

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Determinación de hidrogramas unitarios de la cuenca del río Grande de
Térraba mediante distribuciones probabilísticas**

Trabajo Final de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Berny Zeledón Chavarría

Director del proyecto de graduación:

Ing. Alberto Serrano Pacheco, PhD.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Comité Asesor



Ing. Alberto Serrano Pacheco, PhD.

Director



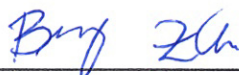
Ing. Juan José Leitón Montero, M.Sc.

Asesor



Ing. Aníbal Brenes Jiménez

Asesor



Berny Zeledón Chavarría

Graduando

Derechos de Propiedad Intelectual

Fecha: 2023, mayo.

El suscrito, **Berny Zeledón Chavarría**, cédula 5-0411-0909, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con el número de carné **B67968**, manifiesta que es autor del proyecto **Determinación de hidrogramas unitarios de la cuenca del río Grande de Térraba mediante distribuciones probabilísticas**, bajo la Dirección del **Ingeniero José Alberto Serrano Pacheco**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación:

Berny Zeledón Chavarría

Nota: De acuerdo con la ley sobre Derechos de Autor y Derechos Conexos No 6683, Artículo 7 (última versión de la norma); "(...) no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales." Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, según el Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

A mi mamá, por brindarme entera e incondicionalmente su apoyo, con todo su esfuerzo y cariño. Este logro te lo dedicó a vos.

Agradecimientos

A mi mamá Ana y a Daniel, por su apoyo y esfuerzo para que yo culmine mis estudios.

A mis hermanos: Danny, Jorge y Alberto por ayudarme de todas las formas posibles en el camino a terminar mis estudios.

A mi tutor de tesis Alberto, por todo el tiempo y conocimiento brindados. También, a mis asesores Juan y Aníbal por sus aportes.

A mis amigos Eliecer, Mónica, María José, Leonardo, Breissy, Omar, Juan Pablo y Mariela, por ser incondicionales y brindarme una amistad verdadera y duradera.

A Karol, Katherine, Sonia, Gustavo, Michelle y Fran por todas las veces que me escucharon y me brindaron su apoyo de alguna manera.

Al Instituto Costarricense de Electricidad por la disposición de brindarme la información necesaria para desarrollar el proyecto.

Finalmente, a la Universidad de Costa Rica, institución que me dio la formación profesional por la cual me siento orgulloso.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Justificación	1
1.1.1 Problema específico.....	1
1.1.2 Importancia	2
1.2 Antecedentes teóricos y prácticos del problema	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Delimitación del problema.....	4
1.4.1 Alcances.....	4
1.4.2 Limitaciones.....	4
1.5 Metodología.....	5
1.5.1 Etapa I: Consulta de información bibliográfica y antecedentes teóricos	6
1.5.2 Etapa II: Caracterización de la cuenca del río Grande de Térraba	7
1.5.3 Etapa III: Definición de hidrogramas unitarios de la cuenca del río Grande de Térraba y calibración de funciones de distribuciones probabilísticas.....	7
1.5.4 Etapa IV: Presentación y análisis de resultados y elaboración del informe final del TFG.....	8
2. Marco teórico.....	9
2.1.1 Caracterización de la cuenca	9
2.1.2 Modelos hidrológicos	15
2.1.3 Probabilidad y estadística hidrológica	21
3. Caracterización de la cuenca del río Grande de Térraba	28
3.1 Ubicación y delimitación de la cuenca	28
3.2 Parámetros morfométricos	31
3.2.1 Parámetros morfométricos generales de la cuenca	31

3.2.2	Parámetros morfométricos asociados a la forma de la cuenca	31
3.2.3	Parámetros morfométricos asociados a la altimetría de la cuenca	32
3.2.4	Parámetros morfométricos de la red de drenaje.....	34
3.3	Caracterización de cobertura, geología y tipología del suelo de la cuenca	35
3.4	Caracterización climatológica de la cuenca.....	39
4.	Definición de hidrogramas unitarios	40
4.1	Eventos para las simulaciones	40
4.2	Hidrogramas sintéticos	50
4.2.1	HU SCS	50
4.2.2	HU Snyder	54
4.3	Calibración de distribuciones probabilísticas.....	56
4.3.1	Estimación de parámetros para la distribución log-normal.....	59
4.3.2	Estimación de parámetros para la distribución gamma.....	66
4.3.3	Estimación de parámetros para la distribución GEV	71
4.3.4	Salidas gráficas de las funciones de distribución calibradas	79
4.4	Validación de ajustes.....	91
4.4.1	Error Cuadrático Medio (RMSE)	91
4.4.2	Error absoluto medio (MAE)	92
4.4.3	Coefficiente de correlación (CC).....	95
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	111
5.1	Conclusiones.....	111
5.2	Recomendaciones	112
6.	Referencias bibliográficas.....	114

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología del TFG (parte 1).....	5
Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología del TFG (parte 2).....	6
Figura 3. Histograma de frecuencias altimétricas en una cuenca	12
Figura 4. Posibles curvas hipsométricas de una cuenca hidrográfica	13
Figura 5. Jerarquización de una red de drenaje (método Strahler).....	14
Figura 6. Esquema de un hidrograma de crecida y hietograma de precipitaciones.....	16
Figura 7. Trazo de una curva S de una cuenca.....	21
Figura 8. Moda en una función de distribución de probabilidad.....	22
Figura 9. Distribución log-normal de 2 parámetros	23
Figura 10. Distribución Gamma de 2 parámetros.....	24
Figura 11. Distribución GEV.....	25
Figura 12. Ubicación de la cuenca del Río Grande de Térraba	29
Figura 13. Subcuencas del Río Grande de Térraba y ubicación de las estaciones de análisis.	30
Figura 14. Distribución altitudinal de la cuenca estudiada	33
Figura 15. Curva hipsométrica de la cuenca estudiada.....	33
Figura 16. Histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca estudiada.....	34
Figura 17. Patrón de drenaje de la cuenca estudiada - Escala 1:50 000	35
Figura 18. Uso y cobertura del suelo de la cuenca del Río Grande de Térraba.....	36
Figura 19. Geología asociada a la cuenca estudiada	37
Figura 20. Tipología de suelo de la cuenca de la cuenca estudiada	38
Figura 21. Precipitación media de la cuenca del Río Grande de Térraba	39
Figura 22. Escorrentía contra fecha de todo el registro de la Estación El Brujo (3103)	41
Figura 23. Escorrentía contra fecha de todo el registro de la Estación El Remolino (3104) ...	41
Figura 24. Escorrentía contra fecha de todo el registro de la Estación Las Juntas (3105)	42
Figura 25. Escorrentía contra fecha de todo el registro de la Estación Caracucho (3107)	42
Figura 26. Escorrentía contra fecha de todo el registro de la Estación Cabagra (3112)	43
Figura 27. Ejemplo de hidrogramas de escorrentía total, de las tormentas descartadas por la forma de las curvas de ascenso o agotamiento irregulares para la cuenca del estudiada	44
Figura 28. Representación de los HU derivados de los eventos observados para cada tormenta en la estación El Brujo 3103.....	46

Figura 29. Representación de los HU derivados de los eventos observados para cada tormenta en la estación El Remolino 3104	46
Figura 30. Representación de los HU derivados de los eventos observados para cada tormenta en la estación Las Juntas 3105	47
Figura 31. Representación de los HU derivados de los eventos observados para cada tormenta en la estación Caracucho 3107	47
Figura 32. Representación de los HU derivados de los eventos observados para cada tormenta en la estación Cabagra 3112	48
Figura 33. Hidrograma Unitario SCS, generalizado con valores promedio para la cuenca del río Grande de Térraba	52
Figura 34. Hidrograma Unitario de Snyder generalizado con valores promedio para la cuenca del río Grande de Térraba	55
Figura 35. Esquema del hidrograma unitario de un evento registrado.	57
Figura 36. HU 19/11/2000 (El Brujo - 3103) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca	79
Figura 37. HU 20/10/2006 (El Brujo 3103) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca.....	79
Figura 38. HU 17/10/2012 (El Remolino 3104) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca	80
Figura 39. HU 27/09/1992 (El Remolino 3104) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca	80
Figura 40. HU 08/11/1978 (Las Juntas 3105) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca	81
Figura 41. HU 27/09/1992 (Las Juntas 3105) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca	81
Figura 42. HU 07/11/1972 (Caracucho 3107) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca	82
Figura 43. HU 20/10/2006 (Caracucho 3107) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca	82
Figura 44. HU 17/07/2004 (Cabagra 3112) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca.....	83

Figura 45. HU 03/09/1998 (Cabagra 3112) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca.....	83
Figura 46. HU SCS y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca ...	84
Figura 47. HU Snyder y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca	84
Figura 48. HU 19/11/2000 (El Brujo - 3103) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius.....	85
Figura 49. HU 20/10/2006 (El Brujo - 3103) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius.....	85
Figura 50. HU 17/10/2012 (El Remolino 3104) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius.....	86
Figura 51. HU 27/09/1992 (El Remolino 3104) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius.....	86
Figura 52. HU 08/11/1978 (Las Juntas 3105) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius.....	87
Figura 53. HU 27/09/1992 (Las Juntas 3105) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius.....	87
Figura 54. HU 07/11/1972 (Caracucho 3107) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius.....	88
Figura 55. HU 20/10/2006 (Caracucho 3107) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius.....	88
Figura 56. HU 17/07/2004 (Cabagra 3112) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius	89
Figura 57. HU 03/09/1998 (Cabagra 3112) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius	89
Figura 58. HU SCS y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius .	90
Figura 59. HU Snyder y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius	90
Figura 60. Correlaciones del HU 19/11/2000 (El Brujo 3103) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca	97
Figura 61. Correlaciones del HU 20/10/2006 (El Brujo 3103) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca	97

Figura 62. Correlaciones del HU 17/10/2012 (El Remolino 3104) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca	98
Figura 63. Correlaciones del HU 27/09/1992 (El Remolino 3104) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca	98
Figura 64. Correlaciones del HU 08/11/1978 (Las Juntas 3105) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca	99
Figura 65. Correlaciones del HU 27/09/1992 (Las Juntas 3105) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca	99
Figura 66. Correlaciones del HU 07/11/1972 (Caracucho 3107) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca	100
Figura 67. Correlaciones del HU 20/10/2006 (Caracucho 3107) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca	100
Figura 68. Correlaciones del HU 17/07/2004 (Cabagra 3112) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca	101
Figura 69. Correlaciones del HU 03/09/1998 (Cabagra 3112) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca	101
Figura 70. Correlaciones del HU SCS con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca.....	102
Figura 71. Correlaciones del HU Snyder con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca.....	102
Figura 72. Correlaciones del HU 19/11/2000 (El Brujo 3103) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius	103
Figura 73. Correlaciones del HU 20/10/2006 (El Brujo 3103) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius	103
Figura 74. Correlaciones del HU 17/10/2012 (El Remolino 3104) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius	104
Figura 75. Correlaciones del HU 27/09/1992 (El Remolino 3104) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius	104
Figura 76. Correlaciones del HU 08/11/1978 (Las Juntas 3105) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius	105
Figura 77. Correlaciones del HU 27/09/1992 (Las Juntas 3105) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius	105

Figura 78. Correlaciones del HU 07/11/1972 (Caracucho 3107) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius	106
Figura 79. Correlaciones del HU 20/10/2006 (Caracucho 3107) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius	106
Figura 80. Correlaciones del HU 17/07/2004 (Cabagra 3112) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius	107
Figura 81. Correlaciones del HU 03/09/1998 (Cabagra 3112) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius	107
Figura 82. Correlaciones del HU SCS con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius.....	108
Figura 83. Correlaciones del HU Snyder con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius.....	108

Índice de cuadros

Cuadro 1. Descripción de la cobertura del número de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana.....	18
Cuadro 2. Tipo de relaciones a partir del coeficiente de correlación de Pearson	27
Cuadro 3. Distribución territorial de los cantones en la cuenca	28
Cuadro 4. Coordenadas de las estaciones hidrológicas empleadas en el estudio.....	30
Cuadro 5. Parámetros morfométricos generales de la cuenca de estudio.....	31
Cuadro 6. Parámetros morfométricos asociados a la forma de la cuenca de estudio	31
Cuadro 7. Parámetros morfométricos asociados a la forma del relieve de la cuenca de estudio	32
Cuadro 8. Parámetros morfométricos asociados a la red de drenaje	34
Cuadro 9. Áreas asociadas a la cobertura de la cuenca del Río Grande de Térraba.....	36
Cuadro 10. Eventos de escorrentía seleccionados para la modelación de hidrogramas unitarios	45
Cuadro 11. Caudal pico y tiempo pico de cada hidrograma unitario observado	49
Cuadro 12. Orden de los suelos presentes en la cuenca y su respectiva proporción.....	51
Cuadro 13. Reclasificación de descripción de suelo y obtención de número de curva de la cuenca	51
Cuadro 14. Registros de tiempo y de caudal del HU SCS.....	53
Cuadro 15. Determinación de C_P y C_T a partir de los eventos de escorrentía	54
Cuadro 16. Registros de tiempo y de caudal del HU Snyder	56
Cuadro 17. Resumen de los q_P y t_P empleados en las calibraciones de distribuciones probabilísticas.....	58
Cuadro 18. Parámetros μ y σ obtenidos para la función de distribución log-normal calibrada con el área de la cuenca	61
Cuadro 19. Parámetros μ y σ obtenidos para la función de distribución log-normal calibrada con el índice de Gravelius	61
Cuadro 20. Funciones de distribución log-normal calibradas resultantes.....	63
Cuadro 21. Parámetros α y β obtenidos para la función de distribución gamma calibrada con el área de la cuenca	67
Cuadro 22. Parámetros α y β obtenidos para la función de distribución gamma calibrada con el índice de Gravelius	67

Cuadro 23. Funciones de distribución gamma calibradas resultantes.....	68
Cuadro 24. Parámetros α , μ y k obtenidos para la función de distribución GEV calibrada con el área de la cuenca.....	72
Cuadro 25. Parámetros α , μ y k obtenidos para la función de distribución GEV calibrada con el índice de Gravelius	72
Cuadro 26. Funciones de distribución GEV calibradas con el área de la cuenca	73
Cuadro 27. Funciones de distribución GEV calibradas el índice de Gravelius.....	76
Cuadro 28. RSME obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas empleando el área de la cuenca.....	91
Cuadro 29. RSME obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas empleando el índice de Gravelius	92
Cuadro 30. MAE obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas empleando el área de la cuenca.....	93
Cuadro 31. MAE obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas empleando el índice de Gravelius	94
Cuadro 32. CC obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas considerando el área de la cuenca.....	95
Cuadro 33. CC obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas considerando el índice de Gravelius.....	96
Cuadro 34. simbología de la condición de ajuste para las pruebas de validación realizadas	109
Cuadro 35. Resumen de pruebas de validación con la respectiva clasificación de la condición de ajuste (calibraciones empleando el área de la cuenca).....	109
Cuadro 36. Resumen de pruebas de validación con la respectiva clasificación de la condición de ajuste (calibraciones empleando el índice de Gravelius)	110

Zeledón Chavarría, Berny

Determinación de hidrogramas unitarios de la cuenca del río Grande de Térraba mediante distribuciones probabilísticas.

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, CR.:

B. Zeledón C, 2023

116h.:83.-26 refs

Resumen

El presente proyecto de investigación explora la calibración de tres funciones de distribución probabilística con el objetivo de simular el comportamiento de hidrogramas unitarios en la cuenca del río Grande de Térraba.

Para ello, se realiza una caracterización a detalle de la cuenca del río Grande de Térraba, considerando parámetros geométricos, de relieve, de la red de drenaje, uso y cobertura del suelo, geológicos, pedológicos y climatológicos. Posteriormente, se calculan los respectivos hidrogramas unitarios reales de la cuenca y los hidrogramas unitarios sintéticos de la metodología de SCS y Snyder. Con los cuales se realizan las respectivas calibraciones a las funciones de distribución probabilística de log-normal, gamma y GEV considerando dos parámetros de la cuenca: el área de la cuenca y el índice de Gravelius.

Con base en los resultados obtenidos, se determina que si es posible emplear funciones de distribución probabilista para simular el comportamiento de hidrogramas unitarios principalmente con funciones de distribución log-normal y gamma, sin embargo, no todos los modelos calibrados simulan a los HU de manera precisa, tal cual es el caso de la función de distribución GEV.

Palabras clave: Hidrograma unitario, funciones de distribución probabilísticas, cuenca del Río Grande de Térraba, calibración de funciones.

Ing. Alberto Serrano Pacheco, Ph.D.

Escuela de Ingeniería Civil

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

1.1.1 Problema específico

El estudio de la respuesta hidrológica de las cuencas hidrográficas, ha sido un campo de análisis recurrente dentro de la hidrología a lo largo del tiempo.

A través de estos estudios, se plantean las bases para el diseño hidráulico y planificación hidrológica de proyectos como conducciones, aprovechamiento energético, diseño pluvial y trasvases (Zúñiga, 2020). Dichos estudios, generalmente, se establecen en puntos específicos de control en una determinada cuenca.

Para la obtención de información como los caudales e hidrogramas de diseño en determinados puntos de control, es necesario conocer datos de mediciones de caudal y precipitación. No obstante, no todas las estaciones hidrológicas poseen dichos datos en los puntos de interés o cuentan con información suficientemente representativa. Ante esta situación, se recurre a la aplicación de modelos de precipitación-escorrentía, con el fin de relacionar la precipitación que ocurre en la cuenca con el caudal escurrido en el punto de interés.

La calidad de los resultados de salida de un modelo conceptual de precipitación-escorrentía, depende de la calidad de los datos de entrada, de la estructura del modelo y del proceso de calibración (Sorooshian & Dracup, 1993). Desafortunadamente, la red nacional de estaciones hidrológicas no es lo suficientemente amplia para brindar la información en cualquier punto de interés que pueda generar resultados óptimos para la modelación de precipitación-escorrentía.

Ante la ausencia de datos de precipitación, se ha optado por describir el comportamiento de cuencas sin instrumentación con base a la conducta de cuencas instrumentadas. Lo cual, puede conllevar en cierto grado a la obtención de resultados inexactos o alejados de la realidad, ya que cada evento de precipitación que surge en una determinada cuenca se comporta de forma diferente y es irreproducible.

En el presente estudio, se pretende desarrollar la relación entre un modelo de respuesta hidrológica del hidrograma unitario para la cuenca del río Grande de Térraba, con calibraciones a distintas funciones de distribución de densidad de probabilidad. Esto, con el fin de representar una función impulso y/o pulso unitario respuesta de una cuenca que permita plantear las bases

para la descripción de comportamientos más cercanos a la realidad para cuencas sin instrumentación.

1.1.2 Importancia

La importancia de estudiar métodos que permitan conocer el comportamiento de una respuesta de pulso unitario en cuencas sin instrumentación, radica en proponer soluciones ante condiciones como la escasez de datos o modelos mal calibrados que pueden generar resultados poco exactos o no detallados en un punto de interés específico.

Se establece el estudio alrededor de factores de ajuste en distribuciones probabilísticas para modelar hidrogramas unitarios, debido a las similitudes que se presentan entre ambas partes. Gráficamente, existe una semejanza directa, donde las funciones de densidad que consideran diferentes parámetros de forma, generan curvas acampanadas, similares a los hidrogramas unitarios. Análogamente, el área bajo la curva de una función densidad es unitaria, lo que se asemeja a la definición del hidrograma unitario, el cual refiere a la respuesta de una cuenca a 1 mm de precipitación efectiva, que está asociada a un volumen de escorrentía superficial unitario.

Es de interés estudiar posibles ajustes a diferentes distribuciones probabilísticas que permitan representar modelos de precipitación-escorrentía para una respuesta hidrológica de un determinado punto de interés, de la manera más adecuada y exacta posible, para poder generar una metodología que sea reproducible y aplicable a situaciones donde no se cuente con los recursos de información referentes a calibración de datos.

Finalmente, la importancia de utilizar una modelación de hidrograma unitario con los ajustes ya mencionados, es generar resultados con alto grado de exactitud y cercanos a la realidad, que permitan planificar diseños hidráulicos de manera correcta.

1.2 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

La utilización de funciones de distribución probabilística como hidrogramas unitarios, ha sido un campo no explorado en Costa Rica. No obstante, en las últimas dos décadas sí se han realizado diferentes investigaciones internacionales que pretenden darle entendimiento a la utilización de dichas funciones como parte de la modelación hidrológica. A continuación, se presentan algunos de los trabajos de investigación realizados:

- (Yue, et al., 2002) extendieron el uso de las funciones de distribución de probabilidad para predecir la forma del hidrograma para diferentes períodos de retorno.
- (Bhunya, et al., 2003) relacionaron el parámetro adimensional del producto entre el caudal punta y tiempo al pico, con las características geomorfológicas de la cuenca, esto por medio de la distribución de probabilidad Gamma.
- (Bhunya, et al., 2007) realizaron una aplicación y comparación entre las funciones de distribución de probabilidad Gamma, Beta, Chi-cuadrado y Weibull como hidrogramas unitarios sintéticos.
- (Bhunya, et al., 2008) compararon la función de distribución de probabilidad Weibull y Gamma con el fin de obtener un hidrograma unitario sintético a partir de los índices de Horton.
- (Goñi, et al., 2009) formularon tres funciones de distribución probabilística derivadas de la función de primera especie de Euler, la función Beta.
- (Ghorbani, et al., 2017) desarrollaron un modelo de optimización no lineal para transmutar un hidrograma unitario en una distribución de probabilidad. Donde, se utilizó el potencial de las funciones en dos parámetros de las distribuciones Gamma, Gumbel, log-normal, normal, Weibull y de tres parámetros la distribución de Pearson.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Ajustar funciones de densidad de distribuciones probabilísticas en la cuenca del río Grande de Térraba, para determinar su aplicabilidad en la simulación de hidrogramas unitarios.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a detalle la morfometría de la cuenca hidrográfica del río Grande de Térraba.
- Obtener los hidrogramas unitarios de crecientes reales para las estaciones hidrológicas: El Brujo (3103), Remolino (3104), Las Juntas (3105), Caracucho (3107) y Cabagra (3112) y los sintéticos de SCS y de Snyder en la cuenca del río Grande de Térraba.
- Ajustar funciones de densidad de distribuciones probabilísticas para modelar hidrogramas unitarios asociados a la cuenca del río Grande de Térraba.

1.4 Delimitación del problema

1.4.1 Alcances

- El presente estudio se circunscribe para cuenca del río Grande de Térraba y a las estaciones hidrológicas: El Brujo (3103), Remolino (3104), Las Juntas (3105), Caracucho (3107) y Cabagra (3112) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).
- Se utilizarán los registros de crecientes de las estaciones hidrológicas: El Brujo (3103), Remolino (3104), Las Juntas (3105), Caracucho (3107) y Cabagra (3112), del ICE. Las cuales comprenden datos desde 1969 hasta 2020.
- Se asumirán como constantes e invariables en el tiempo a las características geomorfológicas de la cuenca de estudio.
- Se obtendrán los hidrogramas unitarios sintéticos a partir de las metodologías asociadas al hidrograma SCS y el hidrograma de Snyder a través del software HEC-HMS.
- Solo se calibrarán las funciones de distribuciones probabilísticas log-normal, gamma y GEV para simular el comportamiento de los hidrogramas unitarios de la cuenca del río Grande de Térraba.
- En general se utilizará el software estadístico de RStudio y el programa de Excel de Microsoft para la respectiva clasificación y procesamiento de los registros de crecientes de las estaciones hidrológicas ya mencionadas.

1.4.2 Limitaciones

- La precisión de la caracterización general de la cuenca del río Grande de Térraba, está sujeta al contenido de las capas del ATLAS del 2012-2014 del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Por ende, la modelación de hidrogramas unitarios con la metodología SCS, la cual emplea parámetros de caracterización física de la cuenca, se encuentra sujeta a la información de que presentan dichas capas. Pudiendo ser esta no totalmente precisa a las condiciones actuales de la cuenca.
- El número de eventos de crecientes respectivo en cada estación, se encuentra limitado por los registros provistos por el ICE.

1.5 Metodología

La metodología a seguir para la elaboración de la presente investigación se muestra a detalle en la Figura 1 y Figura 2.

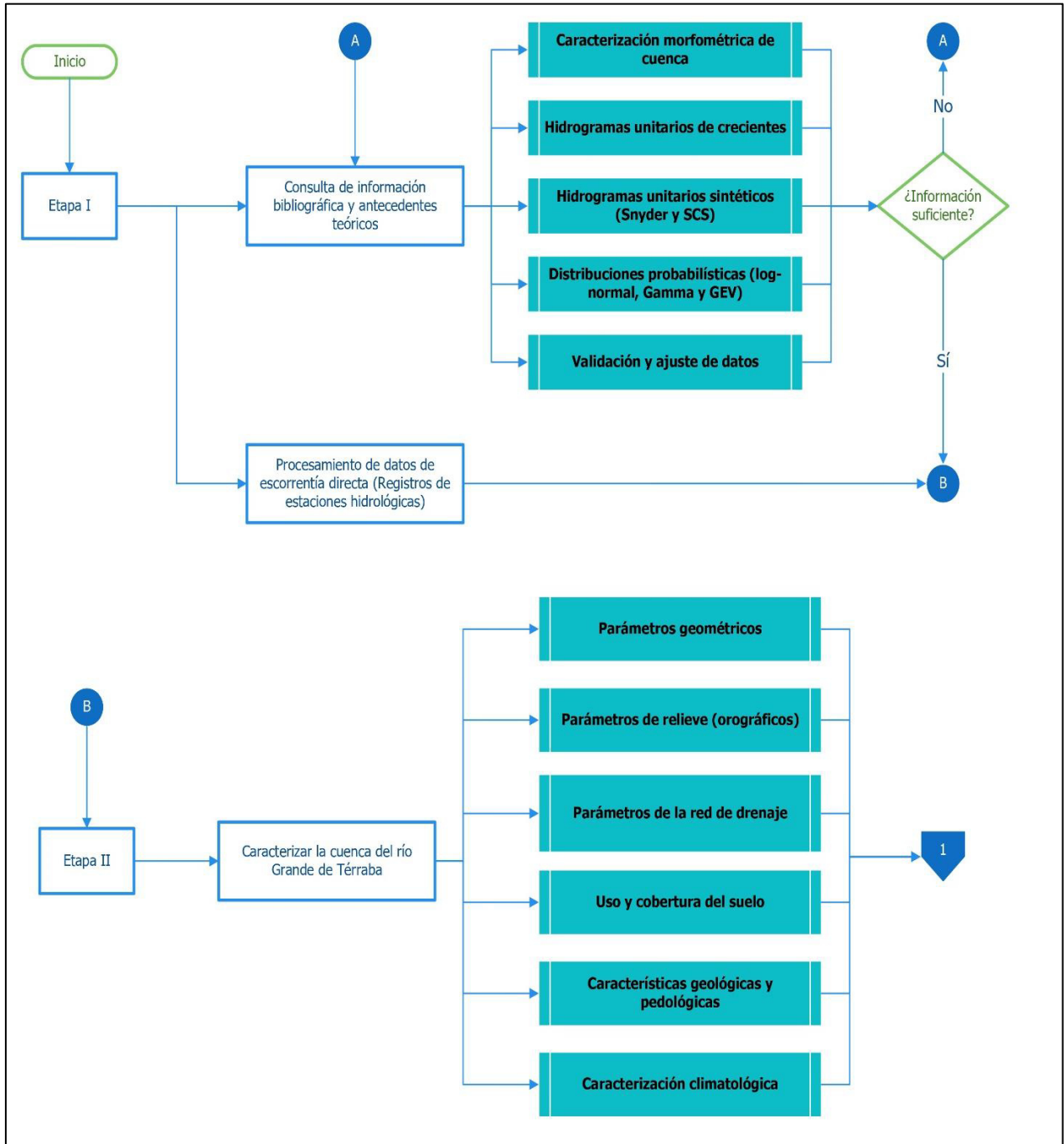


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología del TFG (parte 1)

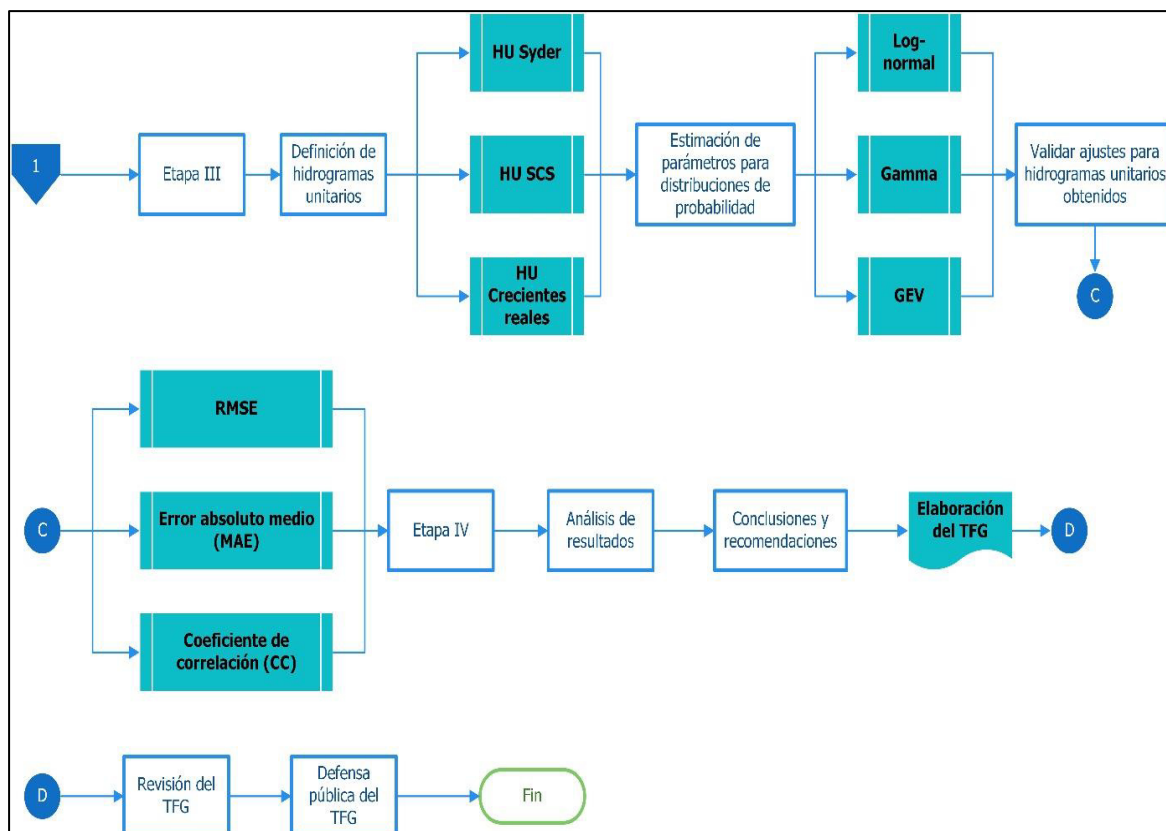


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología del TFG (parte 2)

La presente metodología se resume en cuatro etapas: I) Consulta de información bibliográfica, antecedentes teóricos y procesamiento de datos de escorrentía de los registros de las estaciones hidrológicas de El Brujo (3103), Remolino (3104), Las Juntas (3105), Caracucho (3107) y Cabagra (3112) II) Caracterizar la cuenca del río Grande de Térraba, III) Definición de hidrogramas unitarios y calibración de las funciones de distribución probabilísticas con las respectivas validaciones y finalmente la etapa IV) Presentación y análisis de resultados, y la elaboración del informe final.

1.5.1 Etapa I: Consulta de información bibliográfica y antecedentes teóricos

En esta primera etapa se realizó una revisión de documentos tanto digitales como físicos, que permitiesen entender y desarrollar de manera integral los conceptos y procedimientos presentes en el proyecto de investigación. Dicha información se empleó como base del sustento teórico que se puede encontrar el apartado de Marco teórico.

Luego, se realizó una búsqueda de investigaciones anteriores relacionadas con el uso de funciones de distribución probabilísticas como hidrogramas unitarios. La información recopilada posteriormente fue empleada en el respectivo apartado de antecedentes.

Finalmente, en esta etapa se realizó un procesamiento de los datos de escorrentía de las estaciones hidrológicas de El Brujo (3103), El Remolino (3104), Las Juntas (3105), Caracucho (3107) y Cabagra (3112). El procesamiento consideró una revisión, filtro y ordenamiento de los datos de escorrentía de los diferentes registros.

1.5.2 Etapa II: Caracterización de la cuenca del río Grande de Térraba

En la segunda etapa se realizó una caracterización detallada de la cuenca del río Grande de Térraba. Para esto, se empleó la herramienta computacional QGIS para la obtención de parámetros y generación de mapas. Asimismo, con QGIS se obtuvieron los respectivos parámetros geométricos, de relieve y referentes a la red de drenaje, el uso y cobertura del suelo, características geológicas, pedológicas y climatológicas de la cuenca del río Grande de Térraba.

1.5.3 Etapa III: Definición de hidrogramas unitarios de la cuenca del río Grande de Térraba y calibración de funciones de distribuciones probabilísticas

Una vez procesados y filtrados los datos de escorrentía de los registros de las estaciones hidrológicas de El Brujo (3103), El Remolino (3104), Las Juntas (3105), Caracucho (3107) y Cabagra (3112), y caracterizada la cuenca, se procedió a ejecutar la tercera etapa, la cual consistió en la definición de los hidrogramas unitarios reales y sintéticos de la cuenca del río Grande de Térraba, y la respectiva calibración de las funciones de distribución probabilísticas.

En esta etapa, se obtuvieron los diferentes parámetros asociados a las funciones de distribución de densidad de log-normal, gamma y GEV. Las respectivas calibraciones en las funciones de distribución se realizaron considerando dos parámetros de la cuenca: el área de la cuenca y el índice de Gravelius. Las funciones calibradas resultantes posteriormente, fueron validadas empleando tres metodologías RMSE, MAE y Coeficiente de Correlación.

1.5.4 Etapa IV: Presentación y análisis de resultados y elaboración del informe final del TFG

En esta última etapa se desarrollaron los debidos análisis de los resultados obtenidos anteriormente en las calibraciones, en estos análisis se valoró si realmente los modelos generados a partir de las funciones de distribución probabilísticas son adecuados para simular el comportamiento de los hidrogramas reales y sintéticos de la cuenca del río Grande de Térraba.

Seguido, se generaron las respectivas conclusiones y recomendaciones del proyecto de investigación llevado a cabo. Para posteriormente, elaborar el informe final del TFG, el cual consideró las respectivas correcciones y sugerencias proporcionadas por los respectivos profesionales que integran el comité asesor.

Una vez aprobado el respectivo documento del TFG, se realizó la defensa publica con lo cual finaliza el proyecto de investigación.

2. MARCO TEÓRICO

El presente apartado busca detallar de manera conceptual las bases teóricas utilizadas para la obtención de resultados de la presente investigación. En este, se consideran tres ejes principales: caracterización a detalle de la cuenca, realización de modelos hidrológicos y la probabilidad y estadística hidrológica referente a las distribuciones probabilísticas: log-normal, gamma y GEV.

2.1.1 Caracterización de la cuenca

Para entender el modelo hidrológico que pretende simular la respuesta que tendrá la cuenca del río Grande de Térraba como el resultado de la precipitación de la zona se abarcan las siguientes definiciones.

2.1.1.1 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se define como toda área o superficie de un terreno que aporta agua de escorrentía a un mismo punto de desagüe. Donde, la escorrentía es la constitución de aguas que fluyen a través de la superficie terrestre, esto tras producirse una precipitación pluvial o cualquier aporte de agua en la zona. La delimitación de la cuenca se realiza considerando la naturaleza topográfica de la zona, donde se designa una línea imaginaria que separa laderas opuestas de una elevación (Ibáñez et al., 2010).

2.1.1.2 Parámetros geométricos de una cuenca

Estos corresponden a información geométrica y de forma que describen dimensiones, naturaleza y comportamiento en cada una de las cuencas. A continuación, se proceden a describir algunos términos asociados a la geometría de una cuenca.

- Área (A) y perímetro (P) de la cuenca:

El área de una cuenca se define como una proyección horizontal de la superficie delimitada por la curva de divisorias de aguas. El perímetro por otra parte, corresponde a la longitud sobre un plano horizontal, el cual recorre la línea divisoria de aguas. El valor de este último parámetro se ve afectado directamente a la escala de las curvas de nivel o mapa de trabajo.

- Longitud de cauce principal (L_c):

Es la distancia horizontal desde el punto de desfogue o de control de una cuenca hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal que atraviesa la cuenca corte la línea de divisoria de aguas (Lux Cardona, 2016).

- Factor de forma de la cuenca (K_f):

Tienen la funcionalidad de describir la forma de la cuenca, la cual está asociada directamente con la respuesta hidrológica ya que, definen la interacción de los eventos de precipitación con la superficie terrestre, influenciando los comportamientos de velocidad del flujo y de drenaje hacia los cauces (Porras, 2021).

La fórmula para el factor de forma de una cuenca se muestra en la ecuación (1)

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

Donde:

A= área de la cuenca

L= longitud del cauce principal

A partir de este factor, se puede determinar qué tan cuadrada es la cuenca. De este modo, un valor de K_f igual a la unidad relaciona la forma de cuenca como cuadrada. Asimismo, las cuencas que presentan valores bajos de factor de forma, están menos propensas a crecientes, cuando se compara con cuencas de la misma área con valores más altos de coeficiente de forma (Zúñiga, 2020).

- Índice de Gravelius (I_G):

Compara el área de la cuenca con área de un círculo, donde, la circunferencia del círculo es igual al perímetro de la cuenca.

La fórmula para determinar el índice de Gravelius se presenta en la ecuación (2)

$$I_G = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

Donde:

P=perímetro de la cuenca

A=área de la cuenca

Un valor de I_G igual a la unidad significa que la presenta una forma circular. Generalmente los valores aproximan entre el rango 1-3.

- Tiempo de concentración de la cuenca (T_C):

Este define como el tiempo mínimo requerido para que todos los puntos de una cuenca aporten agua de escorrentía de una forma simultánea al punto de desfogue. Este se encuentra determinado por el tiempo que tardar en llegar a la salida el agua que proviene del punto más alejado de la cuenca. Este representa el momento en el cual el caudal de escorrentía es constante (Villegas, 2014).

Existen diferentes expresiones matemáticas que permiten el cálculo del tiempo de concentración de una cuenca. Sin embargo, dado que la pendiente del cauce se encuentra dentro de un rango entre 3% y 10%, se hará uso de la expresión determinada por Kirpich, la cual se presenta en la ecuación (3).

$$T_C = 0,06 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,77} \quad (3)$$

Donde:

T_C =tiempo de concentración (min)

L=longitud del cauce principal (m)

H=diferencia de elevación entre punto máximo y mínimo del cauce principal (m.s.n.m.)

2.1.1.3 Parámetros de relieve (orográficos)

Están asociados a condiciones del terreno donde se consideran aspectos como la inclinación, alturas y tipo de pendiente que pueden estar presentes en una cuenca. Los parámetros de relieve son de gran importancia, ya que tienen influencia directa sobre la respuesta hidrológica.

A continuación, se procede a describir algunos parámetros de relevancia empleados en la presente investigación.

- Histograma de frecuencias altimétricas:

Corresponde a una representación gráfica que indica el porcentaje de área que se encuentra entre dos elevaciones dadas con respecto al total del área de la cuenca. A partir de la información que se presenta en un histograma de frecuencias altimétricas se puede tener una idea probabilística de la variación de la altura en la cuenca. La Figura 3 presenta un esquema de un histograma de frecuencias altimétricas.

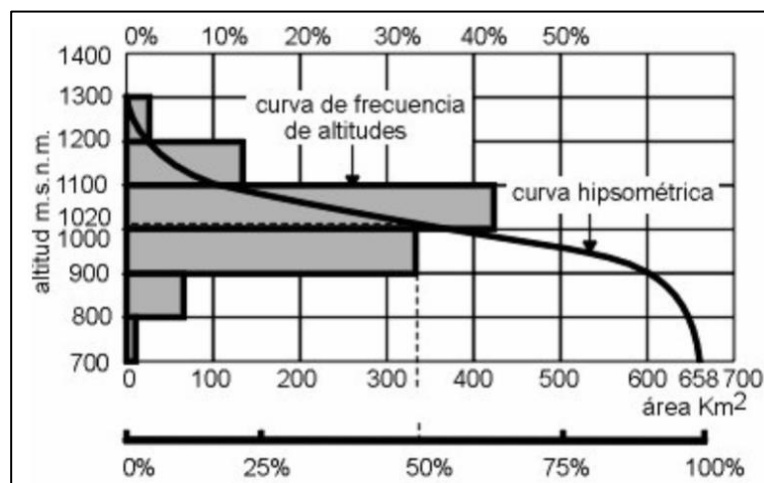


Figura 3. Histograma de frecuencias altimétricas en una cuenca
Fuente: (Villón, Hidrología, 2004)

- Curva hipsométrica:

Curva que indica el porcentaje de área de la cuenca que existe por encima de una elevación dada. La forma de la misma, hace referencia al desarrollo geomorfológico. Las curvas hipsométricas están asociadas con las edades de los ríos respectivos a las cuencas. La Figura 4 muestra diversos ejemplos de curvas hipsométricas.

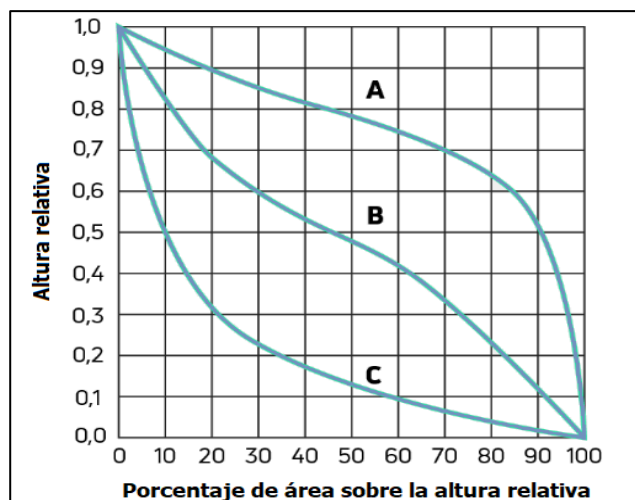


Figura 4. Posibles curvas hipsométricas de una cuenca hidrográfica

Donde:

Curva A: cuenca con gran potencial erosivo (fase de juventud)

Curva B: cuenca en equilibrio (fase de madurez)

Curva C: cuenca sedimentaria (fase de vejez)

- Pendiente del cauce principal:

Se define como la relación entre la diferencia de alturas y longitud para el cauce principal de una cuenca. Dicha pendiente se puede obtener a través del criterio de Taylor y Schwarz y de un promedio de alturas.

2.1.1.4 Parámetros de la red de drenaje

Estos corresponden con parámetros o aspectos que caracterizan los cauces y el desarrollo de la red hidrográfica en una determinada cuenca. A continuación, se describe la jerarquización de la red fluvial y densidad de drenaje en una cuenca.

- Jerarquización de la red fluvial:

Según (Ibáñez et al., 2010), la jerarquización consiste en un proceso de clasificación de cauces en una red de drenaje que permite tener un mejor conocimiento de la complejidad del sistema. Este es un proceso importante, ya que el número de orden de los cauces puede estar directamente relacionado con características físicas, biológicas y químicas de un sistema fluvial.

Existen diferentes métodos para determinar las jerarquías en una red de drenaje. En la presente investigación se hará uso del método Strahler, en el cual el orden se genera según el orden mayor de los tributarios. La Figura 5 muestra el método Strahler empleado.

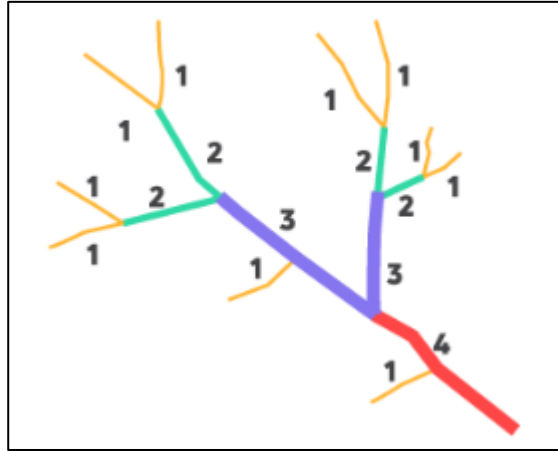


Figura 5. Jerarquización de una red de drenaje (método Strahler)

- Densidad de drenaje (D_d):

Se identifica como un parámetro que indica el grado de desarrollo de una red hidrográfica tomando como punto de partida la suma de las longitudes de todos los cauces y el área de la cuenca. A nivel general, una densidad un valor de densidad de drenaje mayor indica un mayor potencial de erosión. Asimismo, este parámetro varía inversamente con la extensión de la cuenca.

2.1.1.5 Uso y cobertura del suelo

El uso del suelo describe a la utilización de la tierra con fines de desarrollo socioeconómico (e.g. uso urbano, agrícola y uso forestal). La cobertura del suelo confiere a elementos físicos naturales y antropogénicos que se encuentran en la superficie de la tierra (e.g. bosques, asfalto, pastos, etc) (Porrás, 2021). La debida caracterización de estos aspectos es importante, ya que algunas de las metodologías para la obtención de caudales de diseño consideran parámetros que se definen a partir del uso y de la cobertura del suelo.

2.1.1.6 Características geológicas y pedológicas de la cuenca

La geología describe el tipo de material rocoso presente en la cuenca, los cuales están directamente relacionados con el comportamiento de ríos y patrones de drenaje que pueden presentarse en una determinada zona.

Asimismo, la clasificación del tipo de la geología del suelo permite identificar características asociadas a la mineralogía y permeabilidad del terreno cuando este entra en contacto con el agua. Dichas características pueden definir la capacidad de infiltración y la potencia de un terreno para producir y sostener la escorrentía superficial.

2.1.2 Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos son representaciones conceptuales simplificadas, las cuales se utilizan tanto para la predicción como los procesos hidrológicos. En el presente apartado se abarcarán algunos conceptos asociados a los modelos hidrológicos estudiados en la presente investigación.

2.1.2.1 Generación de escorrentía

Cuando se genera un exceso de precipitación que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo, dicho exceso se mueve a través de la cuenca, llenando así depresiones del terreno mismo (Montealegre, 2015). Una vez que se ha generado el exceso de precipitación y este haya fluido a través de la cuenca, dicho exceso pasa a convertirse en escorrentía directa, la cual está asociada a la que llega a los cauces superficiales en un período de tiempo, esto bajo el supuesto de flujo hortoniano (Sánchez, 2004).

2.1.2.2 Hidrograma de crecientes y hietograma

Un hidrograma constituye una representación gráfica de un caudal en función del tiempo. El área que se encuentra por debajo de la curva que conforma el hidrograma corresponde al volumen de agua que ha pasado por un aforo en un intervalo de tiempo determinado.

A partir del hietograma, se distinguen las precipitaciones retenidas o infiltradas de las cuales se producen escorrentía directa, a la cuales se le denomina precipitación neta o efectiva. En la Figura 6 se muestra una representación gráfica de un hidrograma de crecidas con el respectivo hietograma de precipitaciones.

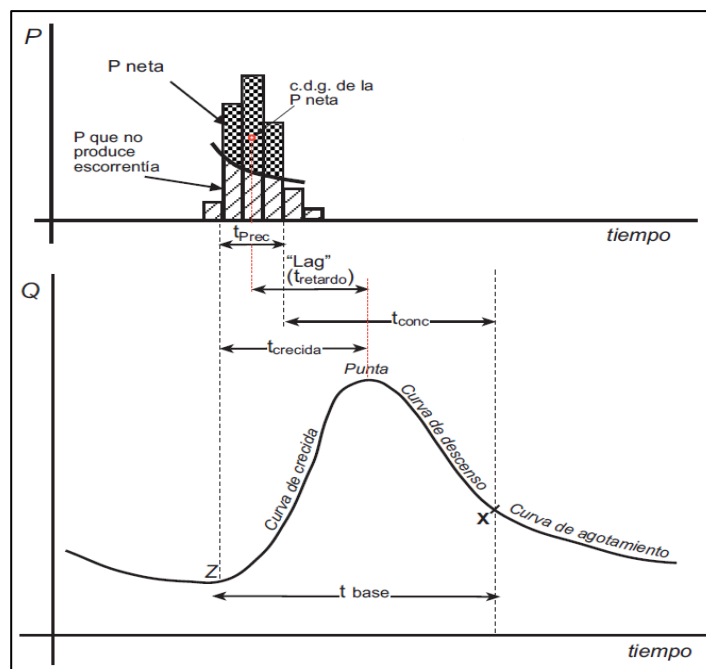


Figura 6. Esquema de un hidrograma de crecida y hietograma de precipitaciones
Fuente: (Sánchez, 2004)

2.1.2.3 Hidrograma unitario

Corresponde a una representación gráfica de la escorrentía directa que se pudiese producir en la salida de una cuenca, si sobre ella se produjera una precipitación neta en unidad de una duración determinada (e.g. 1 mm, durante 1 h). Dicha precipitación, se debe generar con intensidad constante a lo largo del período de manera homogénea en toda la superficie de la cuenca (Sánchez, 2004).

A continuación, se presentan algunas suposiciones básicas del modelo del hidrograma unitario:

- ▶ La precipitación efectiva está uniformemente distribuida en toda el área de drenaje.
- ▶ La intensidad de la precipitación efectiva es constante dentro de la duración efectiva.
- ▶ El hidrograma unitario se dispone para una escorrentía directa y una precipitación efectiva.

2.1.2.4 Hidrogramas unitarios sintéticos

Es un método de derivación de hidrogramas unitarios para cuencas que no presentan estaciones de medición, estos se constituyen con fórmulas teóricas o empíricas que relacionan el caudal máximo con el tiempo. La presente investigación empleará las aproximaciones adimensionales de SCS (por sus siglas en inglés, Soil Conservation Service) y las de Snyder.

A continuación, se presentan una descripción de las metodologías con los correspondientes parámetros de entrada cada una de las aproximaciones.

- Hidrograma unitario SCS:

Este corresponde con un modelo que se basa en promedios de hidrogramas unitarios, los cuales son derivados de precipitaciones y escurrimiento provenientes de una considerable cantidad de cuencas agrícolas en Estados Unidos.

Este modelo emplea el método de abstracciones iniciales con el número de curva (CN) del SCS. El número de curva corresponde a un parámetro hidrológico que se emplea con el fin de describir el potencial de escurrimiento de aguas pluviales para un área de drenaje definida. Este parámetro está en función del uso, cobertura y de la humedad del suelo.

Para obtener el CN se aplica una ponderación del uso de suelo y de la clasificación de los tipos de suelo.

Para emplear el método de abstracciones iniciales, en la presente investigación se hará uso de la capa denominada "Uso de suelo" del ATLAS 2012-2014 del TEC y del software QGIS. Con estos dos recursos, se podrá caracterizar el tipo de cobertura que presenta la cuenca y el orden del suelo, para posteriormente calcular las áreas representativas de cada una de las tipologías de cobertura del suelo.

Una vez que se determina la distribución de áreas por tipo de cobertura de la cuenca, se procede a definir el potencial de escurrimiento que puede poseer el suelo, esta definición se traduce en una clasificación del suelo en grupos hidrológicos identificados de tipo A, B, C o D.

- El grupo de suelos hidrológicos A, se caracterizan por estar conformado por suelos con altas tasas de infiltración, definidos principalmente por arenas o gravas, bien drenadas. Estos suelos por lo general tienen una alta tasa de transmisión de agua.
- Por su parte, los suelos que clasifican como B, son materiales que tienen tasas de infiltración moderada cuando están saturados, estos presentan texturas moderadas de profundas a finas. Estos suelos tienen una tasa media de transmisión de agua.
- Los suelos del tipo C, son materiales que presentan una tasa de infiltración lenta cuando están saturados. Estos suelos generalmente presentan textura fina y una tasa de transmisión de agua lenta.

- Finalmente, los suelos del grupo D, son suelos con alto potencial de escorrentía con tasas de infiltración muy bajas. Por lo general, la textura de estos materiales es arcillosa, y el nivel freático suele ubicarse a nivel superficial.

Posterior a la respectiva caracterización del suelo y la clasificación de los grupos de suelos hidrológicos, el método de abstracciones emplea el Cuadro 1, el cual presenta diferentes coeficientes asociados a la cobertura del número de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana.

Cuadro 1. Descripción de la cobertura del número de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana

Uso de la tierra	Condición Hidrológica	Grupo de Suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada	Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
	Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales	Condiciones pobres	68	79	86	89
	Condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos	Condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques	Cubierta pobre	45	66	77	83
	Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas	Óptimas condiciones	39	61	74	80
	Condiciones aceptables	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios	85% impermeable	89	92	94	95
Distritos industriales	72% impermeable	81	88	91	93
Residencial	-	-	-	-	-
1/8 acre o menos	-	77	85	90	92
1/4 acre	-	61	75	83	87
1/3 acre	-	57	72	81	86
1/2 acre	-	54	70	80	85
1 acre	-	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc	-	98	98	98	98
Calles y carreteras	-	-	-	-	-
Pavimentos con cunetas y alcantarillados	-	98	98	98	98
Grava	-	76	85	89	91
Tierra	-	72	82	87	89

Identificada cada una de las coberturas de la cuenca, se procede a determinar el número de curva. El número de curva corresponde a un parámetro hidrológico que se emplea con el fin de describir el potencial de escorrentía de aguas pluviales para un área de drenaje definida. Este parámetro está en función del uso, cobertura y de la humedad del suelo.

Para la derivación de los respectivos hidrogramas, el modelo de hidrograma sintético de SCS emplea los siguientes parámetros:

Tiempo de retardo (t_{lag}): este corresponde al tiempo de respuesta de la cuenca ante la precipitación máxima registrada. La expresión matemática asociada se muestra en la ecuación (4).

$$t_{lag} = 0,60 T_C \quad (4)$$

Donde:

T_C =tiempo de concentración (min)

Duración efectiva (d_e): este parámetro se puede determinar a partir de la curva S de la cuenca o a partir de la ecuación (5).

$$d_e = \frac{t_p}{5} \quad (5)$$

Donde:

t_p =tiempo pico del hidrograma

Tiempo de la punta del evento estudiado (t_p): corresponde con el tiempo máximo donde ocurre la escorrentía máxima del evento, este se obtiene a partir de expresión presentada en la ecuación (6).

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_{lag} \quad (6)$$

Caudal pico del evento en estudio (q_p): Es el caudal más alto que registra el evento analizado, este se aproxima mediante la ecuación (7).

$$q_p = 0,21 \frac{A_c}{t_p} \quad (7)$$

- Hidrograma unitario de Snyder:

Este es un modelo que se basa en las diferentes relaciones encontradas entre las características de un hidrograma unitario estándar y las asociadas a la morfología de la cuenca. Los parámetros que emplea este modelo son los siguientes:

Tiempo de desfase de Snyder ($t_{lag(Snyder)}$): se define como el tiempo pico del hidrograma de la escorrentía superficial y el centro geométrico de la distribución de la lluvia neta. Se determina a partir de la expresión presentada en la ecuación (8).

$$t_{lag(Snyder)} = 0,75C_t(LL_c)^{0.3} \quad (8)$$

Donde:

C_t , es un coeficiente empírico asociado al tiempo que puede tardar el agua en recorrer la cuenca hidrográfica desde el punto más alejado hasta el punto de salida. Este coeficiente se encuentra en función de las características geológicas y topográficas, tales como la pendiente o la permeabilidad del suelo de la cuenca.

L , es la longitud del cauce principal.

L_c , es la longitud del cauce principal desde el punto de control, hasta el punto más cercano al centroide de la cuenca.

Caudal pico ($q_{p(Snyder)}$): Corresponde con la mayor escorrentía de evento, que según el modelo de Snyder, se obtiene a partir de la ecuación (9).

$$q_{p(Snyder)} = 0,27 \frac{C_p A_c}{t_{lag(Snyder)}} \quad (9)$$

Donde:

C_p , al igual que C_t , corresponde a un coeficiente empírico de la cuenca, dicho coeficiente se encuentra relacionado con las condiciones de almacenamiento de la cuenca.

Tiempo pico ($t_{p(Snyder)}$), se aproxima mediante la ecuación (10).

$$t_{p(Snyder)} = \frac{12}{11} t_{lag(Snyder)} \quad (10)$$

2.1.2.5 Curva S

Se le conoce como curva S al hidrograma de escorrentía directa que es generado por una lluvia continua uniforme de duración infinita. La lluvia continua puede considerarse formada de una serie infinita de lluvias de período P tal que cada lluvia individual tenga una lámina hp_e . La curva S de una cuenca definida, se traza a partir de un hidrograma unitario para una duración dada. Esto quiere decir que, a partir de una curva S es posible obtener hidrogramas unitarios a partir de uno conocido (Villón, Hidrología, 2004). La Figura 7 muestra el trazo de una curva S en una cuenca dada.

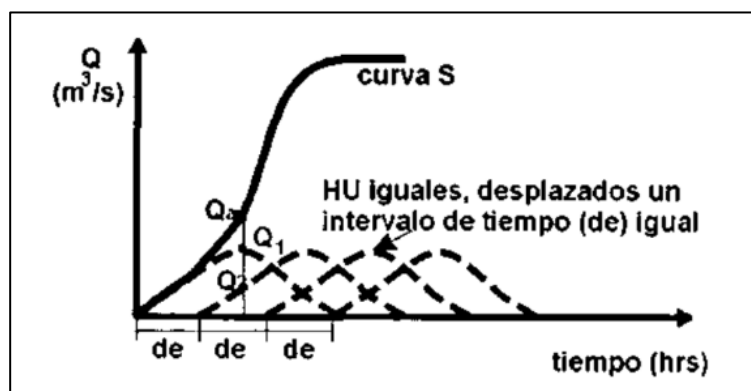


Figura 7. Trazo de una curva S de una cuenca
Fuente: (Villón, Hidrología Estadística, 2006)

2.1.3 Probabilidad y estadística hidrológica

Los estudios hidrológicos requieren de diferentes análisis de información hidrometeorológica, para ello, la hidrología hace uso de conceptos de probabilidad y estadística con el fin de entender la naturaleza de los diferentes fenómenos. A continuación, se presentan algunos conceptos referentes a probabilidad y estadística asociados a las distribuciones de probabilidad log-normal, gamma y GEV, empleadas en la presente investigación:

2.1.3.1 Función de densidad de probabilidad de variable aleatoria discreta

Se define como una expresión matemática que permite determinar la probabilidad $f(x_i) = P(X = x_i)$ de que una variable aleatoria discreta X , tome los valores x_i dentro de un rango definido. El área bajo la curva de una función de densidad de una distribución es unitaria.

2.1.3.2 Media de una distribución (μ)

Es el valor medio del conjunto de datos que conforma una distribución, este valor proporciona una idea general de donde se encuentra una concentración de los valores que puede tomar una variable X.

2.1.3.3 Desviación estándar de una distribución (σ)

Corresponde a un parámetro que expresa cualitativamente que tan dispersos se encuentran los datos alrededor de la media. Asimismo, este dato se puede utilizar como un valor de referencia con el fin de estimar una variación general de los datos.

2.1.3.4 Moda

La moda es el valor que aparece con mayor frecuencia en un conjunto de datos. La información que conforman los datos puede tener una moda, más de una moda o ninguna. Dada una función de distribución de probabilidad, la moda corresponde al punto donde la función alcanza su valor máximo. La Figura 8 presenta la moda en una función de distribución de probabilidad de densidad.

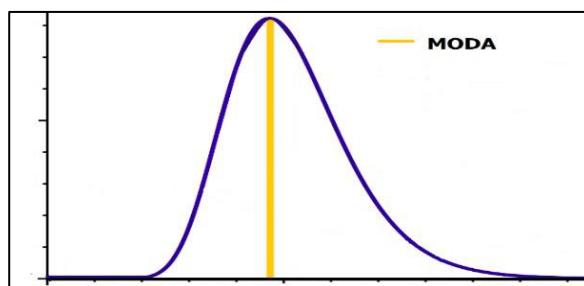


Figura 8. Moda en una función de distribución de probabilidad

2.1.3.5 Distribuciones probabilísticas teóricas

Consiste en modelos probabilísticos, que pretenden representar el comportamiento de una variable, los cuales dependen de parámetros y pruebas de bondad de ajuste. Asimismo, con estas distribuciones se puede tanto como predecir con determinada probabilidad la ocurrencia de una magnitud de un fenómeno hidrometeorológico, así como determinar la magnitud de un fenómeno para un período de retorno dado (Villón, Hidrología Estadística, 2006).

De las distribuciones probabilísticas utilizadas en Hidrología que se abarcan en el presente trabajo son: log-normal, gamma y GEV.

- Distribución log-normal:

Esta distribución se obtiene cuando los logaritmos de una variable definida se describen mediante una distribución normal, es decir que las variaciones en la fiabilidad de una misma clase de componentes se pueden representar considerando la tasa de fallos aleatoria en lugar de una variable constante. La distribución log-normal puede ser de dos parámetros o tres, la presente investigación considerara dos parámetros (σ , μ). Estos parámetros determinan de forma y escala de la distribución probabilística. La Figura 9 ilustra la función densidad de la distribución log-normal.

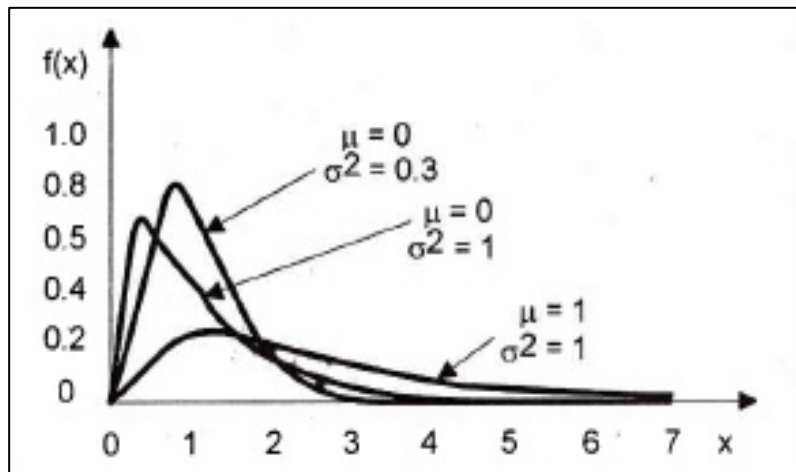


Figura 9. Distribución log-normal de 2 parámetros
Fuente: (Villón, 2006)

La función distribución de densidad log-normal se presenta a continuación en la ecuación (11):

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (11)$$

Donde:

$$x > 0, -\infty < \mu < \infty \text{ y } \sigma > 0.$$

Para esta distribución la moda se comporta de la siguiente manera:

$$\text{Moda} = e^{(\mu - \sigma^2)}$$

- Distribución gamma:

Es una generalización de la distribución exponencial, esta es continua y se adecua para modelizar el comportamiento de ciertas variables aleatorias con asimetría positiva en fenómenos donde se esté involucrado el tiempo. Al igual que la distribución log-normal, la Gamma puede ser de 2 parámetros o de 3, la presente investigación hace uso de la función de dos parámetros (β, α). En la Figura 10, se muestra la representación gráfica de la distribución gamma.

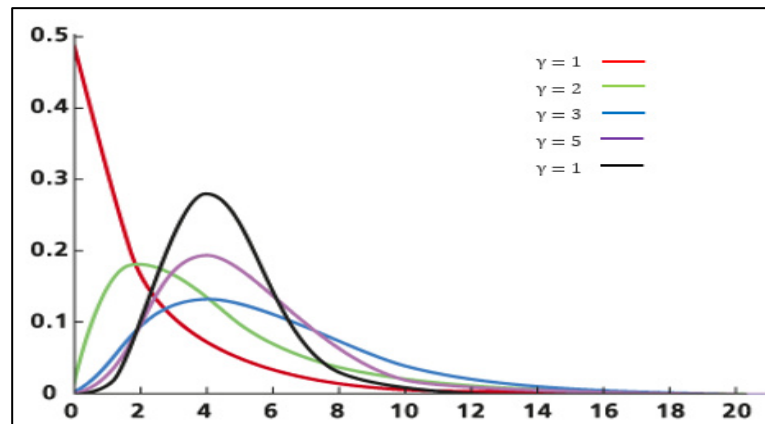


Figura 10. Distribución Gamma de 2 parámetros
Fuente: (ArGis, 2021)

La función distribución de densidad gamma se presenta en la ecuación (12).

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (12)$$

Donde:

Para $x > 0$, $\alpha > 0$ y $\beta > 0$.

Para esta distribución,

Moda = $\beta (\alpha - 1)$

- Distribución GEV:

La distribución de valores extremos generalizados (GEV), es una distribución de probabilidades continuas que se desarrolla dentro de la teoría de los valores extremos. Esta, hace uso de una combinación de los valores extremos de Gumbel, Fréchet y Weibull (VOSE, 2017).

La distribución GEV generalmente se utiliza como una determinada aproximación con el fin de modelar los valores máximos de secuencias largas de variables aleatorias y hace uso de tres parámetros que definen la forma y la escala (μ , k , α). A continuación, en la Figura 11 se muestra una gráfica asociada a la función densidad de la distribución GEV.

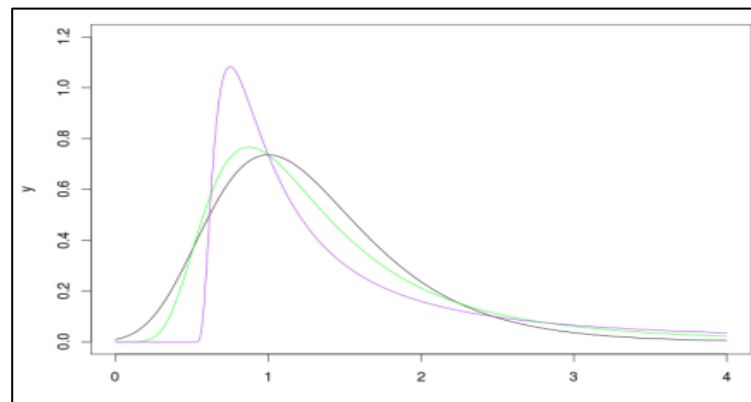


Figura 11. Distribución GEV
Fuente: (Pinheiro & Grotjahn, 2015)

La ecuación que describe el comportamiento de la función densidad de la distribución GEV, se muestra en la ecuación (13).

$$f(x) = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \left\{1 - k \left[\frac{x - \mu}{\alpha}\right]\right\}^{\frac{1}{k-1}} e^{-\left\{1 - k \left[\frac{x - \mu}{\alpha}\right]\right\}^{1/k}} \quad (13)$$

Para $\frac{\mu + \alpha}{k} < x < \infty$

Donde,

$$\text{Moda} = \mu + \alpha \frac{(1+k)^{-k} - 1}{k}$$

2.1.3.6 Validación con métricas de precisión

Consisten en una comprobación estadística, que define si la frecuencia empírica de una serie analizada se ajusta a una determinada función de probabilidades teóricas seleccionadas, esto con base en los valores muestrales (Villón, Hidrología Estadística, 2006).

La presente investigación empleó las siguientes pruebas para validar los respectivos ajustes:

- Error cuadrático medio (RMSE):

El error cuadrático medio o por su traducción RMSE, es una forma estándar empleada para medir el error de un modelo en la predicción de datos cuantitativos. Este método indica que tan concentrados se encuentran los datos alrededor de la línea de mejor ajuste, esto quiere decir, que el RMSE indica el error de predicción promedio del modelo.

La expresión que define al error cuadrático se describe en la ecuación (14).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (14)$$

Donde:

\hat{y}_i es el valor calculado

y_i es el valor observado

n es el tamaño total de la muestra

- Error absoluto medio (MAE):

Este se describe el error promedio que tienen las predicciones del modelo calculado con el modelo real, entre más cercano a cero sea este valor, más preciso será el modelo. Este valor se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{n} \quad (15)$$

Los parámetros para estimar el error absoluto medio corresponden a los mismos indicados en el RMSE.

- Coeficiente de correlación (CC):

El coeficiente de correlación de Pearson, se define como una medida que cuantifica la intensidad de la relación lineal entre dos variables diferentes un análisis de correlación. Este coeficiente refleja que tan similares son las de dos o más variables en un conjunto de datos.

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n - 1)s_x s_y} \quad (16)$$

Donde:

\bar{x} es la media de la muestra para la primera variable

S_x es la desviación estándar simple para la primera variable

\bar{y} es la media de la muestra para la segunda variable

S_y es la desviación estándar simple para la segunda variable

n corresponde con el número de observaciones

El valor de este coeficiente varía entre -1 y 1, donde, el signo del coeficiente indica si variables cambian en una misma dirección o en diferentes direcciones. A continuación, en el Cuadro 2, se presentan los tipos de relaciones según el valor del coeficiente.

Cuadro 2. Tipo de relaciones a partir del coeficiente de correlación de Pearson

Valor			Correlación
± 0,96	~	± 1,00	Perfecta
± 0,85	~	± 0,95	Fuerte
± 0,70	~	± 0,84	Significativa
± 0,50	~	± 0,69	Moderada
± 0,20	~	± 0,49	Débil
± 0,10	~	± 0,19	Muy débil
± 0,09	~	± 0,00	Nula

3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE TÉRRABA

En el presente apartado se dispone a realizar una caracterización a detalle de la cuenca del río Grande de Térraba, en esta caracterización se contempla ubicar el sitio de estudio, obtener y comentar los parámetros morfométricos, así como caracterizar la cobertura, geología y tipología del suelo en la cuenca, y finalmente identificar la climatología de la cuenca.

3.1 Ubicación y delimitación de la cuenca

La cuenca del río Grande de Térraba se localiza en la zona sur de Costa Rica específicamente en mayor proporción entre las provincias de San José, Puntarenas, y en poca proporción Cartago y Limón. Esta distribución territorial por cantón se detalla en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Distribución territorial de los cantones en la cuenca

Provincia	Cantón	Área (km²)	Perímetro (m)
Cartago	Turrialba	0,16	18,10
	Paraíso	0,05	9,45
Limón	Talamanca	1,16	121,43
San José	Pérez Zeledón	1.371,93	188,55
Puntarenas	Buenos Aires	2.383,56	281,45
	Coto Brus	886,14	168,70
	Osa	411,96	254,17
	Golfo	0,30	18,94

Fuente: (Rojas, 2011), Modificado por Zeledón 2023.

La cuenca del río Grande de Térraba es la más extensa de Costa Rica, con un área de 4.905,05 km². Lo cual, a nivel de cobertura, representa cerca de un 10% de la superficie nacional. La cuenca está delimitada entre las coordenadas de 950.000 – 1 100.000 de latitud Norte a 500.000 – 700.000 de longitud Oeste en la proyección CRTM05. El río principal de esta cuenca corresponde con el río Grande de Térraba y nace de la unión entre los ríos El General y Coto Brus. Este tiene una longitud aproximada de 180,00 km.

En la Figura 12, se presenta un mapa con la respectiva ubicación de la cuenca del río Grande de Térraba. En este se observa a mayor detalle la delimitación de la cuenca y su ubicación según la proyección CRTM05.

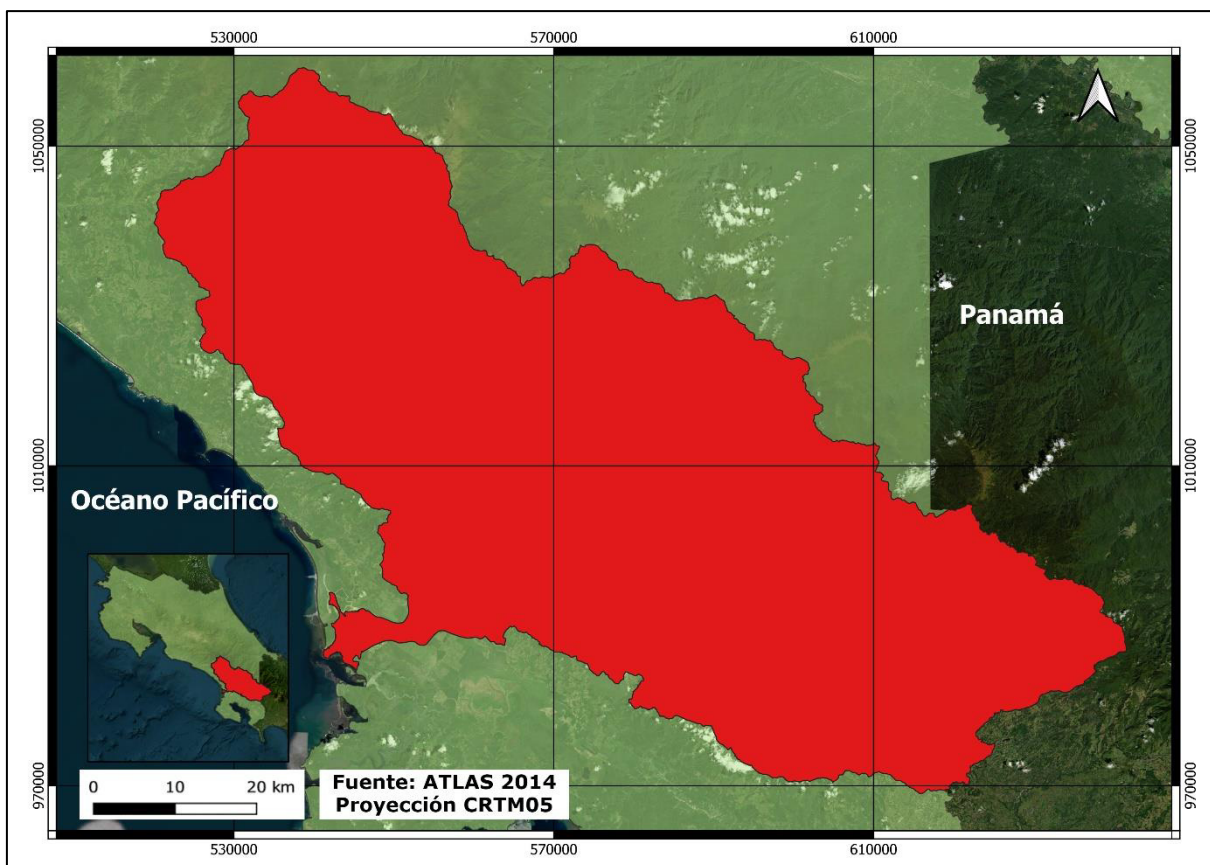


Figura 12. Ubicación de la cuenca del Río Grande de Térraba

Entre las principales actividades socioprodutivas que se realizan en la cuenca se destacan aquellas que se desarrollan dentro de las áreas de manglar y en el sistema fluvial de los principales cauces. Algunas de las actividades que se desarrollan dentro de la cuenca son: recolección de piangua, camaróneras, pesca artesanal, turismo y extracción de materiales. En cuanto al sector agrícola, se destaca el cultivo de palma africana, café, banano y arroz en algunos sectores de gran altura (Rojas, 2011).

La cuenca del río Grande de Térraba está conformada por ocho subcuencas: río Chirripó, río Coto Brus-Cabagra, río General, río Grande de Térraba, río Pacuar, río Pejibaye, río Peñas Blancas y río Unión.

Los eventos hidrológicos ocurridos en estas subcuencas, son usualmente registrados en diferentes estaciones hidrológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y el ICE. De las cuales, con el objetivo de delimitar la obtención de datos vastos, continuos y confiables se seleccionaron cinco estaciones hidrológicas del ICE. Las cuales se encuentran dentro de la cuenca estudiada.

Las cinco estaciones seleccionadas corresponden con: El Brujo (3103), Remolino (3104), Las Juntas (3105), Caracucho (3107) y Cabagra (3112). En el Cuadro 4, se presentan las coordenadas en proyección CRTM05 de las estaciones seleccionadas, así como a la altitud que se encuentra cada una de estas.

Cuadro 4. Coordenadas de las estaciones hidrológicas empleadas en el estudio

Estación	Coordenadas (CRTM05)		Altitud (m.s.n.m.)
	Latitud	Longitud	
El Brujo (3103)	1 005.428,73	557.938,94	136,90
Remolino (3104)	1 019.023,35	551.766,77	395,00
Las Juntas (3105)	1 023.832,94	540.193,49	490,00
Caracucho (3107)	995.584,56	587.867,94	96,00
Cabagra (3112)	1 002.038,51	588.861,59	205,00

La Figura 13 muestra la ubicación de cada una de las estaciones mencionadas anteriormente, así como de las subcuencas que conforman la cuenca del río Grande Térraba.

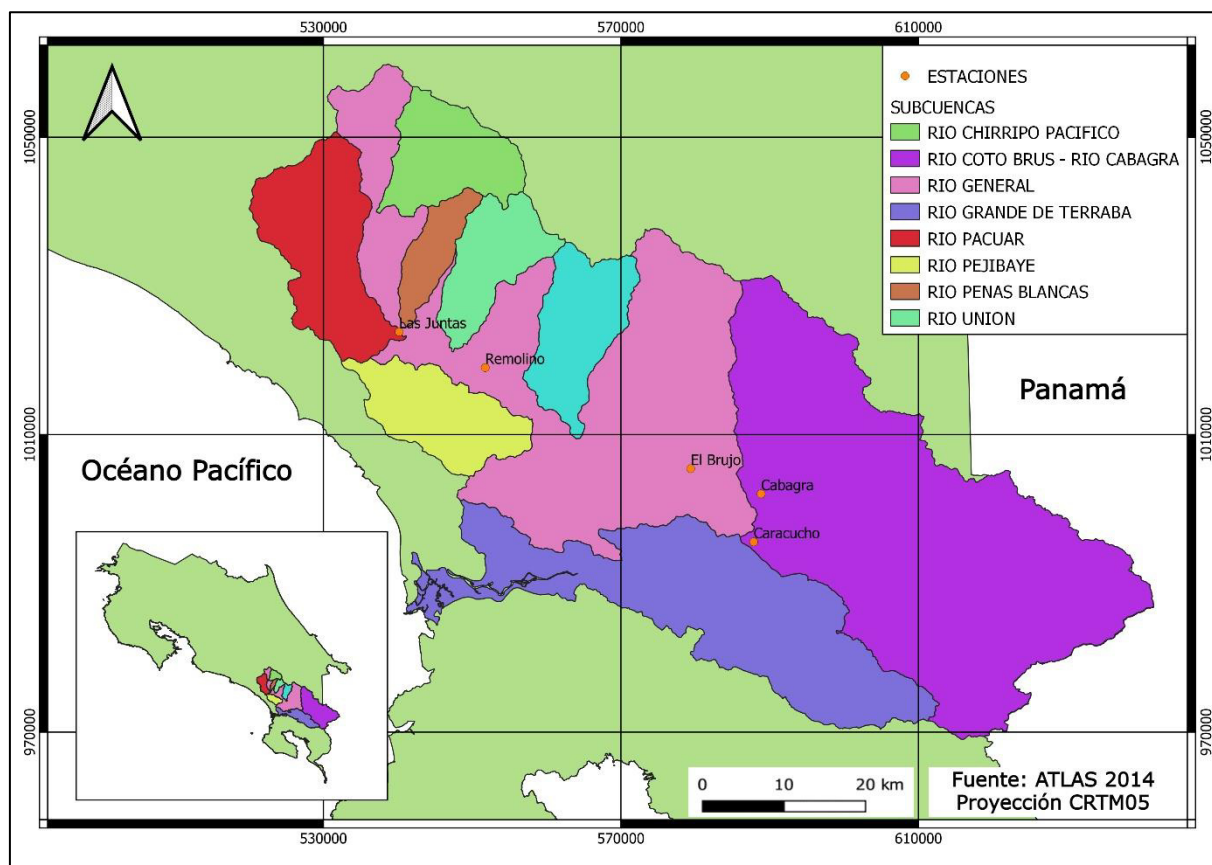


Figura 13. Subcuencas del Río Grande de Térraba y ubicación de las estaciones de análisis

3.2 Parámetros morfométricos

3.2.1 *Parámetros morfométricos generales de la cuenca*

Como se mencionó anteriormente, la cuenca del río Grande de Térraba comprende un área considerable de 4.905,05 km². A nivel general presenta un perímetro de 459,25 km y un ancho promedio de 36,93 km. En el Cuadro 5, se presentan a detalle los parámetros morfométricos generales obtenidos que permiten caracterizar físicamente a la cuenca del río Grande de Térraba.

Cuadro 5. Parámetros morfométricos generales de la cuenca de estudio

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Perímetro	P	km	459,25
Área	A	km ²	4.905,05
Longitud máxima de cuenca	L _M	km	132,82
Longitud de cauce principal	L _C	km	180,00
Ancho de cuenca	A _C	km	36,93
Desnivel altitudinal	D _A	m	3.795,00

3.2.2 *Parámetros morfométricos asociados a la forma de la cuenca*

Con base en los parámetros generales obtenidos, se procedió a determinar los parámetros morfométricos referentes a la forma de la cuenca (factor de forma e índice de Gravelius). Los resultados obtenidos se presentan a detalle en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Parámetros morfométricos asociados a la forma de la cuenca de estudio

Parámetro	Símbolo	Valor
Factor de forma	K _f	1,95
Índice de Gravelius	I _G	1,84

A partir de los resultados obtenidos, se determinó que la cuenca presenta un factor de forma (K_f) de 1,95. Este valor permite clasificar a la cuenca del río Grande de Térraba como ancha.

Por su parte, el índice de Gravelius (I_G), cuyo valor corresponde con 1,84, indica que la cuenca tiene una forma rectangular oblonga.

3.2.3 Parámetros morfométricos asociados a la altimetría de la cuenca

Se procedieron a determinar los parámetros asociados a la forma del relieve de la cuenca, para esto, se emplearon las curvas de nivel que dispone el Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica (IGN) en escala 1:5.000 y del software QGIS, para generar un Modelo de Elevación Digital (MED) que permitiese conocer la altitud máxima, mínima y media. Los resultados obtenidos a través del software se presentan en el Cuadro 7, así como en la Figura 14 la salida gráfica de la distribución altitudinal asociada a los resultados.

Cuadro 7. Parámetros morfométricos asociados a la forma del relieve de la cuenca de estudio

Parámetro	Valor
Altitud máxima	3.795,00 m.s.n.m
Altitud mínima	0,00 m.s.n.m
Altitud media	1.041,11 m.s.n.m

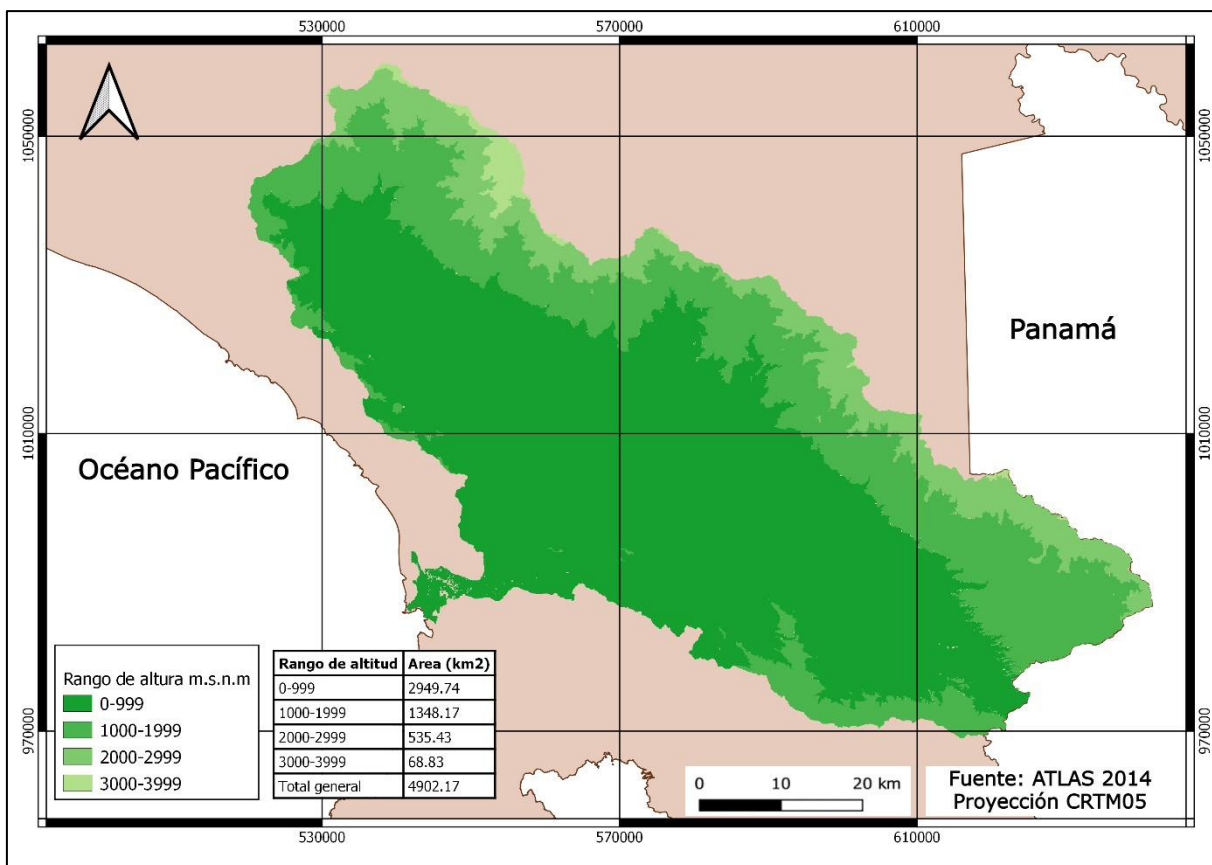


Figura 14. Distribución altitudinal de la cuenca estudiada

A partir de la altimetría obtenida del MED mencionado anteriormente, se procedió a determinar tanto la curva hipsométrica (Figura 15), como el histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca (Figura 16).

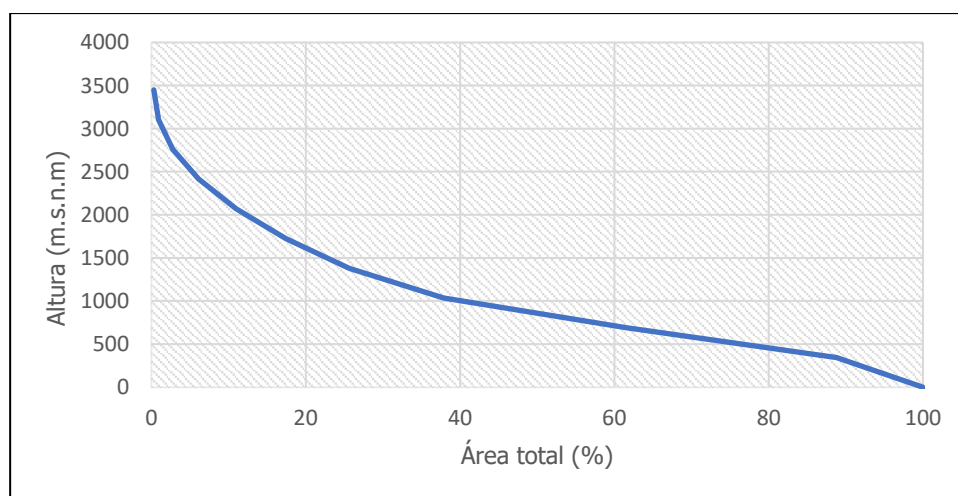


Figura 15. Curva hipsométrica de la cuenca estudiada

A través de la interpretación gráfica obtenida de la curva hipsométrica, se determinó que el río Grande de Térraba se encuentra entre las edades de maduro a viejo, así como que un 40% del área de cuenca presenta un área de 1.000 m.s.n.m.

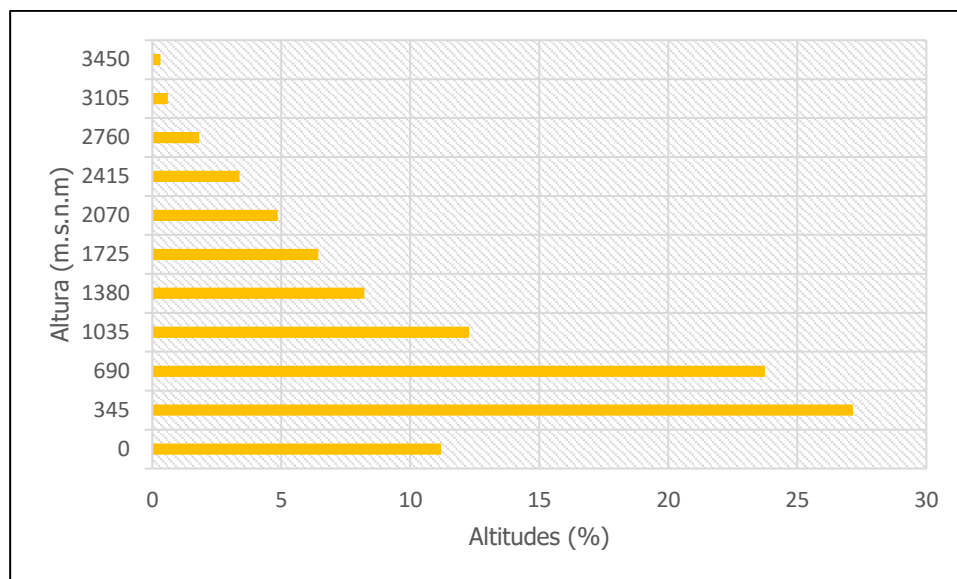


Figura 16. Histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca estudiada

A partir del histograma de frecuencias altimétricas, se logró identificar que más del 25% del relieve está asociado a una altura cercana a los 345 m.s.n.m. y que entre 0 y 5% del relieve comprende una altura promedio de 2.846 m.s.n.m.

3.2.4 Parámetros morfométricos de la red de drenaje

Se analizó el sistema de drenaje de la cuenca, considerando el cauce principal y sus principales afluentes. Los parámetros obtenidos se muestran a detalle en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Parámetros morfométricos asociados a la red de drenaje

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Longitud total de drenaje	L_D	km	19.085,00
Densidad de drenaje	D_D	km/km ²	3,89
Pendiente del cauce	S_C	%	6,26
Tiempo de concentración (Kirpich)	T_C	Horas	10,45

Con base en el valor obtenido para para la densidad del drenaje (3,89 km/km²), se pudo determinar que cuenca presenta una eficiencia de drenaje alta, ya que se encuentra en un rango superior a 3.

En cuanto al orden de la cuenca, se determinó que número de orden máximo es de 4, esto se muestra en la Figura 17, la cual ilustra el patrón de drenaje considerado en la cuenca.

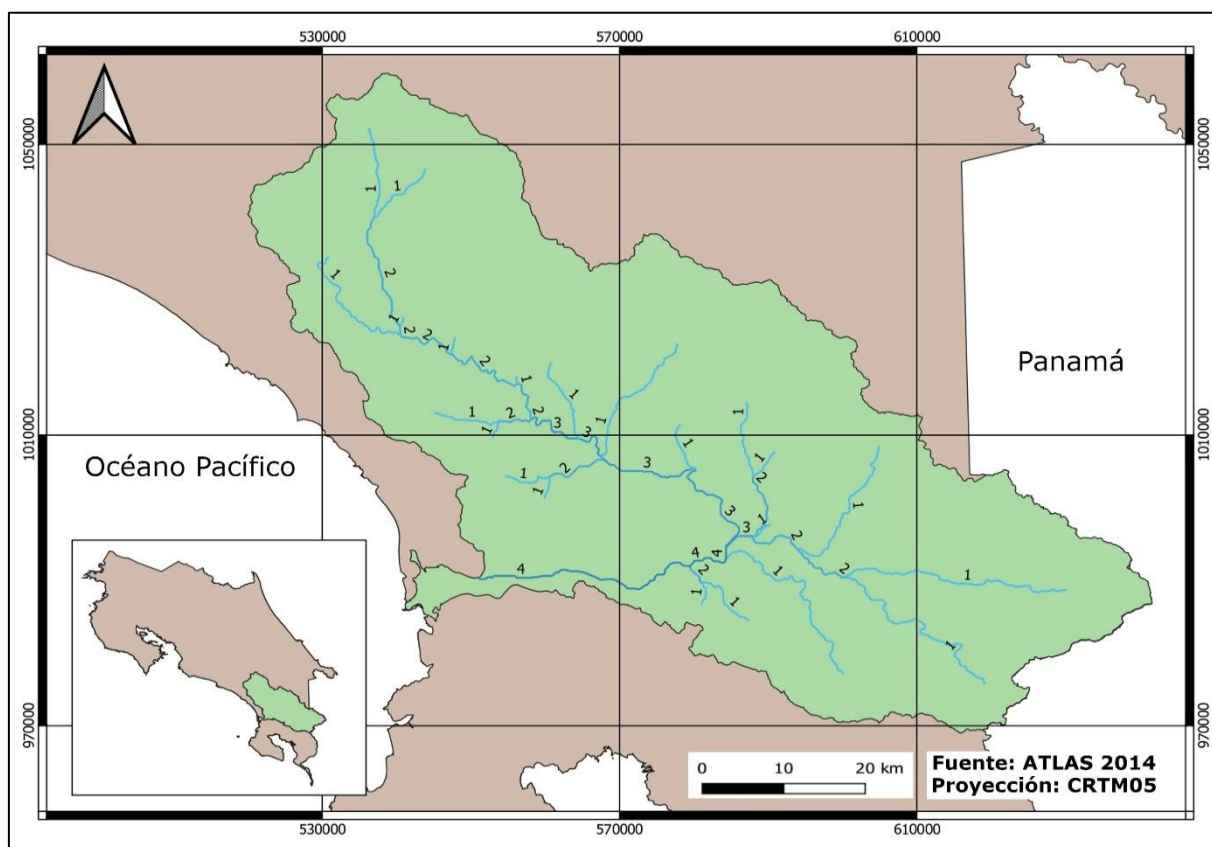


Figura 17. Patrón de drenaje de la cuenca estudiada - Escala 1:50 000

Con base en la Figura 17, se detectó que el número de orden que se repite mayormente, corresponde con el número 1, lo cual se asocia con que el drenaje de la cuenca está conformado mayormente por afluentes pequeños y quebradas que contribuyen al cauce principal. Cabe destacar que esta consideración es válida a partir de la escala de trabajo utilizada, la cual corresponde con 1: 50.000.

3.3 Caracterización de cobertura, geología y tipología del suelo de la cuenca

El uso de suelo con el que cuenta la cuenca se subdivide en: agua, bosque, humedales, no bosque, nubes, páramo y sombras. Donde se destaca que el área asociada a no bosque es la presenta mayor proporción (64,51% del área). Esto se puede apreciar en la Figura 18, la cual muestra la distribución del uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Grande de Térraba. Asimismo, en el Cuadro 9 se muestran las áreas asociadas a la cobertura de la cuenca.

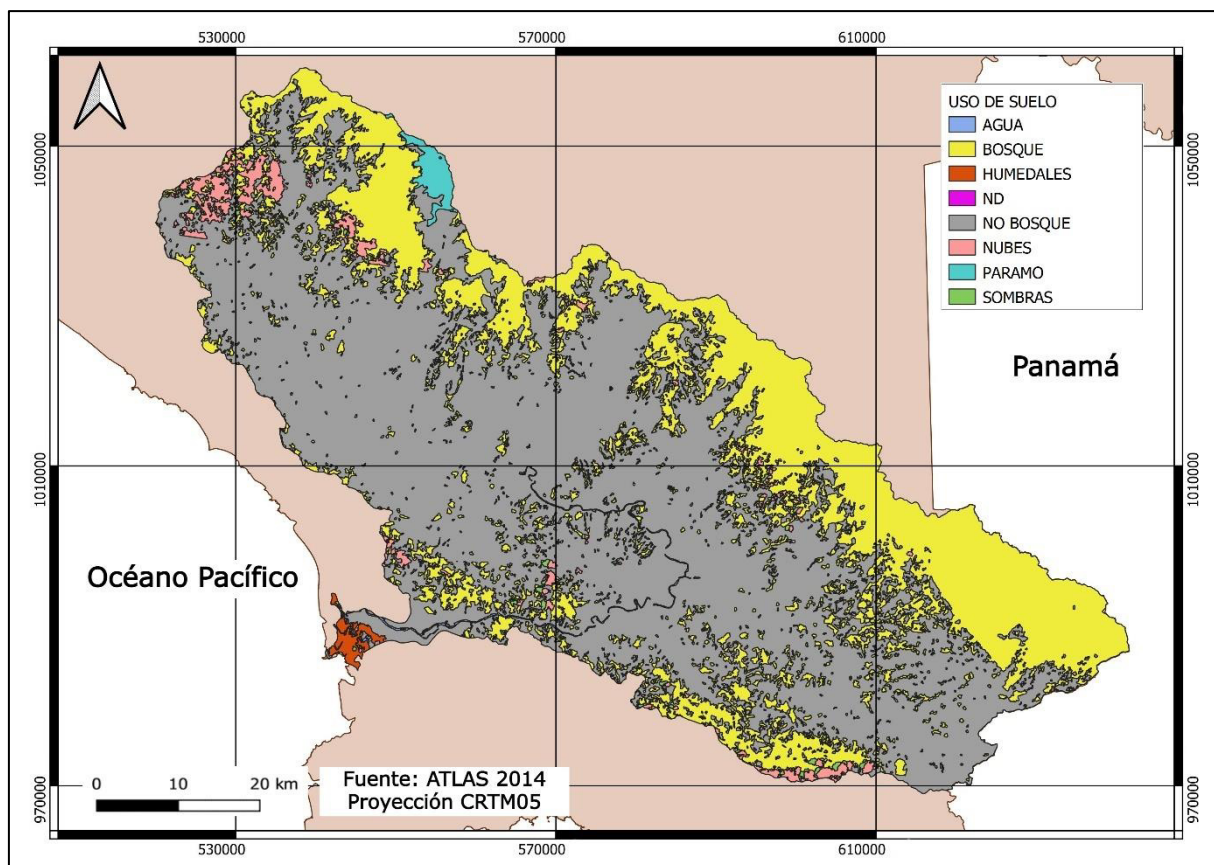


Figura 18. Uso y cobertura del suelo de la cuenca del Río Grande de Térraba

Cuadro 9. Áreas asociadas a la cobertura de la cuenca del Río Grande de Térraba

Tipo de uso de suelo	Área (km ²)	Porcentaje de área (%)
No bosque	3.164,51	64,51
Bosque	1.536,89	31,33
Nubes	109,25	2,23
Páramo	29,53	0,60
Sombras	19,89	0,40
Humedales	18,95	0,38
Áreas no definidas	14,29	0,29
Agua	11,74	0,26

En cuanto a la geología, la cuenca se localiza en una zona conformada por depósitos aluviales y coluviales, facies proximales de rocas volcánicas recientes, rocas intrusivas, rocas sedimentarias de agua profundas, rocas sedimentarias volcanoclásticas y rocas volcánicas. La distribución de la geología se presenta en la Figura 19.

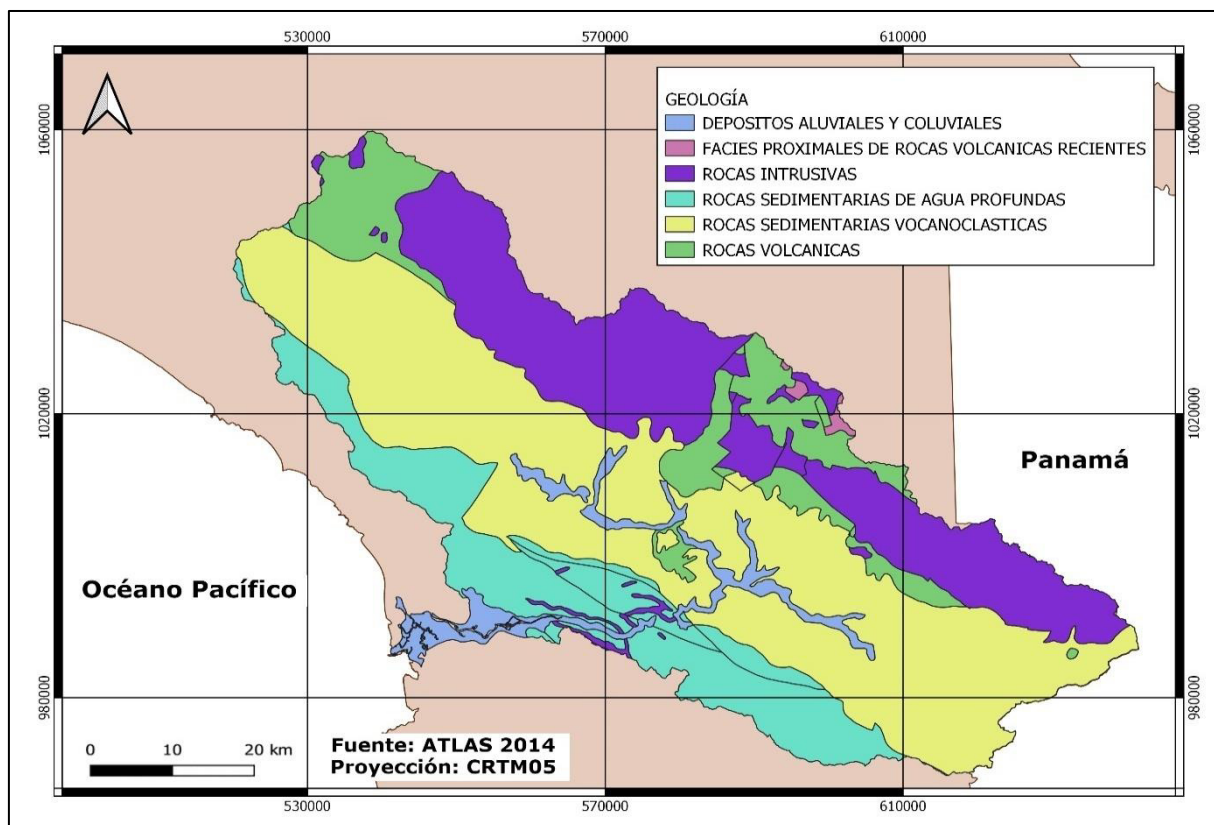


Figura 19. Geología asociada a la cuenca estudiada

La tipología del suelo de la cuenca está compuesta principalmente por entisoles, inceptisoles y en mayor proporción ultisoles. Esta tipología se puede apreciar a detalle en la Figura 20.

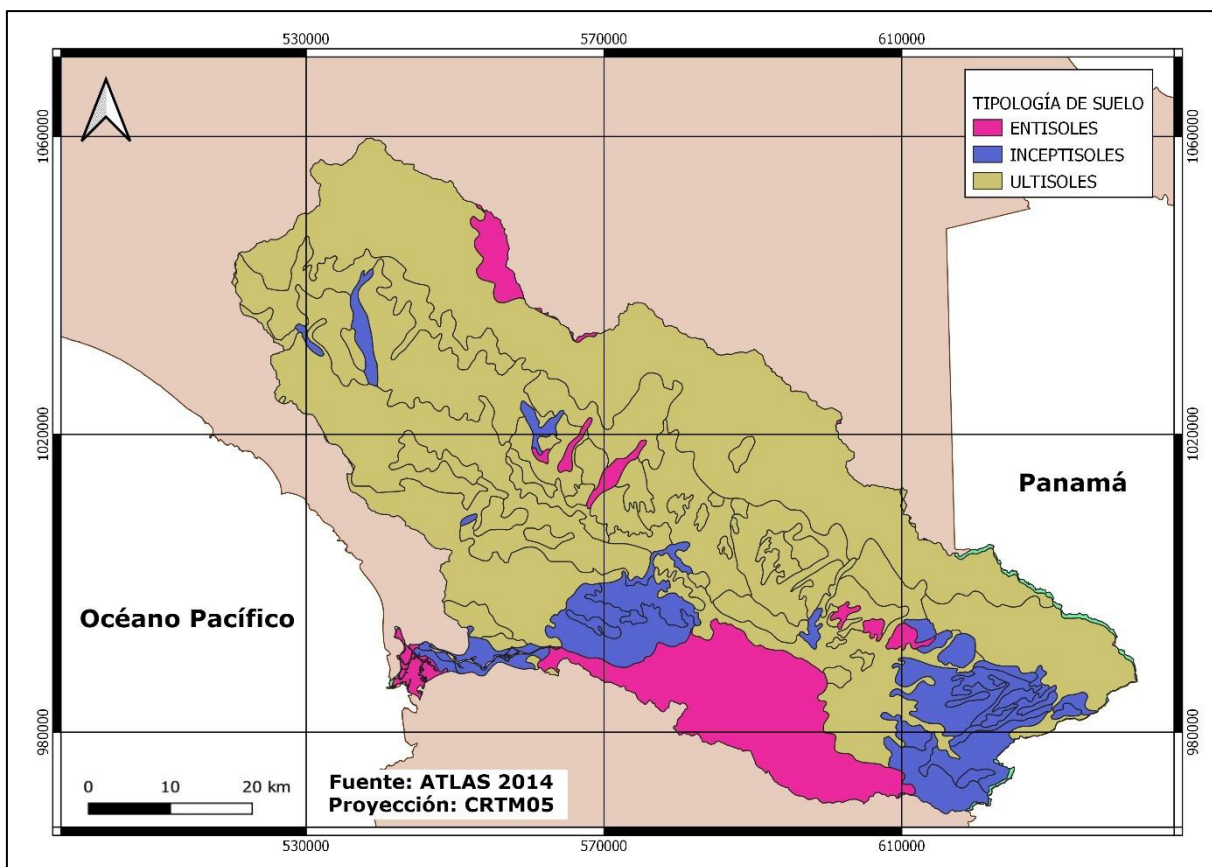


Figura 20. Tipología de suelo de la cuenca de la cuenca estudiada

Como se mencionó anteriormente, se identificó que el suelo de la cuenca está mayormente conformada por ultisoles. Este tipo de suelo se caracteriza por ser uno de los más antiguos que se encuentran en el país y que por lo general se encuentran en lugares con alta humedad y con mucha precipitación.

Entre las propiedades físicas de los ultisoles se destaca que son suelos profundos y cuentan con texturas finas a muy finas, por lo cual, es usual encontrar suelos arcillosos en la zona. Adicionalmente, este tipo de suelo presentan una buena estructuración, lo cual se asocia a un buen drenaje interno.

3.4 Caracterización climatológica de la cuenca

A nivel general, la cuenca presenta un régimen de tipo Pacífico, el cual se asocia a una temporada lluviosa y otra seca bien definidas. La temporada lluviosa usualmente inicia en abril y finaliza en noviembre, y por su parte, la temporada seca normalmente comienza en diciembre y culmina en marzo.

La precipitación media anual de la cuenca va desde 2.200 mm a los 5.500 mm. Los valores más altos se asocian a la zona noroeste de la cuenca, la cual corresponde con el Cerro Nubes. Esta distribución de precipitación en la cuenca estudiada, se puede observar en la Figura 21.

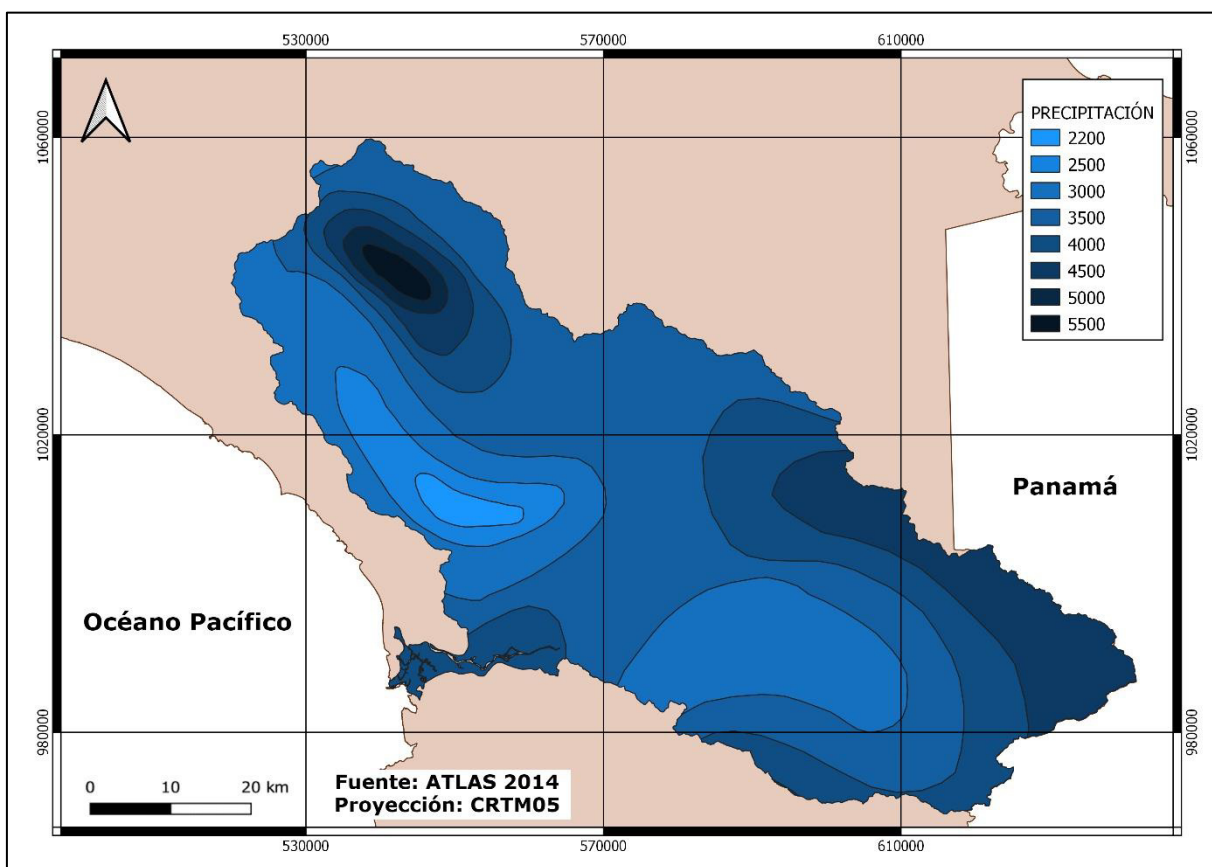


Figura 21. Precipitación media de la cuenca del Río Grande de Térraba

En lo que respecta a la temperatura media anual, en la cuenca se registran valores entre los 14 a 28 °C, pudiendo llegar a oscilar en la parte media baja entre los 18 y 28 °C y en la parte alta entre los 14 y 16 °C.

Por su parte la evapotranspiración anual registra entre los 900 y 1.400 mm. En la parte baja de la cuenca la evapotranspiración se asocia entre los 1.400 y los 1.600 mm y en la zona alta varía entre 900 a 1.000 mm (Rojas, 2011).

4. DEFINICIÓN DE HIDROGRAMAS UNITARIOS

Con el objetivo de parametrizar la respuesta de la cuenca del río Grande de Térraba, se procedió a definir un modelo de precipitación – escorrentía, con base en un conjunto de eventos ocurridos y registrados dentro de la cuenca en las diferentes estaciones hidrológicas ya mencionadas.

La presente investigación empleó la modelación de precipitación – escorrentía del Hidrograma de crecientes reales, para posteriormente, generar los hidrogramas sintéticos: Hidrograma Unitario Sintético Adimensional del Servicio de Conservación de Suelos (HU SCS), Hidrograma Sintético de Snyder.

Se procedió a generar un único hidrograma unitario por metodología (HU SCS y HU de Snyder) con el fin de parametrizar en forma general la información de cada uno de los métodos. Cabe destacar que los hidrogramas unitarios sintéticos fueron obtenidos a partir de la simulación con el software HEC-HMS.

4.1 Eventos para las simulaciones

Para la respectiva simulación de los eventos, se emplearon los datos de escorrentía de las cinco estaciones hidrológicas del ICE presentadas en el Cuadro 4. Como se indicó en los alcances, los datos proporcionados abarcaban desde 1969 hasta 2020.

Cabe destacar que, dada la considerable cantidad de registros por estación, se procesaron los datos de escorrentía contra tiempo con el Software RStudio. Este proceso conllevó inicialmente una revisión total de los datos escorrentía contra tiempo, para cada una de las estaciones. Con este proceso se buscó conocer a nivel general la continuidad de los datos, en todos los registros brindados.

A continuación, se presentan las salidas gráficas de los todos los registros totales de escorrentía contra tiempo por estación (Figura 22 - Figura 26):

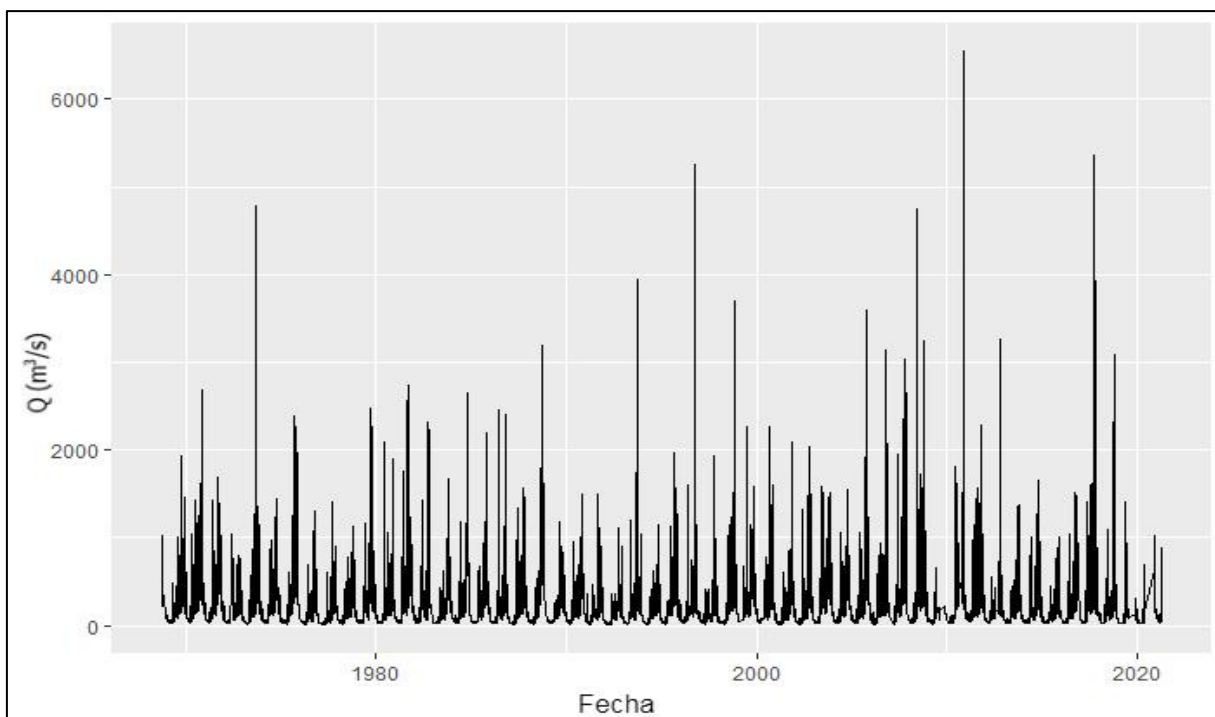


Figura 22. Escorrentía contra fecha de todo el registro de la Estación El Brujo (3103)

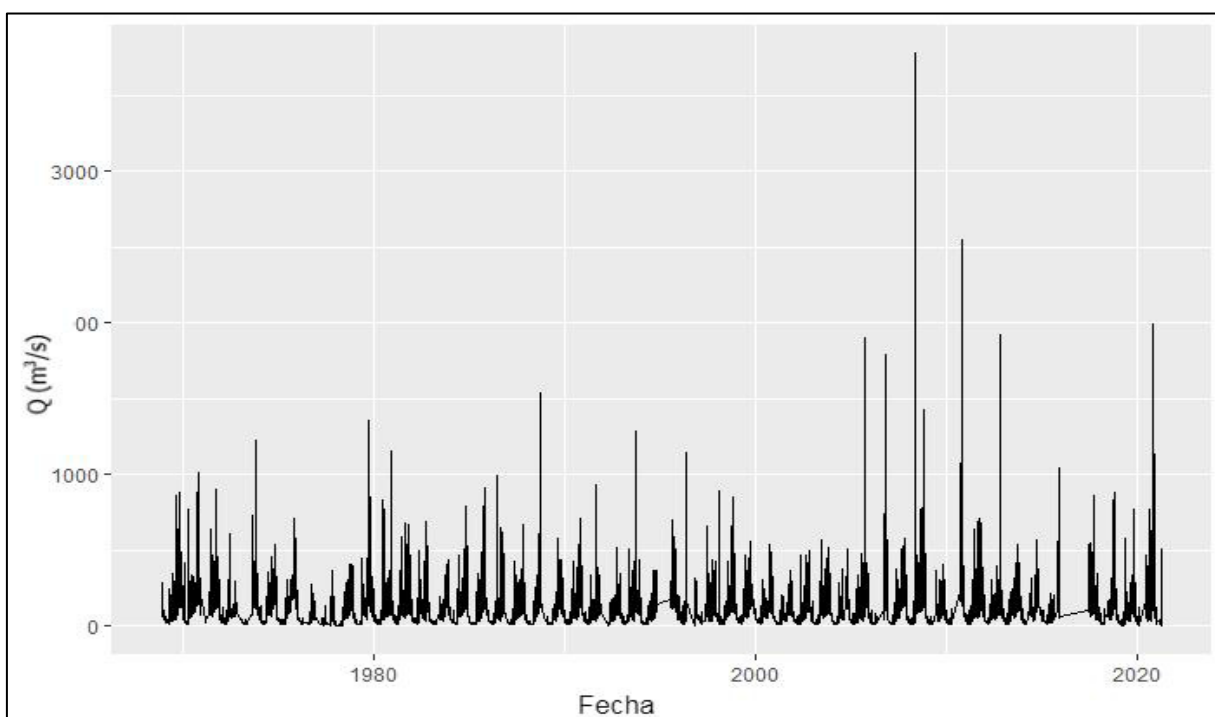


Figura 23. Escorrentía contra fecha de todo el registro de la Estación El Remolino (3104)

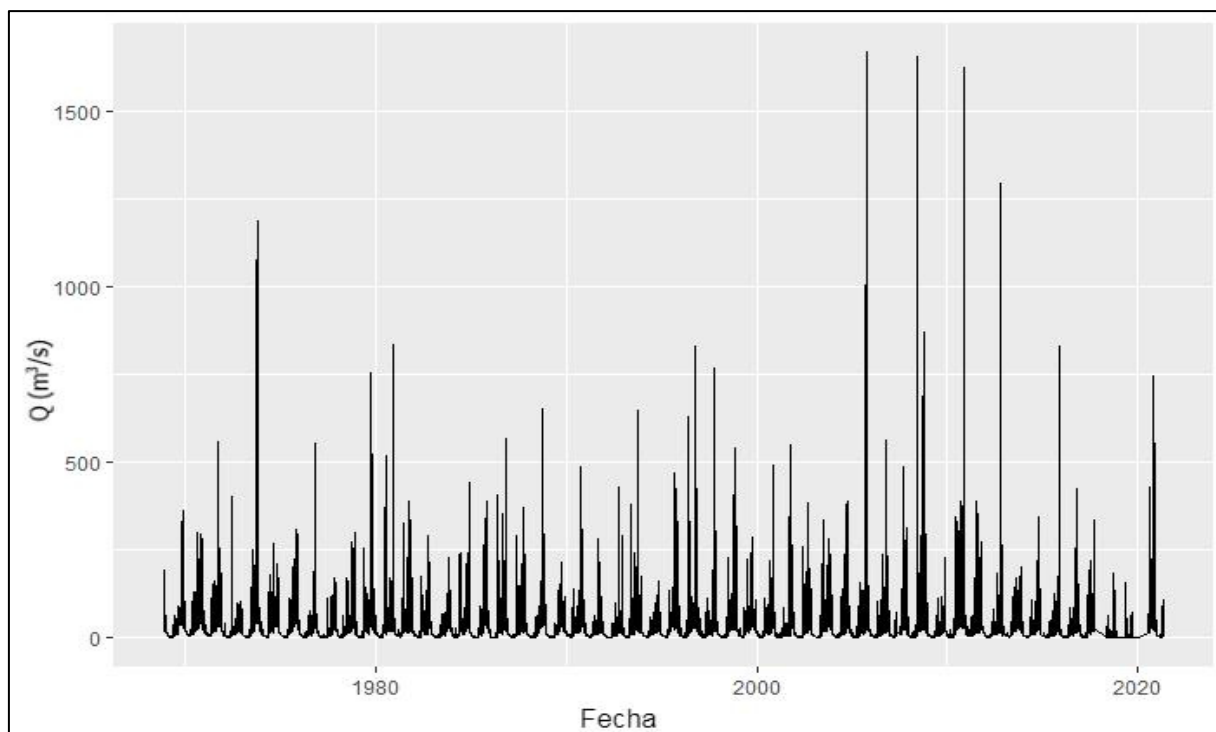


Figura 24. Escorrentía contra fecha de todo el registro de la Estación Las Juntas (3105)

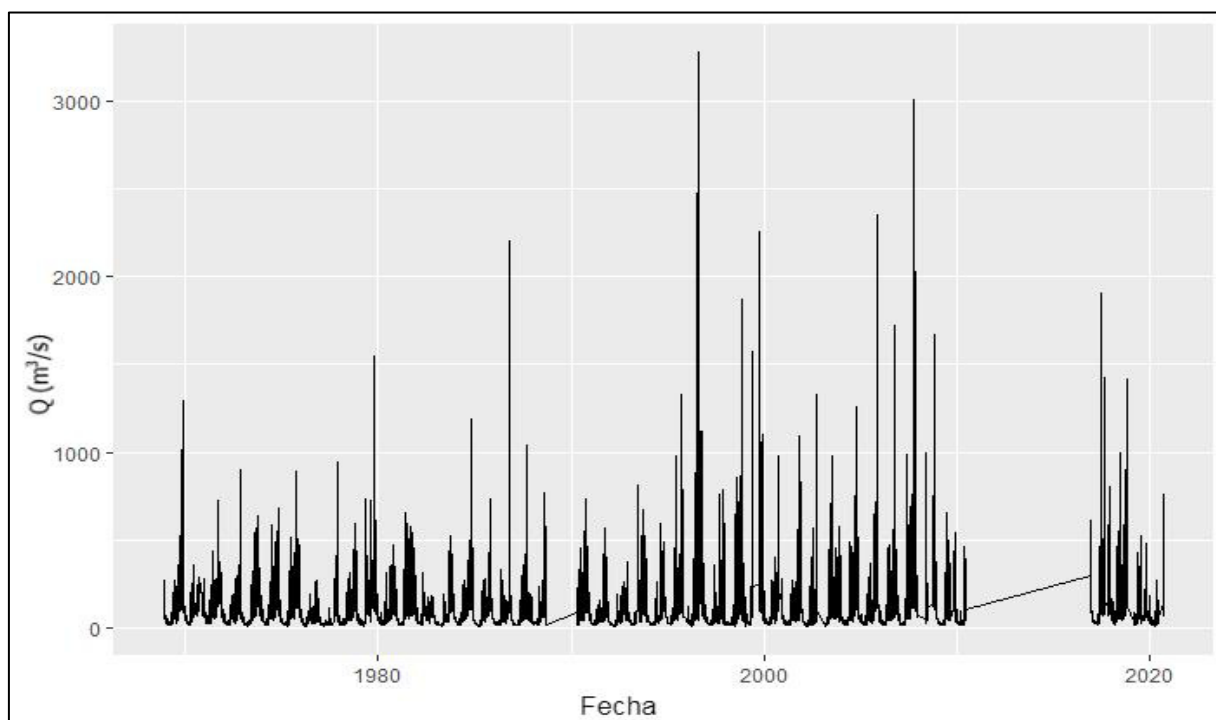


Figura 25. Escorrentía contra fecha de todo el registro de la Estación Caracucho (3107)

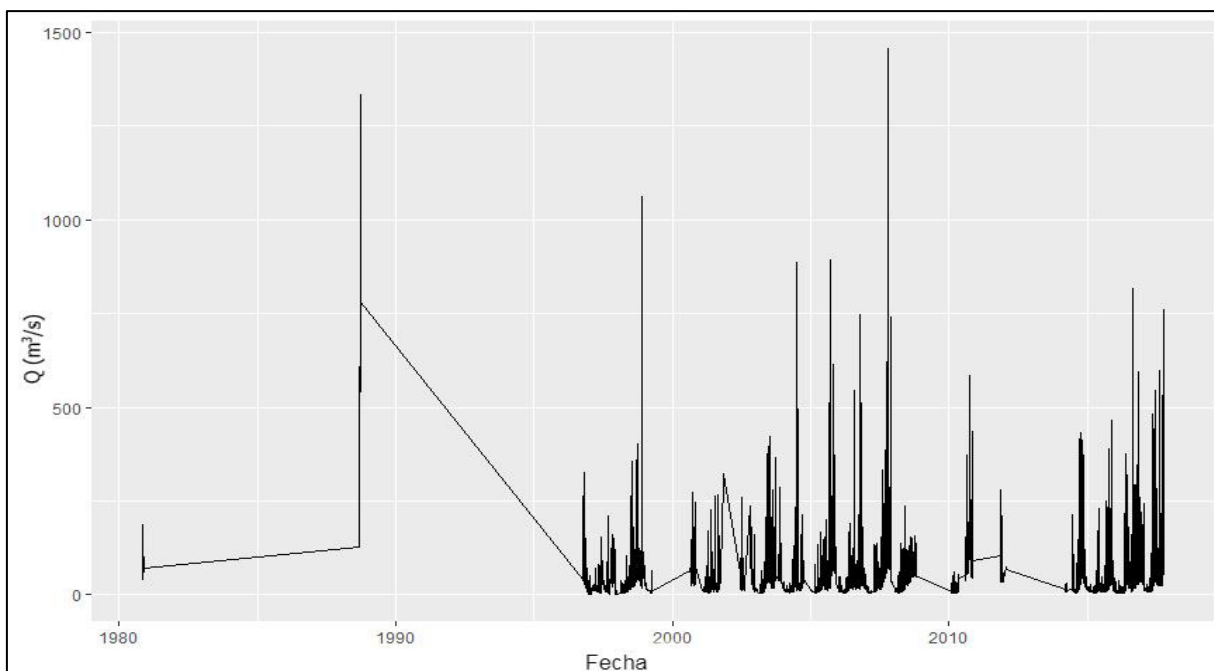


Figura 26. Escorrentía contra fecha de todo el registro de la Estación Cabagra (3112)

Con base en las salidas gráficas presentadas, se pudo determinar que en general tres de las cinco estaciones presentan un comportamiento continuo en los datos de escorrentía. Las estaciones en las que los datos se comportaron continuos fueron: El Brujo (3103), El Remolino (3104) y Las Juntas (3105).

Por otra parte, se identificó que los datos de escorrentía de las estaciones de Caracucho (3107) y Cabagra (3112) presentan discontinuidades en sus registros. Estas discontinuidades se pueden observar principalmente en las largas líneas horizontales al final de los registros de estación Caracucho (3107) y al inicio de los datos de la estación Cabagra (3112). Estas líneas prolongadas significan que los eventos no se registraron de manera tan seguida, sino que existe un lapso de tiempo considerable entre los datos de escorrentía en los respectivos registros.

Identificar estos tramos fue importante, ya que permitieron conocer en que lapsos de tiempo no se realizaron registros de escorrentía en las respectivas estaciones.

Una vez revisados los registros de escorrentía totales contra el tiempo de las cinco estaciones, a través del Software RStudio, se procedió a realizar una revisión a detalle de máximos locales en cada uno de los registros por estación. Esta revisión se ejecutó con el fin de identificar eventos que permitan una modelación de los hidrogramas unitarios de manera adecuada.

Los eventos se seleccionaron considerando el supuesto de "caso ideal", el cual contempla figuras regulares con un caudal base bien definido y considerablemente constante, que presentase una curva de ascenso y descenso suave y continuo, un caudal pico bien definido y un punto definido para el inicio de la curva de agotamiento.

Con el objetivo de ejemplificar los eventos descartados dado el "caso ideal" indicado anteriormente, se presentan la Figura 27, la cual muestra algunos eventos que fueron descartados dada la forma de las curvas de ascenso o agotamiento, las cuales presentan formas irregulares.

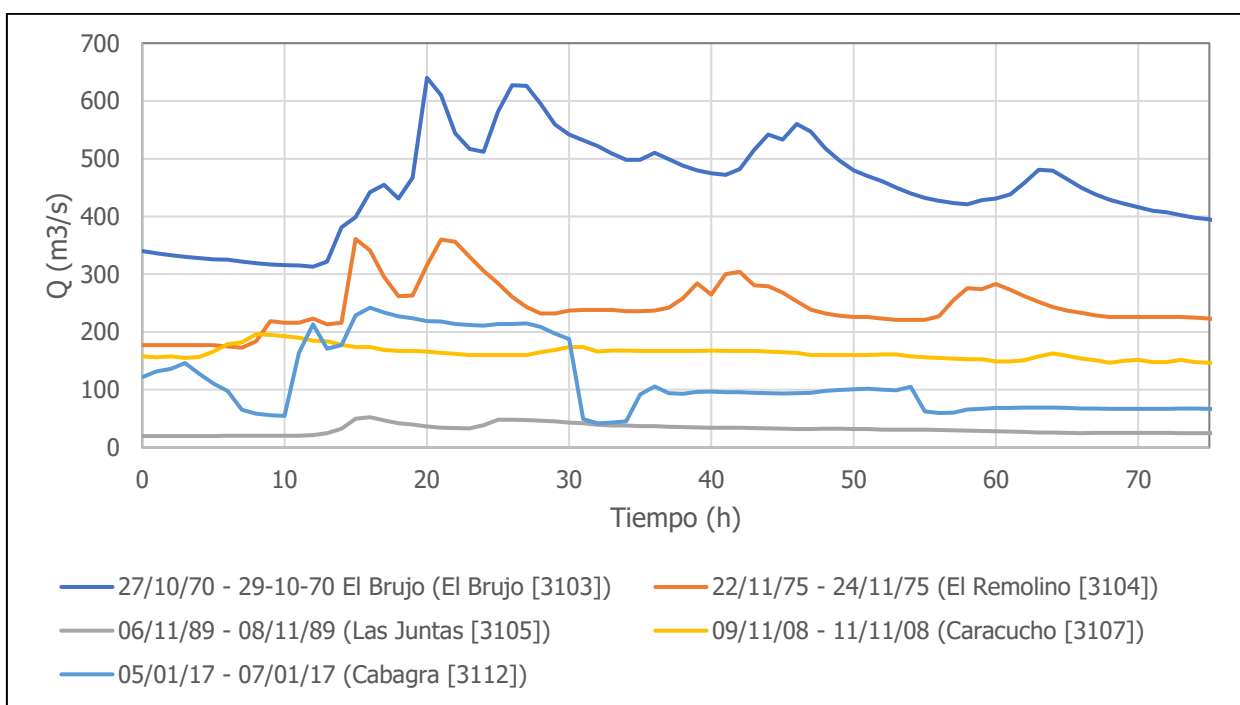


Figura 27. Ejemplo de hidrogramas de escorrentía total, de las tormentas descartadas por la forma de las curvas de ascenso o agotamiento irregulares para la cuenca del estudiada

Asimismo, cabe destacar la importancia de considerar "picos locales" de eventos medianos y bajos, ya que existe mayor probabilidad de que escorrentía ligada a estos eventos se encuentren mejor asociadas a los supuestos del hidrograma unitario.

Una vez descartados los eventos que no se ajustaban al "caso ideal", procedió a derivar los hidrogramas unitarios característicos para las crecientes observadas. Los eventos seleccionados por estación con la respectiva fecha de inicio y de fin del evento, se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Eventos de escorrentía seleccionados para la modelación de hidrogramas unitarios

Estación	Fecha de inicio del evento	Fecha de fin del evento
El Brujo (3103)	27 ago 1991	02 sep 1991
	16 nov 2000	22 nov 2000
	16 sep 2002	22 sep 2002
	17 oct 2006	23 oct 2006
	26 may 2008	01 jun 2008
El Remolino (3104)	15 ene 1970	21 ene 1970
	05 oct 1973	11 oct 1973
	23 jul 1980	29 jul 1980
	10 nov 1980	16 nov 1980
	29 nov 1981	04 dic 1981
	27 ago 1989	02 sep 1989
	24 sep 1992	30 sep 1992
	12 nov 1997	18 nov 1997
14 oct 2012	20 oct 2012	
Las Juntas (3105)	22 nov 1969	28 nov 1969
	26 sep 1970	02 oct 1970
	06 sep 1971	12 sep 1971
	07 jun 1972	13 jun 1972
	05 oct 1973	11 oct 1973
	05 nov 1978	11 nov 1978
	24 sep 1992	30 sep 1992
	21 may 1993	27 may 1993
	14 may 1996	20 may 1996
	13 oct 1997	19 oct 1997
09 oct 2016	15 oct 2016	
Caracucho (3107)	28 oct 1969	03 nov 1969
	04 nov 1972	10 nov 1972
	17 sep 1987	23 sep 1987
	02 jun 1995	08 jun 1995
	03 ago 1998	09 ago 1998
	31 oct 1998	06 nov 1998
	15 dic 1999	21 dic 1999
	09 dic 2003	15 dic 2003
	10 sep 2005	16 sep 2005
	17 oct 2006	23 oct 2006
02 jun 2009	08 jun 2009	
Cabagra (3112)	01 sep 1998	06 sep 1998
	15 nov 2002	21 nov 2002
	14 jul 2004	20 jul 2004
	8 ago 2014	14 ago 2014
	14 nov 2014	20 nov 2014
	27 oct 2016	02 nov 2016
	03 nov 2016	09 nov 2016

Una vez seleccionados los eventos específicos a considerar para las modelaciones, se procedió a realizar la separación de caudal base de la escorrentía directa, con el objetivo de generar los respectivos hidrogramas unitarios característicos de los eventos seleccionados. Los hidrogramas unitarios generados se agruparon por estación, esto con objetivo de identificar el comportamiento general de los eventos seleccionados. Los datos agrupados se presentan desde la Figura 32 hasta la Figura 30.

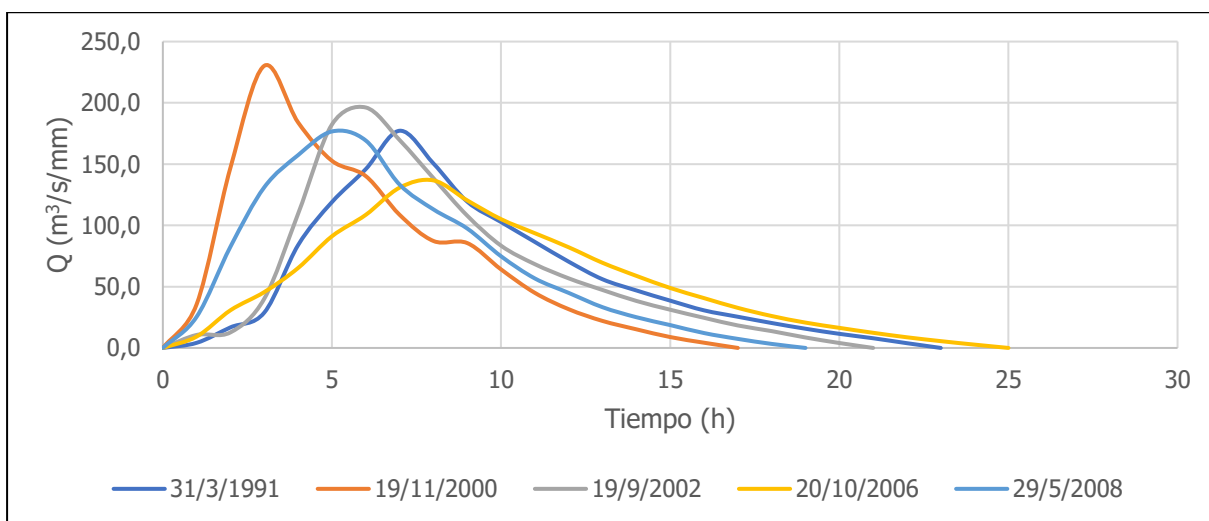


Figura 28. Representación de los HU derivados de los eventos observados para cada tormenta en la estación El Brujo 3103

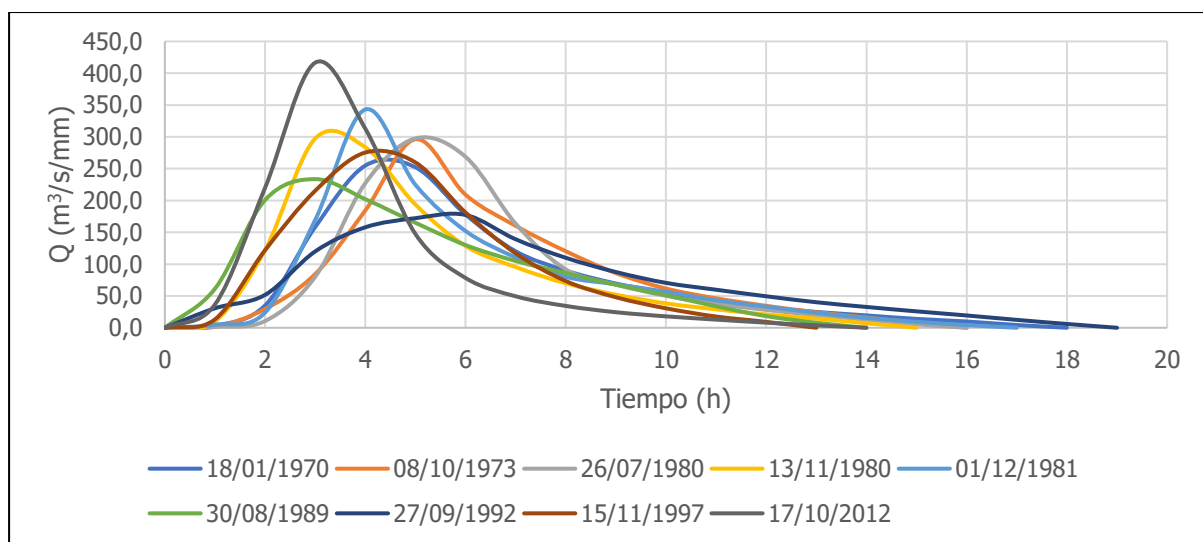


Figura 29. Representación de los HU derivados de los eventos observados para cada tormenta en la estación Remolino 3104

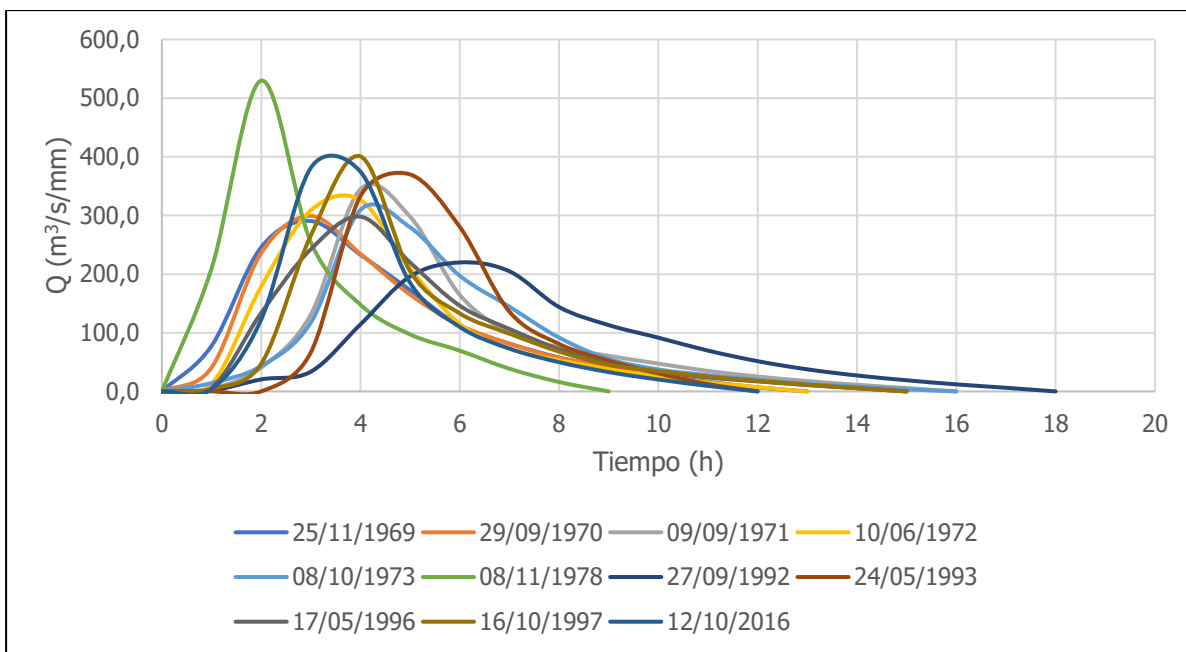


Figura 30. Representación de los HU derivados de los eventos observados para cada tormenta en la estación Las Juntas 3105

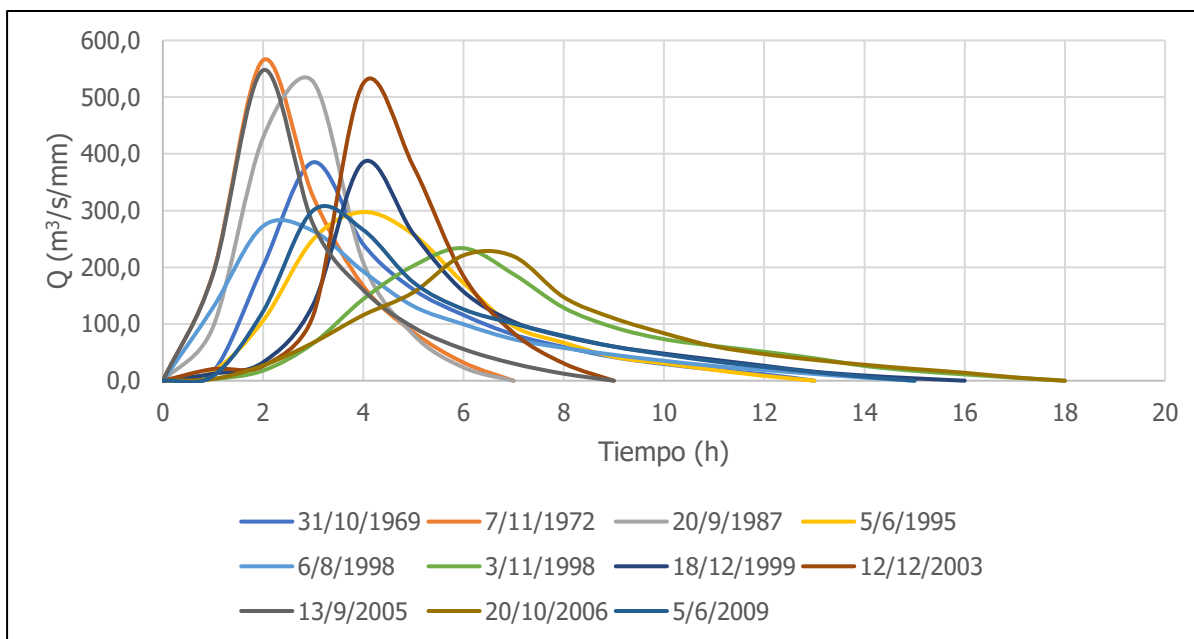


Figura 31. Representación de los HU derivados de los eventos observados para cada tormenta en la estación Caracucho 3107

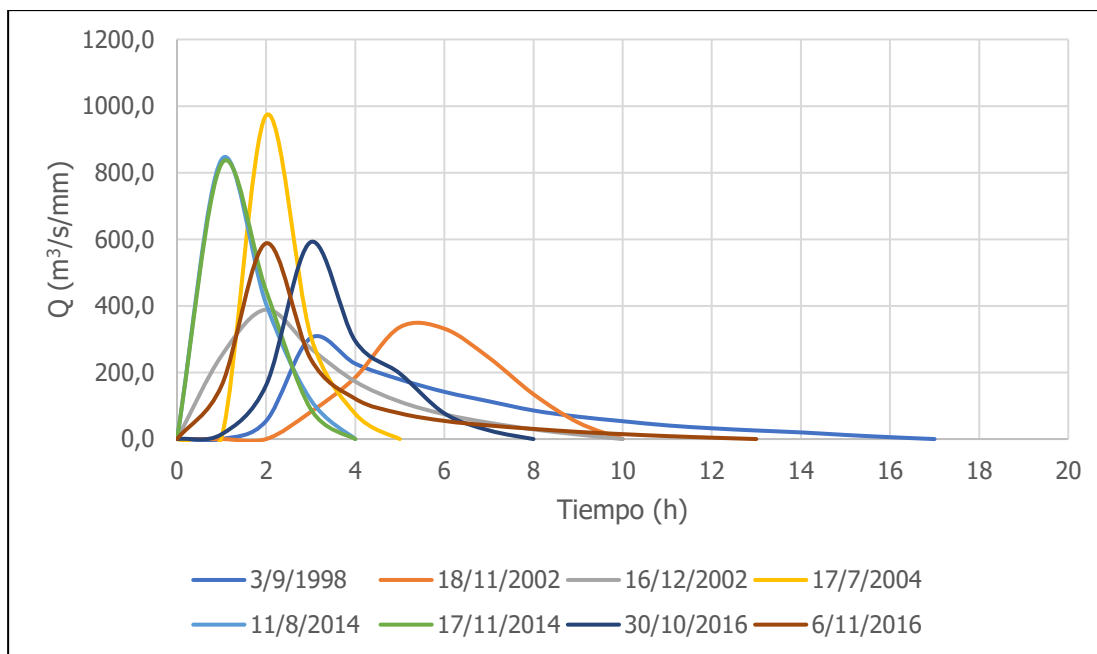


Figura 32. Representación de los HU derivados de los eventos observados para cada tormenta en la estación Cabagra 3112

Con base en las agrupaciones realizadas, se determinó que de manera general las formas de los hidrogramas unitarios cumplen gráficamente con el “caso ideal” planteado anteriormente para los eventos seleccionados para todas las estaciones.

Considerando lo anterior, posteriormente se procedió a extraer los datos de caudal pico (q_p) y el tiempo pico (t_p) de los hidrogramas unitarios observados. Este proceso de recolección de información se ejecutó analizando cada uno de los hidrogramas de manera individual, considerando que se poseían los datos que conforman las curvas de los hidrogramas unitarios se determinó el par ordenado más alto como el q_p en el eje vertical y t_p en el eje horizontal.

Asimismo, para cada uno de los HU se determinó el tiempo para el cual es representativo. Estas duraciones se determinaron a través de la elaboración de la Curva S para cada uno de los HU.

Los resultados obtenidos se detallan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Caudal pico y tiempo pico de cada hidrograma unitario observado

Estación	Fecha	q_p (m ³ /s/mm)	t_p (h)	Tiempo representativo (min)
El Brujo (3103)	31/3/1991	177,23	7,00	85
	19/11/2000	230,24	3,00	35
	19/9/2002	196,20	6,00	70
	20/10/2006	136,72	8,00	95
	29/5/2008	176,67	5,00	60
El Remolino (3104)	18/01/1970	254,84	4,00	45
	08/10/1973	296,24	5,00	60
	26/07/1980	297,58	5,00	60
	13/11/1980	297,37	3,00	35
	01/12/1981	343,06	4,00	50
	30/08/1989	233,58	3,00	35
	27/09/1992	177,32	6,00	70
	15/11/1997	275,35	4,00	45
	17/10/2012	416,61	3,00	35
Las Juntas (3105)	25/11/1969	290,49	3,00	35
	29/09/1970	299,09	3,00	35
	09/09/1971	344,63	4,00	40
	10/06/1972	325,90	4,00	40
	08/10/1973	309,49	4,00	45
	08/11/1978	529,72	2,00	25
	27/09/1992	219,88	6,00	70
	24/05/1993	369,90	5,00	60
	17/05/1996	298,01	4,00	45
	16/10/1997	400,65	4,00	45
	12/10/2016	381,11	3,00	30
Caracucho (3107)	31/10/1969	385,04	3,00	35
	7/11/1972	564,97	2,00	25
	20/9/1987	527,07	3,00	35
	5/6/1995	297,27	4,00	50
	6/8/1998	272,51	2,00	20
	3/11/1998	233,57	6,00	70
	18/12/1999	385,18	4,00	45
	12/12/2003	524,22	4,00	45
	13/9/2005	547,35	2,00	25
	20/10/2006	221,07	6,00	70
	5/6/2009	300,23	3,00	35
Cabagra (3112)	3/9/1998	303,53	3,00	35
	18/11/2002	335,91	5,00	60
	16/12/2002	388,76	2,00	25
	17/7/2004	971,99	2,00	25
	11/8/2014	839,35	1,00	10
	17/11/2014	826,83	1,00	10

Estación	Fecha	q_p (m ³ /s/mm)	t_p (h)	Tiempo representativo (min)
	30/10/2016	591,48	2,00	25
	6/11/2016	587,90	2,00	25
Datos promedio		372,32	3,75	44
Valor máximo		971,99	8,00	95
Valor mínimo		136,72	1,00	10
Desviación estándar		181,71	1,59	19

A partir de los resultados obtenidos, se determina que el q_p promedio es de 372,32 m³/s/mm y el tiempo al pico promedio corresponde con 3,75 h.

Una vez obtenidos los hidrogramas unitarios de las crecientes observadas, y los valores de q_p y t_p de cada uno de los hidrogramas unitarios, se procedió a obtener los diferentes parámetros hidrológicos característicos que permitiesen generar los insumos necesarios para la elaboración de los hidrogramas sintéticos correspondientes.

4.2 Hidrogramas sintéticos

4.2.1 *HU SCS*

Para la obtención de este modelo, inicialmente, se procedió a realizar el método de abstracciones iniciales con el número de curva (CN) del SCS. Para esto, se realizó una revisión de las descripciones de la cobertura del suelo de la cuenca con las respectivas áreas asociadas, presentadas en el Cuadro 9. De las cuales se determinó que la cuenca presenta una cobertura mayormente compuesta por bosque natural (1.140,26 km²) y bosque secundario (567,58 km²), asimismo se detectó que los tipos de uso de suelo como áreas no definidas y agua corresponden con las áreas de menor representación.

Cabe destacar que como se mencionó anteriormente, esta descripción del uso de suelo y la proporción de área asociada, se encuentra sujeta a la temporalidad de las capas del ATLAS 2012-2014, por ende, puede que los datos caracterizados anteriormente no sean totalmente precisos a las condiciones que presenta la cuenca al momento de realizar esta investigación.

Posterior a la descripción del suelo, se procedió a identificar el orden del suelo que compone la cuenca. Esto se realizó con base en la Figura 20, donde se detectó que los materiales que conforman la estructura de suelos son orden Entisoles, Inceptisoles y Ultisoles, siendo este último orden el de mayor área representativa. En el Cuadro 12 se presentan los órdenes del

suelo obtenidos, con el respectivo grupo hidrológico del suelo y el porcentaje de área asociado a cada uno de los órdenes resultantes.

Cuadro 12. Orden de los suelos presentes en la cuenca y su respectiva proporción

Orden del suelo	Grupo hidrológico del suelo	Área (km²)	Porcentaje (%)	Proporción
Entisoles	A	564,30	11,50	0,12
Inceptisoles	B	595,10	12,10	0,12
Ultisoles	C	3.745,60	76,40	0,76
Total	-	4.905,05	100,00	1,00

Considerando los resultados presentados en el Cuadro 12, se define que los suelos de la cuenca pertenecen en mayor proporción al grupo de suelos hidrológicos tipo C con un área de representación de 3.745,60 km². Es decir, a nivel general, los suelos de la cuenca presentan una capacidad de escorrentía moderadamente baja.

Con base en la descripción de la cobertura del número de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0,2S$) del Soil Conservation Service presentado en el Cuadro 1. Se reclasificaron los usos de suelo obtenidos en el Cuadro 9, esto con el objetivo de poder obtener el número de curva según el método del SCS.

La reclasificación resultante y los porcentajes de área equivalentes, se muestran a detalle en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Reclasificación de descripción de suelo y obtención de número de curva de la cuenca

Cobertura	Condición del uso de la tierra	Área (km²)	% Uso	CN(A)	CN(B)	CN(C)
Cultivo	Con tratamiento de conservación	189,90	3,90	62	71	78
Forestal	Cubierta buena	2.496,40	50,90	25	55	70
No forestal	Condiciones pobres	22,60	0,50	68	79	86
Pastizales	Condiciones óptimas	2.189,80	44,60	39	61	74
Urbano	-	6,40	0,10	98	98	98

Considerando los resultados presentados en el Cuadro 13, se procedió a determinar el número de curva de la cuenca sumando los productos resultantes de multiplicar cada proporción de área por su respectivo sub número de curva (A, B y C), este cálculo dio como resultado un el número de curva ponderado de 66,0.

Considerando que el CN ponderado obtenido es del orden de 66,0 y que este parámetro puede variar de 1 a 100, en función del grado de escurrimiento directo, indicando un CN=100 que toda la lluvia se escurre y un CN=1 que toda la lluvia se infiltra, es posible identificar que la precipitación en la cuenca se escurre más de lo que se infiltra.

Una vez obtenido el número de curva ponderado de la cuenca, se procedió a generar el hidrograma unitario SCS, considerando los las características promedio. El resultado obtenido se puede observar en la Figura 33, adicionalmente, en el Cuadro 14 se muestra a detalle el registro resultante de HU SCS.

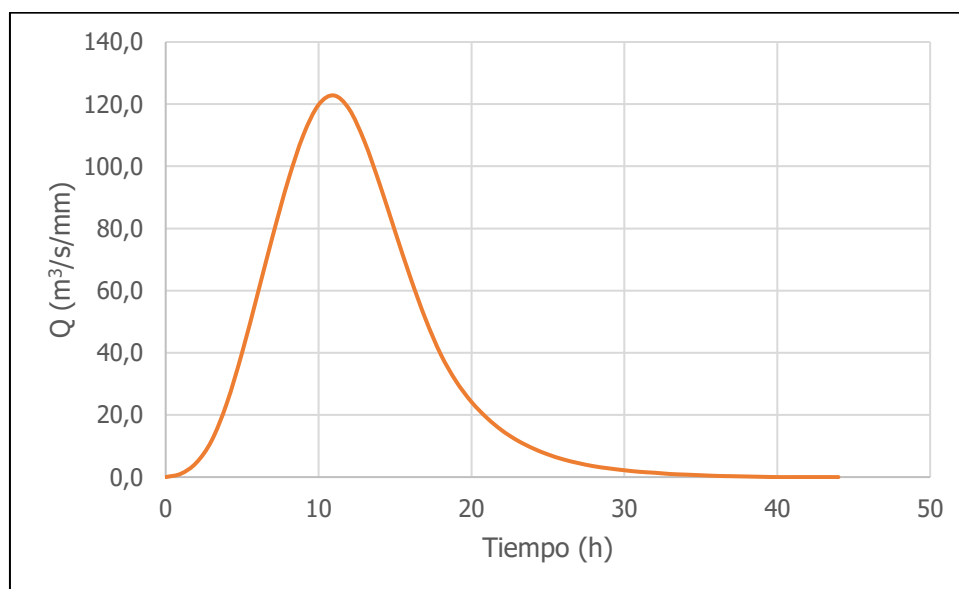


Figura 33. Hidrograma Unitario SCS, generalizado con valores promedio para la cuenca del río Grande de Térraba

Cuadro 14. Registros de tiempo y de caudal del HU SCS

Tiempo (h)	Q(m³/s/mm)
0	0,00
1	1,10
2	4,60
3	11,70
4	23,80
5	40,10
6	58,70
7	77,60
8	95,30
9	110,00
10	119,80
11	122,80 (*)
12	118,40
13	108,00
14	94,20
15	79,10
16	64,30
17	50,80
18	39,40
19	30,80
20	24,20
21	19,10
22	15,00
23	11,80
24	9,30
25	7,30
26	5,70
27	4,50
28	3,50
29	2,80
30	2,20
31	1,70
32	1,40
33	1,00
34	0,80
35	0,60
36	0,40
37	0,30
38	0,20
39	0,10
40	0,00

(*) Caudal pico (q_p)

4.2.2 HU Snyder

Para la modelación del hidrograma unitario de Snyder inicialmente se procedieron a determinar los coeficientes de C_p y C_T con las ecuaciones (8) y (9) respectivamente, en cada uno de los hidrogramas unitarios de los eventos presentados en el Cuadro 10. Los resultados obtenidos se presentan a continuación en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Determinación de C_p y C_T a partir de los eventos de escorrentía

Estación	Fecha	C_p	C_T
<i>El Brujo (3103)</i>	31/3/1991	0,84	0,78
	19/11/2000	0,47	0,33
	19/9/2002	0,80	0,67
	20/10/2006	0,74	0,89
	29/5/2008	0,60	0,55
<i>El Remolino (3104)</i>	18/01/1970	0,69	0,44
	08/10/1973	1,01	0,55
	26/07/1980	1,01	0,55
	13/11/1980	0,61	0,33
	01/12/1981	0,93	0,44
	30/08/1989	0,48	0,33
	27/09/1992	0,72	0,67
	15/11/1997	0,75	0,44
<i>Las Juntas (3105)</i>	17/10/2012	0,85	0,33
	25/11/1969	0,59	0,33
	29/09/1970	0,61	0,33
	09/09/1971	0,94	0,44
	10/06/1972	0,89	0,44
	08/10/1973	0,84	0,44
	08/11/1978	0,72	0,22
	27/09/1992	0,90	0,67
	24/05/1993	1,26	0,55
	17/05/1996	0,81	0,44
	16/10/1997	1,09	0,44
<i>Caracucho (3107)</i>	12/10/2016	0,78	0,33
	31/10/1969	0,79	0,33
	7/11/1972	0,77	0,22
	20/9/1987	1,07	0,33
	5/6/1995	0,81	0,44
	6/8/1998	0,37	0,22
	3/11/1998	0,95	0,67
	18/12/1999	1,05	0,44
	12/12/2003	1,42	0,44
	13/9/2005	0,74	0,22
	20/10/2006	0,90	0,67
5/6/2009	0,61	0,33	

Estación	Fecha	C _p	C _T
<i>Cabagra (3112)</i>	3/9/1998	0,62	0,33
	18/11/2002	1,14	0,55
	16/12/2002	0,53	0,22
	17/7/2004	1,32	0,22
	11/8/2014	0,57	0,11
	17/11/2014	0,56	0,11
	30/10/2016	0,80	0,22
	6/11/2016	0,80	0,22
<i>Datos promedio</i>		0,81	0,42
<i>Valor máximo</i>		1,42	0,89
<i>Valor mínimo</i>		0,37	0,11
<i>Desviación estándar</i>		0,23	0,18

Con base en los resultados presentados en el Cuadro 15, se logró determinar que para a la cuenca del río Grande Térraba, el valor del coeficiente C_p varía entre 0,37 y 1,42, con un valor promedio de 0,81. Y por su parte el coeficiente C_T se encuentra entre 0,11 y 0,89 con un promedio de 0,42.

Considerando los parámetros de C_p y C_T promedio, se procedió a generar el hidrograma unitario de Snyder, el cual se muestra en la Figura 34. Asimismo, en el

Cuadro 16 se muestra el registro de tiempo y caudal del HU de Snyder resultante.

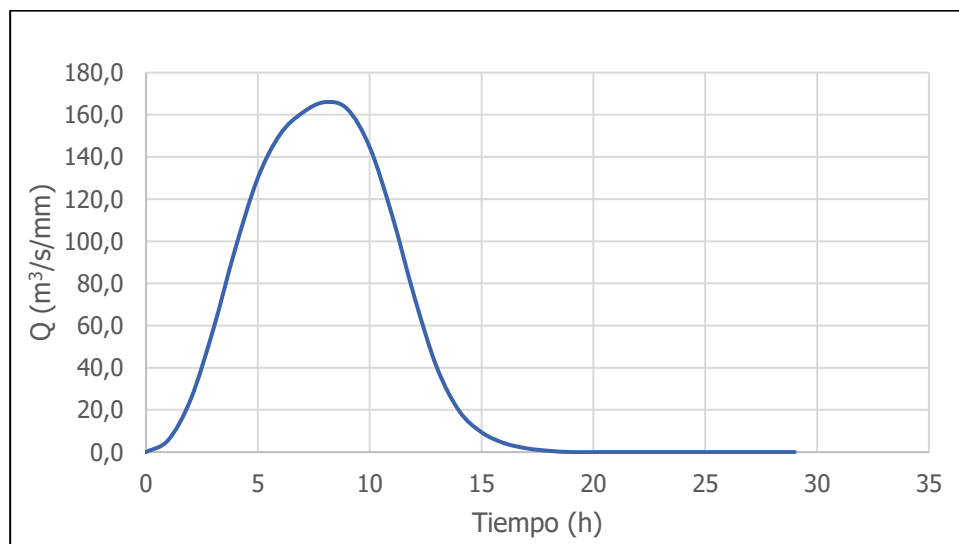


Figura 34. Hidrograma Unitario de Snyder generalizado con valores promedio para la cuenca del río Grande de Térraba

Cuadro 16. Registros de tiempo y de caudal del HU Snyder

Tiempo (h)	Q(m ³ /s/mm)
0	0,00
1	5,80
2	25,10
3	58,00
4	96,80
5	130,10
6	150,80
7	161,00
8	166,00(*)
9	162,70
10	144,60
11	112,30
12	73,50
13	40,20
14	19,50
15	9,40
16	4,30
17	1,80
18	0,60
19	0,00

(*) Caudal pico (q_p)

4.3 Calibración de distribuciones probabilísticas

Una vez determinados los hidrogramas unitarios reales de la cuenca y los sintéticos, se calcularon los parámetros de las distintas funciones de distribución de densidad de probabilidad. Para la posterior calibración, para ello, cabe destacar que se tomaron en consideración los siguientes aspectos:

- Las funciones de densidad log-normal, gamma y GEV, se calibraron considerando esquema del hidrograma unitario mostrado en la Figura 35.

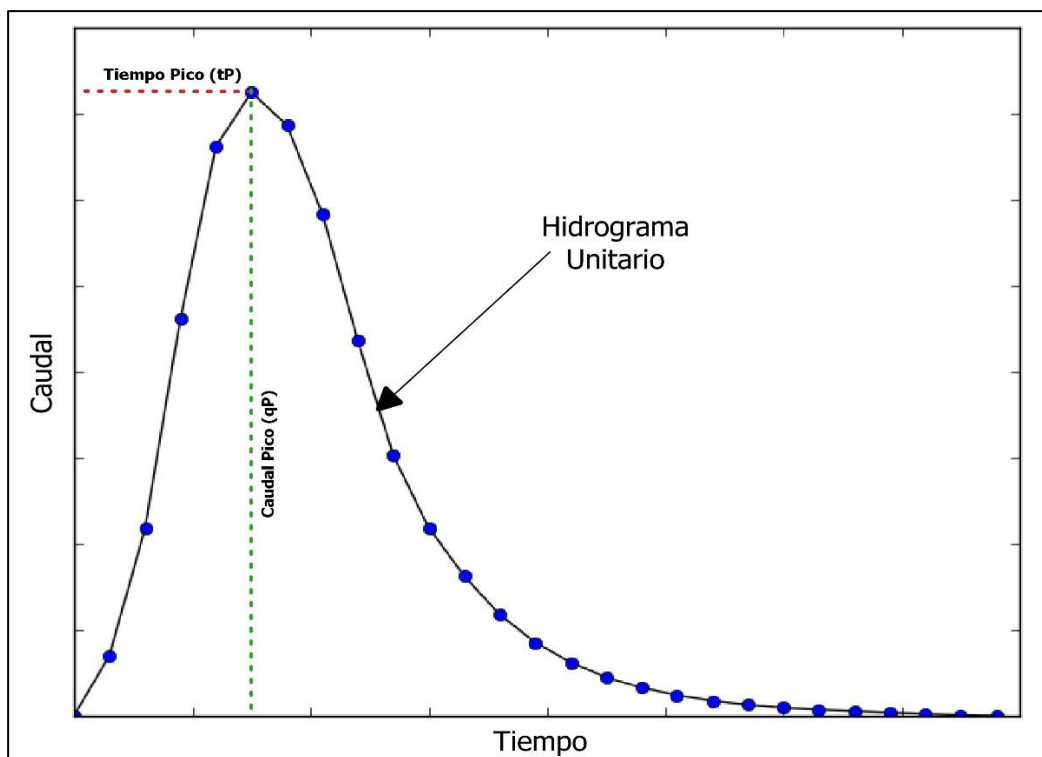


Figura 35. Esquema del hidrograma unitario de un evento registrado.

- Cada moda en la distribución de la función de densidad en el contexto de hidrograma unitario corresponde con el punto donde la función alcanza su valor máximo. Esto quiere decir que, la moda es equivalente al t_p , así como que la función evaluada en la moda es equivalente a q_p .
- Con las calibraciones a las funciones de distribución de densidad se buscó aproximar a la forma de los hidrogramas unitarios, no emplear el concepto de función de distribución probabilística como tal.
- Las calibraciones se realizaron en función de las fórmulas dispuestas en el apartado 1.3.3 Probabilidad y estadística hidrológica del marco teórico.
- Para las respectivas calibraciones, se consideraron dos HU reales por estación. Estos HU corresponden con los que presentaron mayor y menor q_p en los registros. Los respectivos q_p y t_p de los HU empleados, se resumen en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Resumen de los q_P y t_P empleados en las calibraciones de distribuciones probabilísticas

Estación	HU	q_P (m³/s/mm)	t_P (h)
El Brujo (3103)	19/11/2000	230,20	3
	20/10/2006	136,70	8
El Remolino (3104)	17/10/2012	416,60	3
	27/9/1992	177,30	6
Las Juntas (3105)	8/11/1978	529,70	2
	27/9/1992	219,90	6
Caracucho (3107)	7/11/1972	565,00	2
	20/10/2006	221,10	6
Cabagra (3112)	17/7/2004	303,50	3
	3/9/1998	972,00	2
-	SCS	122,80	11
-	Snyder	166,00	8

- Las calibraciones se realizaron considerando dos escenarios: el primero relacionando las ecuaciones de distribución probabilísticas con el área de la cuenca (4.905,05 km²), y el segundo escenario relacionando las ecuaciones con el índice de Gravelius (1,84).

Las calibraciones realizadas considerando el área de la cuenca siguen el esquema de expresión matemática presentada en la ecuación (17).

$$\text{función calibrada}(x) = \frac{10000}{\text{área de la cuenca}} \times q_P \times \text{función de densidad analizada} \quad (17)$$

Mientras que, las calibraciones realizadas empleando el índice de Gravelius siguen el esquema de expresión matemática presentada en la ecuación (18).

$$\text{función calibrada}(x) = \frac{10}{\text{índice de Gravelius}} \times q_P \times \text{función de densidad analizada} \quad (18)$$

La selección del área de la cuenca y del índice de Gravelius como aspectos de calibración, se realizó en función de los parámetros de mayor y menor valor respectivamente que presentó la cuenca en la caracterización realizada en los apartados anteriores.

En cuanto a la conformación de las ecuaciones esquemáticas, cabe destacar que los valores del numerador en la primera fracción de las ecuaciones (17) y (18), tienen como objetivo ajustar la escala de la función de densidad con el respectivo trazo del HU analizado. Con este término que es igual al inverso de convertir cada parámetro inferior a la unidad se busca poder ajustar las funciones de densidad a las magnitudes de los valores que presentan los caudales de los HU.

Lo anterior se deriva principalmente a los órdenes de magnitud que manejan generalmente las funciones de densidad en el eje Y, los cuales son en su gran mayoría, inferiores a la unidad. Adicionalmente, que amplitud de la forma acampanada está directamente ligada con el orden de magnitud mencionado anteriormente.

Con el segundo término de la función, el cual corresponde al caudal pico q_p , se buscó vincular la posición en el eje Y de la función de densidad con la de los HU.

Y finalmente con el tercer término, se emplearon las funciones de densidad de log-normal, gamma y GEV, con los respectivos parámetros calculados.

Asimismo, cabe destacar que estas funciones esquemáticas fueron producto de un proceso reiterativo, en el cual se consideraron parámetros de escala principalmente, y que dieron como resultado los presentados en las ecuaciones (17) y (18).

Considerando lo anterior y que dado a que las distribuciones a estudiar presentan su forma en función de los parámetros, los cuales definen que tan acampanado y alargado es el trazo de la función. Se procedió a determinar los diferentes parámetros para cada una de las distribuciones probabilística considerando los dos parámetros para las calibraciones.

4.3.1 Estimación de parámetros para la distribución log-normal

Para conocer la función de distribución log-normal que describe el mismo comportamiento acampanado de los hidrogramas unitarios obtenidos, inicialmente se procedió a determinar los parámetros μ y σ . El procedimiento para determinar estos parámetros se describe a continuación.

Considerando la ecuación (11) y la moda de la distribución log-normal, se evaluó la moda en la función de densidad de la distribución log-normal. Esta evaluación se presenta a detalle en la ecuación (19).

$$f(moda) = \frac{1}{e^{(\mu-\sigma^2)}\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\mu-\sigma^2-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{\sigma^2}{2}-\mu\right)} \quad (19)$$

Posteriormente, se procedió a multiplicar la moda en ambas partes de la igualdad de la ecuación (19), esta operación se puede observar en la ecuación (20).

$$moda \times f(moda) = e^{(\mu-\sigma^2)} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\left(\frac{\sigma^2}{2}-\mu\right)} \quad (20)$$

Considerando que la moda es equivalente al t_p y que la función evaluada en la moda es igual al q_p y que tanto t_p como q_p son parámetros conocidos, se puede obtener el valor de σ a través de la siguiente expresión.

$$t_p q_p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\left(\frac{-\sigma^2}{2}\right)} \quad (21)$$

Para la obtención del parámetro μ , se procedió a aplicar logaritmo natural a la equivalencia de la moda, dando como resultado lo presentado en la ecuación (22).

$$\ln(moda) = \mu - \sigma^2 \rightarrow \mu = \ln t_p + \sigma^2 \quad (22)$$

Una vez definidas las expresiones matemáticas que permiten obtener los parámetros μ y σ de la función log-normal, y sabiendo que los valores los t_p y q_p son conocidos en los HU reales y HU sintéticos (Cuadro 17), se procedió a calcular los respectivos parámetros para función de densidad. Los parámetros obtenidos se presentan a detalle en el Cuadro 18 y Cuadro 19, para cada uno de los casos de calibración.

Cuadro 18. Parámetros μ y σ obtenidos para la función de distribución log-normal calibrada con el área de la cuenca

Estación	HU	Función de dist. Log-normal	
		σ	μ
El Brujo (3103)	19/11/2000	0,262	1,167
	20/10/2006	0,101	2,090
El Remolino (3104)	17/10/2012	0,262	1,167
	27/9/1992	0,134	1,810
Las Juntas (3105)	8/11/1978	0,379	0,837
	27/9/1992	0,134	1,810
Caracucho (3107)	7/11/1972	0,379	0,837
	20/10/2006	0,134	1,810
Cabagra (3112)	17/7/2004	0,262	1,167
	3/9/1998	0,379	0,837
-	SCS	0,074	2,403
-	Snyder	0,101	2,090

Cuadro 19. Parámetros μ y σ obtenidos para la función de distribución log-normal calibrada con el índice de Gravelius

Estación	HU	Función de dist. Log-normal	
		σ	μ
El Brujo (3103)	19/11/2000	0,603	1,462
	20/10/2006	0,262	2,148
El Remolino (3104)	17/10/2012	0,603	1,462
	27/9/1992	0,341	1,908
Las Juntas (3105)	8/11/1978	0,792	1,321
	27/9/1992	0,341	1,908
Caracucho (3107)	7/11/1972	0,792	1,321
	20/10/2006	0,341	1,908
Cabagra (3112)	17/7/2004	0,603	1,462
	3/9/1998	0,792	1,321
-	SCS	0,193	2,435
-	Snyder	0,262	2,148

Con base en los parámetros presentados en el Cuadro 18 y en el Cuadro 19, se procedió a generar las funciones de distribución log-normal considerando dos escenarios: calibración considerando el área y calibración empleando el índice de Gravelius, empleando los esquemas

mostrados en las ecuaciones (17) y (18). Las funciones resultantes se presentan a detalle en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Funciones de distribución log-normal calibradas resultantes

Estaciones	HU	Función de dist. log-normal (calibrada con el área de la cuenca)	Función de dist. log-normal (calibrada con el índice de Gravelius)
El Brujo (3103)	19/11/2000	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{230,20}{x \times 0,262\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,167)^2}{2 \times 0,262^2}}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{230,20}{x \times 0,603\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,462)^2}{2 \times 0,603^2}}$
	20/10/2006	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{136,70}{x \times 0,101\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-2,090)^2}{2 \times 0,101^2}}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{136,70}{x \times 0,262\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-2,148)^2}{2 \times 0,262^2}}$
El Remolino (3104)	17/10/2012	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{416,60}{x \times 0,262\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,167)^2}{2 \times 0,262^2}}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{416,60}{x \times 0,603\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,462)^2}{2 \times 0,603^2}}$
	27/9/1992	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{177,30}{x \times 0,134\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,810)^2}{2 \times 0,134^2}}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{177,30}{x \times 0,341\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,908)^2}{2 \times 0,341^2}}$
Las Juntas (3105)	8/11/1978	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{529,70}{x \times 0,379\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-0,837)^2}{2 \times 0,379^2}}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{529,70}{x \times 0,792\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,321)^2}{2 \times 0,792^2}}$

Estaciones	HU	Función de dist. log-normal (calibrada con el área de la cuenca)	Función de dist. log-normal (calibrada con el índice de Gravelius)
	27/9/1992	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{219,90}{x \times 0,134\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,810)^2}{2 \times 0,134^2}}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{219,90}{x \times 0,341\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,908)^2}{2 \times 0,341^2}}$
Caracucho (3107)	7/11/1972	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{565,00}{x \times 0,379\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-0,837)^2}{2 \times 0,379^2}}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{565,00}{x \times 0,792\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,321)^2}{2 \times 0,792^2}}$
	20/10/2006	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{221,10}{x \times 0,134\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,810)^2}{2 \times 0,134^2}}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{221,10}{x \times 0,341\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,908)^2}{2 \times 0,341^2}}$
Cabagra (3112)	17/7/2004	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{303,50}{x \times 0,262\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,167)^2}{2 \times 0,262^2}}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{303,50}{x \times 0,603\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,462)^2}{2 \times 0,603^2}}$
	3/9/1998	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{972,00}{x \times 0,379\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-0,837)^2}{2 \times 0,379^2}}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{972,00}{x \times 0,792\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-1,321)^2}{2 \times 0,792^2}}$

Estaciones	HU	Función de dist. log-normal (calibrada con el área de la cuenca)	Función de dist. log-normal (calibrada con el índice de Gravelius)
-	SCS	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{122,80}{x \times 0,074\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\ln(x)-2,403)^2}{2 \times 0,074^2}\right)}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{122,80}{x \times 0,193\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\ln(x)-2,435)^2}{2 \times 0,193^2}\right)}$
-	Snyder	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{166,00}{x \times 0,101\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\ln(x)-2,090)^2}{2 \times 0,101^2}\right)}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{166,00}{x \times 0,262\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\ln(x)-2,148)^2}{2 \times 0,262^2}\right)}$

4.3.2 Estimación de parámetros para la distribución gamma

Al igual que la función de distribución log-normal, para la función gamma, inicialmente, se dispuso a determinar los parámetros α y β . El respectivo procedimiento para obtener estos parámetros se muestra a continuación.

Considerando la ecuación (12) y la moda para la distribución de densidad en la función gamma, se procedió a evaluar la función gamma en la moda. Esto se muestra en la ecuación (23).

$$f(moda) = \frac{(\alpha - 1)^{\alpha-1}}{\beta\Gamma(\alpha)} e^{(1-\alpha)} \quad (23)$$

Seguido, a la ecuación (23) se le procedió a multiplicar la moda en ambas partes de la igualdad. Esto se simplificó en la ecuación (24), de la cual se conocen los valores de t_p y q_p , por ende, fue posible despejar el valor de α .

$$moda \times f(moda) = t_p q_p = \frac{(\alpha - 1)^\alpha}{\Gamma(\alpha)} e^{(1-\alpha)} \quad (24)$$

Considerando lo anterior y la ecuación de la moda de la función de distribución de gamma, se procedió a obtener el valor de β con la ecuación (25).

$$\beta = \frac{t_p}{\alpha - 1} \quad (25)$$

Obtenidas las expresiones matemáticas que permitiesen determinar los parámetros α y β para las funciones de distribución gamma y empleando los valores los t_p y q_p de los HU reales y HU sintéticos (Cuadro 17), se procedió a realizar el respectivo calculo para obtener los valores de α y β . Los resultados obtenidos en cada calibración, se presentan en el Cuadro 21 y en el Cuadro 22.

Cuadro 21. Parámetros α y β obtenidos para la función de distribución gamma calibrada con el área de la cuenca

Estación	HU	Función de dist. Gamma	
		α	β
El Brujo (3103)	19/11/2000	14,770	0,218
	20/10/2006	97,914	0,083
El Remolino (3104)	17/10/2012	14,770	0,218
	27/9/1992	55,587	0,110
Las Juntas (3105)	8/11/1978	7,221	0,322
	27/9/1992	55,587	0,110
Caracucho (3107)	7/11/1972	7,221	0,322
	20/10/2006	55,587	0,110
Cabagra (3112)	17/7/2004	14,770	0,218
	3/9/1998	7,221	0,322
-	SCS	184,079	0,061
-	Snyder	97,914	0,082

Cuadro 22. Parámetros α y β obtenidos para la función de distribución gamma calibrada con el índice de Gravelius

Estación	HU	Función de dist. Gamma	
		α	β
El Brujo (3103)	19/11/2000	3,074	1,447
	20/10/2006	14,780	0,581
El Remolino (3104)	17/10/2012	3,074	1,447
	27/9/1992	8,823	0,767
Las Juntas (3105)	8/11/1978	2,001	1,999
	27/9/1992	8,823	0,767
Caracucho (3107)	7/11/1972	2,001	1,999
	20/10/2006	8,823	0,767
Cabagra (3112)	17/7/2004	3,074	1,447
	3/9/1998	2,001	1,999
-	SCS	26,906	0,425
-	Snyder	14,780	0,581

Considerando los parámetros presentados en el Cuadro 21 y en el Cuadro 22, se generaron las funciones de distribución gamma calibradas correspondientes. Estas funciones al igual que las de log-normal, contemplan dos escenarios: calibración considerando el área y calibración empleando el índice de Gravelius. Las expresiones matemáticas calibradas se pueden observar a detalle en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Funciones de distribución gamma calibradas resultantes

Estaciones	HU	Función de dist. Gamma (calibrada con el área de la cuenca)	Función de dist. gamma (calibrada con el índice de Gravelius)
El Brujo (3103)	19/11/2000	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{230,20 \times x^{14,770-1}}{0,218^{14,770} \Gamma(14,770)} e^{(-\frac{x}{0,218})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{230,20 \times x^{3,074-1}}{1,447^{3,074} \Gamma(3,074)} e^{(-\frac{x}{1,447})}$
	20/10/2006	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{136,70 \times x^{97,914-1}}{0,083^{97,914} \Gamma(97,914)} e^{(-\frac{x}{0,083})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{136,70 \times x^{14,780-1}}{0,581^{14,780} \Gamma(14,780)} e^{(-\frac{x}{0,581})}$
El Remolino (3104)	17/10/2012	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{416,60 \times x^{14,770-1}}{0,218^{14,770} \Gamma(14,770)} e^{(-\frac{x}{0,218})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{416,60 \times x^{3,074-1}}{1,447^{3,074} \Gamma(3,074)} e^{(-\frac{x}{1,447})}$
	27/9/1992	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{177,30 \times x^{55,587-1}}{0,110^{55,587} \Gamma(55,587)} e^{(-\frac{x}{0,110})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{177,30 \times x^{8,823-1}}{0,767^{8,823} \Gamma(8,823)} e^{(-\frac{x}{0,767})}$
Las Juntas (3105)	8/11/1978	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{529,70 \times x^{7,221-1}}{0,322^{7,221} \Gamma(7,221)} e^{(-\frac{x}{0,322})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{529,70 \times x^{2,001-1}}{1,999^{2,001} \Gamma(2,001)} e^{(-\frac{x}{1,999})}$

Estaciones	HU	Función de dist. Gamma (calibrada con el área de la cuenca)	Función de dist. gamma (calibrada con el índice de Gravelius)
	27/9/1992	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{219,90 \times x^{55,587-1}}{0,110^{55,587} \Gamma(55,587)} e^{(-\frac{x}{0,110})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{219,90 \times x^{8,823-1}}{0,767^{8,823} \Gamma(8,823)} e^{(-\frac{x}{0,767})}$
Caracucho (3107)	7/11/1972	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{565,00 \times x^{7,221-1}}{0,322^{7,221} \Gamma(7,221)} e^{(-\frac{x}{0,322})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{565,00 \times x^{2,001-1}}{1,999^{2,001} \Gamma(2,001)} e^{(-\frac{x}{1,999})}$
	20/10/2006	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{221,10 \times x^{55,587-1}}{0,110^{55,587} \Gamma(55,587)} e^{(-\frac{x}{0,110})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{221,10 \times x^{8,823-1}}{0,767^{8,823} \Gamma(8,823)} e^{(-\frac{x}{0,767})}$
Cabagra (3112)	17/7/2004	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{303,50 \times x^{14,770-1}}{0,218^{14,770} \Gamma(14,770)} e^{(-\frac{x}{0,218})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{303,50 \times x^{3,074-1}}{1,447^{3,074} \Gamma(3,074)} e^{(-\frac{x}{1,447})}$
	3/9/1998	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{972,00 \times x^{7,221-1}}{0,322^{7,221} \Gamma(7,221)} e^{(-\frac{x}{0,322})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{972,00 \times x^{2,001-1}}{1,999^{2,001} \Gamma(2,001)} e^{(-\frac{x}{1,999})}$

Estaciones	HU	Función de dist. Gamma (calibrada con el área de la cuenca)	Función de dist. gamma (calibrada con el índice de Gravelius)
-	SCS	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{122,80 \times x^{184,079-1}}{0,061\Gamma(184,079)} e^{(-\frac{x}{0,061})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{122,80 \times x^{26,906-1}}{0,425^{26,906}\Gamma(26,906)} e^{(-\frac{x}{0,425})}$
-	Snyder	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times \frac{166,00 \times x^{97,914-1}}{0,082^{97,914}\Gamma(97,914)} e^{(-\frac{x}{0,082})}$	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times \frac{166,00 \times x^{14,780-1}}{0,581^{14,780}\Gamma(14,780)} e^{(-\frac{x}{0,581})}$

4.3.3 Estimación de parámetros para la distribución GEV

Para definir la función que describe el comportamiento de los hidrogramas unitarios, inicialmente se procedió a determinar los parámetros k , μ y α . Para ello se determinó la expresión equivalente a q_p y t_p , por medio de la derivada de la ecuación (13) igualada a cero. Esta esta expresión corresponde a la siguiente.

$$\frac{df(x)}{dx} = 0 = \frac{d}{dx} \left[\left(\frac{1}{\alpha}\right) \left\{1 - k \left[\frac{x-\mu}{\alpha}\right]\right\}^{\frac{1}{k-1}} \times e^{\left\{-\left\{1 - k \left[\frac{x-\mu}{\alpha}\right]\right\}^{\frac{1}{k}}\right\}} \right] \quad (26)$$

Considerando que la derivada de la función en cero es igual al t_p , se obtiene la siguiente expresión,

$$t_p = \mu + \left(\frac{\alpha}{k}\right) \times \{1 - (k-1)^k\} \quad (27)$$

Evaluando, la función de la distribución GEV en la moda, se obtiene que,

$$q_p = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \left[1 - k \left\{\left(\frac{1}{k}\right)[1 - (k-1)^k]\right\}\right]^{\frac{1}{k-1}} \times e^{\left[-\left(1 - k \left\{\left(\frac{1}{k}\right)[1 - (k-1)^k]\right\}\right)^{\frac{1}{k}}\right]} \quad (28)$$

Cabe destacar que el parámetro k se encuentra asociado al eje vertical de la función de densidad GEV, por ende, para encontrar el término que mejor se ajustara a las funciones que se estaban calibrando, se realizó un proceso de iteración que permitiese determinar este parámetro. Por lo cual, para efectos del despeje de μ y α , el valor de t_p , q_p y k , son conocidos.

Considerando lo anterior, se procedió a calcular los parámetros μ y α , para cada uno de los HU. Asimismo, se presenta los valores de k de mejor ajuste para cada caso. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 24 y en el Cuadro 25.

Cuadro 24. Parámetros α , μ y k obtenidos para la función de distribución GEV calibrada con el área de la cuenca

Estación	HU	Función de dist. GEV		
		α	μ	k
El Brujo (3103)	19/11/2000	0,998	3,121	2,114
	20/10/2006	0,998	8,121	2,114
El Remolino (3104)	17/10/2012	0,998	3,121	2,114
	27/9/1992	0,998	6,121	2,114
Las Juntas (3105)	8/11/1978	0,998	2,121	2,114
	27/9/1992	0,998	6,121	2,114
Caracucho (3107)	7/11/1972	0,998	2,121	2,114
	20/10/2006	0,998	6,121	2,114
Cabagra (3112)	17/7/2004	0,998	3,121	2,114
	3/9/1998	0,998	2,121	2,114
-	SCS	0,998	11,121	2,114
-	Snyder	0,998	8,121	2,114

Cuadro 25. Parámetros α , μ y k obtenidos para la función de distribución GEV calibrada con el índice de Gravelius

Estación	HU	Función de dist. GEV		
		α	μ	k
El Brujo (3103)	19/11/2000	2,660	3,323	2,114
	20/10/2006	2,660	8,323	2,114
El Remolino (3104)	17/10/2012	2,660	3,323	2,114
	27/9/1992	2,660	6,323	2,114
Las Juntas (3105)	8/11/1978	2,660	2,323	2,114
	27/9/1992	2,660	6,323	2,114
Caracucho (3107)	7/11/1972	2,660	2,323	2,114
	20/10/2006	2,660	6,323	2,114
Cabagra (3112)	17/7/2004	2,660	3,323	2,114
	3/9/1998	2,660	2,323	2,114
-	SCS	2,660	11,323	2,114
-	Snyder	2,660	8,323	2,114

Una vez calculados los parámetros k , μ y α , se calibraron las funciones de distribución GEV, esto se realizó considerando la calibración con área de la cuenca y con el índice de Gravelius respectivamente. Las funciones calibradas se muestran en el Cuadro 26 y en el Cuadro 27.

Cuadro 26. Funciones de distribución GEV calibradas con el área de la cuenca

Estaciones	HU	Función de dist. GEV (calibrada con el área de la cuenca)
El Brujo (3103)	19/11/2000	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 230,20 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 3,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 3,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$
	20/10/2006	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 136,70 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 8,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 8,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$
El Remolino (3104)	17/10/2012	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 416,60 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 3,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 3,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$
	27/9/1992	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 177,30 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 6,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 6,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$
Las Juntas (3105)	8/11/1978	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 529,70 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 2,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 2,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$

Estaciones	HU	Función de dist. GEV (calibrada con el área de la cuenca)
	27/9/1992	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 219,90 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 6,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 6,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$
Caracucho (3107)	7/11/1972	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 565,00 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 2,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 2,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$
	20/10/2006	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 221,10 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 6,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 6,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$
Cabagra (3112)	17/7/2004	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 303,50 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 3,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 3,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$
	3/9/1998	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 972,00 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 2,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 2,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$

Estaciones	HU	Función de dist. GEV (calibrada con el área de la cuenca)
-	SCS	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 230,20 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 11,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 11,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$
-	Snyder	$f(x) = \frac{10000}{4905,05} \times 230,20 \times \left(\frac{1}{0,998}\right) \left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 8,121}{0,998}\right]\right\}^{\frac{1}{2,118-1}} e^{-\left\{1 - 2,118 \left[\frac{x - 8,121}{0,998}\right]\right\}^{1/2,118}}$

Cuadro 27. Funciones de distribución GEV calibradas el índice de Gravelius

Estaciones	HU	Función de dist. GEV (calibrada con el índice de Gravelius)
El Brujo (3103)	19/11/2000	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 230,20 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 3,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 3,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$
	20/10/2006	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 136,70 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 8,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 8,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$
El Remolino (3104)	17/10/2012	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 416,60 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 3,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 3,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$
	27/9/1992	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 177,30 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 6,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 6,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$
Las Juntas (3105)	8/11/1978	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 529,70 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 2,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 2,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$

Estaciones	HU	Función de dist. GEV (calibrada con el índice de Gravelius)
	27/9/1992	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 216,90 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 6,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 6,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$
Caracucho (3107)	7/11/1972	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 565,00 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 2,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 2,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$
	20/10/2006	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 221,10 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 6,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 6,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$
Cabagra (3112)	17/7/2004	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 303,50 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 3,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 3,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$
	3/9/1998	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 972,00 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 2,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 2,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$

Estaciones	HU	Función de dist. GEV (calibrada con el índice de Gravelius)
-	SCS	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 122,80 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 11,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 11,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$
-	Snyder	$f(x) = \frac{10}{1,84} \times 166,00 \times \left(\frac{1}{2,660}\right) \left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 8,323}{2,660}\right]\right\}^{\frac{1}{2,114-1}} e^{-\left\{1 - 2,114 \left[\frac{x - 8,323}{2,660}\right]\right\}^{1/2,114}}$

4.3.4 Salidas gráficas de las funciones de distribución calibradas

Con base en las funciones calibradas obtenidas, se procedió a generar las salidas gráficas de las funciones evaluadas en el tiempo. Estas interpretaciones se pueden ver a detalle desde la Figura 36 hasta la Figura 59, donde el rango Figura 36-Figura 47, corresponden con las calibraciones considerando el área de la cuenca y el rango Figura 48-Figura 59, corresponde con las calibraciones empleando el índice de Gravelius.

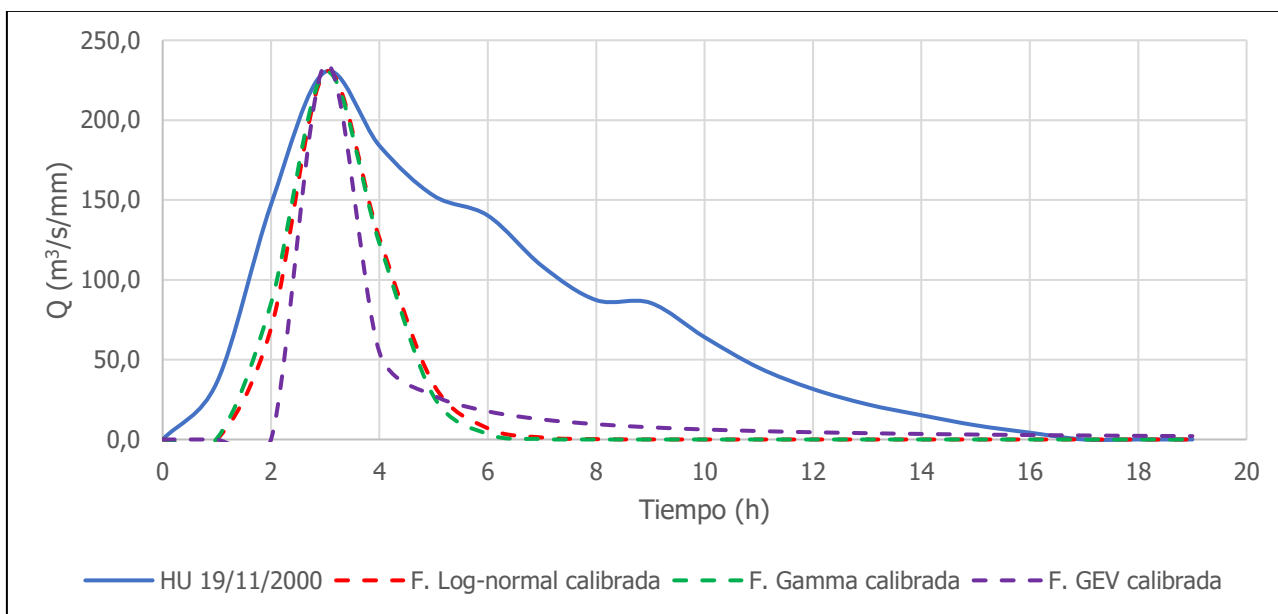


Figura 36. HU 19/11/2000 (El Brujo - 3103) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

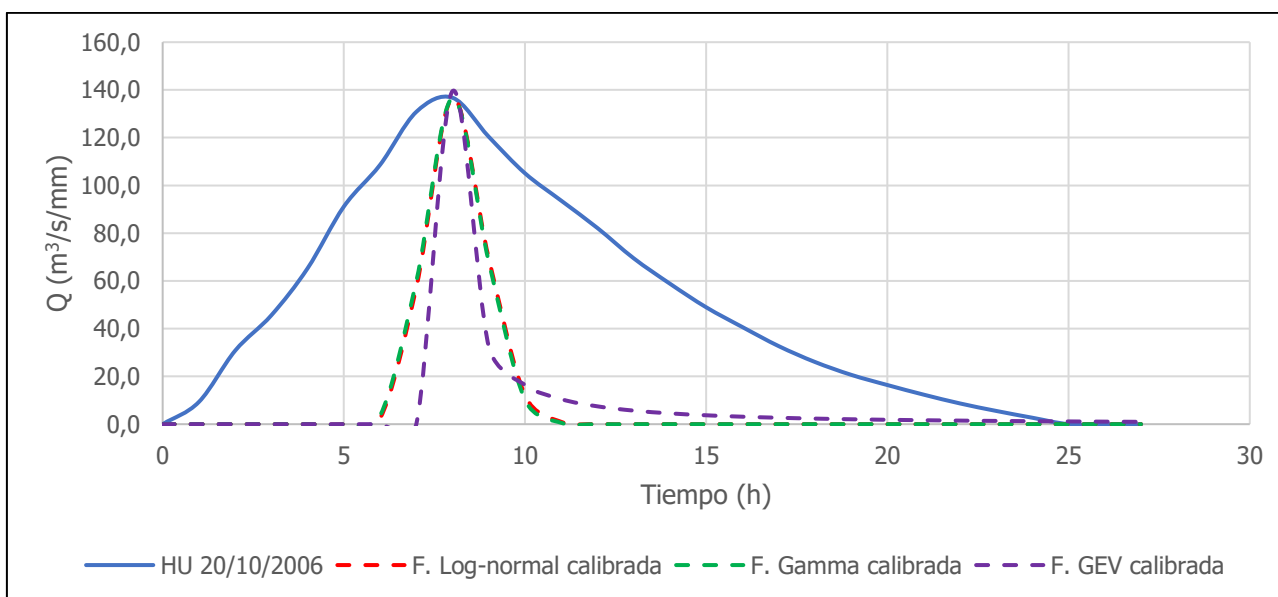


Figura 37. HU 20/10/2006 (El Brujo 3103) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

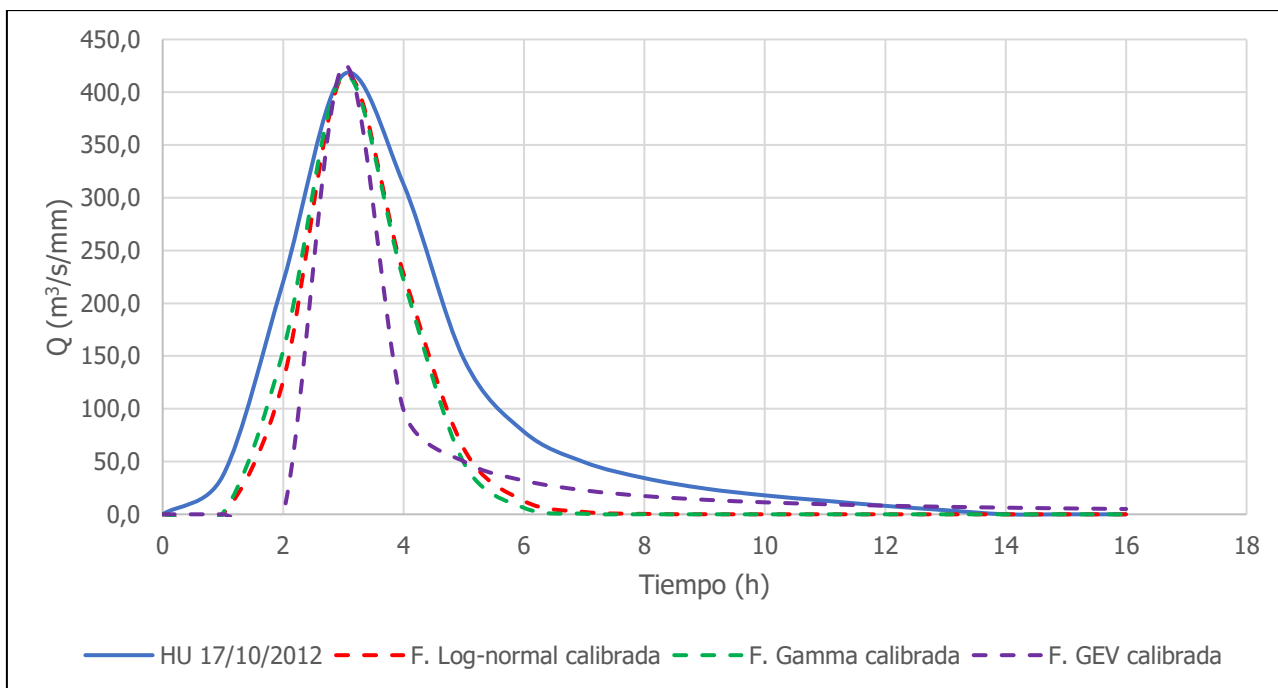


Figura 38. HU 17/10/2012 (El Remolino 3104) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

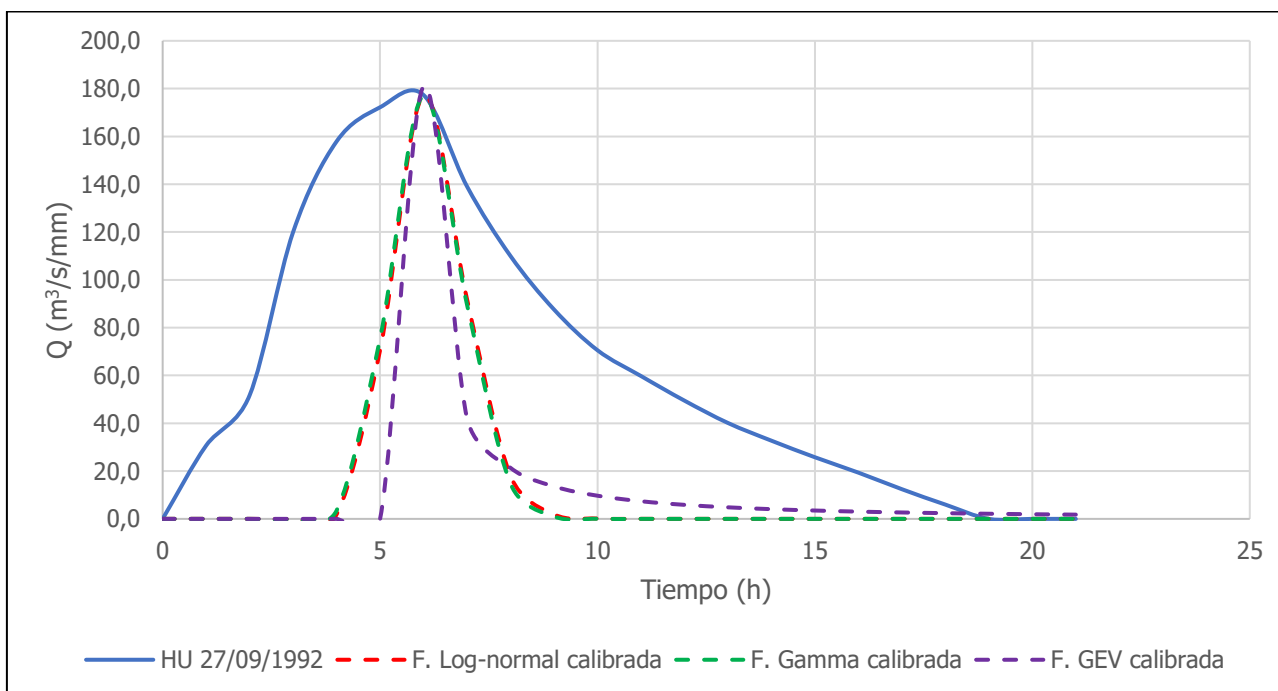


Figura 39. HU 27/09/1992 (El Remolino 3104) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

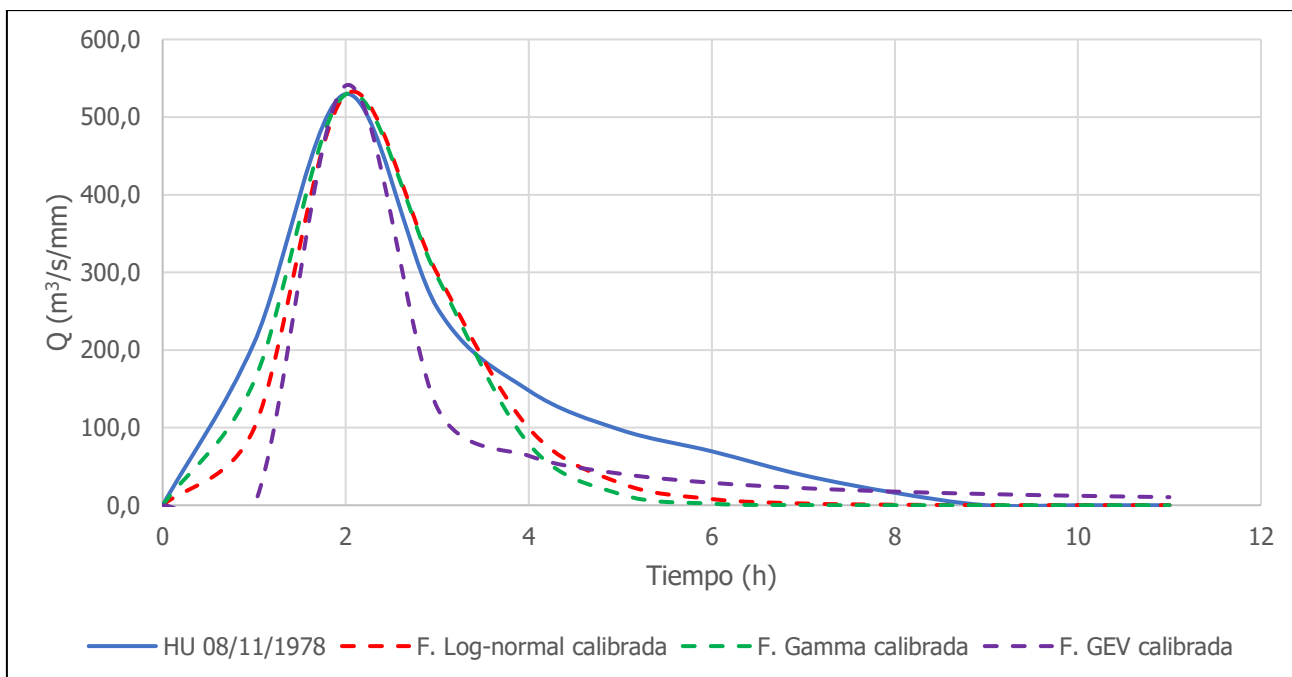


Figura 40. HU 08/11/1978 (Las Juntas 3105) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

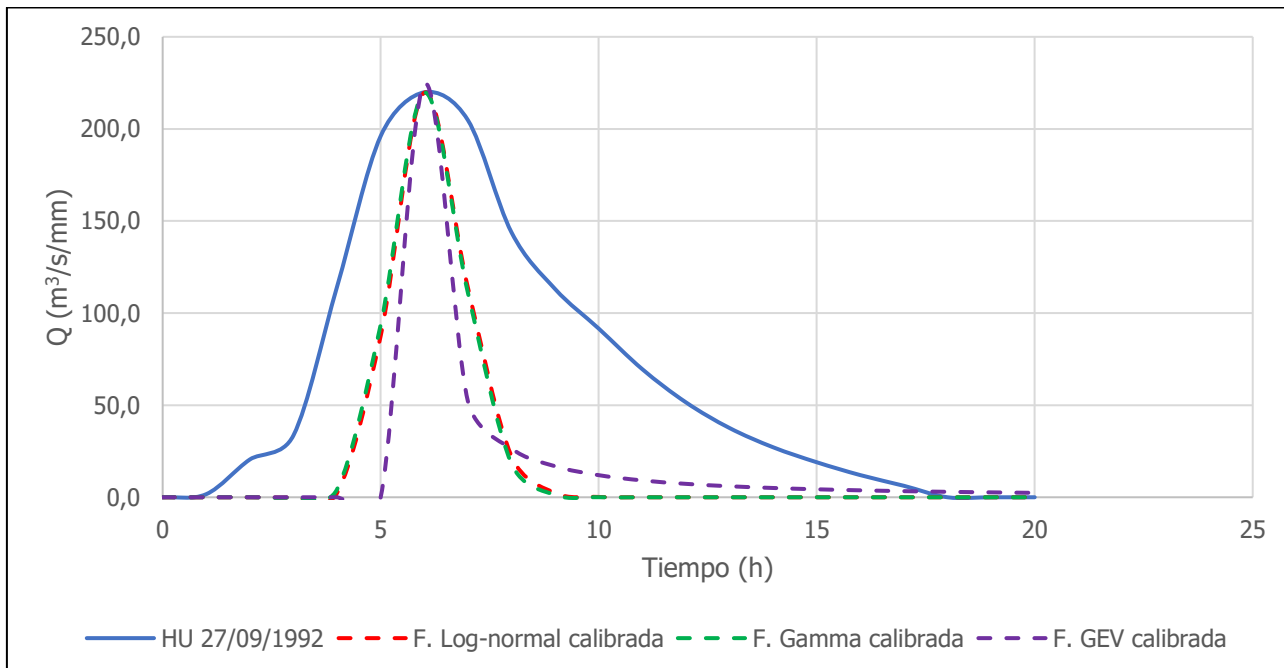


Figura 41. HU 27/09/1992 (Las Juntas 3105) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

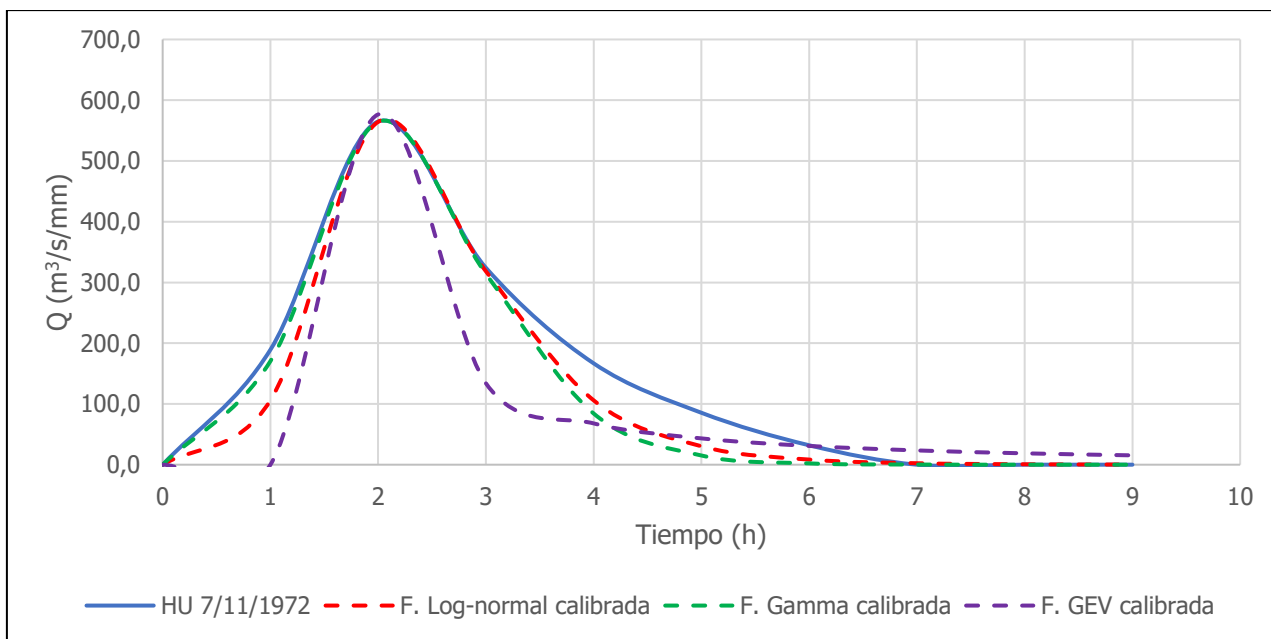


Figura 42. HU 07/11/1972 (Caracucho 3107) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

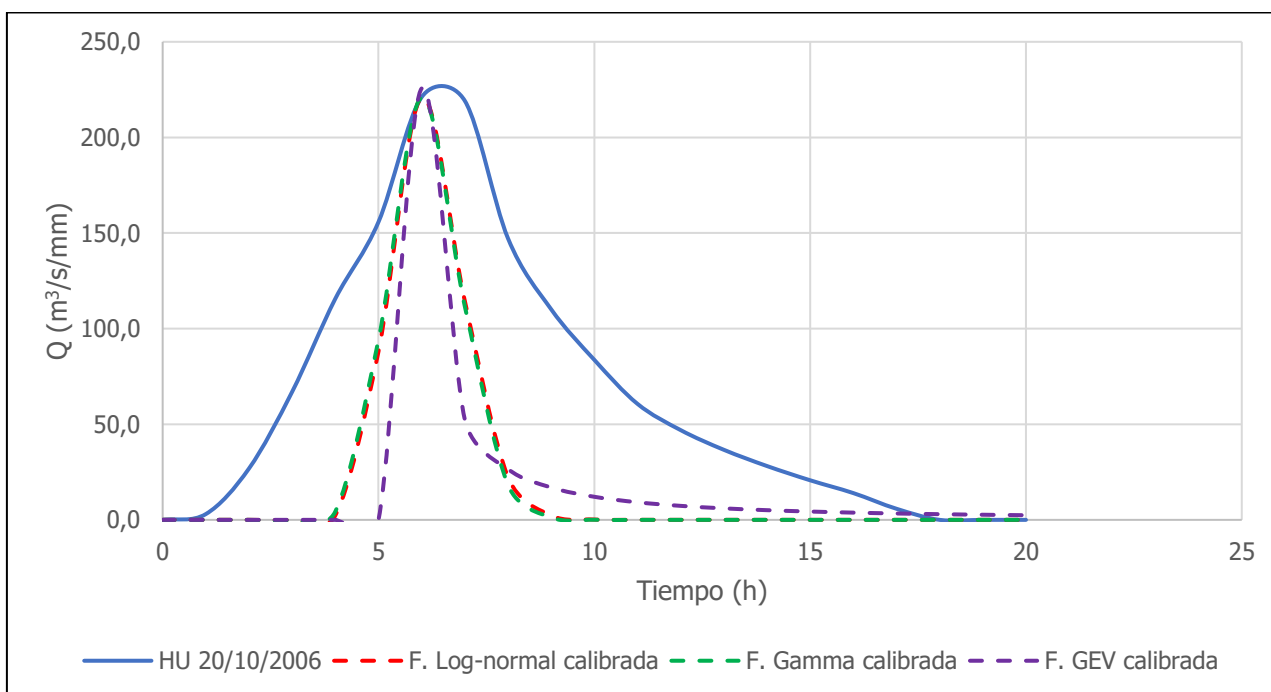


Figura 43. HU 20/10/2006 (Caracucho 3107) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

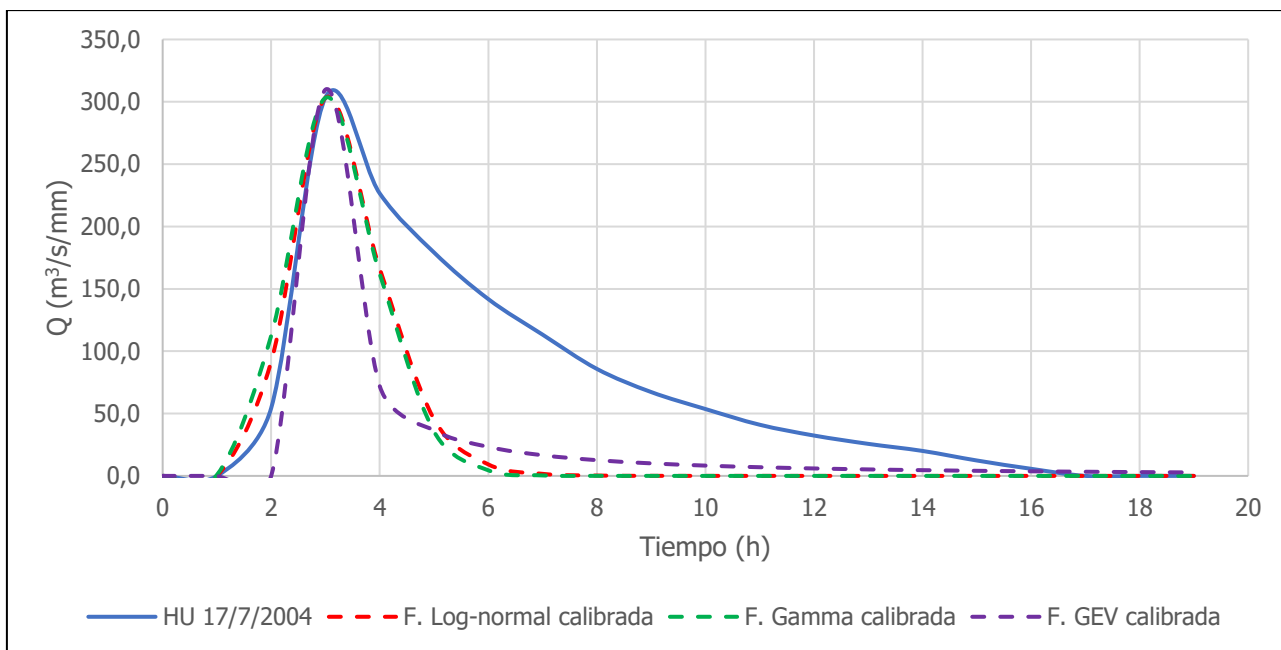


Figura 44. HU 17/07/2004 (Cabagra 3112) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

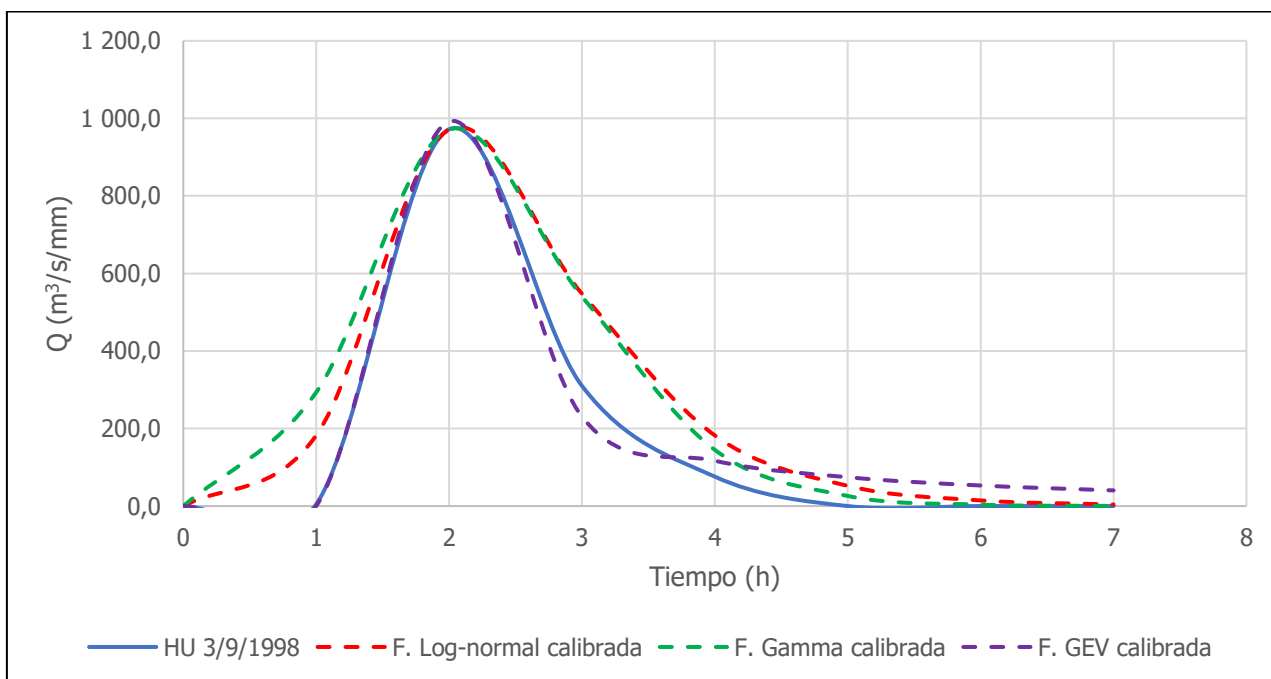


Figura 45. HU 03/9/1998 (Cabagra 3112) y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

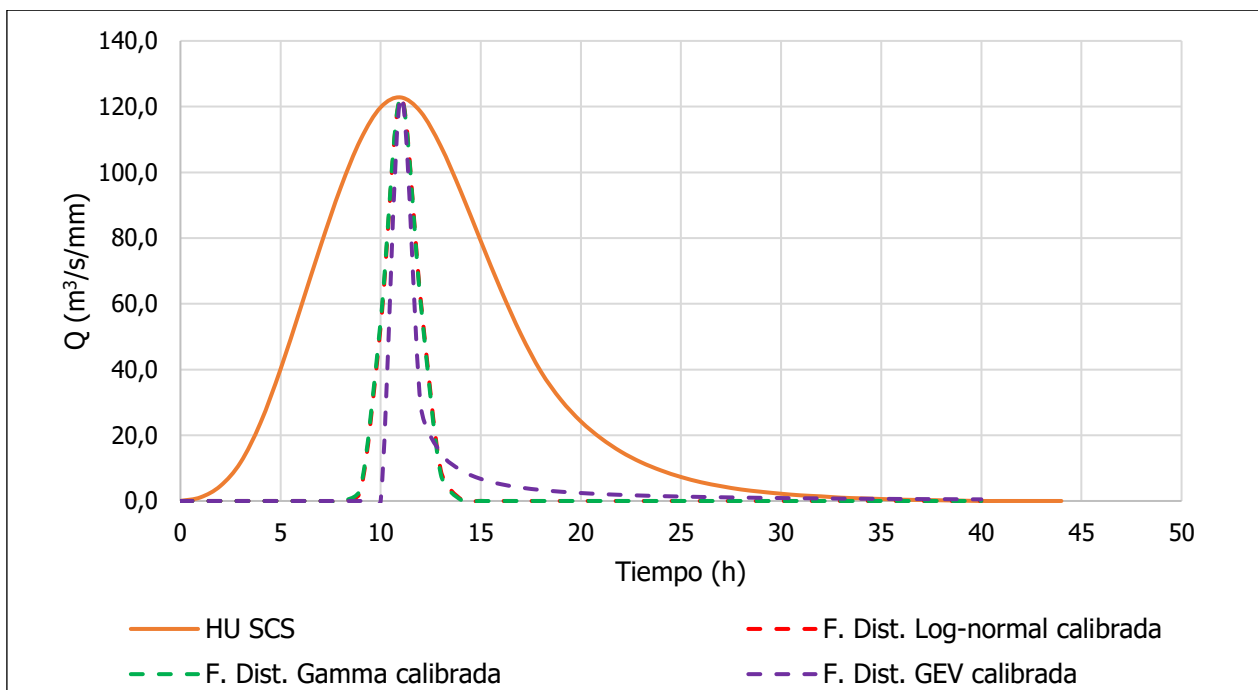


Figura 46. HU SCS y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

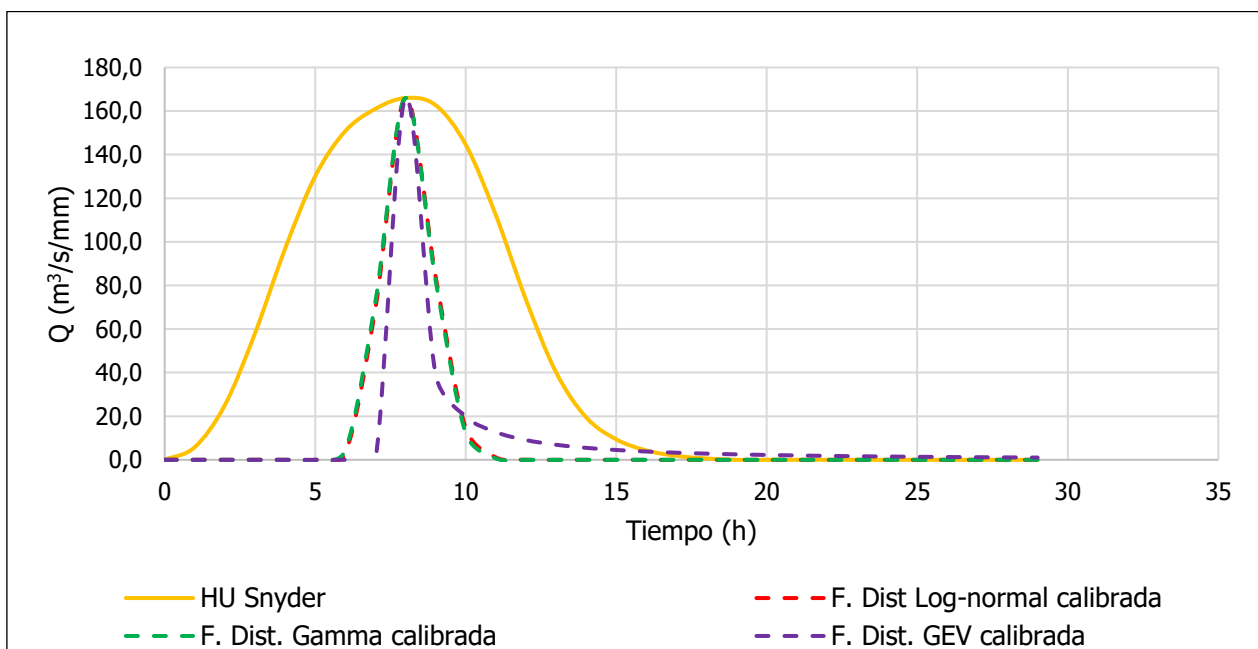


Figura 47. HU Snyder y funciones de densidad calibradas considerando el área de la cuenca

A continuación, se presentan las salidas gráficas obtenidas calibrando las funciones considerando el índice de Gravelius.

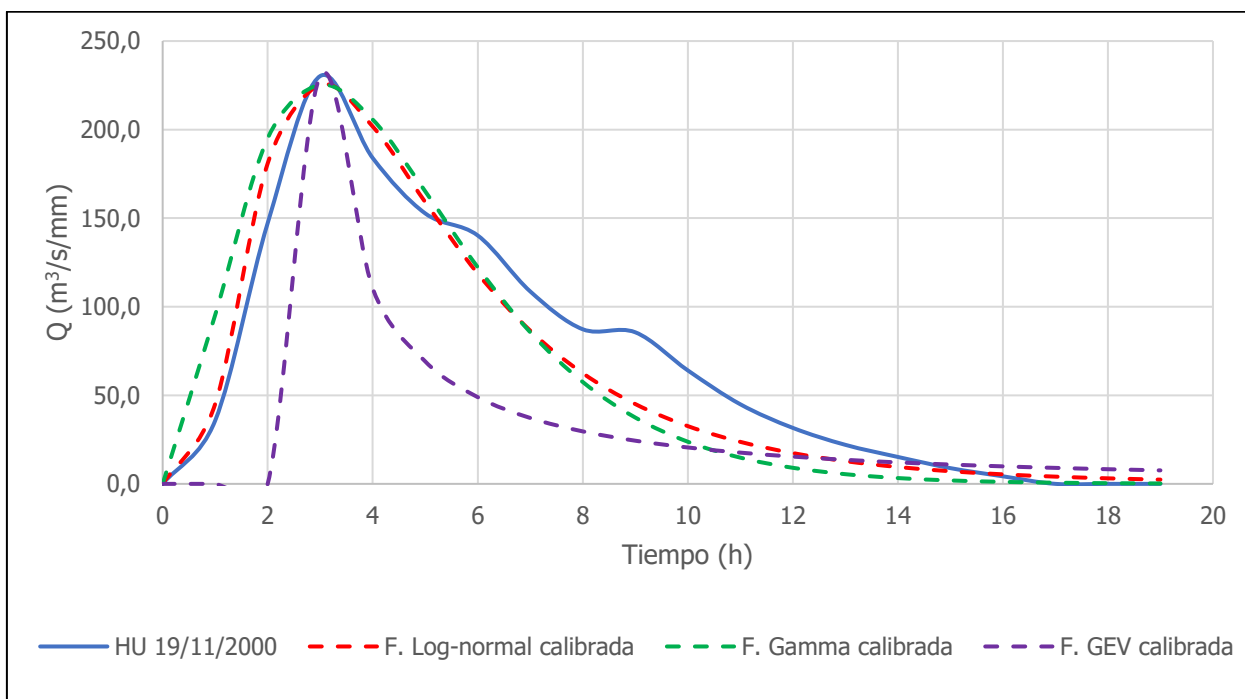


Figura 48. HU 19/11/2000 (El Brujo - 3103) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

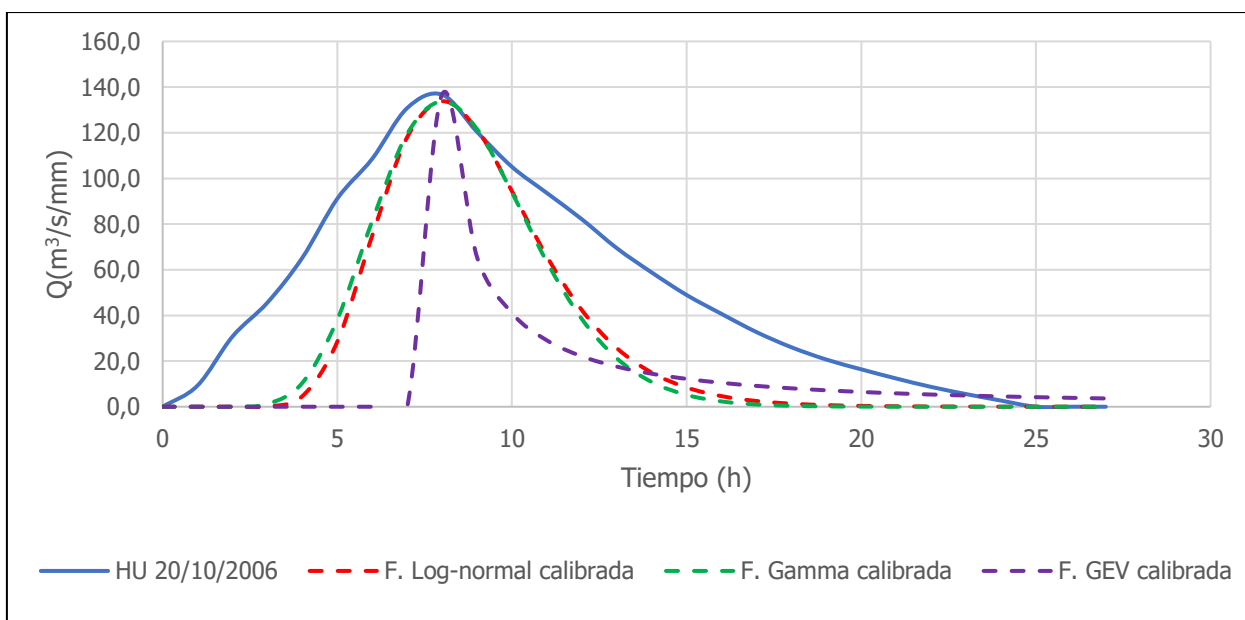


Figura 49. HU 20/10/2006 (El Brujo - 3103) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

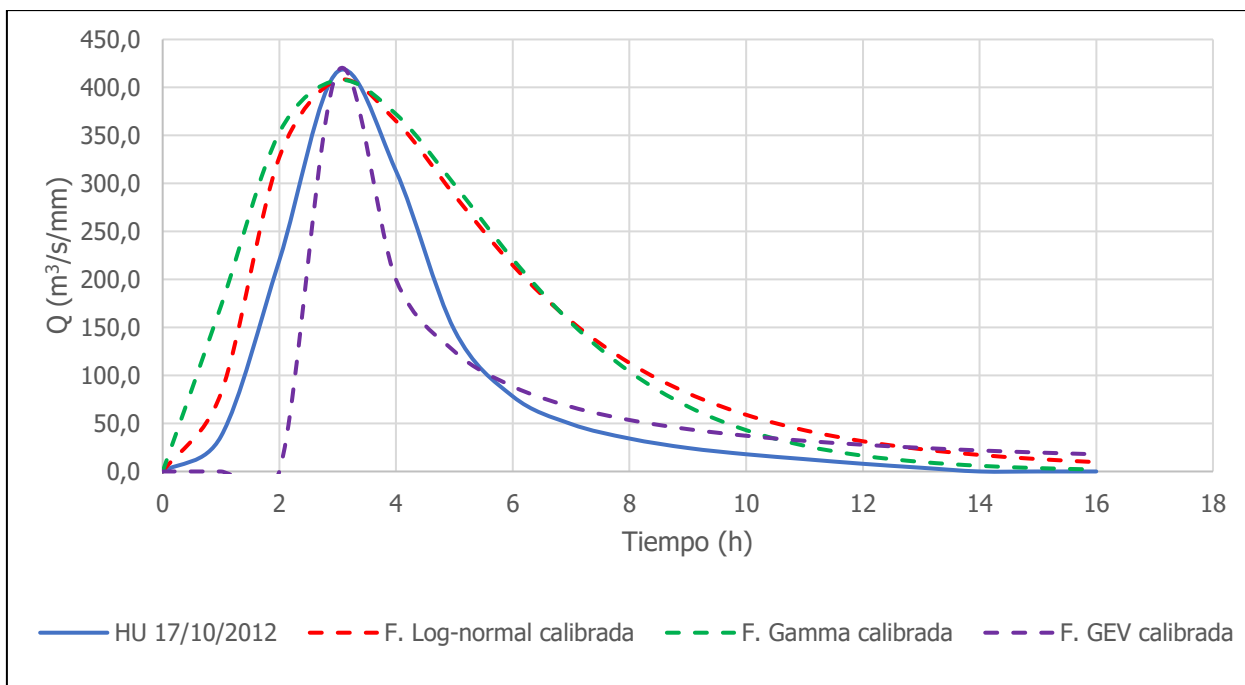


Figura 50. HU 17/10/2012 (El Remolino 3104) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

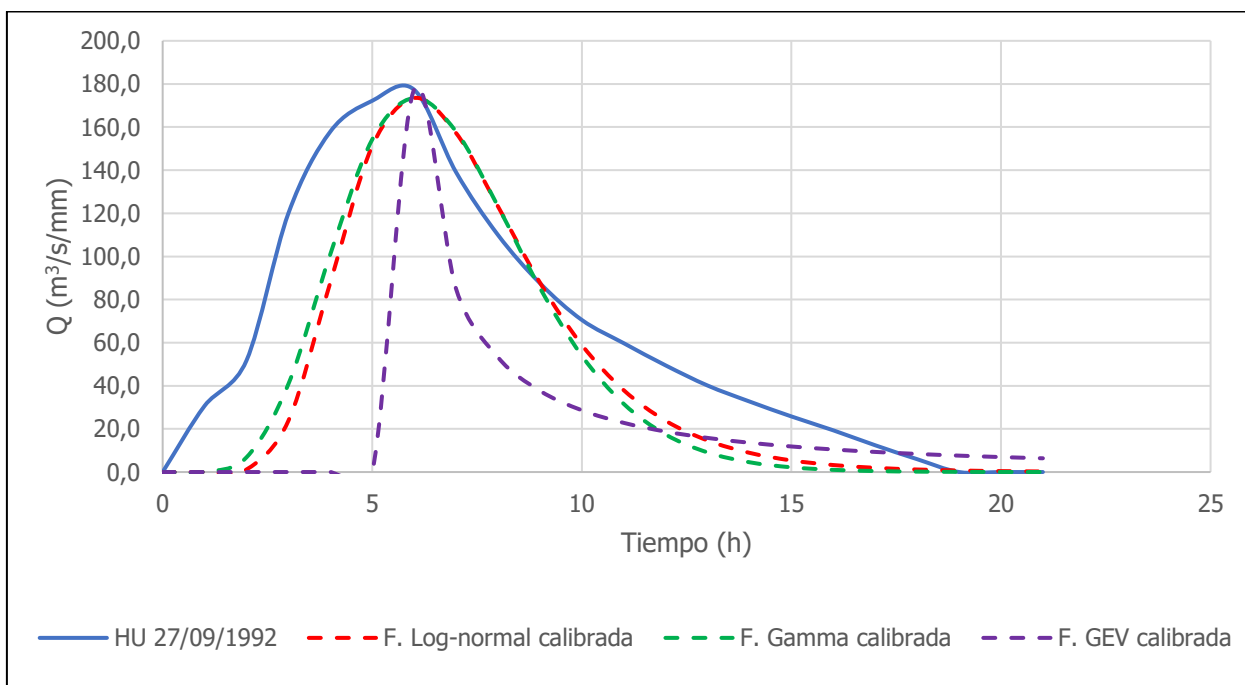


Figura 51. HU 27/09/1992 (El Remolino 3104) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

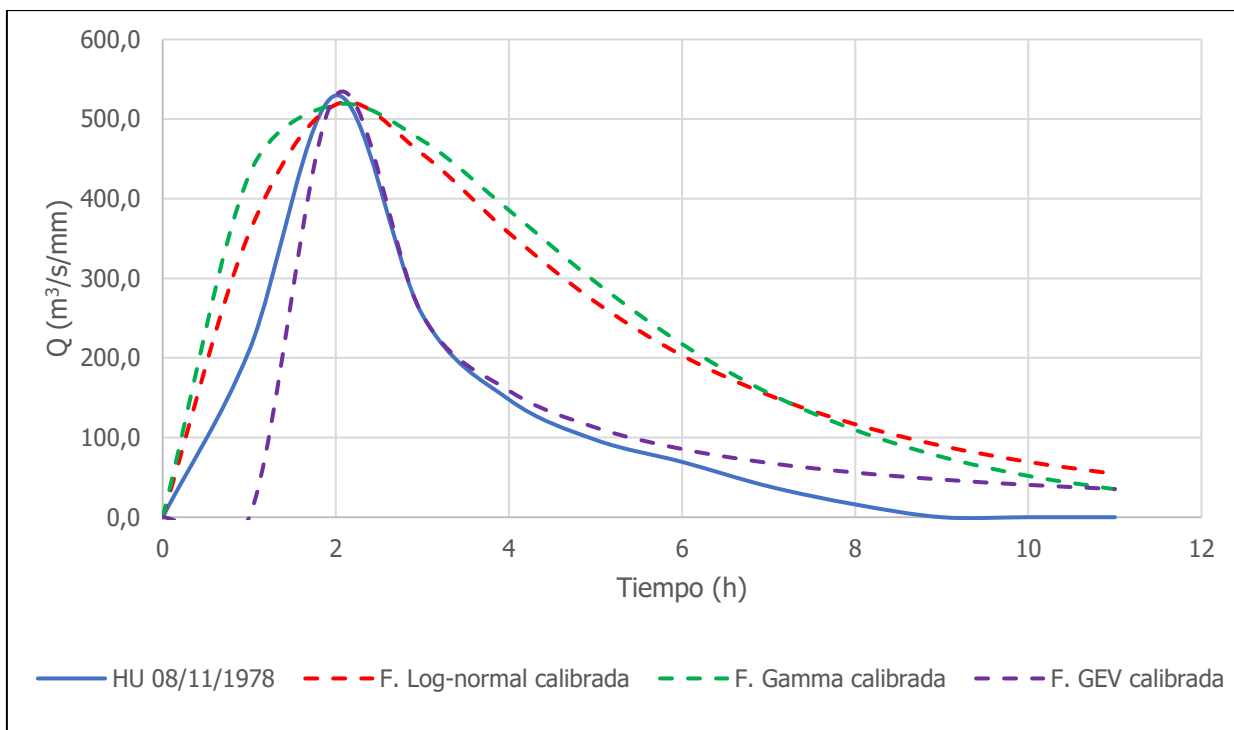


Figura 52. HU 08/11/1978 (Las Juntas 3105) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

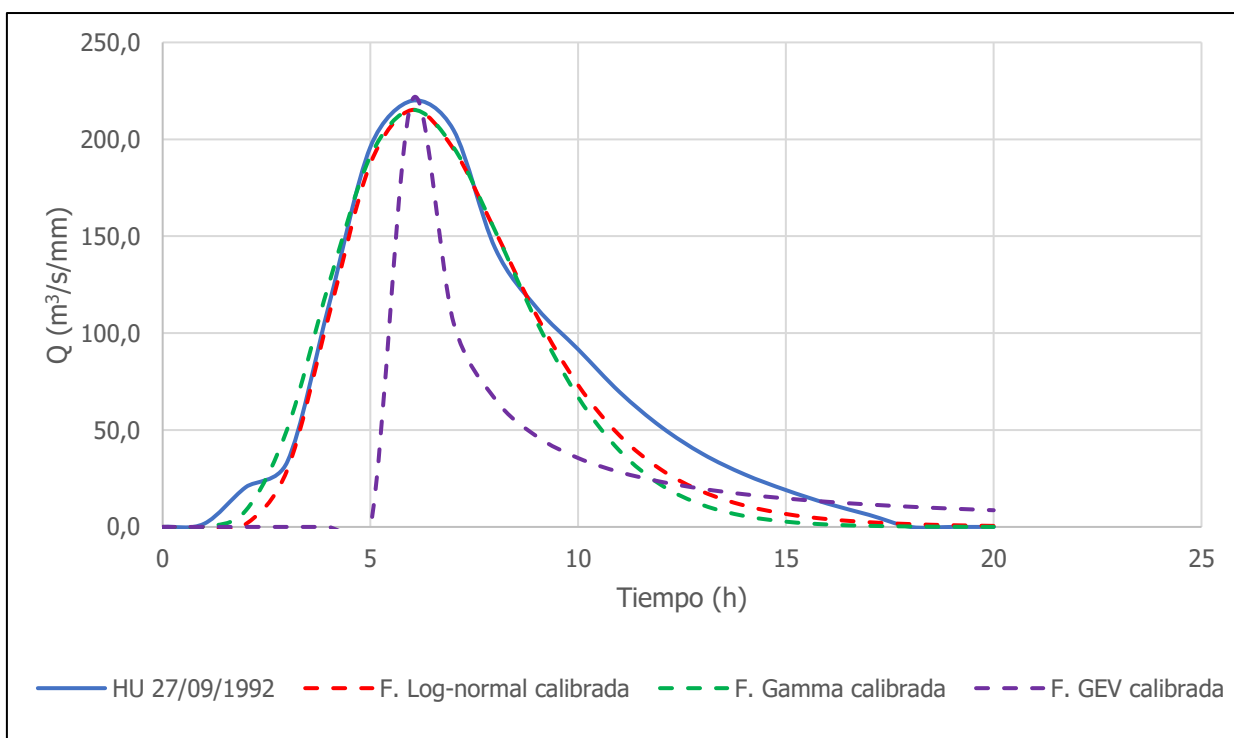


Figura 53. HU 27/09/1992 (Las Juntas 3105) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

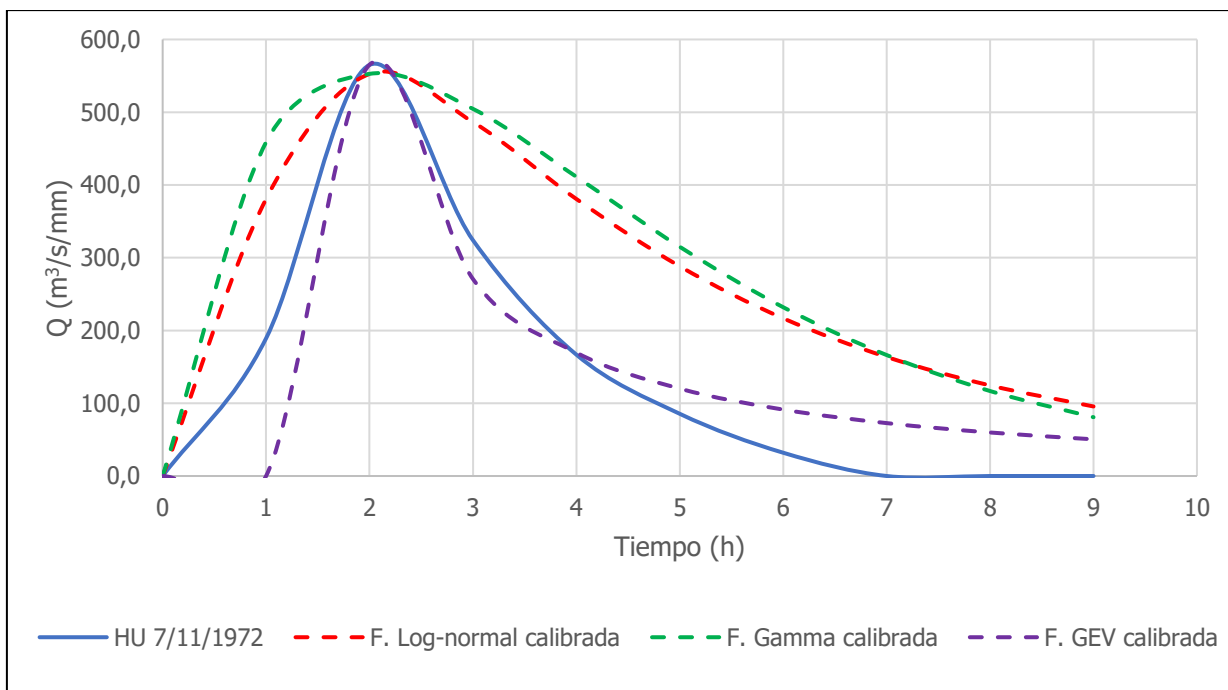


Figura 54. HU 07/11/1972 (Caracucho 3107) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

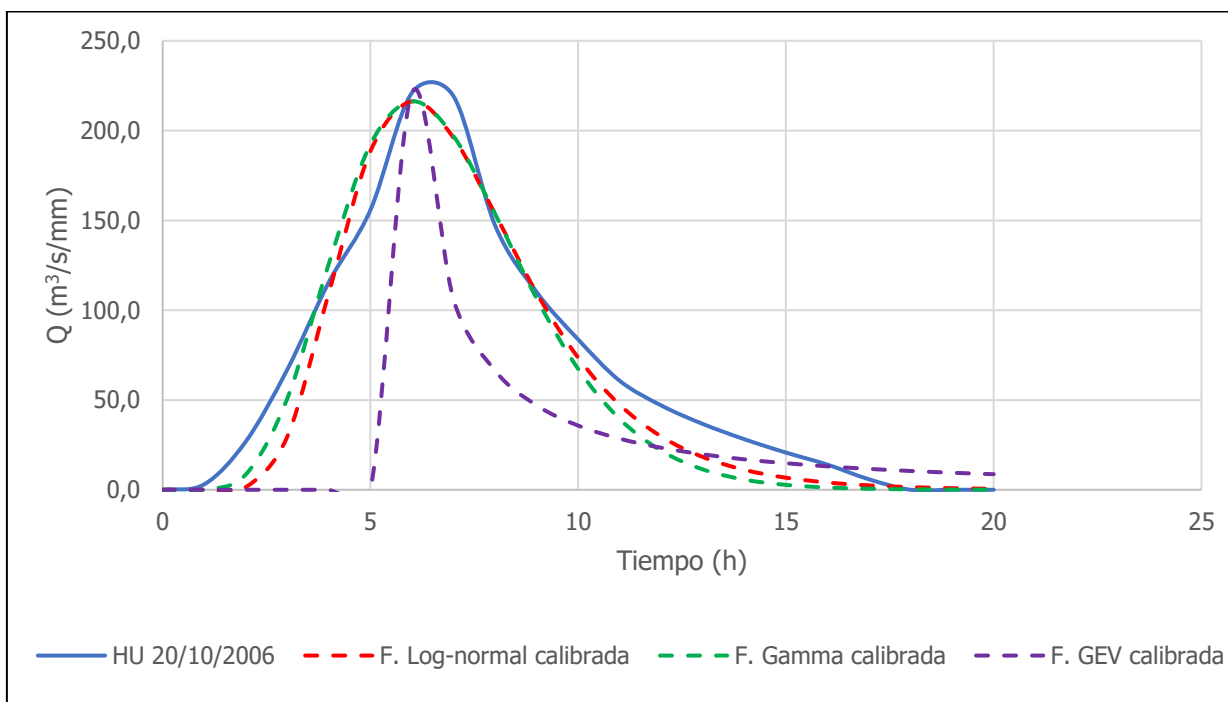


Figura 55. HU 20/10/2006 (Caracucho 3107) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

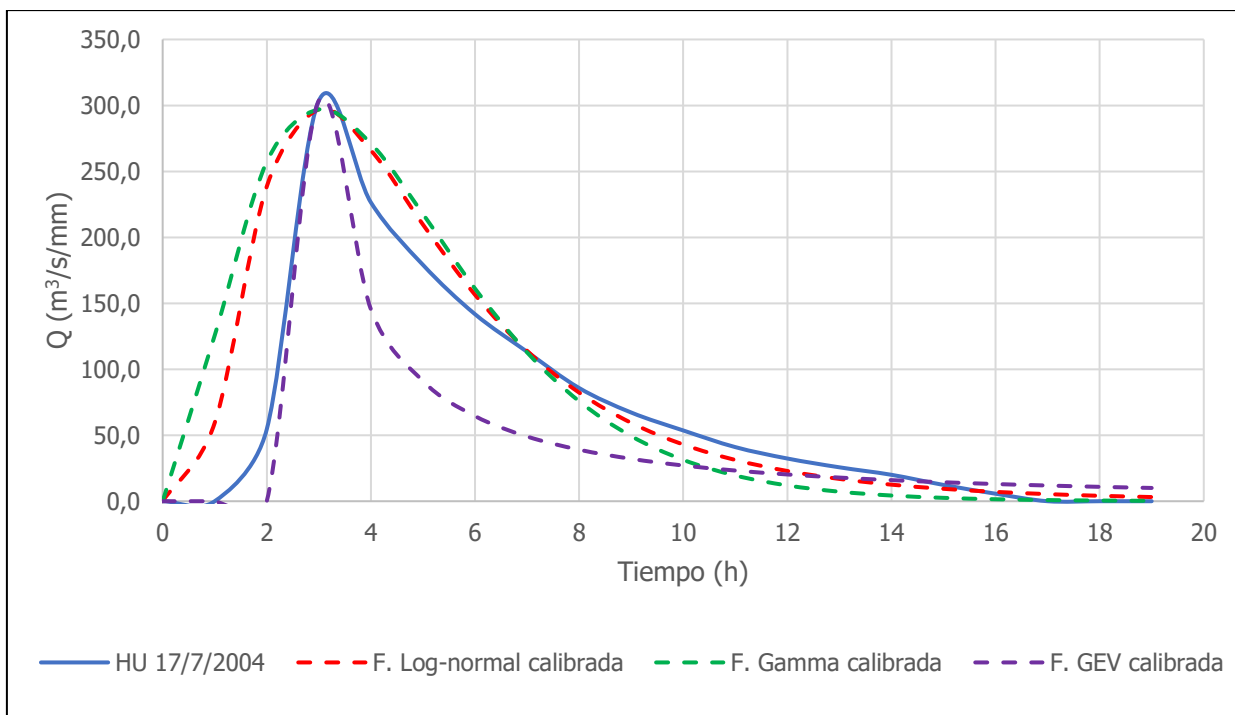


Figura 56. HU 17/07/2004 (Cabagra 3112) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

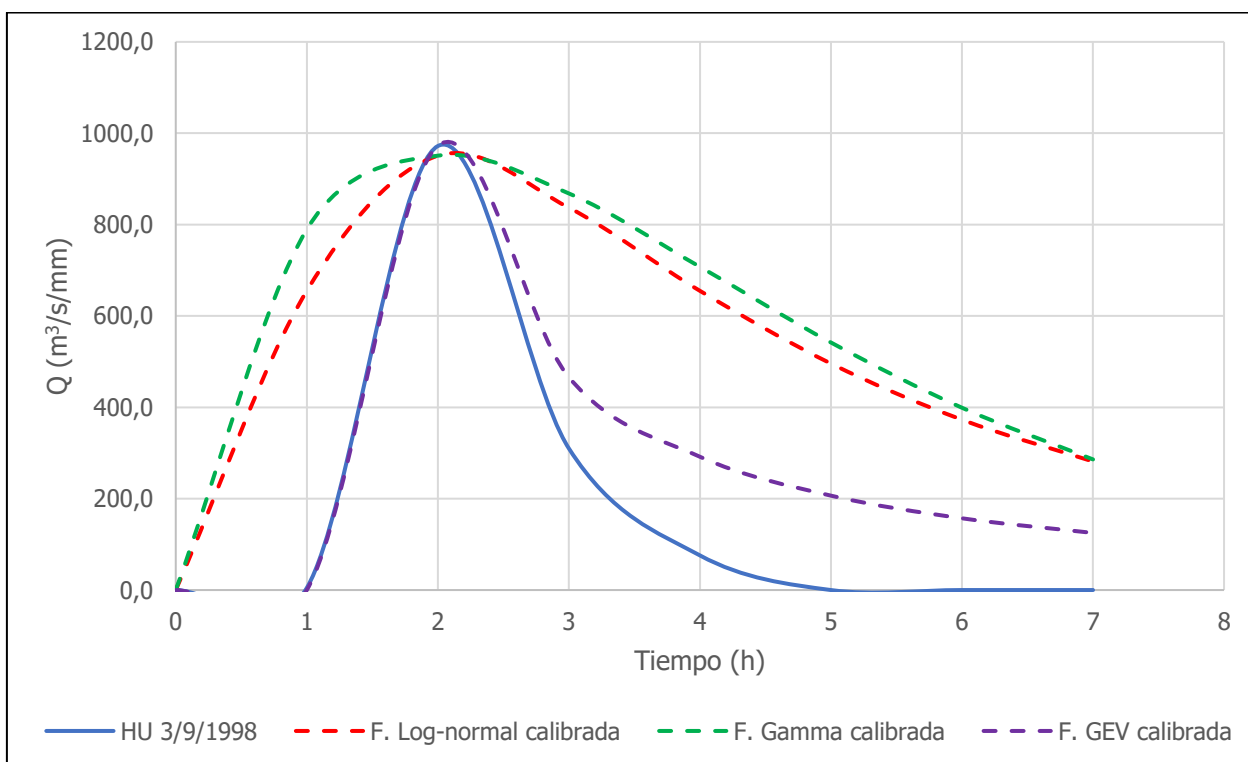


Figura 57. HU 03/09/1998 (Cabagra 3112) y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

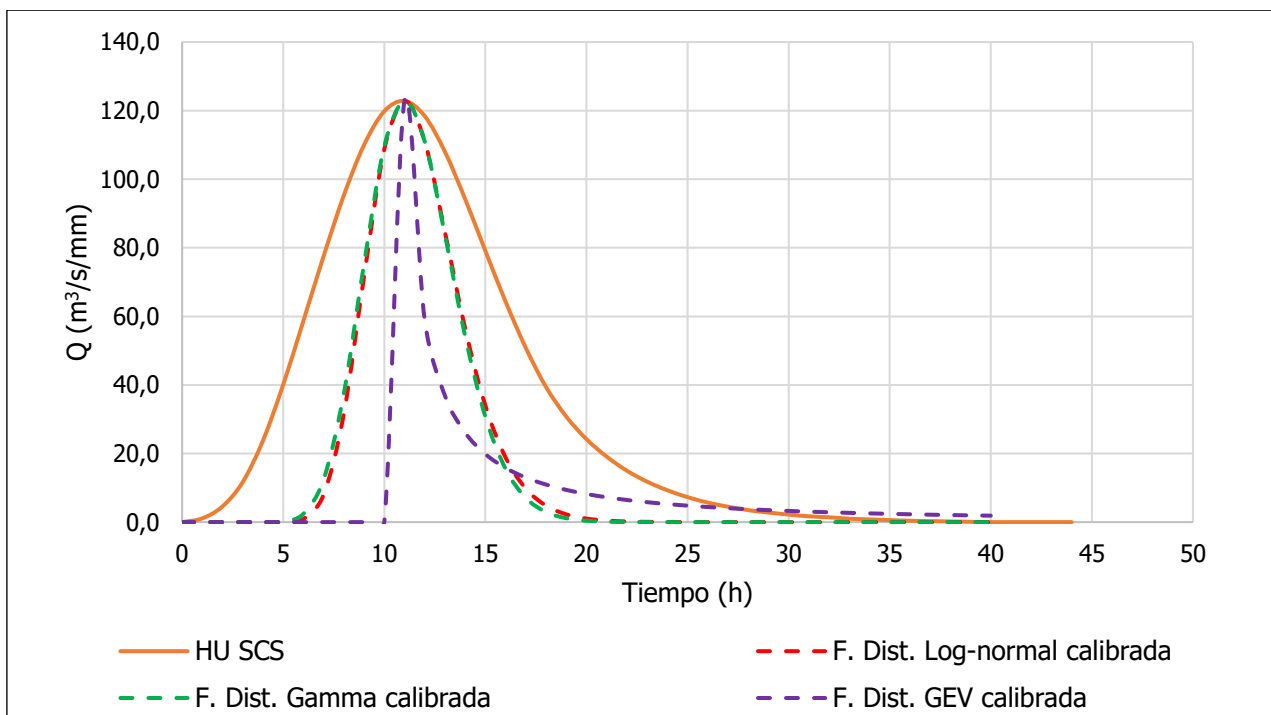


Figura 58. HU SCS y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

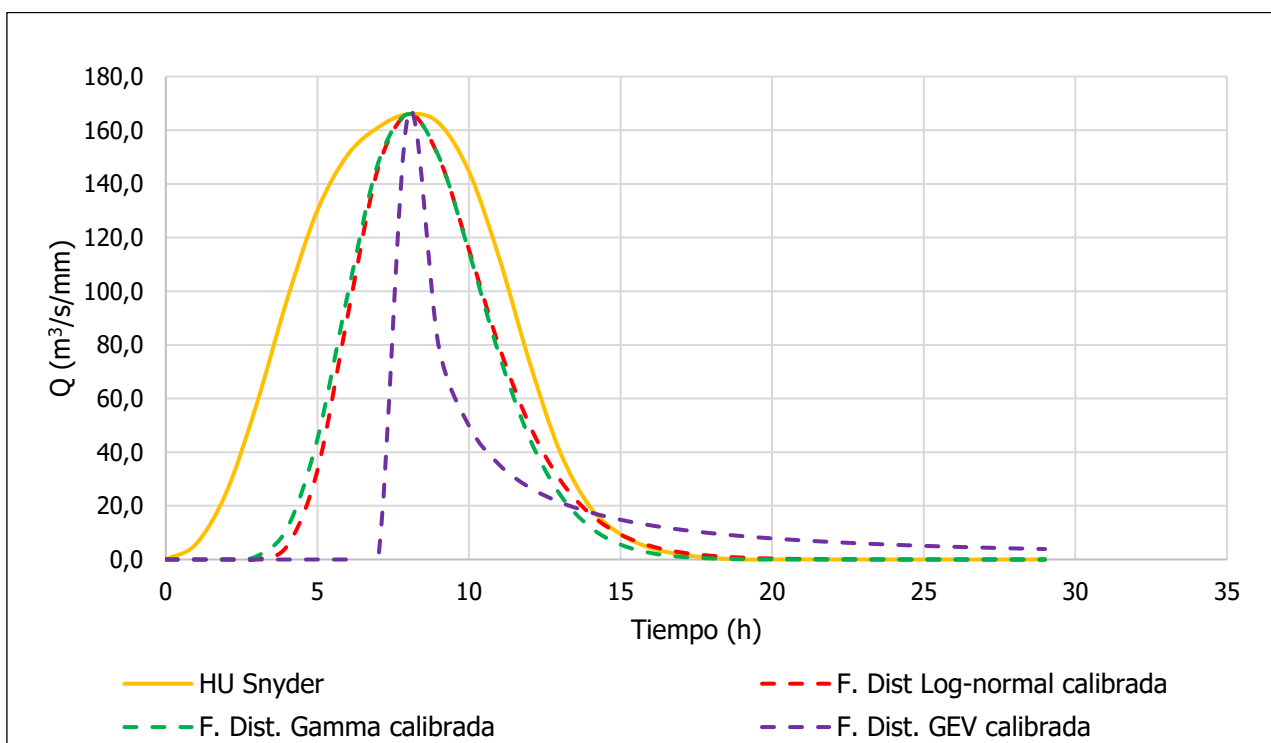


Figura 59. HU Snyder y funciones de densidad calibradas considerando el índice de Gravelius

4.4 Validación de ajustes

Determinadas las funciones de distribución calibradas y los HU reales y sintéticos, se realizaron las pruebas de validación RMSE, MAE y la de Coeficiente de correlación. Los resultados obtenidos, se detalla a mayor detalle a continuación.

4.4.1 *Error Cuadrático Medio (RMSE)*

Considerando la ecuación (14), se procedió a determinar el Error Cuadrático Medio empleando los valores de caudal de los HU (reales y sintéticos) y los valores que simulan el caudal en las funciones de distribución log-normal, gamma y GEV.

Los resultados obtenidos de los RMSE considerando las calibraciones empleando el área de la cuenca se presentan en el Cuadro 28 y los asociados a las calibraciones realizadas con el índice de Gravelius en el Cuadro 29.

Cuadro 28. RSME obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas empleando el área de la cuenca

Estación	HU	RSME		
		Distribución log-normal	Distribución gamma	Distribución GEV
El Brujo (3103)	19/11/2000	61,95	62,42	69,95
	20/10/2006	51,41	51,39	55,21
El Remolino (3104)	17/10/2012	44,35	44,32	79,89
	27/9/1992	62,37	62,20	69,63
Las Juntas (3105)	8/11/1978	47,01	42,81	78,08
	27/9/1992	61,61	61,63	73,41
Caracucho (3107)	7/11/1972	37,80	36,19	92,06
	20/10/2006	60,34	60,59	70,76
Cabagra (3112)	17/7/2004	59,85	62,64	64,78
	3/9/1998	113,06	133,15	47,97
-	SCS	42,92	42,92	45,64
-	Snyder	25,87	25,64	41,23

Cuadro 29. RSME obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas empleando el índice de Gravelius

Estación	HU	RSME		
		Distribución log-normal	Distribución gamma	Distribución GEV
El Brujo (3103)	19/11/2000	18,18	26,52	54,35
	20/10/2006	29,09	28,83	49,16
El Remolino (3104)	17/10/2012	68,49	77,46	62,77
	27/9/1992	31,56	28,80	62,77
Las Juntas (3105)	8/11/1978	126,93	143,37	65,88
	27/9/1992	11,76	15,14	61,65
Caracucho (3107)	7/11/1972	153,49	174,84	74,02
	20/10/2006	15,84	16,38	58,09
Cabagra (3112)	17/7/2004	45,13	56,26	40,29
	3/9/1998	433,08	482,38	138,72
-	SCS	25,87	25,64	41,23
-	Snyder	30,79	28,75	33,09

Teniendo en cuenta que entre más cercano a cero sea el valor de RMSE, más preciso será el modelo, se obtiene que los las funciones de log-normal y gamma presentaron un mejor ajuste. En cuanto a la distribución GEV, se observa que tanto gráficamente (Figura 36 - Figura 59), como bajo la interpretación del valor de RMSE, los modelos son los que menos se ajustan en la mayoría de los casos al comportamiento de los HU.

4.4.2 *Error absoluto medio (MAE)*

Para la obtención del Error Absoluto Medio (MAE), se procedió a emplear la ecuación (15) presentada en el marco teórico. Y, al igual que para el RMSE, se emplearon los datos de caudal de los HU obtenidos y los caudales simulados por las funciones de distribución calibradas. Los valores de MAE obtenidos considerando las calibraciones con el área de la cuenca se presentan en el Cuadro 30 y los valores de MAE asociados a las calibraciones realizadas con el índice de Gravelius se detallan en el Cuadro 31.

Cuadro 30. MAE obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas empleando el área de la cuenca

Estación	HU	MAE		
		Distribución log-normal	Distribución gamma	Distribución GEV
El Brujo (3103)	19/11/2000	44,69	44,65	49,24
	20/10/2006	38,71	38,71	40,47
El Remolino (3104)	17/10/2012	30,27	30,17	41,61
	27/9/1992	45,50	45,50	48,83
Las Juntas (3105)	8/11/1978	32,16	30,35	48,76
	27/9/1992	43,54	43,54	48,04
Caracucho (3107)	7/11/1972	23,25	21,23	59,05
	20/10/2006	43,42	43,42	47,95
Cabagra (3112)	17/7/2004	40,97	43,06	43,23
	3/9/1998	74,16	77,40	39,13
-	SCS	27,13	27,12	27,94
-	Snyder	34,14	34,14	36,62

Cuadro 31. MAE obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas empleando el índice de Gravelius

Estación	HU	MAE		
		Distribución log-normal	Distribución gamma	Distribución GEV
El Brujo (3103)	19/11/2000	13,77	19,92	37,64
	20/10/2006	22,20	22,21	34,90
El Remolino (3104)	17/10/2012	52,19	53,83	35,16
	27/9/1992	21,16	21,06	40,70
Las Juntas (3105)	8/11/1978	108,82	117,37	37,13
	27/9/1992	9,14	11,53	38,23
Caracucho (3107)	7/11/1972	135,13	150,02	52,26
	20/10/2006	11,71	12,78	38,04
Cabagra (3112)	17/7/2004	20,49	29,00	27,87
	3/9/1998	365,96	402,83	108,21
-	SCS	16,95	16,95	24,56
-	Snyder	15,57	15,36	33,04

Sabiendo que el MAE se interpreta como el error promedio al hacer una predicción con el modelo y que entre más cercano a cero sea el valor del MAE, menor será ese error promedio de predicción. Se determina que la distribución log-normal y gamma presentaron un error promedio mayormente aceptable dado que presentan valores más cercanos a cero. Mientras que para la distribución GEV, el valor del MAE es considerablemente mayor a cero en casi todos los eventos que se simularon, por lo tanto, a nivel general, la función de distribución GEV fue el modelo menos preciso de los tres.

Si bien el MAE penaliza menos la precisión de los modelos que el RMSE, ya que es menos sensible a los valores atípicos, el comportamiento en cuanto a la precisión es coherente. A nivel general el comportamiento de los modelos que se calibraron empleando el área de la cuenca presentan valores más constantes, mientras los modelos que fueron calibrados con el índice de Gravelius presentan variaciones considerables, dando modelos que se ajustan de manera aceptable en casos específicos y, por otra parte, indicando que hay modelos que distan considerablemente de los HU reales.

Asimismo, se puede observar que para ambos casos de calibración los valores de MAE específicamente para el caso de los modelos asociados a los HU sintéticos es relativamente bajo.

4.4.3 *Coefficiente de correlación (CC)*

Con base en la ecuación (16), se determinó el coeficiente correlación para cada uno de los modelos hidrológicos y las funciones de distribución obtenidas. En el Cuadro 32 se presentan los CC resultantes considerando las calibraciones con el área de la cuenca. Mientras que, en el Cuadro 33 se muestran los valores de CC obtenidos para las calibraciones realizadas con el índice de Gravelius.

Cuadro 32. CC obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas considerando el área de la cuenca

Estación	HU	Coeficiente de correlación		
		Distribución log-normal	Distribución gamma	Distribución GEV
El Brujo (3103)	19/11/2000	0,78	0,78	0,68
	20/10/2006	0,63	0,63	0,50
El Remolino (3104)	17/10/2012	0,96	0,96	0,81
	27/9/1992	0,68	0,68	0,51
Las Juntas (3105)	8/11/1978	0,97	0,97	0,90
	27/9/1992	0,79	0,79	0,61
Caracucho (3107)	7/11/1972	0,99	0,99	0,89
	20/10/2006	0,80	0,79	0,64
Cabagra (3112)	17/7/2004	0,83	0,80	0,80
	3/9/1998	0,96	0,94	0,99
-	SCS	0,58	0,58	0,47
-	Snyder	0,63	0,63	0,47

Cuadro 33. CC obtenidos a partir de los datos de HU y las distribuciones de probabilidad calibradas considerando el índice de Gravelius

Estación	HU	Coeficiente de correlación		
		Distribución log-normal	Distribución gamma	Distribución GEV
El Brujo (3103)	19/11/2000	0,97	0,94	0,79
	20/10/2006	0,90	0,91	0,58
El Remolino (3104)	17/10/2012	0,94	0,92	0,86
	27/9/1992	0,90	0,93	0,54
Las Juntas (3105)	8/11/1978	0,91	0,88	0,90
	27/9/1992	0,99	0,98	0,70
Caracucho (3107)	7/11/1972	0,90	0,86	0,91
	20/10/2006	0,98	0,98	0,74
Cabagra (3112)	17/7/2004	0,89	0,84	0,92
	3/9/1998	0,69	0,62	0,96
-	SCS	0,88	0,88	0,57
-	Snyder	0,90	0,92	0,54

Con base en los resultados presentados en el Cuadro 32, Cuadro 33 y el Cuadro 2 del apartado de marco teórico, se determina que la correlación de las calibraciones varía entre débil a perfecta en casos particulares, siendo más favorable la correlación con las distribuciones de log-normal y gamma es perfecta, mientras que la correlación para la distribución GEV es moderada.

A nivel general se puede observar que los valores de correlación para las calibraciones realizadas empleando el índice de Gravelius es mayor cuando se compara con las correlaciones de las calibraciones realizadas considerando el área de la cuenca.

A continuación, se presentan las interpretaciones graficas que correlacionan los hidrogramas unitarios con las funciones de distribución log-normal, gamma y GEV (De la Figura 60 a la Figura 83).

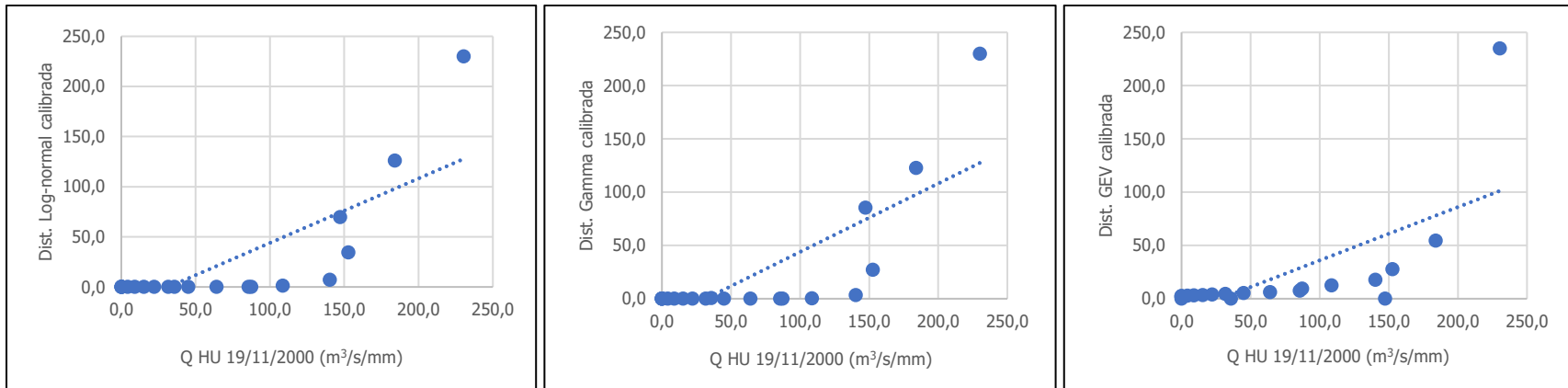


Figura 60. Correlaciones del HU 19/11/2000 (El Brujo 3103) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

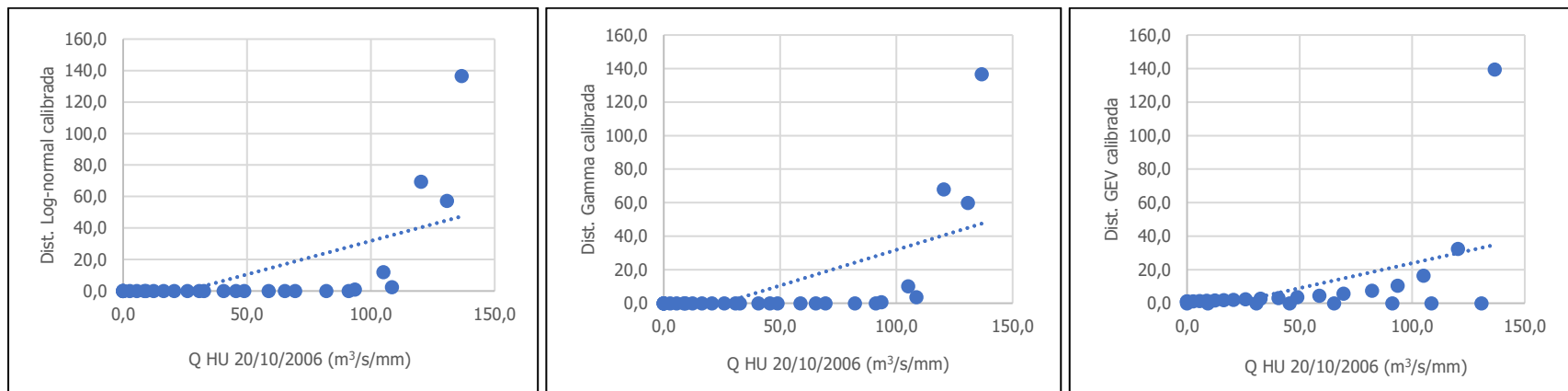


Figura 61. Correlaciones del HU 20/10/2006 (El Brujo 3103) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

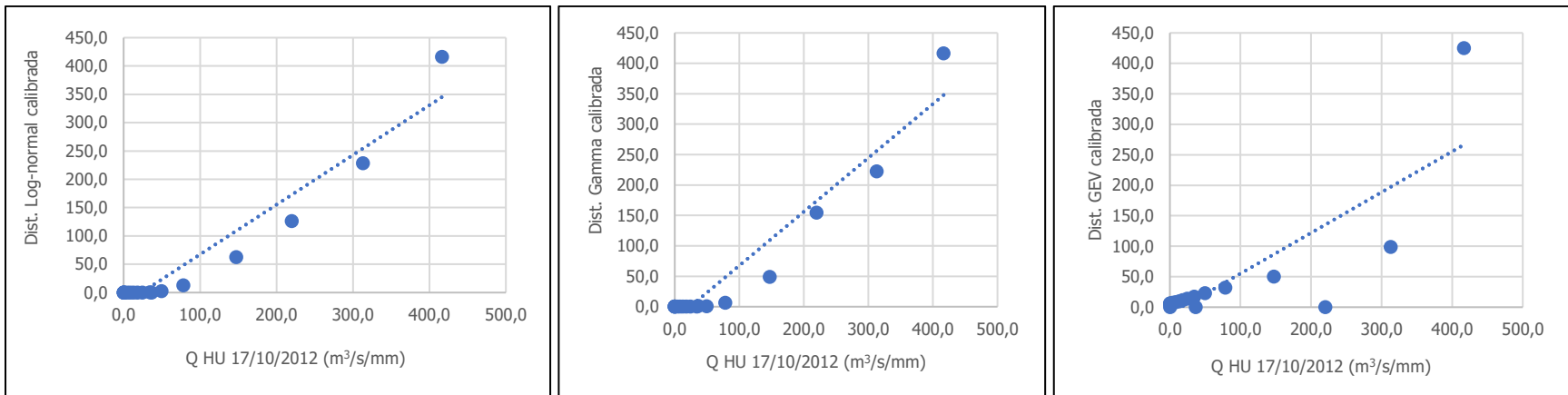


Figura 62. Correlaciones del HU 17/10/2012 (El Remolino 3104) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

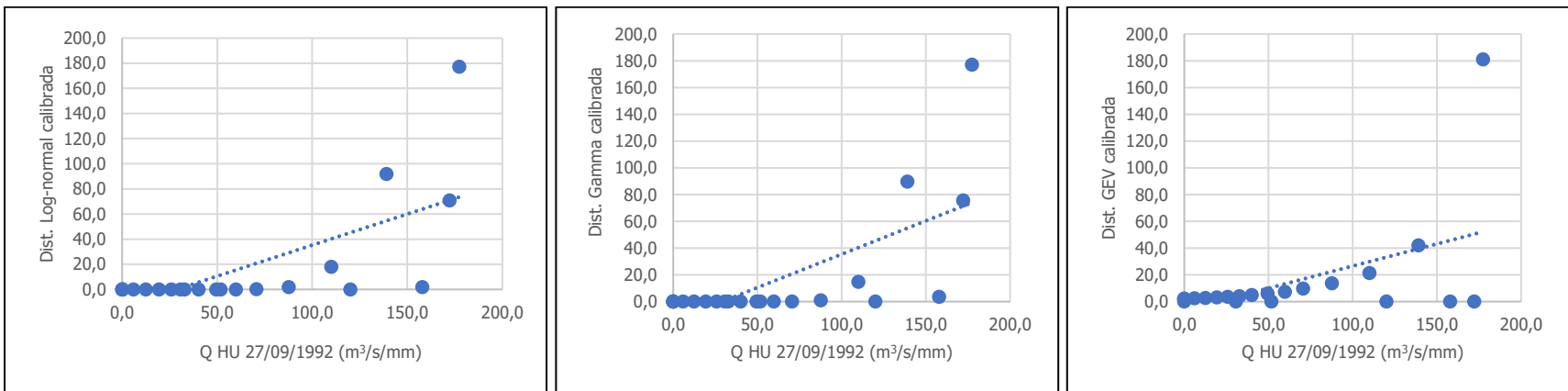


Figura 63. Correlaciones del HU 27/09/1992 (El Remolino 3104) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

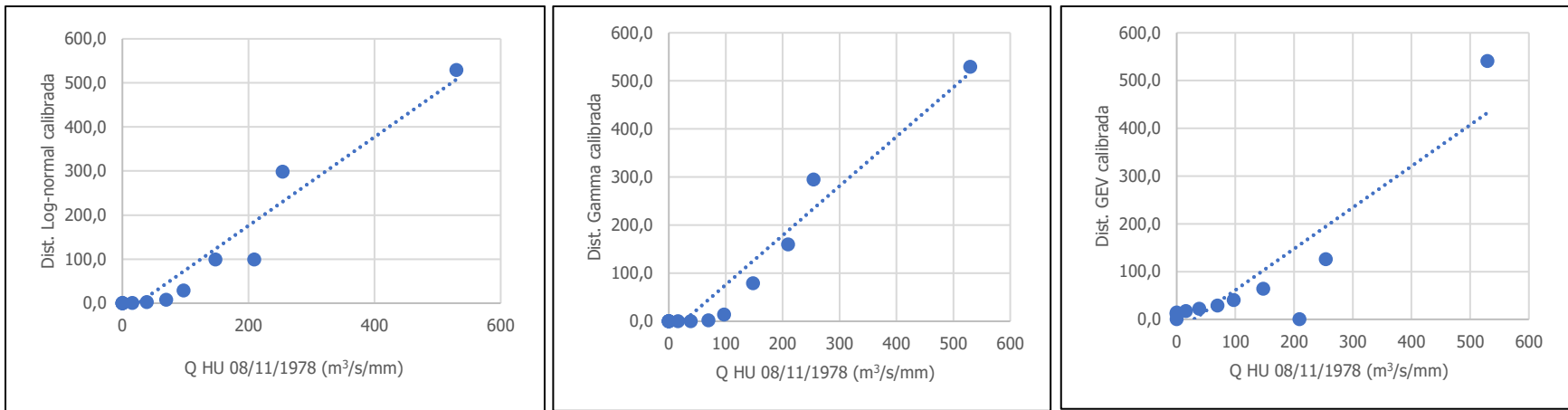


Figura 64. Correlaciones del HU 08/11/1978 (Las Juntas 3105) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

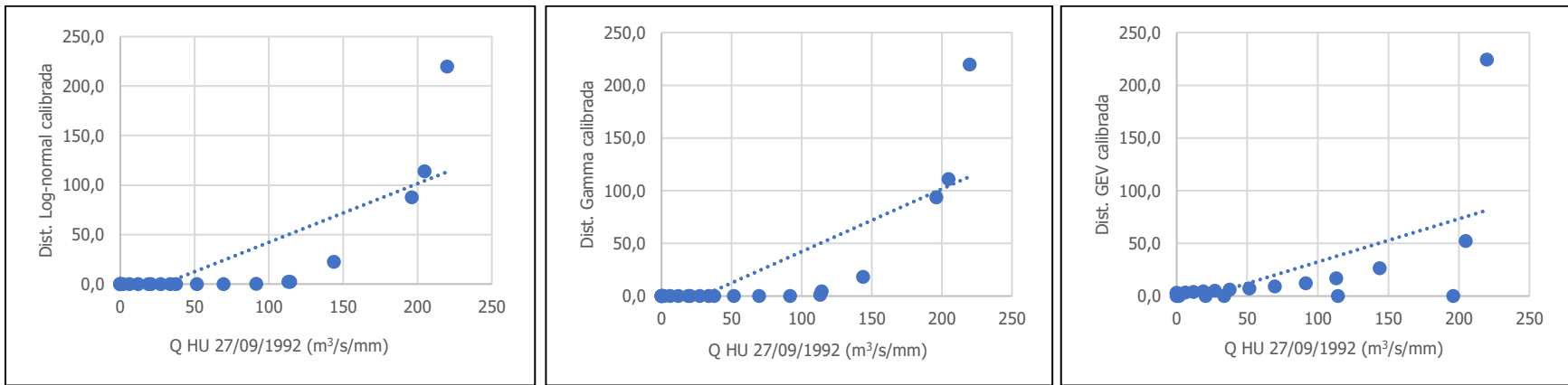


Figura 65. Correlaciones del HU 27/09/1992 (Las Juntas 3105) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

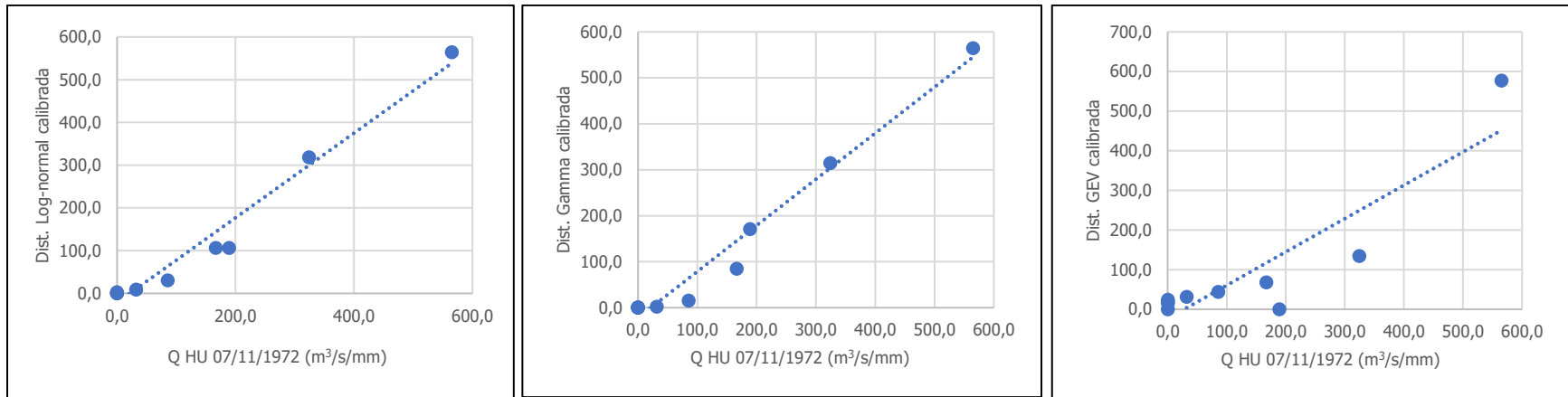


Figura 66. Correlaciones del HU 07/11/1972 (Caracucho 3107) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

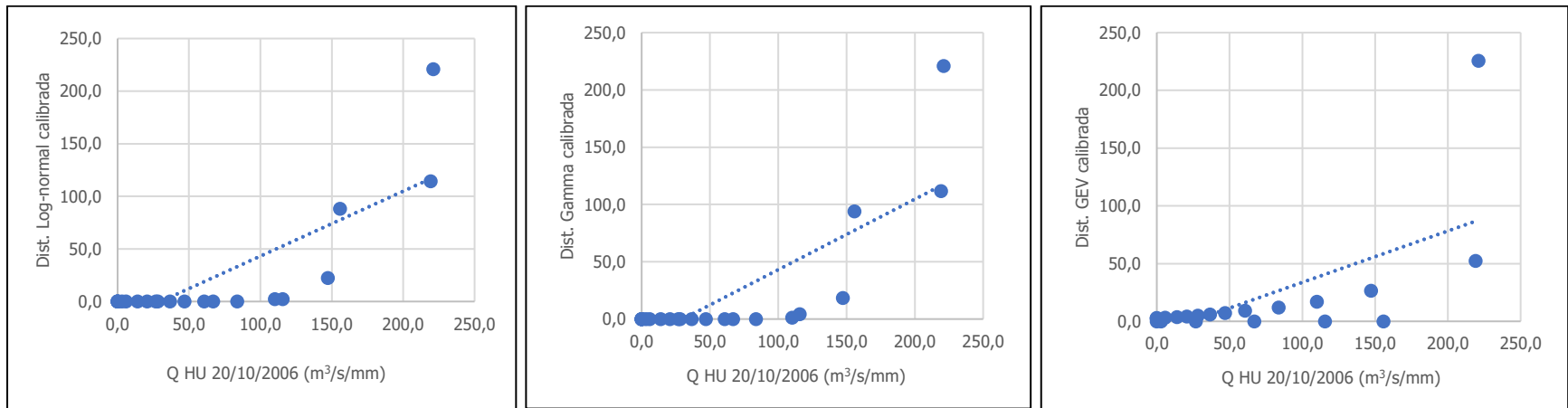


Figura 67. Correlaciones del HU 20/10/2006 (Caracucho 3107) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

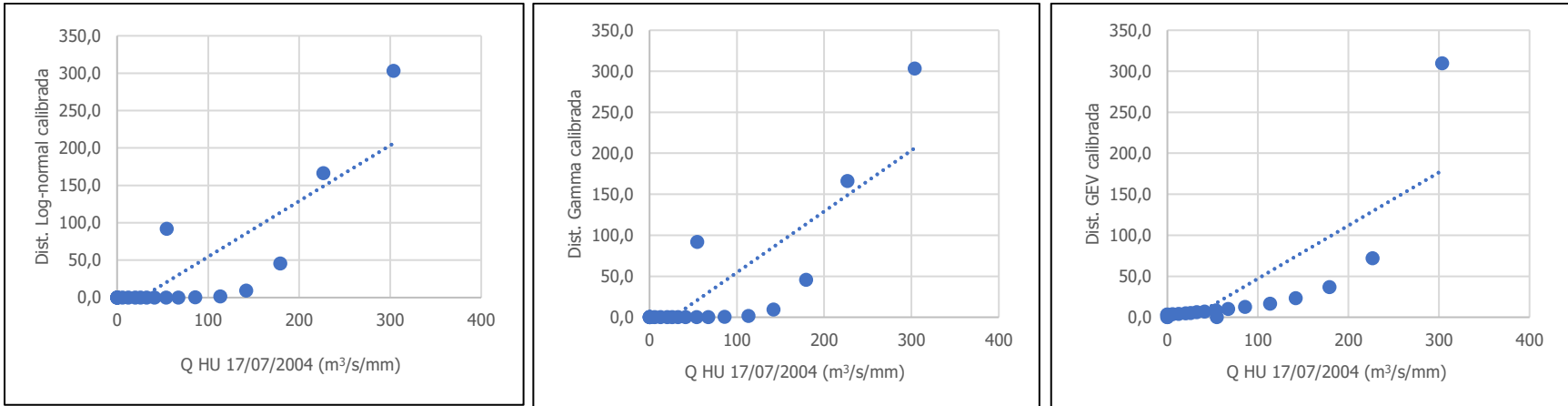


Figura 68. Correlaciones del HU 17/07/2004 (Cabagra 3112) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

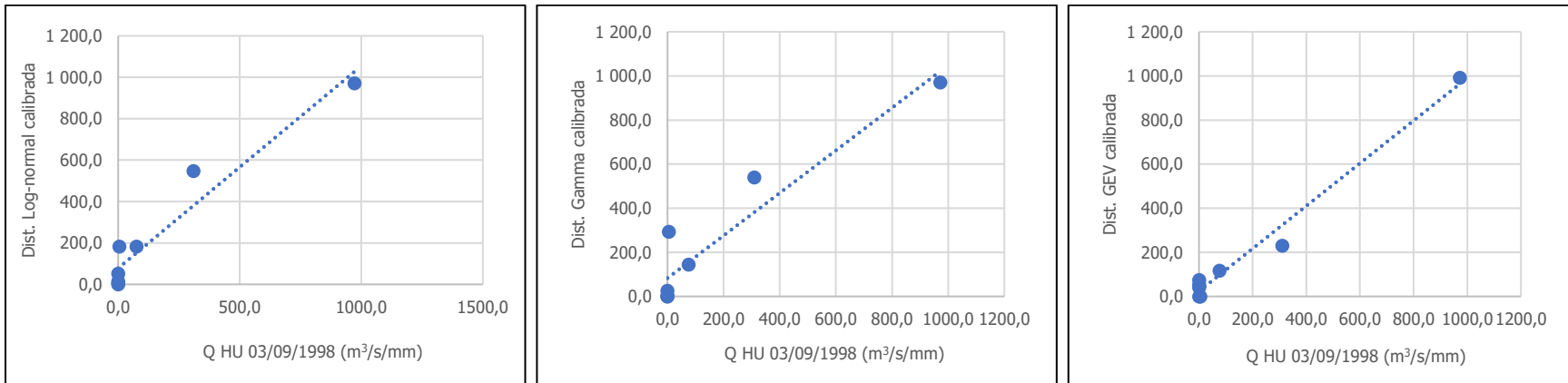


Figura 69. Correlaciones del HU 03/09/1998 (Cabagra 3112) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

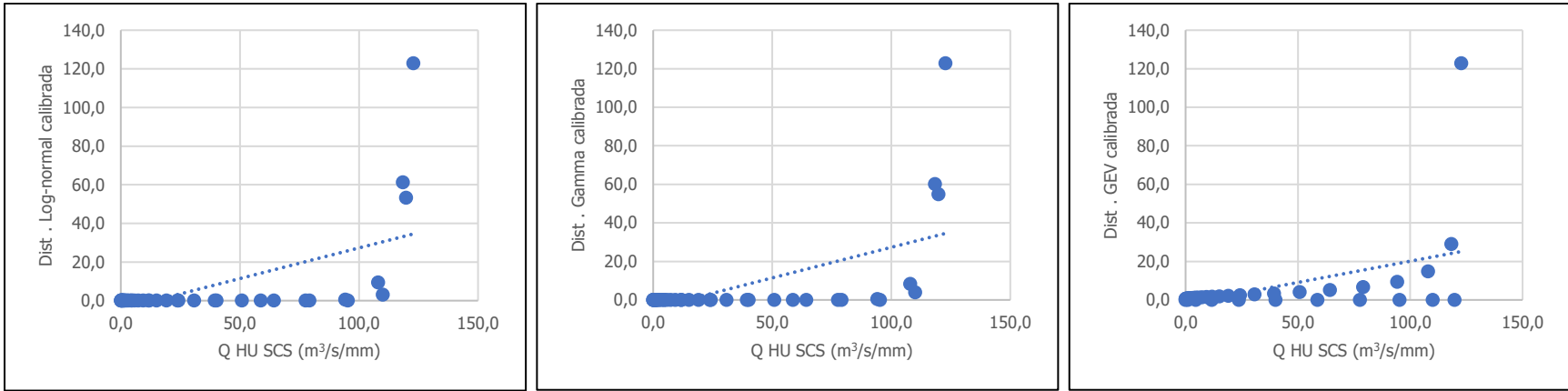


Figura 70. Correlaciones del HU SCS con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

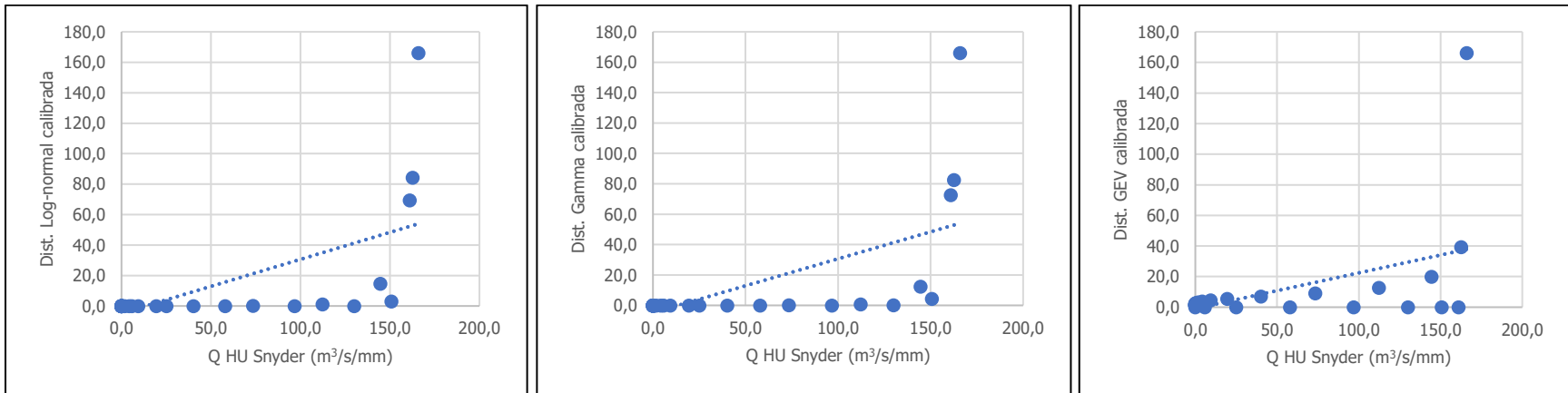


Figura 71. Correlaciones del HU Snyder con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el área de la cuenca

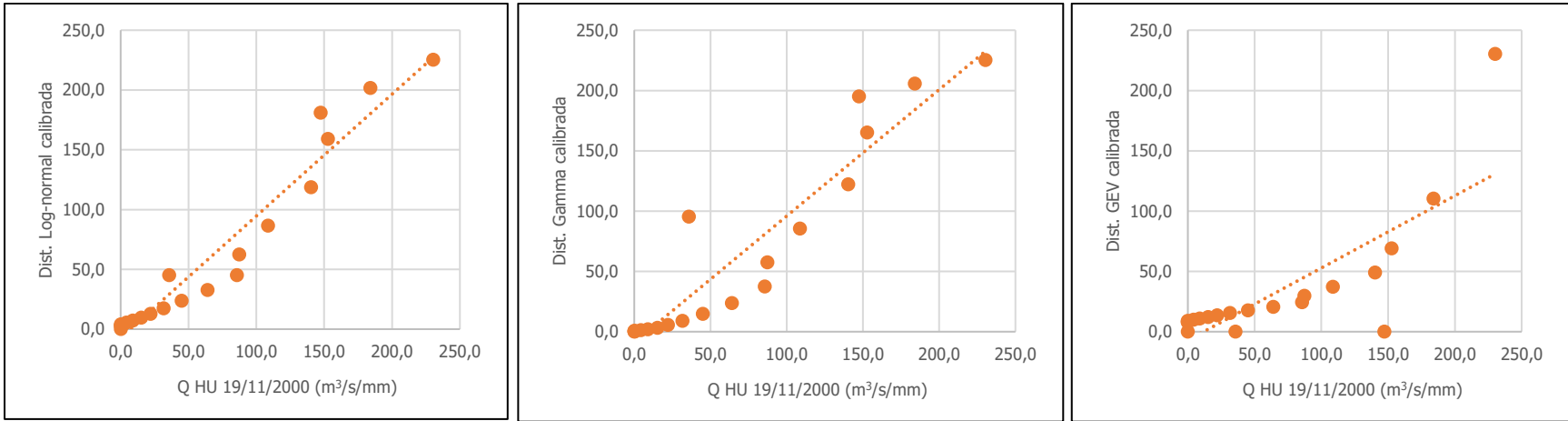


Figura 72. Correlaciones del HU 19/11/2000 (El Brujo 3103) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

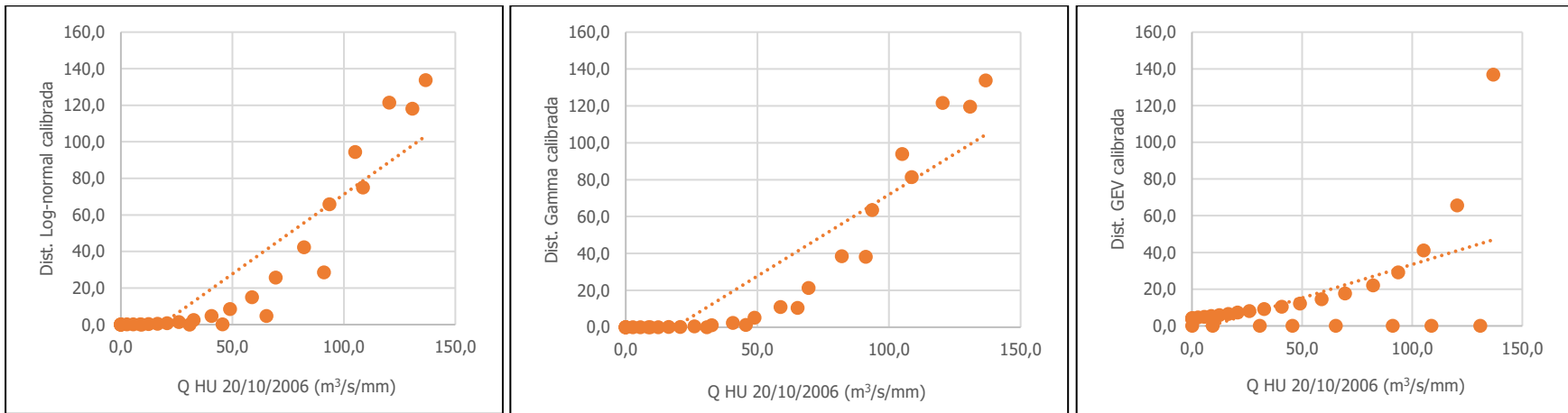


Figura 73. Correlaciones del HU 20/10/2006 (El Brujo 3103) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

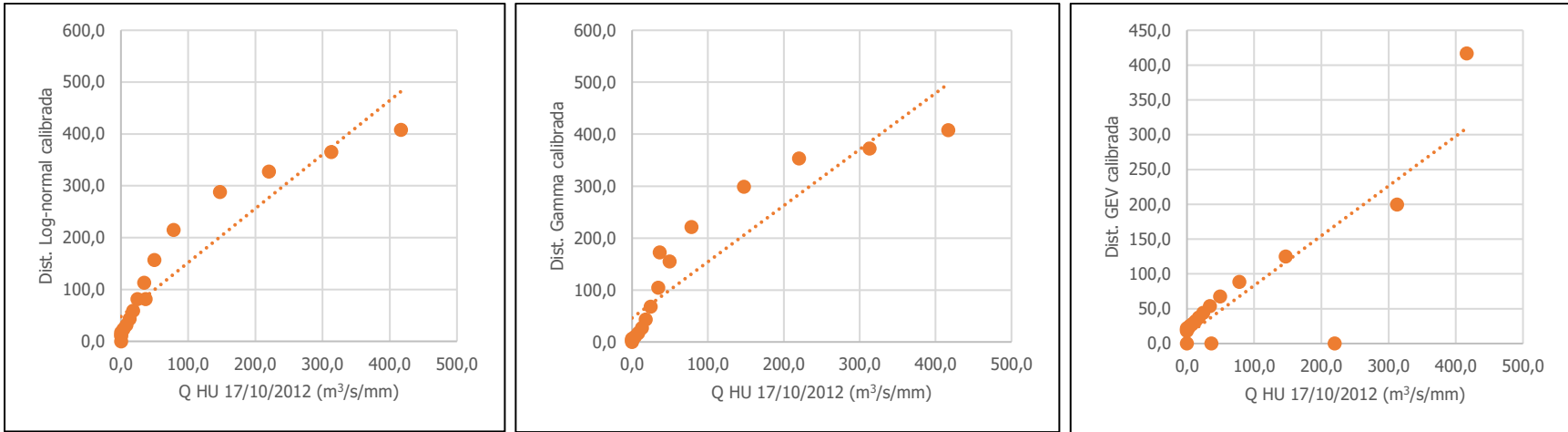


Figura 74. Correlaciones del HU 17/10/2012 (El Remolino 3104) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

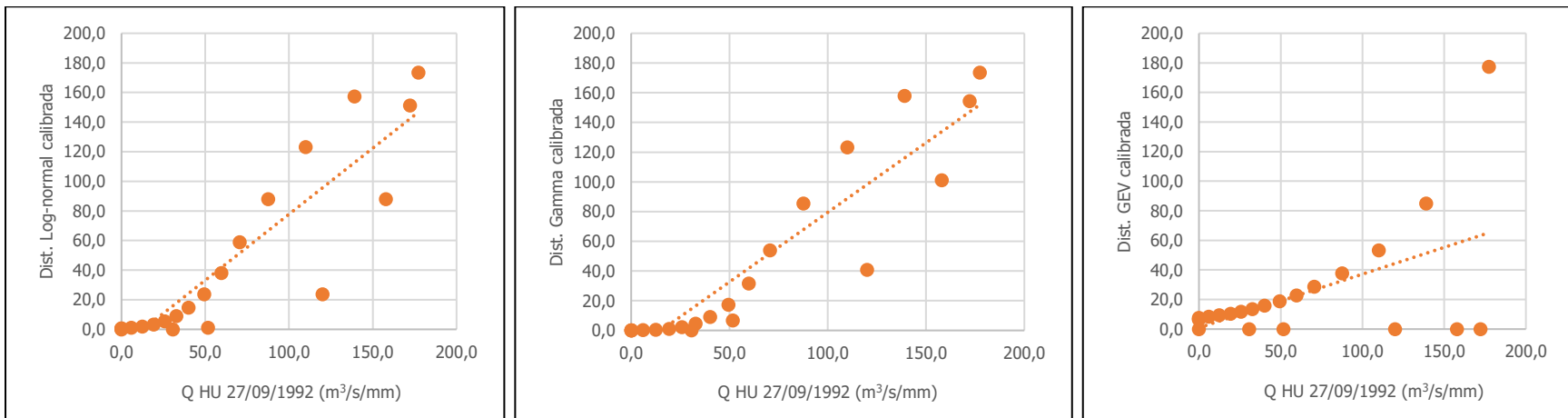


Figura 75. Correlaciones del HU 27/09/1992 (El Remolino 3104) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

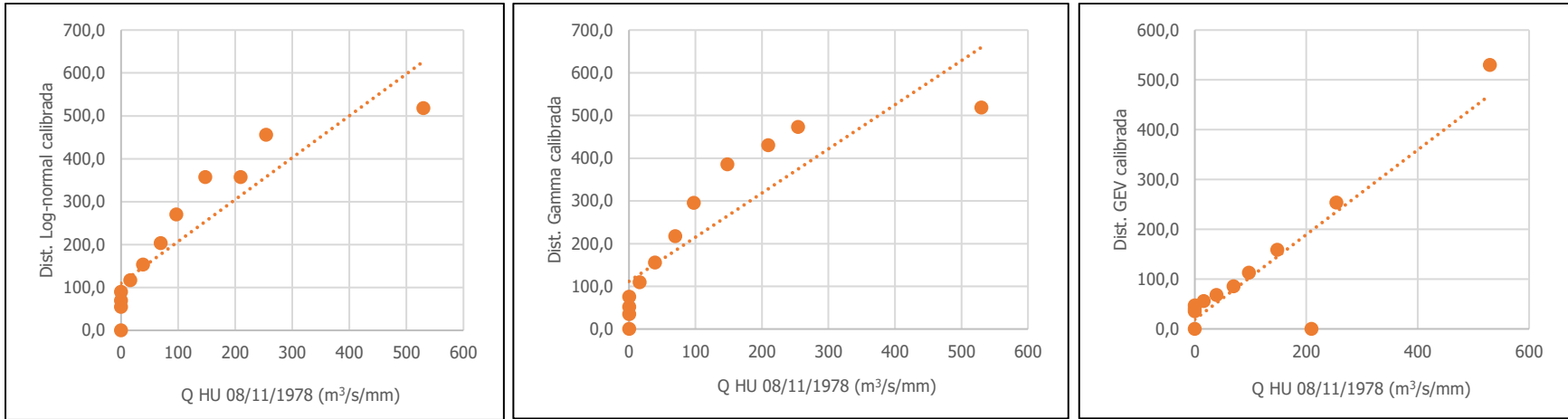


Figura 76. Correlaciones del HU 08/11/1978 (Las Juntas 3105) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

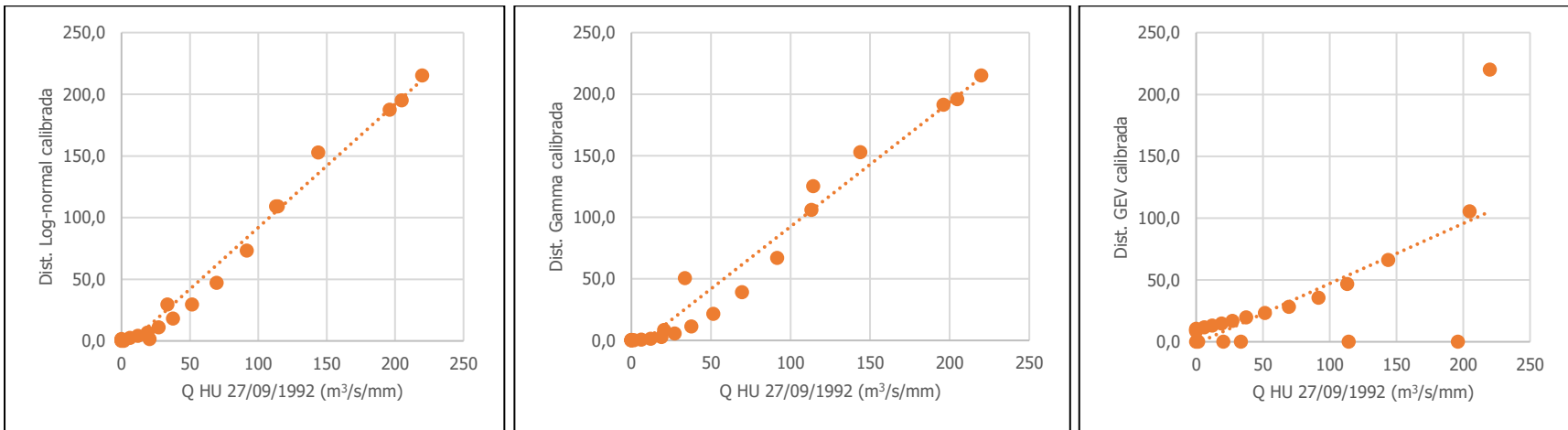


Figura 77. Correlaciones del HU 27/09/1992 (Las Juntas 3105) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

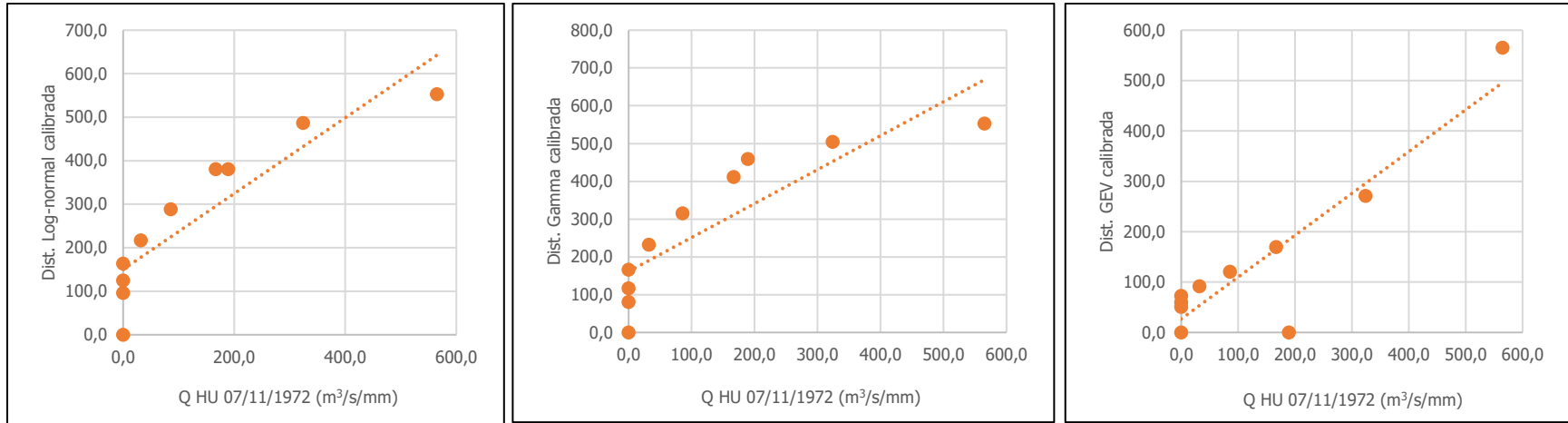


Figura 78. Correlaciones del HU 07/11/1972 (Caracucho 3107) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

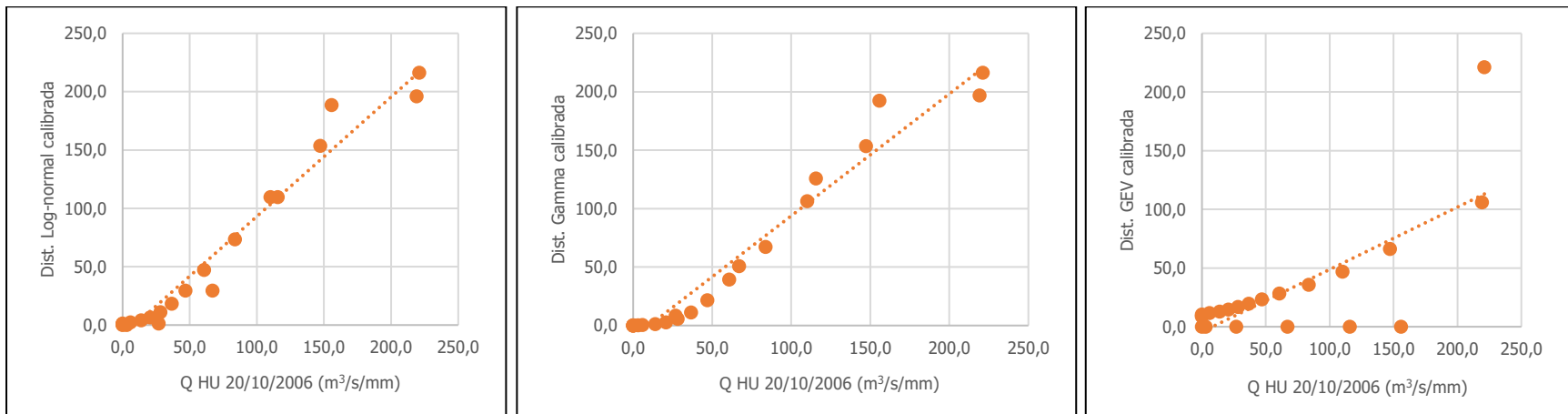


Figura 79. Correlaciones del HU 20/10/2006 (Caracucho 3107) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

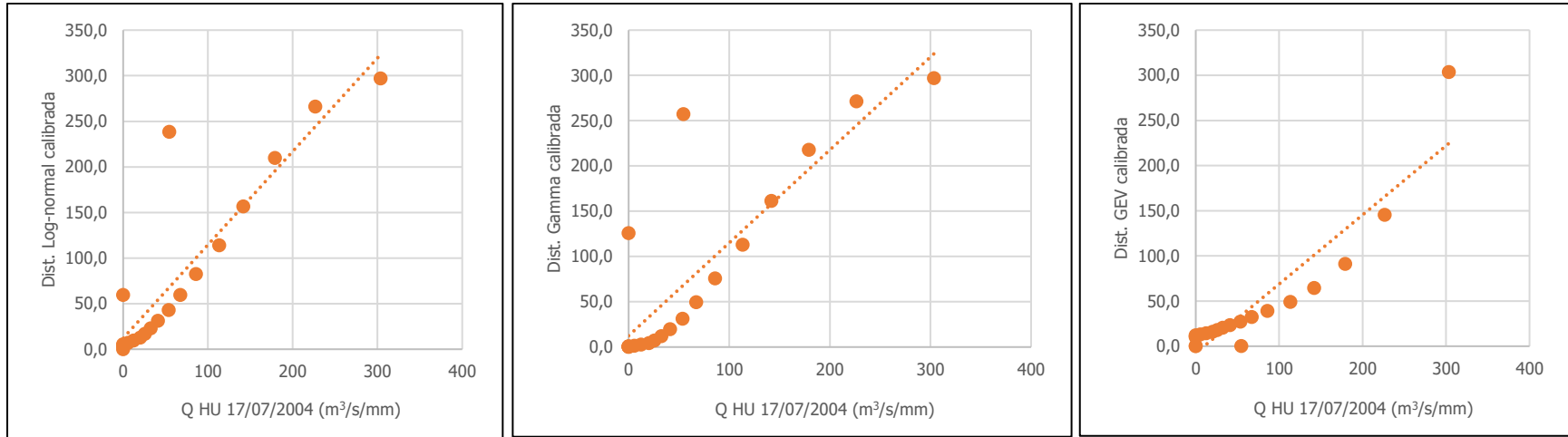


Figura 80. Correlaciones del HU 17/07/2004 (Cabagra 3112) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

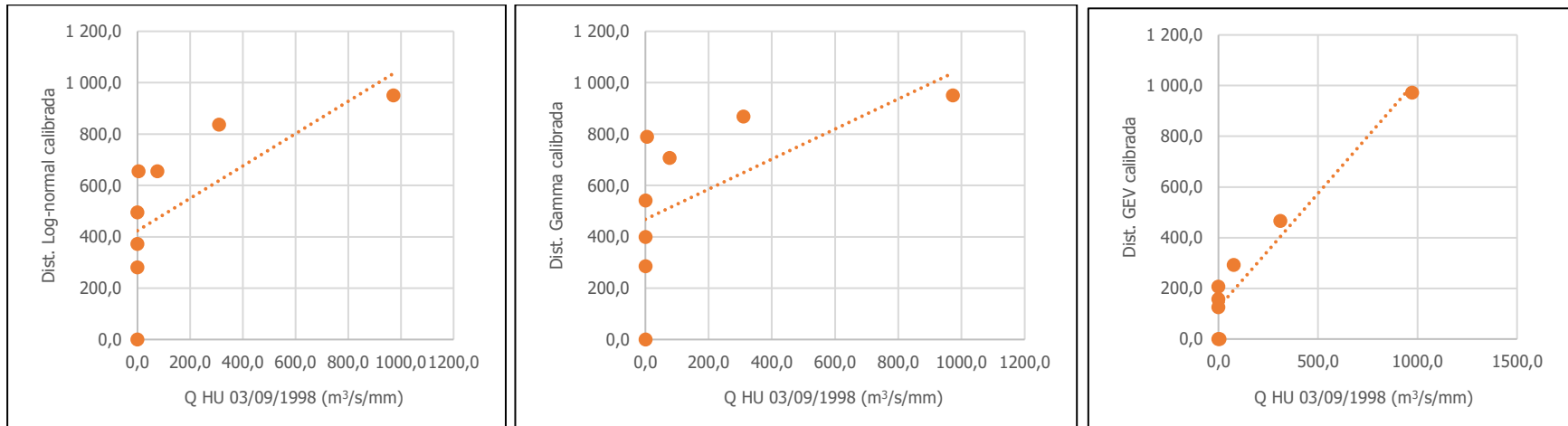


Figura 81. Correlaciones del HU 03/09/1998 (Cabagra 3112) con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

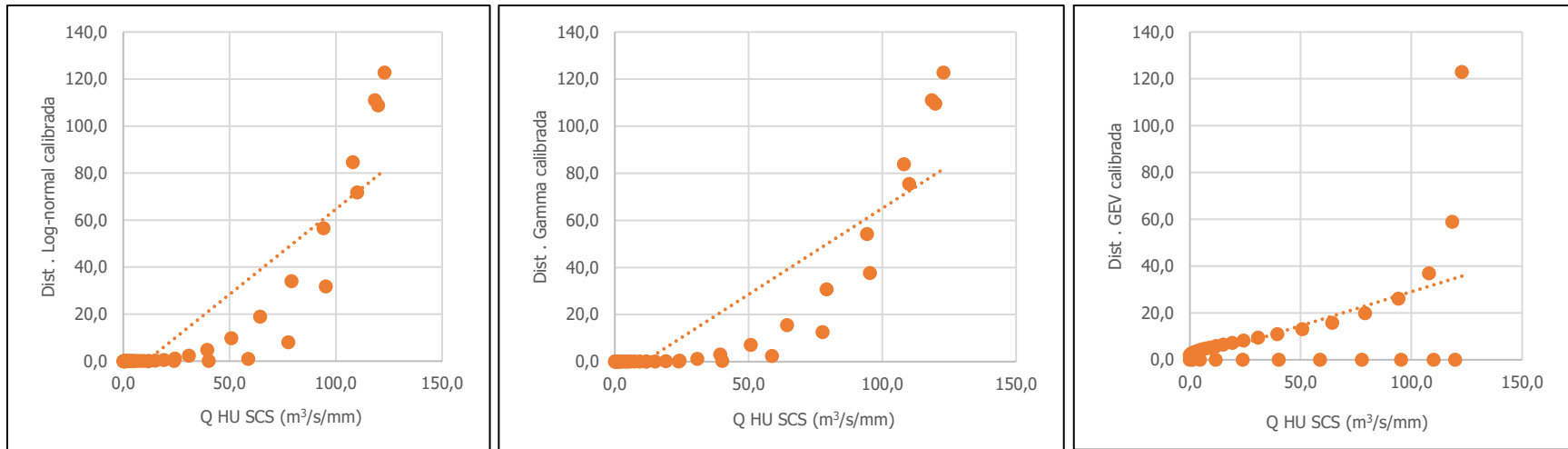


Figura 82. Correlaciones del HU SCS con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

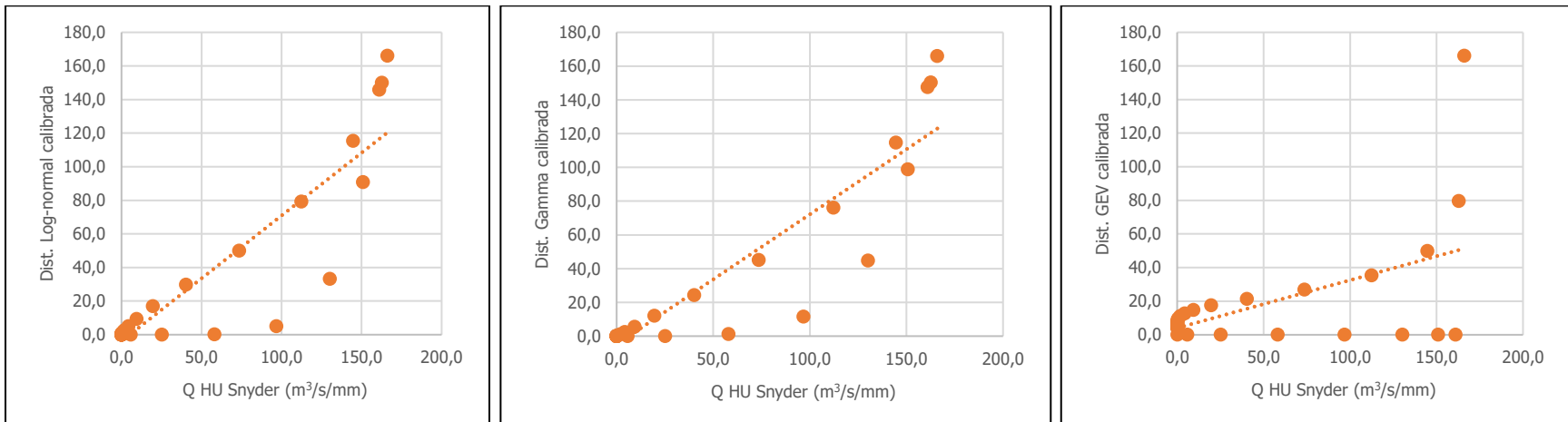


Figura 83. Correlaciones del HU Snyder con las funciones de Dist. Log-normal, gamma y GEV calibradas con el índice de Gravelius

A continuación, en el Cuadro 35 y el Cuadro 36, se muestran a detalle los respectivos resúmenes de los valores obtenidos en cada prueba de validación realizada para cada caso de calibración. Se decidió clasificar la condición del ajuste según lo presentado en Cuadro 34, el cual muestra los respectivos rangos para los cuales los modelos se ajustaron a las pruebas de validación según sea buena, media y mala la condición de ajuste. Esta clasificación se realizó considerando que entre más cercano a cero sea el valor de las validaciones en pruebas de RMSE y MAE mejor ajuste tendrá el modelo y el tipo de relaciones de CC mostrada en el Cuadro 2.

Cuadro 34. simbología de la condición de ajuste para las pruebas de validación realizadas

Condición de ajuste	RMSE	MAE	CC
Buena	0-35	0-35	1,00-0,96
Media	36-50	36-50	0,95-0,85
Mala	50 \geq	50 \geq	0,84 \geq

Cuadro 35. Resumen de pruebas de validación con la respectiva clasificación de la condición de ajuste (calibraciones empleando el área de la cuenca)

Estación	HU	RMSE			MAE			CC		
		Log-normal	Gamma	GEV	Log-normal	Gamma	GEV	Log-normal	Gamma	GEV
El Brujo (3103)	19/11/2000	61,95	62,42	69,95	44,69	44,65	49,24	0,78	0,78	0,68
	20/10/2006	51,41	51,39	55,21	38,71	38,71	40,47	0,63	0,63	0,50
El Remolino (3104)	17/10/2012	44,35	44,32	79,89	30,27	30,17	41,61	0,96	0,96	0,81
	27/9/1992	62,37	62,20	69,63	45,50	45,50	48,83	0,68	0,68	0,51
Las Juntas (3105)	8/11/1978	47,01	42,81	78,08	32,16	30,35	48,76	0,97	0,97	0,90
	27/9/1992	61,61	61,63	73,41	43,54	43,54	48,04	0,79	0,79	0,61
Caracucho (3107)	7/11/1972	37,80	36,19	92,06	23,25	21,23	59,05	0,99	0,99	0,89
	20/10/2006	60,34	60,59	70,76	43,42	43,42	47,95	0,80	0,79	0,64
Cabagra (3112)	17/7/2004	59,85	62,64	64,78	40,97	43,06	43,23	0,83	0,80	0,80
	3/9/1998	113,06	133,15	47,97	74,16	77,40	39,13	0,96	0,94	0,99
-	SCS	42,92	42,92	45,64	27,13	27,12	27,94	0,58	0,58	0,47
-	Snyder	25,87	25,64	41,23	34,14	34,14	36,62	0,63	0,63	0,47

Cuadro 36. Resumen de pruebas de validación con la respectiva clasificación de la condición de ajuste (calibraciones empleando el índice de Gravelius)

Estación	HU	RMSE			MAE			CC		
		Log-normal	Gamma	GEV	Log-normal	Gamma	GEV	Log-normal	Gamma	GEV
El Brujo (3103)	19/11/2000	18,18	26,52	54,35	13,77	19,92	37,64	0,97	0,94	0,79
	20/10/2006	29,09	28,83	49,16	22,20	22,21	34,90	0,90	0,91	0,58
El Remolino (3104)	17/10/2012	68,49	77,46	62,77	52,19	53,83	35,16	0,94	0,92	0,86
	27/9/1992	31,56	28,80	62,77	21,16	21,06	40,70	0,90	0,93	0,54
Las Juntas (3105)	8/11/1978	126,93	143,37	65,88	108,82	117,37	37,13	0,91	0,88	0,90
	27/9/1992	11,76	15,14	61,65	9,14	11,53	38,23	0,99	0,98	0,70
Caracucho (3107)	7/11/1972	153,49	174,84	74,02	135,13	150,02	52,26	0,90	0,86	0,91
	20/10/2006	15,84	16,38	58,09	11,71	12,78	38,04	0,98	0,98	0,74
Cabagra (3112)	17/7/2004	45,13	56,26	40,29	20,49	29,00	27,87	0,89	0,84	0,92
	3/9/1998	433,08	482,38	138,72	365,96	402,83	108,21	0,69	0,62	0,96
-	SCS	25,87	25,64	41,23	16,95	16,95	24,56	0,88	0,88	0,57
-	Snyder	30,79	28,75	33,09	15,57	15,36	33,04	0,90	0,92	0,54

Como se indicó anteriormente, a nivel general evaluando las tres pruebas de validación es posible identificar que las funciones de distribución log-normal y gamma se ajustan mejor al comportamiento de los HU.

Si bien el Cuadro 36 presenta una gran cantidad de valores de CC en condición media, cabe resaltar que la mayoría de estos valores son superiores a 0,90, acercándose a correlaciones en condición buena.

Adicionalmente, se puede identificar que los modelos que presentaron mejor ajuste corresponden con aquellos que el t_p fue mayor. Esto se denota principalmente en los HU sintéticos cuyos valores de t_p fueron de los valores más altos de los HU analizados.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el siguiente apartado, se dispone a presentar las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas en función de los resultados e interpretación de datos abarcados anteriormente.

5.1 Conclusiones

- Como principal conclusión se determinó que para esta investigación si fue posible calibrar funciones de distribuciones probabilísticas que simulen el comportamiento de hidrogramas unitarios. Si bien no todos los modelos generados presentaron un ajuste al comportamiento de los HU reales y sintéticos, se obtuvieron modelos que con una correlación casi perfecta. Asimismo, se destaca que las funciones de distribución que presentaron un mejor ajuste al comportamiento de los HU, fueron log-normal y gamma, mientras que GEV fue la que más se alejó del ajuste buscado.
- Fue posible caracterizar a detalle la cuenca del río Grande de Térraba. De la cual se obtuvieron parámetros como el área de la cuenca, y el índice de Gravelius, que posteriormente fueron empleados en las calibraciones de las funciones de distribución. Con base en los resúmenes de resultados presentados en el Cuadro 35 y en el Cuadro 36, se determinó para esta investigación, que las funciones que fueron calibradas considerando el índice de Gravelius presentaron un mejor ajuste que las funciones que se calibraron con el área de cuenca, lo cual pudiese implicar que el uso de parámetros de valores bajos para la calibración de funciones de distribución es más adecuado que los parámetros con valores altos.
- Asimismo, se identificó que para esta investigación los modelos que presentaron un mejor ajuste con el comportamiento de los HU, fueron aquellos donde el t_p presentaba valores más altos según el Cuadro 17. Esto se denota principalmente en los HU sintéticos que presentaron los valores de t_p más altos y se ajustaron medianamente bien a los HU.
- Con base en las salidas gráficas presentadas en desde la Figura 36 hasta la Figura 59, se determinó que la forma del HU real debe ser unimodal, y lo más suavizada con una rama de recesión monótonamente decreciente para que la función de distribución calibrada pueda ser empleada para simular el comportamiento de los HU de manera adecuada. Ya que, dado a las características propias de las formas de las funciones de distribución probabilísticas, el trazo no podría describir formas irregulares.

- Finalmente, a través de la calibración de las funciones de distribución de densidad log-normal, gamma y GEV, para la derivación de hidrogramas unitarios, fue posible generar un procedimiento general para su aplicación en otras cuencas del país. Este, se pone a disposición como uno de los resultados de la investigación y puede ser empleado como guía para futuras investigaciones.

5.2 Recomendaciones

- La presente investigación empleó como base la calibración de tres funciones de densidad de probabilidad para la simulación de hidrogramas unitarios (log-normal, gamma y GEV). Con base a esta premisa, se recomienda evaluar otras funciones de distribución de densidad como la Beta, Fréchet y Weibull, que han aproximado adecuadamente en modelos de investigaciones internacionales tales como los realizados por (Nadarajah, 2007) y (Sarkar, Goel, & Mathur, 2010). Esto con el fin de ampliar la investigación de derivación de hidrogramas unitarios a partir de modelos de probabilidad en Costa Rica.
- Las funciones de distribución de densidad utilizadas en la presente investigación emplean de dos a tres parámetros para su forma. Considerando que las validaciones realizadas, las cuales indican que las funciones de distribución calibradas log-normal y gamma (de dos parámetros), son más precisas que la de función GEV (de tres parámetros), se recomienda que en cuencas de características similares a la del río Grande de Térraba se estudie el comportamiento de funciones de distribución de densidad con dos y tres parámetros, con el fin de conocer si existe una mejor relación entre los HU con la cantidad de parámetros de las funciones de distribución.
- En presente estudio se obtuvieron HU a partir de las metodologías de SCS y Snyder, sin embargo, se recomienda explorar otro tipo de metodologías de derivación de HU sintéticos como la de Nash, para posteriores evaluaciones.
- Se recomienda que los parámetros característicos a emplear en la calibración de las respectivas funciones de distribución probabilística sean aquellos que consideren valores bajos. Dado que los modelos calibrados con el índice de Gravelius se ajustaron mejor a los HU que los que fueron calibrados considerando el área de la cuenca.
- Se recomienda emplear programas matemáticos como MAPLE y/o MATLAB para la obtención de los parámetros que definen la forma de las funciones de distribución de densidad, ya que facilitan los cálculos y dan resultados precisos. Además de que cuentan con una basta cantidad

de códigos asociados a las funciones de distribución de densidad, lo que hace que la obtención de los parámetros sea más práctica.

- Finalmente, se recomienda evaluar las funciones de distribución empleadas en la presente investigación en cuencas con características tanto similares, como muy diferentes. Esto, con el objetivo de ampliar la información del estudio de funciones de distribuciones probabilísticas como hidrogramas unitarios.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ArGis. (2021). *Distribuciones para la asignación de valores aleatorios*. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/data-management/distributions-for-assigning-random-values.htm>
- Benites, L. (5 de enero de 2023). *Statologos*. Obtenido de Distribución Lognormal: Definición, Ejemplos: <https://statologos.com/distribucion-logaritmica-normal/>
- Bhunya, Bhunya, P., Mishra, S., & Berndtsson, R. (2007). Suitability of Gamma, Chi-square, Weibull and Beta distributions as synthetic unit hydrographs. *Journal of Hydrology*, 334(1-2), 28-38. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.022
- Bhunya, P., Berndtsson, R., Singh, P., & Hubert, P. (2008). Comparison between Weibull and gamma distributions to derive synthetic unit hydrograph using Horton ratios. *Water Resources Research*, 44(4). doi:10.1029 / 2007WR006031
- Bhunya, P., Mishra, S., & Berndtsson, R. (2003). Simplified two-parameter gamma distribution for derivation of synthetic unit hydrograph. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(4), 226-230. doi:10.1061 / (ASCE) 1084-0699 (2003) 8: 4 (226)
- Elizondo, G. (2016). *Análisis de la vulnerabilidad a la socavación del puente sobre el río Blando en la Ruta Nacional No.32*. (Tesis de grado), Universidad de Costa Rica, San José.
- Ghorbani, M., Singh, V., Sivakumar, B., Kashani, M., Atre, A., & Asadi, H. (2017). Probability distribution functions for unit hydrographs with optimization using genetic algorithm. *Appl Water Sci*, 66-676. doi:10.1007/s13201-015-0278-y
- Goñi, M., Gimena, F., & López, J. (2013). Tres hidrogramas unitarios basados en la función de distribución beta: un enfoque novedoso. *Revista de Ciencias Hidrológicas*, 58(1), 1-12.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. (2010). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Lux Cardona, B. (2016). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*. Ciudad Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Montealegre, A. (2015). *Estudio hidrológico e hidráulico de las inundaciones del Valle de Coris, Cartago*. (Tesis de grado), Universidad de Costa Rica, San José.

- Nadarajah, S. (2007). Probability models for unit hydrograph derivation. *Journal of Hydrology*, 185-189.
- Pinheiro, M., & Grotjahn, R. (2015). *An Introduction to Extreme Value Statistics*. Perugia.
- Porras, J. P. (2021). *Apuntes del curso: IC-0808 Hidrología*. San José: Universidad de Costa Rica.
- R Development Core Team. (2000). *Introducción a R*. R Project.
- Rojas, N. (2011). *Estudio de las cuencas hidrográficas de Costa Rica*. San José: Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica.
- Sánchez, J. (2004). *Notas de curso: Hidrología*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Sarkar, S., Goel, N. K., & Mathur, B. S. (2010). Performance Investigation of Nakagami-m Distribution to Derive Flood Hydrograph by Genetic Algorithm Optimization Approach. *Hydrologic Engineering*, 658-666.
- Sorooshian, S., & Dracup, J. (1993). Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: Correlated and Heteroscedastic error cases. *Water Resources Research*, 29(4).
- Tamborero del Pino, J., & Cejalvo Lapeña, A. (2004). *Fiabilidad: la distribución lognormal*. Sevilla: Centro Nacional de Condiciones de Trabajo.
- Villegas, P. (18 de agosto de 2014). *Tiempo de concentración de la cuenca*. Obtenido de Agua y SIG: <https://aguaysig.com/tiempo-de-concentracion-de-la-cuenca/>
- Villón, M. (2004). *Hidrología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Villón, M. (2006). *Hidrología Estadística*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- VOSE. (2017). *Distribución generalizada de valores extremos*. Obtenido de <https://www.vosesoftware.com/riskwiki/Generalizedextremevaluedistribution.php>
- Yue, S., Ouarda, T., Bobée, B., Legendre, P., & Bruneau, P. (2002). Approach for Describing Statistical Properties of Flood Hydrograph. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(2), 147-153. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:2(147)

Zúñiga, C. (2020). *Aplicación de la metodología del Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico en la Cuenca del Río Pejibaye*. (Tesis de grado), Universidad de Costa Rica, San José.