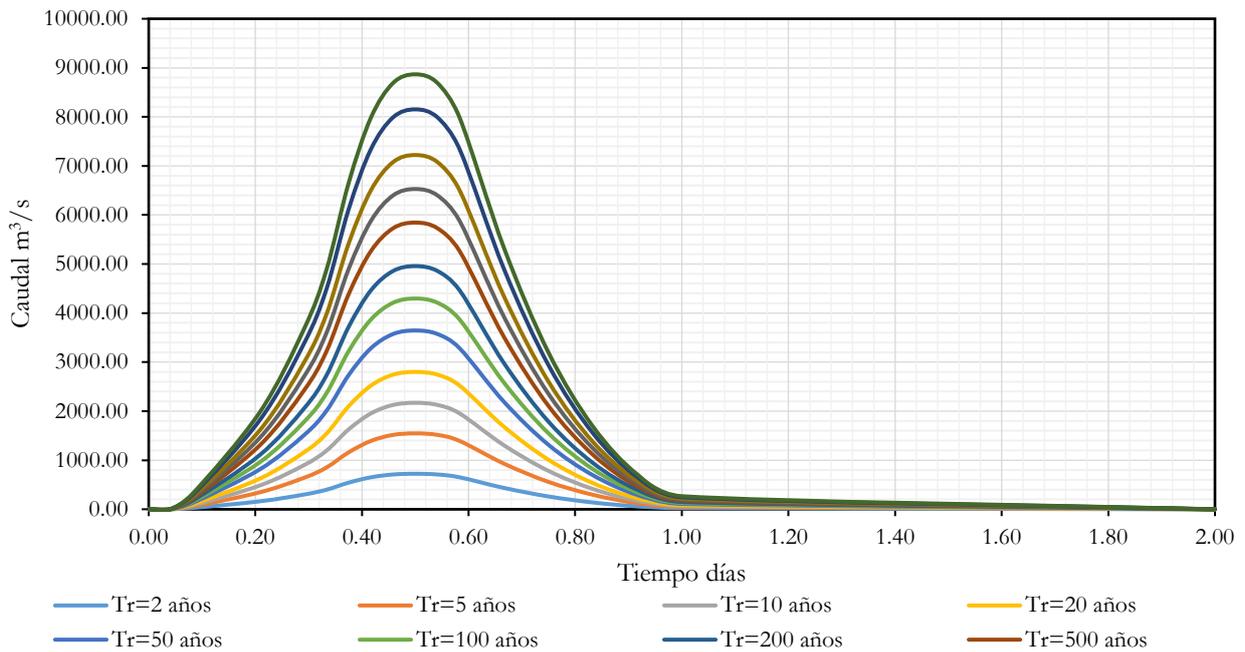


Ilustración 9. Hidrogramas obtenidos para la estación 20018 Marquelia.

3.2 Climatología

Se realizó una inspección de las estaciones climatológicas de la región, tanto de cantidad como de calidad de información que en ellas se encuentra, concluyendo que 8 estaciones influyen en la cuenca aportando lluvia de acuerdo con el método de polígonos de Thiessen. La distribución espacial de ellas se aprecia en la Ilustración 10, mientras que la clave, nombre y coordenadas UTM, se enuncian en la Tabla 4.

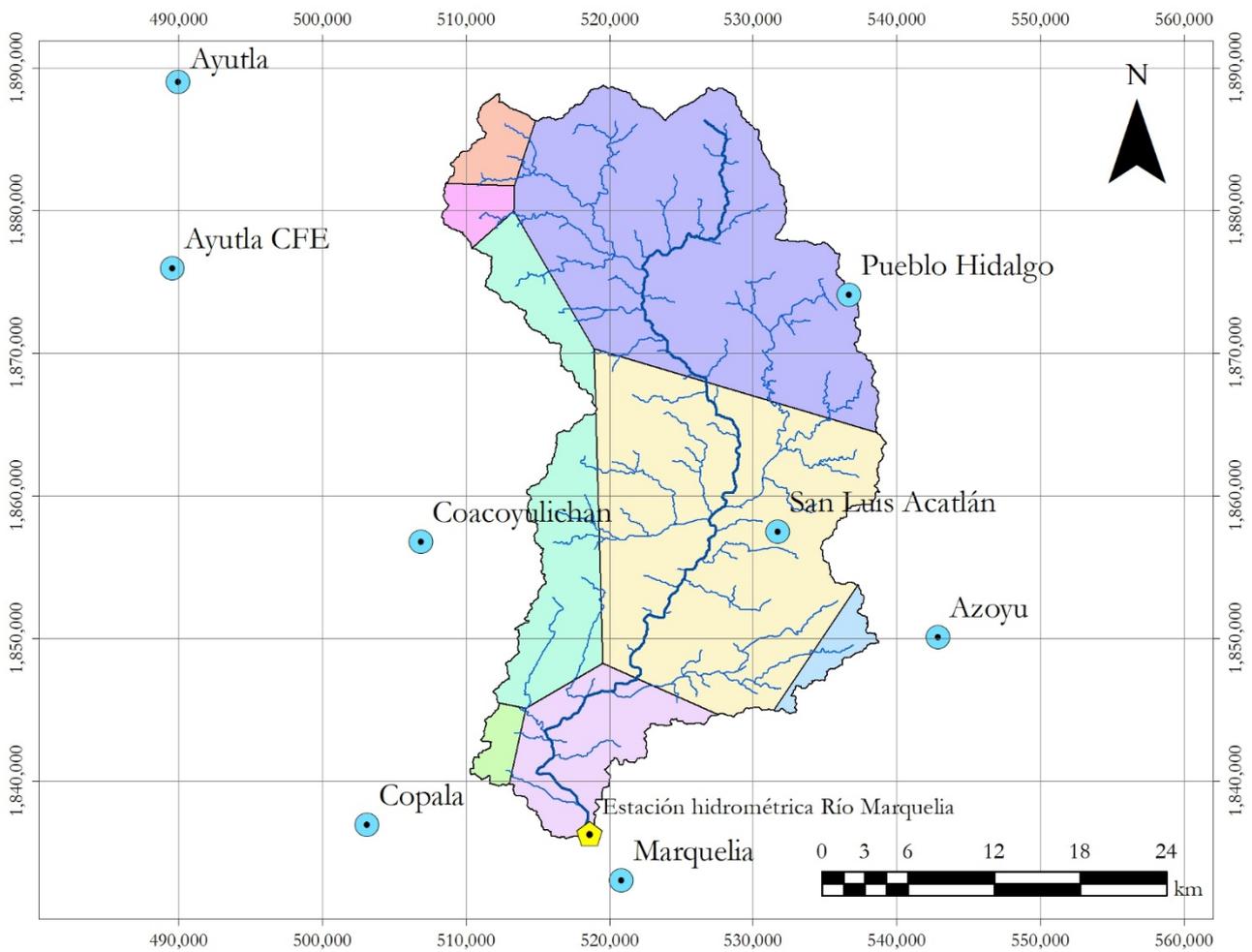


Ilustración 10. Ubicación de la estación hidrométrica, estaciones climatológicas y sus polígonos de Thiessen.

Tabla 4. Nombre, clave y coordenadas de las estaciones climatológicas

| Nombre | Clave | X | Y |
|------------------|-------|-----------|-------------|
| Ayutla | 12107 | 489,951.6 | 1,888,991.4 |
| Ayutla Cfe | 12012 | 489,556.8 | 1,875,944.9 |
| Azoyu | 12013 | 542,844.7 | 1,850,068. |
| Coacoyulichan | 12214 | 506,867.1 | 1,856,755.3 |
| Copala | 12022 | 503,110.9 | 1,836,934.7 |
| Marquelia | 12173 | 520,831.8 | 1,833,042.2 |
| Pueblo Hidalgo | 12205 | 536,673.7 | 1,874,055.9 |
| San Luis Acatlán | 12068 | 531,700.4 | 1,857,454. |

Los datos de lluvia faltantes fueron completados con el peso del valor inverso de su distancia, con respecto a las estaciones vecinas y se evaluó que en la serie no se alterasen fuertemente los estadísticos con respecto de la serie original. Finalmente, se contó con un registro que contempló la misma franja de datos, que abarca los años 1958 a 2015. En la Tabla 5 se muestra la precipitación máxima anual acumulada en 24 horas y al final de ella se puede observar el valor mínimo, promedio y máximo de ellos.

Tabla 5. Precipitación máxima anual en 24 horas en mm, registrada en las estaciones climatológicas.

| | Ayutla | Ayutla (CFE) | Azoyu | Coacoyulichan | Copala | Marquelia | Pueblo Hidalgo | San Luis Acatlán |
|------|--------|--------------|--------|---------------|--------|-----------|----------------|------------------|
| Año | 12012 | 12107 | 12013 | 12214 | 12205 | 12173 | 12022 | 12068 |
| 1958 | 90.50 | 103.00 | 97.49 | 94.69 | 96.68 | 96.89 | 95.15 | 96.57 |
| 1959 | 80.00 | 104.00 | 93.42 | 88.04 | 91.86 | 92.26 | 88.92 | 91.65 |
| 1960 | 109.00 | 140.00 | 126.34 | 119.39 | 124.32 | 124.84 | 120.52 | 124.05 |
| 1961 | 98.50 | 129.00 | 100.14 | 94.26 | 102.08 | 96.50 | 81.00 | 95.93 |
| 1962 | 85.50 | 88.00 | 87.21 | 86.68 | 87.00 | 87.13 | 87.00 | 87.07 |
| 1963 | 76.37 | 79.00 | 62.53 | 56.81 | 62.78 | 60.15 | 50.00 | 59.96 |
| 1964 | 88.50 | 90.00 | 90.92 | 90.57 | 90.47 | 91.07 | 92.00 | 91.02 |
| 1965 | 79.50 | 80.00 | 76.88 | 75.79 | 76.92 | 76.42 | 74.50 | 76.39 |
| 1966 | 80.50 | 89.00 | 74.45 | 72.99 | 76.52 | 72.51 | 63.50 | 72.43 |
| 1967 | 86.00 | 86.50 | 91.10 | 91.59 | 90.36 | 91.76 | 95.00 | 91.74 |
| 1968 | 53.00 | 105.40 | 91.81 | 80.70 | 86.69 | 90.64 | 90.00 | 89.25 |
| 1969 | 132.10 | 132.10 | 122.38 | 122.66 | 124.67 | 121.01 | 114.00 | 121.13 |
| 1970 | 123.50 | 84.50 | 101.69 | 110.43 | 104.23 | 103.57 | 109.00 | 104.56 |
| 1971 | 192.00 | 57.30 | 90.68 | 119.28 | 104.22 | 93.47 | 94.00 | 97.07 |
| 1972 | 91.00 | 86.50 | 100.38 | 100.98 | 97.83 | 102.27 | 111.50 | 102.24 |
| 1973 | 123.70 | 123.70 | 196.86 | 194.82 | 179.67 | 207.20 | 260.00 | 206.34 |
| 1974 | 272.50 | 173.80 | 262.30 | 281.47 | 257.17 | 273.39 | 320.00 | 275.28 |
| 1975 | 152.00 | 200.40 | 143.20 | 134.19 | 148.96 | 135.81 | 103.00 | 135.05 |

| | Ayutla | Ayutla (CFE) | Azoyu | Coacoyulichan | Copala | Marquelia | Pueblo Hidalgo | San Luis Acatlán |
|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|------------------|
| Año | 12012 | 12107 | 12013 | 12214 | 12205 | 12173 | 12022 | 12068 |
| 1976 | 225.00 | 200.40 | 100.19 | 212.19 | 101.94 | 62.00 | 208.00 | 109.00 |
| 1977 | 103.50 | 120.60 | 105.16 | 80.41 | 105.03 | 108.00 | 54.00 | 104.50 |
| 1978 | 136.50 | 160.80 | 133.78 | 170.92 | 130.75 | 200.00 | 195.00 | 118.50 |
| 1979 | 117.00 | 118.20 | 121.49 | 124.50 | 114.22 | 280.00 | 131.00 | 84.90 |
| 1980 | 124.50 | 126.00 | 101.71 | 134.39 | 101.93 | 97.00 | 143.00 | 102.80 |
| 1981 | 100.00 | 174.10 | 152.31 | 144.49 | 125.50 | 132.00 | 151.00 | 157.00 |
| 1982 | 62.30 | 115.00 | 90.18 | 105.00 | 96.20 | 94.00 | 171.50 | 89.30 |
| 1983 | 100.00 | 120.00 | 108.62 | 119.00 | 63.70 | 94.00 | 101.00 | 112.00 |
| 1984 | 84.00 | 84.00 | 62.98 | 115.00 | 106.70 | 75.00 | 123.00 | 60.20 |
| 1985 | 68.00 | 72.00 | 100.24 | 130.00 | 83.00 | 122.00 | 102.00 | 94.55 |
| 1986 | 85.00 | 69.00 | 52.00 | 99.00 | 88.40 | 67.00 | 82.50 | 57.80 |
| 1987 | 75.00 | 95.50 | 68.30 | 125.00 | 60.50 | 62.00 | 105.00 | 92.80 |
| 1988 | 90.00 | 89.50 | 70.00 | 200.00 | 180.70 | 136.50 | 140.00 | 126.40 |
| 1989 | 95.00 | 300.00 | 46.00 | 200.00 | 224.77 | 128.00 | 277.00 | 75.50 |
| 1990 | 85.00 | 100.00 | 63.00 | 85.00 | 116.85 | 60.00 | 184.00 | 50.00 |
| 1991 | 95.00 | 45.00 | 100.30 | 200.00 | 183.50 | 116.79 | 61.00 | 132.00 |
| 1992 | 115.00 | 210.00 | 123.00 | 150.00 | 132.50 | 121.49 | 132.00 | 120.10 |
| 1993 | 100.00 | 204.50 | 183.15 | 130.00 | 91.00 | 177.90 | 145.00 | 210.00 |
| 1994 | 175.50 | 102.50 | 97.90 | 90.00 | 167.50 | 48.00 | 100.00 | 108.70 |
| 1995 | 181.60 | 165.60 | 55.00 | 130.00 | 104.00 | 82.00 | 193.00 | 95.00 |
| 1996 | 96.40 | 100.00 | 85.50 | 270.00 | 110.50 | 147.00 | 188.00 | 120.00 |
| 1997 | 101.90 | 101.50 | 190.50 | 200.00 | 211.50 | 127.50 | 226.00 | 280.50 |
| 1998 | 88.40 | 157.00 | 98.00 | 200.00 | 138.00 | 90.30 | 171.00 | 280.00 |
| 1999 | 103.70 | 144.00 | 95.00 | 120.00 | 118.50 | 100.30 | 102.00 | 126.50 |
| 2000 | 114.40 | 242.00 | 95.00 | 160.00 | 120.50 | 163.00 | 129.50 | 126.00 |
| 2001 | 117.12 | 87.00 | 70.50 | 210.00 | 200.83 | 200.00 | 181.50 | 80.80 |
| 2002 | 137.75 | 136.30 | 110.00 | 140.00 | 168.00 | 130.00 | 146.50 | 120.80 |
| 2003 | 131.75 | 133.10 | 195.50 | 105.00 | 96.00 | 336.80 | 186.50 | 136.00 |
| 2004 | 119.37 | 130.20 | 95.00 | 80.00 | 188.00 | 56.00 | 111.50 | 120.00 |
| 2005 | 157.27 | 155.50 | 85.00 | 160.00 | 126.50 | 75.00 | 168.00 | 160.80 |
| 2006 | 113.54 | 104.60 | 86.09 | 120.00 | 88.50 | 109.00 | 186.50 | 80.80 |
| 2007 | 137.37 | 136.00 | 83.22 | 143.27 | 164.50 | 95.00 | 136.00 | 80.50 |
| 2008 | 124.05 | 122.70 | 180.00 | 110.00 | 165.00 | 96.00 | 173.50 | 90.00 |
| 2009 | 113.43 | 123.00 | 120.50 | 70.00 | 178.50 | 97.00 | 128.50 | 110.00 |
| 2010 | 166.68 | 141.50 | 195.00 | 245.31 | 325.00 | 97.00 | 218.00 | 60.30 |
| 2011 | 115.79 | 101.50 | 120.00 | 159.77 | 198.50 | 76.00 | 146.50 | 80.00 |
| 2012 | 129.17 | 121.50 | 85.50 | 153.85 | 185.50 | 89.00 | 143.00 | 86.20 |
| 2013 | 290.47 | 298.50 | 185.00 | 260.33 | 182.50 | 136.00 | 287.00 | 80.00 |
| 2014 | 184.88 | 153.00 | 95.00 | 271.25 | 235.50 | 97.00 | 283.50 | 95.40 |
| 2015 | 133.35 | 135.00 | 45.50 | 129.56 | 138.50 | 117.00 | 126.50 | 59.81 |
| <i>Pmed mm</i> | <i>119.12</i> | <i>128.43</i> | <i>107.95</i> | <i>139.11</i> | <i>133.13</i> | <i>115.78</i> | <i>142.89</i> | <i>111.95</i> |
| <i>Pmax mm</i> | <i>290.47</i> | <i>300.00</i> | <i>262.30</i> | <i>281.47</i> | <i>325.00</i> | <i>336.80</i> | <i>320.00</i> | <i>280.50</i> |
| <i>Pmin mm</i> | <i>53.00</i> | <i>45.00</i> | <i>45.50</i> | <i>56.81</i> | <i>60.50</i> | <i>48.00</i> | <i>50.00</i> | <i>50.00</i> |
| <i>n</i> | <i>58</i> | <i>58</i> |

A partir de la precipitación máxima anual para 24 h (Tabla 5), se muestra el comportamiento de la lluvia de la región en la Ilustración 11, adicionalmente se muestra la media de las precipitaciones máximas anuales de cada estación climatológica.

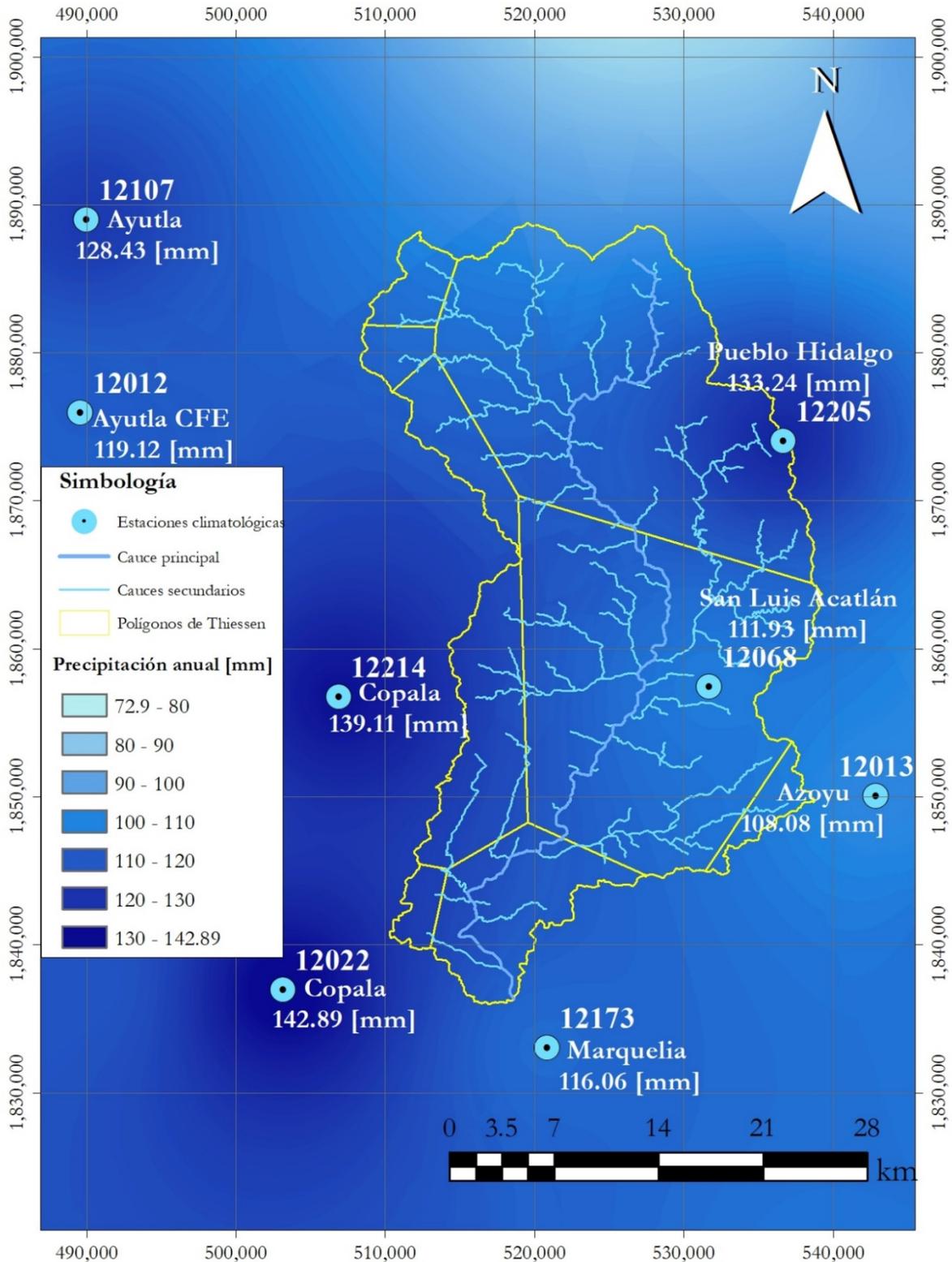


Ilustración 11. Distribución espacial de la lluvia.

3.2.1 Distribuciones de probabilidad

Con los valores máximos anuales de lluvia de cada estación, se formó una serie hidrológica, cada una se corrigió con un factor para considerar el intervalo fijo de observación (Weiss 1964) y con un factor de reducción por área (Campos-Aranda 1998); se aplicaron algunas pruebas de calidad para verificar su homogeneidad y consistencia. En seguida se ajustaron distintas funciones de distribución de probabilidad y mediante el error estándar de ajuste se seleccionó aquella con el menor valor. Con ésta se hizo la extrapolación de las variables correspondientes a distintos periodos de retorno (Escalante y Reyes 2002); en este trabajo se presentan los valores correspondientes a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1 000, 2 000, 5 000 y 10 000 años (Tabla 6).

Tabla 6. Funciones de distribución de probabilidad para lluvia de 24 h en mm.

| | Ayutla | Ayutla (CFE) | Azoyu | Coacoyulichan | Copala | Marquelia | Pueblo Hidalgo | San Luis Acatlán |
|--------|-----------|--------------|-----------|---------------|-------------|---------------|----------------|------------------|
| Clave | 12012 | 12107 | 12013 | 12214 | 12022 | 12173 | 12205 | 12068 |
| t\fdp | GVE-3P-ML | GVE-3P-ML | GVE-3P-ML | Gumbel-Gumbel | LogNor-2P-M | Gumbel-Gumbel | GVE-3P-ML | Gamma 3P-M |
| 2 | 108.08 | 117.65 | 98.46 | 123.38 | 131.14 | 100.66 | 122.07 | 97.43 |
| 5 | 143.84 | 159.79 | 134.78 | 189.95 | 186.96 | 138.78 | 168.17 | 141.50 |
| 10 | 173.07 | 192.10 | 162.79 | 223.75 | 225.09 | 185.35 | 202.56 | 175.97 |
| 20 | 206.15 | 226.88 | 193.09 | 246.50 | 262.36 | 248.09 | 238.79 | 211.38 |
| 50 | 257.75 | 278.13 | 237.97 | 272.94 | 311.73 | 304.22 | 290.89 | 259.56 |
| 100 | 304.17 | 321.74 | 276.37 | 291.99 | 349.69 | 340.95 | 334.18 | 297.00 |
| 200 | 358.28 | 370.22 | 319.23 | 310.70 | 388.46 | 376.01 | 381.32 | 335.24 |
| 500 | 443.94 | 442.81 | 383.76 | 335.24 | 441.24 | 421.28 | 450.25 | 386.99 |
| 1,000 | 521.50 | 505.02 | 439.35 | 353.73 | 482.48 | 455.17 | 507.96 | 427.01 |
| 2,000 | 612.13 | 574.36 | 501.58 | 372.21 | 524.95 | 488.92 | 570.96 | 467.73 |
| 5,000 | 755.82 | 678.35 | 595.40 | 396.64 | 583.14 | 533.44 | 663.25 | 522.62 |
| 10,000 | 885.99 | 767.54 | 676.29 | 415.13 | 628.79 | 567.08 | 740.56 | 564.92 |
| EEA | 8.33 | 8.84 | 9.82 | 7.11 | 7.45 | 7.89 | 7.45 | 14.11 |

3.2.2 Curvas *i-d-t*

Se calcularon las curvas intensidad-duración-periodo de retorno (Chen 1983) para cada una de las estaciones involucradas (Ilustración 13 a 20) y para toda la cuenca (Ilustración 21) con el método de Chen, el cual consiste en:

Intensidad de precipitación:

$$i_d^T = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} T^{F-1})}{(d+b)^c} \quad [4]$$

Donde:

P es la precipitación en mm para duración de una hora y periodo de retorno T de 10 años:

$$P_1^{10} \quad [5]$$

F es el cociente F de Precipitación-Frecuencia:

$$F = \frac{P_d^{100}}{P_d^{10}} \quad [6]$$

a,b,c,d, son parámetros de ajuste definidos como:

$$a = -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4 \quad [7]$$

$$b = -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4 \quad [8]$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288R^4 \quad [9]$$

R es el factor de convectividad:

$$R = \frac{P_1^T}{P_{24}^T} \quad [10]$$

Los factores R (Ilustración 12) de convectividad actualizados en 2018 (Labrada, 2018), los cocientes de Precipitación-Frecuencia, el área y porcentaje de participación calculados para cada estación, se muestran en la Tabla 7.

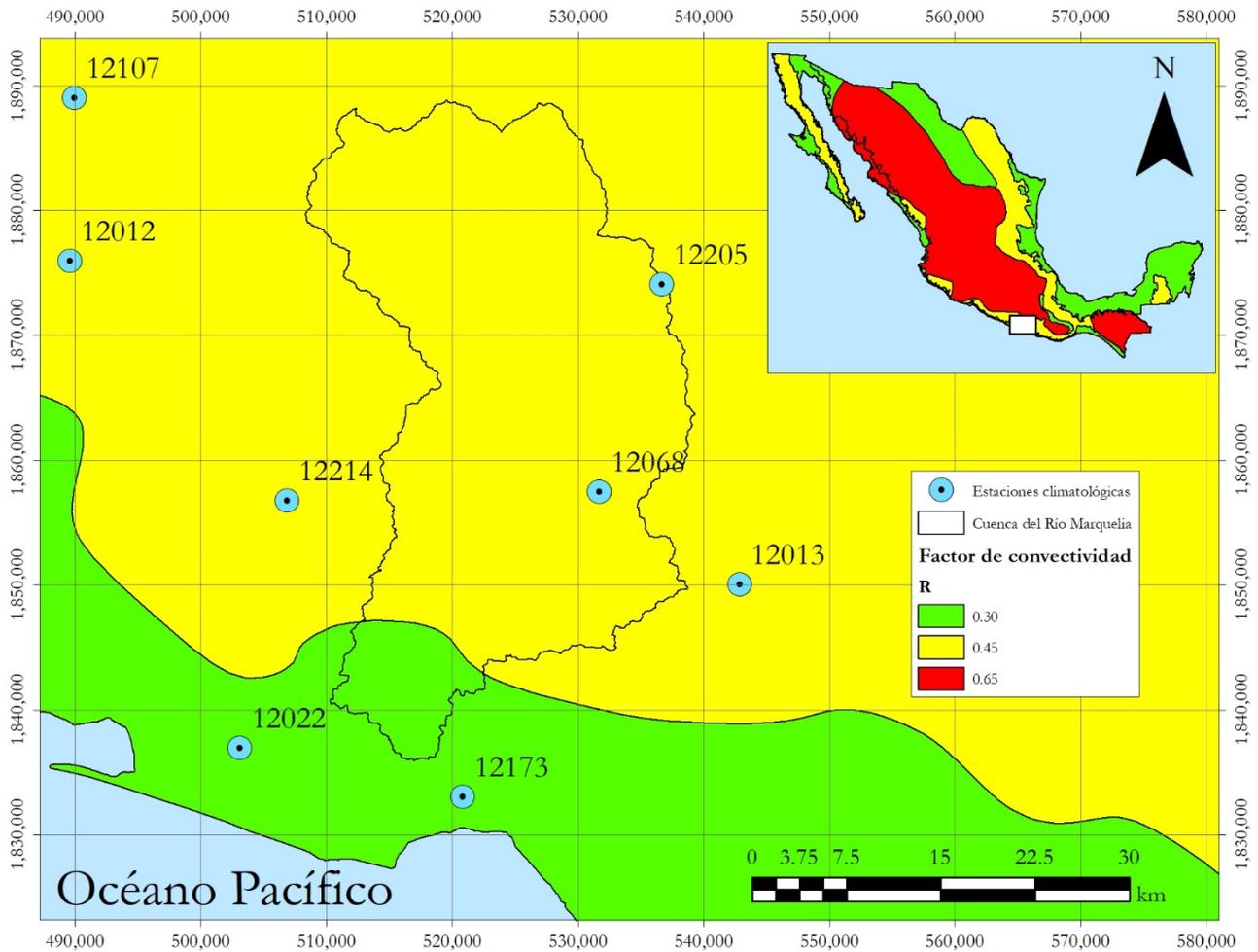


Ilustración 12. Factor de convectividad (Labrada 2018).

Tabla 7. Cociente de precipitación-frecuencia y factor de convectividad de las estaciones climatológicas

| Nombre | Clave | A km ² | A % | F | R |
|------------------|-------|-------------------|-------|------|------|
| Ayutla | 12012 | 15.62 | 1.5% | 2.02 | 0.3 |
| Ayutla CFE | 12107 | 22.35 | 2.2% | 1.67 | 0.3 |
| Azoyu | 12013 | 16.82 | 1.7% | 1.82 | 0.3 |
| Coacoyulichan | 12214 | 125.00 | 12.3% | 1.30 | 0.3 |
| Copala | 12022 | 13.10 | 1.3% | 1.56 | 0.45 |
| Marquelia | 12173 | 83.89 | 8.3% | 1.84 | 0.45 |
| Pueblo Hidalgo | 12205 | 372.61 | 36.7% | 1.66 | 0.3 |
| San Luis Acatlán | 12068 | 367.07 | 36.1% | 1.94 | 0.3 |

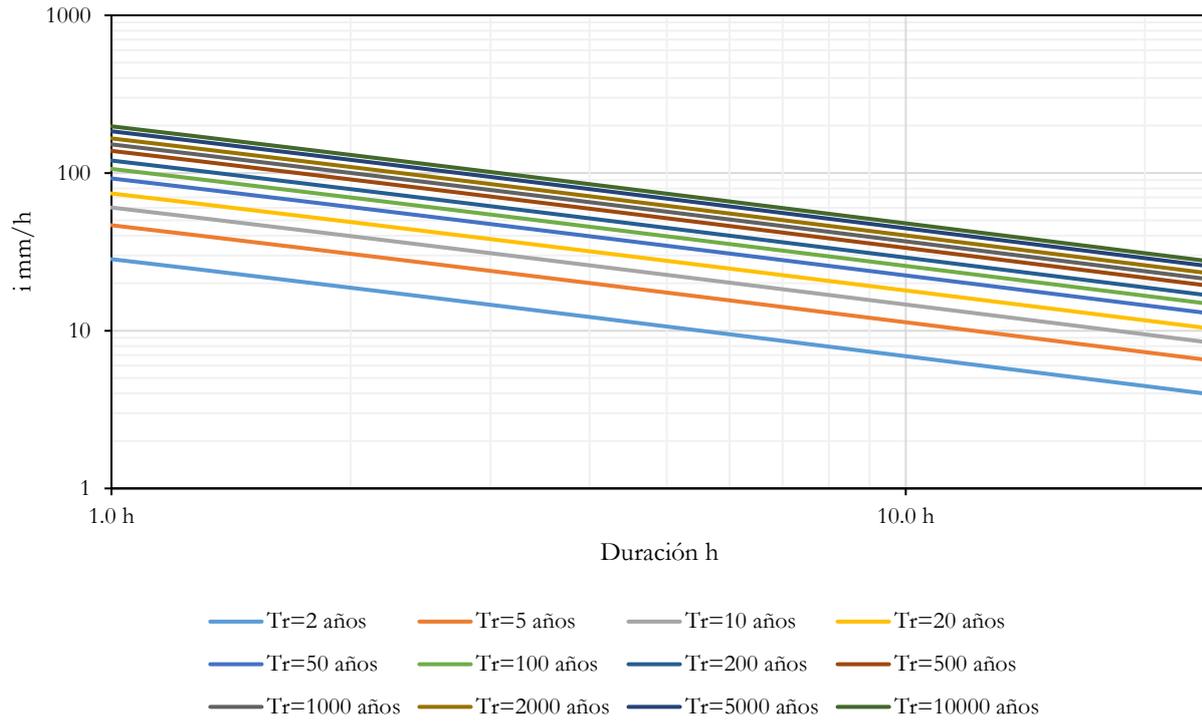


Ilustración 13. Curvas i-d-t para la estación 12012 Ayutla.

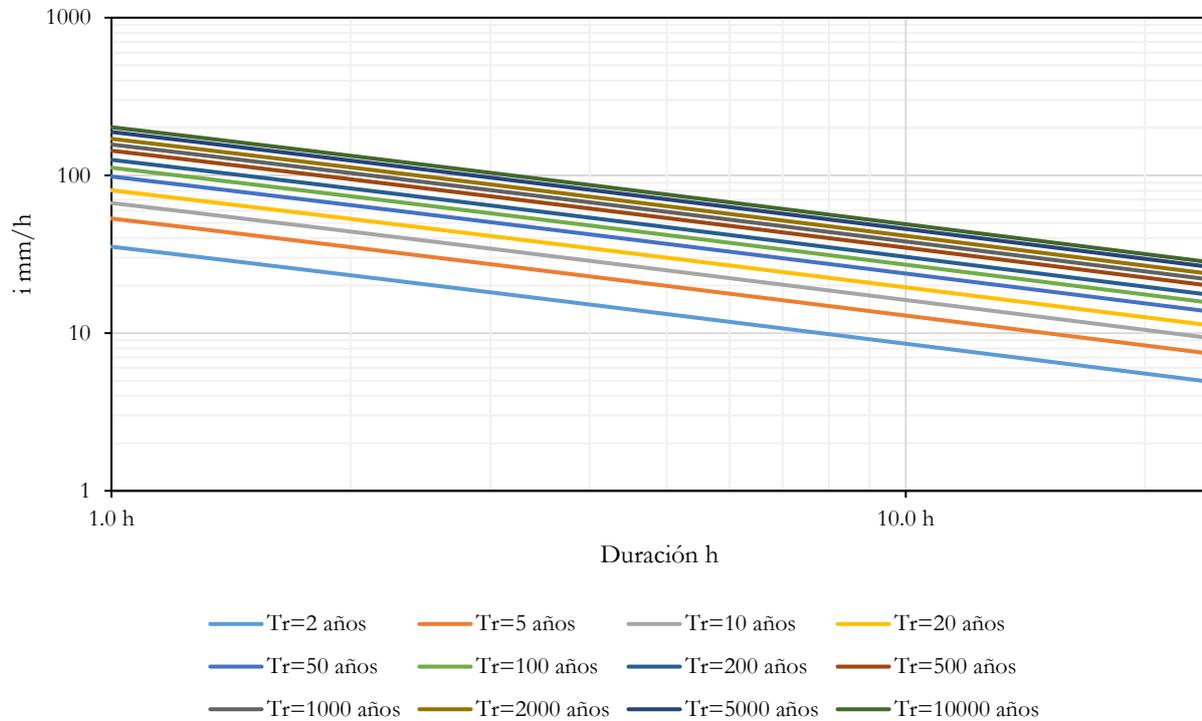


Ilustración 14. Curvas i-d-t para la estación 12107 Ayutla CFE.

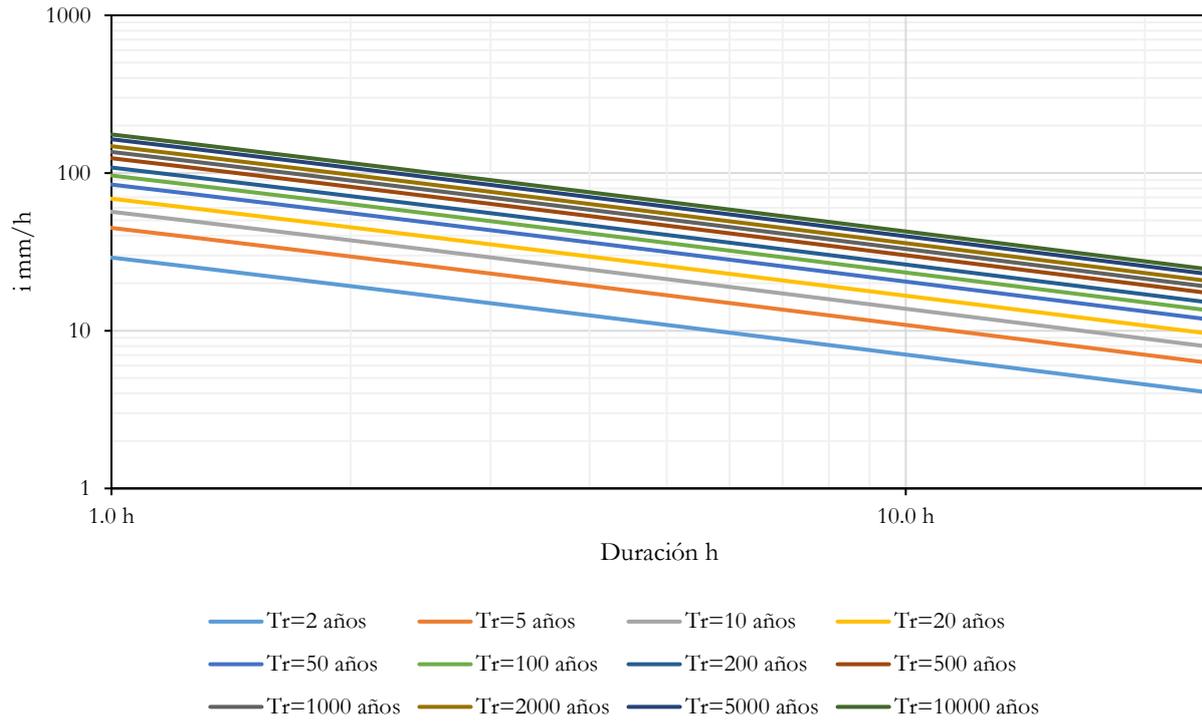


Ilustración 15. Curvas i-d-t para la estación 12013 Azoyu.

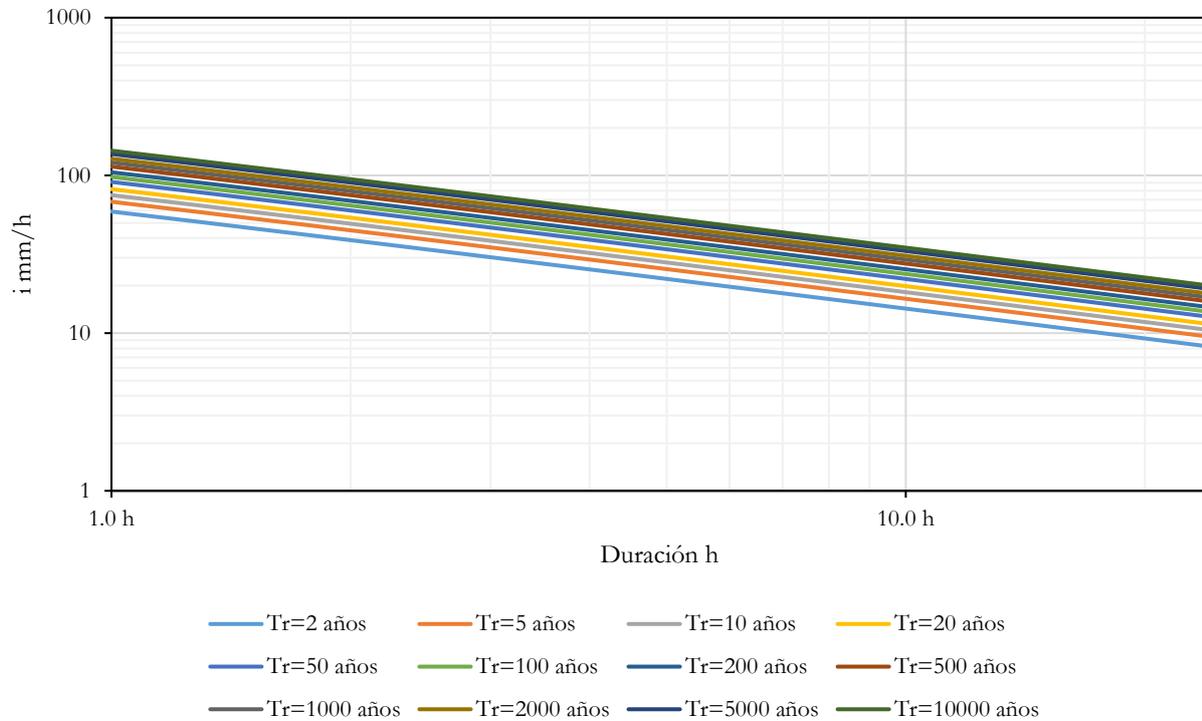


Ilustración 16. Curvas i-d-t para la estación 12214 Coacoyulichan.

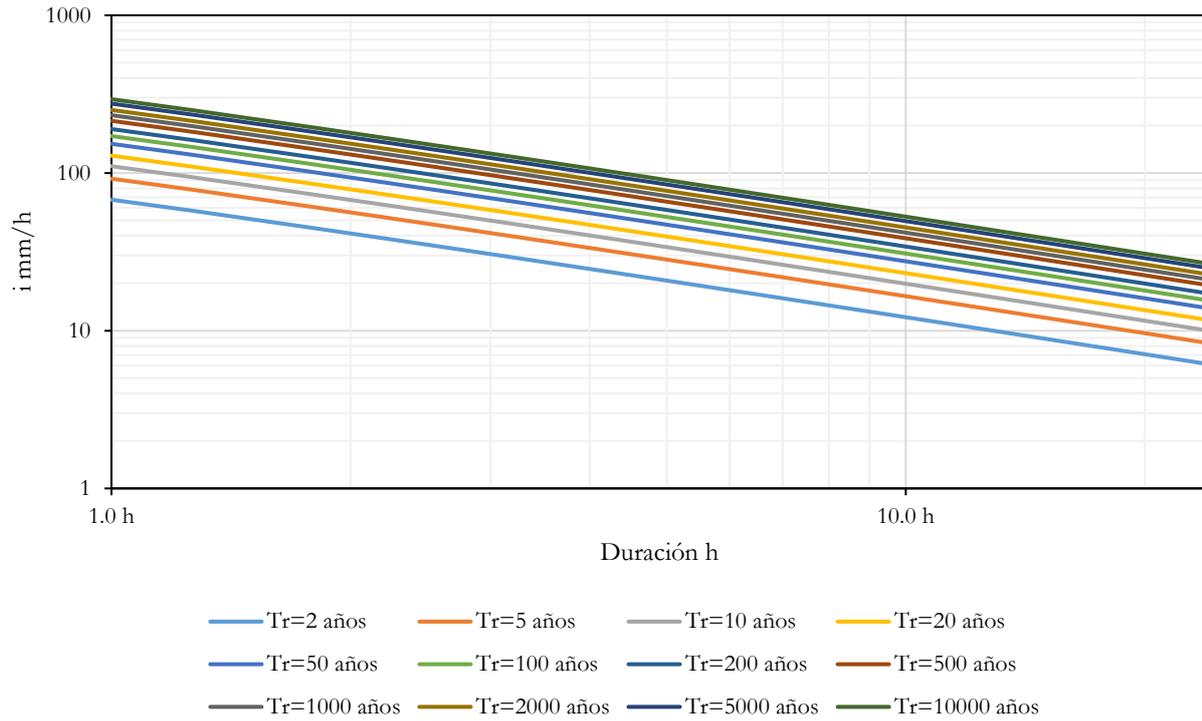


Ilustración 17. Curvas i-d-t para la estación 12022 Copala.

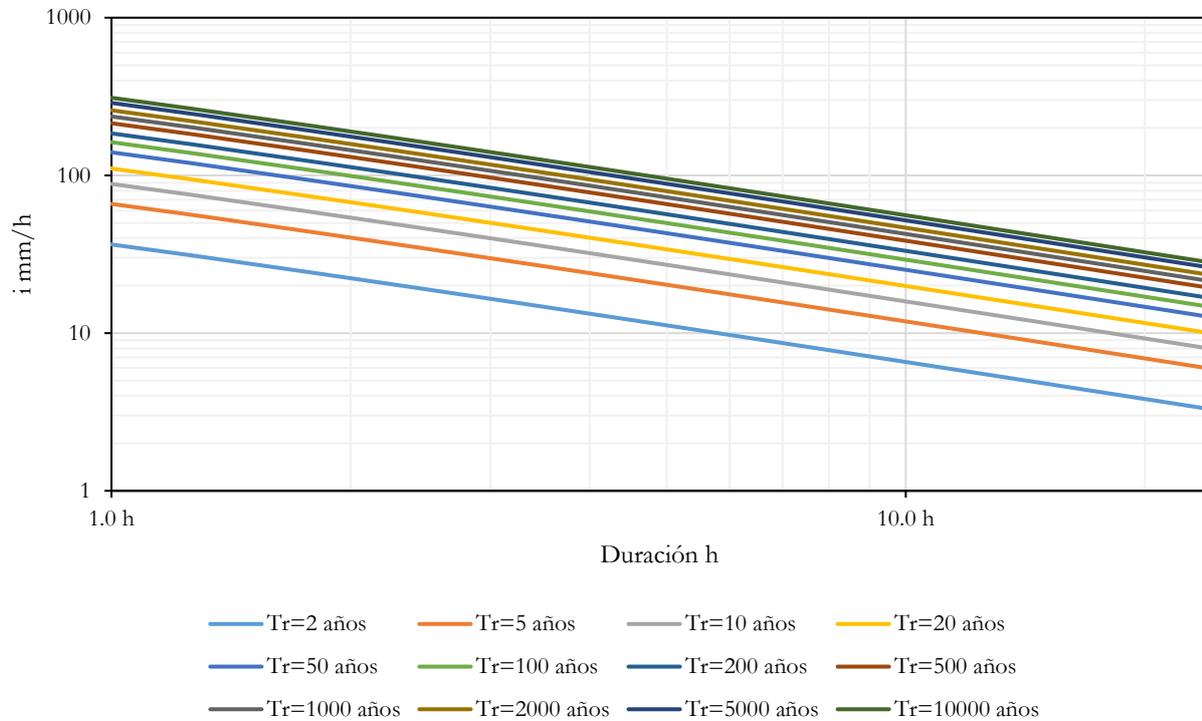


Ilustración 18. Curvas i-d-t para la estación 12173 Marquelia.

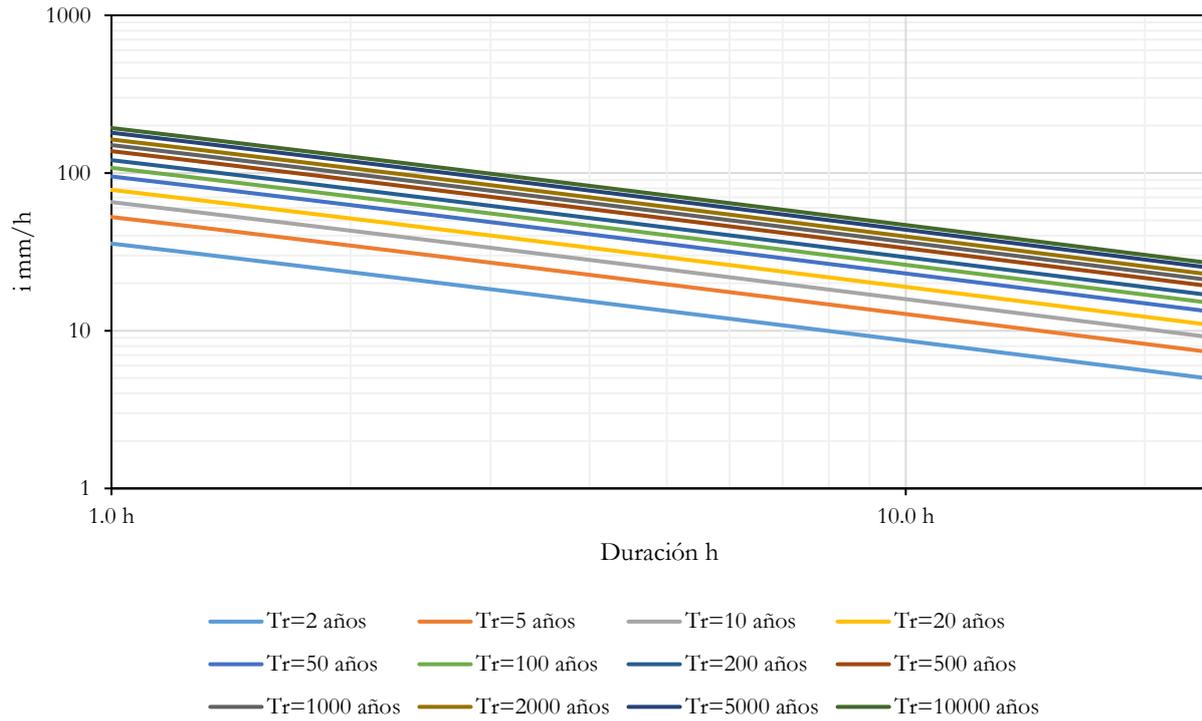


Ilustración 19. Curvas i-d-t para la estación 12205 Pueblo Hidalgo.

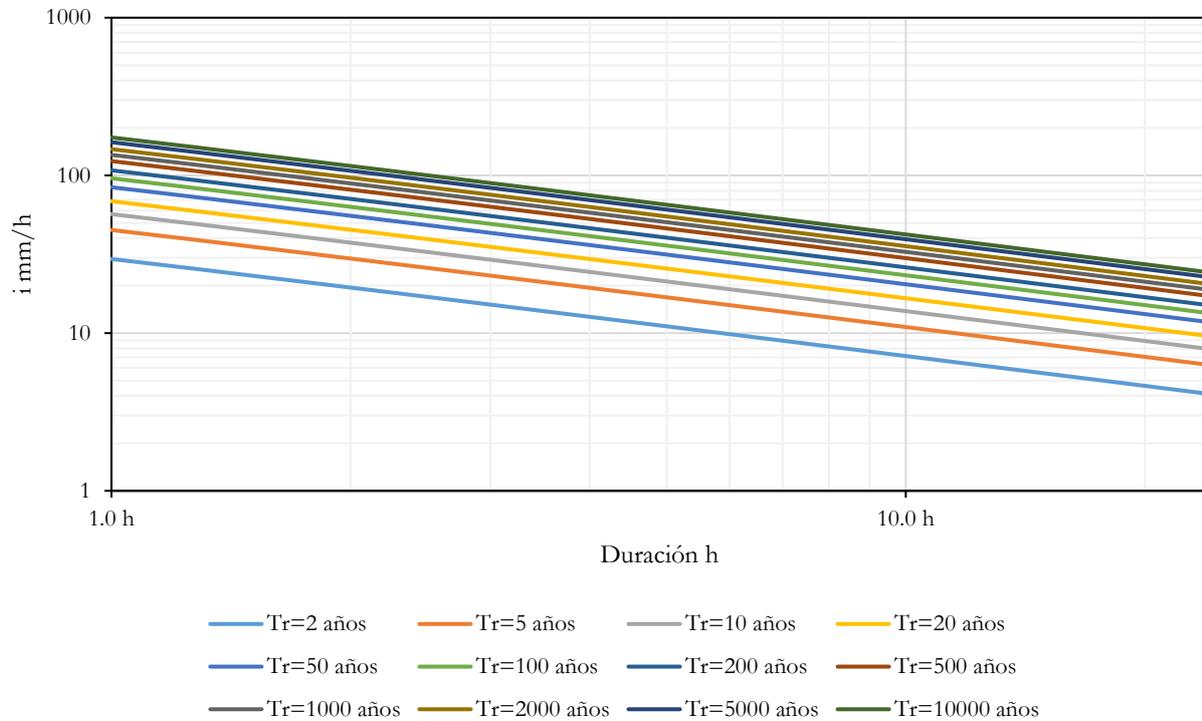


Ilustración 20. Curvas i-d-t para la estación 12068 San Luis Acatlán.

Las curvas i-d-t para la cuenca fueron obtenidas con el peso del área del polígono de Thiessen de cada estación climatológica, el resultado se muestra a continuación:

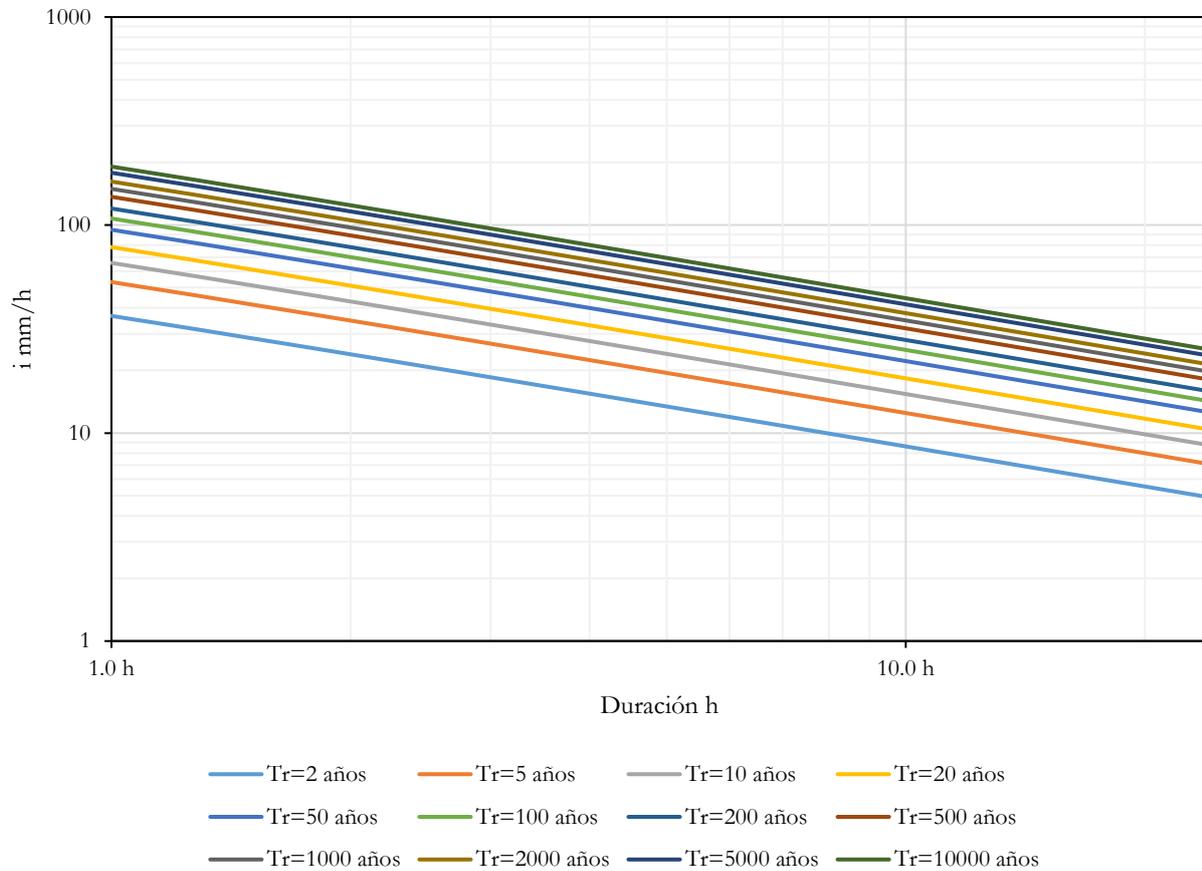


Ilustración 21. Curvas i-d-t para la cuenca del río Marquelia.

3.2.3 Hietogramas de diseño

La obtención de hidrograma de escurrimiento directo, se realizó a través del cálculo de hietogramas de precipitación efectiva, y para ello fue necesario realizar el cálculo del número de escurrimiento de la cuenca.

Se determinaron los hietogramas de diseño con una duración de tormenta $dt \approx 12.5$ h en función del tiempo de concentración (Nanía y Gomez Valentín, 2006), un incremento de tiempo $\Delta t = 0.5$ h y distribución temporal de la lluvia a través del método del bloque alterno.

La infiltración y precipitación efectiva fueron calculados con el método del número de curva del Soil Conservation Service (SCS) (Hernández, 2014) en cada sitio de la región (Ilustración 22), relacionando la precipitación efectiva con la precipitación total en función del uso-tipo de suelo y la pendiente del terreno (Chow et al. 1994), el método consiste en:

Precipitación efectiva:

$$P_e = 0 \quad \text{si} \quad P - \frac{5080}{CN} + 50.8 \leq 0 \quad 11$$

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{5080}{CN} + 50.8\right)^2}{P + \frac{20320}{CN} - 203.2} \quad \text{si} \quad P - \frac{5080}{CN} + 50.8 > 0 \quad 12$$

donde:

P es la precipitación total en mm

P_e es la precipitación efectiva en mm

CN es el Número de Curva

Resultando un valor medio de CN igual a 76.69

El cálculo de hietogramas de precipitación total y efectiva, fue realizado para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1 000, 2 000, 5 000 y 10 000 años. En la Ilustración 23 se muestran los resultados para la cuenca y en las Ilustraciones 24 a 31, los resultados para cada estación climatológica, mostrando a manera de ejemplo solo los valores correspondientes a un periodo T= 50 años.

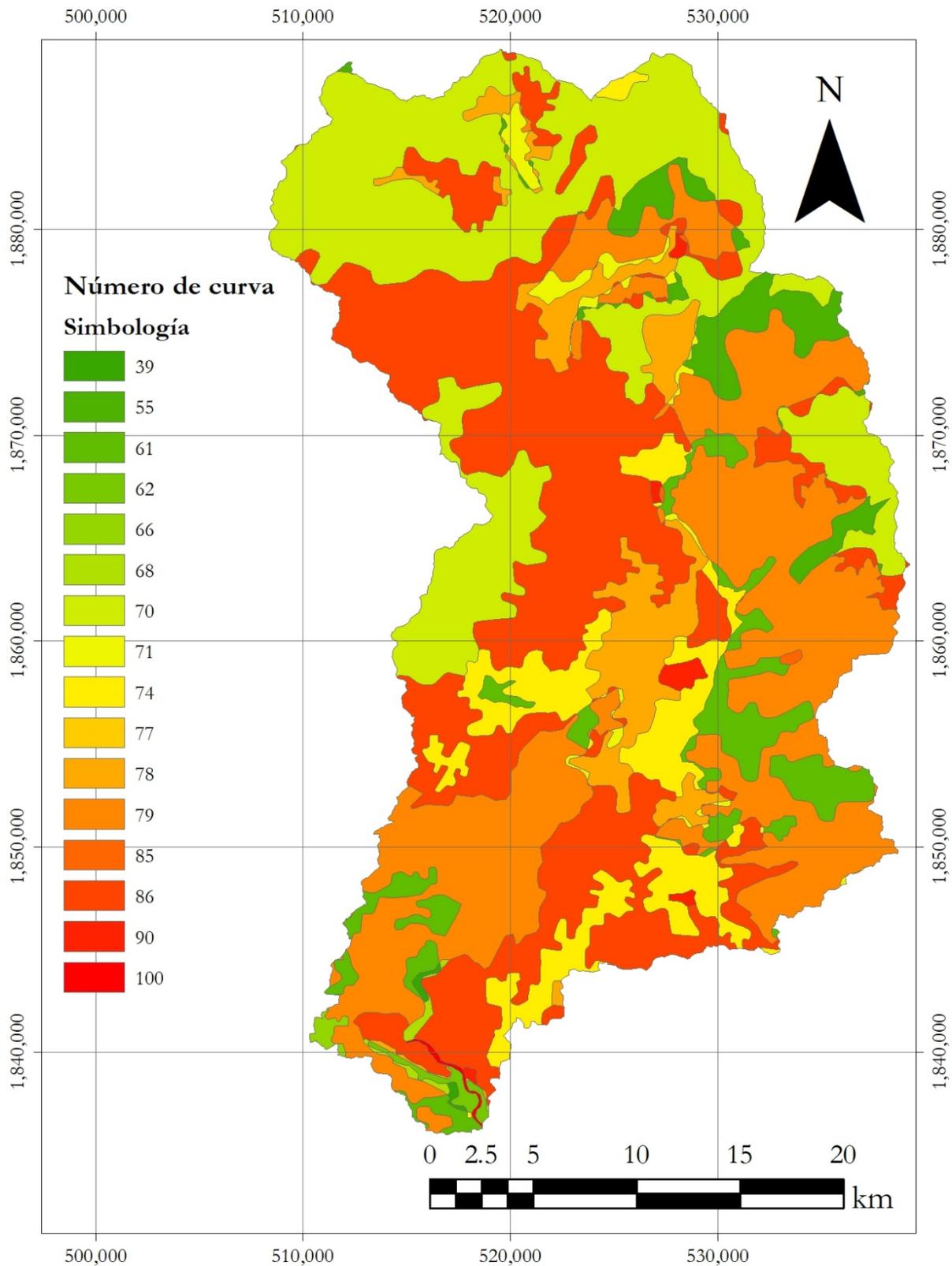


Ilustración 22. Número de curva.

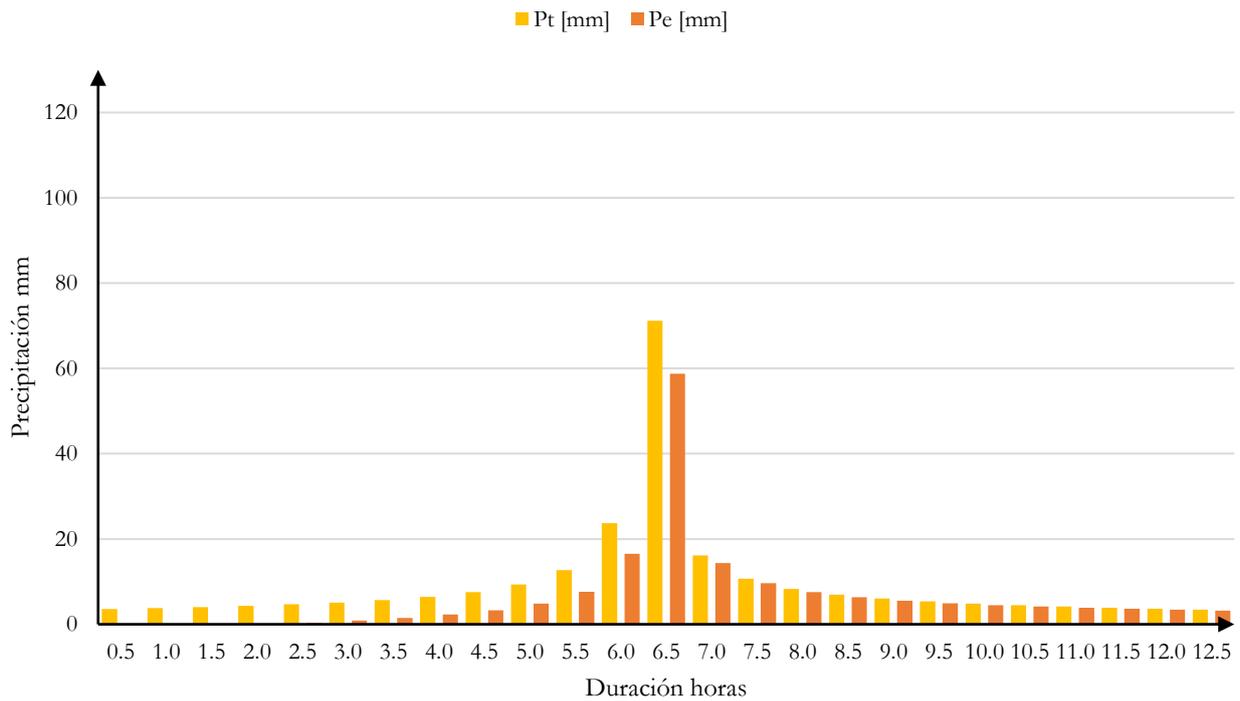


Ilustración 23. Hietograma de diseño de la cuenca Marquelia, para $Tr=50$ años.

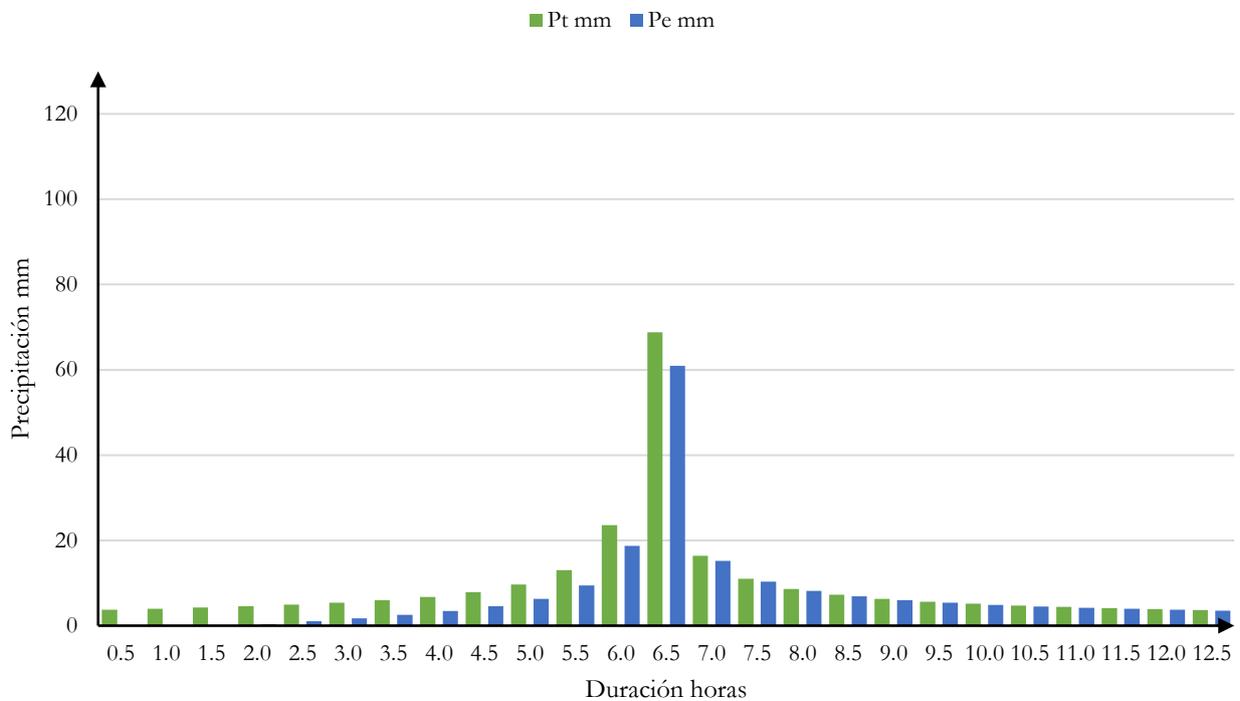


Ilustración 24. Hietograma de diseño de la estación Ayutla, para $Tr=50$ años.

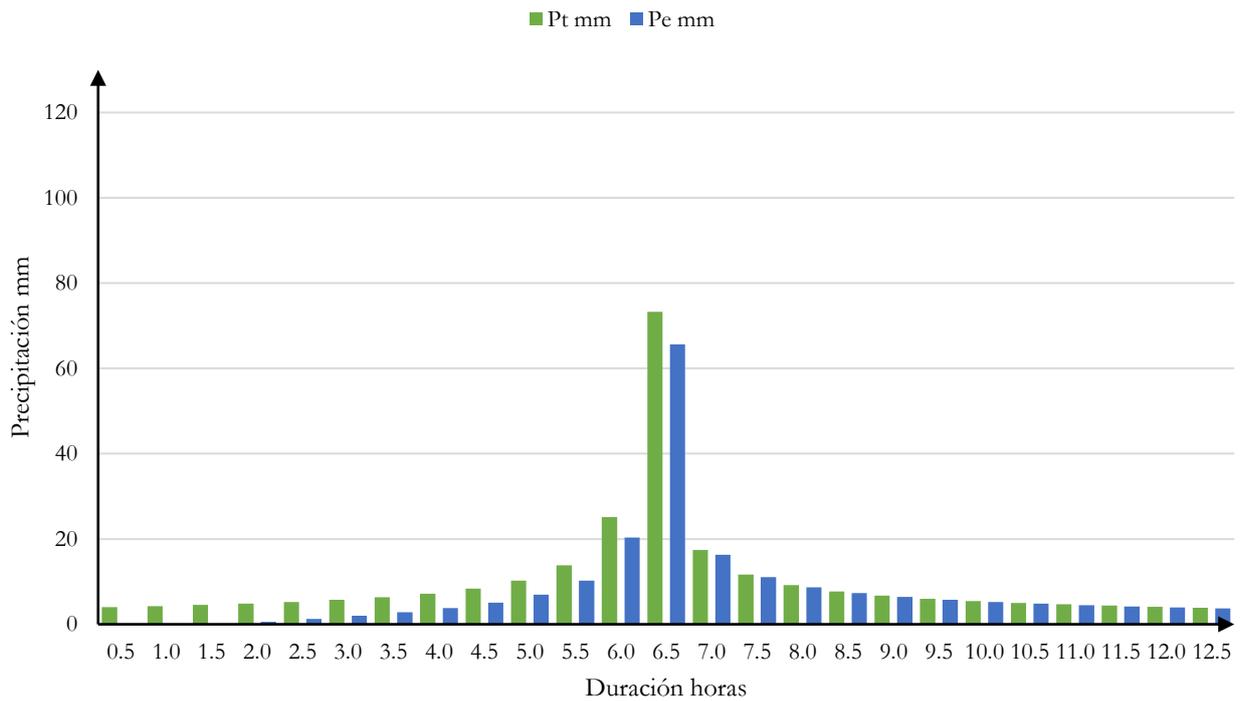


Ilustración 25. Hietograma de diseño de la estación Ayutla CFE, para $T_r=50$ años.

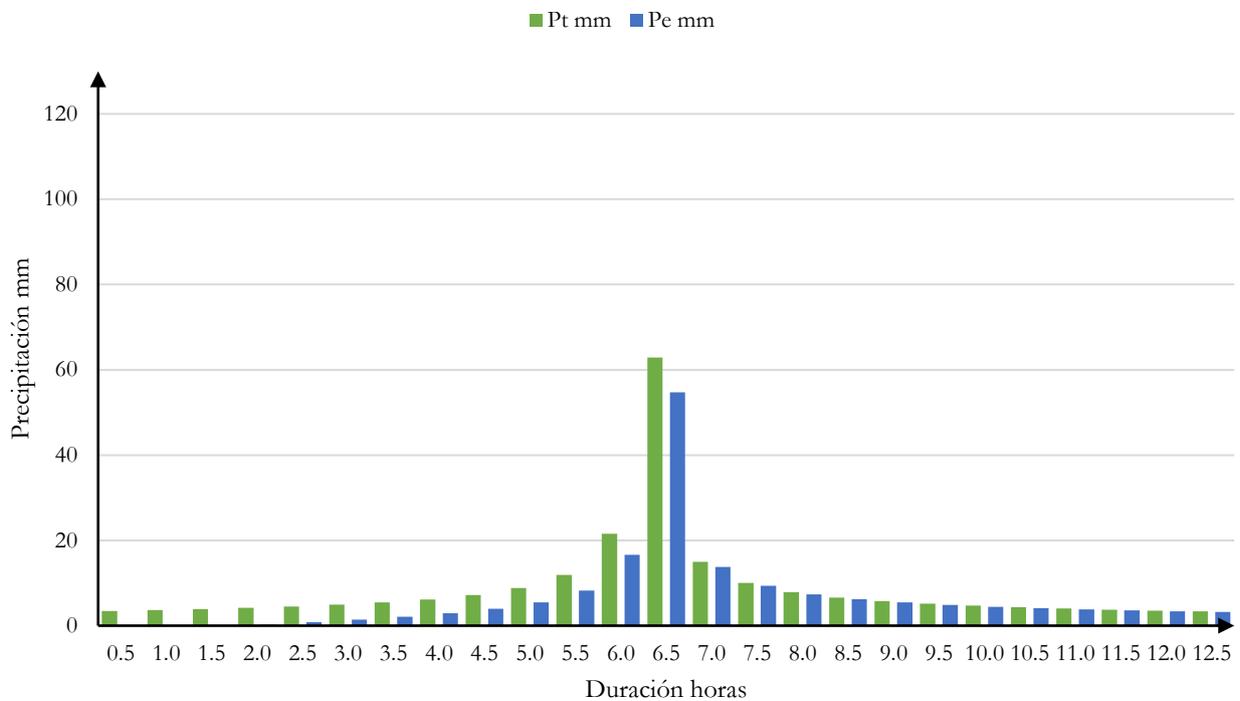


Ilustración 26. Hietograma de diseño de la estación Azoyu, para $T_r=50$ años.

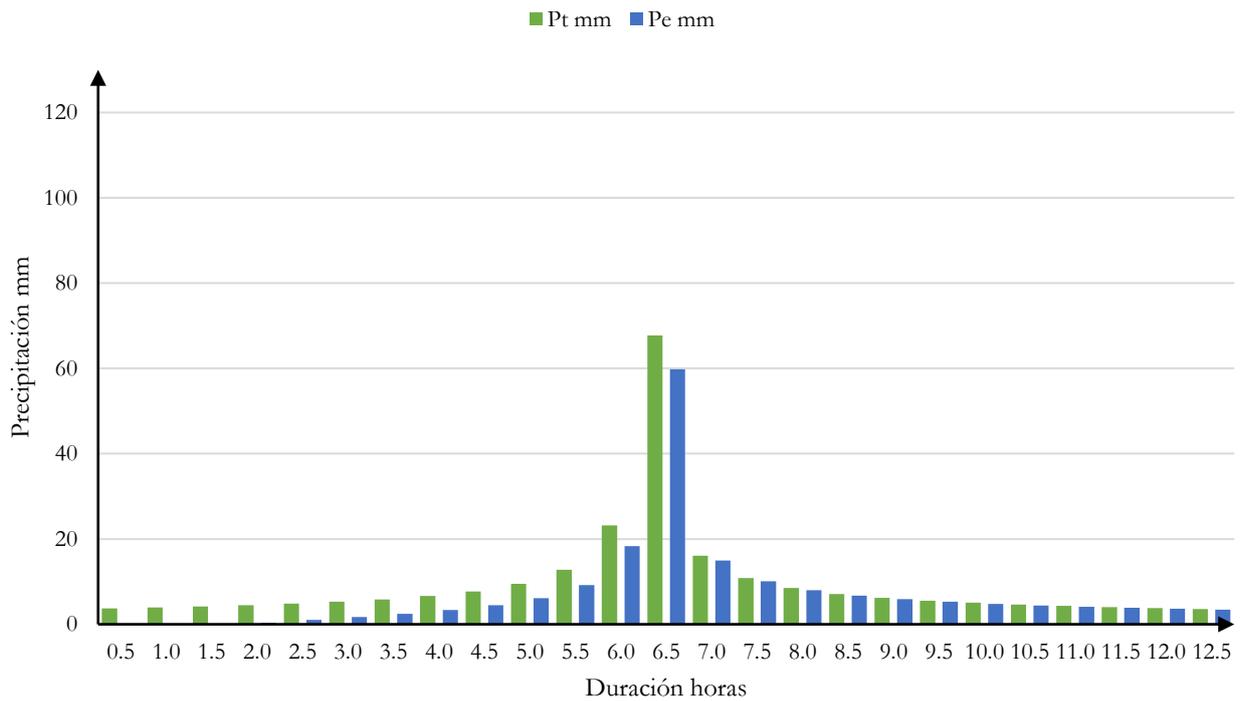


Ilustración 27. Hietograma de diseño de la estación Coacoyulichan, para $T_r=50$ años.

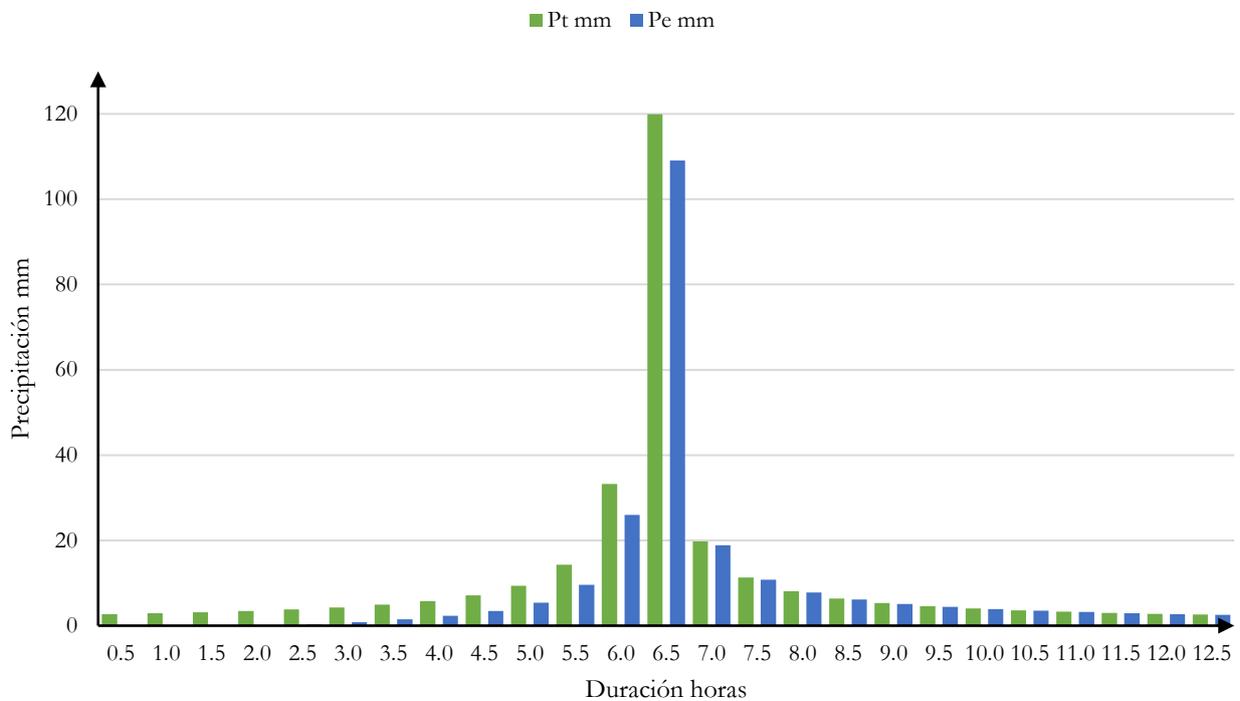


Ilustración 28. Hietograma de diseño de la estación Copala, para $T_r=50$ años.

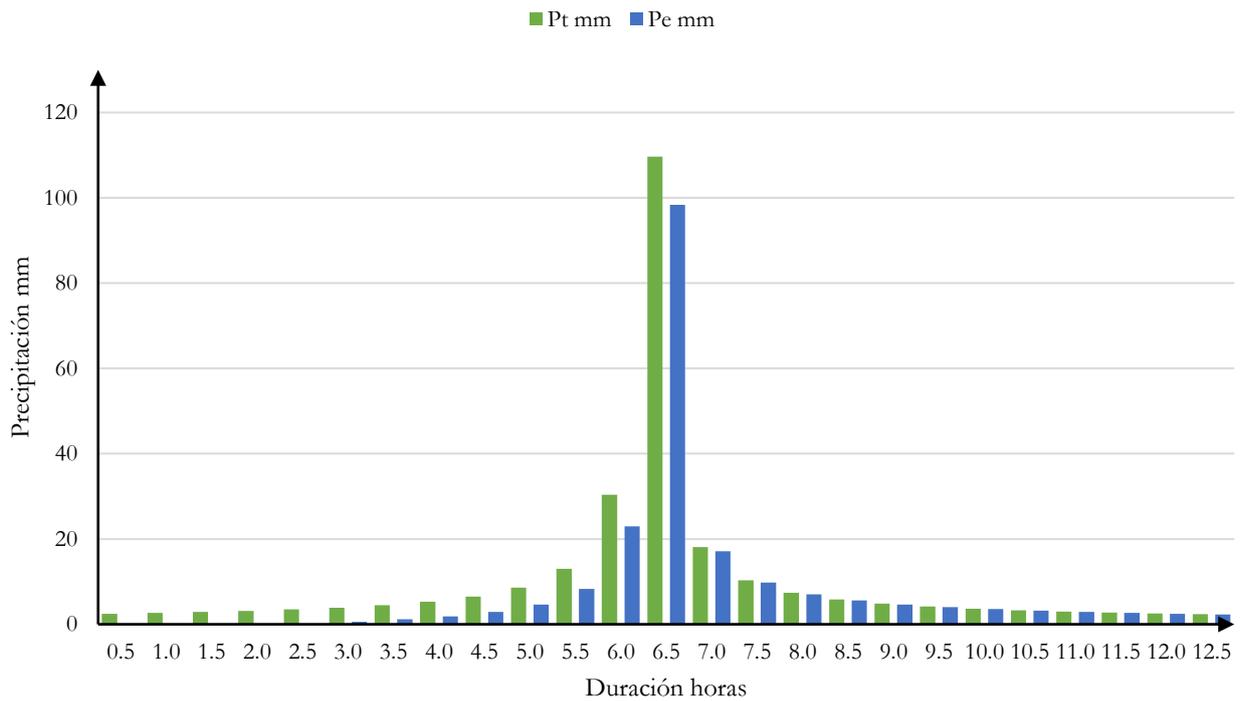


Ilustración 29. Hietograma de diseño de la estación Marquelia, para Tr=50 años.

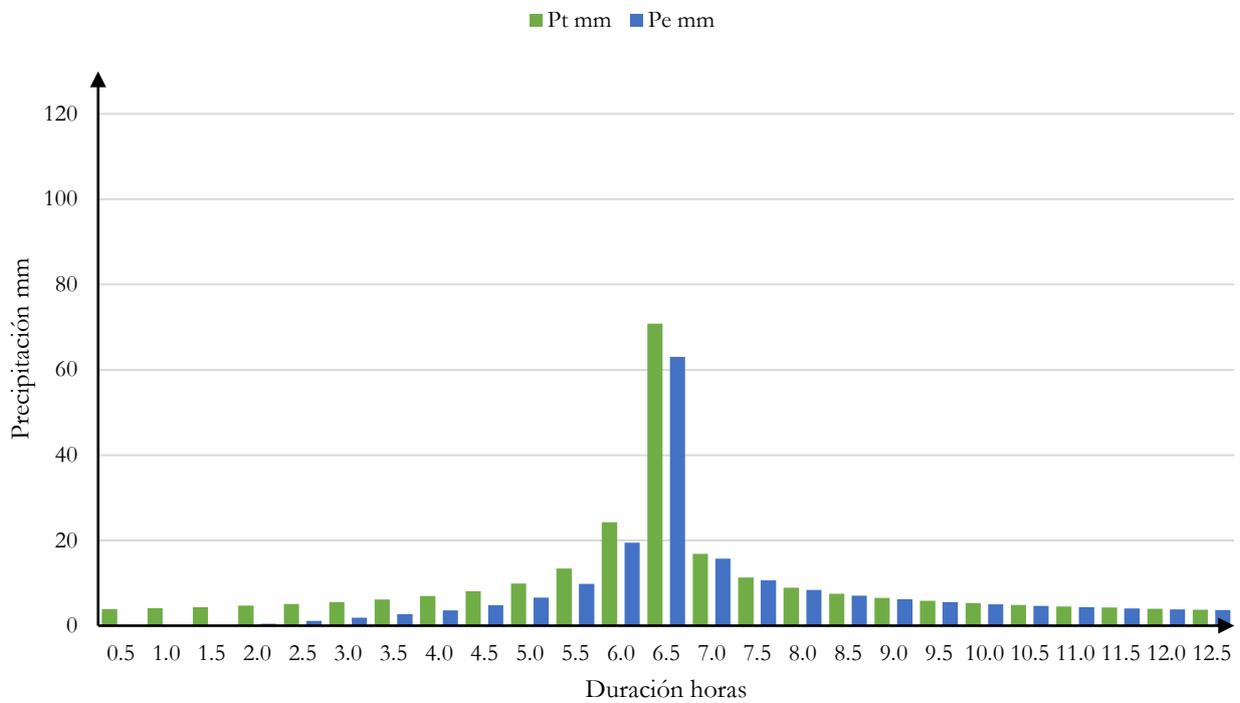


Ilustración 30. Hietograma de diseño de la estación Pueblo Hidalgo, para Tr=50 años.

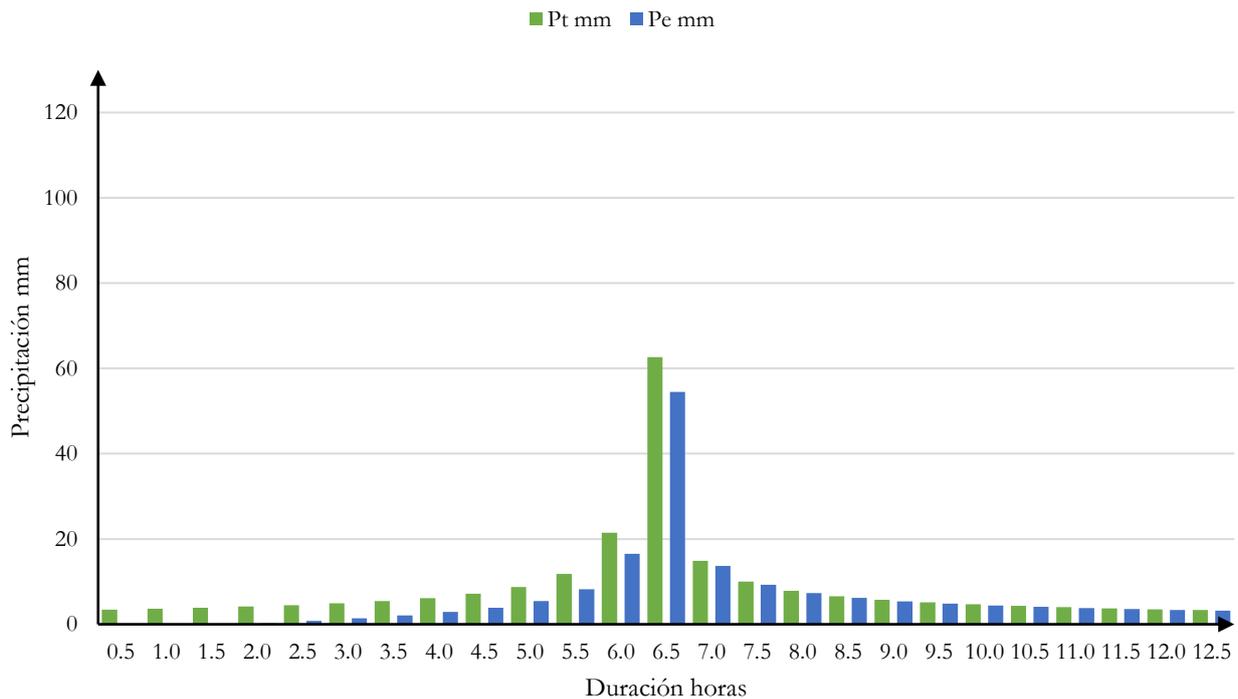


Ilustración 31. Hietograma de diseño de la estación San Luis Acatlán, para $T_r=50$ años.

La saturación del suelo puede alcanzar el umbral para el cual el suelo se encuentre completamente saturado y no exista más infiltración, por lo tanto contar con un único valor de número de curva no es lo más apropiado, estrictamente hablando debería ser calculado un valor de CN por cada evento de diseño. Dicho en otras palabras, al incrementar la intensidad de la lluvia, la infiltración disminuye y consecuentemente el escurrimiento incrementa. Esta consideración no fue aplicada en este caso, debido a que fueron evaluados varios eventos de diseño tanto en el modelo agregado como en el distribuido, y particularmente para el método distribuido, se añadiría otro conjunto de variables (ver apartado 3.4.6) sobre las cuales habría que encontrar la combinación más apropiada.

3.3 Modelo agregado

Se calcularon los hidrogramas de escurrimiento directo en la salida de la cuenca, con el método del hidrograma unitario sintético adimensional (Chow et al. 1994).

- H.U.S.A.:

$$Q = \sum_{j=1}^k P_j q_{k-j+1} \quad [13]$$

- Caudal Unitario:

$$\frac{q}{q_p} = \left(\frac{t}{t_p}\right)^{3.5} \exp\left[-3.5\left(\frac{t}{t_p} - 1\right)\right] \quad [14]$$

- Caudal unitario pico:

$$q_p = \frac{0.208A}{t_p} \quad [15]$$

- Tiempo pico:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad [16]$$

donde:

Q_k es el caudal del hidrograma de escurrimiento directo en m^3/s

P_j es la precipitación efectiva de la barra j del hietograma en mm

q_k es el caudal unitario de la ordenada $k-j+1$ del hidrograma unitario $m^3/s/mm$

t es tiempo en horas

t_r es el tiempo de retraso en horas

A es el área de la cuenca en km^2

Se ajustaron los caudales pico obtenidos en la transformación de lluvia en escurrimiento con el modelo agregado con respecto de los valores medidos en la estación hidrométrica, para realizar la calibración del modelo empleando el Numero de Curva, tomando como base un periodo de retorno de 50 años; ello se logró con $CN= 72$.

Los hidrogramas calculados con el modelo agregado se muestran en las Ilustraciones 32 a 43.

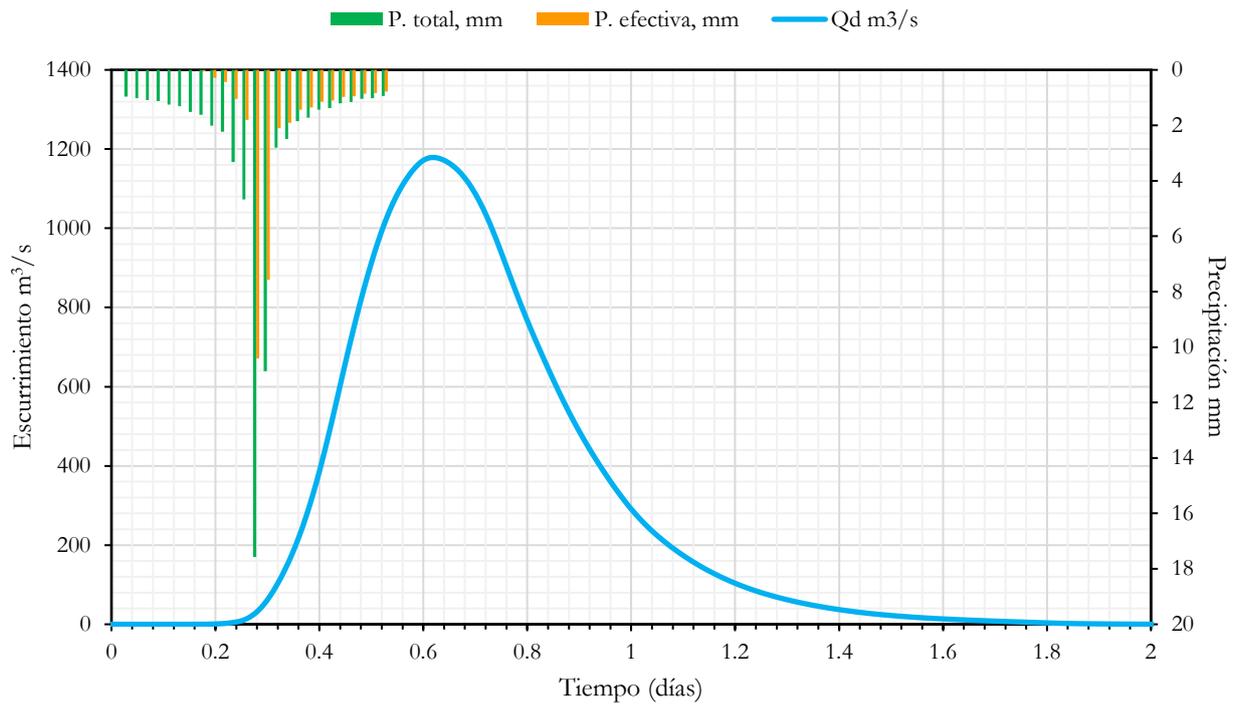


Ilustración 32. Hidrograma de escurrimiento directo, $T_r=2$ años.

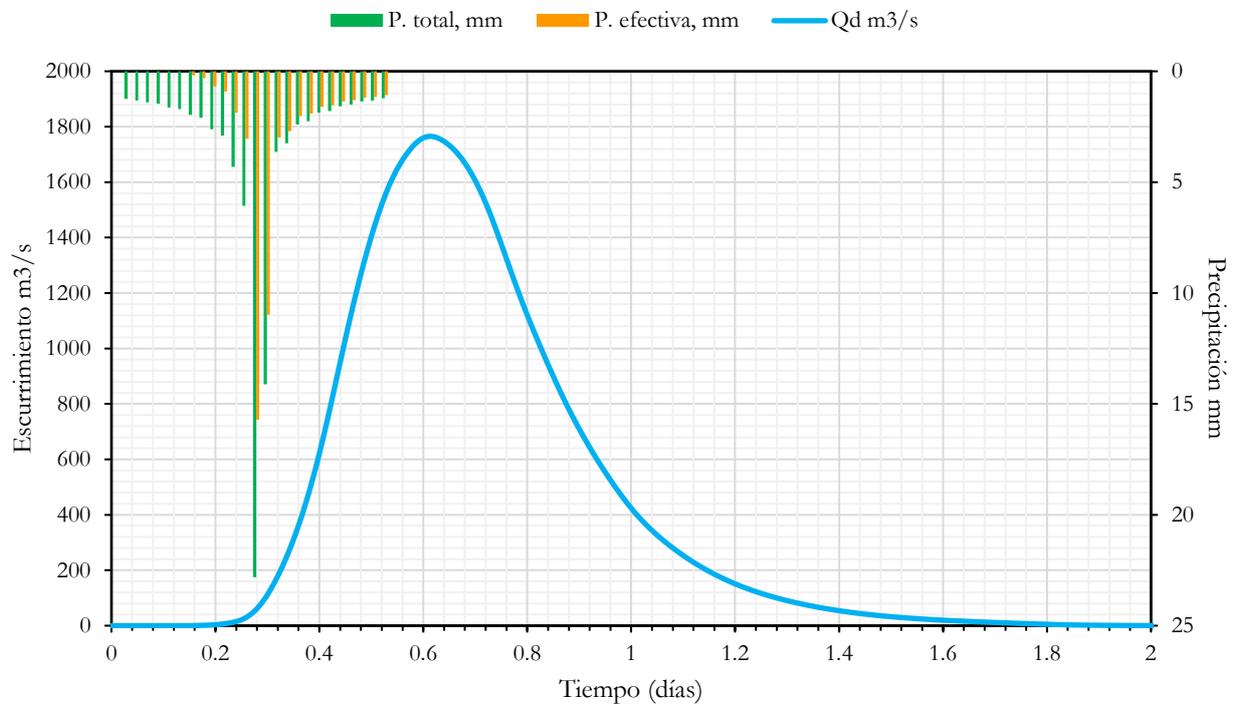


Ilustración 33. Hidrograma de escurrimiento directo, $T_r=5$ años.

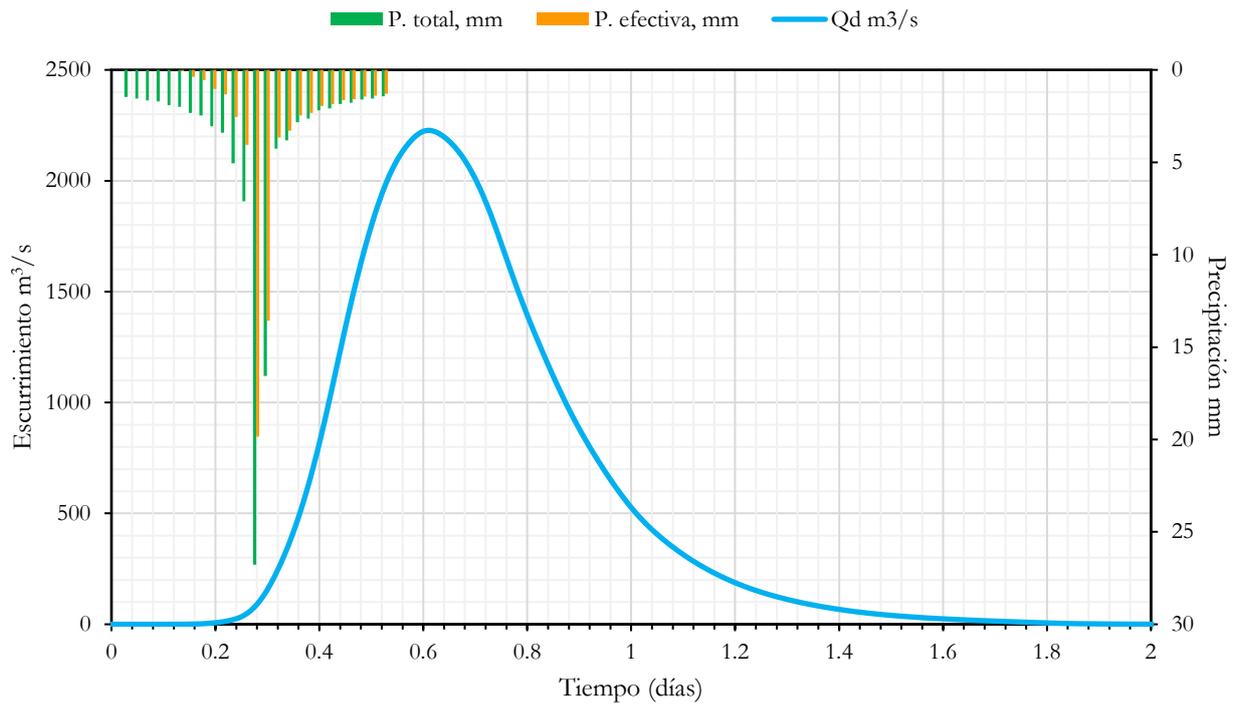


Ilustración 34. Hidrograma de escurrimiento directo, $T_r=10$ años.

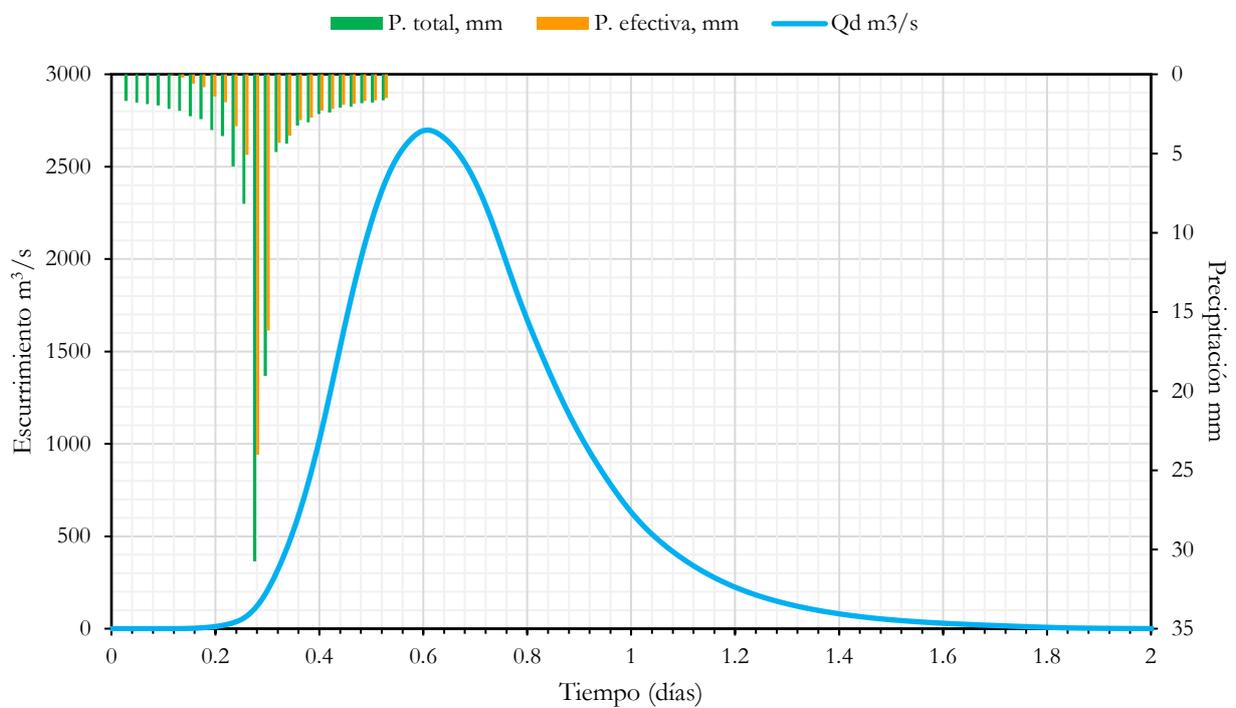


Ilustración 35. Hidrograma de escurrimiento directo, $T_r=20$ años.

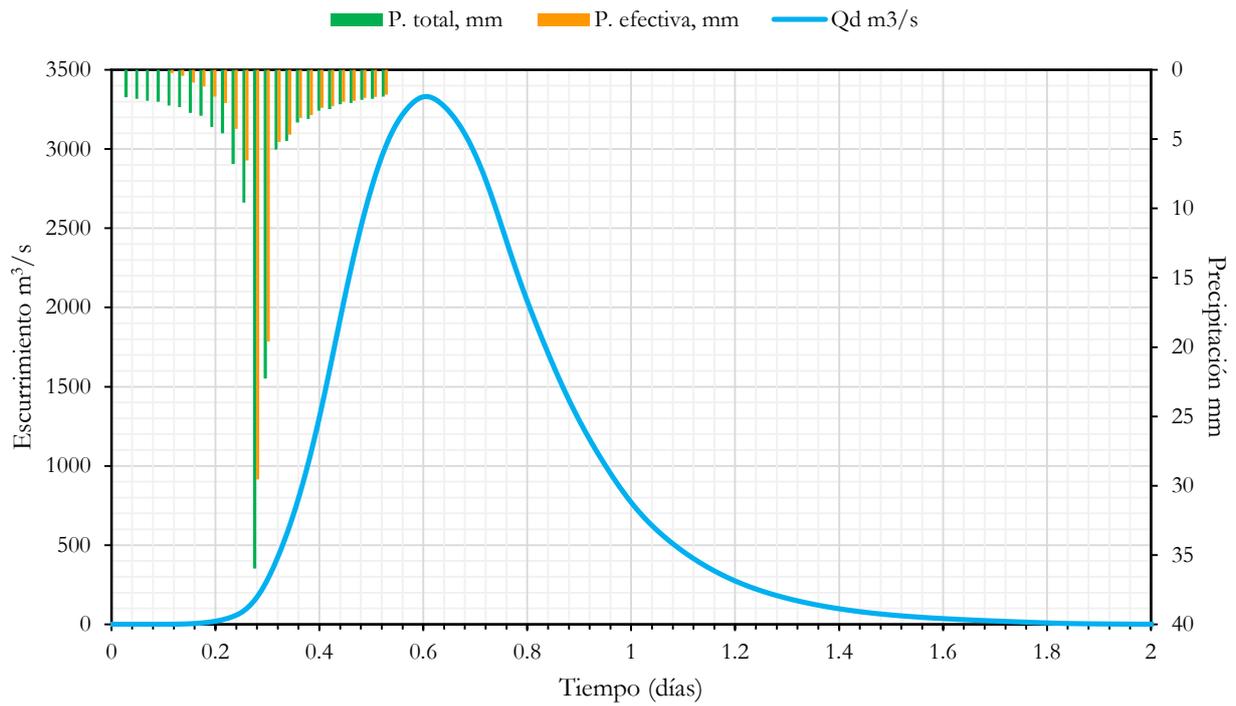


Ilustración 36. Hidrograma de escurrimiento directo, $T_r= 50$ años.

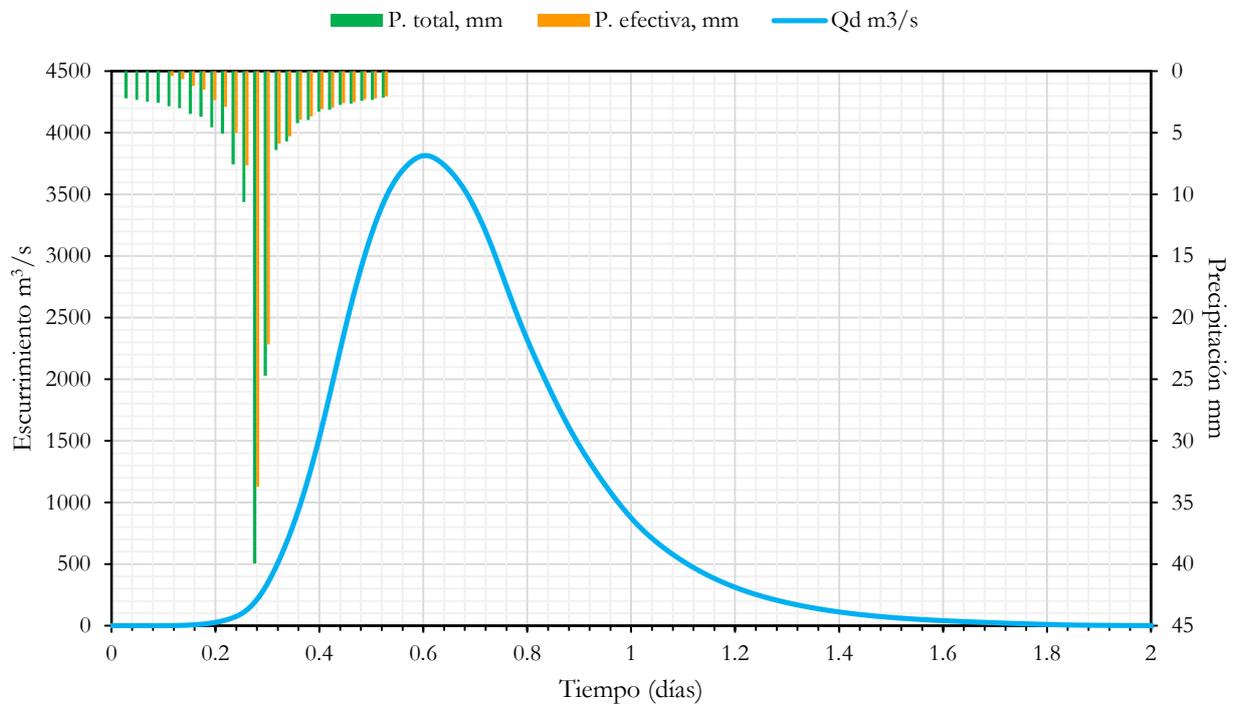


Ilustración 37. Hidrograma de escurrimiento directo, $T_r= 100$ años

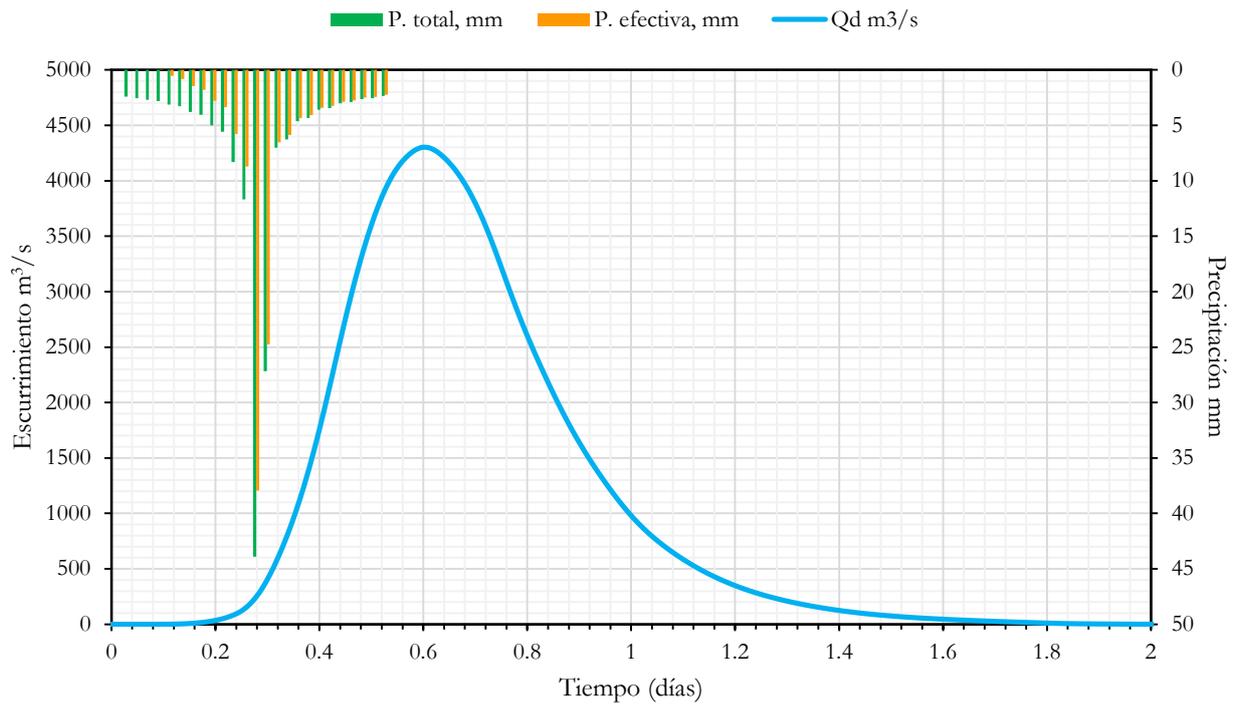


Ilustración 38. Hidrograma de escurrimiento directo, $T_r = 200$ años

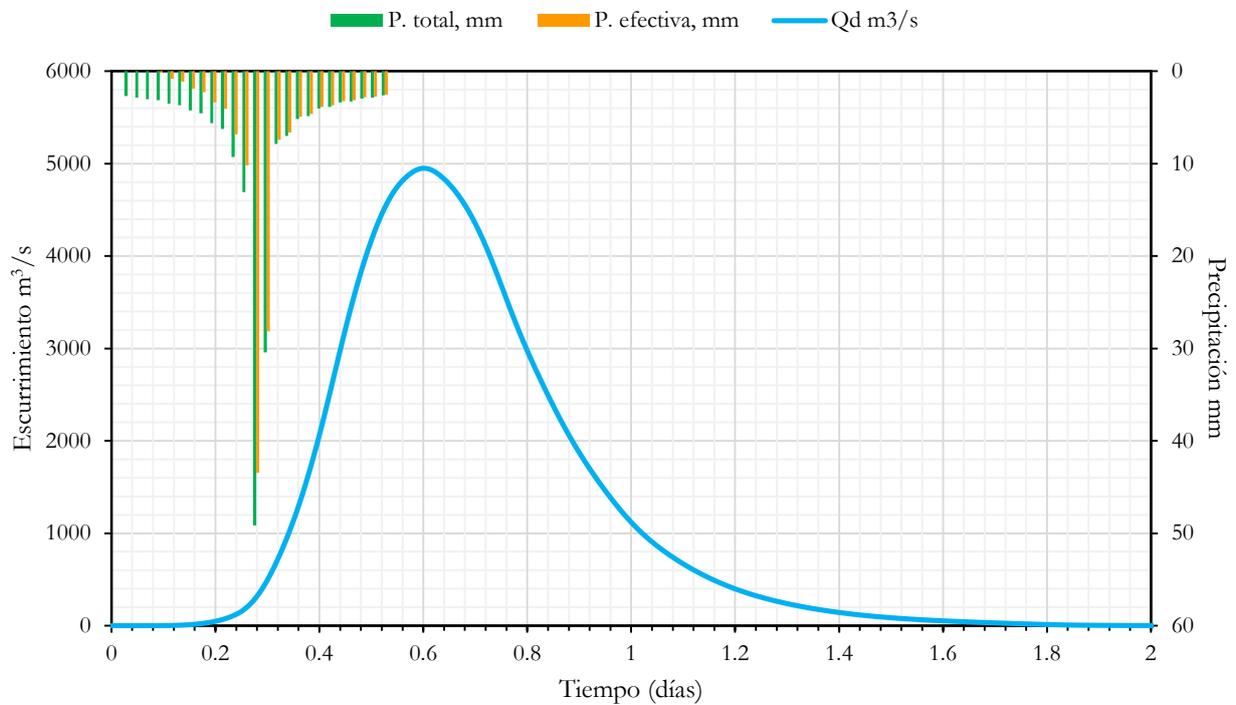


Ilustración 39. Hidrograma de escurrimiento directo, $T_r = 500$ años.

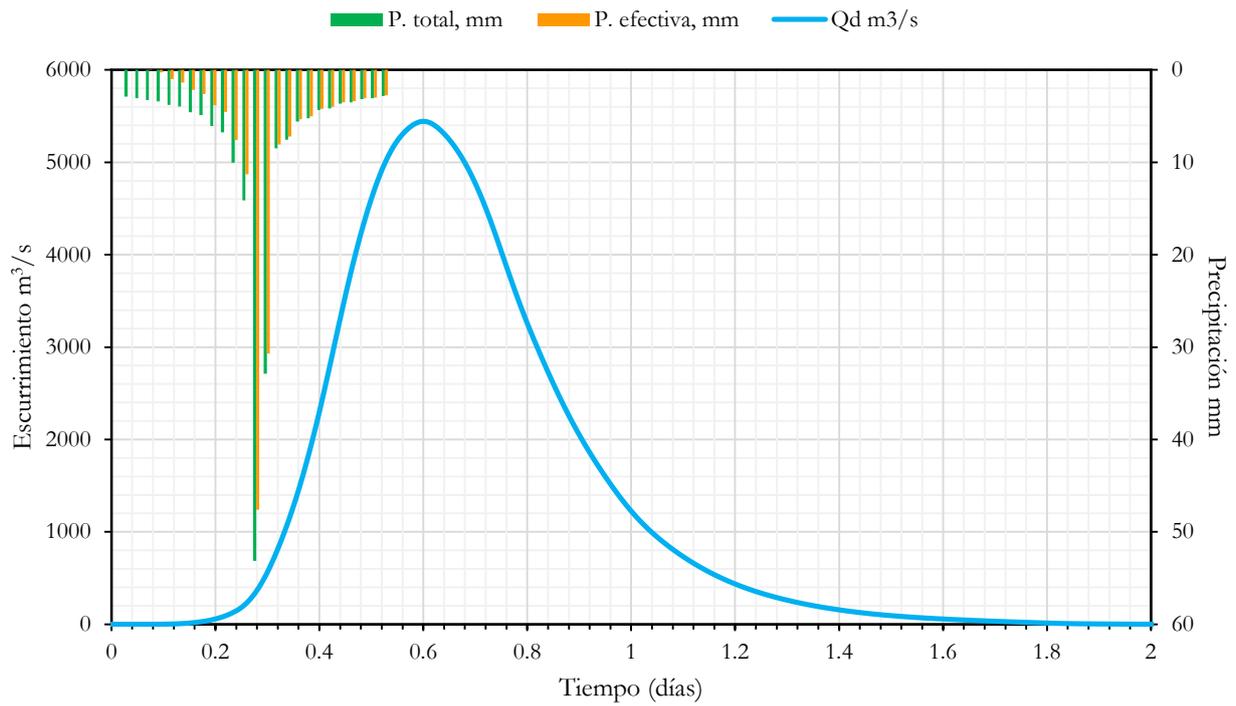


Ilustración 40. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 1,000$ años

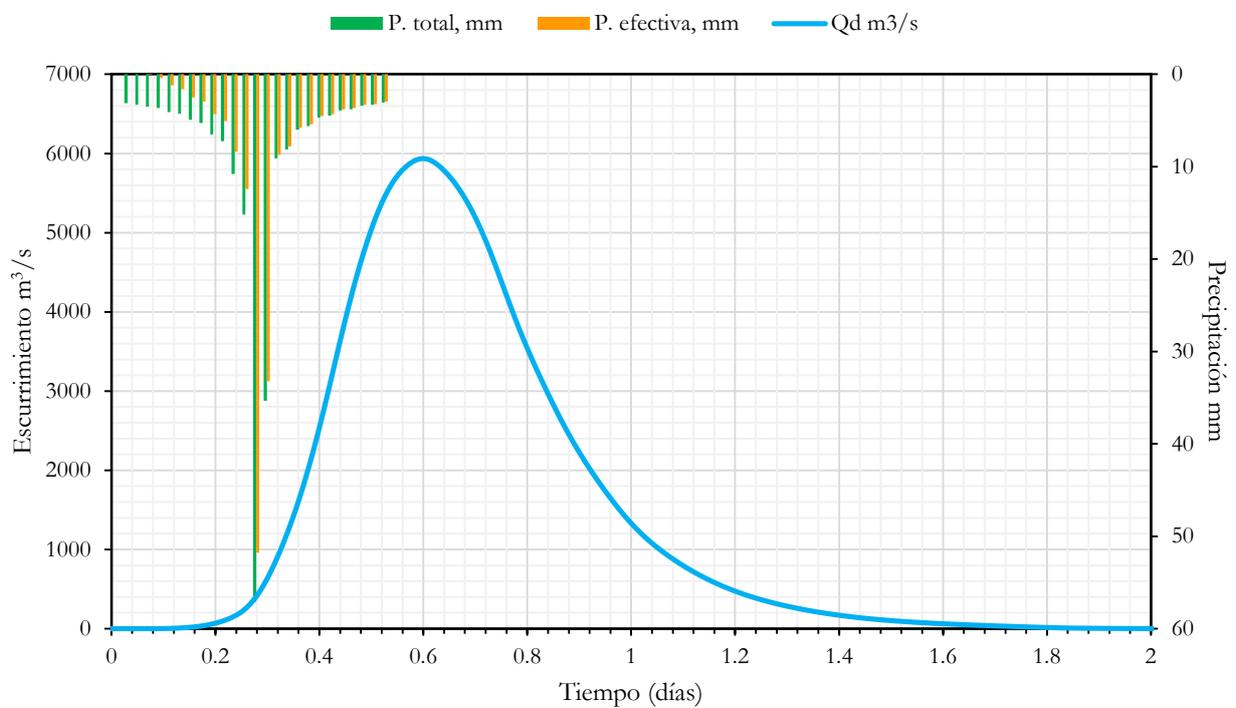


Ilustración 41. Hidrograma de escurrimiento directo, $Tr= 2,000$ años.

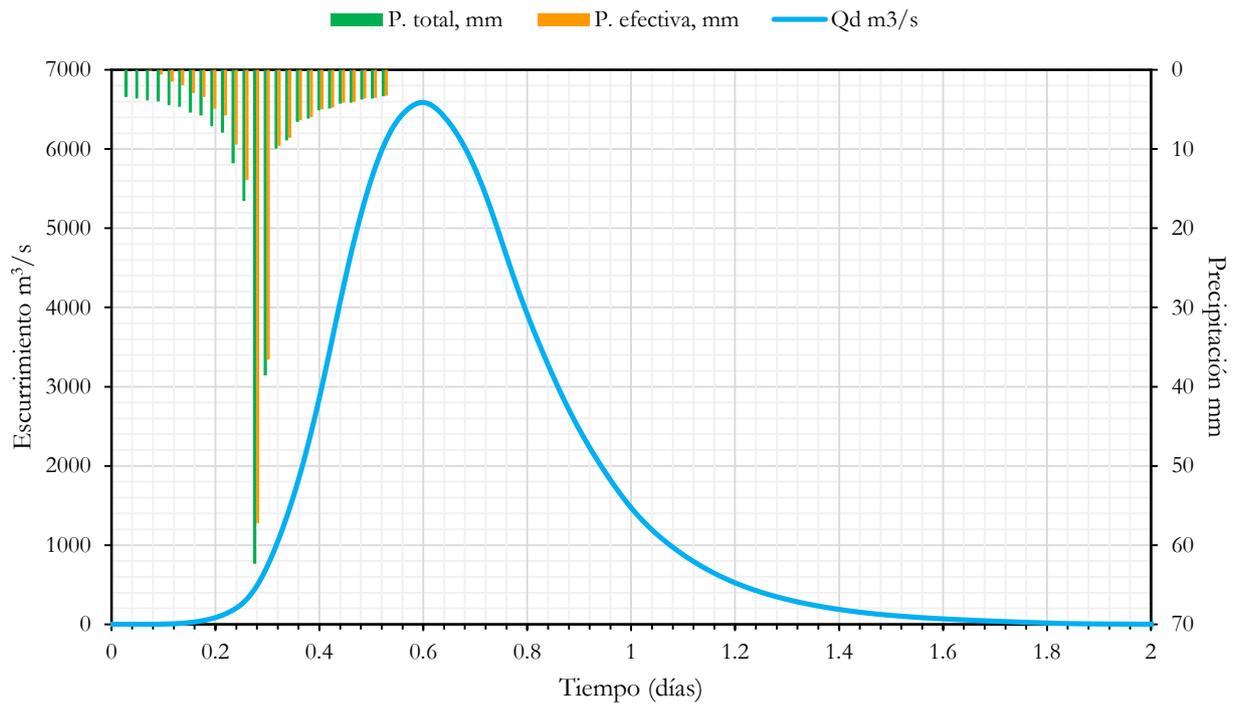


Ilustración 42. Hidrograma de escurrimiento directo, $T_r = 5,000$ años.

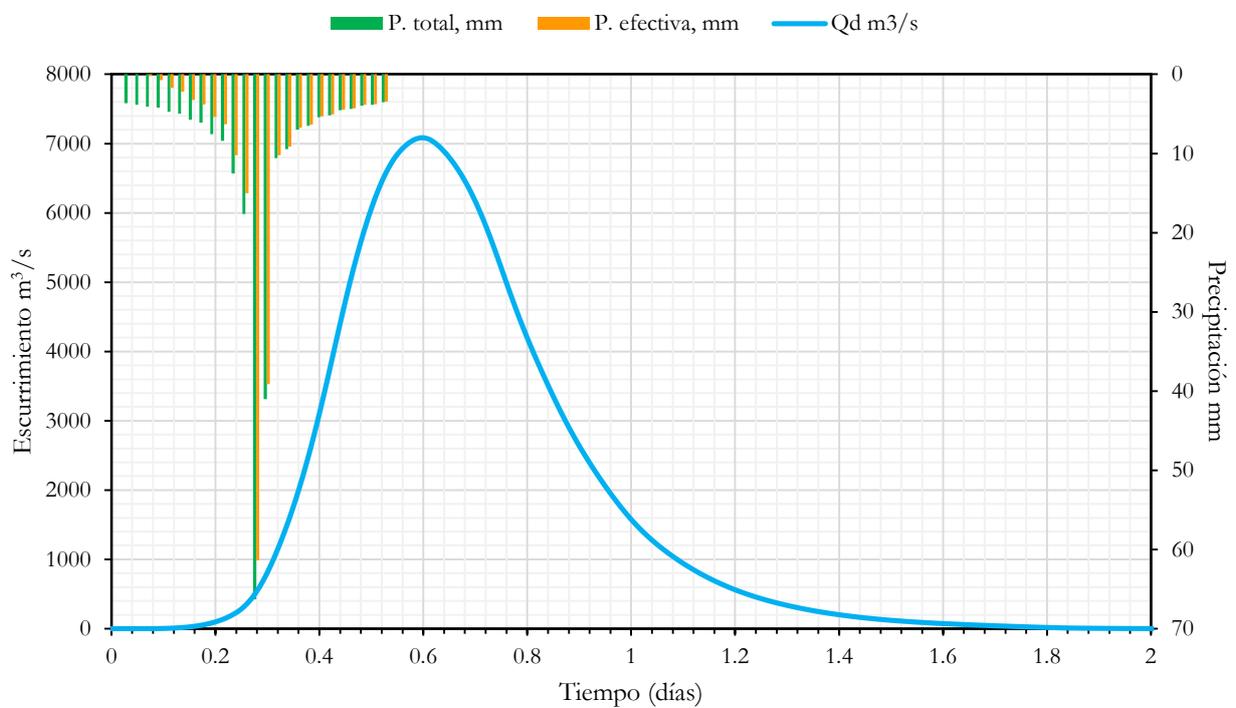


Ilustración 43. Hidrograma de escurrimiento directo, $T_r = 10,000$ años.

3.4 Modelo distribuido

Para el cálculo del proceso lluvia-escurrimiento con parámetros distribuidos, se utilizó una malla de cálculo sobre la cual fueron asignadas diferentes variables a través del modelo de flujo bidimensional Iber.

3.4.1 Iber

Iber es un software de descarga libre para modelación hidráulica e hidrológica, desarrollado en España, en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC), Grupo de Ingeniería Matemática (Universidad de Santiago de Compostela) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE), promovido por el Centro de estudios Hidrográficos del CEDEX desarrollado desde la administración pública española. Tiene aplicación en campos de hidráulica tales como simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales, evaluación de zonas inundables, cálculo de las zonas de flujo preferente, cálculo hidráulico de encauzamientos, cálculo hidráulico de redes de canales en lámina libre, cálculo de corrientes de marea en estuarios, estabilidad de los sedimentos del lecho, procesos de erosión sedimentación por transporte de material granular (Bladé et al. 2014), además de contar con el módulo de hidrología que se usa en el presente estudio.

El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones de St. Venant de agua poco profundas promediadas en dos direcciones.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = 0 \quad [17]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial Z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} \quad [18]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial Z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} \quad [19]$$

Donde:

- h es la profundidad de agua
- U_x, U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad
- g es la aceleración de la gravedad

- ρ es la densidad del agua
- Z_b es la cota del fondo

τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}} \quad [20]$$

$$\tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}} \quad [21]$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad

El modelo Iber, cuenta con una interfaz gráfica sencilla de manipular, ya que modelos de este tipo generalmente requieren al usuario que escriba ciertas líneas de código, en las que se indican las instrucciones que deberán ser efectuadas por el programa. Iber puede apoyarse de modelos geométricos previamente elaborados en SIG o CAD; de esta manera se puede visualizar la zona de cálculo y asignar condiciones directamente sobre ella.

De manera general, Iber requiere que se elabore un modelo geométrico en el cual se concentre el dominio del problema, en este caso la cuenca. Posteriormente el modelo debe ser dividido en superficies donde pueden ser añadidas diversas condiciones, tales como lluvia, coeficiente de rugosidad de Manning y la zona de salida del flujo, para este modelo las superficies fueron las corrientes principales del río y los polígonos de Thiessen de las estaciones climatológicas. Finalmente, la geometría del modelo debe ser discretizada en elementos geométricos de cálculo (triangulares o cuadriláteros) cuyo tamaño es definido de acuerdo con la cantidad de resultados deseados y la importancia del sitio donde se requiera mayor o menor detalle. El cálculo se realiza durante un periodo de tiempo suficiente, que podría atribuirse al tiempo de concentración, y como se trata de un modelo bidimensional en el que los resultados cambian de elemento a elemento a través del tiempo, se debe asignar también un intervalo apropiado de impresión de resultados, en el cual se puedan visualizar los cambios que van sucediendo en el modelo dentro el periodo calculado.

3.4.2 Caracterización del dominio de cálculo

Se realizó el trazo de la discretización de la cuenca (Ilustración 44) contemplando el parteaguas, el área de influencia de los polígonos de Thiessen, y las zonas de aportación y propagación del flujo, empleando un sistema de coordenadas UTM.

3.4.3 Distribución de la lluvia

La distribución espacial de la lluvia se realizó mediante el método de los polígonos de Thiessen, esto es, el hietograma de lluvia efectiva de cada estación en su área de influencia.

Cada modelo fue elaborado con 4 días de simulación; durante los primeros dos días escurrió la condición inicial, hasta que el hidrograma producto de este escurrimiento pudo considerarse despreciable, a partir de este instante se simuló la tormenta de precipitación efectiva sobre la cuenca donde el escurrimiento que se presentó se atribuyó por completo a la lluvia de la tormenta.

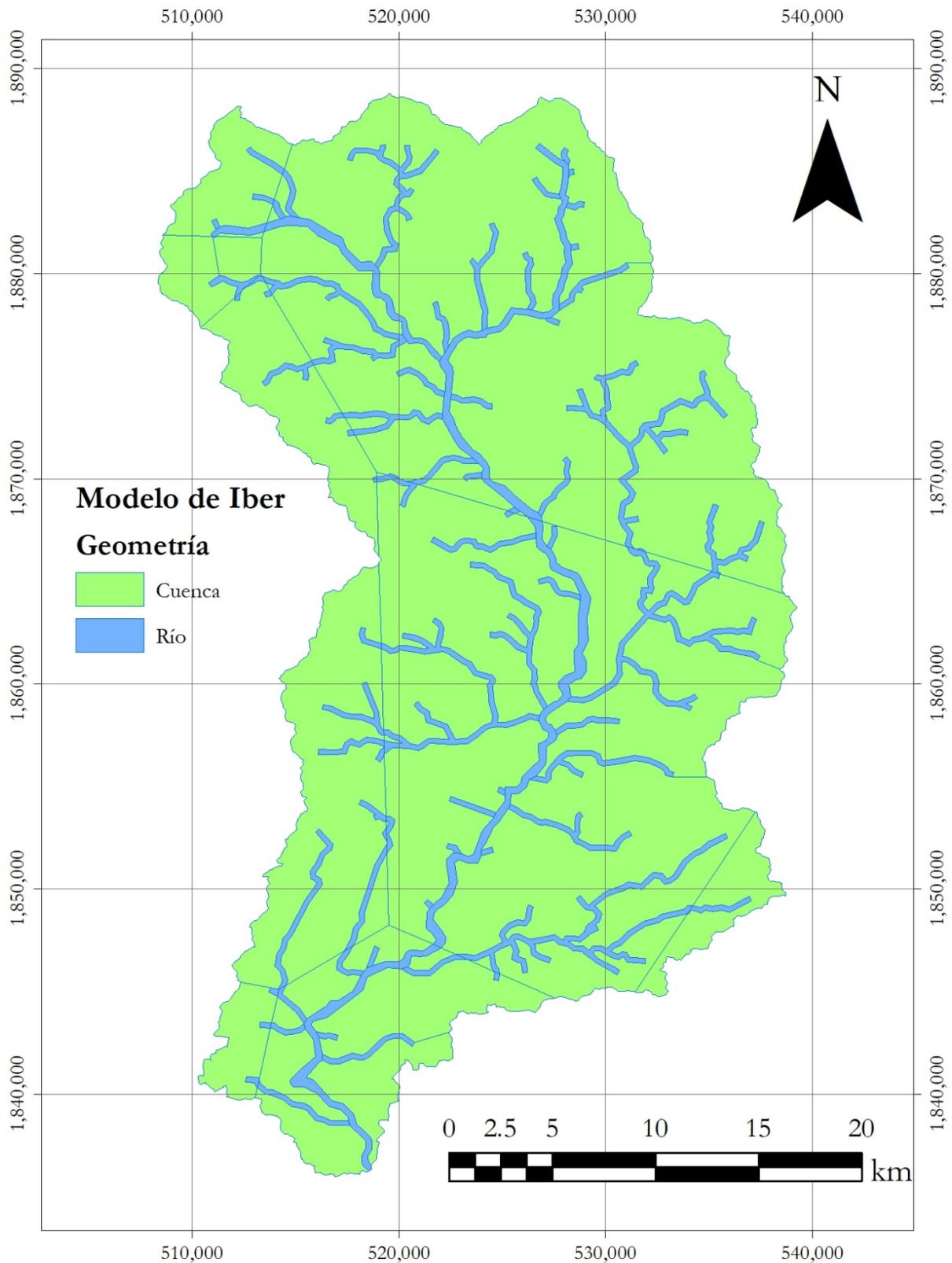


Ilustración 44. Geometría del modelo Iber: cauce principal, cauces secundarios y polígonos de Thiessen.

3.4.4 Tamaño de malla

Se asignaron dos valores de tamaño de malla en la cuenca, un valor para zonas de propagación y otro valor para zonas de aportación de flujo, por lo tanto, en cauces el tamaño máximo es de 100 m, mientras que en el resto del dominio es de 500 m. La geometría de la cuenca se discretizó en 73,288 elementos, suma de los elementos triangulares con longitudes de aristas de diferente tamaño. Fue descargado el modelo digital (INEGI 2013) con resolución de 15 m, y se asignó la elevación topográfica sobre cada elemento de la malla (Ilustración 45).

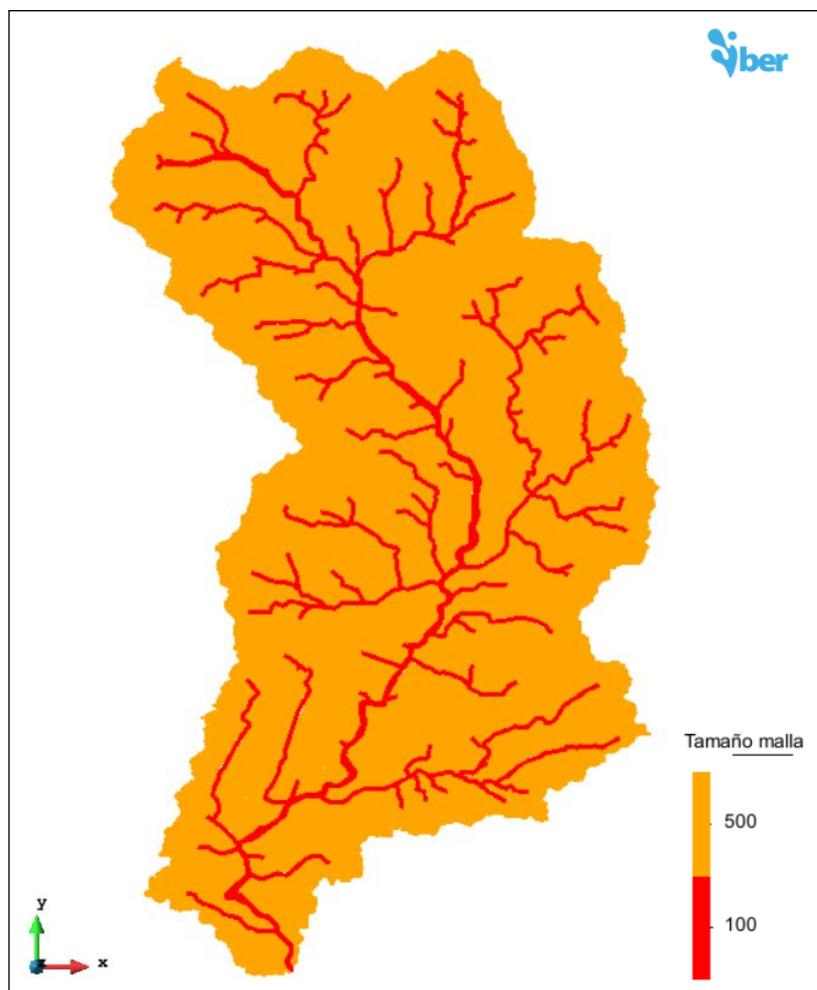


Ilustración 45. Tamaños de malla.

Los tamaños propuestos no son forzosamente con valor constante sobre el modelo (Ilustración 46), estos representan un valor máximo al cual estará sujeta la generación de la malla. Existen algunas funciones que permiten mejorar la transición de tamaños de elementos, principalmente para curvas o sitios con ángulos muy pequeños, sin embargo, en este caso el modelo geométrico fue elaborado en CAD, creando una malla que requirió una

cantidad pequeña de elementos por generar y que proporcionó una resolución suficiente para encontrar resultados aceptables en un tiempo apropiado, realizando algunos cálculos previos.

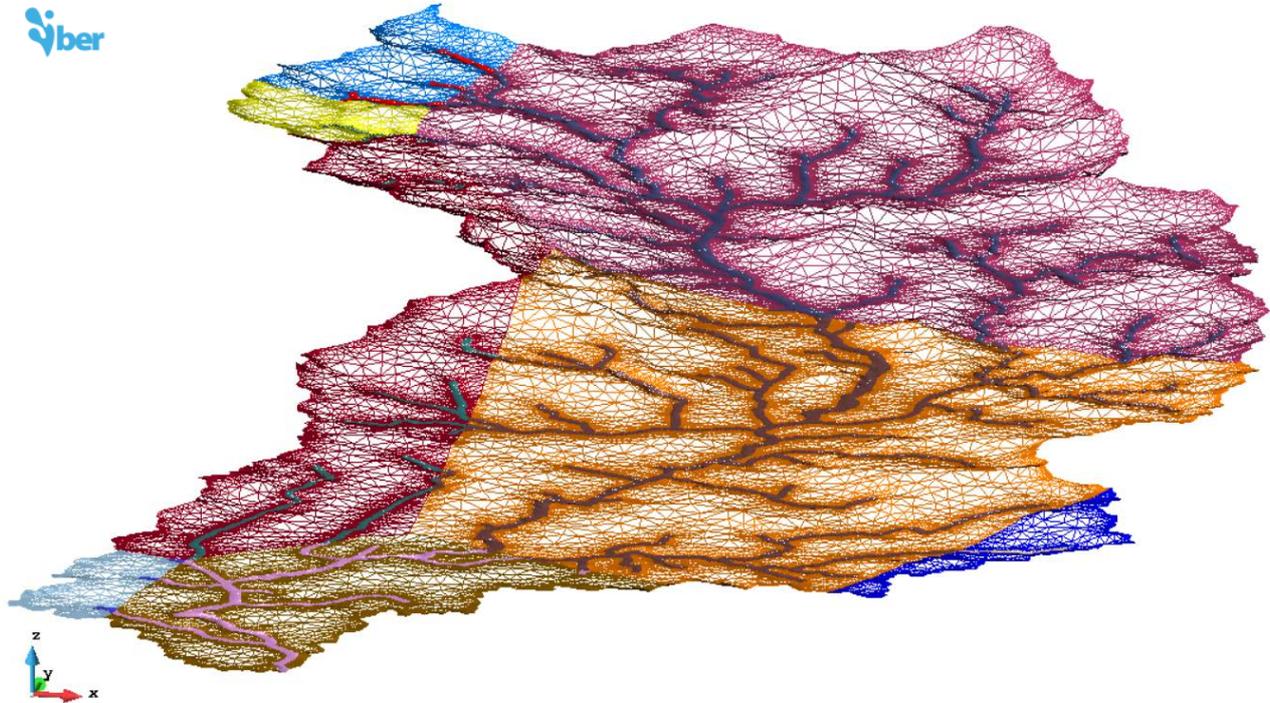


Ilustración 46. Malla de cálculo.

3.4.5 Usos de suelo

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía clasifica los usos de suelo en una carta topográfica con escala 1:250,000 con datos vectorizados (INEGI 2016). Para el sitio de análisis se encuentran 19 usos distintos (Ilustración 47 y Tabla 8); las descripciones textuales (INEGI 2017) de algunos de ellos o de suelos de característica similar acompañados de algunas fotos de diversos sitios de México (Ilustraciones 49 a 58), que describen el tipo de vegetación que existe en la zona de estudio. Adicionalmente se muestra la clasificación del tipo de suelo que existe en la cuenca para apoyar dichas descripciones (Ilustración 48).

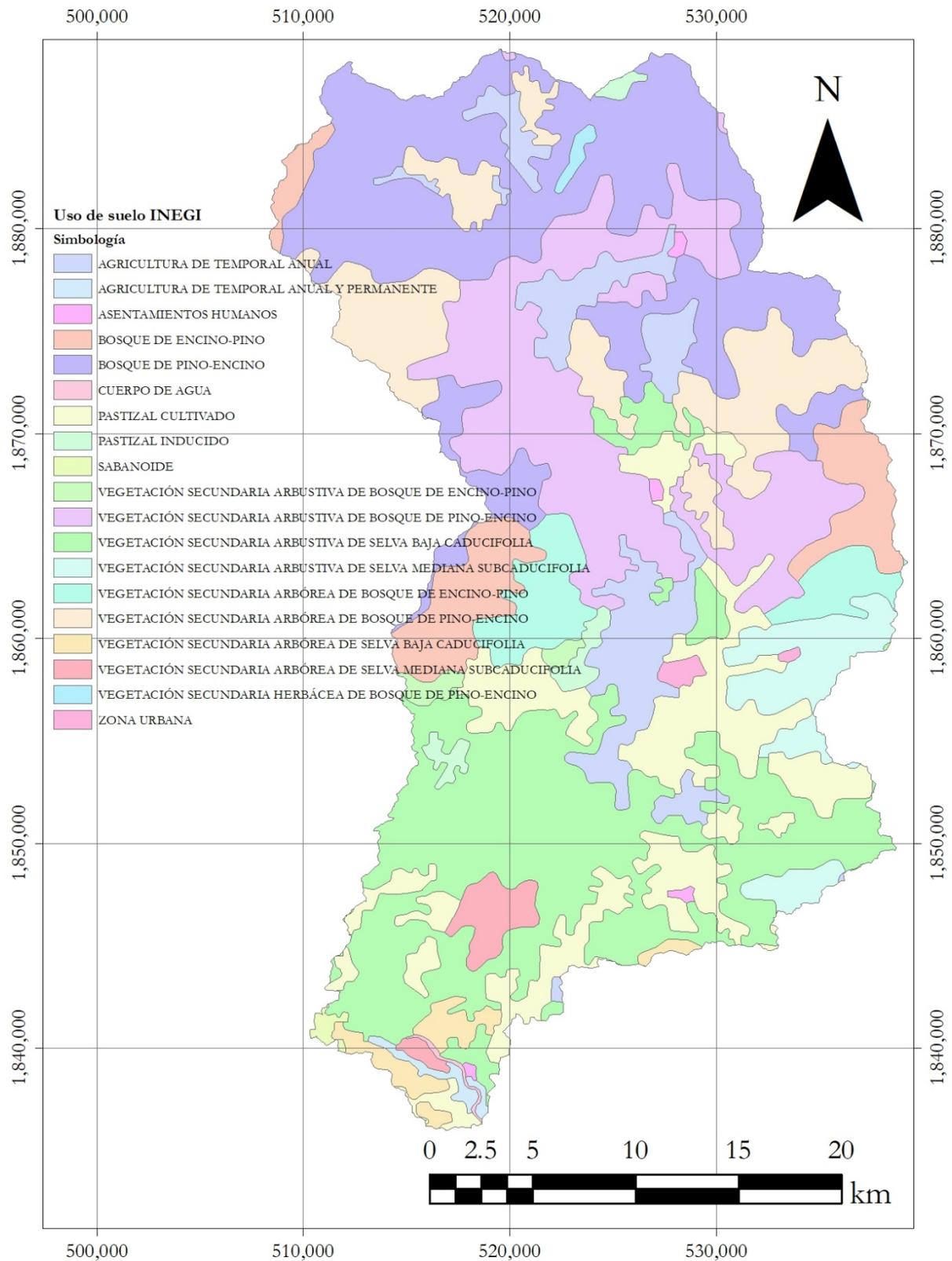


Ilustración 47. Usos de suelo de la cuenca, serie VI (INEGI 2016).

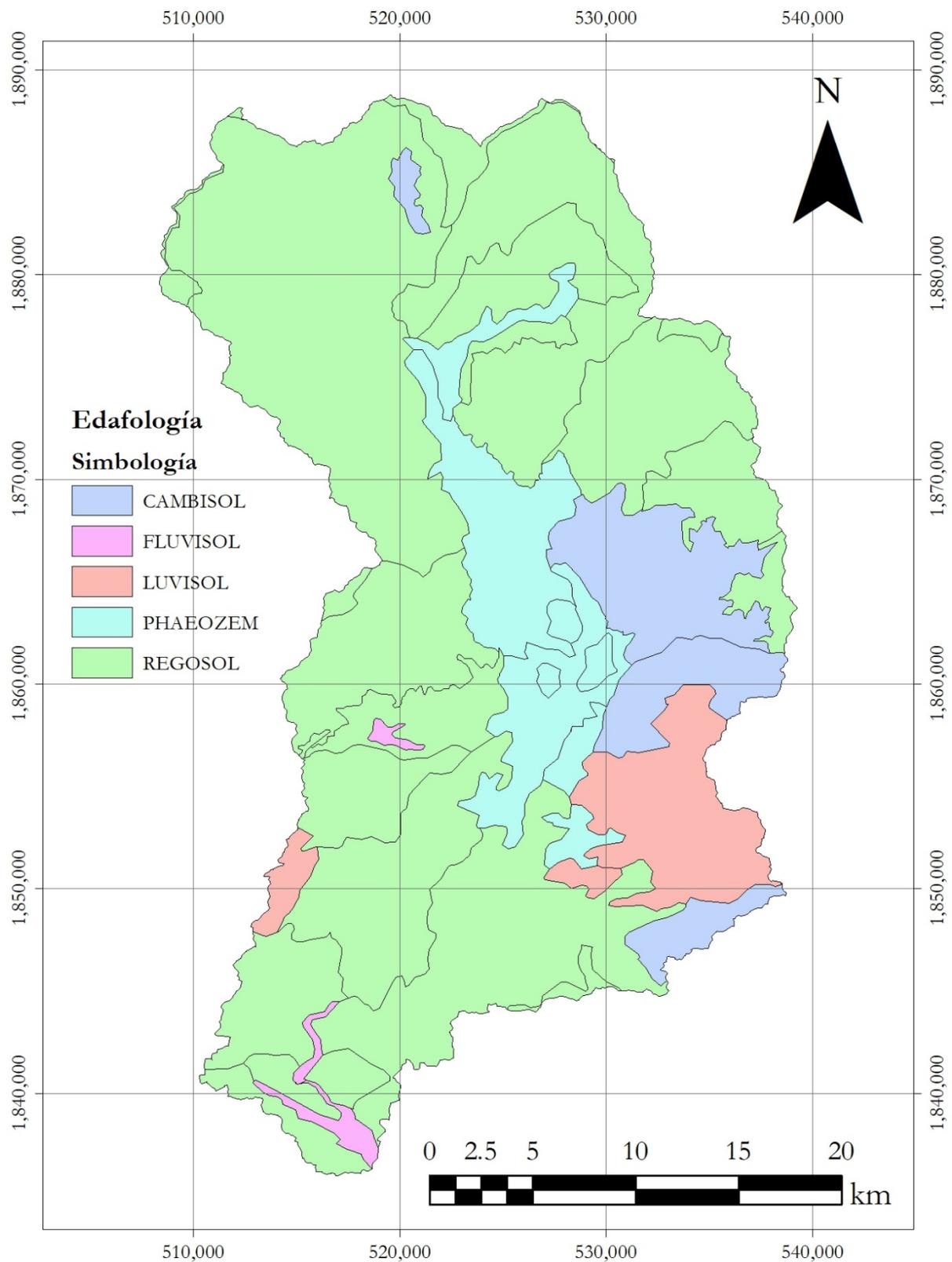


Ilustración 48. Edafología de la cuenca (INEGI 2014).

Tabla 8. Usos de suelo de la cuenca, serie VI (INEGI 2016).

| | Uso de suelo |
|----|---|
| 1 | Asentamientos Humanos |
| 2 | Bosque De Pino-Encino |
| 3 | Bosque De Encino-Pino |
| 4 | Cuerpo De Agua |
| 5 | Pastizal Cultivado |
| 6 | Pastizal Inducido |
| 7 | Agricultura De Temporal Anual |
| 8 | Agricultura De Temporal Anual Y Permanente |
| 9 | Vegetación Secundaria Arbustiva De Bosque De Pino-Encino |
| 10 | Vegetación Secundaria Arbórea De Bosque De Pino-Encino |
| 11 | Vegetación Secundaria Arbustiva De Bosque De Encino-Pino |
| 12 | Vegetación Secundaria Arbórea De Bosque De Encino-Pino |
| 13 | Vegetación Secundaria Arbustiva De Selva Baja Caducifolia |
| 14 | Vegetación Secundaria Arbórea De Selva Baja Caducifolia |
| 15 | Vegetación Secundaria Arbustiva De Selva Mediana Subcaducifolia |
| 16 | Vegetación Secundaria Arbórea De Selva Mediana Subcaducifolia |
| 17 | Vegetación Secundaria Herbácea De Bosque De Pino-Encino |
| 18 | Sabanoide |
| 19 | Zona Urbana |

Bosque de pino-encino. Comunidades vegetales características de las zonas montañosas de México. Se distribuyen en la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental, el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, en climas templados, semifríos, semicálidos y cálidos húmedos y subhúmedos con lluvias en verano, con temperaturas que oscilan entre los 10 y 28 °C y una precipitación que va de los 600 a los 2,500 mm anuales. Se concentran entre los 1,200 y los 3,200 m. Se establecen en sustrato ígneo y en menor proporción, sedimentario y metamórfico, sobre suelos tanto someros como profundos y rocosos principalmente cambisoles, leptosoles, luvisoles, regosoles, entre otros. Alcanzan alturas de 8 a 35 m. Las comunidades están conformadas por diferentes especies de pino (*Pinus spp.*) y encino (*Quercus spp.*), pero con dominancia de las primeras. Lo integran árboles perennifolios y caducifolios, con floración y fructificación variables durante todo el año (Ilustración 49).



Ilustración 49. Bosque de pino-encino, Techalutla Jalisco (INEGI 2017).

Bosque de encino-pino. Comunidad que se distribuye principalmente en los sistemas montañosos del país, concentrándose la mayor parte en: Sierra Madre Occidental, Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur y en menor proporción Sierra Madre Oriental, Cordillera Centroamericana, Sierras de Chiapas y Guatemala, Llanura Costera del Golfo Norte, Mesa del Centro y Península de Baja California. Se desarrolla en climas templados, semifríos, semicálidos, cálidos húmedos y subhúmedos con lluvias en verano, con una temperatura que oscila entre los 10 y 28 °C y una precipitación total anual que varía desde los 600 a 2,500 mm, en cuanto a la altitud oscila desde los 300 y 2,800 m. El sustrato donde se desarrolla esta comunidad es de origen ígneo como tobas y riolitas y sedimentarias como las calizas principalmente, se establecen en suelos como leptosoles, luvisoles, regosoles, phaeozem y en menor proporción los durisoles y umbrisoles. Estas comunidades están conformadas por encinos (*Quercus* spp.), y en proporción algo menor de pinos (*Pinus* spp.). Se desarrolla principalmente en áreas de mayor importancia forestal, en los límites altitudinales inferiores de los bosques de pino-encino. Estas comunidades muestran menor porte y altura que aquellos donde domina el pino sobre el encino con una altura de 8 a 35 m. Son árboles perennifolios y caducifolios, la floración y fructificación es variable durante todo el año (Ilustración 50).



Ilustración 50. Bosque de Encino-Pino. Huimilpan, Querétaro (INEGI 2017).

El uso de suelo Pastizal, solo cuenta con una imagen de este tipo (Ilustración 51), no obstante diferentes tipos de pastizal son descritos posteriormente.



Ilustración 51. Pastizal, Cuatro Ciénegas, Coahuila (INEGI 2017).

Pastizal Inducido. Esta comunidad dominada por gramíneas o graminoides aparece como consecuencia del desmonte de cualquier tipo de vegetación; también puede establecerse en áreas agrícolas abandonadas o bien como producto de áreas que se incendian con frecuencia. Los pastizales inducidos algunas veces corresponden a una fase de la sucesión normal de comunidades vegetales, cuyo clímax es por lo común un bosque o un matorral. A consecuencia del pastoreo intenso o de los fuegos periódicos, o bien de ambos factores juntos, se detiene a menudo el proceso de la sucesión y el pastizal inducido permanece como tal mientras perdura la actividad humana que lo mantiene. Otras veces el

pastizal inducido no forma parte de ninguna serie normal de sucesión de comunidades, pero se establece y perdura por efecto de un intenso y prolongado disturbio, ejercido a través de tala, incendios, pastoreo y muchas con ayuda de algún factor del medio natural, como, por ejemplo, la tendencia a producirse cambios en el suelo que favorecen el mantenimiento del pastizal. De esta manera se tiene la categoría de pastizales inducidos que prosperan una vez destruidos los bosques de pino y de encino, característicos de las zonas montañosas de México. En altitudes superiores a 2,800 m las comunidades secundarias frecuentemente son similares a la pradera de alta montaña, formadas por gramíneas altas que crecen en extensos macollos. Los géneros *Festuca*, *Muhlenbergia*, *Stipa* y *Calamagrostis* son los más típicos de estos pastizales que, además de su interés ganadero, son aprovechados también a través de la extracción de la raíz de zacatón, materia prima para la elaboración de escobas que proporcionan las partes subterráneas de *Muhlenbergia macroura*. (Ilustración 52).



Ilustración 52. Pastizal inducido, Matamoros, Tamaulipas (INEGI 2017).

Agricultura de temporal. Se clasifica como tal al tipo de agricultura de todos aquellos terrenos donde el ciclo vegetativo de los cultivos depende del agua de lluvia, por lo que su éxito está en función de la cantidad de precipitación y de la capacidad del suelo para retener el agua, su clasificación es independiente del tiempo que dura el cultivo en el suelo, puede llegar a más de diez años, en el caso de los frutales, o bien por periodos dentro de un año como los cultivos de verano. Incluye los que reciben agua invernal como el garbanzo. Estas zonas, para ser clasificadas como de temporal deberán permanecer sembradas al menos un 80% del ciclo agrícola. Pueden ser áreas de monocultivo o de policultivo y pueden combinarse con pastizales o bien estar mezcladas con zonas de riego, lo que conforma un

mosaico complejo, difícil de separar, pero que generalmente presenta dominancia de los cultivos cuyo crecimiento depende del agua de lluvia (Ilustración 53).



Ilustración 53. Agricultura de temporal, Laguna Guerrero, Quintana Roo (INEGI 2017).

Vegetación secundaria. Cuando un tipo de vegetación primaria es eliminada o alterada por diversos factores humanos o naturales, surge una comunidad vegetal significativamente diferente a la original con estructura y composición florística heterogénea. (Ilustraciones 54 y 55).

Diversas vegetaciones secundarias son encontradas dentro de la zona de estudio, donde la vegetación secundaria del uso de suelo nombrado, no es descrita en el documento citado, pero el uso de suelo general, si lo es, por lo tanto debe conocerse primero cual es el concepto al que se llama vegetación secundaria.



**Ilustración 54. Vegetación secundaria arbustiva de selva mediana caducifolia, Maxcanú, Yucatán
(INEGI 2017).**



**Ilustración 55. Vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa caducifolia, Quiriego, Sonora
(INEGI 2017).**

Dos casos de tipos de vegetación secundaria son descritos a continuación. Un ejemplo se encuentra en la vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subcaducifolia, en esta, el nombre como tal no es descrito, pero el uso de suelo general si se puede encontrar. (Ilustración 56)

Selva mediana subcaducifolia. Se desarrolla en regiones cálidas subhúmedas con lluvias en verano, la precipitación anual oscila entre 1,000 y 1,250 mm y la temperatura media anual es de 25.9 a 26.6 °C, con una temporada seca muy bien definida y prolongada. Los climas en los que prospera son los Am (clima tropical monzónico) más secos y preferentemente los Aw (clima tropical húmedo). Se localiza entre los 150 y 1,250 m de altitud. El material parental que sustenta a este tipo de vegetación está constituido por rocas basálticas o graníticas y afloramientos de calizas que dan origen a suelos oscuros, muy someros, con abundantes rocas o bien en suelos grisáceos arenosos y profundos. Los valores de pH son francamente ácidos o cercanos a la neutralidad, aunque sin llegar a 7. En la península de Yucatán, sus suelos, aunque pedregosos, tienen una pequeña capa de materia orgánica formada por la gran cantidad de hojas que dejan caer los árboles; se presentan afloramientos de rocas calcáreas de colores rojizos y blancos, especialmente en la periferia de la sierra de Ticul y en las hondonadas o rejolladas. Al centro de Veracruz, la selva mediana subcaducifolia se presenta en lomeríos con suelos arenosos o ligeramente arcillosos con buen drenaje. Este tipo de selva presenta en las zonas de su máximo desarrollo árboles cuya altura máxima oscila entre 25 y 30 m. La densidad de los árboles es mucho menor que la de las selvas altas perennifolias y subperennifolias; sin embargo, a mitad de la temporada de lluvias, en la época de mayor desarrollo de follaje, la cobertura puede ser lo suficientemente densa para disminuir fuertemente la incidencia de la luz solar en el suelo.



Ilustración 56. Vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subcaducifolia, Santa María

Tonameca, Oaxaca (INEGI 2017).

Selva baja caducifolia. Se desarrolla en condiciones climáticas en donde predominan los tipos cálidos subhúmedos, semisecos o subsecos. El más común es Aw, aunque también se presenta BS y Cw. La temperatura media anual oscila entre los 18 a 28 °C. Las precipitaciones anuales se encuentran entre 300 a 1,500 mm. Con una estación seca bien marcada que va de 6 a 8 meses la cual es muy severa. Se le encuentra desde el nivel del mar hasta unos 1,900 m, rara vez hasta 2,000 m de altitud, principalmente sobre laderas de cerros con suelos de buen drenaje, en la vertiente del golfo no se le ha observado arriba de 800 m la cual se relaciona con las bajas temperaturas que ahí se tienen si se le compara con lugares de igual altitud de la vertiente del pacífico. Los componentes arbóreos de esta selva presentan baja altura, normalmente de 4 a 10 m eventualmente hasta 15 m. El estrato herbáceo es bastante reducido y sólo se puede apreciar después de que ha empezado claramente la época de lluvias y retoñan o germinan las especies herbáceas. Las formas de vidas crasas y suculentas son frecuentes, especialmente en los géneros *Agave*, *puntia*, *Stenocereus* y *Cephalocereus*. (Ilustración 57)



Ilustración 57. Selva Baja Caducifolia, Ciudad Valles, San Luis Potosí (INEGI 2017).

Vegetación Sabanoide. En los estados del Pacífico sur, especialmente Oaxaca y Guerrero pueden observarse extensas superficies cubiertas por un pastizal con elementos arbóreos de los géneros *Byrsonima* y *Curatella*, semejante en su fisonomía a la sabana, pero que se desarrolla sobre laderas de cerros con inclinación variable, a veces bastante pronunciada y con suelos que no tienen indicios de drenaje lento. Se desconoce el determinismo ecológico de esta “vegetación sabanoide” y si bien con frecuencia se notan señales de incendios, estos no se han observado en todos los sitios visitados. A menudo están ligados con rocas metamórficas como sustrato geológico. En Sinaloa se describen

comunidades análogas, así como en Jalisco, Nayarit y Colima, formando una franja estrecha, no del todo continua, a lo largo de la costa pacífica desde Sinaloa hasta el Istmo de Tehuantepec. Como elementos leñosos se citan de Jalisco y Nayarit los géneros *Byrsonima*, *Conostegia*, *Curatella*, *Dodonaea*, *Miconia*, *Quercus*, *Vitex* y entre las gramíneas cabe mencionar: *Aristida*, *Bouteloua*, *Ctenium*, *Andropogon*, *Eragrostis*, *Hilaria*, *Heteropogon*, *Lasiacis*, *Muhlenbergia*, *Oplismenus*, *Panicum*, *Paspalum*, *Pennisetum* y *Trachypogon*. Estas comunidades a menudo forman mosaicos con encinares de clima cálido. (Ilustración 58)



Ilustración 58. Vegetación Sabanoide, San Dionisio del mar, Oaxaca (INEGI 2017).

Un uso de suelo que muestra la carta en la zona de estudio, es nombrado como “Sabanoide”, no obstante el texto lo nombra como “Vegetación Sabanoide” refiriéndose al mismo uso.

Adicionalmente, algunas imágenes de diferentes sitios de la cuenca (Ilustraciones 60 a 66) fueron obtenidas con google earth (Ilustración 59) con el objetivo de ilustrar la abundancia de vegetación de la cuenca, tales se muestran a continuación:

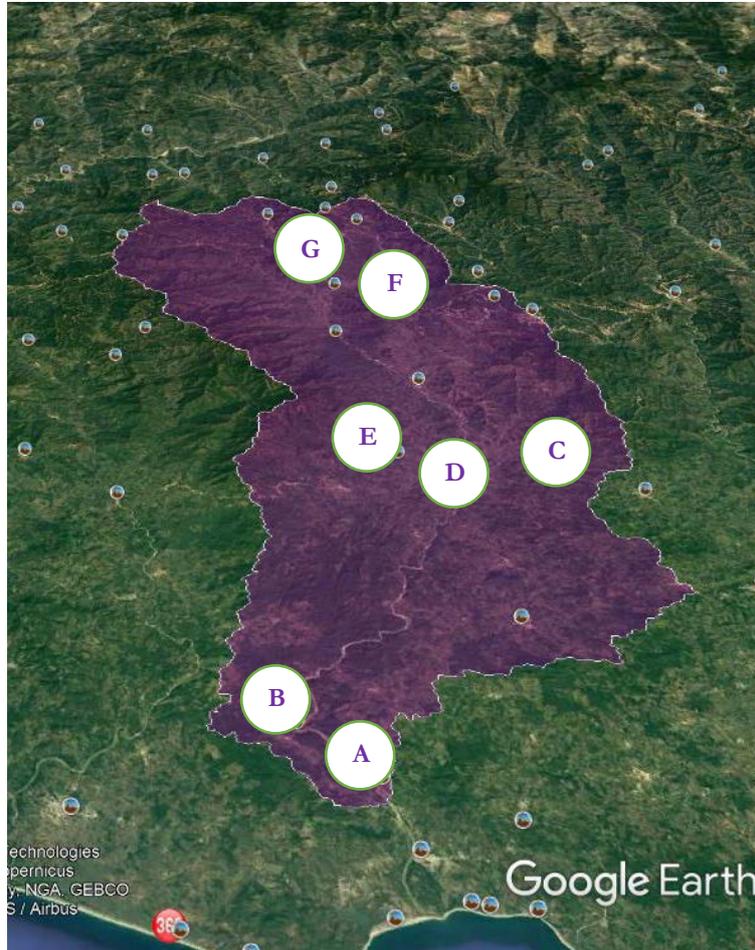


Ilustración 59. Ubicación de las fotografías de diversos sitios de la cuenca (Google, 2019).



Ilustración 60. A) Fotografía del tramo final del Rio Marquelia (Google, 2019).



Ilustración 61. B) Fotografía zona de cascada, Rio Marquelia (Google, 2019).



Ilustración 62. C) Fotografía de pueblo de Yoloxochitl, San Luis Acatlán (Google, 2019).



Ilustración 63. D) Fotografía de zona de río, San Luis Acatlán (Google, 2019).



Ilustración 64. E) Fotografía de Poza Santa, San Luis Acatlán (Google, 2019).



Ilustración 65. F) Fotografía panorámica, Pueblo Hidalgo (Google, 2019).

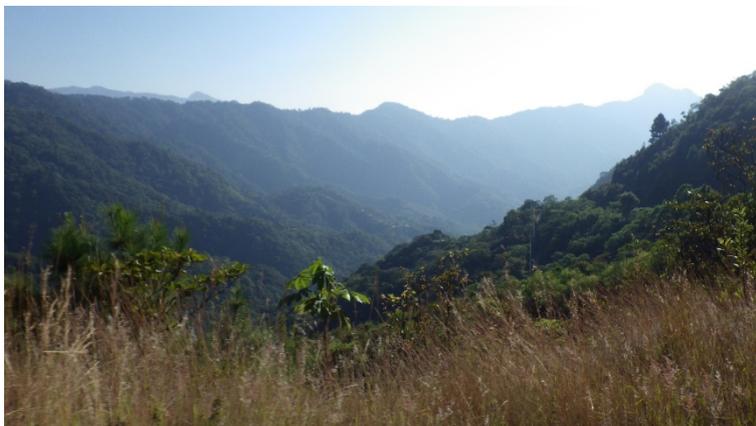


Ilustración 66. G) Fotografía panorámica, Pueblo Hidalgo (Google, 2019).

3.4.6 Coeficientes de fricción de Manning

El escurrimiento superficial puede ser considerado en dos etapas principales: escurrimiento en zonas de aportación y escurrimiento en zonas de propagación. El primero de ellos ocurre sobre las planicies de la cuenca, donde ocurre una parte del ciclo hidrológico. Al iniciar la tormenta si el terreno no cuenta con lluvia antecedente, durante los primeros instantes de la tormenta, el flujo se infiltra a través del suelo de acuerdo con el grado de permeabilidad del mismo y posteriormente cuando se encuentra saturado, se presenta el escurrimiento superficial sobre la planicie en láminas de pocos milímetros de altura. Posteriormente ocurre la segunda etapa del escurrimiento, cuando el flujo es transportado hacia las zonas de propagación, en las cuales la profundidad de este incrementa desde pocos centímetros hasta algunos metros de profundidad; dicho fenómeno ocurre principalmente dentro de canales y cauces de un río. En la modelación hidrológica 2D, lo anterior tiene repercusiones importantes, dado que es necesario emplear un coeficiente de fricción de tipo hidrológico en las zonas de aportación y uno de tipo hidráulico en las zonas de propagación (Ilustración 67).

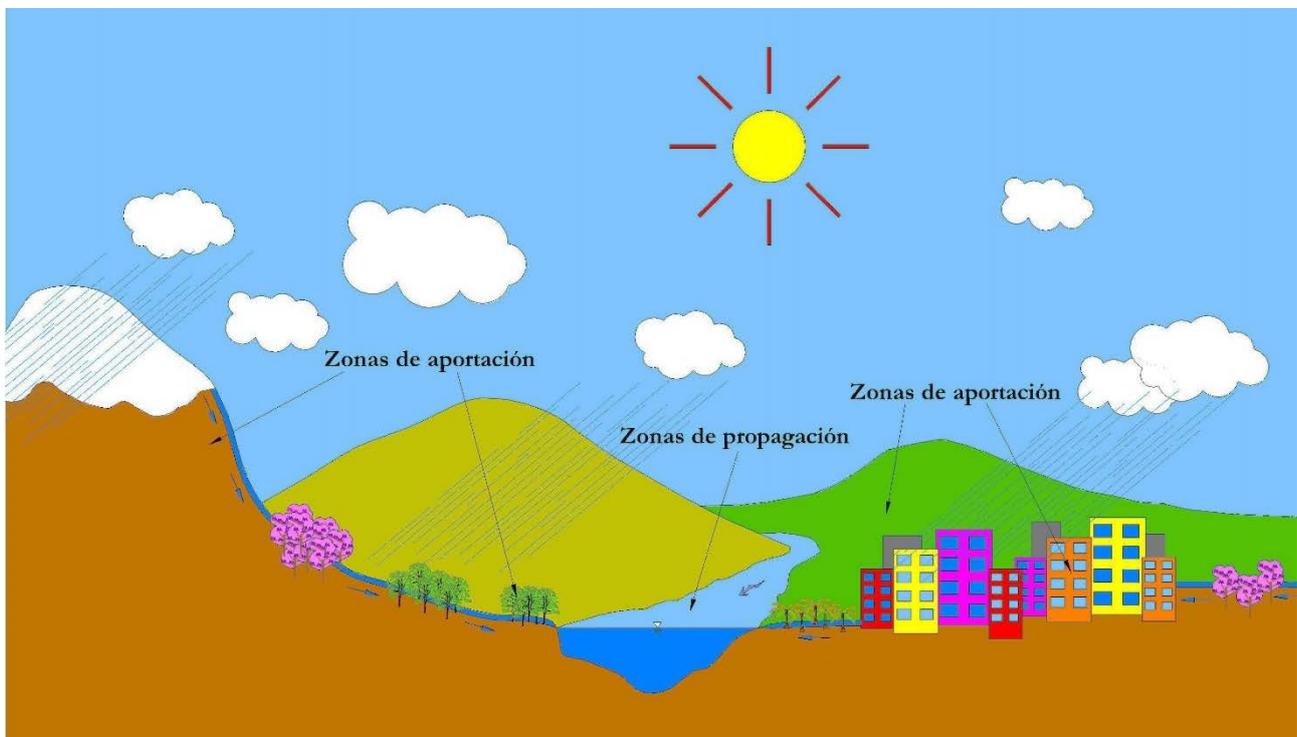


Ilustración 67. Zonas de aportación y zonas de propagación.

Robert Manning propone una ecuación para calcular el flujo en superficie libre, tomando en cuenta la resistencia que opone el suelo, la cual fue adaptándose hasta llegar a la nombrada “ecuación de Manning”.

El punto de mayor importancia de la ecuación, radica en encontrar un coeficiente que describa correctamente la resistencia al flujo. Generalmente este valor es seleccionado de un conjunto de tablas que se han elaborado con base en experimentos de laboratorio de diversas partes del mundo y datos de campo (Tabla 9).

En la mayoría de las ocasiones suele asignarse un solo valor para el dominio completo, aunque existen ocasiones en que el dominio puede ser discretizado, ya que la variación de estos valores puede ser muy alta; tal es el caso de una planicie o zona de aportación, donde los valores comúnmente empleados no son apropiados y se encuentran fuera del rango común de coeficientes de rugosidad de canales y ríos, por lo tanto, puede plantearse la posibilidad de emplear un coeficiente de rugosidad de Manning de tipo hidrológico.

Algunos factores que deben evaluarse para ser considerados en la determinación de un coeficiente de rugosidad, de acuerdo con Chow (2004), son los siguientes:

A. Rugosidad superficial. Depende mucho de las características granulométricas del material del fondo del cauce, que afectan directamente al perímetro en contacto con el flujo. Los materiales finos tienden a concentrar rugosidades bajas, debido a que no generan una pérdida de energía considerable, mientras que la presencia de materiales gruesos ocasiona una pérdida de energía mayor y por lo tanto se requiere un coeficiente más elevado.

B. Vegetación. Además de la presencia del material del fondo, siempre se cuenta con vegetación que crece naturalmente y por distintas temporadas dependiendo del nivel del cauce, que contribuye al incremento del coeficiente cuando la presencia de ella es abundante. La densidad, la altura y la distribución de la vegetación, es un factor para determinar la variación del coeficiente y la elección del valor apropiado.

C. Irregularidad del canal. Los canales no siempre mantienen su forma constante, debido a los montículos, como barras y crestas generadas en el fondo del canal y que pueden variar abruptamente de una sección a otra. Cuando una sección irregular es constante, la pérdida de energía es ligera, mientras que para secciones con cambios de geometría abrupta, se genera una pérdida mayor y consecuentemente debe emplearse un coeficiente de rugosidad con mayor valor.

D. Alineamiento del canal. La forma natural de algunos cauces o las limitantes fisiográficas de un sitio no siempre permiten que un cauce pueda mantener un sentido recto. Los meandros con grandes curvaturas generan una pérdida de energía suave, mientras que para cambios de dirección fuertes la pérdida incrementa, como

consecuencia, tenemos una pérdida de energía mayor en la parte exterior de la curvatura lo cual podría anunciar el uso de diferentes coeficientes de fricción de Manning a lo largo de la sección.

E. Sedimentación y socavación. Los fenómenos de erosión y depósito son un tema de la hidráulica fluvial, es un fenómeno cíclico que altera la forma de fondo del canal, dependiendo de la intensidad de una avenida puede incrementar la profundidad, el caudal y por tanto la velocidad, trayendo consigo arrastre de material y depósito en otros sitios. En general, un proceso de sedimentación tiende a mantener una superficie uniforme, mientras que la socavación genera cambios en el fondo que incrementan la pérdida de energía, tal como sucede en la parte posterior de las pilas de los puentes.

F. Obstrucción. En algunas ocasiones la corriente fuerte puede traer arrastre de material suspendido que, al bajar la intensidad, tiende a depositarse. Puede suceder con troncos, rocas o basura. Adicionalmente las pilas y los estribos generan una reducción en la sección geométrica del cauce que incrementa la pérdida de energía. Estos factores deben ser tomados en cuenta para la elección del tipo de material que representa mejor la n de la superficie en contacto con el agua.

G. Tamaño y forma del canal. Un cambio de sección en el canal puede ocasionar un cambio en el radio hidráulico de la sección, a pesar de ello dependiendo de las condiciones, el coeficiente de fricción puede mantenerse constante entre estas y considerarse solamente una pérdida local.

H. Cambio estacional. La hierba, maleza y depósito de material en el fondo son cambios que pueden variar de una temporada a otra, mientras que la temporada de estiaje el agua fluirá en menor cantidad y habrá menor abundancia vegetal, en época de avenidas incrementará junto con el arrastre de materiales.

I. Material en suspensión y carga de lecho. En algunas ocasiones existe material flotante al interior del cauce, vegetación y fauna que contribuyen en una ligera pérdida de energía, ya que consumen parte del área hidráulica del canal.

J. Nivel y caudal. Cuando los niveles de agua son pequeños, el fluido es más sensible a la rugosidad de la superficie, mientras que para niveles altos, los mismos efectos son despreciables. En ocasiones cuando el agua rebasa los niveles de las márgenes, se pone en contacto con planicies propensas a inundación, y debido a su nivel bajo, tienen consecuentemente un coeficiente de rugosidad de Manning superior al de cauce. Por lo tanto en planicies de inundación el valor de fricción Manning tiende a ser mucho mayor, siempre tomando en cuenta el nivel de sumergencia de la maleza en zonas

naturales y los obstáculos encontrados en zonas urbanas.

Las consideraciones mencionadas hacen referencia a las características de ríos y canales, no obstante la idea principal radica en las características de la cobertura del suelo, que en este estudio son aplicadas a zonas de aportación de pequeñas láminas del flujo.

Uno de los puntos de mayor relevancia se muestra en el apartado *J*, en este se indica que el valor *n* empleado para una planicie o zona de aportación, debe ser siempre varias veces mayor que un valor empleado dentro del rango de valores comunes para ríos y canales, es aquí que se propone emplear para estos sitios coeficientes de rugosidad de Manning de tipo hidrológico.

Adicionalmente debe considerarse que los elementos del terreno que propician un efecto de retraso del flujo sobre la superficie, incrementan siempre el valor del coeficiente de rugosidad de Manning y por lo tanto crean una disminución en la velocidad, mientras que superficies que tienden a ser más lisas o menos rugosas tienen un coeficiente de rugosidad menor y por lo tanto un incremento en la velocidad de propagación del flujo.

Tabla 9. Coeficientes de fricción de Manning para corrientes naturales (Chow 2004).

| CORRIENTES MENORES, ANCHO SUPERFICIAL EN NIVEL CRECIENTE < 30 m | | Mínimo | Normal | Máximo |
|--|---|---------------|---------------|---------------|
| A | CORRIENTES EN PLANICIES | | | |
| 1 | Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos | 0.025 | 0.03 | 0.033 |
| 2 | Igual al anterior, pero con más piedras y malezas | 0.03 | 0.035 | 0.04 |
| 3 | Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena | 0.033 | 0.04 | 0.045 |
| 4 | Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras | 0.035 | 0.045 | 0.05 |
| 5 | Igual al anterior pero con niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes | 0.04 | 0.048 | 0.055 |
| 6 | Igual al 4, pero con más piedras | 0.045 | 0.05 | 0.06 |
| 7 | Tramos lentos, con malezas y pozos profundos | 0.05 | 0.07 | 0.08 |
| 8 | Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos | 0.075 | 0.1 | 0.15 |
| B | CORRIENTES MONTAÑOSAS, SIN VEGETACIÓN EN EL CANAL, MARGENES USUALMENTE EMPINADAS, ÁRBOLES Y MATORRALES A LO LARGO DE LAS MARGENES SUMERGIDAS EN NIVELES ALTOS | | | |
| 1 | Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas | 0.03 | 0.04 | 0.05 |
| 2 | Fondo: cantos rodados con rocas grandes | 0.04 | 0.05 | 0.07 |
| | PLANICIES DE INUNDACION | Mínimo | Normal | Máximo |
| A | PASTIZALES SIN MATORRALES | | | |
| 1 | Pasto corto | 0.025 | 0.03 | 0.035 |
| 2 | Pasto alto | 0.03 | 0.035 | 0.05 |
| B | AREAS CULTIVADAS | | | |
| 1 | Sin cultivo | 0.02 | 0.03 | 0.04 |
| 2 | Cultivos en línea maduros | 0.025 | 0.035 | 0.045 |
| 3 | Campos de cultivo maduros | 0.03 | 0.04 | 0.05 |
| C | MATORRALES | | | |

| | | | | | |
|---|---|--|---------------|---------------|---------------|
| | 1 | Matorrales dispersos, mucha maleza | 0.035 | 0.05 | 0.07 |
| | 2 | Pocos matorrales y árboles en invierno | 0.035 | 0.05 | 0.06 |
| | 3 | Matorrales medios a densos en verano | 0.04 | 0.06 | 0.08 |
| | 4 | Matorrales medios a densos en invierno | 0.045 | 0.07 | 0.11 |
| | 5 | Matorrales medios a densos en verano | 0.07 | 0.1 | 0.16 |
| D | ARBOLES | | | | |
| | 1 | Sauces densos, rectos en verano | 0.11 | 0.15 | 0.2 |
| | 2 | Terreno limpio, con troncos sin retoños | 0.03 | 0.04 | 0.05 |
| | 3 | Igual que el anterior pero con una gran cantidad de retoños | 0.05 | 0.06 | 0.08 |
| | 4 | Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por debajo de las ramas+ | 0.08 | 0.1 | 0.12 |
| | 5 | Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas | 0.1 | 0.12 | 0.16 |
| CORRIENTES MAYORES, ANCHO SUPERFICIAL EN NIVEL CRECIENTE > 30 m | | | Mínimo | Normal | Máximo |
| A | Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales | | 0.025 | ... | 0.06 |
| B | Sección irregular y rugosa | | 0.035 | ... | 0.1 |

En México, Campos (2010) propone utilizar algunos valores de resistencia al flujo para planicies de inundación (Tabla 10), donde debido al tamaño reducido de la lámina del flujo, deben emplearse valores más altos que los comunes, ya que a diferencia de un cauce donde se impacta mayormente sobre el flujo en contacto con las paredes del cauce, en una planicie se afecta toda la profundidad dentro de la superficie que cubre.

Tabla 10. Valores de resistencia al flujo sobre el terreno (Campos-Aranda 2010).

| Tipo de superficie | n |
|--|-----------|
| Pavimentos lisos | 0.02 |
| Asfalto o concreto | 0.05-0.15 |
| Suelo desnudo compacto, sin piedras | 0.1 |
| Terreno moderadamente rugoso o cobertura de pasto disperso | 0.3 |
| Cobertura dispersa de césped | 0.2 |
| Cobertura moderada de césped | 0.4 |
| Cobertura densa de césped | 0.17-0.8 |
| Pasto denso | 0.17-0.3 |
| Pasto Bermuda | 0.30-0.48 |
| Bosque maderable | 0.6 |

Por otra parte, la metodología de inspección visual (Kalyanapu et al. 2009), señala que en grandes extensiones con características similares, se puede emplear un mismo coeficiente de fricción de Manning, aunque puede resultar un trabajo complicado cuando el área de la cuenca es demasiado grande. Algunos coeficientes que fueron obtenidos por esta metodología se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Coeficientes de fricción obtenidos por inspección visual (Kalyanapu et al. 2009).

| Descripción de la superficie | n |
|-------------------------------|-------|
| Asfalto | 0.012 |
| Concreto | 0.013 |
| Madera | 0.014 |
| Césped | 0.15 |
| Pasto denso y algunos arboles | 0.2 |
| Árboles y maleza | 0.4 |

Finalmente, para emplear sistemas de información geográfica y sensores remotos se debe contar con la cartografía digital de uso de suelo de la región (Kalyanapu et al. 2009). A través de éste se puede realizar una clasificación tomando en cuenta la descripción física de cada uso de suelo, para poder asignar un coeficiente de fricción correspondiente a cada uno de ellos. Algunos valores obtenidos por este método se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Coeficientes de fricción de Manning obtenidos por SIG y mapas de uso de suelo (Kalyanapu et al. 2009).

| Descripción del uso de suelo | n |
|--------------------------------|--------|
| bosque caducifolio | 0.36 |
| bosque verde | 0.32 |
| bosque mixto | 0.4 |
| arbusto, matorral | 0.4 |
| pastizales herbáceos | 0.368 |
| pasto, heno | 0.325 |
| humedales leñosos | 0.086 |
| humedales herbáceos emergentes | 0.1825 |

La resolución, y el constante cambio de los usos de suelo, así como el cambio en la cobertura vegetal de un sitio son algunos de los factores que pueden limitar el empleo de esta metodología. Aunque la determinación de los coeficientes es el tema de mayor complejidad, es una de las técnicas que actualmente son más accesibles para asignar coeficientes de manera rápida.

Como resultado de las descripciones de uso de suelo y vegetación de la zona de estudio que presenta INEGI, se realizó una aproximación de la cantidad de vegetación que abunda dentro de la cuenca del río Marquelia (INEGI 2017).

Empleando los criterios de Chow 2004, Kalyanapu et al. 2009 y Campos-Aranda 2010, fue posible realizar una propuesta aproximada de valores para coeficientes de rugosidad de Manning de tipo hidrológico, los cuales son empleados para el cálculo con el modelo

distribuido. Debido a que el coeficiente de rugosidad es el parámetro de calibración del modelo distribuido, se concentraron los 19 usos de suelo en solo 7 (Ilustración 68) que cuentan con características similares (Kalyanapu et al. 2009). Esta distribución es separada de las zonas de propagación de la cuenca, ya que adicionalmente se considera un coeficiente de fricción para el río (Ilustración 69). En este caso el valor empleado en zonas de propagación, es mucho mayor que los valores empleados comúnmente en ríos; Chow (2004) propone un valor $n=0.1$ máximo para corrientes mayores que 30 m con sección irregular y rugosa, no obstante el tamaño de la discretización de los elementos que en este caso fue de 100 m, permite contar con diversos factores que pueden ocurrir en una distancia tan extensa, tales como sinuosidad, vegetación, cambios de topografía, etc. adicionalmente se debe mencionar que la combinación de los valores propuestos no es única y que para esta combinación ya no es posible disminuir el coeficiente empleado en el Río. Los valores empleados y su porcentaje de participación dentro de la cuenca se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Uso de suelo, influencia y coeficiente de fricción empleados en la cuenca del río Marquelia.

| Uso de suelo | Área km ² | % Área | n |
|-------------------------|----------------------|--------|-------|
| Vegetación | 493.03 | 48.51% | 0.300 |
| Bosque de pino y encino | 246.25 | 24.23% | 0.450 |
| Río | 108.76 | 10.70% | 0.180 |
| Pastizal | 107.75 | 10.60% | 0.150 |
| Agricultura de temporal | 55.1 | 5.42% | 0.300 |
| Asentamientos urbanos | 3.61 | 0.36% | 0.110 |
| Sabanoide | 1.88 | 0.19% | 0.300 |
| Cuerpo de agua | 0.06 | 0.01% | 0.150 |

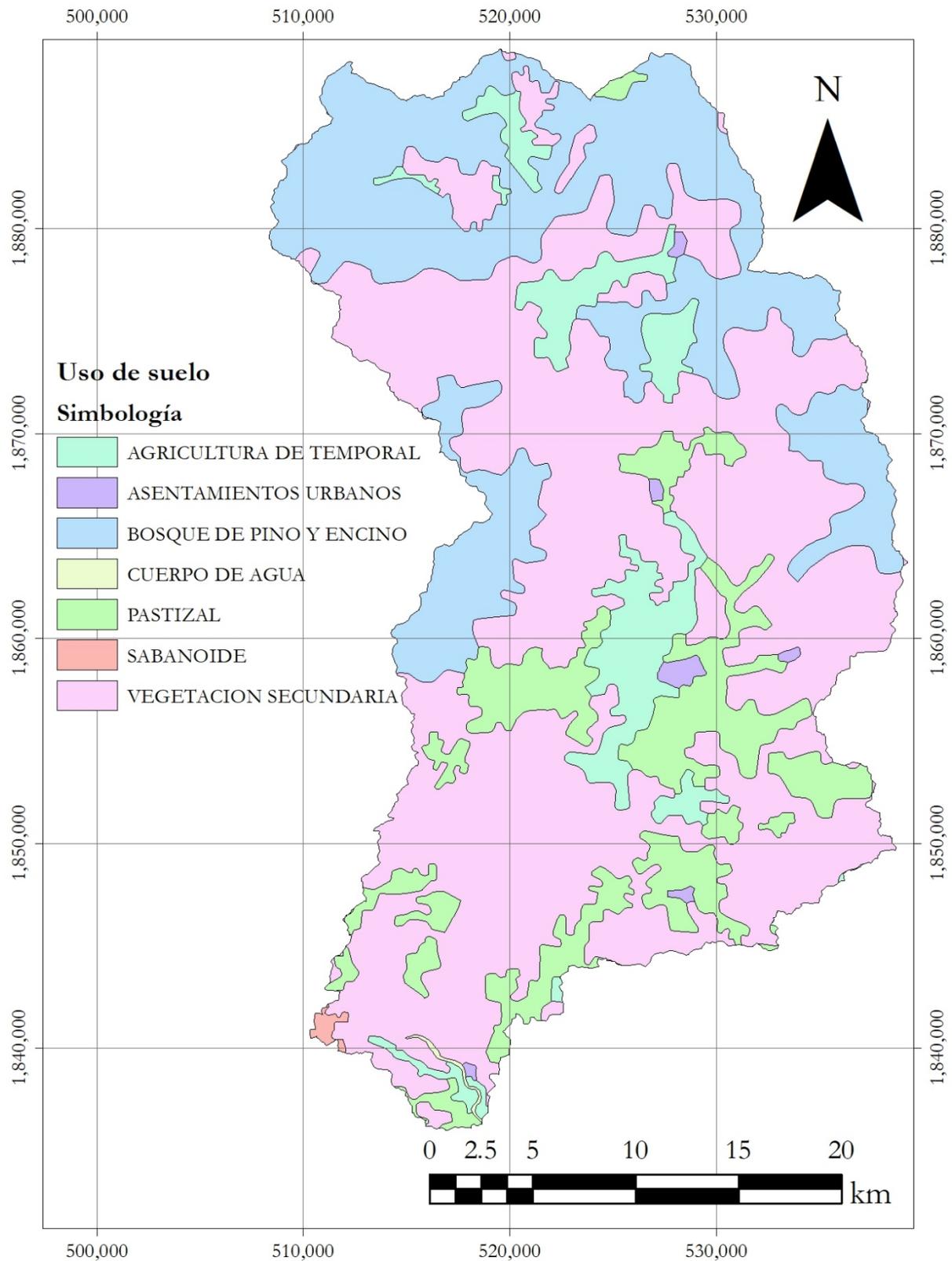


Ilustración 68. Usos de suelo empleados en el modelo distribuido.

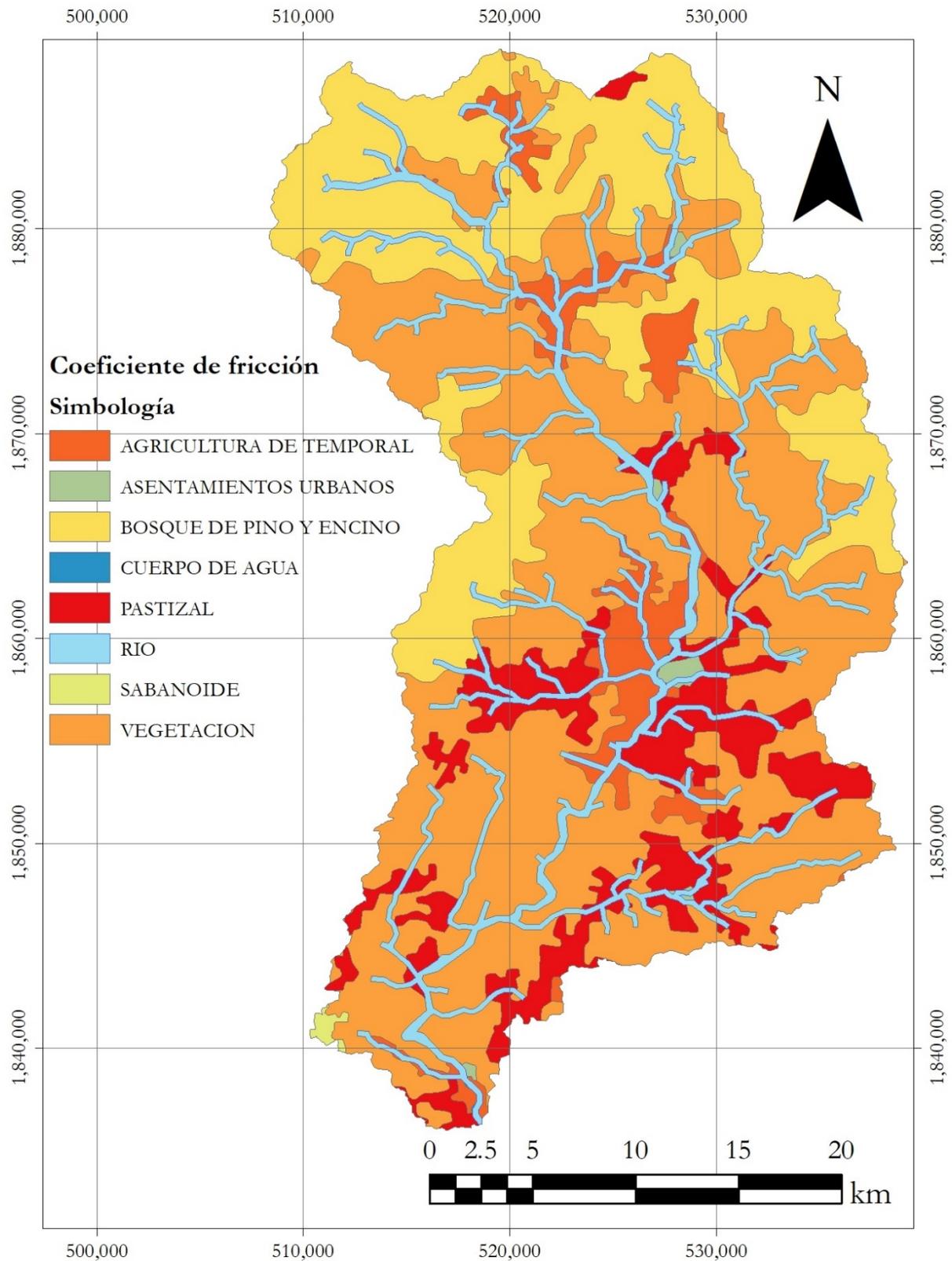


Ilustración 69. Distribución de los coeficientes de fricción.

3.4.7 Consideraciones de cálculo

Al generar la malla en los elementos geométricos existe información del modelo digital de elevaciones que llega a perderse, es decir, de un tamaño de malla a otro, pueden encontrarse configuraciones con ligeras diferencias en el mismo sitio y por tanto la topografía original no es la misma ya que se pierde detalle. Por esta razón, en el cálculo se activó el llenado de depresiones de Iber para corregir almacenamientos con profundidades fuera de rango sobre la malla. El límite seco-mojado fue fijado en 0.0001 m para permitir mayor interacción entre elementos de cálculo con láminas pequeñas; esta consideración sumó volumen de escurrimiento que debe ser considerado en el cálculo y adicionalmente permitió estabilizar las oscilaciones entre el llenado y vaciado de elementos. El esquema numérico utilizado fue DHD (Cea y Bladé, 2015), este simula el fenómeno de onda dinámica con un coste computacional menor sin tener que reducir demasiado el paso de tiempo así como el tamaño de la malla, adicionalmente funciona adecuadamente en modelos de láminas de agua pequeñas como los de tipo hidrológico, suavizando los cambios de régimen y estabilizando las pérdidas de energía. Para el cálculo se usó Iber plus (García-Feal et al. 2018) para activar paralelización con tarjeta gráfica y disminuir el tiempo de cómputo.

Se estableció una condición inicial de 0.15 m de profundidad sobre todo el modelo, debido a que dentro del dominio encontramos lagos, estanques, embalses, etc. que no fueron considerados en el escurrimiento de la precipitación efectiva. Con esto se permitió que estas depresiones naturales del terreno, fueran cubiertas de agua durante los instantes iniciales de cálculo y sin contribuir con el escurrimiento directo, logrando que la precipitación efectiva escurriera sin quedar estancada sobre dichos sitios; por tanto aunque se produjo un escurrimiento ficticio con la condición inicial, este no fue considerado como parte del cálculo. Consecuentemente fue añadido tiempo adicional al periodo de cálculo, de tal modo que la lluvia efectiva ingresó al modelo una vez que el escurrimiento de la condición inicial salió del mismo. Los hidrogramas de escurrimiento directo tuvieron una duración aproximada de 2 días y se imprimieron resultados considerando intervalos de resultados de 900 s, es decir, cada 15 min.

El equipo empleado fue un ordenador portátil marca HP que cuenta con procesador Core I7 de séptima generación y 24 GB de memoria Ram. Al tratarse de modelos con numerosos elementos de malla y varios días de simulación, se requiere contar con suficiente espacio en disco para almacenar los 12 modelos generados.

4 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos, es decir los hidrogramas asociados a distintos Tr , con las consideraciones descritas anteriormente, tanto con la estación hidrométrica como con el método agregado y distribuido se muestran en las Ilustraciones 70 a 81.

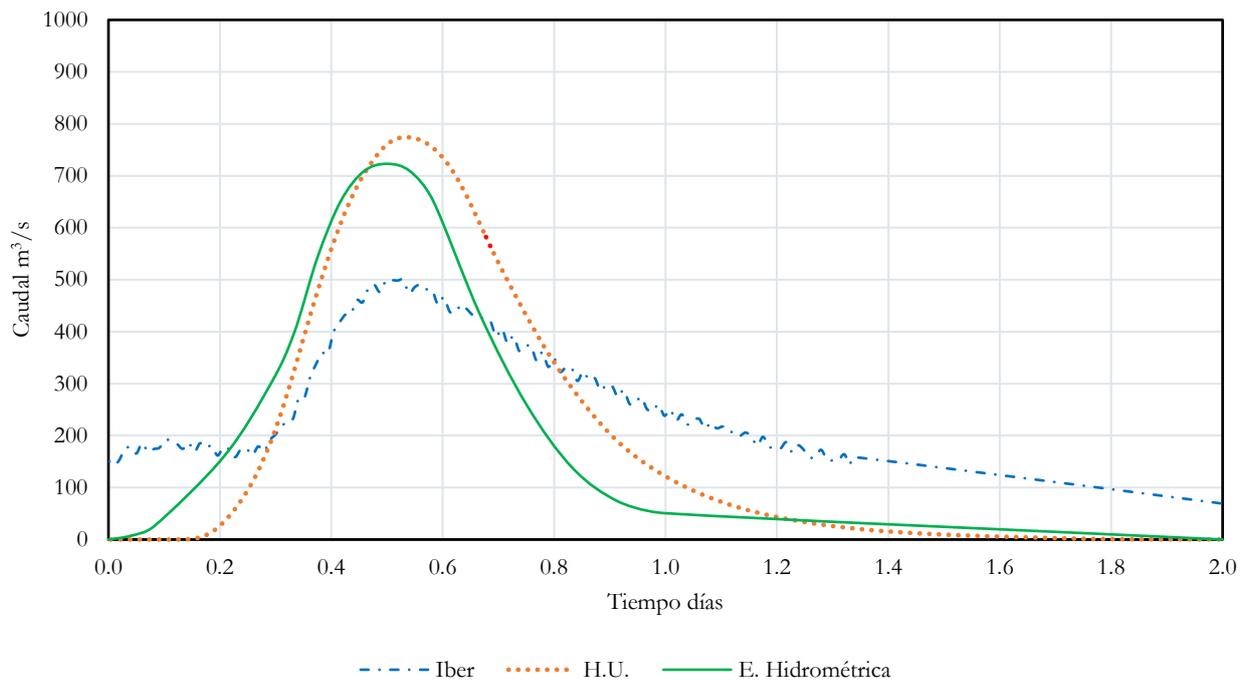


Ilustración 70. Comparación de hidrogramas, $Tr=2$ años.

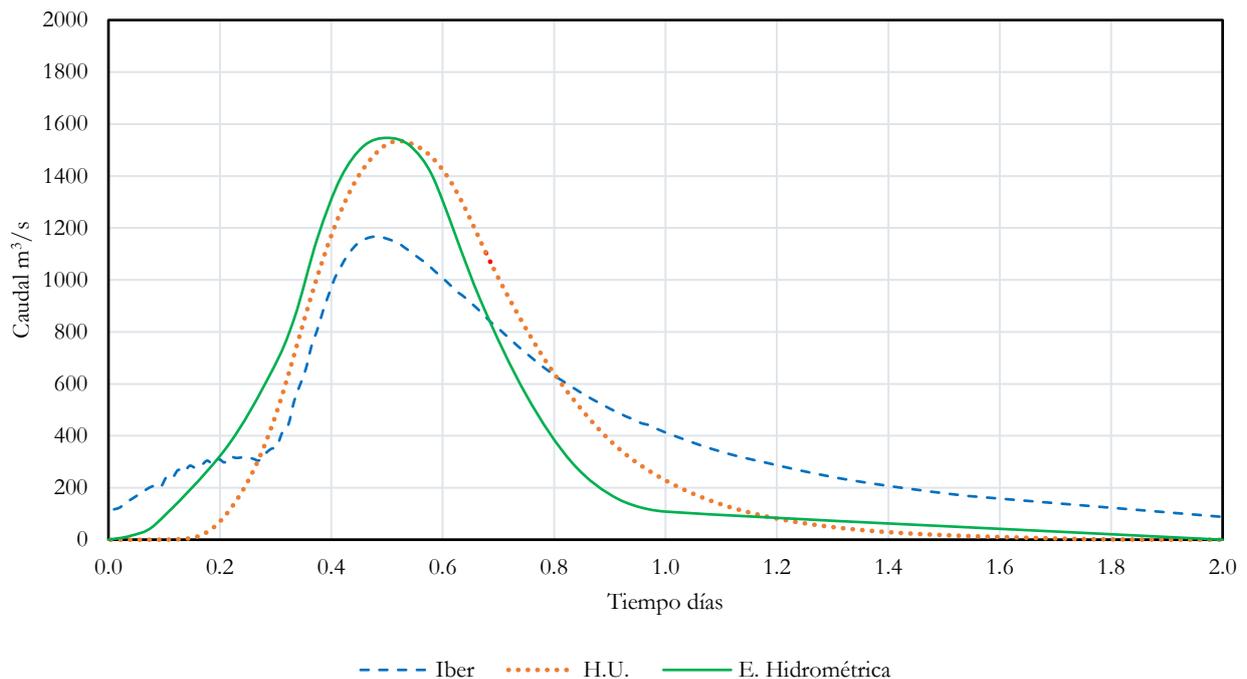


Ilustración 71. Comparación de hidrogramas, $Tr=5$ años.

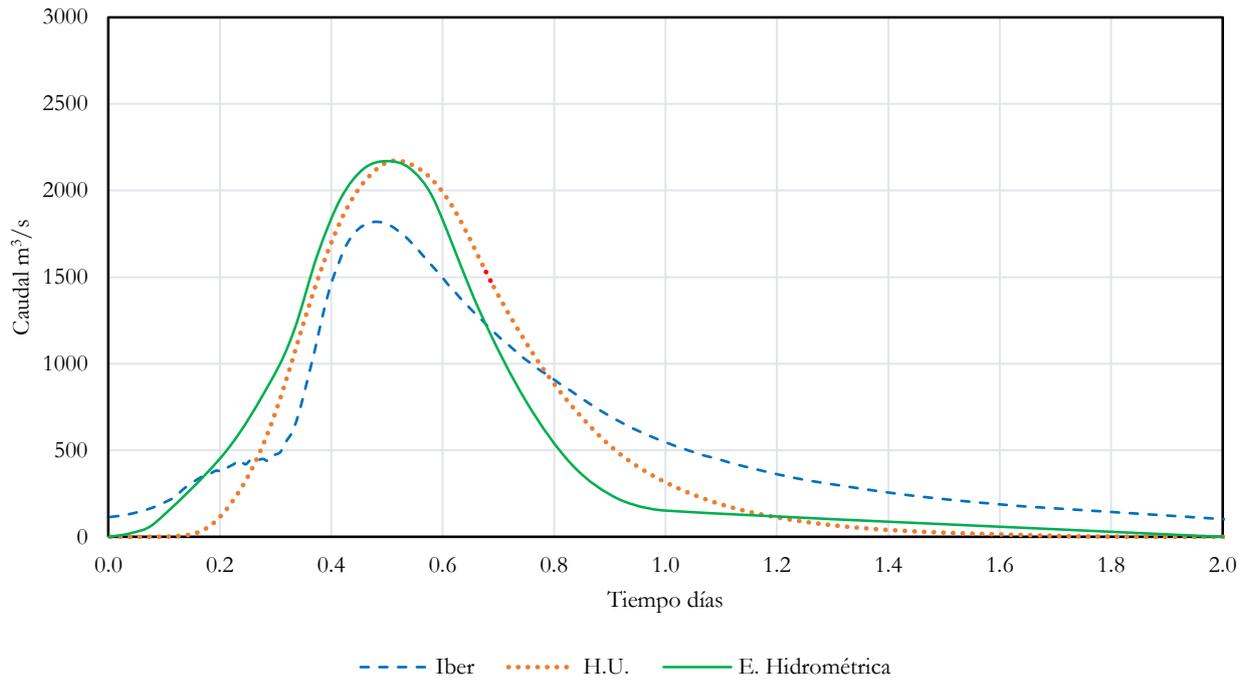


Ilustración 72. Comparación de hidrogramas, $T_r=10$ años

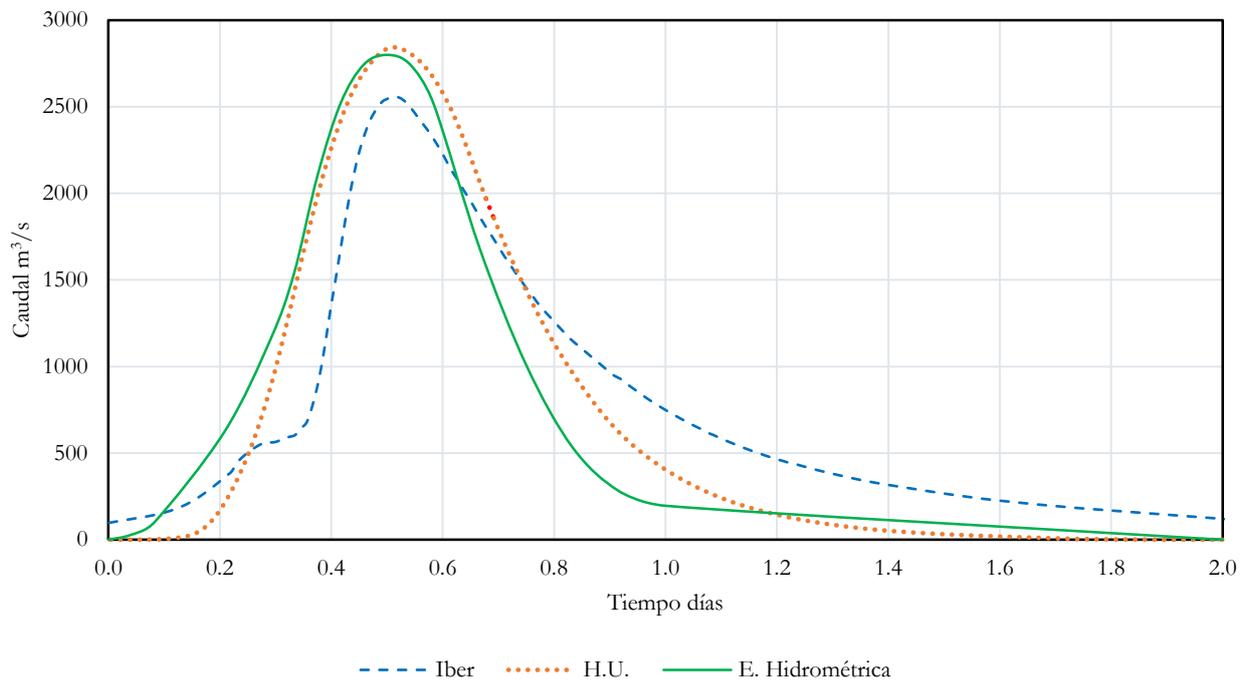


Ilustración 73. Comparación de hidrogramas, $T_r=20$ años.

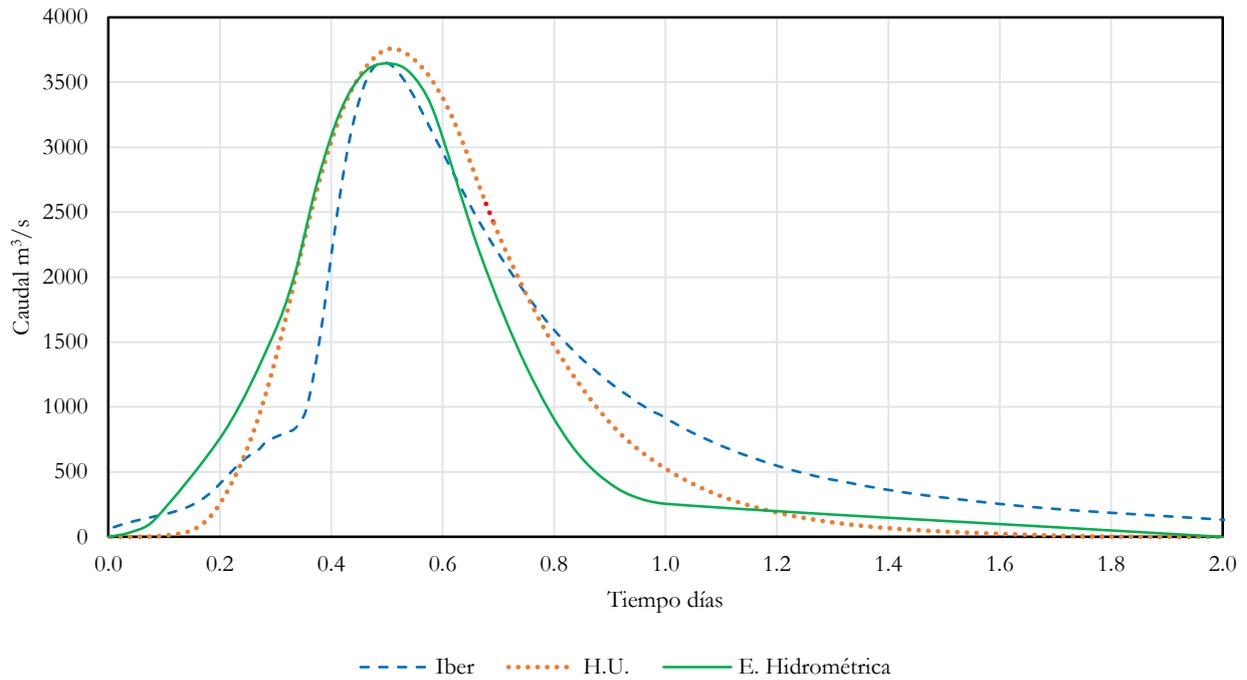


Ilustración 74. Comparación de hidrogramas, $T_r=50$ años.

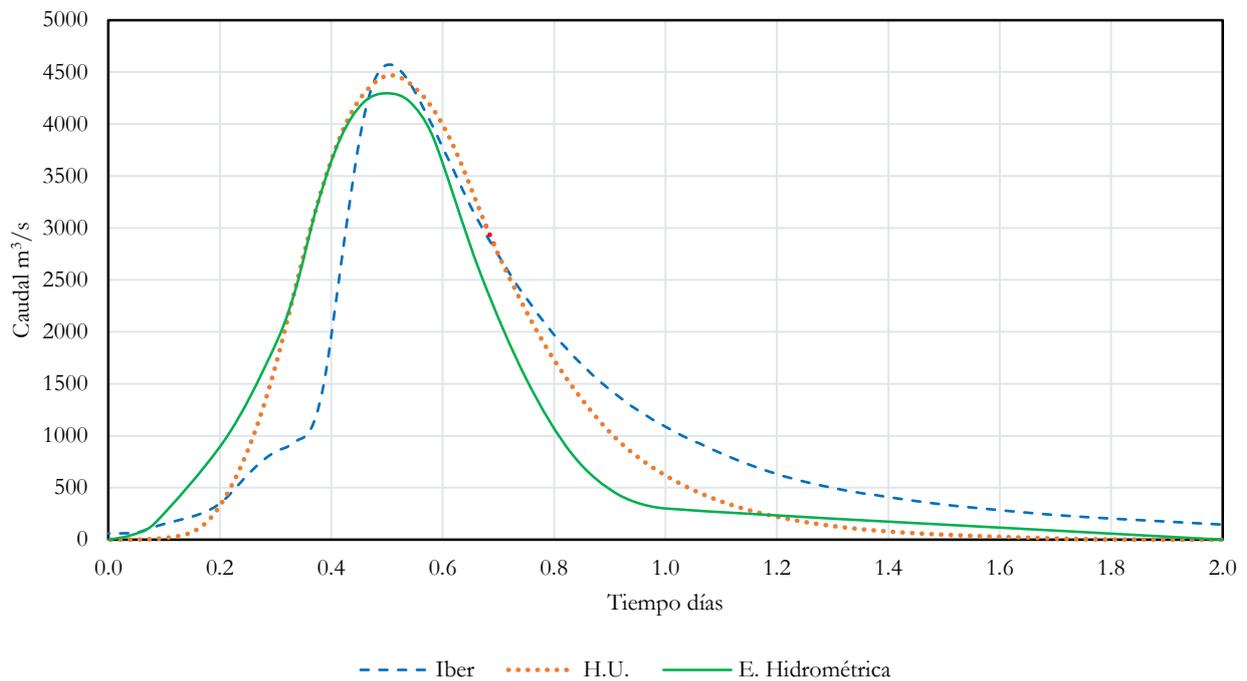


Ilustración 75. Comparación de hidrogramas, $T_r=100$ años

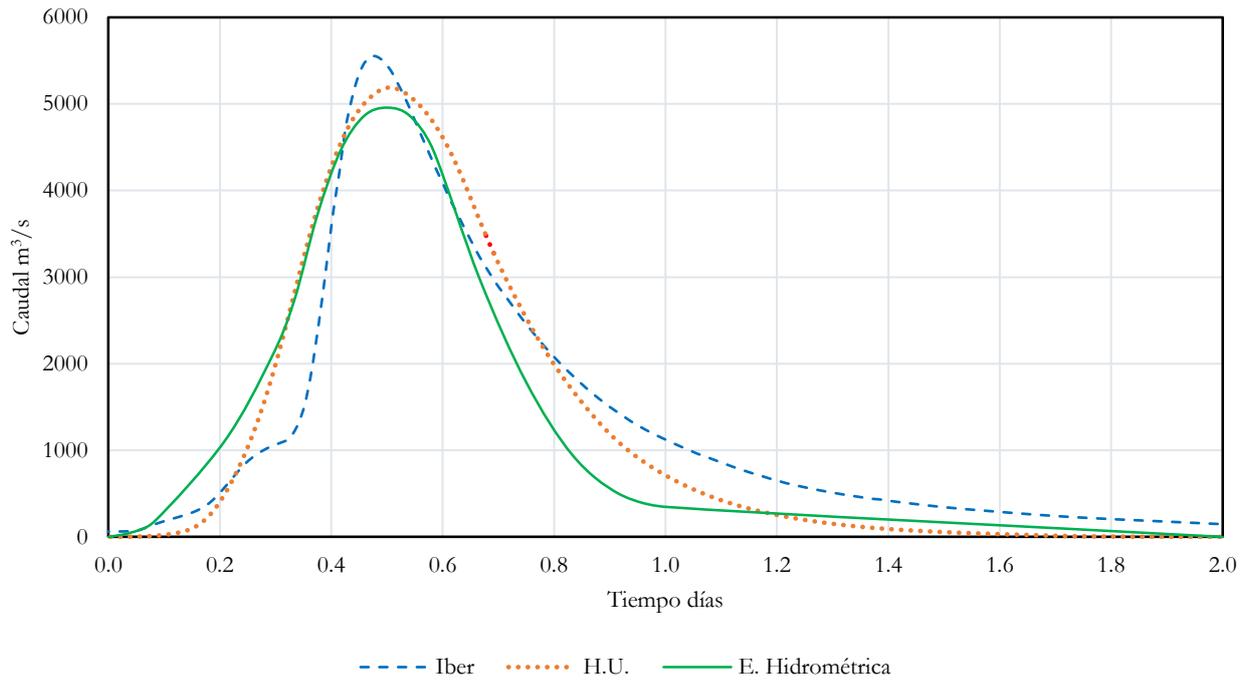


Ilustración 76. Comparación de hidrogramas, $T_r= 200$ años.

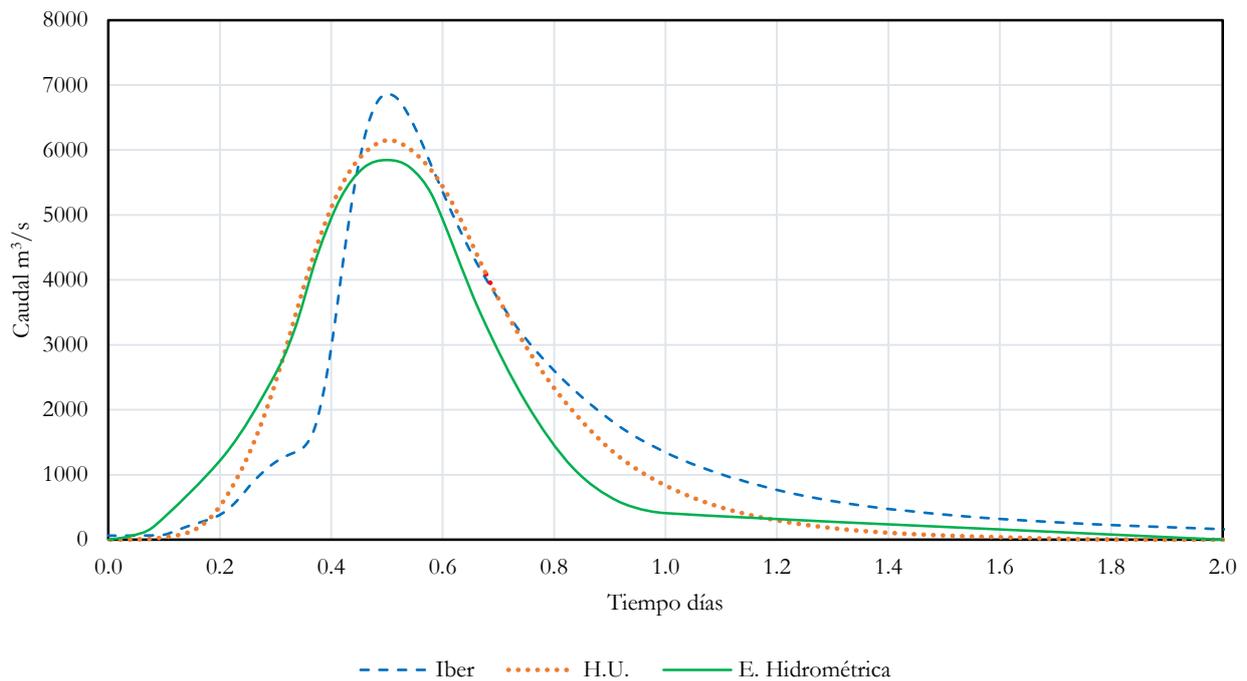


Ilustración 77. Comparación de hidrogramas, $T_r= 500$ años.

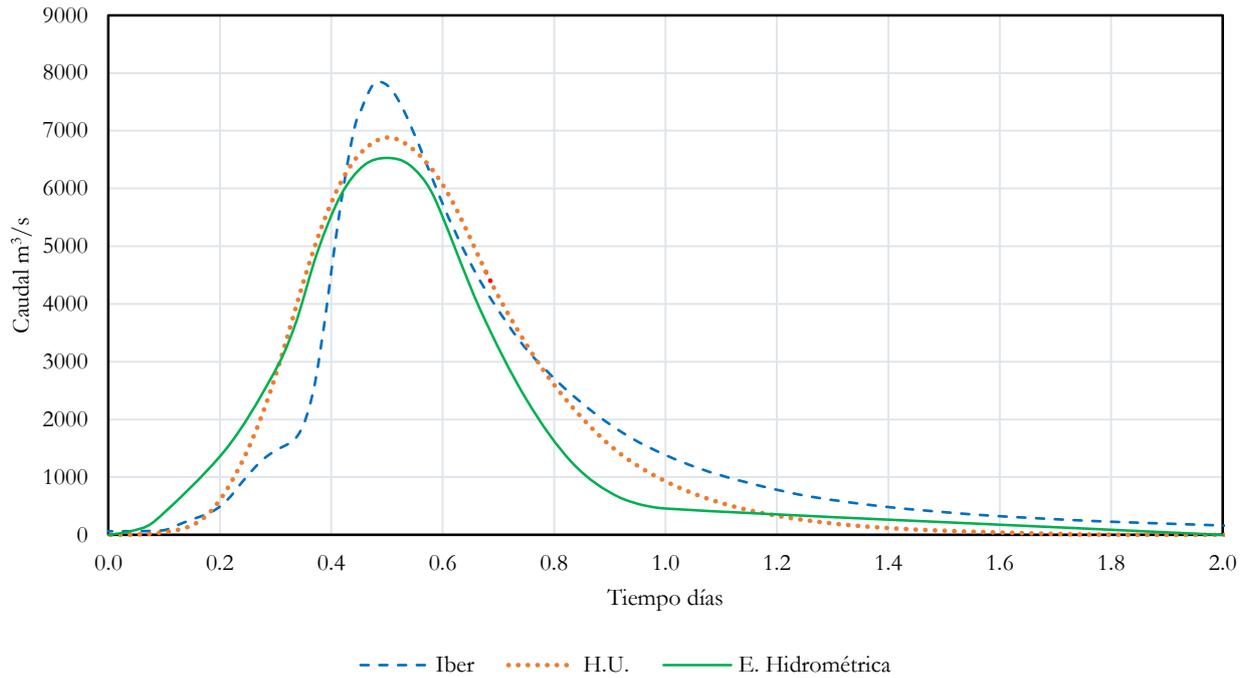


Ilustración 78. Comparación de hidrogramas, $Tr=1,000$ años.

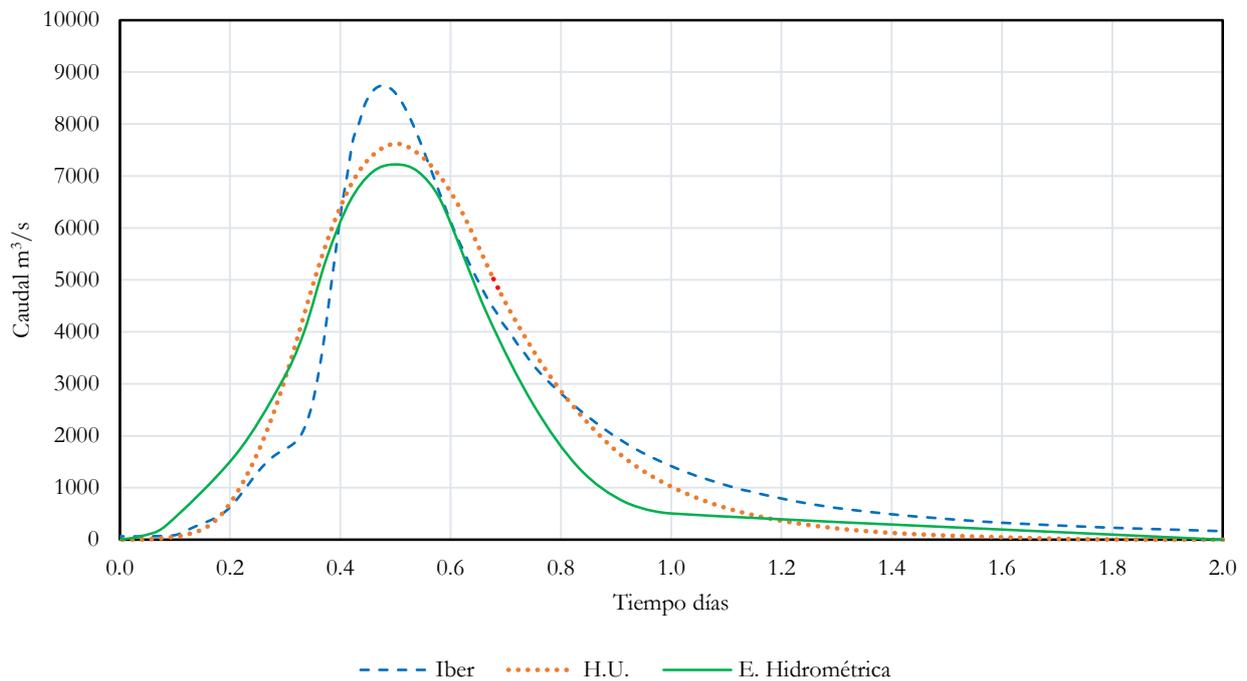


Ilustración 79. Comparación de hidrogramas, $Tr=2,000$ años.

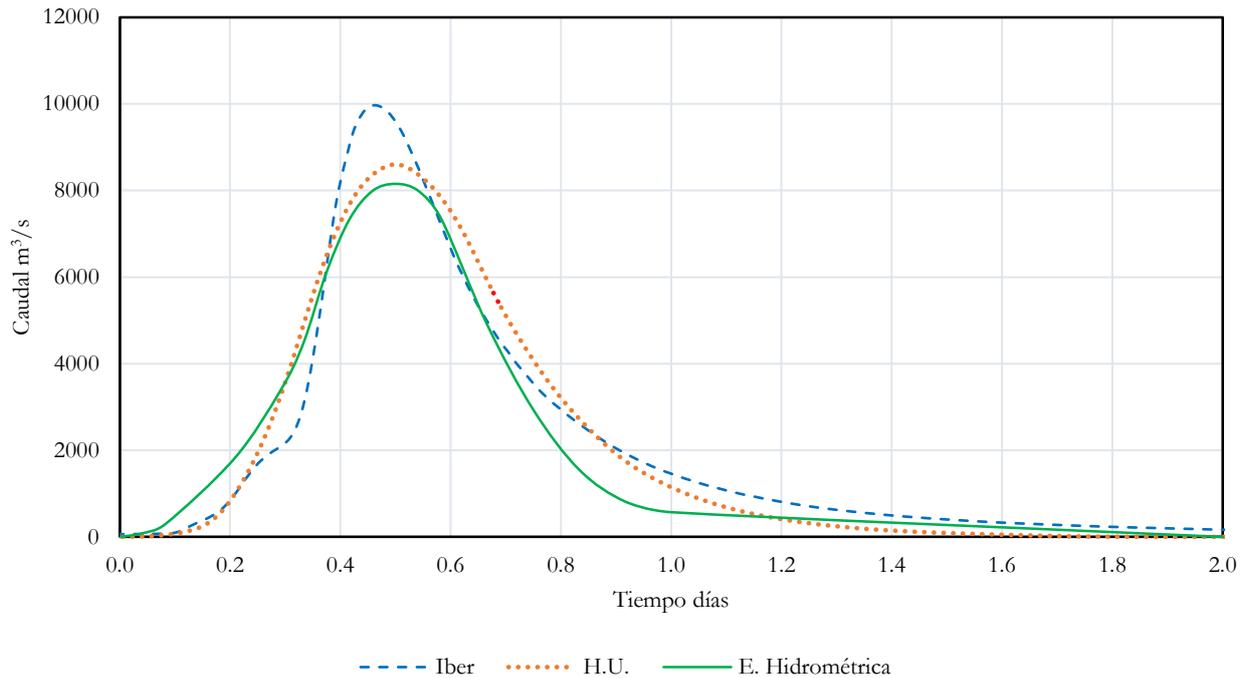


Ilustración 80. Comparación de hidrogramas, $T_r= 5,000$ años.

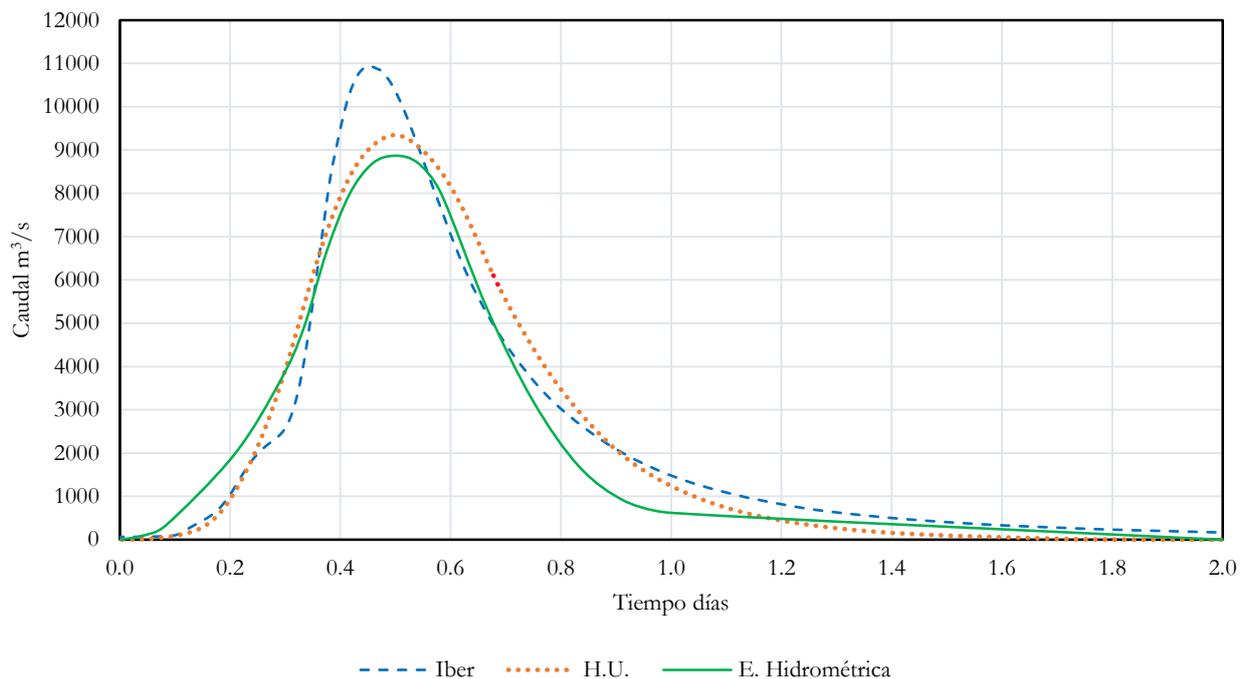


Ilustración 81. Comparación de hidrogramas, $T_r= 10,000$ años.

Todos los hidrogramas calculados con Iber, presentaron un primer pico durante las primeras horas y un segundo pico horas después cuando este fue considerado como el caudal punta de cada análisis. Debido a que se simuló una lluvia constante sobre toda la cuenca, el

primer pico puede atribuirse a la forma de la cuenca. El hidrograma para $Tr= 2$ años, tiene una forma achatada debido a que se trató de una lluvia escasamente intensa, sin embargo los demás hidrogramas tienen una forma más parecida entre sí, ya que la lluvia comenzó a incrementar y a generar mayor escurrimiento superficial.

Con el caudal pico y el volumen de los hidrogramas y distintos periodos de retorno se construyeron las curvas $Tr-Q$ (Ilustración 82) y las curvas $Tr-Vol$ (Ilustración 83)

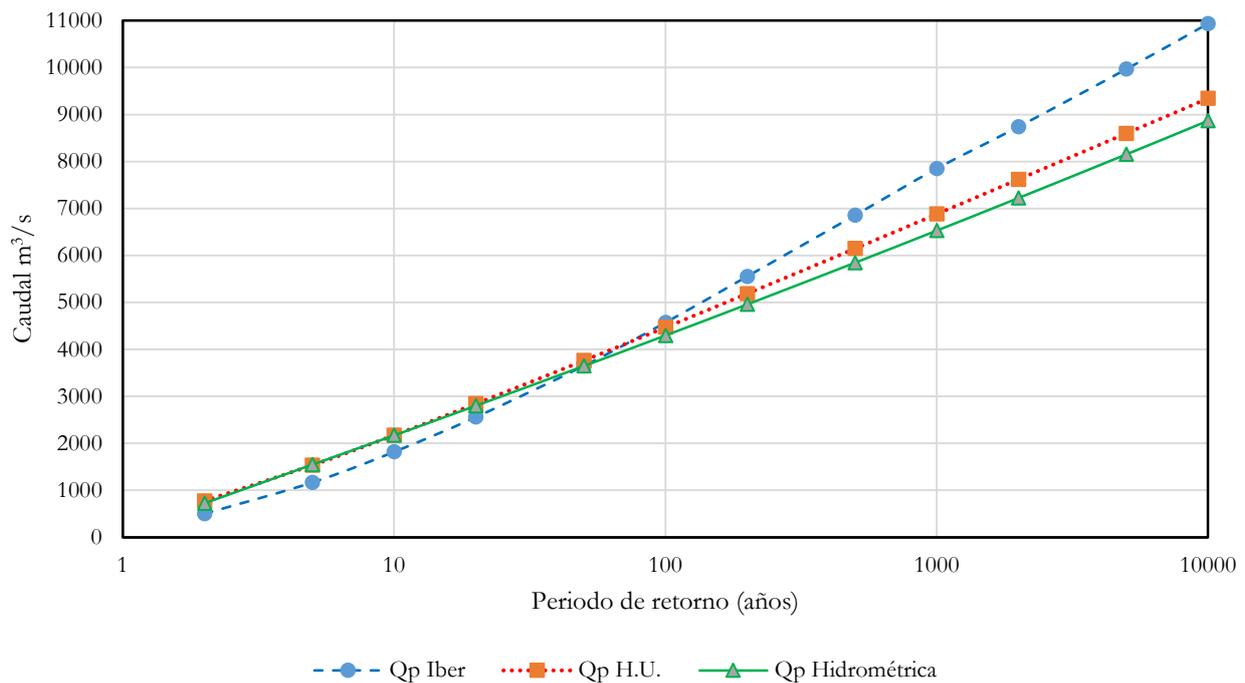


Ilustración 82. Comparación de caudales pico, Cuenca del río Marquelia.

Los hidrogramas de 2 a 20 años tienen valores de caudal punta menores que los valores de la estación hidrométrica y que los calculados con el método agregado; el hidrograma de $Tr= 50$ años, es el valor más cercano a los valores de la estación hidrométrica dado que fue el utilizado para la calibración y del H.U., mientras que para periodos de retorno mayores que 50 años, todos los modelos de Iber dan resultados de caudal punta superiores (Ilustración 82).

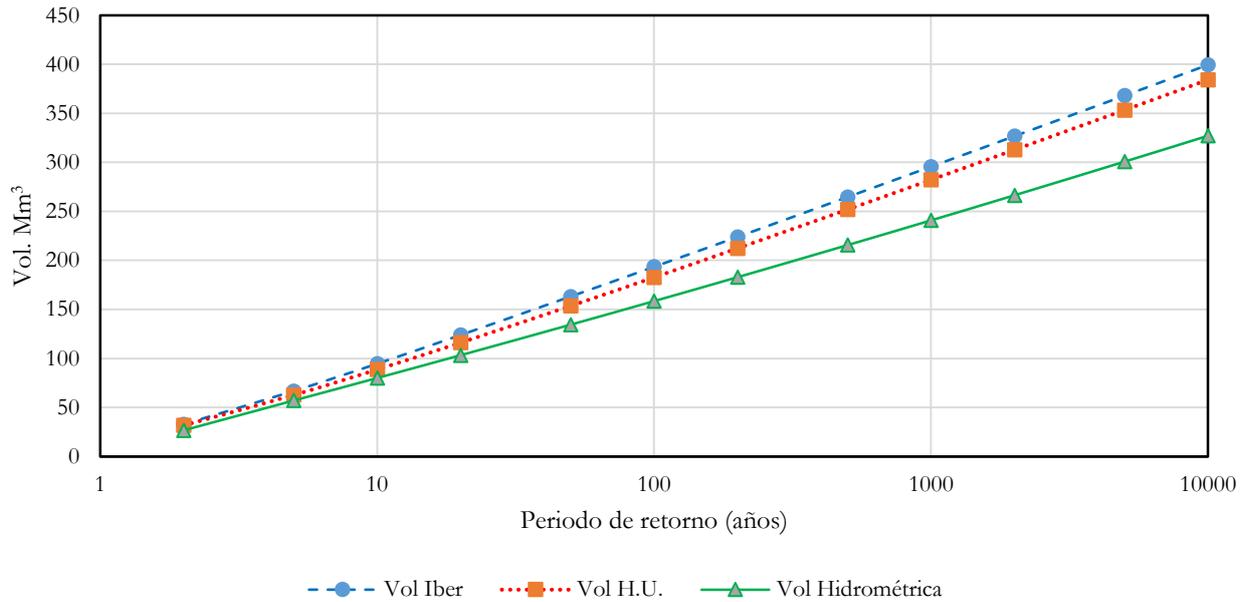


Ilustración 83. Comparación de volumen de escurrimiento directo, Cuenca del río Marquelia.

Esta relación no se mantiene para los volúmenes de escurrimiento directo, tanto en Iber como en el H.U., se presentan valores superiores que los de la estación hidrométrica, no obstante ambos modelos calcularon valores muy parecidos entre sí, ello se debió en gran medida al hidrograma seleccionado

Adicionalmente, para contrastar los resultados se realizó el cálculo del error relativo de cada periodo de retorno con respecto de los valores de la estación hidrométrica (Tabla 14 y 15).

Tabla 14. Error relativo del modelo agregado y distribuido con respecto del caudal observado en la estación hidrométrica.

| T | Q _p Hidrométrica m ³ /s | Q _p H.U. m ³ /s | er H. U. % | Q _p H. Iber m ³ /s | er Iber % |
|-------|---|---------------------------------------|------------|--|-----------|
| 2 | 723 | 774 | 7.1% | 499 | 30.9% |
| 5 | 1547 | 1534 | 0.8% | 1167 | 24.6% |
| 10 | 2170 | 2172 | 0.1% | 1819 | 16.2% |
| 20 | 2799 | 2842 | 1.5% | 2557 | 8.7% |
| 50 | 3645 | 3760 | 3.1% | 3648 | 0.1% |
| 100 | 4296 | 4468 | 4.0% | 4570 | 6.4% |
| 200 | 4957 | 5185 | 4.6% | 5553 | 12.0% |
| 500 | 5845 | 6146 | 5.1% | 6856 | 17.3% |
| 1000 | 6529 | 6881 | 5.4% | 7849 | 20.2% |
| 2000 | 7222 | 7619 | 5.5% | 8739 | 21.0% |
| 5000 | 8153 | 8599 | 5.5% | 9967 | 22.3% |
| 10000 | 8867 | 9344 | 5.4% | 10936 | 23.3% |

Tabla 15. Error relativo del modelo agregado y distribuido con respecto del volumen observado en la estación hidrométrica.

| T | Vol Hidrometrica Mm3 | Vol H.U. Mm3 | er H. U. % | Vol H. Iber Mm3 | er Iber % |
|-------|----------------------|--------------|------------|-----------------|-----------|
| 2 | 26.7 | 31.7 | 18.9% | 32.9 | 23.3% |
| 5 | 57.1 | 62.7 | 9.9% | 66.7 | 16.9% |
| 10 | 80.0 | 88.7 | 10.8% | 94.6 | 18.2% |
| 20 | 103.3 | 116.0 | 12.4% | 123.9 | 19.9% |
| 50 | 134.5 | 153.6 | 14.2% | 163.2 | 21.4% |
| 100 | 158.5 | 182.7 | 15.3% | 193.5 | 22.1% |
| 200 | 182.8 | 212.3 | 16.1% | 223.9 | 22.4% |
| 500 | 215.6 | 251.9 | 16.8% | 264.7 | 22.7% |
| 1000 | 240.8 | 282.2 | 17.2% | 295.6 | 22.7% |
| 2000 | 266.4 | 312.8 | 17.4% | 326.7 | 22.6% |
| 5000 | 300.7 | 353.4 | 17.5% | 368.1 | 22.4% |
| 10000 | 327.1 | 384.3 | 17.5% | 399.4 | 22.1% |

Finalmente se realizó un análisis de sensibilidad del tamaño de malla como del coeficiente de fricción de Manning.

Para el primer caso se varió la propuesta de planteada en este estudio con valores para río y para el resto del dominio. Los resultados muestran el caudal punta calculado para un periodo de retorno de 50 años. Los tamaños originales de malla se muestran con un factor de escala de 1, se incrementaron y redujeron en 50 %, (Tabla 16).

Tabla 16. Variación de los tamaños de malla.

| Factor de escala | Tamaño de malla en cauces m | Tamaño de malla en resto de la cuenca m | Cantidad de elementos generados (mil) | Caudal punta m ³ /s |
|------------------|-----------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------|
| 1.5 | 150 | 750 | 46.235 | 3,211 |
| 1 | 100 | 500 | 73.367 | 3,662 |
| 0.5 | 50 | 250 | 198.993 | 4,122 |

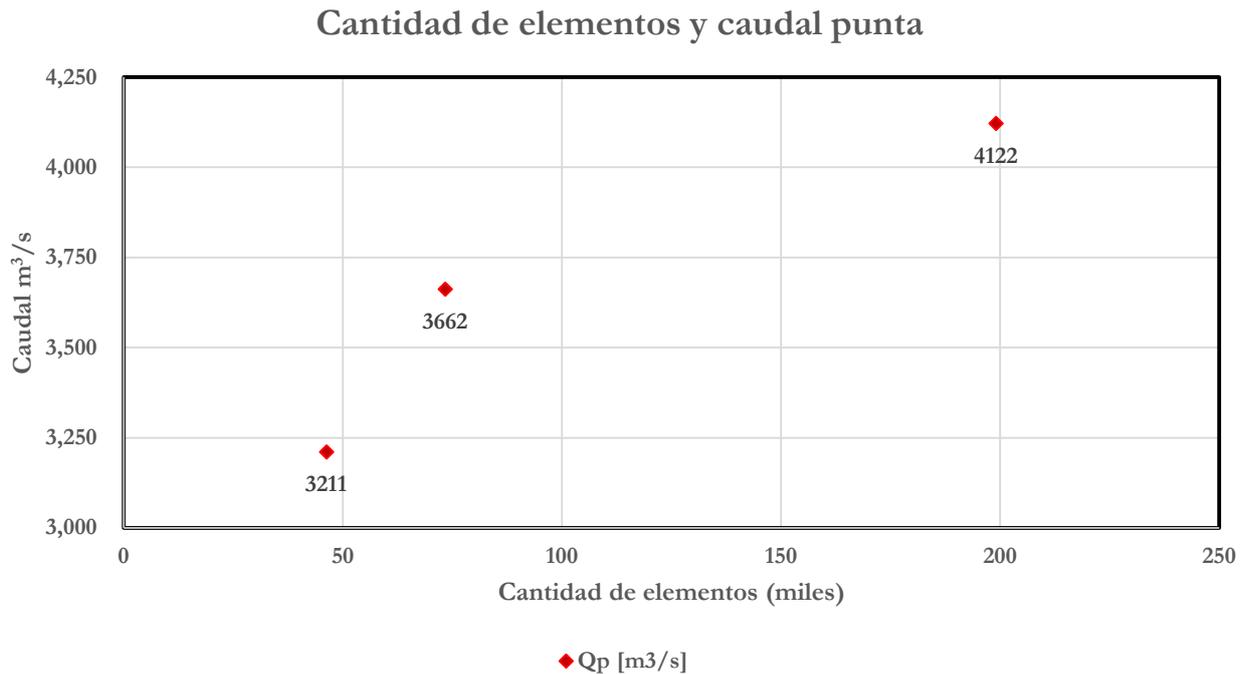


Ilustración 84. Cantidad de elementos de la malla – Caudal punta.

En la Ilustración 84, el caudal de 3,662 m³/s corresponde al caudal punta calibrado con el evento de 50 años; se observa que al contar con mallas de mayor tamaño el caudal decrece, mientras que lo opuesto ocurre al disminuir los tamaños de malla, ya que el caudal aumenta.

El caudal tenderá a un valor constante de caudal con la disminución del tamaño de los elementos, es decir, tenderá a la solución; lo ideal sería emplear el tamaño de elementos adecuado para obtener dicha solución, aunque esto puede ser poco práctico para cuencas grandes, debido al gran número de elementos por generar y calcular además de la duración de la tormenta, ya que ambos factores incrementan en forma exponencial el tiempo de cálculo. Para limitar el tamaño de los elementos, una opción es que estos no sean menores a la resolución del MDT, el cual en este caso es 15 m

En el segundo análisis, todos los valores presentados en este estudio son afectados por un factor para incrementar y disminuir en 50 % con respecto de los valores originales (Tabla 17). El hidrograma de salida correspondiente al Tr= 50 años, se presenta en la Ilustración 85.

Tabla 17. Variación de los coeficientes de rugosidad.

| Uso de suelo | 0.5 n | n | 1.5 n |
|-------------------------|-------|------|-------|
| Agricultura de temporal | 0.150 | 0.30 | 0.450 |
| Asentamientos urbanos | 0.055 | 0.11 | 0.165 |
| Bosque de pino y encino | 0.225 | 0.45 | 0.675 |
| Cuerpo de agua | 0.075 | 0.15 | 0.225 |
| Pastizal | 0.075 | 0.15 | 0.225 |
| Rio | 0.090 | 0.18 | 0.270 |
| Sabanoide | 0.150 | 0.30 | 0.450 |
| Vegetación secundaria | 0.150 | 0.30 | 0.450 |

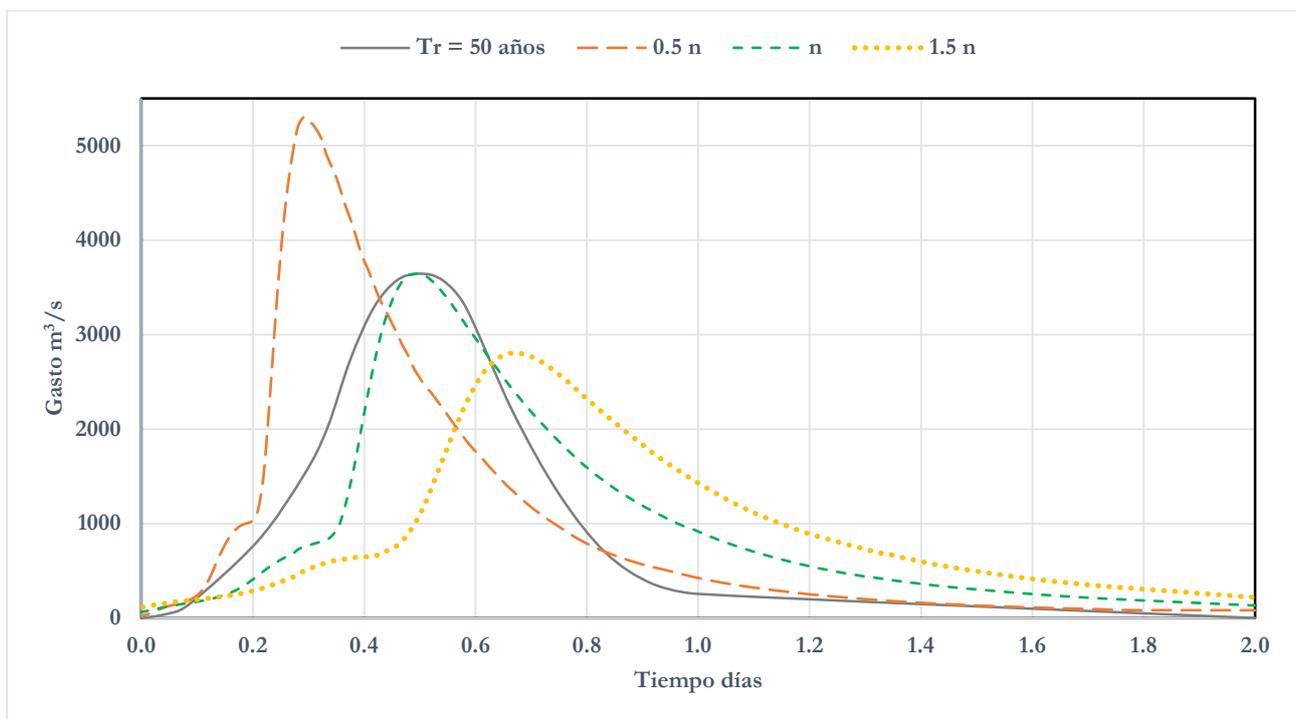


Ilustración 85. Hidrogramas para $Tr= 50$ años, calculados con diferentes coeficientes de rugosidad.

La Ilustración 85 muestra el hidrograma de la estación hidrométrica en color gris, en línea discontinua color verde el hidrograma calculado con los coeficientes empleados en el estudio y los hidrogramas obtenidos al calcular con diferentes coeficientes de rugosidad. Se observa que con coeficientes menores existe menor oposición del suelo y por lo tanto el agua fluye con mayor velocidad permitiendo alcanzar el valor máximo del hidrograma en un tiempo menor y consecuentemente presentar un pico mayor al esperado, mientras que para coeficientes mayores que los de referencia, se presenta un retraso en la punta y a consecuencia de rugosidades mayores existe una atenuación del valor máximo del hidrograma.

5 Conclusiones

En este trabajo se determinaron los hidrogramas de salida de la cuenca del río Marquelia, asociados a distintos periodos de retorno, empleando dos métodos; uno hidrológico de parámetros concentrados y otro de parámetros distribuidos. Ambos se calibraron con un periodo de retorno de 50 años. El primero a través del CN y el segundo a partir de los mismos datos mediante el coeficiente de fricción de Manning. Del proceso y de los resultados se concluyen algunos aspectos que se comentan a continuación.

Caudal y volumen. La estación hidrométrica ubicada en el punto de salida de la cuenca, permitió realizar una transformación de lluvia en escurrimiento con resultados más precisos tanto para el modelo agregado como para el distribuido.

La comparación de los caudales punta y los volúmenes de escurrimiento directo calculados, presentaron errores relativos bajos con respecto al valor aforado. El mejor ajuste ocurrió entre los periodos de 20 a 200 años, que usualmente son los periodos empleados para diseño de carreteras, puentes, alcantarillas y obras de protección en México; sin embargo, para probabilidades bajas, los picos de Iber fueron más elevados que los valores observados. Se debe mencionar que los volúmenes calculados con el modelo agregado y con Iber fueron valores del mismo orden, mientras que los volúmenes de la estación de aforo fueron menores.

Se observó que la forma del hidrograma depende en mayor manera de la forma de la cuenca, de la distribución de la lluvia, de la dirección del movimiento de la tormenta, entre otras variables, y en nuestro caso para una cuenca de 1,000 km², se observaron en los registros históricos diferentes formas de hidrogramas, en los cuales estos factores cobran importancia.

Tiempo de cálculo. El tiempo de proceso y cómputo con un modelo agregado es de minutos, aunque sólo permite calcular un hidrograma de escurrimiento directo en el punto de salida; en cambio, el modelo distribuido permite conocer la distribución temporal de la profundidad, velocidad, así como el hidrograma en cualquier sección de una corriente entre otras variables hidráulicas que pueden ser obtenidas para la gestión de la cuenca, no obstante, el tiempo de cálculo puede ser de varias horas o incluso días.

Durante la parte final de la investigación, se colaboró con los desarrolladores de Iber el

Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña, donde además de realizar observaciones puntuales que fueron atendidas, se realizaron nuevos cálculos de los modelos permitiendo la paralelización con tarjeta gráfica (GPU). Aunque la geometría y mallado ya habían sido elaborados de tal manera que el tiempo de cómputo se optimizara, esta consideración logró reducir sustancialmente el tiempo de cómputo de cada uno de los modelos de aproximadamente 2 horas a 10 minutos en cada uno de ellos.

Coefficiente de fricción de Manning. Es uno de los temas de mayor relevancia de esta tesis y debe ser tratado con cuidado. Los valores fueron propuestos con base a la distribución del uso de suelo y vegetación de la cuenca, descripción y fotografías de los usos de suelo predominantes, uso de sistemas de información geográfica para ubicar espacialmente cada coeficiente y además fueron propuestos de acuerdo a la coincidencia de estas descripciones con los valores que han publicado algunos autores.

Se requiere comprender la física del fenómeno que ocurre al emplear el coeficiente de fricción de Manning, ya que el comportamiento es diferente con alturas de lámina de agua milimétricas, que cuando se tratan profundidades de centímetros; es decir, deben ser considerados valores específicos cuando se trate zonas de aportación de flujo, que de acuerdo con los resultados se trata de valores varias veces mayores que los coeficientes de rugosidad de Manning de tipo hidráulico empleados en zonas de propagación.

Los coeficientes de fricción de Manning propuestos para el uso de suelo que tuvieron mayor valor son: Bosque, Vegetación y Sabanoide. Aunque el valor de Bosque fue el mayor y cuenta con un área de participación considerable, se observó que se encuentra en zonas de aportación en la parte más alta de la cuenca y más alejada del punto de salida; de acuerdo con su descripción, el valor de Sabanoide tuvo un valor relativamente alto con respecto de los demás, sin embargo, cuenta con un porcentaje de participación bajo para la cuenca y puede influir muy poco en los resultados; para el caso de Vegetación, este uso de suelo no es lo suficiente preciso para considerar la cantidad de abundancia de vegetación del mismo, por lo tanto puede ser clasificada de mejor manera a partir del uso de suelo en el cual se desarrolle cada vegetación secundaria, en lugar de homogeneizar todas las vegetaciones secundarias con un mismo coeficiente. Para mejorar la precisión del coeficiente empleado en este uso de suelo, se debería contar con una mejor descripción y mayor cantidad de imágenes, ya que INEGI presenta una gama amplia de vegetaciones secundarias en cartas vectorizadas, que no son descritas completamente en su “Guía para la interpretación de cartografía Uso de Suelo y Vegetación”.

Debido a que el tamaño de los elementos tiene un mínimo de 100 m, y para contemplar la existencia de vegetación, cambios en la topografía, sinuosidad, etc., se debe resaltar que el valor de río resultó elevado para tratarse de una zona de propagación, sin embargo, para la combinación propuesta este valor ya no disminuyó, ya que el modelo planteado fue mayormente sensible al mismo, y que la calibración del modelo distribuido dependió en gran manera de este valor.

Número de curva. Durante la etapa de calibración del modelo, se observó que las lluvias más intensas obligaron a reducir los valores de fricción de Manning propuestos para incrementar el pico del hidrograma, lo cual físicamente indica que el terreno opone menor resistencia y el agua fluye con mayor rapidez, por lo tanto es de mayor importancia calcular correctamente la precipitación de la cuenca desde el origen de los datos y principalmente el cálculo de la precipitación efectiva, para no sobredimensionar los coeficientes de rugosidad de Manning propuestos en el modelo distribuido.

El número de curva toma aquí un valor de importancia, ya que para el modelo agregado el parámetro de calibración fue el CN mientras que, para el distribuido, fue el coeficiente de fricción de Manning. En este estudio se planteó usar un solo CN que fue calculado siguiendo la metodología propuesta por el SCS; para futuras evaluaciones, puede considerarse el cálculo de CN de cada celda y por lo tanto calcular la precipitación efectiva de cada elemento de la cuenca a través de SIG.

Tamaño de la malla. El método se apoyó de un análisis de sensibilidad de la variación del tamaño de malla, en este se observó que una malla fina converge en resultados más precisos, y en función de esto, se puede encontrar un equilibrio entre la resolución de la malla y el tiempo de cálculo más coherente para cada problema.

La paralelización de cálculo con tarjeta gráfica permite tener modelos con una mayor cantidad de elementos en un periodo de cálculo más apropiado, pero no siempre se tiene la facilidad de contar con un equipo de cómputo de alto rendimiento, por lo tanto la sensibilidad del modelo permite definir la mejor relación de número de elementos y tiempo de cálculo.

Distribución de la lluvia. Emplear un método de interpolación para modelar el comportamiento de la lluvia puede resultar más coherente con la realidad, ya que la distribución de Thiessen puede no ser la más apropiada debido a que la lluvia varía

gradualmente con respecto del espacio.

Se puede plantear la distribución de la lluvia con el método de Krigin o IDW, aunque existen otros modelos, los mencionados tienden a ser los de uso más común en el caso de la lluvia, sin embargo la propuesta queda para futuras evaluaciones.

Tiempo de concentración. En hidrología, la tormenta de diseño suele calcularse partiendo del tiempo de concentración y adicionalmente se vuelve un parámetro de calibración en los modelos agregados. Durante la colaboración con el Instituto Flumen, se desarrolló una investigación sobre la relación que existe entre los coeficientes de fricción y los tiempos de concentración para modelos hidrológicos, concluyendo a groso modo que las fórmulas empíricas no consideran el decremento de tiempo que existe durante la propagación de la onda al incrementar el caudal, dicho en otras palabras, a mayor caudal menor tiempo de concentración.

Para realizar diseño hidráulico, tienden a emplearse caudales con valores elevados, en consecuencia, no tiene sentido emplear un tiempo de concentración de una fórmula que no represente tiempo que en realidad ocurre al transitar el caudal a diseñar.

Los modelos de algunas cuencas estudiadas en Flumen, requieren coeficientes de fricción demasiado bajos y sin sentido físico para representar los tiempos de concentración calculados por algunas ecuaciones empíricas, por otro lado con base en estudios como el propuesto en este trabajo, los coeficientes de fricción que se deben emplear en zonas de aportación, tienden a ser varias veces mayores que los coeficientes de tipo hidráulico.

6 Referencias

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., and Coll, A. (2014). “Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos.” *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya), 30(1), 1–10.
- Cabezas, F. (2015). “Análisis estructural de modelos hidrológicos y de sistemas de recursos hídricos en zonas semiáridas.” Universidad de Murcia.
- Campos-Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosi. Facultad de Ingeniería, San Luis Potosí.
- Campos-Aranda, D. F. (2010). *Introducción a la hidrología urbana*. Universidad Autónoma de San Luis Potosi. Facultad de Ingeniería.
- Caro, C. A. (2015). “Modelación hidrológica distribuida basada en esquemas de volúmenes finitos.” Universitat Politecnica de Catalunya.
- Caro, C. A., and Bladé, E. (2005). “Tratamiento de la rugosidad dentro de un modelo hidrológico basado en esquema de volúmenes finitos.”
- Cea, L., and Bladé, E. (2015). “A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications.” *Water Resources Research*, 51(7), 5464–5486.
- Chen, C. (1983). “Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formulas.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12), 1603–1621.
- Chow, V. Te. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Lima Perú, McGraw Hill.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., and Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. (M. E. Suárez R., ed.), McGraw Hill Interamericana.
- Domínguez, R., Esquivel Garduño, G. M., Antonio, B., Mendoza Reséndiz, A., Arganis Juárez, M. L., and Carrizosa Elizondo, E. (2008). *Manual del modelo para pronóstico de escurrimiento*. Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad de Mexico.
- Escalante, C. A., and Reyes, L. (2002). *Técnicas estadísticas en hidrología*. Universidad

Nacional Autónoma de Mexico, Facultad de Ingeniería, Ciudad de Mexico.

- Escalante, C. A., and Reyes, L. (2014). *Hidrología básica*. (V. J. Bourguett Ortiz and V. H. Alcocer Yamanaka, eds.), Instituto Mexicano de tecnología del agua.
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, J. M., and Formella, A. (2018). “An accelerated tool for flood modelling based on Iber.” *Water (Switzerland)*, 10(10), 1–23.
- García-Marin, A., Roldán-Cañas, J., Estévez, J., Moreno-Pérez, F., Serrat-Capdevila, A., González, J., Francés, F., Olivera-Orgaz, F., and Giráldez, J. V. (2014). “Hydrology and its role in water engineering.” *Ingeniería del agua*, 18(1), 14.
- Google. (2019). “Google Earth.” <<https://earth.google.com/web/>>.
- Hernández, F. (2014). “Obtención del número de curva (CN) para la república mexicana mediante el uso de sistemas de información geográfica, aplicando la metodología del tr-55.” Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Facultad de Ingeniería.
- Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S., and Wilson, M. D. (2007). “Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review.” *Geomorphology*, 90(3–4), 208–225.
- INEGI. (2013). “Continuo de elevaciones mexicano 3.0.” <<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>>.
- INEGI. (2014). “Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional).” <http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/eda250s2gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no>.
- INEGI. (2016). “Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (capa union).” <http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no>.
- INEGI. (2017). *Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Ciudad de Mexico.

- Kalyanapu, A. J., Burian, S. J., and McPherson, T. N. (2009). "Effect of land use-based surface roughness on hydrologic model output." *Journal of Spatial Hydrology*, 9(2), 51–71.
- Kim, J., Warnock, A., Ivanov, V. Y., and Katopodes, N. D. (2012). "Coupled modeling of hydrologic and hydrodynamic processes including overland and channel flow." *Advances in Water Resources*, Elsevier Ltd, 37, 104–126.
- Labrada, P. (2018). "Análisis regional para lluvias de diseño con duraciones menores a un día." Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Facultad de Ingeniería.
- De Luna-Cruz, F., Ramos-Hernández, J. G., Fuentes-Mariles, O. A., and Gracia-Sánchez, J. (2019). "FluBiDi—a model to estimate flood based on runoff: validation using extreme and natural basin conditions." *Hydrological Sciences Journal*, Taylor & Francis, 64(3), 297–317.
- Nanía, E. S., and Gomez Valentín, M. (2006). *Ingeniería hidrológica*. Grupo Editorial Universitario.
- Weiss, L. L. (1964). "Ratio of true fixed-interval maximum rainfall." *Journal of Hydraulics Division*, 77–87.