



Respuesta hidrológica de la cuenca hidrográfica del río Briseño ante eventos pluviométricos extremos máximos

Briseño's basin hydrological response to maximum extreme rainfall events

Resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Briseño a eventos pluviométricos extremos máximos

Alex Briones-Chonillo^I

abriones7084@pucesm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8990-6268>

Eric Cabrera-Estupiñán^{II}

eric.cabrera@uleam.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-1266-2947>

Correspondencia: abriones7084@pucesm.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

***Recibido:** 07 de enero de 2022 ***Aceptado:** 31 de enero de 2022 * **Publicado:** 14 de febrero de 2022

- I. Ingeniero Civil, Magister en Administración Pública, Mención Desarrollo Institucional, Constructor y Consultor de Obras Civiles, Libre Ejercicio, Maestrante de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Manabí, Ecuador.
- II. Ingeniero Hidráulico, Magister en Ingeniería Hidráulica, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador.

Resumen

Este artículo se desarrolla en la Cuenca Briseño ubicada en la provincia de Manabí, Ecuador. Aquí se presenta la obtención de las curvas IFD de la estación M0163 partiendo del relleno de su serie de datos de lluvias máximas en 24 horas con el paquete Climatol de R. Se obtiene un mapa de CN de toda la cuenca y se crea un modelo hidrológico en HEC-HMS pudiéndose obtener los hidrogramas de crecidas para varios períodos de retorno. Se presenta el ejemplo para $T=100$ años y se obtiene un gráfico y ecuaciones de ajuste que permiten obtener el caudal pico para cualquiera de los cierres principales de la cuenca a partir del período de retorno de una lluvia.

Palabras claves: HEC-HMS; Climatol; Briseño; Demarcación hidrográfica de Manabí; eventos extremos

Abstract

This paper takes place in the Briseño Basin located in the province of Manabí, Ecuador. The IFD curves of station M0163 is presented starting from the filling of its data series of maximum rainfall in 24 hours with the R package called Climatol. A CN map of the entire basin is obtained, and a hydrological model is created in HEC-HMS, flood hydrographs for various return periods also was obtained. The example is presented for $T=100$ years and a graph and adjustment equations are obtained for compute the peak flow in any of the main sinks of the basin from the return period.

Keywords: HEC-HMS; Climatol; Briseño; Manabí basin district; extreme events

Resumo

Este artigo é desenvolvido na Bacia de Briseño localizada na província de Manabí, Equador. Aqui apresentamos a obtenção das curvas IFD da estação M0163 a partir do preenchimento de sua série de dados de precipitação máxima em 24 horas com o pacote Climatol de R. Obtém-se um mapa NC de toda a bacia e cria-se um modelo hidrológico. em HEC-HMS podendo obter os hidrogramas de cheias para vários períodos de retorno. O exemplo é apresentado para $T=100$ anos e obtém-se um gráfico e equações de ajuste que permitem obter o pico de vazão para qualquer um dos principais fechamentos da bacia a partir do período de retorno de uma chuva.

Palavras-chave: HEC-HMS; climatol; Brisenos; Demarcação hidrográfica de Manabí; eventos extremos

Introducción

Acorde con Wahistrom & Guha-Sapir (2015) los desastres relacionados con el clima son cada vez más frecuentes, predominando los producidos por inundaciones y tormentas. Las inundaciones por sí solas representan el 47% de todos los desastres vinculados al clima según datos recopilados en el período (1995-2015). Son varias las causas que provocan estas inundaciones, una de las más importantes tiene que ver con las intensas lluvias que son producidas en una época determinada del año y que llegan a ser particularmente severas cuando son provocadas por fenómenos climáticos como huracanes y El niño – Oscilación del Sur, ENOS. En especial este último fenómeno afecta de forma importante a países latinoamericanos que tienen sus costas hacia el océano Pacífico. En este caso se encuentra Ecuador que tiene varias provincias con costas hacia el Pacífico y que en gran medida su desarrollo económico y social depende de esta característica (Engelbertz, et al., 2015; Choez, Ríos, & Del Valle, 2019), ver figura 1 a) y b).

Una de estas provincias es Manabí que se encuentra ubicada al occidente del país en la llamada región Litoral o Costa, limitando al oeste con el océano Pacífico y con una superficie de 19427 km² siendo la cuarta provincia por extensión de las veinticuatro del país, ver figura 1 b) y c).

Desde el punto de vista hidrológico una gran parte de toda la provincia constituye la llamada Demarcación hidrográfica de Manabí compuesta por seis cuencas (MA-01 hasta la MA-06) que tienen la peculiaridad de que todos sus sistemas fluviales son de corto recorrido y desembocan en el océano Pacífico, ver figura 1 c) y es la única provincia del país que no recibe contribución hídrica natural proveniente del deshielo de la cordillera de los Andes (Campos, Zambrano, Castro, Sinichenko, & Gritsuk, 2019). Esto último unido a la ocurrencia de intensas lluvias producto al efecto directo de El Niño y una topografía muy llana en las zonas bajas ha propiciado que en varias de estas cuencas se hayan producido grandes inundaciones provocando importantes desastres con un elevado impacto económico y social fundamentalmente en el sector agrícola y urbano. Un ejemplo de esto se constata en la ciudad de Chone, perteneciente a la cuenca MA-03 la que acorde con Gil, Varela, & Mardones (2005) alcanzó gran notoriedad en el país producto a la ocurrencia de alrededor de 200 inundaciones en los últimos 35 años, realidad que en la actualidad ha cambiado en alguna medida producto a la inclusión de obras encaminadas a la mitigación del impacto de las grandes avenidas producidas por intensas lluvias.

Otra de las cuencas importantes de la demarcación hidrográfica de Manabí y que es objeto de estudio de este trabajo es la MA-04 Briseño que se encuentra contigua a la cuenca de Chone y en

la que si bien no existe una ciudad o pueblo de grandes dimensiones, se puede decir que tiene un gran desarrollo desde el punto de vista agropecuario destacándose amplios campos que son empleados en la agricultura, y más hacia la costa han proliferado en los últimos años la construcción de grandes piscinas artificiales (camaroneras) destinadas a la cría y comercialización de camarón de agua dulce.

Estos objetos económicos unidos a otros problemas de tipo medioambiental y social pueden sufrir importantes pérdidas con la ocurrencia de intensas lluvias que pueden provocar grandes crecidas e inundaciones, fundamentalmente en las zonas bajas de la cuenca y la desembocadura del río en el mar, de aquí la importancia de contar con estudios hidrológicos actualizados de la cuenca hidrográfica incluido el sistema fluvial (Hurtado-Pidal, Triana, Espitia-Sarmiento, & Jarrín-Pérez, 2020). Sin lugar a duda estos estudios permitirán definir zonas de riesgo y proponer soluciones de diversas naturalezas para minimizar el impacto que las inundaciones puedan provocar e incluso para la futura implantación de obras de aprovechamiento hidráulico.

Para la elaboración de estos estudios a escala de cuenca hidrográfica la mejor herramienta que existe es sin lugar a duda la modelación matemática ya que estos modelos son capaces de concebir (de diversas maneras) todas las complejidades del ciclo hidrológico.

Por tal motivo el objetivo de este trabajo es obtener la respuesta hidrológica actualizada de la cuenca hidrográfica del río ante eventos pluviométricos extremos máximos.

Para cumplir con este propósito se emplea el programa HEC-HMS con el que se crea un modelo hidrológico de base determinística, semidistribuido espacialmente y régimen de flujo impermanente de eventos (Aguilar & Martín, 2016). El resultado principal de su aplicación es la obtención de los hidrogramas en los cierres de las subcuencas, para lluvias intensas de diferentes períodos de retorno, todo esto con los datos más actualizados que se pudo recopilar.

Materiales y métodos

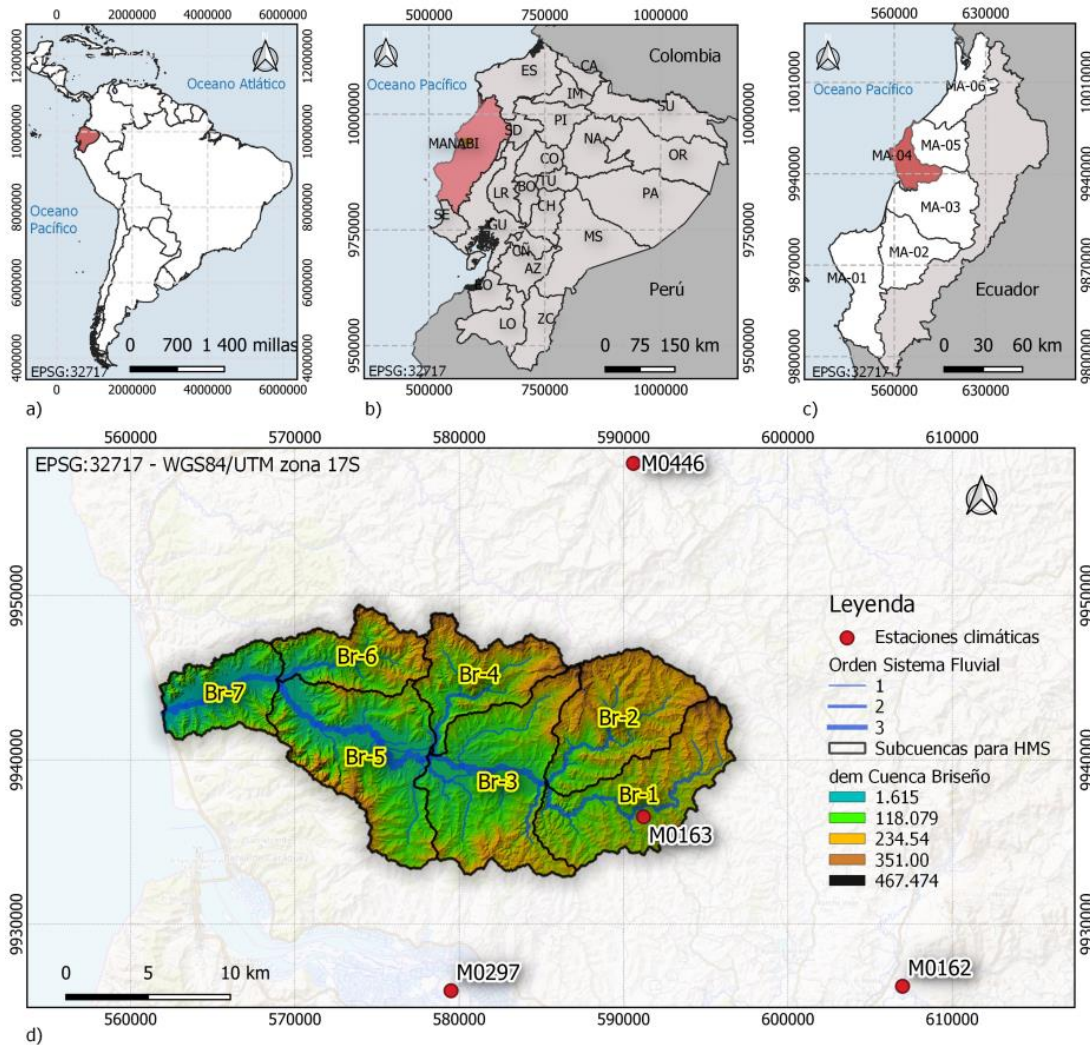
La cuenca de estudio se denomina Briseño y pertenece a la cuenca MA-04 de la demarcación hidrográfica de Manabí. Como puede apreciarse en el mapa de la figura 1 c) se encuentra ubicada en la zona centro-norte de la provincia de Manabí y sus aguas drenan al mar Pacífico Ecuatoriano continental.

Determinación de subcuencas y red de drenaje para el modelo HMS.

Para la obtención de subcuencas y sus sistemas fluviales e incluso para una gran parte de los parámetros morfométricos de las subcuencas y cuencas se empleó el modelo de elevación digital del terreno dem del proyecto SIGTIERRAS con tamaño de cuadrículas de 4m, equivalente a una escala de 1:4000, que es muy buena para este tipo de estudios hidrológicos (Mancero et al., 2015) y todo el trabajo espacial se realizó en el SIG QGIS en su versión estable a largo plazo LTR (siglas en inglés) 3.16, que en la actualidad es SIG libre más usado a nivel profesional, sobre todo en aplicaciones hidrológicas, (Kwast & Kurt, 2020).

Los geoprosesos asociados a la obtención de las subcuencas y sistema fluvial fueron realizados fundamentalmente con funciones del SIG Grass que se encuentran en QGIS destacándose: 1- *r.carve*: Con esta función se modifica el dem de partida disminuyendo 0.5 m la cota en los pixeles que intersectan con un tema de líneas que fue obtenido por medio de vectorización y que representa los ríos y meandros principales del sistema fluvial, este nuevo dem garantiza que en el proceso de creación del sistema fluvial, los ríos transcurran exactamente por donde lo hacen en la realidad, eliminando con esto errores de trazado y conexión del modelo que suelen ocurrir generalmente en las zonas de topografía llana en la cuenca por imprecisiones en la obtención del dem. 2- *r.fill*: Se rellenan las zonas de depresiones en las que pueda quedar estancada el agua, para garantizar el recorrido de los ríos sin interrupciones. 3. *r.watershed*: Esta es sin dudas la principal función, con ella se obtienen las subcuencas y el sistema de drenaje, en este caso se empleó el criterio de un valor mínimo de acumulación de flujo para la creación de los ríos. 4. *r.water.outlet*: Con esta función se introduce el cierre de la cuenca y se obtiene toda la cuenca de estudio, posteriormente con funciones de selección, cambio de formato ráster a vectorial y unión de polígonos y líneas se pueden obtener los polígonos que representan las subcuencas, en este caso son 7, Br-1, Br-2, Br-3, Br-4, Br-5, Br-6, Br-7, así como las líneas que representan a los ríos del sistema fluvial, al que posteriormente se le definió su orden de Strahler, todo esto puede observarse en el mapa d) de la figura 1.

Figura 1: Ubicación espacial de la zona de estudio. Subcuencas y sistema fluvial de la cuenca Briseño y estaciones climáticas circundantes. *Fuente:* Elaboración propia.



Análisis morfométrico de subcuencas y red de drenaje.

Con la información espacial y de atributos obtenida para cada subcuenca se pudo calcular sus parámetros morfométricos principales para su posterior caracterización, ver la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros morfométricos principales de las subcuencas.

Nro	Cuenca y subcuencas	A (km ²)	Lcp (m)	P (km)	Lc (km)	Cmáxc (m)	Cmínc (m)	Cmáxc _p (m)	Cmínc _p (m)
1	Briseño	352.41	77.397	145	34.156	481.245	1.3149	217.5	1.6149
2	Br-1	57.684	26.725	57.001	11.372	481.245	74.261	217.5	74.261
3	Br-2	51.941	15.005	43.997	11.157	450.296	72.681	198.743	72.681
4	Br-3	73.018	14.607	67.829	7.258	456.88	43.1215	72.676	43.12
5	Br-4	36.218	12.635	48.271	10.069	456.9	44.597	169.05	44.597
6	Br-5	71.363	25.336	61.724	10.486	434.9	11.299	43.12	11.299
7	Br-6	31.675	10.032	42.526	9.232	412.34	11.304	133.99	11.304
8	Br-7	30.514	10.729	38.725	7.257	274.49	1.615	11.3	1.615

continuación

Nro	Cuenca y subcuencas	R _f	K _c	C _c	H (m)	h _{cp} (m)	S _{mp}	t _c (min)	t _{lag} (min)
1	Briseño	0.30	2.16	0.21	479.63	215.9	0.0017	706.3	423.77
2	Br-1	0.446	2.10	0.223	406.98	143.2	0.0045	207.7	124.60
3	Br-2	0.417	1.71	0.337	377.62	126.2	0.0075	167.8	100.69
4	Br-3	1.386	2.22	0.199	413.76	29.55	0.0019	205.1	123.06
5	Br-4	0.357	2.25	0.195	412.30	124.5	0.0098	150	90.01
6	Br-5	0.649	2.05	0.235	423.61	31.82	0.0012	320.2	192.11
7	Br-6	0.372	2.12	0.220	401.04	122.7	0.0096	131.9	79.16
8	Br-7	0.579	1.96	0.256	272.87	9.685	0.0007	298.4	179.02

Fuente: Elaboración propia.

Donde: A (km²) Es el área de la cuenca. L_{cp} (km) Es la longitud del cauce principal. P (km) Es el perímetro de la cuenca. L_c (km) Es la longitud axial de la cuenca. $C_{máxc}$ (m) Es la cota máxima de la cuenca. $C_{mínc}$ (m) Es la cota mínima de la cuenca. $C_{máxc_p}$ (m) Es la cota máxima del cauce principal. $C_{mínc_p}$ (m) Es la cota mínima del cauce principal. R_f Es el factor de forma de Horton de la cuenca $R_f = \frac{A}{L_c^2}$. K_c Coeficiente de compacidad o de Gravelius $K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$. C_c Coeficiente de circularidad de Miller $C_c = 4\pi \frac{A}{P^2}$. H Desnivel máximo de la cuenca. Δh_{cp} (m) Densivel del cauce principal. S_{mp} Pendiente media ponderada del cauce principal. t_c (min) tiempo de concentración obtenido con la expresión de Kirpich $t_c = 3.989 \cdot L_c^{0.77} \cdot S_{mp}^{-0.385}$. t_{lag} (min) tiempo de retardo que se toma como un 60% del tiempo de concentración.

Análisis de lluvias máximas para el modelo hidrológico

Uno de los problemas que presenta esta zona centro – norte de la provincia de Manabí es la falta de datos hidroclimáticos. Para la cuenca de estudio no existen estaciones de hidrológicas con datos

de caudales en los ríos, por tal motivo se debió realizar un análisis de los datos pluviométricos que por demás son también muy escasos. En tal sentido dentro de la cuenca se tiene la estación M0163 y las vecinas más cercanas M0162, M0297 y M0446, todas pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI. El objetivo de esta sección es obtener las curvas de Intensidad – frecuencia -duración, (en lo adelante) IFD, así como yetogramas sintéticos para lluvias de cierta duración y período retorno.

En la tabla 2 y la figura 1 d) se brindan algunos datos importantes de las estaciones.

Tabla 2: Estaciones climáticas de la zona de estudio, ver figura 1 d)

Nro	Código	Nombre	Tipo	x	y	Cota
1	M0163	Boyacá	Secundaria	591216	9936532	370
2	M0162	Chone	Principal	606979	9926212	36
3	M0297	Simbocal	Secundaria	579499	9925940	0.00
4	M0446	San Isidro	Pluviométrica	590600	9958057	138

Fuente: Elaboración propia.

En (Campos & Sinichenko, 2017) se publican las series de precipitación máxima en 24 horas (lámina de precipitación del día que más llovió en cada mes) desde el año 1982 hasta el 2013. En esta referencia se puede constatar que las estaciones M0297 y la M0446 tienen muy pocos datos y tomando en consideración que se encuentran muy alejadas de la cuenca se decide no tenerlas en cuenta. Por otra parte, la estación M0163 a pesar de carecer de datos en varios años, su influencia es determinante en el estudio, más aún cuando se encuentra en la zona alta de la cuenca. Finalmente se tiene la estación M0162 que es una de las dos estaciones con mejor y mayor cantidad de datos climatológicos de la provincia, incluso cuenta con datos pluviográficos y sus propias curvas IFD (Guachamanin et al, 2015). Los datos de lluvia máxima en 24 horas de esta estación se emplean para rellenar los datos faltantes de la estación M0163, esto se realiza con el paquete Climatol de R con el que primeramente se homogeneizan las series (Guijarro, 2019). En la tabla 3 todas las celdas marcadas son valores obtenidos del proceso de relleno y en la última columna se obtienen los valores máximos de cada año constituyendo la serie de trabajo.

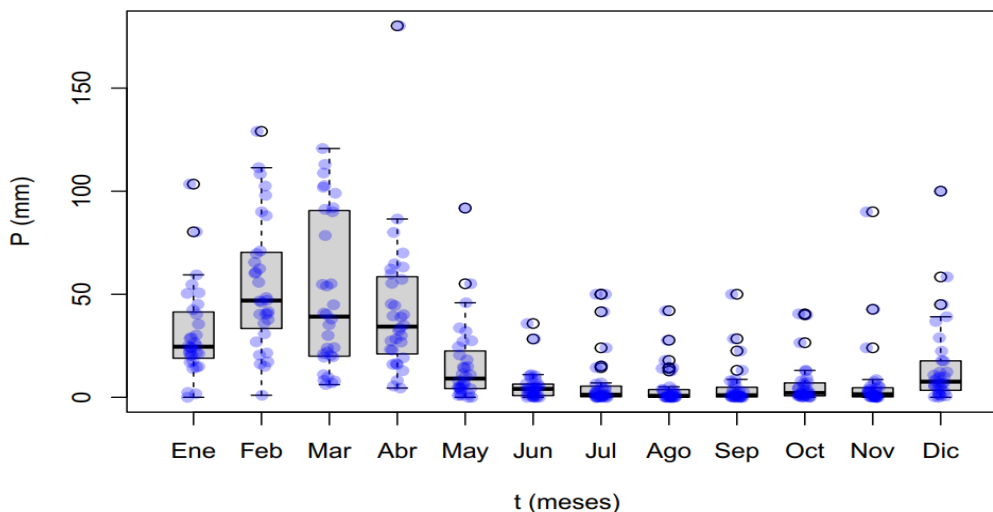
Tabla 3: Precipitación máxima en 24 horas con datos rellenos por medio del paquete Climatol de R.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Máx
1982	17.6	20.5	92	16	11.4	5.3	0.5	0	3.9	26.5	42.7	39.1	92
1983	45.1	47.1	99	86.5	91.8	28.3	50	42	28.4	3.7	3.2	17.8	99
1984	1.7	16.2	7	30	5.2	11	3.8	1.6	2.8	2.2	0.9	58.4	58.4
1985	22.4	48.4	23.9	35	27.4	3	1	2	1.4	1.6	2	4.8	48.4
1986	80.3	15	30	44.5	1	0	1	0	0	2.6	0	1.4	80.3
1987	17	60.6	55.1	33.6	55.1	1.1	1	12.8	1.8	13.1	0	5.3	60.6
1988	30.2	21.5	9.8	15.9	5.6	1.3	0	0.4	13.1	0.3	3	2.6	30.2
1989	40.3	108.3	102.7	22.9	0.9	0.5	0.2	0	5.9	0.7	0	0.7	108.3
1990	14.9	17.2	24.1	63.2	4.2	9.4	1.3	0	1	1.7	0.8	4.2	63.2
1991	24	35.9	20.3	23.2	18.2	4.5	0.3	2.6	0.2	0.2	8.6	10	35.9
1992	20.4	30.8	35.2	62.2	33.7	3.9	7	0.5	0.7	0.9	0.2	4.3	62.2
1993	21.2	62.4	101.9	38.9	4.2	35.8	2.9	0.9	0.7	7.3	2.5	7	101.9
1994	21.7	88.1	38	32.3	45.9	6.3	0.2	0.5	0.2	6.7	2.8	36.8	88.1
1995	28.5	102.5	21.1	12.9	14.3	6.6	4.5	3.3	0.5	1.2	0.7	12.3	102.5
1996	35.5	26.9	40.9	39.5	1.7	0.5	0.9	0.6	0.3	0.6	0.2	1.9	40.9
1997	24.3	69.7	54	55.3	24.5	10.5	50	0.2	50	40	90	100	100
1998	54.7	111.4	78.5	80	7	0	0	0	0	0.3	4.3	0.5	111.4
1999	0	90	90	70	0	0	0	0	0	40.5	0	0	90
2000	14	41.6	44.9	28.3	0	0	0	0	0	0.7	0.2	6.5	44.9
2001	103.4	65.5	108.8	26.8	4.4	0.5	1.2	0.5	0.4	0.4	0.9	5.7	108.8
2002	42.5	37.7	54.8	57.2	14.6	10.4	2.1	3.6	8.7	9.3	2.6	28.9	57.2
2003	29	46.1	11	4.5	5	5.3	41.5	1.3	0.2	1.5	7.6	45	46.1
2004	24.8	71	19.6	5.5	11	4	4.5	2.1	3	4.4	0.3	10	71
2005	26.5	40.3	19.5	59.8	1.5	0.2	2	0.1	0.5	1	5	8.1	59.8
2006	14.6	60.2	40.3	19.2	27.1	2.8	0	27.7	8	0	5.4	10.8	60.2
2007	21.4	46.8	91.2	180.2	8	8.7	6.4	0	2	2	24	7.1	180.2
2008	50.4	55.8	113	64.8	3.1	4.2	14.4	3.9	2.1	3.6	1	0.3	113
2009	2.4	1	8	27.4	14.9	4.5	0.4	17.9	22.5	0	0	9.2	27.4
2010	50.7	40.5	8.2	16.4	10.2	5.1	15.2	14.4	7	6	4	12.2	50.7
2011	20.3	40.5	6.2	8.2	20.5	3	0	14	0	12.8	0.5	1.3	40.5
2012	59.4	129	120.7	45.3	32	4.5	24	0.2	0	8	5.6	17.6	129
2013	25	98	22	40.1	6.5	1.2	3.2	5.1	1	4.5	0.2	22.4	98
Med	30.7	54.57	49.74	42.05	15.96	5.7	7.48	4.94	5.19	6.38	6.85	15.38	76.87
Máx	103.4	129	120.7	180.2	91.8	35.8	50	42	50	40.5	90	100	180.2
Mín	0	1	6.2	4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	27.4

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2 se puede observar un gráfico de caja aplicado a los valores de la tabla 3 de forma mensual, obsérvese cómo es evidente que los meses con mayor pluviometría transcurren desde diciembre a mayo, desde el punto de vista estadístico estos meses también presentan mucho menos valores atípicos u outliers (valores fuera de la caja, valores que pueden tener algún sesgo estadístico), esto es positivo ya que la serie de trabajo se conforma con los valores mayores de cada año que por lo general estarán en estos meses.

Figura 2: Gráfico de caja para precipitaciones máximas en 24 horas, estación M0163 Boyacá, período 1982-2013.
Fuente: Elaboración propia.



La serie de trabajo de 32 valores fue ajustada a una función de distribución acumulada de eventos máximos de tipo Gumbel y comprobada su bondad de ajuste con la prueba de Smirnov-Kolmogorov, finalmente vinculando la función de probabilidades de Gumbel con el período de retorno T, se pudo obtener los valores de precipitación máxima probable PMP en 24 horas para diferentes períodos de retorno como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 4: Precipitación máxima en 24 horas con datos rellenos por medio del paquete Climatol de R.

Nro	Código	Nombre	T 2 años	T 5 años	T 10 años	T 25 años	T 50 años	T 100 años	T 500 años
1	M0163	Boyacá	71.31	101.25	121.07	146.12	164.69	183.14	225.76

Fuente: Elaboración propia.

En Guachamanin et al. (2015) se presentan los valores de intensidad (mm/h) para lluvias máximas en 24 horas para los mismos períodos de retorno que se vienen trabajando y con la serie de precipitación hasta el 2011, ver la tabla 5. Si se multiplican estos valores de intensidades por 24 se obtienen los valores de PMP, estos valores aparecen en la última fila de la tabla 5, obsérvese que son valores muy parecidos a los obtenidos en el trabajo actual (tabla 4), este resultado de comprobación es importante y de alguna manera valida el proceso de manipulación de datos realizado.

Tabla 5: Valores de intensidad (mm/h) y Precipitación máxima en 24 horas publicados en Guachamanin et al. (2015) para la estación M0163.

Nro	Código	Nombre	T 2 años	T 5 años	T 10 años	T 25 años	T 50 años	T 100 años	T 500 años
			Intensidad (mm/h)						
1	M0163	Boyacá	2.15	3.79	4.84	6.13	7.05	7.94	-
			Precipitación máxima en 24 horas (mm)						
			51.6	90.96	116.16	147.12	169.2	190.56	-

Fuente: Elaboración propia.

En este punto es necesario obtener la precipitación máxima probable para tiempos diferentes a 24 horas, cosa que se pudiera lograr por medio de fajas pluviográficas, sin embargo, esto no es posible porque no se cuenta con los datos en la estación, por tal motivo se decidió emplear coeficientes obtenidos en Campos (1998) que se aplican a los valores de PMP en 24 horas y que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6: Coeficientes por los que se debe multiplicar las precipitaciones máximas probables de duración 24 horas para encontrar sus homólogas en diferentes tiempos.

Duración de los eventos de precipitación (hr)									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
Coeficientes aplicados a las precipitaciones									
0.3	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.8	0.91	1

Fuente: Elaboración propia.

Para este trabajo solo se emplean coeficientes para lluvias de 24 horas sin embargo Campos (1998) amplía esta tabla para duraciones de 2 – 7 días. Los valores en cursiva en la tabla 7 se obtienen multiplicando cada coeficiente de la tabla 6 que aquí se encuentran en la columna Coef, por el valor de PMP para duración de 24 horas asociado a cada período de retorno, pero aun así, hasta este momento el valor de tiempo más pequeño es una hora y para el modelo hidrológico se desea emplear un yetograma con intervalos de tiempo de 5 min, por tal motivo la estrategia fue obtener las curvas de mejor ajuste Precipitación (mm) vs tiempo (min) para cada valor de T, en la gráfica de la figura 3 se ubica el ejemplo para T= 100 años, los valores “Obtenidos” son los de la columna 10 de la tabla 7.

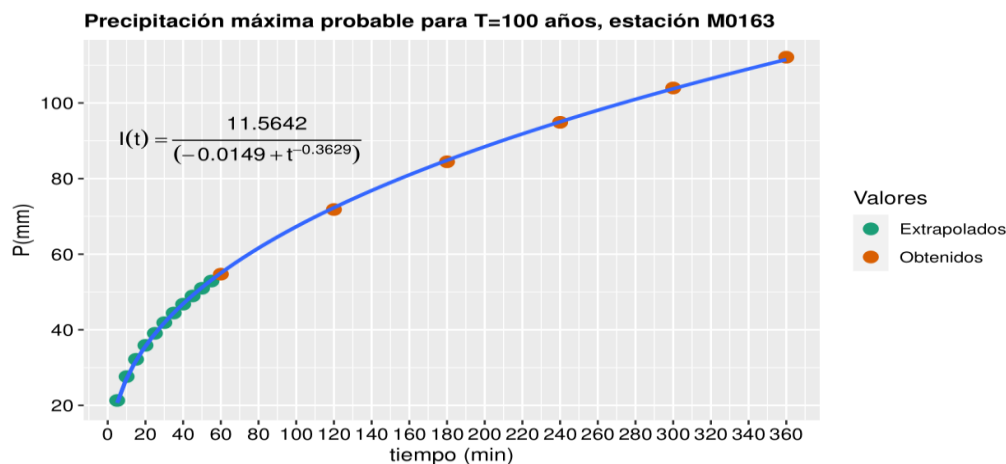
Tabla 7: Valores de precipitación máxima probable P(mm) para diferentes duraciones de la precipitación y diferentes períodos de retorno T.

t (min)	t (hr)	t (días)	Coef	T 2años	T 5años	T 10años	T 25años	T 50años	T 100años	T 500años
60	1	0.04	0.3	21.39	30.38	36.32	43.84	49.41	54.94	67.73
120	2	0.08	0.39	27.81	39.49	47.22	56.99	64.23	71.42	88.04
180	3	0.13	0.46	32.8	46.58	55.69	67.21	75.76	84.24	103.85
240	4	0.17	0.52	37.08	52.65	62.96	75.98	85.64	95.23	117.39
300	5	0.21	0.57	40.65	57.71	69.01	83.29	93.88	104.39	128.68
360	6	0.25	0.61	43.5	61.76	73.85	89.13	100.46	111.71	137.71
480	8	0.33	0.68	48.49	68.85	82.33	99.36	111.99	124.53	153.51
720	12	0.50	0.80	57.05	81	96.86	116.89	131.76	146.51	180.61
1080	18	0.75	0.91	64.89	92.14	110.18	132.97	149.87	166.66	205.44
1440	24	1	1	71.31	101.25	121.07	146.12	164.7	183.14	225.76

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se obtienen las ecuaciones de ajuste se evalúan valores de tiempo menores a 60 min, (valores “Extrapolados”) en la figura 3. Esto se realiza para todos los períodos de retorno.

Figura 3: Precipitación vs tiempo para T= 100 años, estación M0163. Fuente: Elaboración propia.

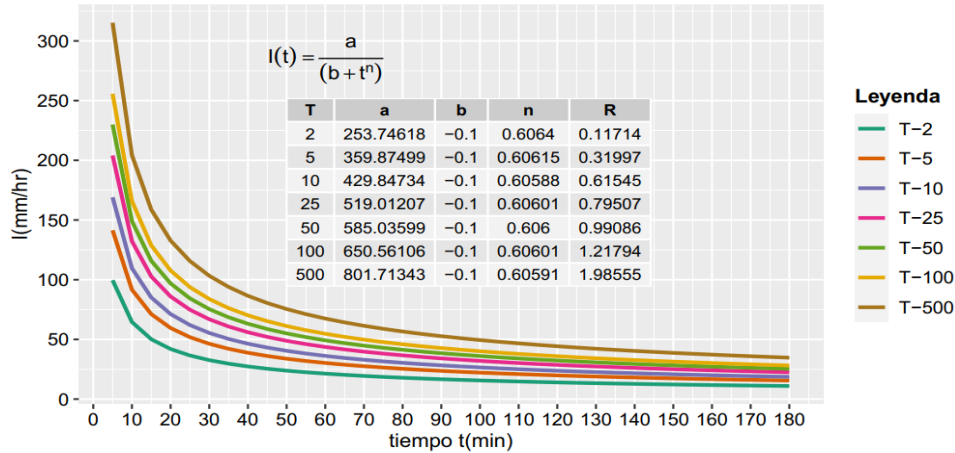


Con estas series de precipitación para intervalos de tiempo de 0 a 180 minutos se pueden obtener las intensidades dividiendo la precipitación por el tiempo correspondiente y así se obtienen las curvas IFD de la estación M0163, ver la gráfica de la figura 4.

Con las curvas IFD se decide aplicar el método de bloques alternos (Chow, Maidment, & Mays, 1994) para obtener los hietogramas de los diferentes períodos de retorno. Finalmente se tiene en

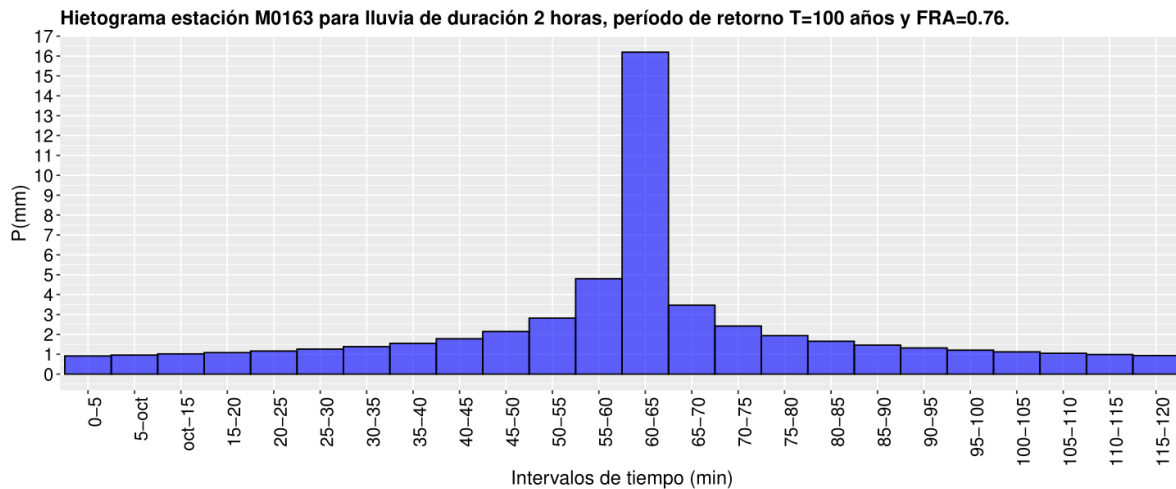
cuenta que estos hietogramas deberán ser aplicados a todas las subcuencas porque es el único dato existente, en tal sentido se calcula el llamado Factor de Reducción Areal FRA por medio del gráfico obtenido por la Organización Meteorológica Mundial OMM en 1983 y publicada originalmente en el Technical Paper 29, U.S. Weather Bureau, 1958, (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Figura 4: Gráfico de caja para precipitaciones máximas en 24 horas, estación M0163 Boyacá, período 1982-2013.
Fuente: Elaboración propia.



Para el área total de la cuenca se obtiene un $FRA = 0.76$, multiplicando por este valor al hietograma obtenido con el método de bloques alternos se obtiene el siguiente hietograma.

Figura 5: Hietograma de la estación M0163 para precipitación de 2 horas y T=100 años afectado por un factor de reducción areal $FRA=0.76$. Fuente: Elaboración propia.

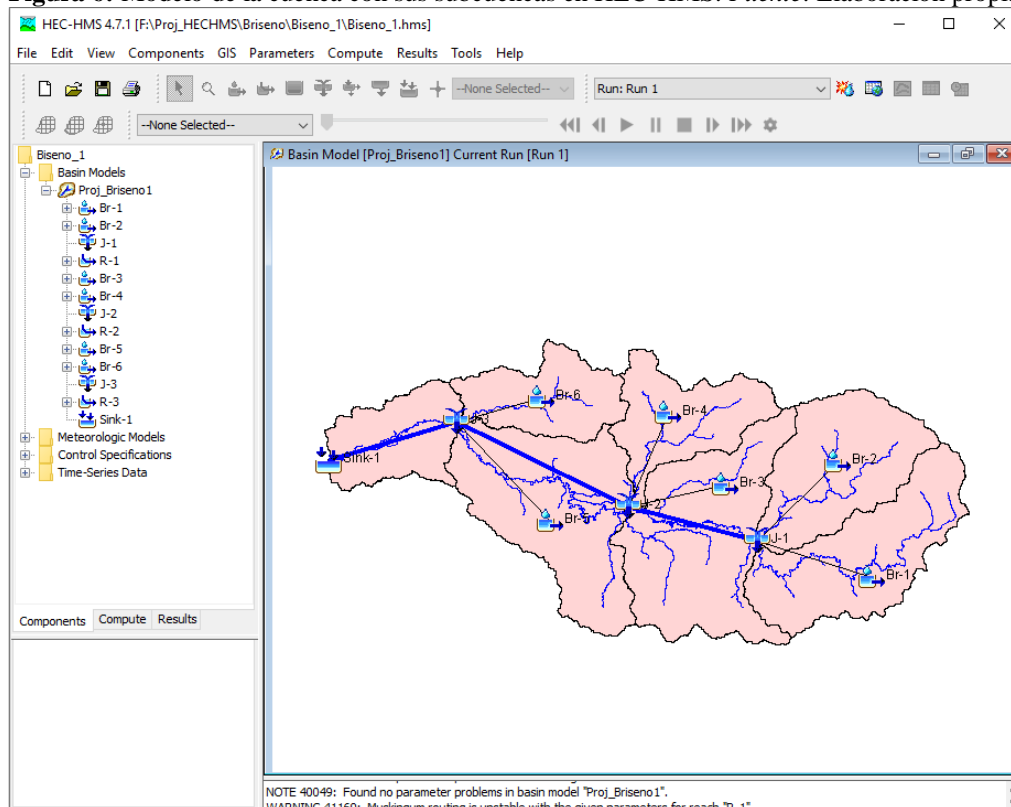


Modelo hidrológico en HEC-HMS de la cuenca Briseño

Modelo de cuenca

Una vez que se tienen los datos de las cuencas, sistema fluvial, pluviometría, etc se pasa a la creación del modelo. Primeramente, se realizó el llamado modelo de cuenca *Basin Model* donde se ubicaron todos los elementos para modelar la gran cuenca, dígame las subcuencas *Subbasins*, las interconexiones entre las subcuencas por medio de uniones o *Junctions*, los tramos de ríos que transportan los hidrogramas llamados *Reaches*, y finalmente el cierre de la cuenca *Sink*, ver la siguiente figura.

Figura 6: Modelo de la cuenca con sus subcuencas en HEC-HMS. *Fuente:* Elaboración propia.



Métodos de pérdidas para el modelo hidrológico en HMS.

Estos son métodos que permiten determinar cuánta agua de la que llega a la cuenca no provoca escurrimiento directo y por lo tanto se “pierde”. Cuando este volumen de agua se retira del hietograma bruto que se introduce al modelo se obtiene el hietograma neto que no es más que la llamada lluvia efectiva, la que llega al sistema fluvial.

HEC-HMS tiene un amplio grupo de métodos para obtener dichas pérdidas y por consiguiente el hietograma neto. En este caso se emplea el método del número de la curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos popularmente conocido como método de CN, aplicado con una metodología orientada a la obtención de los valores de CN para cada subcuenta del modelo por medio de herramientas SIG (Gutierrez, Méndez, & del Salto, 2017; Ferrer, Rodríguez, & Estrela, 1995; Maurtua & Zelada, 2016).

Esta metodología se basa en la obtención de tres mapas, 1- mapa de pendientes reclasificados en menores a 3% o mayores o iguales a 3%, en la figura 7 para el primer mapa los polígonos con valores 0 significa que tienen pendiente menor a 3%, 2- de igual forma se necesita de un mapa de grupos hidrológicos, los que se demuestra que guardan relación estrecha con la textura de los suelos, por ejemplo suelos de textura fina se asocian al grupo hidrológico “C”, gruesa “A” y media “B”, ver el mapa de textura en la figura 7 y finalmente 3- Mapa de uso del suelo, que en este trabajo se realizó por medio un proceso de vectorización manual con orto imágenes actuales en algunas zonas de la cuenca y en otras se empleó la orto imagen obtenida por el proyecto SIGTIERRAS en el año 2014, ver el mapa de uso de suelo en la figura 7. Con todos estos datos se realiza una intersección y se obtienen polígonos que cumplen el requisito de tener un único valor de las variables analizadas anteriormente y en base a los valores de CN publicados en la tabla 1 por Ferrer, Rodríguez, & Estrela (1995) se aplicaron funciones lógicas en la calculadora de campos de QGIS y se pudo realizar la asignación de valores de CN a los polígonos, ver mapa de CN en la figura 17. Posteriormente se cortó el mapa de CN para los límites de cada subcuenca y se calculó un valor medio ponderado de CN para cada subcuenca, necesario para el modelo en HMS, ver tabla 8.

Del mapa general de CN de la cuenca y por ende de las subcuencas, así como de los valores de CN de la tabla 8 llama la atención las zonas de la cuenca alta con valores tan elevados de CN, esto es muy perjudicial si se desea minorar las grandes avenidas producidas por lluvias intensas. La causa está en que en estas zonas predomina un uso de suelo con muy poca vegetación y por lo tanto el suelo está muy expuesto a la erosión y demás fenómenos perjudiciales para la cuenca, este es un indicador que apunta a la necesaria toma de medidas de protección de la zona alta de la cuenca Briseño.

Figura 7: Mapas de pendiente reclasificada, textura, uso de suelo y de Número de la curva o CN. *Fuente:* Elaboración propia.

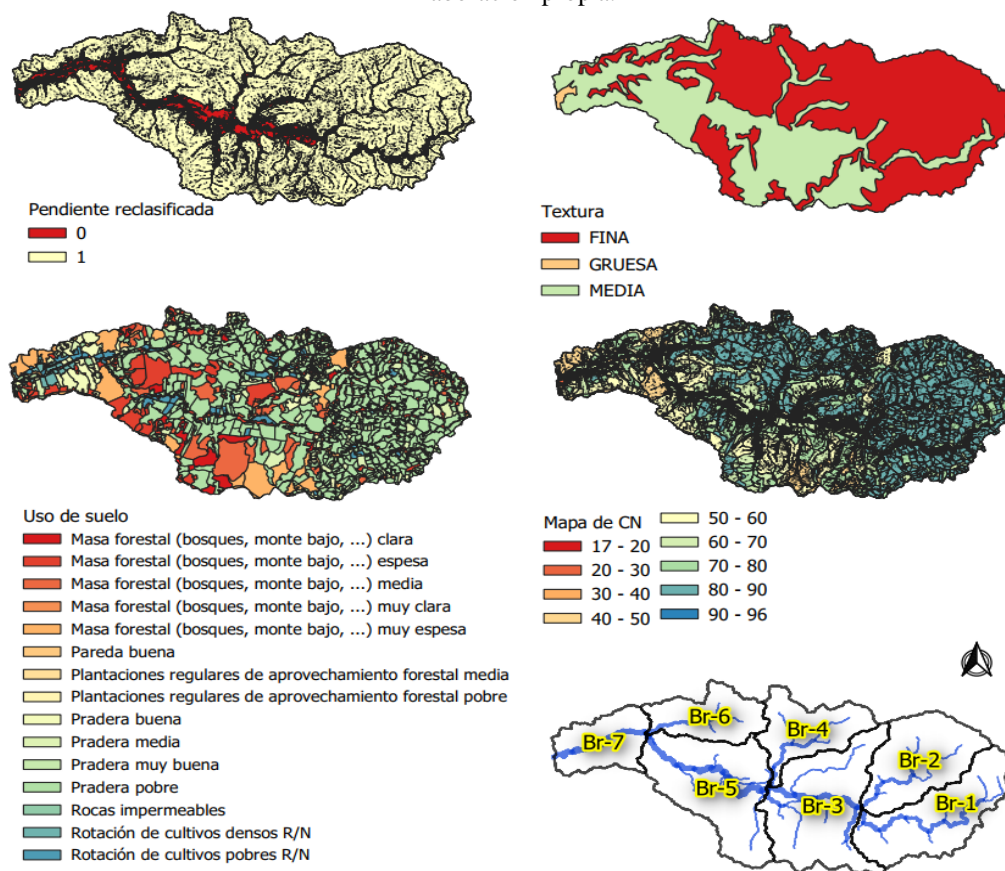


Tabla 8: Valores de CN para cada subcuenca obtenidos de geo-procesos siguiendo la metodología presentada por Ferrer, Rodríguez, & Estrela (1995).

Nro	Subcuenca	CN
1	Br-1	79.47
2	Br-2	81.00
3	Br-3	67.83
4	Br-4	80.04
5	Br-5	67.79
6	Br-6	73.80
7	Br-7	60.81

Fuente: Elaboración propia

Métodos de escurrimiento directo para el modelo hidrológico en HMS.

También son conocidos como métodos de transformación ya que su función es transformar el hietograma en un hidrograma, de igual forma HMS cuenta con varios métodos para lograr este propósito, en este trabajo se decidió emplear el método del Hidrograma unitario del Servicio de

Conservación de Suelos de los Estados Unidos, (NRCS, 2007), para este método se suministra de dato el tiempo de retardo *lag time* se define el tipo de gráfico como *Standard (PRF 484)*.

Métodos de tránsito.

En este tipo de modelos semi distribuidos es muy común que algunas subcuencas deban servir de tránsito, estas por lo general se ubican en las zonas bajas y menos accidentadas de la cuenca. En este caso se tiene a las subcuencas Br-3, Br-5 y Br-7, estas si bien también aportarían caudal, su principal función es transitar los hidrogramas provenientes de las subcuencas altas de montaña.

MHS de igual manera tiene implementado varios métodos para lograr este tránsito, en el estudio actual se emplea el método de Muskingum que fue desarrollado por G.T Mc Carty y otros con el empleo de los estudios de control de inundaciones del río Muskingum efectuado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos U.S Army Corps of Engineers en el año 1935 (Chow, 1964).

Para la aplicación del método se obtienen los parámetros K y X con el empleo del procedimiento propuesto por Monsalve (1999) para cuando se carece de datos de hidrogramas de entrada y salida al tramo; los resultados se presentan en la tabla 9.

Tabla 9: Valores de K(hr), X y subreaches para cada tramo del río del modelo en HEC-HMS en el que se realizará un tránsito de hidrograma.

Nro	Tramo	L(km)	Csup	Cinf	S	K(hr)	X	Subreaches
1	R1	14.61	72.676	43.12	0.002	2.19	0.5	30
2	R2	25.34	43.12	11.30	0.0012	2.79	0.5	34
3	R3	10.73	11.30	1.62	0.0009	2.51	0.46	28

Fuente: Elaboración propia

Otras consideraciones

No se considera un caudal base en el río a la hora de evaluar el evento. Tampoco se considera la aplicación de métodos de intercepción del agua en el follaje de las plantas ni los métodos de almacenamiento superficial.

Resultados y discusión

Escenarios y resultados de la simulación del modelo en HEC-HMS.

Una vez introducida toda la información espacial y de atributos necesaria para la ejecución del modelo se decide realizar 7 simulaciones, una para cada hietograma obtenido con cada uno de los

períodos de retorno que se vienen trabajando, 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años, en el documento por cuestiones de espacio solo se presentó el hietograma obtenido para T= 100 años, figura 5, que además fueron afectados por el FRA.

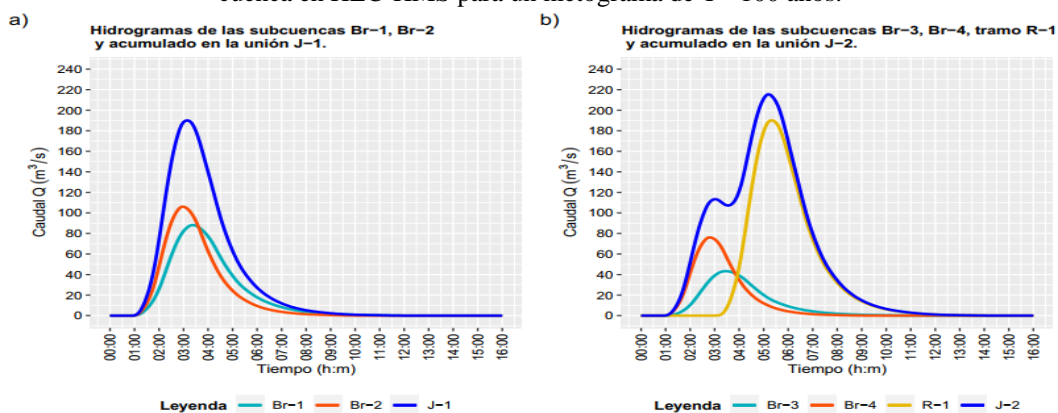
En la figura 8 se presentan 4 paneles con los hidrogramas (respuesta hidrológica) obtenidos en los 4 cierres principales de la cueca para la simulación con el hietograma correspondiente a T=100 años. En el panel a) de la figura 8 se pueden observar los dos hidrogramas producidos por las subcuencas Br-1 y Br-2 y su acumulación que vendría a ser el efecto de ambos hidrogramas cuando se unen en el cierre J-1.

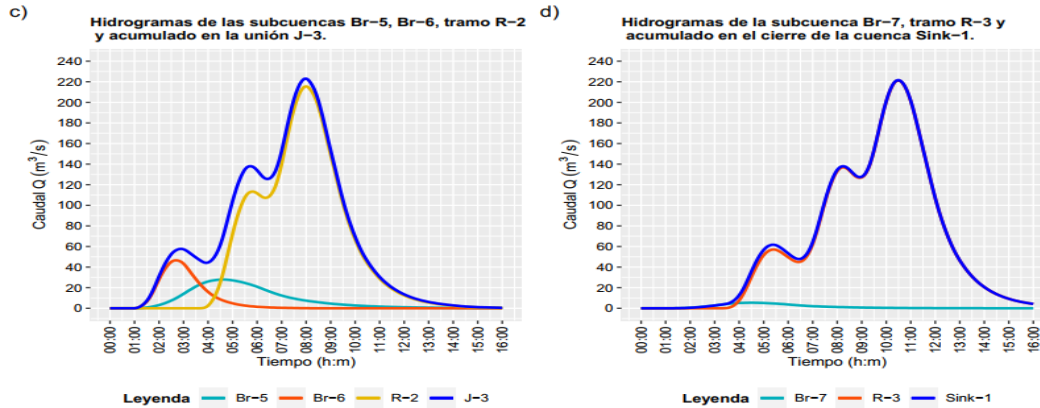
Esto mismo se realizó para los cierres J-2, J-3 y Sink1 lo que se puede mostrar en los paneles b), c) y d) respectivamente. Es muy interesante analizar cómo a partir del cierre J-2 hacia aguas abajo el caudal pico no varía sustancialmente, lo que si hace es desplazarse en el tiempo llegando a tener un valor máximo de cerca de diez horas y treinta minutos, en el cierre más bajo de la cuenca, este tiempo es obtenido desde el inicio del evento de lluvia.

Una vez realizadas todas las simulaciones se procedió a obtener los valores de caudal máximo en los hidrogramas, así como su tiempo en los cierres o confluencias principales de la cuenca, estos son J-1, J-2, J-3, Sink1 y con estos valores se elaboró la gráfica que se presenta en la figura 9.

Estas gráficas y/o sus ecuaciones de ajuste que también se brindan pueden ser muy útiles para diversos trabajos de ingeniería en la cuenca por cuanto si se conoce la intensidad de la lluvia y su período de retorno se puede tener un estimado del caudal pico que estará pasando en los alrededores de los cierres principales. Obsérvese que las diferencias en caudal máximo en los diferentes cierres aumentan a medida que lo hace la intensidad de la lluvia (representada aquí por el período de retorno).

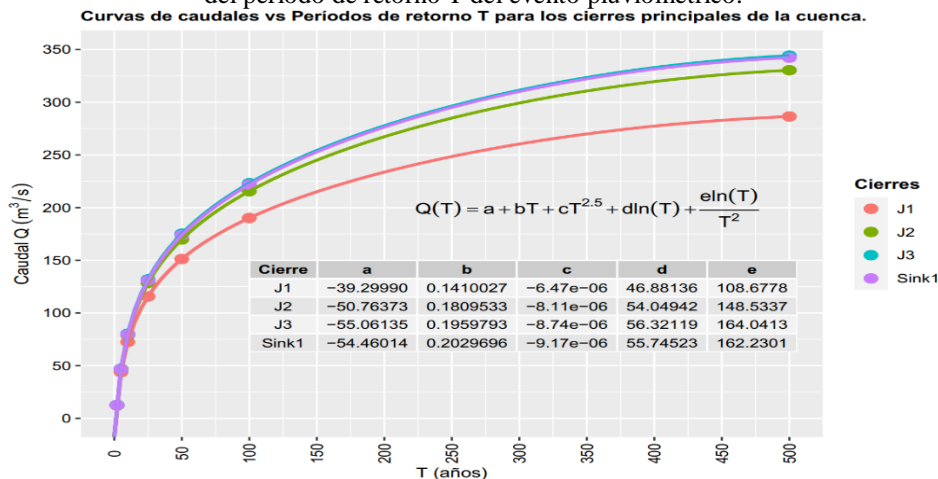
Figura 8: Hidrogramas de todas las subcuencas y tramos de tránsito hasta los cierres, simulados con el modelo de la cuenca en HEC-HMS para un hietograma de T= 100 años.





Fuente: Elaboración propia.

Figura 9: Curvas de caudales máximos obtenidos en los cierres o confluencias principales de la cuenca en función del periodo de retorno T del evento pluviométrico.



Fuente: Elaboración propia.

Un último resultado interesante fueron los tiempos en que se obtuvo los valores pico de caudal en cada cierre y estos prácticamente no variaron a los que se pueden observar en la figura 8.

Conclusiones

Se obtiene la respuesta hidrológica de la cuenca Briseño (hidrogramas) en los principales cierres y confluencias de la cuenca, para eventos de lluvia intensa con períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años con datos actualizados por medio de un modelo hidrológico semidistribuido realizado en HEC-HMS. También se presenta un gráfico y ecuaciones de ajuste que permiten

obtener el caudal pico en los cierres principales de la cuenca para eventos de lluvia con cualquier período de retorno de 2 a 500 años y se presentan los hidrogramas de las subcuencas y tramos en los cierres principales para un hietograma de $T=100$ años.

Se obtiene un mapa del número de la curva CN de toda la cuenca de estudio en el que llama la atención que gran parte de la zona alta de la cuenca presenta valores elevados de CN, entre 80 y 96, la causa está en que en estas zonas predomina un uso de suelo con muy poca vegetación y por lo tanto el suelo está muy expuesto a la erosión y demás fenómenos perjudiciales para la cuenca, este es un indicador que apunta a la necesaria toma de medidas de protección de la zona alta de la cuenca Briseño.

Se realizó una manipulación de los datos mensuales y anuales de lluvia máxima en 24 horas de las estaciones M0162 y M0163 que permitió por medio del paquete de R, Climatology, homogenizar las series y rellenar los datos faltantes de la estación M0162 Boyacá y con esta información de partida se obtuvo las curvas de Intensidad Frecuencia y Duración IFD de la estación.

Referencias bibliográficas

1. Aguilar, J. A.P., & Martín, M. D. (2016). *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS*. 1- Centro para el conocimiento del paisaje. 2- Instituto IMDEA Agua., Alcalá.
2. Campos, A. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis de Potosí. Facultad de Ingeniería. San Luis de Potosí, S. L. O., México.
3. Campos, A. C., Zambrano, X. V., Castro, C. C., Sinichenko, E., & Gritsuk, I. (2019). Water supply and demand of the hydrographic demarcation of Manabi, Ecuador. *International Scientific and Practical Conference Engineering Systems - 2019* (págs. 1-7). Moscow: IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/675/1/012021
4. Campos, S A., & Sinichenko, E. K. (2017). *Características de los pequeños sistemas fluviales y recursos hídricos de la demarcación hidrográfica de Manabí, perspectivas de desarrollo*. Recuperado de <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29251391>
5. Choez, B. B., Ríos, S. C., & Del Valle, D. M. (2019). Análisis de la vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Santa Ana de Vuelta Larga, provincia de Manabí, Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, 1-14. doi:dx.doi.org/10.14350/ig.59767
6. Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia.

7. Engelbertz, D. T., Zambrano, J. C., Cedeño, T. E., Alfaro, S. Z., Pico, J. F., Delgado, J. Q., Cárdenas, M. P. (2015). Dinámica de los eventos climáticos extremos en la cuenca del río Portoviejo, Manabí, Ecuador. *La técnica*, 80-91.
8. Ferrér, M., Rodríguez, J., & Estrela, T. (1995). Generación automática del número de curva con Sistemas de Información Geográfica. *Ingeniería del agua*, 2(4), 43-58.
9. Gil, V., Varela, C., & Mardones, G. (2005). Gestión Integral del riesgo por inundaciones: Caso de estudio ciudad de Chone. *XXXIII Curso Internacional de Geografía aplicada: Geografía y riesgos ambientales. CEPEIGE* (págs. 91-109). Quito: CEPEIGE. Obtenido de <http://www.cepeige.org/wp-content/uploads/2018/05/200591-109.pdf>
10. Guachamanin, W.; García, F.; Arteaga, M.; Cadena, J.(2015). *Determinación de Ecuaciones Para el Cálculo de Intensidades Máximas de Precipitación. Actualización del Estudio de Lluvias Intensas*; INAMHI: Quito, Ecuador; Recuperado de: online: <http://https://www.serviciometeorologico.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia>.
11. Guijarro, J. (2019). *Homogeneización de series climáticas con Climatol. Versión 3.1.1*. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Departamento Técnico, Islas Baleares, España. <https://CRAN.R-project.org/package=climatol>. Recuperado de: http://www.climatol.eu/homog_climatol-es.pdf
12. Gutierrez, D. C., Méndez, D. P., & del Salto, R. A. (2017). Determinación de parámetro hidrológico número de curva en la cuenca de la quebrada El Batán, usando sistemas de información geográfica y percepción remota. *Figempa: Investigación y Desarrollo*, 31-41. doi:<https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.53>
13. Hurtado-Pidal, J., Triana, J. A., Espitia-Sarmiento, E., & Jarrín-Pérez, F. (2020). Flood Hazard Assessment in Data-Scarce Watersheds Using Model Coupling, Event Sampling, and Survey Data. *Water*, 1-19. doi:<https://doi.org/10.3390/w12102768>
14. Kwast, H. V., & K. M. (2020). *QGIS for hidrological applications, recipes for catchment hydrology and water management*. (G. Sherman, Ed.) Chugiak, Alaska, USA: Locate Press.
15. Mancero, H. G., Toctaguano, D. S., Tacuri, C. A., Kirby, E. P., & Tierra, A. R. (2015). Evaluación de Modelos Digitales de Elevación obtenidos por diferentes sensores remotos. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 10(1), 107-111. <https://doi.org/10.24133/cctespe.v10i1.33>

16. Maurtua, M. P., & Zelada, C. V. (2016). Generación de mapa de número de curva con Sistema de Información Geográfica. *Apuntes de ciencia y sociedad*, 91-99. doi:<http://dx.doi.org/10.18259/acs.2016029>
17. Monsalve, Sáenz., G (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Alfaomega. Colombia.
18. NRCS. (2007). Chapter 16 Hydrographs. En *National Engineering Handbook Part 630 Hydrology* (págs. 16.1-16.23). NRCS.
19. Wahistrom, M., & Guha-Sapir, D. (2015). *The human cost of weather related disasters 1995-2015*. Brussels: CRED. Obtenido de https://www.unisdr.org/2015/docs/climatechange/COP21_WeatherDisastersReport_2015_FINAL.pdf