

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

**VALIDACIÓN DE LAS LEYES DE HORTON Y SCHUMM PARA LA
GENERACIÓN DE HIDROGRAMAS DE ESCORRENTÍA DIRECTA EN LAS
SUB CUENCAS CHOROBAL Y CERRO BLANCO DE LA CUENCA
HUAMANZAÑA**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:
HIDROLOGÍA – HIDRÁULICA**

AUTORA:
Br. Gulden García, Johanna Esther

JURADO EVALUADOR:
PRESIDENTE: Narvaez Aranda Ricardo Andres
SECRETARIO: Medina Carbajal Lucio
VOCAL: Segundo Vargas López

ASESOR:
Serrano Hernández, José Luis
Código orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1931-6817>

TRUJILLO - PERÚ

2021

Fecha de sustentación: 27/10/2021

DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto del camino y por otorgarme cada salud para lograr mis objetivos, además de su infinito amor y bondad.

A mi tía, Nilda Gulden, quien ha sido mi mano derecha durante todo este tiempo y su incondicional apoyo, apostando por mi futuro.

A mi hija Sophia Guarniz Gulden, por ser el motor de mi vida que me impulsa a seguir adelante cada día.

A mis padres German Gulden y Esther García, y demás familiares, por ser parte de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Al Ing., José Luis Serrano Hernández por su orientación, paciencia y motivación, contribuyendo con sus conocimientos y capacidad intelectual, siendo fundamental en el desarrollo de la presente investigación.

Además, doy gracias a todos aquellos que tuvieron que ver en el desarrollo de la presente tesis.

RESUMEN

El uso de modelos matemáticos para caracterizar una cuenca y/o representar el ciclo hidrológico (la transformación de precipitación a escorrentía), en la predicción de crecidas máximas están percibiendo consideración considerable en los proyectos de control de recursos hídricos superficiales a nivel global, por lo que en la presente investigación se desarrolló con el modelo hidrológico del Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico, que nos permite determinar los caudales pico y el tiempo en que se alcanza este (tiempo pico) en las sub cuencas de Cerro blanco y Chorobal, el modelo fue elaborado y propuesto por Ignacio Rodríguez Iturbe y Juan Valdés en 1979, el cual tiene como variables principales las relaciones de Bifurcación y Longitud (Horton 1945) y la relación de Área (Schumm 1956). Estas se determinaron a partir de las características geomorfológicas como el orden de la corriente, según método de Strahler, longitud y área de drenaje de la red de drenaje, a través de software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), obteniendo un hidrograma unitario distinto en cada sub cuenca en estudio. El proceso de transformación de precipitación a escorrentía obedece también a variables como son: La precipitación en la cuenca, abstracción, precipitación efectiva y la discretización temporal de esta, resultando en un modelo meteorológico. Luego se procedió a la convolución entre el la precipitación y el hidrograma unitario, obteniendo un hidrograma de escorrentía directa en las sub cuencas Cerro blanco y Chorobal, siendo superpuestas entre sí y al tránsito del hidrograma resultante hasta el tramo del cauce en donde se comparan los caudales modelados y los caudales resultante del análisis de máximas de los caudales históricos para distintos periodos de retorno, siendo finalmente los resultados sometidos a pruebas de sensibilidad, calibración y finalmente la validación del modelo según el coeficiente de correlación lineal de Pearson, siendo este igual a 0.832 siendo válido para un nivel de confianza de 95%. Al considerar la validez del modelo es posible aplicar el modelo a cuencas no aforadas dentro del área de estudio en la determinación de eventos extremos y de su empleo como consideración en los proyectos de mitigación y/o protección e ingeniería.

Palabras clave: Relaciones de Horton y Schumm, hidrograma unitario instantáneo geomorfológico, hidrograma de escorrentía directa, correlación lineal de Pearson.

ABSTRACT

The use of mathematical models to characterize a basin and / or represent the hydrological cycle (the transformation from precipitation to runoff), in the prediction of maximum floods are receiving considerable consideration in the projects of control of surface water resources at a global level, therefore that in the present investigation was developed with the hydrological model of the Geomorphological Instantaneous Unit Hydrogram, which allows us to determine the peak flows and the time in which this is reached (peak time) in the sub-basins of Cerro Blanco and Chorobal, the model was elaborated and proposed by Ignacio Rodríguez Iturbe and Juan Valdés in 1979, which has as main variables the Bifurcation and Longitude relationships (Horton 1945) and the Area relationship (Schumm 1956). These were determined from the geomorphological characteristics such as the order of the stream, according to Strahler's method, length and drainage area of the drainage network, through Geographic Information Systems (GIS) software, obtaining a different unit hydrograph in each sub-basin under study. The transformation process from precipitation to runoff is also due to variables such as: Precipitation in the basin, abstraction, effective precipitation and its temporal discretization, resulting in a meteorological model. Then, the convolution was carried out between the precipitation and the unit hydrograph, obtaining a direct runoff hydrograph in the Cerro Blanco and Chorobal sub-basins, being superimposed on each other and on the transit of the resulting hydrograph to the section of the channel where the modeled flows and flows resulting from the analysis of maximum historical flows for different return periods, the results being finally subjected to sensitivity tests, calibration and finally the validation of the model according to the Pearson linear correlation coefficient, this being equal to 0.832 being valid for a confidence level of 95%. By considering the validity of the model, it is possible to apply the model to non-gauged basins within the study area in the determination of extreme events and its use as a consideration in mitigation and / or protection and engineering projects.

Keywords: Horton and Schumm relationships, geomorphological instantaneous unit hydrograph, direct runoff hydrograph, Pearson's linear correlation.

INDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INDICE.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xix
ÍNDICE DE ANEXOS	xxvi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problema de investigación.....	1
1.1.1. Descripción del problema.....	1
1.1.2. Formulación del problema.....	2
1.2. Justificación	2
1.3. Viabilidad de la investigación	3
1.4. Objetivos de la investigación.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
CAPÍTULO II.....	6
2. MARCO DE REFERENCIA	6
2.1. Antecedentes.....	6
2.1.1. Antecedentes nacionales.....	6
2.1.2. Antecedentes internacionales.....	7
2.2. Marco Teórico	8
2.2.1. Concepto de cuenca	8
2.2.1.1. Clasificación de la cuenca	8
2.2.1.1.1. Según el tamaño	8
2.2.1.1.2. Según su desembocadura.....	10
2.2.1.1.3. Según su elevación	10
2.2.1.2. Características geomorfológicas de la cuenca.....	11
2.2.1.2.1. Elementos de la cuenca	11
2.2.1.2.2. Morfometría de la cuenca.....	12

2.2.1.2.2.1. Parámetros de forma	12
2.2.1.2.2.2. Parámetros de relieve	14
2.2.1.2.2.3. Otros parámetros	17
2.2.1.2.2.4. Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca.....	17
2.2.2. Sistemas de información geográfica y la hidrología.....	19
2.2.3. Datos hidrológicos, análisis y tratamiento.....	20
2.2.3.1. Datos hidrológicos.....	20
2.2.3.2. Análisis y tratamiento hidrológico	20
2.2.3.2.1. Análisis de consistencia.....	20
2.2.3.2.1.1. Análisis visual gráfico.....	20
2.2.3.2.1.2. Análisis de doble masa.....	21
2.2.3.2.1.3. Análisis estadístico.....	21
2.2.3.2.2. Distribuciones probabilísticas de valores extremos.....	23
2.2.3.2.3. Prueba de bondad de ajuste	23
2.2.4. Transformación lluvia - escorrentía.....	24
2.2.4.1. Tormenta de diseño	25
2.2.4.1.1. Curvas precipitación – duración – periodo de retorno	25
2.2.4.1.2. Determinación de la ecuación y las curvas PDT cuando hay datos de precipitación diarias totales	26
2.2.4.1.2.1. Modelo de Dyck y Peschke.....	27
2.2.4.1.2.2. Modelo de Frederick Bell (1969).....	27
2.2.4.1.3. Precipitación efectiva	27
2.2.4.1.3.1. Método de SCS para abstracciones.....	27
2.2.4.1.3.2. Cálculo del número de curva	28
2.2.4.1.4. Elaboración del histograma de entrada para el modelo.....	30
2.2.4.1.4.1. Correcciones al valor representativo de precipitación	30
2.2.4.1.4.2. Distribución temporal de la precipitación.....	31
2.2.4.1.4.3. Distribución temporal de abstracciones	32
2.2.4.2. Hidrograma unitario	32
2.2.4.2.1. Principios del hidrograma unitario	32
2.2.4.2.2. Deducción del hidrograma unitario	33
2.2.4.2.3. Aplicación del hidrograma unitario.....	33
2.2.4.2.4. Hidrograma unitario sintético.....	34
2.2.4.3. Tránsito de avenidas en cauces.....	34

2.2.5. Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.....	36
2.2.5.1. Características fisiográficas de la cuenca	36
2.2.5.1.1. Red de drenaje	36
2.2.5.1.2. Relaciones de Horton y Schumm	37
2.2.5.1.3. Longitud de tributarios y del cauce principal	37
2.2.5.1.4. Velocidad de tránsito	38
2.2.5.2. Relaciones de Rosso para determinar los parámetros de forma y escala	39
2.2.6. Análisis de sensibilidad de parámetros, calibración y validación del modelo	39
2.2.6.1. Análisis de sensibilidad de parámetros.....	40
2.2.6.1.1. Coeficiente de Nash.....	40
2.2.6.1.2. Error balance de masas	40
2.2.6.2. Calibración de modelos hidrológicos	41
2.2.6.3. Validación de modelos hidrológicos	41
2.3. Marco Conceptual.....	43
2.4. Hipótesis	43
2.5. Variables	44
2.5.1. Variables dependientes	44
2.5.2. Variables independientes	44
2.5.3. Operacionalización de las variables.....	44
CAPÍTULO III	46
3. METODOLOGÍA	46
3.1. Tipo y nivel de investigación.....	46
3.2. Población, Marco Muestral, Unidad de Análisis y Muestra.....	46
3.2.1. Población	46
3.2.2. Marco Muestral.....	46
3.2.3. Unidad de análisis.....	46
3.2.4. Muestra	46
3.3. Técnicas e instrumentos de investigación.....	46
3.4. Diseño de investigación.....	47
3.5. Procesamiento y análisis de datos.....	47
CAPÍTULO IV	49

4. ANÁLISIS, APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	49
4.1. Descripción de la zona de estudio	49
4.1.1. Ubicación.....	49
4.1.1.1 Ubicación política.....	49
4.1.1.2 Ubicación geográfica.....	51
4.1.1.3 Ubicación hidrográfica	51
4.1.2. Características climatológicas	51
4.1.3. Características hidrográficas.....	52
4.2. Recopilación de la información	53
4.2.1. Identificación de la zona.....	53
4.2.1.1. Determinación de la sección hidráulica del río	53
4.2.1.2. Determinación del caudal	53
4.2.1.3. Data histórica hidrológica y meteorológica.....	54
4.2.1.4. Material cartográfico	55
4.3. Análisis de la información	57
4.3.1. Delimitación de las unidades hidrográficas	57
4.3.2. Determinación de las características geomorfológicas.....	58
4.3.2.1. Propiedades morfométricas de la cuenca.....	58
4.3.2.1.1. Parámetros de forma.....	58
4.3.2.1.2. Parámetros de relieve	60
4.3.2.1.3. Parámetros de la red hidrográfica.....	64
4.3.2.1.3.1. Caracterización de la red hídrica.....	64
4.3.2.1.3.2. Leyes de composición de drenaje	73
4.3.3. Análisis estadístico de la data histórica	95
4.3.3.1. Análisis de consistencia.....	96
4.3.3.1.2. Análisis visual gráfico	96
4.3.3.1.3. Análisis de doble masa	100
4.3.3.1.4. Análisis estadístico	103
4.3.3.2. Análisis de valores extremos	115
4.3.4. Análisis de la transformación lluvia escorrentía.....	133
4.3.4.1. Estimación de la precipitación sobre las subcuencas	133
4.3.4.2. Tormenta de diseño	137
4.3.4.2.1. Discretización temporal de la precipitación	137

4.3.4.2.2.	Cálculo de la abstracción y su distribución temporal	139
4.3.4.2.2.1.	Cálculo de la curva número y condición de humedad antecedente ..	139
4.3.4.2.2.2.	Infiltración inicial para cada sub cuenca.....	142
4.3.4.2.2.3.	Distribución temporal de las abstracciones.....	143
4.3.4.3.	Hidrograma unitario	156
4.3.4.3.1.	Longitud del cauce mayor orden y velocidad del cauce.....	157
4.3.4.3.2.	Relaciones de Horton y Schumm	159
4.3.4.3.3.	Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.....	159
4.3.4.4.	Caudales máximos avenidas	162
4.3.4.4.1.	Hidrograma de escorrentía directa.....	162
4.3.4.4.2.	Tránsito de avenidas	172
4.3.4.5.	Análisis de sensibilidad de parámetros, calibración y validación del	
modelo	181	
4.3.4.5.1.	Análisis de sensibilidad de parámetros.....	181
4.3.4.5.2.	Calibración del modelo.....	188
4.3.4.5.3.	Validación del modelo.....	189
4.4.	Resumen y discusión de resultados	191
4.4.4.	Resultados de los objetivos específicos	191
4.4.4.1.	Relaciones de Horton y Shumm	191
4.4.4.2.	Tormenta de diseño	192
4.4.4.3.	Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.....	192
4.4.4.4.	Hidrograma de escorrentía directa.....	194
4.4.4.5.	Hidrograma de escorrentia final	195
4.4.4.6.	Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo.....	195
4.4.5.	Resultado del objetivo general.....	195
4.5.	Prueba de hipótesis	196
4.6.	Aplicación de la metodología de la problemática real.....	197
4.6.1.	Obras de cruce, encauzamiento y/o protección	197
CONCLUSIONES.....		207
BIBLIOGRAFÍA		208
ANEXOS		212

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación propuesta para las cuencas según su tamaño.....	9
Tabla 2	Índices y/o coeficientes según la forma de la cuenca.....	12
Tabla 3	Índices y/o coeficientes según el relieve de la cuenca.....	14
Tabla 4	Clasificación de pendiente en cuencas.+	16
Tabla 5	Otros parámetros de la cuenca.....	17
Tabla 6	Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca.	18
Tabla 7	Funciones de distribución de probabilidad teóricas consideradas.....	23
Tabla 8	Tabla de valores críticos de la prueba KS.	24
Tabla 9	Clasificación de clases AMC para el método de abstracciones de lluvia del SCS.	29
Tabla 10	Grupos hidrológicos del suelo.	30
Tabla 11	Velocidades promedio aproximadas en pies/s del flujo de escorrentía.	38
Tabla 12	Valores referenciales del criterio de Nash.	40
Tabla 13	Valores críticos de la r de Pearson para una prueba unilateral según grados de libertad ($\square=N-2$).	42
Tabla 14	Tabla de las variables.....	44
Tabla 15	Delimitación de la zona en estudio.....	50
Tabla 16	Codificación para las sub cuencas en estudio.....	51
Tabla 17	Características climáticas de la zona.	51
Tabla 18	Características de los cauces principales y su origen.	52
Tabla 19	Lecturas tomadas en el mes de Marzo 2017.....	54
Tabla 20	Características de las estaciones meteorológicas e hidrológicas.	55
Tabla 21	Información cartográfica requerida.	55
Tabla 22	Parámetros de forma - Sub cuenca Cerro blanco.....	59
Tabla 23	Parámetros de forma - Sub cuenca Chorobal.	59
Tabla 24	Análisis hipsométrico - Sub cuencas Cerro blanco.	60
Tabla 25	Análisis hipsométrico - Sub cuencas Chorobal.	61
Tabla 26	Parámetro de relieve de las sub cuencas.....	64
Tabla 27	Interfaz de la red drenaje según el # de celdas en ArcGIS.	65

Tabla 28	Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 6400.	69
Tabla 29	Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 3200.	69
Tabla 30	Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 1600.	69
Tabla 31	Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 800.	69
Tabla 32	Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 400.	70
Tabla 33	Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 200.	70
Tabla 34	Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 100.	70
Tabla 35	Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 6400....	71
Tabla 36	Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 3200....	71
Tabla 37	Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 1600....	71
Tabla 38	Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 800.....	71
Tabla 39	Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 400.....	72
Tabla 40	Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 200.....	72
Tabla 41	Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 100.....	72
Tabla 42	Relación de bifurcación – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Cerro blanco....	74
Tabla 43	Relación de longitud – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Cerro blanco.....	74
Tabla 44	Relación de área – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Cerro blanco.	74
Tabla 45	Relación de bifurcación – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Cerro blanco....	75
Tabla 46	Relación de longitud – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Cerro blanco.....	75
Tabla 47	Relación de área – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Cerro blanco.	75
Tabla 48	Relación de bifurcación – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Cerro blanco....	75
Tabla 49	Relación de longitud – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Cerro blanco.....	76
Tabla 50	Relación de área – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Cerro blanco.	76
Tabla 51	Relación de bifurcación – #Celdas = 800 – Sub cuenca Cerro blanco.....	76
Tabla 52	Relación de longitud – #Celdas = 800 – Sub cuenca Cerro blanco.....	76
Tabla 53	Relación de área – #Celdas = 800 – Sub cuenca Cerro blanco.	77
Tabla 54	Relación de bifurcación – #Celdas = 400 – Sub cuenca Cerro blanco.....	77

Tabla 55	Relación de longitud – #Celdas = 400 – Sub cuenca Cerro blanco.....	77
Tabla 56	Relación de área – #Celdas = 400 – Sub cuenca Cerro blanco.	78
Tabla 57	Relación de bifurcación – #Celdas = 200 – Sub cuenca Cerro blanco.	78
Tabla 58	Relación de longitud – #Celdas = 200 – Sub cuenca Cerro blanco.....	78
Tabla 59	Relación de área – #Celdas = 200 – Sub cuenca Cerro blanco.	79
Tabla 60	Relación de bifurcación – #Celdas = 100 – Sub cuenca Cerro blanco.	79
Tabla 61	Relación de longitud – #Celdas = 100 – Sub cuenca Cerro blanco.....	79
Tabla 62	Relación de área – #Celdas = 100 – Sub cuenca Cerro blanco.	80
Tabla 63	Relación de bifurcación – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Chorobal.....	80
Tabla 64	Relación de longitud – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Chorobal.....	80
Tabla 65	Relación de área – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Chorobal.	80
Tabla 66	Relación de bifurcación – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Chorobal.....	81
Tabla 67	Relación de longitud – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Chorobal.....	81
Tabla 68	Relación de área – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Chorobal.	81
Tabla 69	Relación de bifurcación – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Chorobal.....	81
Tabla 70	Relación de longitud – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Chorobal.....	82
Tabla 71	Relación de área – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Chorobal.	82
Tabla 72	Relación de bifurcación – #Celdas = 800 – Sub cuenca Chorobal.....	82
Tabla 73	Relación de longitud – #Celdas = 800 – Sub cuenca Chorobal.....	82
Tabla 74	Relación de área – #Celdas = 800 – Sub cuenca Chorobal.	83
Tabla 75	Relación de bifurcación – #Celdas = 400 – Sub cuenca Chorobal.....	83
Tabla 76	Relación de longitud – #Celdas = 400 – Sub cuenca Chorobal.....	83
Tabla 77	Relación de área – #Celdas = 400 – Sub cuenca Chorobal.	84
Tabla 78	Relación de bifurcación – #Celdas = 200 – Sub cuenca Chorobal.....	84
Tabla 79	Relación de longitud – #Celdas = 200 – Sub cuenca Chorobal.....	84
Tabla 80	Relación de área – #Celdas = 200 – Sub cuenca Chorobal.	85
Tabla 81	Relación de bifurcación – #Celdas = 100 – Sub cuenca Chorobal.....	85
Tabla 82	Relación de longitud – #Celdas = 100 – Sub cuenca Chorobal.....	85
Tabla 83	Relación de área – #Celdas = 100 – Sub cuenca Chorobal.	86
Tabla 84	Parámetros de la red de drenaje - Sub cuenca Cerro blanco.....	95
Tabla 85	Parámetros de la red de drenaje - Sub cuenca Chorobal.	95

Tabla 86	Distancia en kilómetros de las estaciones a las unidades hidrográficas en referencia al centroide de cada sub cuenca.	102
Tabla 87	Datos necesarios para el análisis – Estación Julcán.....	104
Tabla 88	Datos necesarios para el análisis estadístico – Estación Huacamarcanga.	105
Tabla 89	Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la media – Estación Julcán.	106
Tabla 90	Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la desviación estándar – Estación Julcán.	107
Tabla 91	Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la media – Estación Huacamarcanga.....	108
Tabla 92	Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la desviación estándar – Estación Huacamarcanga.	109
Tabla 93	Datos necesarios para el análisis – Estación Huacamarcanga – 2 periodos.	111
Tabla 94	Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la media – Estación Huacamarcanga – 2 periodos.	111
Tabla 95	Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la desviación estándar – Estación Huacamarcanga – 2 periodos.....	112
Tabla 96	Cálculo y resultados del análisis estadístico de Tendencia de la media – Estación Julcán.	114
Tabla 97	Cálculo y resultados del análisis estadístico de Tendencia de la media – Estación Huacamarcanga.....	114
Tabla 98	Análisis de valores extremos - Estación Julcán.....	116
Tabla 99	Análisis de valores extremos - Estación Huacamarcanga.	117
Tabla 100	Análisis de valores extremos - Acueducto Chorobal.....	120
Tabla 101	Resumen prueba de Kolmogorov and Smirnov - Estación Julcán.	125
Tabla 102	Resumen prueba de Kolmogorov and Smirnov - Estación Huacamarcanga.	125
Tabla 103	Resumen prueba de Kolmogorov and Smirnov – Acueducto Chorobal..	126
Tabla 104	Resumen de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno - Estación Julcán.	126
Tabla 105	Resumen de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno - Estación Huacamarcanga.....	127
Tabla 106	Resumen de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno – Acueducto Chorobal.	128

Tabla 107	Características de la estación Laredo.....	129
Tabla 108	Análisis de valores extremos - Estación Laredo.....	130
Tabla 109	Resumen prueba de Kolmogorov and Smirnov - Estación Laredo.	132
Tabla 110	Resumen de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno – Estación Laredo.	132
Tabla 111	Precipitación máxima ajustada para cada estación.	134
Tabla 112	Precipitación por cada sub cuenca.	135
Tabla 113	Corrección de la precipitación en cada sub cuenca – Sub cuenca Cerro Blanco.	136
Tabla 114	Corrección de la precipitación en cada sub cuenca – Sub cuenca Chorobal.	137
Tabla 115	Patrón de discretización de la precipitación (24 horas).	138
Tabla 116	Identificación del Grupo Hidrológico.....	140
Tabla 117	Cálculo de la Curva Número - Sub cuenca Cerro Blanco.	141
Tabla 118	Cálculo de la Curva Número - Sub cuenca Chorobal.....	142
Tabla 119	Números de curva para distintas condiciones de humedad antecedente, la retención potencial máxima y la abstracción inicial.	143
Tabla 120	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 25 años.	144
Tabla 121	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 50 años.	145
Tabla 122	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 100 años.	146
Tabla 123	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 200 años.	147
Tabla 124	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 500 años.	148
Tabla 125	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 1000 años.	149

Tabla 126	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 25 años.	150
Tabla 127	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 50 años.	151
Tabla 128	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 100 años.	152
Tabla 129	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 200 años.	153
Tabla 130	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 500 años.	154
Tabla 131	Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 1000 años.	155
Tabla 132	Asignación de la velocidad promedio del cauce de orden mayor - Sub cuenca Cerro Blanco.	158
Tabla 133	Asignación de la velocidad promedio del cauce de orden mayor - Sub cuenca Chorobal.	158
Tabla 134	Relaciones de Horton y Schumm para cada sub cuenca.	159
Tabla 135	Resumen de los parámetros para el cálculo del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.	160
Tabla 136	Caudales pico para 25, 50 y 100 años de periodo de retorno.	169
Tabla 137	Caudales pico para 200, 500 y 1000 años de periodo de retorno.	169
Tabla 138	Resumen de resultados de caudales pico por la superposición de hidrogramas.	172
Tabla 139	Parámetros para el cálculo del tránsito hidrológico – Método de Muskingum.	173
Tabla 140	Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 25 Años.	174
Tabla 141	Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 50 Años.	175
Tabla 142	Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 100 Años. ...	176
Tabla 143	Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 200 Años. ...	177
Tabla 144	Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 500 Años. ...	178
Tabla 145	Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 1000 Años. ...	179

Tabla 146	Caudales pico a la salida del área en estudio (Estación Chorobal).....	180
Tabla 147	Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 6400.....	182
Tabla 148	Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 3200.....	182
Tabla 149	Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 1600.....	182
Tabla 150	Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 800.....	183
Tabla 151	Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 400.....	183
Tabla 152	Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 200.....	183
Tabla 153	Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 100.....	184
Tabla 154	Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 6400.	184
Tabla 155	Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 3200.	185
Tabla 156	Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 1600.	185
Tabla 157	Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 800.	185
Tabla 158	Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 400.	186
Tabla 159	Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 200.	186
Tabla 160	Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 100.	186
Tabla 161	Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 1600, sin considerar análisis de consistencia en la estación Huacamarcanga.....	187
Tabla 162	Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 1600, sin considerar análisis de consistencia en la estación Huacamarcanga.....	188
Tabla 163	Resumen del análisis de sensibilidad y aproximación óptima.....	188
Tabla 164	Cálculo del coeficiente de correlación de Pearson.	190

Tabla 165	Resumen de resultados del análisis para el cálculo de las relaciones de Horton y Schumm en relación del # celdas.	191
Tabla 166	Resumen de cálculo de la precipitación efectiva.	192
Tabla 167	Variables y parámetros para la construcción del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.....	193
Tabla 168	Valores interpretativos del factor de forma.	194

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cuenca hidrográfica (Cuenca del Amazonas).....	8
Figura 2 Izq. Cuenca Endorreica - Der. Cuenca Exorreica.	10
Figura 3 Clasificación de la cuenca de acuerdo a su elevación.....	11
Figura 4 Partes de la cuenca.	12
Figura 5 Influencia de la forma de la cuenca en el hidrograma.	14
Figura 6 Características de las curvas hipsométricas en ciclo erosivo.	17
Figura 7 Representación espacial de la cuenca usando SIG.....	20
Figura 8 Serie histórica de caudales promedios anuales.	21
Figura 9 Análisis de doble masa para determinar la estación base.	21
Figura 10 Serie con componente transitoria en la forma de salto.	22
Figura 11 Serie con componente transitoria en la forma en la forma de tendencia.	23
Figura 12 Ejemplo de transformación Lluvia-escorrentía.....	25
Figura 13 Representación distribución temporal de la precipitación.	26
Figura 14 Ejemplo de curvas P-D-F.....	26
Figura 15 Variables del método de abstracciones de precipitación del SCS.	28
Figura 16 Solución gráfica de la ecuación de escorrentía.	29
Figura 17 Curvas profundidad - área para reducir precipitación con el fin de obtener valores promedio en el área.....	31
Figura 18 Ejemplo de distribución temporal de una tormenta.	32
Figura 19 Distribución temporal de las abstracciones.....	32
Figura 20 Partes del hidrograma de escorrentía directa, según los principios del HU.	34
Figura 21 Almacenamiento por cuña y por prisma en un tramo de un canal.	35
Figura 22 Cuenca del riachuelo Miller, condado Blanco, mostrando la delimitación de órdenes de ríos.....	37
Figura 23 Parámetros geomorfológicos para la cuenca Mamón en Venezuela.....	38
Figura 24 Esquema del diseño de la investigación.....	47
Figura 25 Cuencas en estudio.....	49
Figura 26 Límite distrital de la zona en estudio.	50
Figura 27 Límite provincial de la zona en estudio.	50
Figura 28 Codificación de las sub cuencas en estudio.	52
Figura 29 Sección hidráulica del río Chorobal.....	53

Figura 30 Identificación de las estaciones meteorológicas.	54
Figura 31 Curvas de nivel, ríos y quebradas.	55
Figura 32 Modelo digital de elevación (Digital elevation model – DEM – resolución 12.5m).	56
Figura 33 Mapa de suelos del Perú.....	56
Figura 34 Mapa nacional de cobertura vegetal.....	57
Figura 35 Delimitación de las sub cuencas.	58
Figura 36 Curva hipsométrica de la sub cuenca Cerro blanco.	62
Figura 37 Curva hipsométrica de la sub cuenca Chorobal.	62
Figura 38 Polígono de frecuencias - Sub cuenca Cerro blanco.....	63
Figura 39 Polígono de frecuencias - Sub cuenca Chorobal.....	63
Figura 40 <i>Ensayo 1</i> : # de celdas 6400 = 1 km ²	65
Figura 41 <i>Ensayo 2</i> : # de celdas 3200 = 0.5 km ²	65
Figura 42 <i>Ensayo 3</i> : # de celdas 1600 = 0.25 km ²	66
Figura 43 <i>Ensayo 4</i> : # de celdas 800 = 0.125 km ²	66
Figura 44 <i>Ensayo 5</i> : # de celdas 400 = 0.0625 km ²	67
Figura 45 <i>Ensayo 6</i> : # de celdas 200 = 0.03125 km ²	67
Figura 46 <i>Ensayo 7</i> : # de celdas 100 = 0.015625 km ²	68
Figura 47 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 6400 = 1 km ² – Sub cuenca Cerro blanco.....	86
Figura 48 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 3200 = 0.5 km ² – Sub cuenca Cerro blanco.....	87
Figura 49 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 1600 = 0.25 km ² – Sub cuenca Cerro blanco.....	87
Figura 50 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 800 = 0.125 km ² – Sub cuenca Cerro blanco.....	88
Figura 51 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 400 = 0.0625 km ² – Sub cuenca Cerro Blanco.....	88
Figura 52 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 200 = 0.03125 km ² – Sub cuenca Cerro blanco.....	89
Figura 53 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 100 = 0.015625 km ² – Sub cuenca Cerro blanco.....	89
Figura 54 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 6400 = 1 km ² – Sub cuenca Chorobal.	90

Figura 55 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 3200 = 0.5 km ² – Sub cuenca Chorobal.	90
Figura 56 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 1600 = 0.25 km ² – Sub cuenca Chorobal.	91
Figura 57 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 800 = 0.125 km ² – Sub cuenca Chorobal.	91
Figura 58 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 400 = 0.0625 km ² – Sub cuenca Chorobal.	92
Figura 59 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 200 = 0.03125 km ² – Sub cuenca Chorobal.	92
Figura 60 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 100 = 0.015625 km ² – Sub cuenca Chorobal.	93
Figura 61 Perfil longitudinal del cauce principal - Sub cuenca Cerro blanco.....	94
Figura 62 Perfil longitudinal del cauce principal - Sub cuenca Chorobal.....	94
Figura 63 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Julcán.....	96
Figura 64 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Cachicadán.	97
Figura 65 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Huacamarcanga.	98
Figura 66 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Mollepata.....	98
Figura 67 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Quiruvilca.....	99
Figura 68 Caudales aforados máximos anuales – Estación de aforo “Acueducto Chorobal”.....	100
Figura 69 Análisis de doble masa para determinar la estación base - Estación Julcán...	101
Figura 70 Análisis de doble masa para determinar la estación base - Estación Cachicadán.....	101
Figura 71 Análisis de doble masa para determinar la estación base - Estación Huacamarcanga.	102
Figura 72 Análisis de doble masa para determinar la estación base - Estación Quiruvilca.....	102
Figura 73 Análisis de doble masa para obtener los periodos de estudio.....	103
Figura 74 Representación gráfica de las medias por cada muestra – Estación Julcán.	104
Figura 75 Representación gráfica de las medias por cada muestra – Estación Huacamarcanga.	105
Figura 76 Serie corregida de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Julcán 1971 - 2018.	108

Figura 77 Representación gráfica de las medias por cada muestra – Estación Huacamarca – 2 periodos.	111
Figura 78 Serie corregida de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Huacamarca 1971 – 2018 – 2 periodos.	113
Figura 79 Ajuste gráfico – Estación Julcán – Gamma 2P.	121
Figura 80 Ajuste gráfico – Estación Julcán – Gamma 3P.	121
Figura 81 Ajuste gráfico – Estación Julcán – Log Pearson tipo III.	121
Figura 82 Ajuste gráfico – Estación Julcán – Gumbel.	122
Figura 83 Ajuste gráfico – Estación Huacamarca – Gamma 2P.	122
Figura 84 Ajuste gráfico – Estación Huacamarca – Gamma 3P.	122
Figura 85 Ajuste gráfico – Est. Huacamarca – Log Pearson tipo III.	123
Figura 86 Ajuste gráfico – Estación Huacamarca – Gumbel.	123
Figura 87 Ajuste gráfico – Acueducto Chorobal – Gamma 2P.	123
Figura 88 Ajuste gráfico – Acueducto Chorobal – Gamma 3P.	124
Figura 89 Ajuste gráfico – Acueducto Chorobal – Log Pearson tipo III.	124
Figura 90 Ajuste gráfico – Acueducto Chorobal – Gumbel.	124
Figura 91 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Laredo.	129
Figura 92 Ajuste gráfico – Estación Laredo – Gamma 2P.	131
Figura 93 Ajuste gráfico – Estación Laredo – Gamma 3P.	131
Figura 94 Ajuste gráfico – Estación Laredo – Log Pearson tipo III.	131
Figura 95 Ajuste gráfico – Estación Laredo – Gumbel.	132
Figura 96 Estaciones consideradas en el cálculo de la precipitación media de cada sub cuenca.	135
Figura 97 Determinación del factor de reducción para ambas sub cuencas.	136
Figura 98 Patrón de curva P-D-F y Discretización de la precipitación.	138
Figura 99 Patrón de discretización de precipitación para una duración de 15 horas.	139
Figura 100 Hietograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 25 años.	145
Figura 101 Hietograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 50 años.	146
Figura 102 Hietograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 100 años.	147
Figura 103 Hietograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 200 años.	148

Figura 104 Hietograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 500 años.....	149
Figura 105 Hietograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 1000 años.....	150
Figura 106 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 25 años.	151
Figura 107 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 50 años.	152
Figura 108 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 100 años.	153
Figura 109 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 200 años.	154
Figura 110 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 500 años.	155
Figura 111 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 1000 años.	156
Figura 112 Sub cuencas y el cauce de mayor orden.....	157
Figura 113 Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico - Cerro Blanco.	160
Figura 114 Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico - Chorobal.	161
Figura 115 Conjunto de ecuaciones para la convolución de tiempo discreto.	163
Figura 116 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco – T=25 años.	163
Figura 117 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco – T=50 años.	164
Figura 118 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco – T=100 años.	164
Figura 119 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco – T=200 años.	165
Figura 120 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco – T=500 años.	165
Figura 121 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco – T=1000 años.	166
Figura 122 Transformación lluvia escorrentía – Chorobal – T=25 años.....	166
Figura 123 Transformación lluvia escorrentía – Chorobal – T=50 años.....	167
Figura 124 Transformación lluvia escorrentía – Chorobal – T=100 años.....	167
Figura 125 Transformación lluvia escorrentía – Chorobal – T=200 años.....	168
Figura 126 Transformación lluvia escorrentía – Chorobal – T=500 años.....	168
Figura 127 Transformación lluvia escorrentía – Chorobal – T=1000 años.....	169
Figura 128 Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 25 años.....	170
Figura 129 Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 50 años.....	170

Figura 130	Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 100 años.....	170
Figura 131	Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 200 años.....	171
Figura 132	Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 500 años.....	171
Figura 133	Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 1000 años.....	171
Figura 134	Tramo de tránsito hidrológico - Río Chorobal.....	172
Figura 135	Hidrograma de salida – Periodo de retorno 25 años.....	175
Figura 136	Hidrograma de salida – Periodo de retorno 50 años.....	176
Figura 137	Hidrograma de salida – Periodo de retorno 100 años.....	177
Figura 138	Hidrograma de salida – Periodo de retorno 200 años.....	178
Figura 139	Hidrograma de salida – Periodo de retorno 500 años.....	179
Figura 140	Hidrograma de salida – Periodo de retorno 1000 años.....	180
Figura 141	Hidrogramas unitarios instantáneos geomorfológicos de las sub cuencas Cerro blanco y Chorobal.....	193
Figura 142	Comparación entre caudales simulados y caudales extremos (registro de aforo en la estación Chorobal).	196
Figura 143	Comparación de caudales mediante la ecuación de regresión lineal.	197
Figura 144	Cruce de la quebrada Santa Clara y el trazo proyectado de la carretera Km. 72+140.....	198
Figura 145	Estado actual de la quebrada y la estructura existente.....	199
Figura 146	Cuenca y/o área de drenaje en el cruce entre el trazo proyectado y la quebrada Santa Clara.....	199
Figura 147	Cruce de la quebrada Purzulate y el trazo proyectado de la carretera Km. 30+660.....	200
Figura 148	Estado actual de la quebrada y la estructura existente.....	200
Figura 149	Cuenca y/o área de drenaje en el cruce entre el trazo proyectado y la quebrada Purzulate.....	200
Figura 150	Cruce de la quebrada Río Seco y el trazo proyectado de la carretera Km. 25+200.....	201
Figura 151	Estado actual de la quebrada y la estructura existente.....	201
Figura 152	Cuenca y/o área de drenaje en el cruce entre el trazo proyectado y la quebrada Río Seco.....	202
Figura 153	Parámetros de la socavación general y parámetros en una sección transversal del cauce natural.	203
Figura 154	Efectos del flujo en las pilas y socavación local.....	203

Figura 155 Patrones de flujo en un estribo.....	204
Figura 156 Secciones transversales en el análisis de un puente.....	204
Figura 157 Flujo a presión tipo compuerta.....	205
Figura 158 Flujo a presión totalmente sumergido.....	205
Figura 159 Flujo a presión en combinación con flujo tipo vertedero en la parte superior.	206

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Julcán.....	213
Anexo 2. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Cachicadán.	214
Anexo 3. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Huacamarcanga.	215
Anexo 4. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Mollepata.....	216
Anexo 5. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Quiruvilca.....	217
Anexo 6. Datos de caudal máximo - Acueducto Chorobal.	218
Anexo 7. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Laredo.....	219
Anexo 8. Valores CN para áreas urbanas.....	220
Anexo 9. Valores CN para tierras agrícolas cultivadas.....	221
Anexo 10. Valores CN para otras tierras agrícolas.	222
Anexo 11. Valores CN para pastizales áridos y semiáridos.....	223
Anexo 12. Grupo hidrológico según descripción del suelo.....	224

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de investigación

1.1.1. Descripción del problema

La geomorfología estudia y pretende cuantificar determinar rasgos de la superficie terrestre. La cuenca actúa como un colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimientos, esta función se realiza con ciertas pérdidas cuya interrelación con los factores hidrológicos, el clima y configuración del terreno es muy compleja.

A la fecha se ha comprobado la influencia de ciertos índices con las respuestas hidrológicas de una cuenca como son: el área, su forma, pendiente y elevación media, las características de su red de drenaje y las del cauce principal. Es conveniente aclarar que el carácter hidrológico tiende a formar las características físicas de la cuenca aceptando esta interrelación del poder predecir la respuesta hidrológica de una cuenca. Esto constituye una de las aplicaciones más importantes de la Geomorfología.

La metodología del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico (HUIG) Rodríguez-Iturbe & Valdés (1979), plantea una relación entre la escorrentía y la red drenaje ordenada según Horton (1945) los cuales derivan las leyes de número (Relación de bifurcación) y de longitud (Relación de longitud) de los ríos de diferente orden y que luego es modificada por Strahler (1964), que después con un raciocinio similar Schumm (1965) propuso la ley de áreas (Relación de áreas) que relacionan las áreas promedio que se drenan por ríos de ordenes sucesivos.

En el Perú, la investigación en cuanto a la materia no viene desarrollándose a pasos agigantados, a pesar de que el recurso hídrico es de gran potencial y relevancia en el país; en los estudios hidrológicos existentes se hace uso de metodologías extranjeras que tienen detrás años de investigación que las respaldan pero que arrojan parámetros que son validados en los países que las desarrollan, por lo que es necesario que estas sean adaptadas a nuestra realidad.

Este trabajo pretende poner de manifiesto el interés del uso de esquemas simples para el cálculo de máximas que incorporen las relaciones entre el régimen hidrológico y las características fisiográficas de una cuenca como variables además de datos hidrológicos ya existentes, y su aplicación en las unidades hidrográficas Chorobal y Cerro Blanco, pertenecientes a la cuenca del Río Huamantla ubicada al norte del país.

1.1.2. Formulación del problema

La interrogante a resolver responde:

¿Con qué grado de veracidad inciden las relaciones de Horton y Schumm, a partir de las características fisiográficas como variables en la generación de hidrogramas de escorrentía directa en las unidades hidrográficas Chorobal y Cerro Blanco, en comparación con los registros históricos en la estación hidrológica Chorobal, a través de la metodología del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico?

1.2. Justificación

Los eventos extraordinarios, como los eventos del Fenómeno del Niño (1891, 1925, 1982/83, 1997/98, además de otros posteriores con intensidad débil y moderada) y del fenómeno conocido como “Niño costero” (2016/17), se han presentado en nuestro país desde mucho tiempo antes a que fueran registradas de manera histórica o que fueran cuantificados meteorológicamente; aunque el evento mencionado ha manifestado un riesgo mayor debido a los cambios del ciclo natural. Este potente riesgo se agrava debido a una ausencia casi total de acciones de los organismos gubernamentales de control de mitigación y/o prevención y una serie de actividades humanas no controladas, lo que termina en repercusiones que van más allá de las pérdidas tanto económicas como de infraestructura y comunicación, sino de alteración ecológica y la pérdida de vidas humanas. Por lo que existe la necesidad de realizar proyectos de mitigación y/o prevención ante eventos extremos para el diseño de obras que permitan contener y minimizar los daños causados por las inundaciones y las corrientes extremas.

Debido al inadecuado sistema de monitoreo hidrológico, el empleo de metodologías empíricas que se basan en parámetros fisiográficos son

herramientas alternativas además de viables ya que estos parámetros son únicos para cada cuenca en particular.

Las unidades hidrográficas mencionadas, son de las tantas cuencas que presentan los problemas de monitoreo y la necesidad de una metodología alternativa como es el propuesto por el hidrograma unitario instantáneo geomorfológico, que presenta una ventaja frente a otros métodos sintéticos ya que de manera directa y/o indirecta se formula en función de variables fisiográficas que son particulares en cada cuenca siendo es una herramienta viable.

1.3. Viabilidad de la investigación

El presente trabajo cuenta con información básica para su desarrollo, a fin de cumplir con el objetivo principal y los objetivos específicos. Esta información es de libre acceso como son:

- 1.** Datos pluviométricos históricos, obtenidos vía web del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología).
- 2.** Modelos digitales de elevación, que se encuentran para libre descarga en la web, como son las imágenes tomadas vías satélite, en este caso la del satélite ALOS Palsar.
- 3.** Cartografía digital, obtenidos de oficinas gubernamentales como son el Ministerio del Ambiente (MINAM), Ministerio de Agricultura (MINAGRI) a través de sus oficinas SENAMHI Y ANA (Autoridad Nacional del Agua).
- 4.** Bibliografía, ya sea en libros como en publicaciones en la web.

La dificultad que limita el cumplir con cada objetivo, viene dado por que la información de libre acceso no se encuentra procesada ni apta para su directa aplicación, esto no afecta la viabilidad del presente trabajo pues se contempla la optimización de estos.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Validar las relaciones de Horton y Schumm, a partir de sus características fisiográficas para la generación de hidrogramas de escorrentía directa en las sub cuencas Chorobal y Cerro Blanco de la cuenca Huamantla.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Determinar las relaciones de Horton y Schumm (siendo estas las relaciones de bifurcación, longitud y de área) a partir de las características fisiográficas de las sub cuencas en estudio, previa revisión de la información cartográfica y de los datos que resulten del proceso; que servirán para calcular, así como otras características necesarias, valiéndose de los sistemas de información geográfica.
2. Calcular el valor de precipitación efectiva en cada sub cuenca, para determinados periodos de retorno, cuyo procedimiento comprende el reunir y ordenar datos (meteorológicos e hidrológicos), aplicar métodos de ajuste estadísticos, la precipitación media en el área de cada sub cuenca y por último la infiltración, esto para cada tormenta calculada por cada periodo de retorno. Representar la tormenta calculada anteriormente con respecto al tiempo, aplicando diferentes métodos, comparar y elegir el adecuado para el presente trabajo.
3. Generar el hidrograma unitario instantáneo, con la metodología del “Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico” desarrollado por Rodríguez-Iturbe y Valdés (1979), el cual relaciona la respuesta hidrológica de la cuenca a sus parámetros geomorfológicos y al parámetro dinámico de velocidad del flujo, en cada unidad hidrográfica mencionada.
4. Generar los hidrogramas de escorrentía directa en cada sub cuenca, producto de la convolución entre la precipitación efectiva y el hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.

5. Generar un hidrograma de escorrentía final producto de la superposición de los hidrogramas generados anteriormente para cada unidad hidrográfica y el tránsito de este al punto en comparación.
6. Realizar el análisis de sensibilidad de parámetros, calibración y validación del modelo.
7. Aplicación de la metodología como alternativa, a otros modelos, de solución en la problemática real de cuencas y/o sub cuencas sin información dentro del área en estudio como dato hidrológico para el diseño de obras lineales y/o transversales al cauce o cauces contenidos en la red hídrica del área en estudio, como son el análisis hidráulico de puentes, alcantarillas, badenes, obras de protección ante eventos máximos, determinación de llanuras de inundación, etc.

CAPÍTULO II

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes

En el Perú y el mundo se han hecho investigaciones de eventos hidrológicos extremos y sus consecuencias, los modelos matemáticos para la generación de respuestas hidrológicas ha sido puesto en práctica, Latinoamérica no se excluye de la investigación de estos, por lo que en el presente trabajo se mencionan algunos.

2.1.1. Antecedentes nacionales

En los informes (Ramos Taipe, Apaella Nalvarte, & Ochoa Acuña, 2010), desarrollan a solicitud de la Autoridad Nacional de Agua, dentro del marco de la modernización de la gestión de la Agricultura y en cumplimiento del Artículo 119° de la Ley 29338, en donde en conjunto con los consejos de cuenca respectivos, fomenta programas integrales de control de avenidas, desastres naturales o artificiales y prevención de daños por inundaciones o por otros impactos del agua y sus bienes asociados, promoviendo la coordinación de acciones estructurales, institucionales y operaciones necesarias. Cada estudio se orientó a conocer el comportamiento hidrológico de las cuencas y las crecidas máximas, en los periodos de avenidas para las cuencas de la vertiente del Pacífico del litoral peruano, aplicando un análisis estadístico de los caudales máximos y sus valores a diferente periodo de retorno con un previo ajuste a una función de probabilidad. Se concluyó que los valores estimados por métodos estadísticos dependen de la calidad de la información existente y muchos arrojan resultados subestimados.

(Cachuán Dávila, 2017) Para optar el título profesional de Ingeniero Civil en la Universidad Nacional del Centro del Perú, en la tesis “Modelo Hidrológico para la generación de Crecidas Máximas empleando el Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico en la sub cuenca del Rio Shullcas”, el estudio nace a consecuencia de que el río Schullcas existe una estación hidrométrica de datos escasos y dos estaciones pluviométricas que proporcionan datos inconsistentes al valle con restricciones en la medición. Debido a que en épocas de avenidas la oferta de agua sobrepasa la demanda de esta, esta se

desperdicia en procesos de infiltración e inundaciones, al no tenerse un registro confiable de caudales máximos que evidencia el potencial que no se aprovecha. Como solución, el autor plantea la simulación de eventos extremos como alternativa confiable para la generación de crecidas, a través del método del Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico, en la cuenca en estudio, simulando una respuesta a eventos extremos de precipitación mediante la convolución de características climatológicas y geomorfológicas. Concluyendo que el método indica un modelamiento válido y próximo para un alto nivel de confianza.

2.1.2. Antecedentes internacionales

(Echeverri Vélez, 2007) Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Civil – Hidráulica en la Universidad Nacional Autónoma de México, en la tesis “Estudio de las crecientes en las Cuencas de la Costa del Estado de Chiapas”, el estudio se origina a consecuencia a las tormentas tropicales periódicas que generaron precipitaciones de gran intensidad y que a su paso dejan cuantiosas pérdidas ambientales y económicas en la cuenca de Chiapas, produciendo la necesidad tener un modelo de generación de crecidas. La metodología que fue empleada fue la del Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico, que en convolución con el hietograma de diseño obtenido a partir de un mapa de isoyetas de la data histórica de la estación Coatán. La validación del modelo consistió en reproducir el evento de algunas tormentas particulares y el evento de diseño esperado para cien años de periodo de retorno; los resultados obtenidos fueron del mismo orden de que los medidos para las tormentas particulares.

(Vikrant & Rajiv, 2003), el estudio parte de la necesidad de atender el manejo de las inundaciones en las cuencas hidrográficas del Himalaya, siendo esta una de las regiones más afectadas por las inundaciones en el mundo, además la aplicación de los métodos convencionales de modelos de escorrentía es difícil debido a la ausencia de un número adecuado de estaciones pluviométricas. La aplicación de Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico, para derivar el hidrograma unitario de estas cuencas, proporciona un enfoque adecuado ya que proporciona una respuesta hidrológica de una cuenca fluvial sobre la base de las características físicas

definidas por las relaciones morfométricas de Horton teniendo una ventaja por sobre otros métodos tradicionales debido a que las características morfométricas de cada cuenca pueden ser conocidas. Se concluye que además de tener una buena estimación de la respuesta hidrológica de una cuenca, el método proporciona una variabilidad en el espacio y el tiempo dando un carácter dinámico de esta, debido al efecto de la consideración del efecto de la velocidad en la metodología.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Concepto de cuenca

Es un espacio geográfico cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por las precipitaciones y cuyos excedentes en agua o materias solidas transportadas por el agua forman, en un punto espacial único, una desembocadura (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009).

La definición anterior se refiere a excedentes de agua se refiere a drenaje superficial, ya que cada cuenca está asociada a una cuenca subterránea cuya forma en planta es similar a la forma superficial, formada debido a la infiltración (Aparicio Mijares, 2012).



Figura 1 Cuenca hidrográfica (Cuenca del Amazonas).

Fuente: (Wikipedia, s.f.).

2.2.1.1. Clasificación de la cuenca

2.2.1.1.1. Según el tamaño

Una cuenca se puede clasificar según su tamaño en cuencas grandes y cuencas pequeñas.

A) Cuenca grande

En donde el área es mayor a 250 km², predominando las características fisiográficas como pendiente, elevación, área, cauce, etc. (Campos Aranda D. F., 1987)

B) Cuenca pequeña

En donde el área es menor a 250 km², donde la forma y la cantidad de escurrimiento están influenciado por las características físicas del suelo como el tipo de este y la vegetación contenida en la cuenca (Campos Aranda D. F., 1987), en la tabla 1 se aprecian rangos de clasificación según el tamaño.

Tabla 1

Clasificación propuesta para las cuencas según su tamaño.

Área (km²)	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia – pequeña
500 a 2500	Intermedia – grande
2500 a 5000	Grande
> 5000	Muy grande

Fuente: (Campos Aranda D. F., 1987).

2.2.1.1.2. Según su desembocadura

En función de la salida de la de una cuenca, existen dos tipos de cuencas.

A) Cuencas endorreicas

Donde el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente esta se da en un lago. (Aparicio Mijares, 2012)

B) Cuencas exorreicas

El punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y esta puede ser en otra corriente o en el mar. (Aparicio Mijares, 2012).

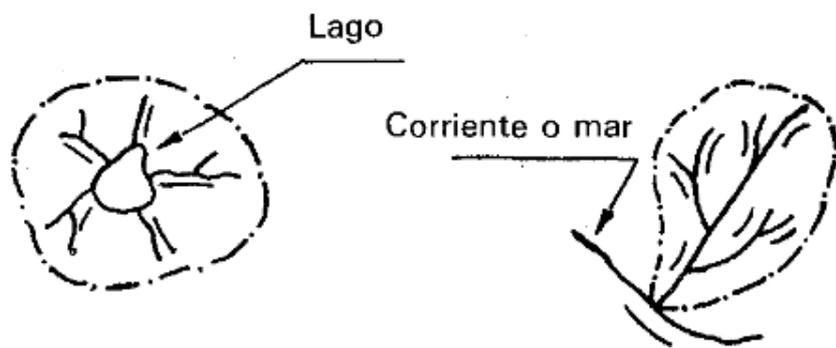


Figura 2 Izq. Cuenca Endorreica - Der. Cuenca Exorreica.

Fuente: (Aparicio Mijares, 2012).

2.2.1.1.3. Según su elevación

Además de la clasificación anterior, podemos clasificarlas según la elevación relativa de sus partes, se aplica en cuencas andinas, se puede clasificar en cuencas alta, media y baja. (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009)

A) Cuenca alta

También llamada como cuenca de cabecera o de recepción de esta; por su posición, capta y almacena en los nevados y glaciares de sus cumbres, también en lagunas y represamientos, tiene mayores aportes provenientes de la precipitación. (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009).

B) Cuenca media

Se caracteriza por tener una mayor pendiente relativa causando un caudal con torrentes turbulentos con el transporte de sedimentos. (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009).

C) Cuenca baja

A este nivel y/o elevación la pendiente relativa es menor por lo que el caudal de flujo se considera continuo y con cauce definido, amplias llanuras de inundación además de presentar zonas de depósito de sedimentos. (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009). En la figura 3 se muestra una representación de las partes de la cuenca según la elevación.

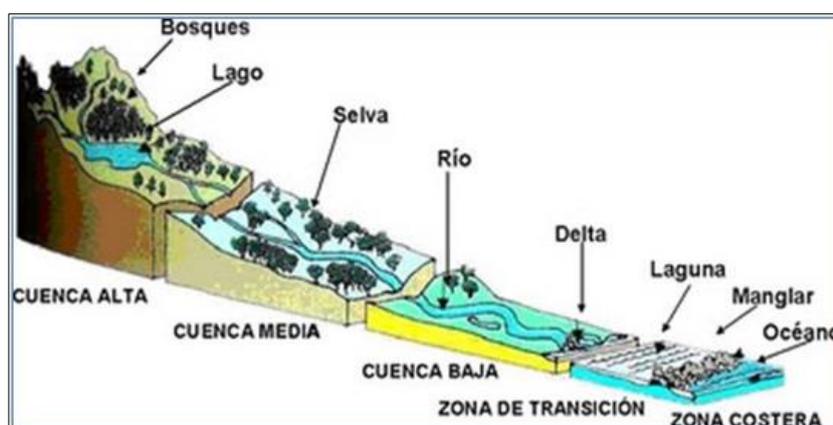


Figura 3 Clasificación de la cuenca de acuerdo a su elevación.

Fuente: (Ordoñez Gálvez, 2011).

2.2.1.2. Características geomorfológicas de la cuenca

Según (De Pedraza Gilzans, 1996), las características geomorfológicas vienen a ser un conjunto de técnicas y métodos, utilizados atributos y configuraciones del relieve de una cuenca y, en base a ellos, conocer el sistema de relaciones espaciales que caracterizan a las formas del terreno.

2.2.1.2.1. Elementos de la cuenca

A) Área de la cuenca y parteaguas

Según (Aparicio Mijares, 2012), el área de la cuenca se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas que es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que la separa de cuencas vecinas.

B) Cauce principal y corrientes tributarias

El cauce principal es la corriente que pasa por la salida de la cuenca, aplicada únicamente a cuencas exorreicas y las demás corrientes se denominan tributarias, además más tributarias tenga una cuenca más rápida es su respuesta a la precipitación (Aparicio Mijares, 2012). En la figura 4, se muestra gráficamente lo expuesto.

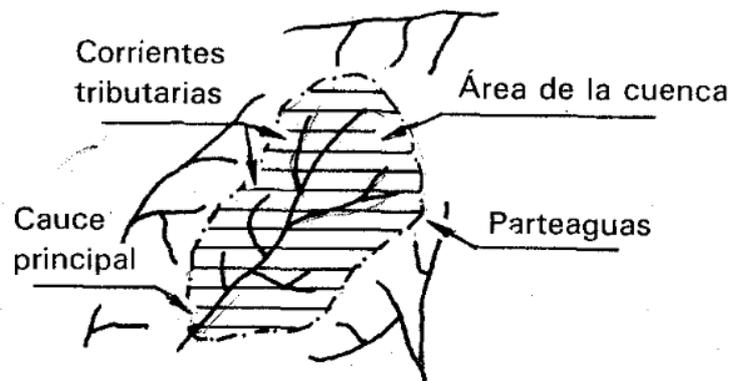


Figura 4 Partes de la cuenca.

Fuente: (Aparicio Mijares, 2012).

2.2.1.2.2. Morfometría de la cuenca

Según (Gaspari & otros, 2013), esta nos proporciona una descripción física – espacial que permite realizar comparaciones entre distintas cuencas hidrográficas. Al mismo tiempo, ofrecen conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales.

2.2.1.2.2.1. Parámetros de forma

Debido a la influencia de la forma de la cuenca en el movimiento del agua y en la respuesta hidrológica, se ha de cuantificar parámetros por medio de índices o coeficientes (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009), a continuación, se muestran algunos.

Tabla 2

Índices y/o coeficientes según la forma de la cuenca

Parámetro	Fórmula	Descripción
Índice de compacidad o Coeficiente de Gravelius (Ic)	$I_C = \frac{P}{P_0}$	<p>Es el cociente que existe entre el perímetro de la cuenca, y el perímetro equivalente de una circunferencia, que tiene la misma área de la cuenca (Campos Aranda D. F., 1987).</p> <p>Criterio: Si $I_c = 1$ la cuenca tiene forma circular, este coeficiente nos da luces sobre la escorrentía y la forma del hidrograma de salida. Si I_c es diferente de 1 la cuenca es de forma irregular.</p>
Factor de forma (Ff)	$F_f = \frac{B}{L_C}$	<p>Fue definido por Horton, es el cociente entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud del cauce principal.</p> <p>Criterio: Este factor muestra que las cuencas no son similares en forma, y a medida que el área aumenta la relación A/L^2 disminuye, indicando una tendencia al alargamiento en cuencas grandes y esta forma influye en los hidrogramas de caudales máxima.</p>
Relación de Elongación (Re)	$R_e = \frac{D}{L_C}$	<p>Definido por Schumm, es la relación entre el diámetro de un círculo de igual área a la cuenca y la longitud de la cuenca.</p> <p>Criterio: Si R_e se aproxima a 1.00 son regiones de relieve bajo, en cambio sí se encuentra entre 0.60 a 0.80 son regiones de fuertes relieves y pendientes pronunciadas.</p>
Relación de circularidad (Rci)	$R_{c_i} = \frac{4\pi A}{P^2}$	<p>Es el cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuyo perímetro es igual al de la cuenca.</p> <p>Criterio:</p>

Parámetro	Fórmula	Descripción
		Cuando R_{ci} tiende a 1.00 la cuenca toma forma circular y si R_{ci} es 0.785 o menor la cuenca se considera cuadrada.

Fuente: (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009)

Como se mencionó anteriormente la forma de la cuenca afecta las características de la descarga de la corriente de agua, principalmente en los eventos de flujo extremo. En general, de una cuenca de forma casi circular será distintos a una cuenca de forma estrecha y alargada con la misma área (Campos Aranda D. F., 1987).

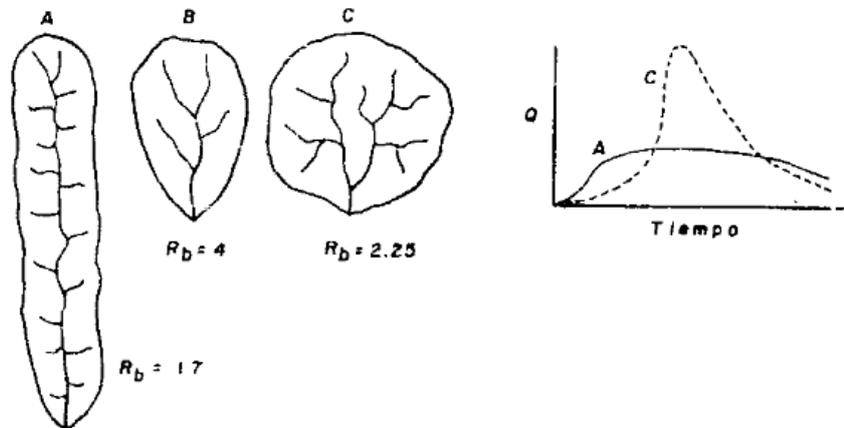


Figura 5 Influencia de la forma de la cuenca en el hidrograma.

Fuente: (Campos Aranda D. F., 1987).

2.2.1.2.2.2. Parámetros de relieve

Para la descripción del relieve de una cuenca hay parámetros desarrollados por varios autores (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009); entre los más utilizados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

Índices y/o coeficientes según el relieve de la cuenca.

Parámetro	Fórmula	Descripción
Pendiente media de la cuenca (S)	1. J.W. Alvord	La pendiente media de la cuenca tiene relación en parámetros como la infiltración, el flujo superficial y subterráneo. Criterio: Controla el tiempo de flujo sobre el terreno y en la magnitud de las crecidas.
	$S_C = \frac{D * L_n}{A}$	
Clasificación de pendiente	2. R.E. Horton	Clasificar la pendiente permite categorizar el relieve del área del terreno de la cuenca. Criterio: Se puede establecer desde un tipo de terreno plano, accidentado hasta muy escarpado, ver tabla 4.
	$S_{(x,y)} = \frac{n_{(x,y)} D_e}{L_{(x,y)}}$	
Curva hipsométrica	-	Es la representación gráfica del relieve de la cuenca, indicando el porcentaje de área de la cuenca que existe por encima de una cota determinada. Criterio: En la figura se muestra tres curvas de cuencas hipotéticas en donde: (A) Potencialmente erosivo en fase joven. (B) En equilibrio de fase madura. (C) Sedimentaria en fase de vejez. Además, se determina la Altitud media correspondiente al área
	-	

Parámetro	Fórmula	Descripción
		por debajo y encima del 50% Ver figura 6.
Diagrama de frecuencias altimétricas	-	Es la representación gráfica, de la distribución en porcentaje de las superficies ocupadas por diferentes altitudes. Criterio: Se determina la altitud más frecuente.
Tiempo de concentración (Tc)	Fórmula de Kirpich: $T_C = 0.06626 \left(\frac{L_P^2}{S} \right)^{0.385}$	Tiempo necesario para que toda la cuenca contribuya eficazmente a la generación del flujo de desagüe. Criterio: El tiempo de concentración no es constante y depende de la intensidad y la precipitación.

Fuente: (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009)

Tabla 4

Clasificación de pendiente en cuencas.

PENDIENTE (%)	TIPO DE TERRENO
2	Plano
5	Suave
10	Accidentado medio
15	Accidentado
25	Fuertemente accidentado
50	Escarpado
>50	Muy escarpado

Fuente: (Campos Aranda D. , 1992)

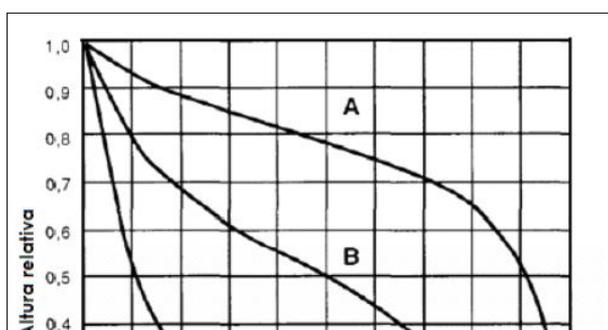


Figura 6 Características de las curvas hipsométricas en ciclo erosivo.

Fuente: (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009)

2.2.1.2.2.3. Otros parámetros

En la tabla 5, se mencionan otros parámetros asociados a la cuenca.

Tabla 5

Otros parámetros de la cuenca.

Parámetro	Fórmula	Descripción
Ancho máximo (E)	-	El ancho máximo de la cuenca, pasa generalmente próximo al centro de gravedad de esta.
Longitud de la cuenca (Lc)	-	Es la distancia entre la salida y el punto más alejado, cerca de la cabecera del cauce principal, medida en línea recta.
Ancho medio (Bm)	$B_m = \frac{A}{L_C}$	Es la relación entre el área de la cuenca y la longitud de la cuenca.
Longitud al centro de gravedad (La)	-	Corresponde a la distancia medida en línea recta desde el punto de concentración al baricentro de la figura geométrica de la cuenca o a la proyección del cauce principal.

Fuente: (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009).

2.2.1.2.2.4. Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca

Según (Ven Te Chow y Otros, 1994), el estudio cuantitativo de la forma del terreno superficial, se utiliza para realizar medidas de

similaridad geométrica entre cuencas, en especial entre sus redes de ríos.

Tabla 6

Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca.

Parámetro	Fórmula	Descripción
Orden jerárquico de la cuenca	-	Refleja el grado de ramificación de la red de drenaje, existiendo metodologías para asignar el orden a la cuenca (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009). El método propuesto por Horton (1942), modificada luego por Strahler (1952), los cauces sin tributarios reciben el orden 1, que al juntarse forma uno de orden 2 y así sucesivamente, el curso principal lleva el máximo número de orden, definiéndose.
Longitud de la red hídrica y longitud del cauce principal	-	La longitud de la red hídrica es la suma de todos los cauces que pertenecen a la red de drenaje de la cuenca. La longitud del cauce principal viene a ser la longitud del cauce de mayor orden en la red hídrica.
Densidad de drenaje	$D_d = \frac{L_t}{A}$	Horton (1945), expuso la densidad de drenaje como el cociente entre la longitud total de la red hídrica y el área de la cuenca.
Índice de sinuosidad	$S_i = \frac{L_C}{L_t}$	Schumm (1963), propuso el índice de sinuosidad como el cociente de la longitud del cauce principal entre la longitud del valle, un valor de

Parámetro	Fórmula	Descripción
Relaciones o leyes de composición del drenaje	$R_B = \frac{N_{i+1}}{N_i}$ $R_L = \frac{L_i}{L_{i+1}}$ $R_A = \frac{A_i}{A_{i+1}}$	<p>sinuosidad menor a 1.25 se define como baja sinuosidad.</p> <p>Horton (1945), inicio el estudio cuantitativo de redes de ríos, derivando algunas leyes al relacionar el número y la longitud (Ven Te Chow y Otros, 1994) y Schumm (1953), con un criterio similar, propuso la relación de las áreas (Ven Te Chow y Otros, 1994).</p>

Fuente: (Cachuán Dávila, 2017).

2.2.2. Sistemas de información geográfica y la hidrología

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la hidrología son campos que comparten intereses, por lo que cada vez más estudiosos del tema se apoyan en los SIG para el modelamiento hidrológico, particularmente cuando se desea representar espacialmente una cuenca (Morad & Triviño Pérez, 2001).

Para el modelamiento hidrológico apoyado en los SIG, es necesario partir de los MDT, pues estos ofrecen una representación espacial de la realidad y admiten la simulación de algunos procesos físicos que ocurren en la cuenca (Echeverri Vélez, 2007).

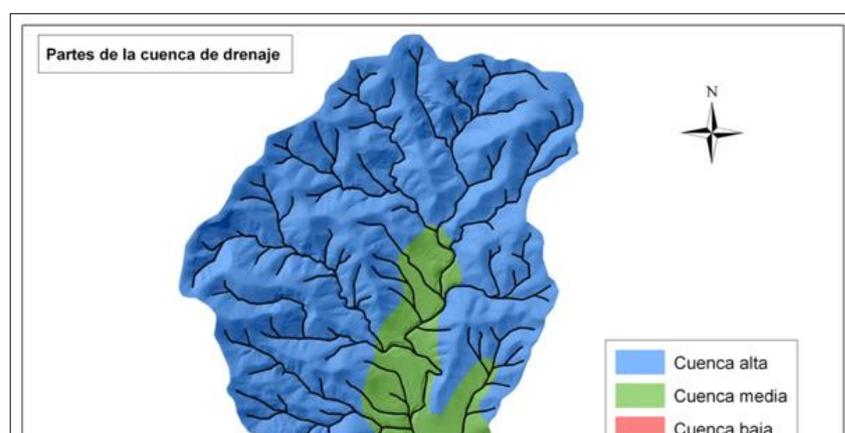


Figura 7 Representación espacial de la cuenca usando SIG.

Fuente: (López, Ángel, 2013).

2.2.3. Datos hidrológicos, análisis y tratamiento

2.2.3.1. Datos hidrológicos

El especialista que desarrolla un estudio hidrológico, tiene la necesidad de buscar la información de la cuenca en estudio en las instituciones encargadas de la medición de datos de fenómenos naturales (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005).

En el Perú el organismo encargado de generar y proveer información y conocimiento meteorológico, hidrológico y climático de manera confiable, oportuna y accesible en beneficio de la sociedad peruana, es el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología).

2.2.3.2. Análisis y tratamiento hidrológico

2.2.3.2.1. Análisis de consistencia

Previamente al uso de la serie histórica en el modelo, es imprescindible realizar el análisis de consistencia respectivo, con el fin de obtener una serie confiable (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005), determinándose generalmente mediante: Análisis visual gráfico, análisis de doble masa y análisis estadístico.

2.2.3.2.1.1. Análisis visual gráfico

Este análisis sirve para analizar la consistencia de la información hidrológica de manera visual, y detectar los periodos donde la

información es dudosa, lo que puede reflejarse en picos altos o bajos, saltos y tendencias (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005). A continuación, se muestra un ejemplo de serie histórica de caudales para su análisis visual gráfico.

Figura 8 Serie histórica de caudales promedios anuales.

Fuente: (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005).

2.2.3.2.1.2. Análisis de doble masa

El análisis consiste en la información hidrológica, precipitación acumulada de la estación que se analiza con el valor medio de la precipitación anual acumulada de un grupo de estaciones vecinas (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009). En la siguiente figura se muestra una gráfica de análisis de doble masa.

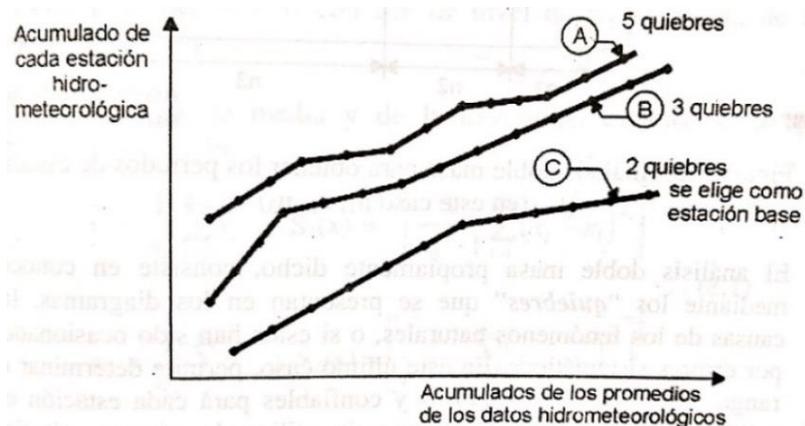


Figura 9 Análisis de doble masa para determinar la estación base.

Fuente: (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005)

2.2.3.2.1.3. Análisis estadístico

Luego de realizar los análisis anteriores, y hallar los periodos de posible corrección se procede al análisis estadístico de saltos y de tendencia, tanto para la media como en la desviación estándar (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005).

A) Análisis de saltos

Los saltos son formas determinísticas que permiten a una serie de datos históricos periódicos pasar de un estado a otro, influenciados por cambios naturales o provocados por el hombre (Cachuán Dávila, 2017), en la siguiente figura se muestra una forma de salto.

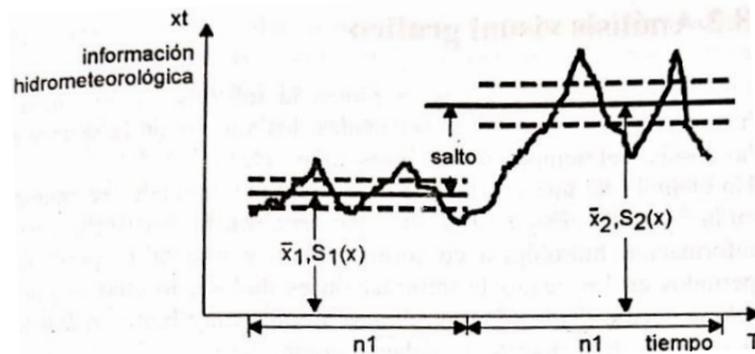


Figura 10 Serie con componente transitoria en la forma de salto.

Fuente: (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005).

Este análisis consiste en probar si los valores de la media y desviación estándar de cada sub muestras son estadísticamente iguales o diferentes con una probabilidad de 95% de confianza o nivel de significancia de 5% (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005), mediante la prueba t de “Student” y la prueba F de Fisher Snedecor.

B) Análisis de tendencia

Las tendencias son componentes determinísticas transitorias, se definen como un cambio sistemático y continuo sobre una muestra de información hidrometeorológica que afecta las distribuciones y dependencias de las series (Cachuán Dávila, 2017), en la figura 11 se muestra una forma de tendencia.

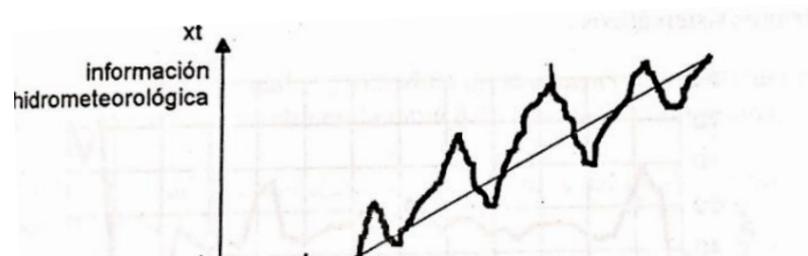


Figura 11 Serie con componente transitoria en la forma en la forma de tendencia.

Fuente: (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005).

2.2.3.2.2. Distribuciones probabilísticas de valores extremos

En estadística existen muchas funciones de distribución de probabilidad teóricas, en la tabla 7 se muestran las funciones de probabilidad teóricas consideradas en el presente trabajo.

Tabla 7

Funciones de distribución de probabilidad teóricas consideradas.

Distribución	Función densidad $f(x)$	Función acumulada $F(x)$	Función acoplada	Parámetros
Gamma 2 Parámetros	$\frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}$	$\frac{\Gamma_x(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$	<u>Función Gamma</u> $\Gamma(\alpha)$ $\int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt$	
Gamma 3 Parámetros	$\frac{(x-\gamma)^{\alpha-1} e^{-\frac{(x-\gamma)}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}$	$\frac{\Gamma_{x-\gamma}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$	<u>Función Gamma Incompleta</u> $\int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$	α de forma β de escala γ de localización
Log Pearson Tipo III	$\frac{\left(\frac{\ln x - \gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\frac{\ln x - \gamma}{\beta}}}{x \beta \Gamma(\alpha)}$	$\frac{\Gamma_{\frac{\ln x - \gamma}{\beta}}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$	<u>Función Gamma Incompleta</u> $\int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$	
Gumbel	$\frac{e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}} e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}}{\sigma}$	$e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}}$	-	σ de escala μ de localización

Fuente: (EasyFit Technologies MathWave, 2015), centro de ayuda al usuario.

2.2.3.2.3. Prueba de bondad de ajuste

En (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005), Esta prueba consiste en comprobar de manera gráfica y estadísticamente si la frecuencia empírica de la serie analizada se ajusta a una determinada distribución de probabilidad teórica, para el presente trabajo se considerará la Prueba de Smirnov – Kolmogorov, esta compara las diferencias entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad de la distribución teórica, tomando el valor máximo de valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica del modelo, como se muestra:

$$\Delta = \max |F(x) - P(x)| \quad \text{Ec. 2.24}$$

En la tabla 8, se muestra la tolerancia de los valores críticos en la prueba de Kolmogorov – Smirnov.

Tabla 8

Tabla de valores críticos de la prueba KS.

Prueba de Smirnov-Kolmogorov					
valores críticos $p(\alpha, n)$					
Tamaño de la muestra	Nivel de significancia α				
	20%	15%	10%	5%	1%
1	0.9000	0.9250	0.9500	0.9750	0.9950
2	0.6840	0.7260	0.7760	0.8420	0.9290
3	0.5650	0.5970	0.6420	0.7080	0.8280
4	0.4940	0.5250	0.5640	0.6240	0.7330
5	0.4460	0.4740	0.5100	0.5650	0.6690
10	0.3220	0.3420	0.3680	0.4100	0.4900
15	0.2660	0.2830	0.3040	0.3380	0.4040
20	0.2310	0.2460	0.2640	0.2940	0.3560
30	0.1928	0.2054	0.2233	0.2546	0.3092
35	0.1795	0.1913	0.2084	0.2387	0.2907
≥ 35	$1.07/\sqrt{N}$	$1.14/\sqrt{N}$	$1.22/\sqrt{N}$	$1.36/\sqrt{N}$	$1.63/\sqrt{N}$

Fuente: (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005).

2.2.4. Transformación lluvia - escorrentía

Luego de analizar el régimen de precipitaciones de una cuenca, se procede a determinar sus pérdidas por infiltración, obteniendo la precipitación efectiva, para luego transformar esa lluvia en escorrentía o caudal (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009). En la figura 12 se muestra un ejemplo del sistema lluvia – escorrentía.

2.2.4.1. Tormenta de diseño

Es un patrón de precipitación definido para utilizar en el diseño del modelo hidrológico como parámetro de entrada para generar caudales de salida, definiéndose mediante un valor de profundidad de precipitación, y se calculan mediante procedimientos de lluvia-escorrentía (Ven Te Chow y Otros, 1994). En la figura 13 se muestra una la variación temporal de la precipitación.

2.2.4.1.1. Curvas precipitación – duración – periodo de retorno

Una vez que se han obtenido los resultados del análisis estadístico y el ajuste de probabilidades para todos los periodos de retorno considerados, se procede a construir las curvas P-D-F (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009).

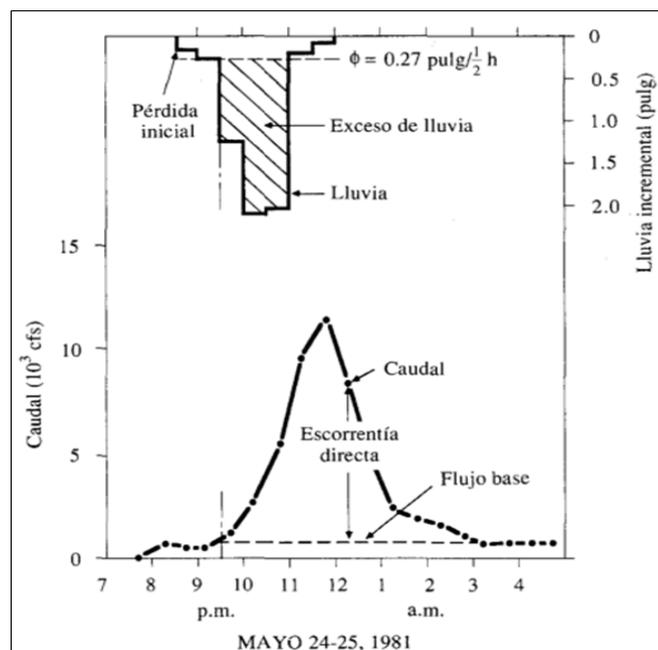


Figura 12 Ejemplo de transformación Lluvia-escorrentía.

Fuente: (Ven Te Chow y Otros, 1994).

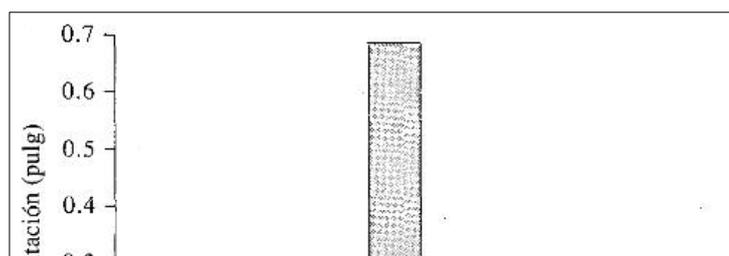


Figura 13 Representación distribución temporal de la precipitación.

Fuente: (Ven Te Chow y Otros, 1994).

Estas curvas determinan las características y/o el comportamiento de la zona o región, en función de sus variables: magnitud, duración y frecuencia (Campos Aranda D. F., 1987). En la figura 14, se muestra un ejemplo de las curvas P-D-F.

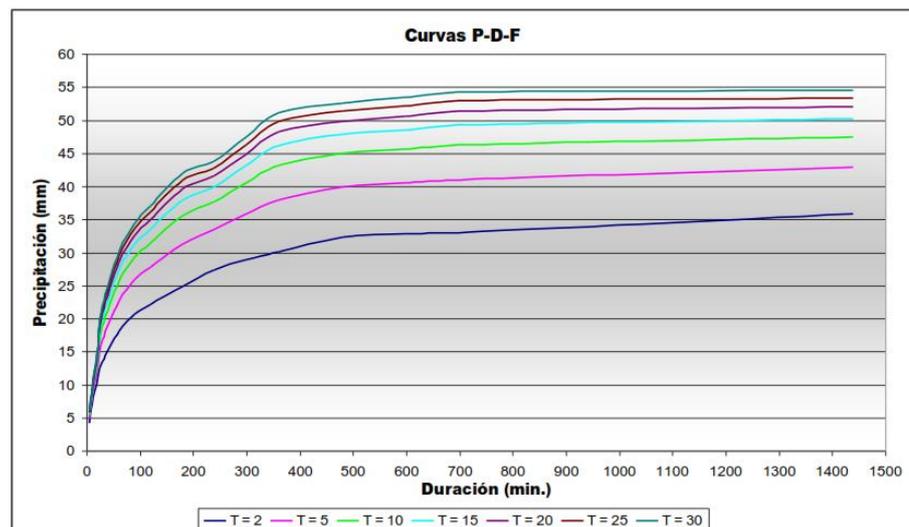


Figura 14 Ejemplo de curvas P-D-F.

Fuente: (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009).

2.2.4.1.2. Determinación de la ecuación y las curvas PDT cuando hay datos de precipitación diarias totales

(Villón Béjar, Hidroesta, 2012), es común el no contar con datos tomados de fluviógrafos y/o pluviómetros, por lo que se requiere establecer relaciones empíricas para transformar los valores de precipitación (altura) diaria a valores de precipitación de corta

duración, esto con la finalidad de conocer la distribución temporal de la precipitación máxima en 24 horas, por lo cual se hace uso de algoritmos de desagregación de datos globales en incrementales, en el presente trabajo se ha de considerar los siguientes criterios:

2.2.4.1.2.1. Modelo de Dyck y Peschke

Según este criterio de discretización las precipitaciones de duración corta, están en función de la precipitación diaria y se puede aplicar también a precipitaciones máximas en 24 horas, entonces se puede generar las curvas IDT con la siguiente ecuación empírica (Villón Béjar, Hidroesta, 2012).

$$P_D = P_{24h} \left(\frac{D}{1440} \right)^{0.25} \quad \text{Ec. 2.25}$$

2.2.4.1.2.2. Modelo de Frederich Bell (1969)

Este modelo permite hallar la precipitación máxima para una duración y un periodo de retorno dados, haciendo uso como valor base una precipitación de una hora de duración con un periodo de retorno de 10 años (Villón Bejar, 2002). La ecuación empírica, es:

$$P_D^T = (0.21 \ln T + 0.52) (0.54 D^{0.25} - 0.50) P_{60}^{10} \quad \text{Ec. 2.26}$$

2.2.4.1.3. Precipitación efectiva

Según (Ven Te Chow y Otros, 1994), la precipitación efectiva, es la precipitación que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo. Esta fluye a través de la cuenca y se convierte en escorrentía directa a la salida de la cuenca. En el presente estudio se ha considera la metodología del Soil Conservation Service (1972) para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta, lo que nos permite calcular el volumen de precipitación efectiva.

2.2.4.1.3.1. Método de SCS para abstracciones

En (Ven Te Chow y Otros, 1994), la hipótesis del método SCS consiste en que la siguiente ecuación, expresa la relación entre dos cantidades potenciales que son iguales, es decir:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad \text{Ec. 2.27}$$

La ecuación 2.27 expresa que, tomando a la tormenta como un absoluto, la precipitación efectiva P_e es siempre menor o igual a la altura de precipitación P ; de igual manera, después que la escorrentía empieza, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es igual a una retención potencial máxima S . Hay una cantidad menor de precipitación antes del encharcamiento por el cual no ocurre escorrentía llamada abstracción inicial I_a , y luego la escorrentía potencia es $P - I_a$.

En la figura 15, se expresa gráficamente el principio de continuidad, el cual deriva en la ecuación:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad \text{Ec. 2.28}$$

Al estudiar resultados obtenidos para cuencas experimentales pequeñas, se ha deducido una relación empírica:

$$I_a = 0.2S \quad \text{Ec. 2.29}$$

Despejando en función de P_e y combinando las ecuaciones 2.27, 2.28 y 2.29, se deduce la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Ec. 2.30}$$

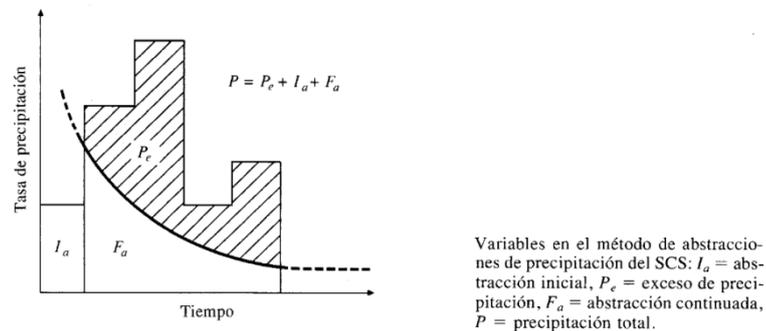


Figura 15 Variables del método de abstracciones de precipitación del SCS.

Fuente: (Ven Te Chow y Otros, 1994).

2.2.4.1.3.2. Cálculo del número de curva

(Ven Te Chow y Otros, 1994), al representar en graficas la información de P y P_e para muchas cuencas, el SCS encontró

curvas características. Para estandarizar estas, se define un número adimensional de curva CN, tal que $0 \leq CN \leq 100$, ver figura 16.

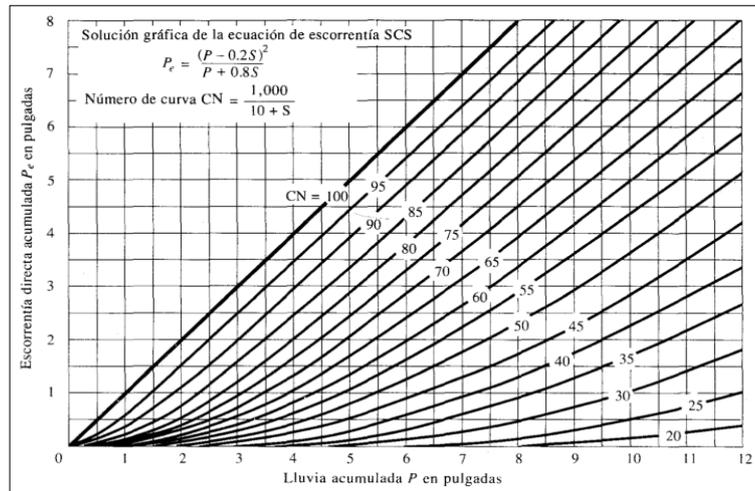


Figura 16 Solución gráfica de la ecuación de escorrentía.

Fuente: (Villón Bejar, 2002).

La retención potencial S y el número de curva se relacionan, según la ecuación que se muestra a continuación:

$$S(\text{pulg.}) = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{Ec. 2.31}$$

Como se puede observar, la precipitación efectiva P_e es sensible al valor de Curva Número, por lo que este debe tener en cuenta las condiciones antecedentes de humedad (AMC), que se agrupan en tres condiciones básicas como se ve en la siguiente tabla:

Tabla 9

Clasificación de clases AMC para el método de abstracciones de lluvia del SCS.

Grupo AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (pulg)	
	Estación inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor que 0.5	Menor que 1.4
II	0.5 a 1.1	1.4 a 2.1
III	Sobre 1.1	Sobre 2.1

Fuente: Del libro (Ven Te Chow y Otros, 1994), Soil Conservation Service, 1972, tabla 4.2, p. 4.12.

Los números de curva han sido tabulados por el SCS con base en el tipo de suelo y el uso de la tierra. Se definen cuatro grupos de suelos:

Tabla 10

Grupos hidrológicos del suelo.

Grupo de suelos	Descripción
Grupo A	Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
Grupo B	Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
Grupo C	Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.
Grupo D	Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos marinos.

Fuente: (Ven Te Chow y Otros, 1994).

Los valores de CN para distintos tipos de uso de la tierra, se dan en las tablas expuestas en el Anexo N° 02. Para una cuenca hecha de varios tipos de suelos y con diferentes usos de tierra, se puede calcular un CN compuesto.

2.2.4.1.4. Elaboración del histograma de entrada para el modelo

2.2.4.1.4.1. Correcciones al valor representativo de precipitación

A) Corrección por intervalo fijo de observación

(Sau Soto, s/f), menciona a L.L. Weiss en base a un estudio de miles de estaciones-año de datos de lluvia, encontró que los resultados de un análisis probabilístico llevado a cabo con lluvias máximas anuales tomados en un único y fijo intervalo de observación (24 horas) al ser incrementados un 13% conducían a magnitudes más aproximadas a las obtenidas con lluvias máximas verdaderas.

B) Reducción por magnitud de cuenca

Según (Sau Soto, s/f), se considera que los valores puntuales obtenidos en la estación pluviométrica son representativos de solo 25 km² y al tender a abarcar un área mayor de cuenca, deberían ser reducidos, según la gráfica expuesta en la siguiente figura:

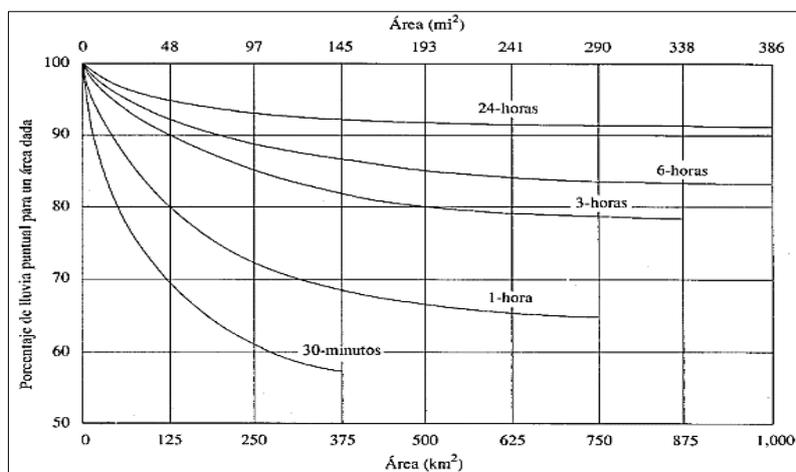


Figura 17 Curvas profundidad - área para reducir precipitación con el fin de obtener valores promedio en el área.

Fuente: Del libro (Ven Te Chow y Otros, 1994), Organización Meteorológica Mundial, 1983; original de Technical Paper 29, U.S. Weather Bureau, 1958.

2.2.4.1.4.2. Distribución temporal de la precipitación

Al no existir datos pluviométricos de tormentas en una determinada región y se desea generar una tormenta de diseño, entonces se puede recurrir a distribuciones temporales de precipitación padronizadas, obtenidas en base a otras tormentas observadas (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009).

Existen varios métodos para generar la distribución temporal de la tormenta de diseño, en el presente estudio se van considerar dos métodos en particular: Padrón de tormenta crítica del USBR y Método de bloques alternos, ambos métodos nos permiten reordenar las precipitaciones en intervalos de tiempo fijos permitiéndonos maximizar los efectos de la tormenta, en la figura 18 se muestra una distribución de tormenta disgregada en el tiempo.

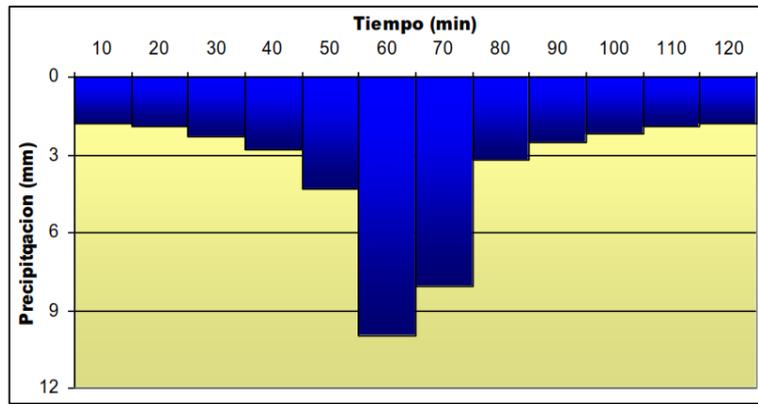


Figura 18 Ejemplo de distribución temporal de una tormenta.

Fuente: (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009).

2.2.4.1.4.3. Distribución temporal de abstracciones

Según (Ven Te Chow y Otros, 1994), hasta el momento solo se han calculado las profundidades de exceso de precipitación de una tormenta, haciendo uso de las ecuaciones 2.27 y 2.28, se puede calcular la distribución temporal de las abstracciones F_a en una tormenta.

$$F_a = \frac{S(P - I_a)}{P - I_a + S} \quad P \geq I_a \quad \text{Ec. 2.32}$$

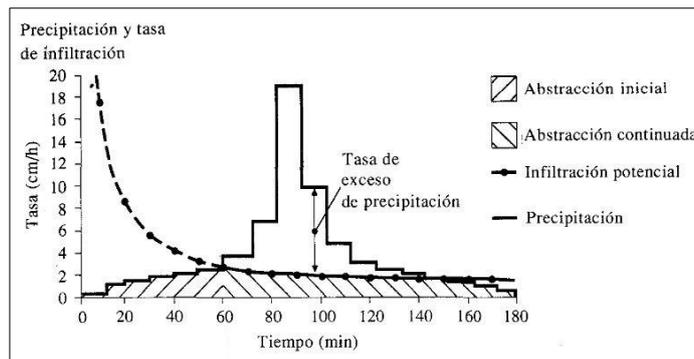


Figura 19 Distribución temporal de las abstracciones.

Fuente: (Ven Te Chow y Otros, 1994).

2.2.4.2. Hidrograma unitario

2.2.4.2.1. Principios del hidrograma unitario

En (Aparicio Mijares, 2012), fue introducido por Sherman (1932) y se define como el hidrograma de escurrimiento directo producido por una precipitación efectiva de altura unitaria, generalmente 1 mm (Unidad Internacional), de una determinada duración, además considera otros factores que se toman en cuenta de manera explícita

son: área de la cuenca, su forma, pendiente, vegetación, su red de drenaje etc. El Hidrograma unitario está basado en las siguientes hipótesis:

- a) Para una cuenca dada, el tiempo de escorrentía es constante para cualquier precipitación de la misma duración de lluvia efectiva.
- b) Todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo tiempo de escorrentía, son directamente proporcionales, al volumen total de escurrimiento directo (al volumen total de precipitación efectiva), por lo que son proporcionales entre sí.
- c) El hidrograma que resulta de un periodo de precipitación puede superponerse a hidrogramas resultantes de precipitaciones antecesoras.

2.2.4.2.2. Deducción del hidrograma unitario

En (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009), para deducir un hidrograma unitario de una cuenca dada, es necesario iniciar con un hidrograma observado (hidrograma patrón) que represente la escorrentía directa que corresponde a una sola tormenta, que es producida por la precipitación efectiva de cobertura tanto temporal como espacial uniformemente en la cuenca, teniendo en cuenta ciertos parámetros como el área de la cuenca, la altura de precipitación sobre la cuenca, tiempo de duración de la precipitación efectiva.

2.2.4.2.3. Aplicación del hidrograma unitario

En (Ven Te Chow y Otros, 1994), se expone que, una vez que se ha determinado el hidrograma unitario, este se puede utilizar para generar hidrogramas de escorrentía directa, se selecciona un hietograma de precipitación, se estima las abstracciones obteniendo el hietograma de exceso de lluvia y luego por convolución se genera un hidrograma de salida para cierto periodo de retorno, cuya expresión se presenta en la ecuación 2.33.

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \tag{Ec. 2.33}$$

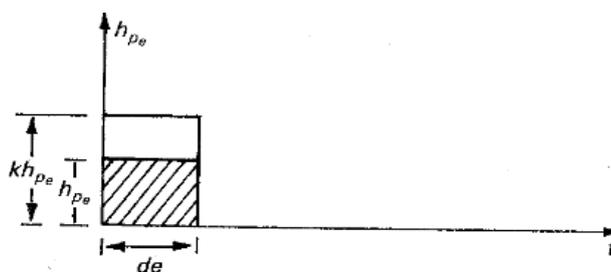


Figura 20 Partes del hidrograma de escorrentía directa, según los principios del HU.

Fuente: (Ven Te Chow y Otros, 1994)

2.2.4.2.4. Hidrograma unitario sintético

Para (Villón Bejar, 2002), en el método del hidrograma unitario es necesario de un hidrograma medido de la cuenca y un registro de la precipitación, pero debido a que, en la mayor parte de las cuencas, estas no cuentan con información hidrométrica ni con pluviógrafos, por lo que es conveniente contar con métodos que se basan en las características generales de la cuenca para generar hidrogramas unitarios, denominados sintéticos.

Según (García-Bartual, 1989), una de las formas más ampliamente aceptadas es la dada por la función gamma de 2 parámetros, o modelo de Nash (1958), quien derivó tal formulación como resultado de conceptualizar el comportamiento hidrológico de la cuenca como el debido a una cascada de embalses lineales, la función $u(t)$ que resulta, o hidrograma unitario de Nash, cuya expresión se muestra en la ecuación 2.34.

$$u(t) = \frac{t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{k}}}{k^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad \text{Ec. 2.34}$$

Donde α y k son el parámetro de forma y escala respectivamente, y $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma.

2.2.4.3. Tránsito de avenidas en cauces

En (Echeverri Vélez, 2007) se define tránsito de avenidas al cambio del hidrograma al recorrer un cauce, existen dos métodos para la simulación del tránsito de avenidas y son: hidráulicos e hidrológicos. Los métodos hidrológicos usan simplificaciones del mundo real, lo que facilita la simulación, pero son menos aproximados a la realidad que los métodos hidráulicos y son más ampliamente usados.

En este trabajo se presenta el método de Muskingum, que modela el almacenamiento volumétrico de creciente en un cauce mediante la combinación del almacenamiento de cuña y prisma, que durante el avance de la onda de creciente el caudal de entrada es mayor al de salida siendo este un almacenamiento de cuña, y también existe un almacenamiento de sección transversal constante a lo largo del tramo del cauce siendo un almacenamiento por prisma. En la siguiente figura se muestra gráficamente el criterio del método.

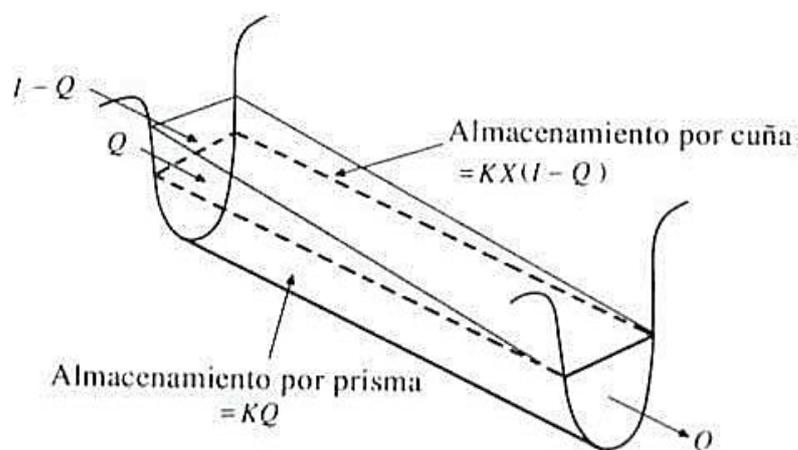


Figura 21 Almacenamiento por cuña y por prisma en un tramo de un canal.

Fuente: (Echeverri Vélez, 2007).

En la figura anterior se observa la geometría del tramo del cauce donde, como se expresa en (Aparicio Mijares, 2012), el almacenamiento por prisma es igual KQ , donde K es una constante llamada parametro de almacenamiento, y el almacenamiento por cuña es igual a $KX(I-Q)$, donde X es un factor de peso que expresa la influencia relativa de las entradas y las salidas del almacenamiento en el tramo. Por lo tanto el almacenamiento total S es la suma de ambos componentes.

$$S=KQ+KX(I-Q)$$

Ec. 2.35

2.2.5. Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico

En (Echeverri Vélez, 2007) se hace referencia a Rodríguez-Iturbe y Valdés (Rodríguez et al, 1979) como creadores e investigadores del modelo, y que otros autores han ido trabajando en el mejoramiento del modelo y en su aplicación en modelos distribuidos.

El modelo relaciona la reacción de una cuenca a un impulso determinado a partir de sus características fisiográficas, en particular a su red drenaje expresadas en las relaciones de Horton y Schumm.

2.2.5.1. Características fisiográficas de la cuenca

2.2.5.1.1. Red de drenaje

Esta se describe principalmente en función al orden de las corrientes, longitud de tributarios, densidad de corriente y densidad de drenaje. El orden de las corrientes es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca (Echeverri Vélez, 2007).

Como se menciona en la tabla 6, en (Ven Te Chow y Otros, 1994) el ordenamiento de los ríos propuesta por Horton (1945) y modificada ligeramente por Strahler (1964), procede a designar a los cauces sin tributarios con el de orden 1, cuando dos cauces de orden 1 se unen al resultante se le designa el orden 2 y así de manera sucesiva, cuando dos cauces de orden distinto se encuentran prevale el orden mayor, siguiendo esta metodología el orden de la cuenca de drenaje es el mismo que el orden del cauce a su salida. Ver figura 22.

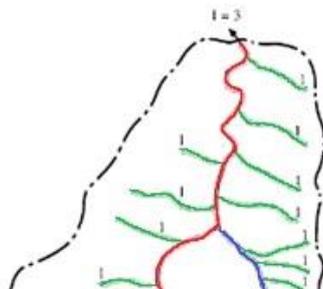


Figura 22 Cuenca del riachuelo Miller, condado Blanco, mostrando la delineación de órdenes de ríos.
Fuente: (Ven Te Chow y Otros, 1994).

2.2.5.1.2. Relaciones de Horton y Schumm

En la tabla 6, se muestran las expresiones de las relaciones de Horton y Schumm, y para el cálculo de estas se procede según (Ven Te Chow y Otros, 1994), se grafican los valores de N_i , L_i y A_i en una escala logarítmica contra el orden del río en una escala lineal, tal como se muestra en la figura 23, y luego se calculan determinando la pendiente de las líneas de estas gráficas.

2.2.5.1.3. Longitud de tributarios y del cauce principal

De (Echeverri Vélez, 2007), la longitud de los cauces tributarios es un indicador de la pendiente de la cuenca y del grado de drenaje de esta. Las zonas accidentadas y bien drenadas, generalmente cuentan con numerosos y pequeños tributarios, en cambio en las zonas planas en donde los suelos son permeables los cauces tributarios son largos y usualmente son permanentes.

La longitud del cauce principal es la distancia que recorre la corriente de mayor orden desde que inicia hasta el punto de interés.

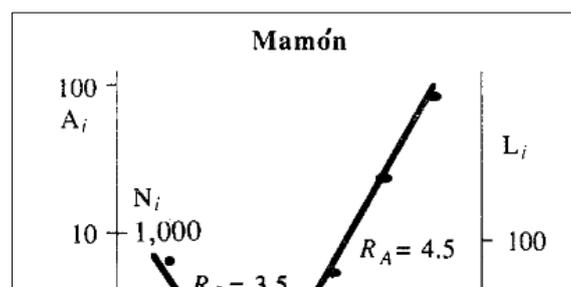


Figura 23 Parámetros geomorfológicos para la cuenca Mamón en Venezuela.

Fuente: Valdés, Fiallo y Rodríguez-Iturbe, p. 1123, 1979. Copyright de la American Geophysical Unón – Expuesto del libro (Ven Te Chow y Otros, 1994).

2.2.5.1.4. Velocidad de tránsito

La velocidad de tránsito de un cauce puede calcularse de las ecuaciones que describen el flujo superficial y que dependen de la rugosidad del cauce, y se expone en la ecuación de manning (Ecuación 2.36) o de los valores propuestos en la Tabla 11.

$$v = \frac{R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}}{n} \quad \text{Ec. 2.36}$$

Tabla 11

Velocidades promedio aproximadas en pies/s del flujo de escorrentía.

Descripción del curso de agua	Pendiente en porcentaje			
	0 - 3	4 - 7	8 - 11	12 -
No concentrado*				

Descripción del curso de agua	Pendiente en porcentaje			
	0 - 3	4 - 7	8 - 11	12 -
Bosques	0 – 1.5	1.5 – 2.5	2.5 – 3.25	3.25 –
Pastizales	0 – 2.5	2.5 – 3.5	3.5 – 4.25	4.25 –
Cultivos	0 – 3.0	3.0 – 4.5	4.5 – 5.5	5.50 –
Pavimentos	0 – 8.5	8.5 – 13.5	13.5 – 17	17 –
Concentrado**				
Canal de salida la ecuación de manning determina la velocidad				
Canal natural no bien definido	0 – 2	2 – 4	4 – 7	7 –

* Esta condición usualmente ocurre en las partes superiores de la cuenca antes de que el flujo superficial se acumule en un canal.

** Estos valores varían con el tamaño del canal y otras condiciones. Cuando sea posible, deben hacerse determinaciones más precisas para condiciones particulares mediante la ecuación de velocidad de Manning.

Fuente: (Ven Te Chow y Otros, 1994).

2.2.5.2. Relaciones de Rosso para determinar los parámetros de forma y escala

En (García-Bartual, 1989), Rosso (1984) utiliza la función gamma de dos parámetros (o modelo de Nash), probando su flexibilidad para modelar el IUH, entonces Rosso demuestra que al introducir sobre la base de la analogía con la cascada de embalses lineales, es capaz de reproducir la aproximación de Rodríguez–Iturbe y Valdés, lo cual es un importante avance en la ciencia de la hidrología.

Siguiendo los estudios de R. Rosso, que propone las relaciones de Horton y Schumm para determinar los parámetros de forma y de escala.

$$\alpha = 3.29 \left(\frac{R_b}{R_a} \right)^{0.78} R_l^{0.07} \quad \text{Ec. 2.37}$$

El parámetro de forma, como se observa en la ecuación 2.37, agrega los efectos de las leyes físicas que determinan la estructura de la red de drenaje.

$$k = 0.70 \left(\frac{R_a}{R_b R_l} \right)^{0.48} \frac{L}{v} \quad \text{Ec. 2.38}$$

El parámetro de escala, se concentra en la dinámica del transporte de agua en la cuenca.

2.2.6. Análisis de sensibilidad de parámetros, calibración y validación del modelo

2.2.6.1. Análisis de sensibilidad de parámetros

Es el desarrollo de alterar los valores de los parámetros en el modelo y comprobar los resultados debidos a la modificación de esos valores, con esa finalidad se emplean distintos métodos, los cuales se exponen:

2.2.6.1.1. Coeficiente de Nash

Es el criterio más usado en hidrología, definido por la ecuación:

$$E=1-\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i}-Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i-\bar{Q})^2} \quad \text{Ec. 2.39}$$

Según (Cabrera, 2011), este coeficiente mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Cuando el valor de E=1 la simulación es perfecta; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces E=0. Algunos valores sugeridos en la toma de decisiones se resumen en la tabla 12.

Tabla 12

Valores referenciales del criterio de Nash.

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

Fuente: Molnar 2011, en documento (Cabrera, 2011).

2.2.6.1.2. Error balance de masas

Expresa cuantitativamente la relación entre el volumen del hidrograma observado y el simulado, se expresa como:

$$m=100\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim}-Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad \text{Ec. 2.40}$$

Donde m es un porcentaje y que según (Cabrera, 2011) si el ajuste es perfecto, m=0. En el proceso de calibración, se debe buscar alcanzar el valor más bajo de m.

2.2.6.2. Calibración de modelos hidrológicos

Consiste en determinar los parámetros del modelo que producen el mejor ajuste a los caudales observados. Para determinar los parámetros óptimos en la modelación, se utilizó el Coeficiente de Nash y el Error balance (Cachuán Dávila, 2017).

2.2.6.3. Validación de modelos hidrológicos

En (Cachuán Dávila, 2017), se realiza mediante la significación del coeficiente de correlación de Pearson, que evalúa el grado de correlación lineal existente entre caudales observados y los simulado. Sus valores absolutos varían de manera $0 \leq r(x,y) \leq 1$, y se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

$$r_{x,y} = \frac{\sum Z_x Z_y}{N} \quad \text{Ec. 2.41}$$

Donde Z_x y Z_y se calculan según las ecuaciones 2.42 y 2.43.

$$Z_x = \sum (x - x_m) s_x^{-1} \quad \text{Ec. 2.42}$$

$$Z_y = \sum (y - y_m) s_y^{-1} \quad \text{Ec. 2.43}$$

Donde:

X : información de los registros observados.

Y : información de los registros simulados.

X_m : media de los registros

Y_m : media de los registros simulados.

S_x : desviación estándar de los registros observados.

S_y : desviación estándar de los registros simulados.

N : tamaño de las muestras.

La significación de este coeficiente es determinada con una prueba estadística basada en la ley de Snodcor, la cual permite obtener directamente la significación del coeficiente de correlación de Pearson.

En la tabla mostrada (JIMÉNEZ, 2011), Pearson brinda para varios niveles de significancia (α), los valores críticos $r(v,\alpha)$ para realizar la prueba de

significación de estos coeficientes, en función de sus grados de libertad ($v=N-2$).

Tabla 13

Valores críticos de la r de Pearson para una prueba unilateral según grados de libertad ($v=N-2$).

Grado de Libertad $v=N-2$	Nivel de significancia (α)			
	0.10	0.005	0.02	0.01
1	0.988	0.997	1.000	1.000
2	0.900	0.950	0.980	0.990
3	0.805	0.878	0.934	0.959
4	0.729	0.811	0.882	0.917
5	0.669	0.754	0.833	0.874
6	0.622	0.707	0.789	0.834
7	0.582	0.666	0.750	0.798
8	0.549	0.632	0.716	0.765
9	0.521	0.602	0.685	0.735
10	0.497	0.576	0.658	0.708
15	0.412	0.482	0.558	0.606
20	0.360	0.423	0.492	0.537
25	0.323	0.381	0.445	0.487
30	0.296	0.349	0.409	0.449
40	0.257	0.304	0.358	0.393
50	0.231	0.273	0.322	0.354
60	0.211	0.250	0.295	0.325
80	0.183	0.217	0.256	0.283
100	0.164	0.195	0.230	0.254

Fuente: (<https://www.uv.es/meliajl/Docencia/Tablas/TablaR.PDF>., s.f.)

En conclusión, si se cumple que $r_{xy} > r(v,\alpha)$, se deduce que los caudales simulados poseen una mayor validez, es decir, una mayor relación con los caudales observados.

2.3. Marco Conceptual

Geomorfología. En (wikipedia, 2013), se define como una rama de la geografía y de la geología que tiene como objetivo el estudio de las formas de la superficie terrestre, enfocado en describir, entender su génesis y su actual comportamiento.

Abstracciones. (Ven Te Chow y Otros, 1994), define que las abstracciones o pérdida por infiltración, son básicamente el agua absorbida por infiltración, interceptación y/o almacenamiento superficial, por la condición de permeabilidad del suelo.

Número de curva. (Cachuán Dávila, 2017), afirma que es un índice de potencialidad de producir escorrentía de una cuenca y es inversamente proporcional a la capacidad de retención del suelo.

Hietograma. (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009), lo define como un gráfico de barras que la expresa precipitación en función del tiempo en intervalos regulares de este, que se refiere a un día o a una tormenta en particular.

Avenida máxima. En (wikipedia, S/F), se define como la elevación del nivel de un curso de agua significativamente mayor que el flujo medio de este.

Periodo de retorno. (Aparicio Mijares, 2012), lo define como un espacio muestral que tiene su propia función de distribución o de densidad de probabilidad, que normalmente no se conoce a priori.

2.4. Hipótesis

Las características geomorfológicas y las relaciones de Horton y Shumm como parámetros para la generación del hidrogramas de escorrentía directa en las unidades hidrográficas Chorobal y Cerro Blanco, a través de la metodología del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico, tienen una correlación del 5% de significancia al validar el modelo mediante la “Significación del coeficiente de correlación lineal de Pearson (Tabla H)”, en comparación con los registros históricos de la estación hidrológica Chorobal.

2.5. Variables

2.5.1. Variables dependientes

- Hidrograma de escorrentía directa en la estación hidrológica Chorobal.
- Relaciones de Horton y Schumm.
- Tormenta de diseño (Hietograma de precipitación).
- Precipitación efectiva (Infiltración).

2.5.2. Variables independientes

- Características fisiográficas.
- Precipitación máxima en 24 horas.
- Tipo de suelo y cobertura vegetal.

2.5.3. Operacionalización de las variables

En la tabla 14 se muestran las variables que definen el presente estudio.

Tabla 14

Tabla de las variables.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicador
Hidrograma de escorrentía directa	Es la variación con respecto al tiempo de algún parámetro hidrológico, como es nivel de agua, caudal, sedimentos etc.	La medición de estos a través del tiempo puede ser definido por intervalos de este según sea conveniente.	m ³ /s
Relaciones de Horton y Schumm	Son ratios que cuantifican y ordenan la red de ríos de una cuenca.	Se obtienen a partir la cartografía de la zona en estudio.	-
Tormenta de diseño	Es la variación con respecto al tiempo y definido en intervalos de este.	Se obtiene mediante procedimientos empíricos.	mm
Precipitación efectiva	Es el volumen que escurre al saturarse el suelo y que también varía en el tiempo.	Se obtiene mediante procedimientos semi-empíricos.	mm

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicador
Características fisiográficas	Son las características propias de cada cuenca y que intervienen en la respuesta hidrológica de esta.	Actualmente se obtienen mediante Sistemas de información geográfica	Distintas unidades
Precipitación total diaria	Es el volumen total de precipitación en 24 horas, no contempla la variación temporal por los que existe la necesidad de métodos empíricos para representar esa variación.	Son datos tomados de estaciones de medición y son controlados mediante una entidad que se encarga de validar estos datos.	mm
Tipo de suelo y cobertura vegetal	Vienen a ser el tipo característico de un lugar determinado, así como su cobertura vegetal y/o uso actual.	Se obtienen a partir la cartografía de la zona en estudio.	Unidad de área

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

Según el nivel de investigación del fenómeno en estudio, se trata de una investigación exploratoria, pues si bien es un fenómeno conocido, este no ha sido muy estudiado cuyos resultados que se obtienen son aproximados y aun en la actualidad se sigue investigando.

El diseño de la investigación viene a ser una investigación de campo, pues la información requerida se obtiene directamente de la realidad y esta no puede ser manipulada ni alterada.

3.2. Población, Marco Muestral, Unidad de Análisis y Muestra

3.2.1. Población

La población viene dada por la cuenca del río Huamanzaña, que es la zona global en estudio, en donde se aplicaran los métodos en estudio.

3.2.2. Marco Muestral

El marco muestral viene dado por las sub cuencas Cerro blanco y Chorobal, que son parte de la red de drenaje que aporta a la cuenca del río Huamanzaña.

3.2.3. Unidad de análisis

Viene dado por cada sub cuenca como unidad de análisis, que pertenece a la cuenca del río Chorobal.

3.2.4. Muestra

Son cada sub cuenca que contienen características propias y que son variables que intervienen en el resultado, siendo este sensible a estos.

3.3. Técnicas e instrumentos de investigación

1. Modelo digital de elevación: Se descargó del sitio web Alaska Satellite Facility en formato raster con una resolución (tamaño de celda) de 12.5 x 12.5.
2. Mapas temáticos de tipo de suelo y cobertura vegetal: El de uso de suelo fue proporcionado previa solicitud al MINAGRI cuya fuente es el ONERN

(Actualmente ANA) y el de cobertura vegetal se descargó de forma libre en el sitio web del MINAM.

3. Datos meteorológicos e hidrológicos: Los datos meteorológicos fueron descargados de forma libre el sitio web del SENAMHI y los datos hidrológicos fueron proporcionados por el PECH.
4. Recolección de bibliografía: Se han recopilado libros de hidrología tanto básicos como aplicados, manuales, estudios similares, etc., de los cuales se extrae la metodología para el modelamiento hidrológico.

3.4. Diseño de investigación

(Carrasco Días, 2005), expresa que los tipos de diseño no experimentales son aquellos en los cuales las variables independientes no tienen una manipulación intencional, y carecen de grupos de control ni experimental. Estos analizan y estudian los hechos y/o fenómenos después de haber ocurrido.

(Ccanto, 2010), propone que el diseño no experimental puede ser longitudinal si los datos se recolectan a través del tiempo, siendo estos puntuales o periódicos específicos, para intervenir en el resultado en sus determinaciones y consecuencias.

En (Cachuán Dávila, 2017), el diseño longitudinal de tendencia analiza cambios a través del tiempo en variables dentro de alguna población o de una muestra representativa, en la figura 24 se muestra el esquema del diseño aplicado a la investigación.

Entonces el diseño a aplicar en el presente estudio es el no experimental del tipo longitudinal de tendencia.

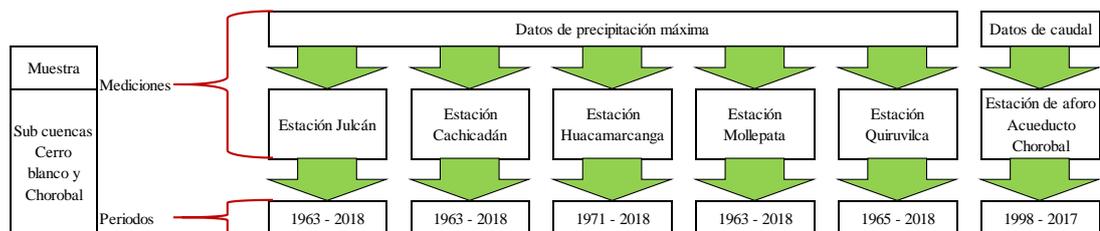


Figura 24 Esquema del diseño de la investigación.

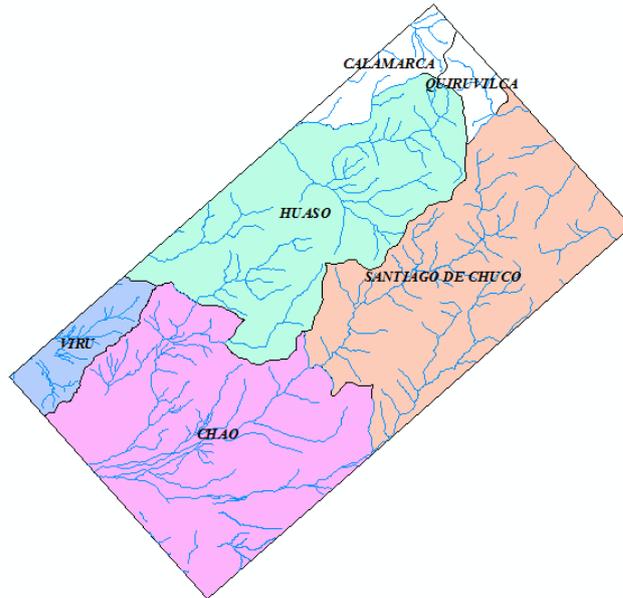
Fuente: Elaboración propia.

3.5. Procesamiento y análisis de datos

Tanto el análisis como el procesamiento y análisis de los datos se explican en el capítulo IV, del presente estudio.

Tabla 15 Delimitación de la zona en estudio.

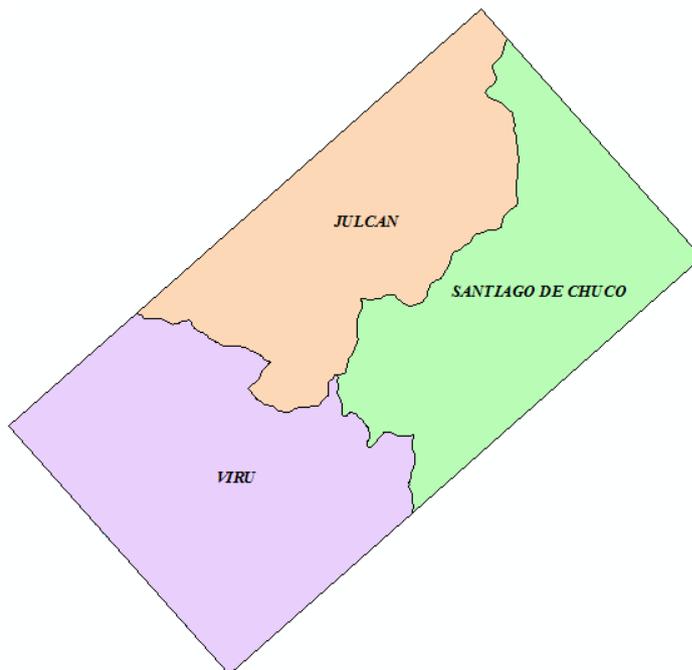
Mapa de ubicación	Descripción
-------------------	-------------



Abarca los distritos de Huaso, Santiago de Chuco y Chao.

Figura 26 Límite distrital de la zona en estudio.

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).



Distrito de Huaso:
Provincia de Julcán.
Distrito de Santiago de Chuco:
Provincia de Santiago de Chuco.
Distrito de Chao:
Provincia de Virú.

Figura 27 Límite provincial de la zona en estudio.

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Fuente: Varios.

4.1.1.2 Ubicación geográfica

La ubicación geográfica se la zona se encuentra en la sierra y norte del Perú, se encuentra limitada entre las coordenadas 787668.62 E, 9075098.20 N y 775453.85 E y 9076838.10 N en la proyección UTM zona sur Datum WGS84.

4.1.1.3 Ubicación hidrográfica

La ubicación y/o nomenclatura hidrográfica de la zona de estudio, según la codificación de unidades de drenaje con la metodología Pfafstetter, se identifica hasta un nivel 7, en la tabla 16 se especifica de forma ascendente los niveles.

Tabla 16

Codificación para las sub cuencas en estudio.

Nivel	Unidad hidrográfica	Código
1	Río Chao (Cerro Blanco) y Río Tutumo (Chorobal)	1377122 / 1377128
2	Río Huamazaña	0137712
3	Unidad hidrográfica 13771	0013771
4	Unidad hidrográfica 1377	0001377
5	Unidad hidrográfica 137	0000137
6	Unidad hidrográfica 13	0000013
7	Región Hidrográfica del Pacífico	0000001

Fuente: Elaboración propia, mapa de sub cuencas hidrológicas ANA.

En la figura 28, se muestran las unidades hidrográficas para el presente estudio, y sus códigos consecuentes a la tabla 15.

4.1.2. Características climatológicas

La zona en estudio presenta un clima árido en la zona costera y en la zona sierra el clima seco y semi seco, en la tabla 17 se describe.

Tabla 17

Características climáticas de la zona.

Clima	Zona	Descripción
Árido	Costera	Deficiencia de lluvias en todas las estaciones. De condición semi seca
Semi seco	Sierra	Otoño, invierno y primavera seca, de clima templado a frío.

Fuente: SENAMHI.

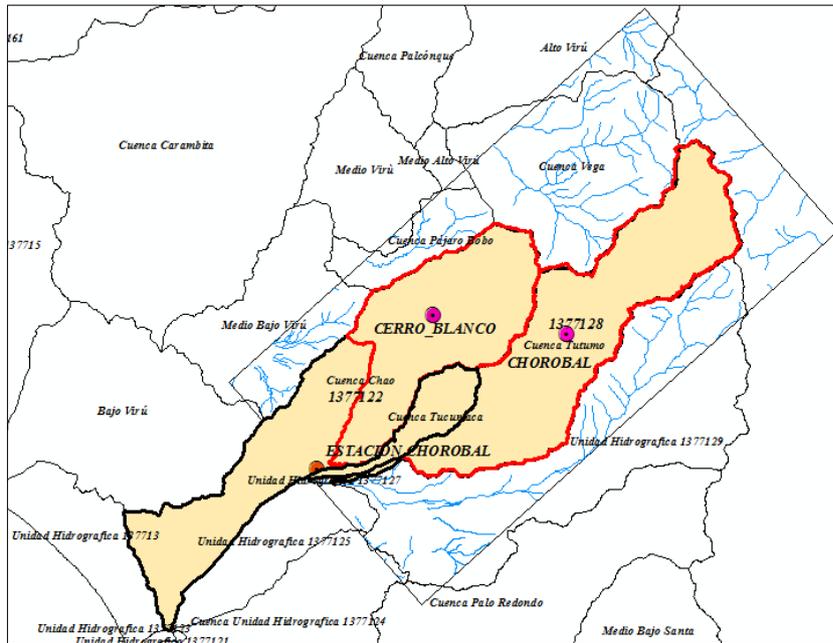


Figura 28 Codificación de las sub cuencas en estudio.

Fuente: Elaboración propia en base a cartografía del ANA.

4.1.3. Características hidrográficas

El origen del escurrimiento de ambas sub cuencas es pluvial, es decir se alimenta del almacenamiento de lagunas y del escurrimiento que genera las precipitaciones que aportan agua a las quebradas y estas a su vez a los cauces principales, que durante su trayecto toman distintos nombres según la zona. En la tabla 18 se mencionan algunas características de los cauces principales y sus orígenes.

Tabla 18

Características de los cauces principales y su origen.

Sub cuenca	Origen	Tipo	Nombre	Área Km ²	Longitud Km
Chorobal	Pluvial	Laguna	Melgón	0.016	-
		Río	Melgón		4.78
		Río	Oyón		27.69
		Río	Chorobal		7.36
		Río	Tutumó		15.84
Cerro Blanco	Pluvial	Qda	Canraz		7.89
		Río	Carrizal		19.24
		Río	Cerro Blanco		6.94

Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía – IGN.

4.2. Recopilación de la información

4.2.1. Identificación de la zona

Se realizó una búsqueda de información de datos de campo, como la identificación de la sección hidráulica del río Chorobal y el método de aforo de este.

4.2.1.1. Determinación de la sección hidráulica del río

Se determinó la sección a partir de planos topográficos de la zona anteriormente elaborados por el Proyecto Especial Chavimochic (PECH), el cual fue proporcionado para el desarrollo del presente trabajo. Ver figura 29.

4.2.1.2. Determinación del caudal

La medición de caudal es realizada por el PECH, este consiste en tres lecturas diarias automatizadas cada seis horas, para luego promediar estos valores y obtener un caudal representativo del día.

En la tabla 19, se muestran datos de aforo de caudal realizados entre los días 15 a 19 de marzo de 2019, tiempo en que se desarrollaron los eventos del “Niño Costero”.

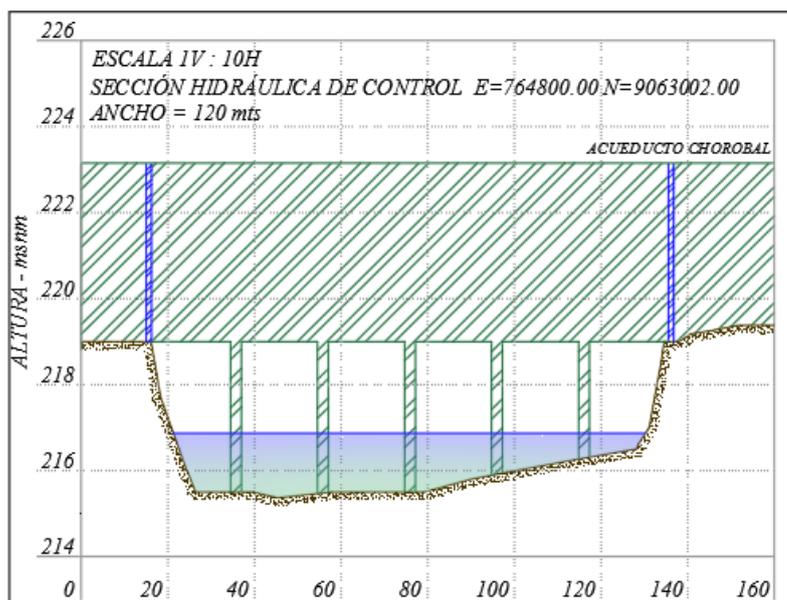


Figura 29 Sección hidráulica del río Chorobal.

Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por el Proyecto Especial Chavimochic.

Tabla 19

Lecturas tomadas en el mes de Marzo 2017.

Río Chorobal – Estación Chorobal				
Fecha	6:00h	12:00h	18:00h	Máximo
15/03/2017	20.00	10.00	40.00	40.00
16/03/2017	20.00	20.00	70.00	70.00
17/03/2017	27.00	22.00	68.00	68.00
18/03/2017	28.00	20.00	55.00	55.00
19/03/2017	25.00	18.00	30.00	30.00

Fuente: Información proporcionada por el Proyecto Especial Chavimochic.

4.2.1.3. Data histórica hidrológica y meteorológica

Se identificaron cinco estaciones meteorológicas cercanas a la zona en estudio y de la estación de aforo, como se muestra en la figura 30.

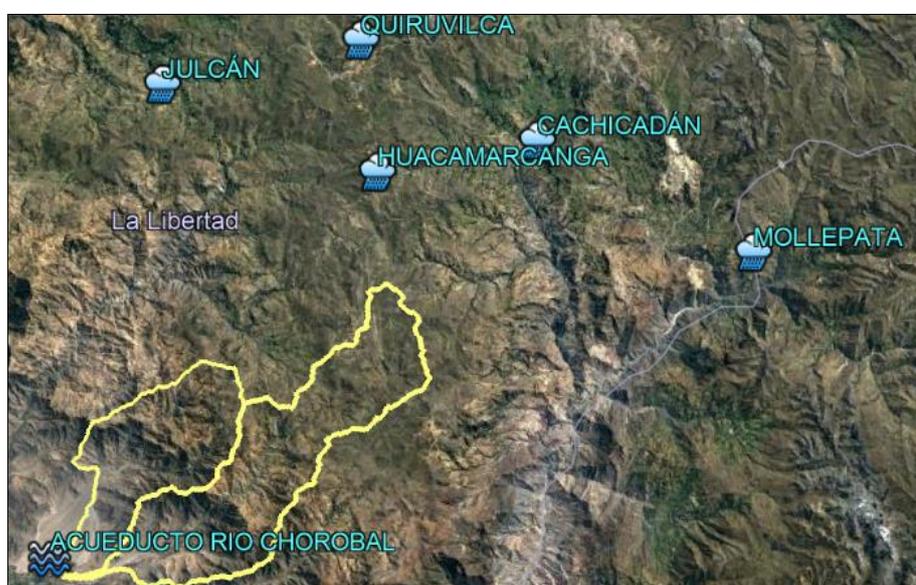


Figura 30 Identificación de las estaciones meteorológicas.

Fuente: Elaborado a partir de imágenes satelitales - software libre Google Earth.

Una vez identificas las estaciones se realizó la búsqueda de la información, en donde los datos del tipo meteorológicos (Precipitación) se obtuvieron de manera libre en la página oficial del Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología (SENAMHI) y los del tipo hidrológico (Aforo de caudal) como se mencionó anteriormente fueron proporcionados por el Proyecto Especial Chavimochic, (Ver anexo N° 01).

Tabla 20

Características de las estaciones meteorológicas e hidrológicas.

Nombre	Tipo de estación	Intervalo	Coordenadas	
			Este	Norte
Julcán	Meteorológica	1963–2018	777,090.50	9,110,176.48
Cachicadán	Meteorológica	1963–2018	814,190.28	9,104,447.73
Huacamarcanga	Meteorológica	1971–2018	798,321.46	9,101,286.27
Mollepata	Meteorológica	1963–2018	174,488.00	9,093,349.00
Quiruvilca	Meteorológica	1965–2018	796,770.20	9,114,268.01
Acueducto Chorobal	Hidrológica	1998–2017	764,800.00	9,063,002.00

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.4. Material cartográfico

El material cartográfico requerido para la elaboración del presente trabajo se muestra en la tabla 21.

Tabla 21

Información cartográfica requerida.

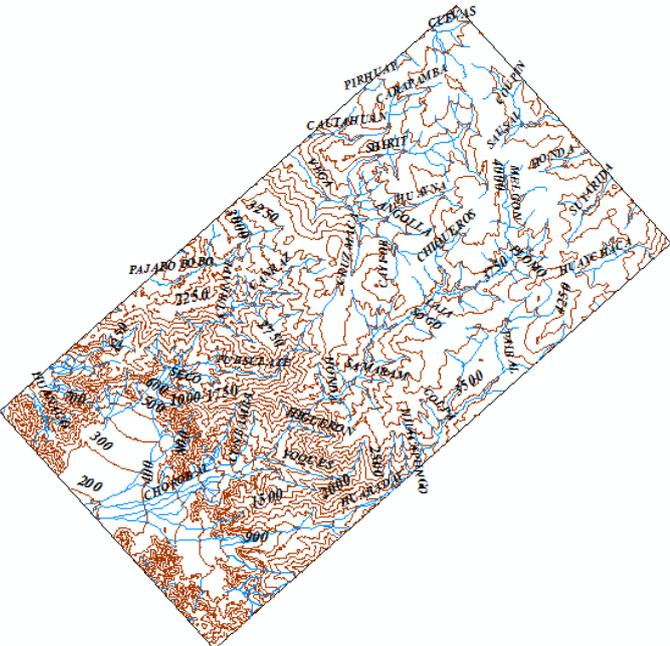
Material Cartográfico	Leyenda
	<ul style="list-style-type: none"> CURVAS DE NIVEL RÍOS Y QUEBRADAS

Figura 31 Curvas de nivel, ríos y quebradas.

Fuente: Cartas nacionales del Perú en escala 1:100,000 – Instituto Geográfico Nacional (IGN)

Modelos digitales de elevación, que se encuentran para libre descarga en la web, como son las imágenes tomadas vías satélite, en este caso la del satélite ALOS Palsar.

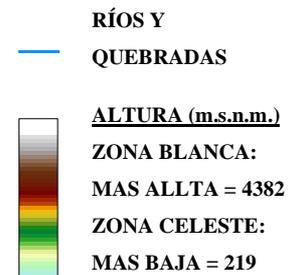
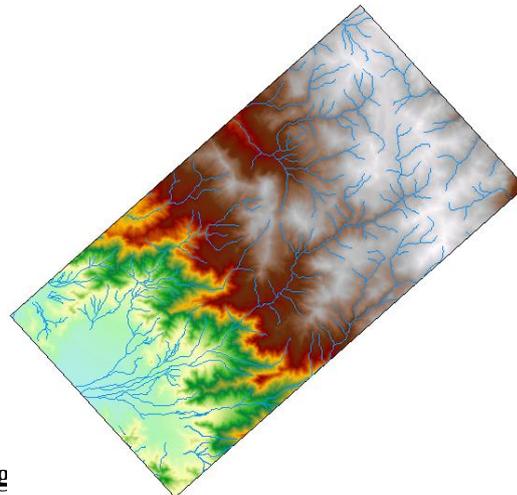


Fig igital
 elevation model – DEM – resolución 12.5m).

Fuente: <https://www.asf.alaska.ed>

Clasificación edáfica, Escala 1:5,000,000, construido a partir del mapa mundial de suelos FAO–UNESCO–ISRIC.

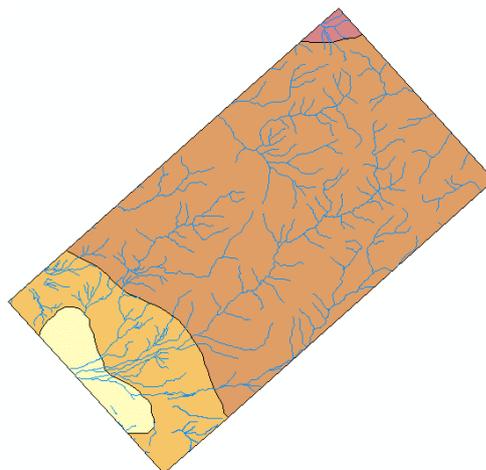


Figura 33 Mapa de suelos del Perú.

Fuente: ANA – INRENA 1996.

Material Cartográfico	Leyenda
Escala 1:100,000, donde se muestra la distribución geográfica y superficial de los diversos tipos de cobertura vegetal existente en el país, basado en imágenes satelitales LANDSAT 5 del año 2011.	

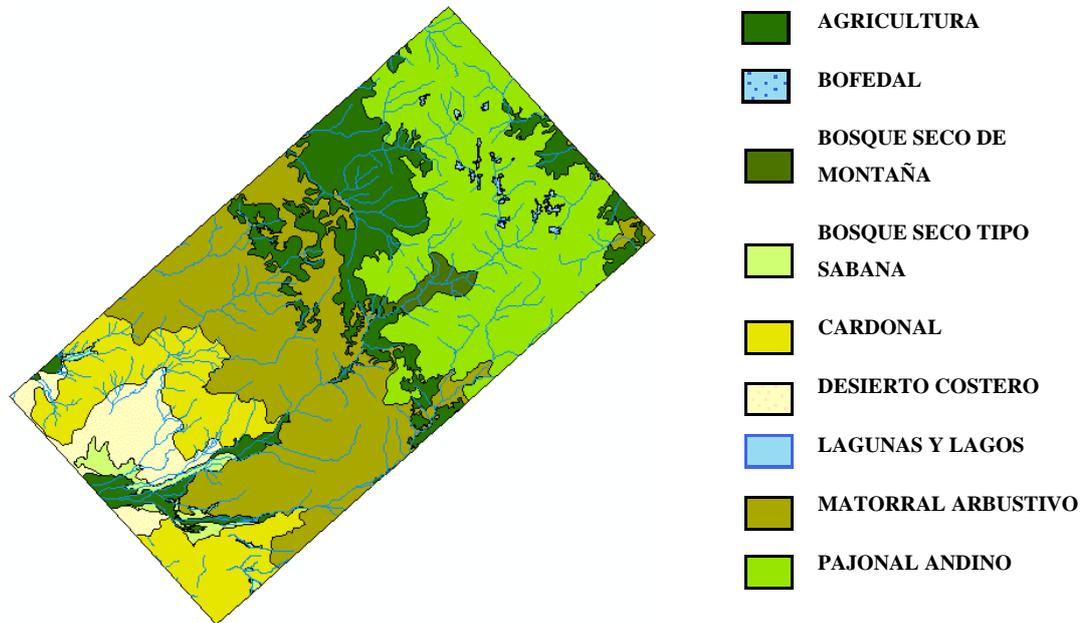


Figura 34 Mapa nacional de cobertura vegetal.

Fuente: Ministerio del Ambiente 2015.

Fuente: Varios.

4.3. Análisis de la información

4.3.1. Delimitación de las unidades hidrográficas

La delimitación de las sub cuencas Cerro blanco y Chorobal, se realizó mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y su herramienta ArcHydro 10, que está orientada al procesamiento hidrológico del modelo digital de elevación (DEM), permitiendo así calcular los parámetros característicos de cada sub cuenca y así a través de estos pronosticar el comportamiento de cada sub cuenca.

En la siguiente figura, se muestran las sub cuencas delimitadas y con un punto de salida común, esto es a que el objetivo es determinar el caudal de salida

que llega hasta ese punto producto de la superposición de caudales con respecto al tiempo.

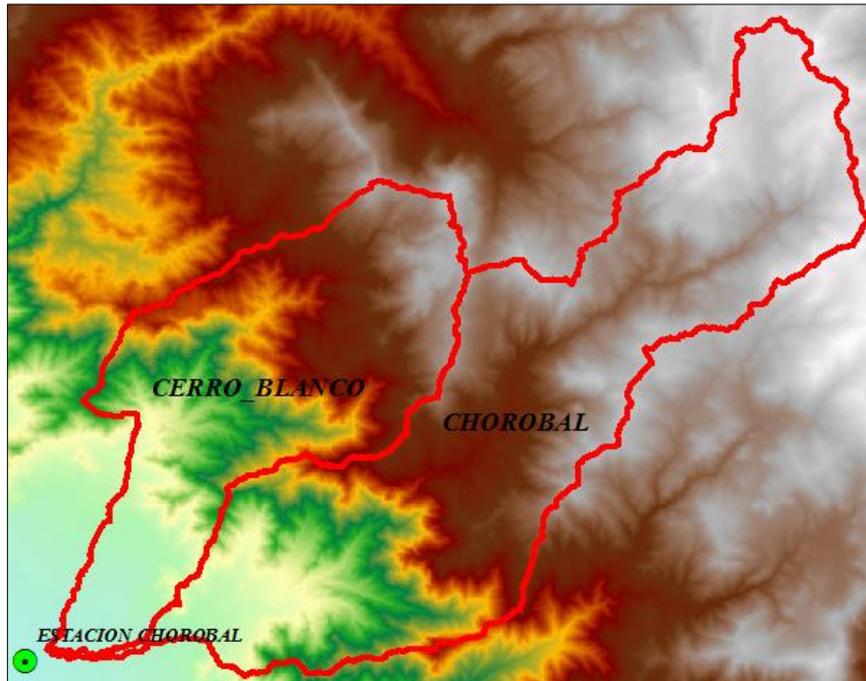


Figura 35 Delimitación de las sub cuencas.

Fuente: Elaboración propia en base al material cartográfico.

4.3.2. Determinación de las características geomorfológicas

Las características geomorfológicas se han calculado y/o determinado haciendo uso de los SIG (Sistemas de información geográfica); procesando un DEM (Modelo digital de elevación), que se expone en la tabla 22 y que se encuentra de libre descarga en la web, y que son las imágenes tomadas vías satélite con una resolución de 12.5 metros, en este caso la del satélite ALOS Palsar. El análisis geomorfológico se expone en los ítems siguientes.

4.3.2.1. Propiedades morfométricas de la cuenca

Según las consideraciones expuestas en el ítem 2.2.1.2.2., del maco de referencia, se obtuvieron las principales características morfométricas de cada sub cuenca.

4.3.2.1.1. Parámetros de forma

En las tablas presentadas se observan los parámetros de forma calculados con los métodos expuestos en el ítem 2.2.1.2.2.1 del marco de referencial.

Tabla 22

Parámetros de forma - Sub cuenca Cerro blanco.

Parámetro	Und.	Valor	Características
Área (A)	Km ²	193.87	25<A<250 Km ² Cuenca "Pequeña"
Perímetro (P)	Km	99.75	-
Índice de compacidad (Ic)	-	2.02	Ic>>1 Cuenca de forma asimétrica "Rectangular"
Factor de forma (Ff)	-	0.47	0.45 - 0.60 Cuenca "Ligeramente ensanchada"
Radio de elongación (Rc)	-	0.56	Re << 1 "Fuerte relieve y pendiente pronunciada"
Relación de circularidad (Rci)	-	0.24	Rci<<0.785 Cuenca "Cuadrada"

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 23**

Parámetros de forma - Sub cuenca Chorobal.

Parámetro	Und.	Valor	Características
Área (A)	Km ²	317.05	250<A<500 Km ² "Intermedia. – pequeña"
Perímetro (P)	Km	164.65	-
Índice de compacidad (Ic)	-	2.61	Ic>>1 Cuenca de forma asimétrica "Rectangular"
Factor de forma (Ff)	-	0.36	0.30 - 0.37 Cuenca "Ligeramente alargada"
Radio de elongación (Rc)	-	0.45	Re << 1 "Fuerte relieve y pendiente pronunciada"
Relación de circularidad (Rci)	-	0.15	Rci<<<0.785 Cuenca "Cuadrada"

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.1.2. Parámetros de relieve

A continuación, se expone el análisis de las áreas por curvas de nivel dentro de cada sub cuenca, lo que resulta el representar estas áreas en porcentaje con respecto al área total de la cuenca.

Tabla 24

Análisis hipsométrico - Sub cuencas Cerro blanco.

Altitud (msnm)	Áreas parciales (km ²)	Áreas acumuladas (km ²)	Áreas sobre las altitudes (Km ²)	Porcentaje del total	Porcentaje sobre las altitudes
259.00		0.00	0.00	0.00%	0.00%
500.00	20.41	20.41	173.45	10.53%	89.47%
750.00	11.02	31.43	162.43	5.68%	83.79%
1,000.00	13.35	44.78	149.08	6.89%	76.90%
1,250.00	15.51	60.29	133.57	8.00%	68.90%
1,500.00	11.99	72.28	121.58	6.18%	62.72%
1,750.00	10.01	82.29	111.57	5.16%	57.55%
2,000.00	9.94	92.23	101.63	5.13%	52.42%
2,250.00	12.45	104.68	89.18	6.42%	46.00%
2,500.00	15.56	120.24	73.62	8.03%	37.98%
2,750.00	13.20	133.44	60.42	6.81%	31.17%
3,000.00	14.88	148.32	45.54	7.68%	23.49%
3,250.00	11.93	160.25	33.61	6.15%	17.34%
3,500.00	11.97	172.22	21.64	6.17%	11.16%
3,750.00	16.88	189.10	4.76	8.71%	2.46%
3,950.00	4.76	193.86	0.00	2.46%	0.00%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25

Análisis hipsométrico - Sub cuencas Chorobal.

Altitud (msnm)	Áreas parciales (km ²)	Áreas acumuladas (Km ²)	Áreas sobre las altitudes (Km ²)	Porcentaje del total	Porcentaje sobre las altitudes
258.00		0.00	0.00	0.00%	0.00%
500.00	3.48	3.48	313.57	1.10%	98.90%
750.00	14.64	18.12	298.93	4.62%	94.28%
1,000.00	18.57	36.69	280.36	5.86%	88.43%
1,250.00	16.72	53.41	263.64	5.27%	83.15%
1,500.00	13.87	67.28	249.77	4.37%	78.78%
1,750.00	10.68	77.96	239.09	3.37%	75.41%
2,000.00	9.58	87.54	229.51	3.02%	72.39%
2,250.00	8.16	95.70	221.35	2.57%	69.82%
2,500.00	7.55	103.25	213.80	2.38%	67.43%
2,750.00	8.96	112.21	204.84	2.83%	64.61%
3,000.00	16.19	128.40	188.65	5.11%	59.50%
3,250.00	21.60	150.00	167.05	6.81%	52.69%
3,500.00	26.45	176.45	140.60	8.34%	44.35%
3,750.00	53.31	229.76	87.29	16.81%	27.53%
4,000.00	44.67	274.43	42.62	14.09%	13.44%
4,250.00	40.82	315.25	1.80	12.87%	0.57%
4,400.00	1.80	317.05	0.00	0.57%	0.00%

Fuente: Elaboración propia.

Con las áreas representadas en porcentajes expuestas en las tablas 24 y 25, a continuación, se ha elaborado la curva hipsométrica para cada sub cuenca, en donde tomando como referencia al ítem 2.2.1.2.2.1. del marco de referencia, específicamente la tabla 3 y la figura 6, se ha de identificar la sub cuenca Cerro blanco como una cuenca en proceso de madurez y un potencial erosivo en equilibrio y en la sub cuenca Chorobal se determina como una cuenca en fase joven y con un gran potencial erosivo.

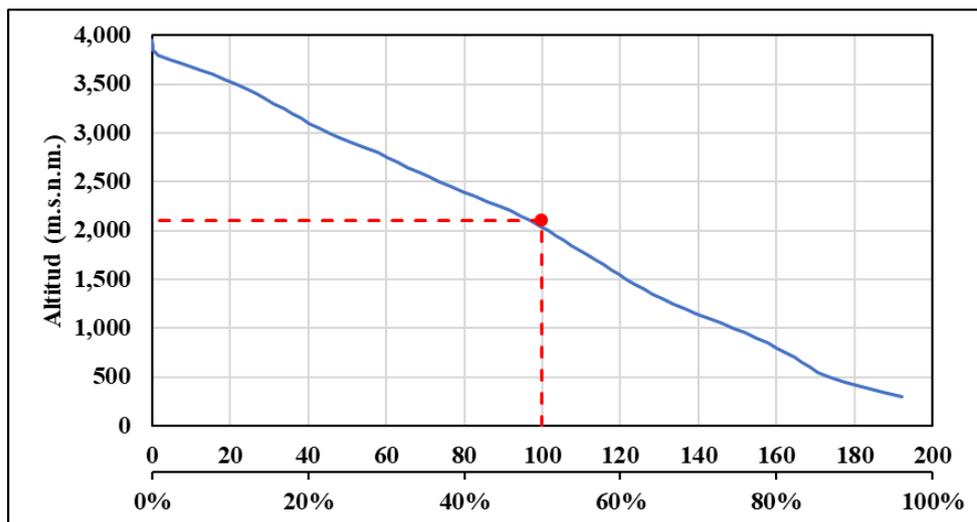


Figura 36 Curva hipsométrica de la sub cuenca Cerro blanco.

Fuente: Elaboración propia.

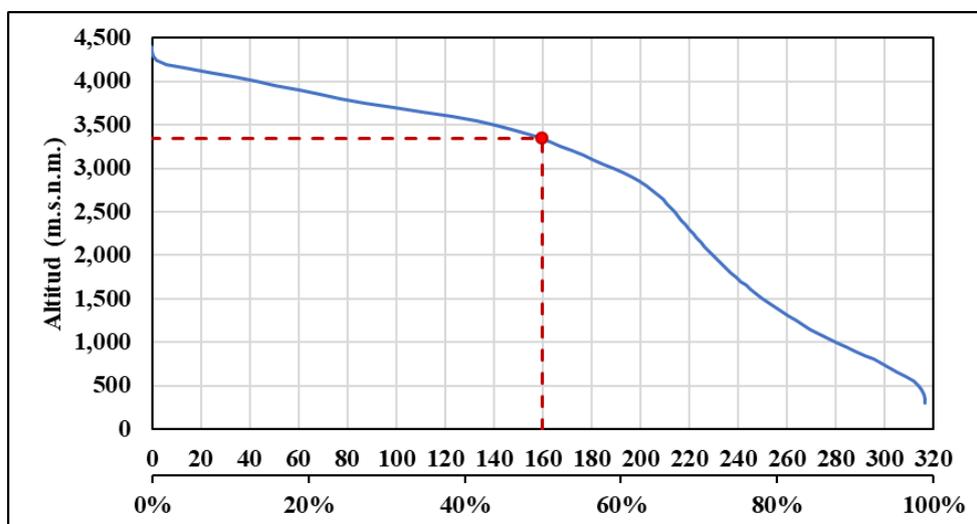


Figura 37 Curva hipsométrica de la sub cuenca Chorobal.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de construir la curva hipsométrica se prosigue a la elaboración de los polígonos de frecuencia, en donde para la sub cuenca Cerro blanco las cotas entre 500 y 700 m.s.n.m. son las frecuentes con un 10.53% y para Chorobal las cotas más frecuentes son 3,750 a 4,000 m.s.n.m. con un porcentaje de 16.81%.

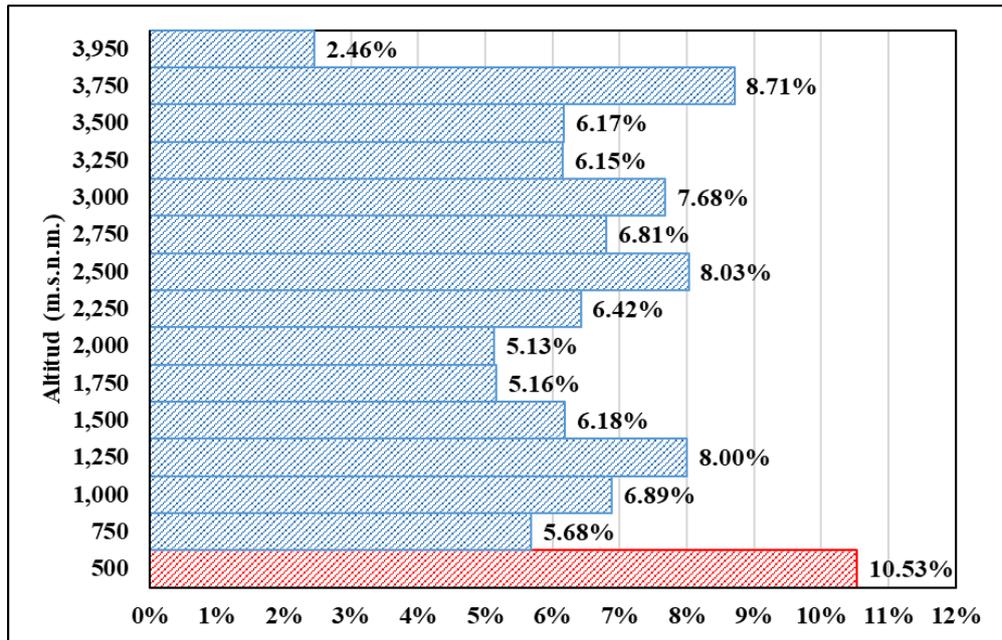


Figura 38 Polígono de frecuencias - Sub cuenca Cerro blanco.

Fuente: Elaboración propia.

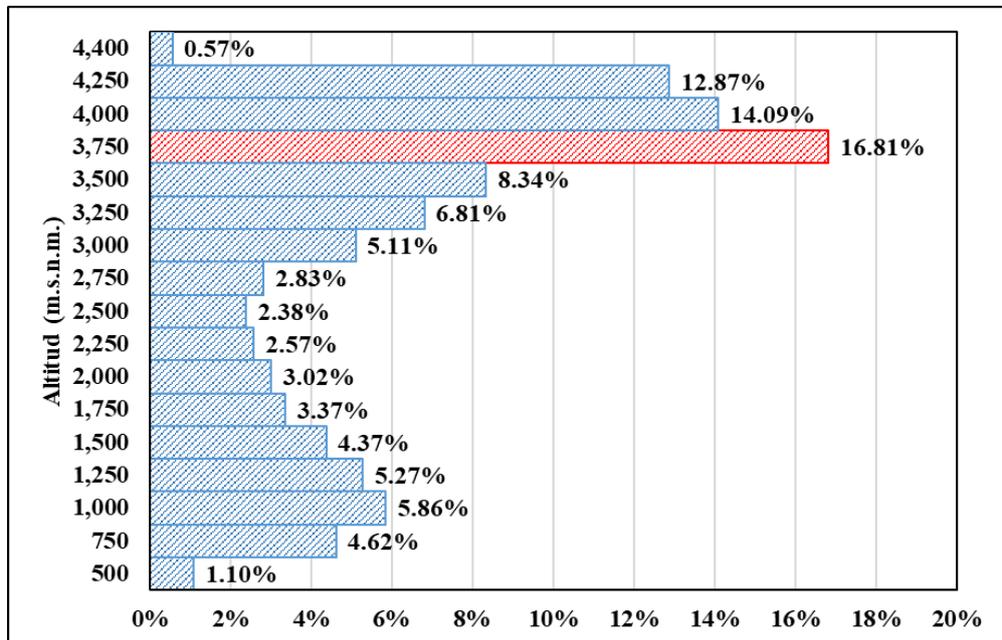


Figura 39 Polígono de frecuencias - Sub cuenca Chorobal.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla mostrada a continuación se observan los parámetros de relieve calculados con los métodos expuestos en el ítem 2.2.1.2.2.1 del marco de referencial.

Tabla 26

Parámetro de relieve de las sub cuencas.

Parámetro	Und.	Valor	
		C.B.	CHO.
Pendiente media	%	45.56	38.60
Altitud más frecuente	m.s.n.m	500.00	3,750.00
Elevación media	m.s.n.m.	2,027.45	2,854.22
Tiempo de concentración	hr.	2.63	4.29

Fuente: Elaboración propia.

Según la clasificación de la tabla 4, el área de las cuencas Cerro Blanco y Chorobal como terrenos desde Fuertemente accidentados a Escarpados, siendo entre las cotas 800 y 2300 m.s.n.m. (Zona media y media baja de cada sub cueca) un tipo de terreno totalmente escarpado.

4.3.2.1.3. Parámetros de la red hidrográfica

4.3.2.1.3.1. Caracterización de la red hídrica

Se definió la red hídrica a partir de un modelo digital de elevación (DEM), como se muestra en la tabla 6, para esto se elaboraron 7 pruebas y/o ensayos con la ayuda del software ArcGIS 10.5 (Versión de prueba) con las características siguientes:

- El tamaño de celda es de 12.5 metros en el DEM, para los 7 ensayos.
- En la tabla 29 se muestra, para los 7 ensayos los números de celda y su equivalente en km², para la caracterización de la red drenaje.

Cabe mencionar que una celda representa la resolución espacial (pixel) del ráster utilizado, por lo que al variar el tamaño y/o el número de estas la configuración del ráster aumenta o disminuye se precisión o resolución espacial (Cachuán Dávila, 2017).

La jerarquización de la red drenaje se realiza con el método de Horton y Strahler según en la tabla 6 del punto 2.2.1.2.2.4.

Tabla 27

Interfaz de la red drenaje según el # de celdas en ArcGIS.

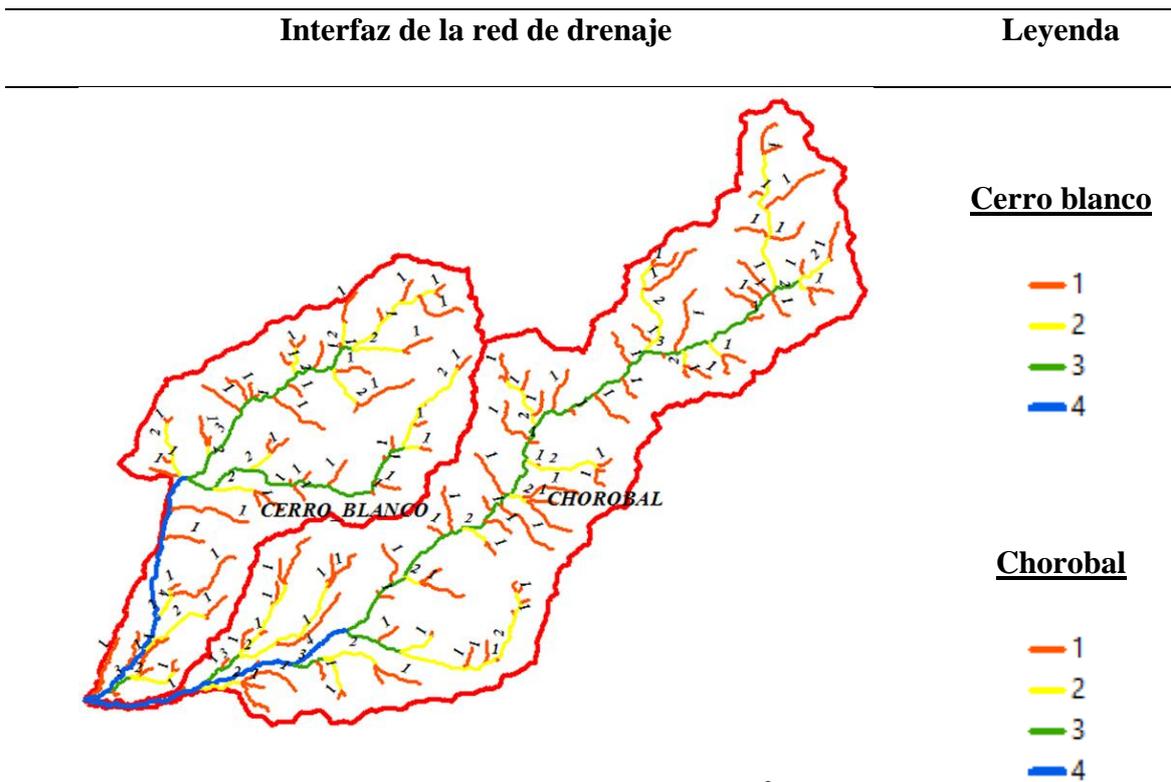


Figura 40 Ensayo 1: # de celdas 6400 = 1 km².

Fuente: Elaboración propia.

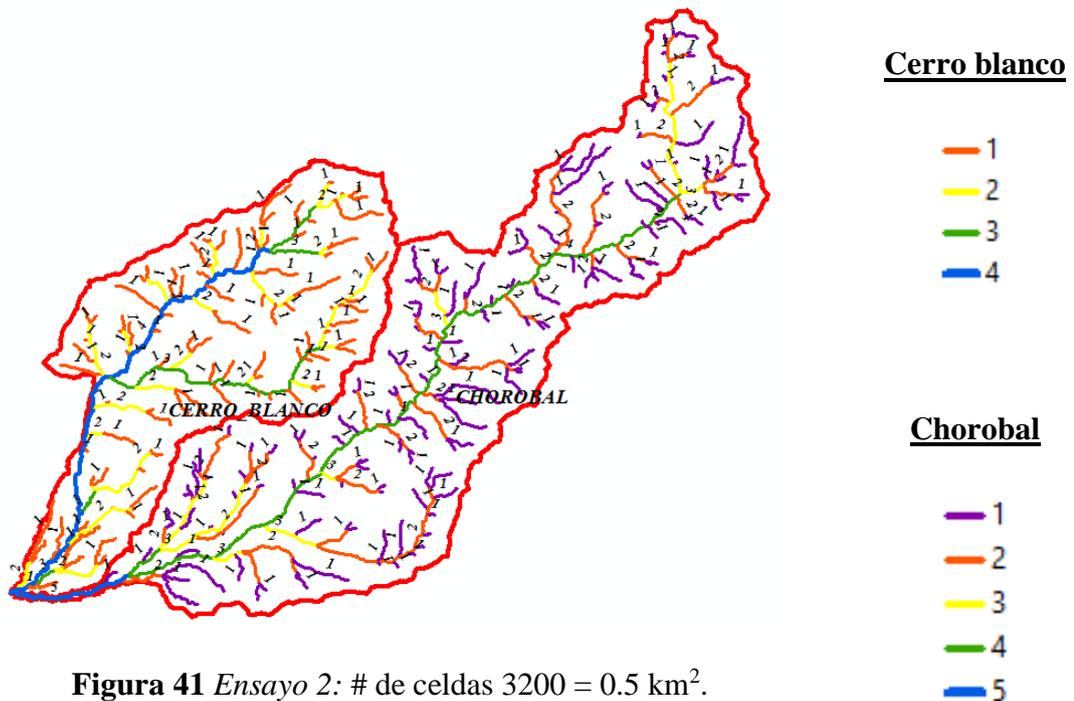


Figura 41 Ensayo 2: # de celdas 3200 = 0.5 km².

Fuente: Elaboración propia.

Interfaz de la red de drenaje

Leyenda

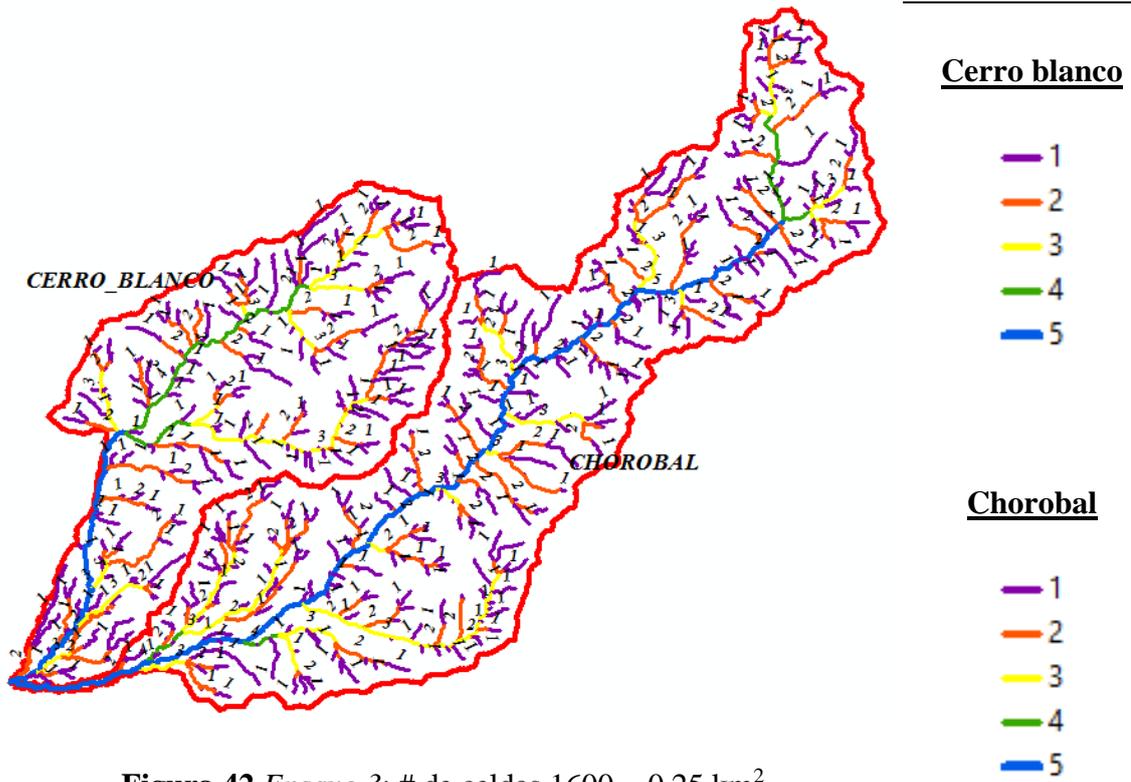


Figura 42 Ensayo 3: # de celdas 1600 = 0.25 km².

Fuente: Elaboración propia.

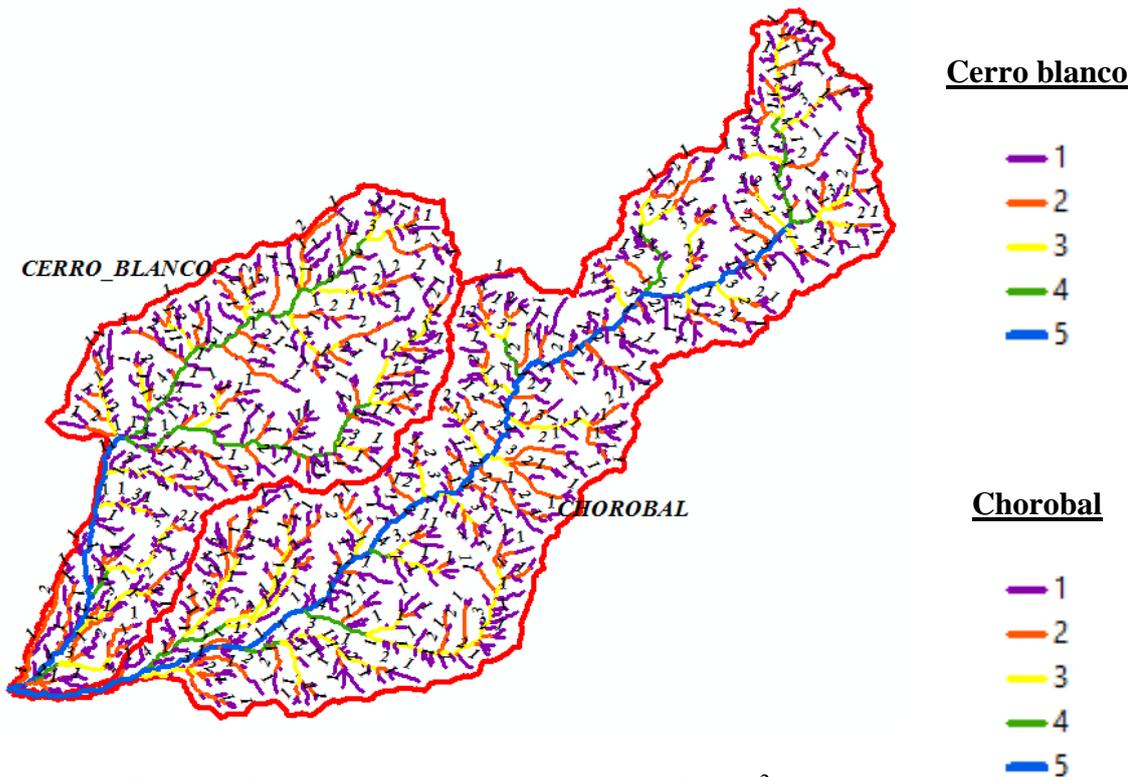


Figura 43 Ensayo 4: # de celdas 800 = 0.125 km².

Fuente: Elaboración propia.

Interfaz de la red de drenaje

Leyenda

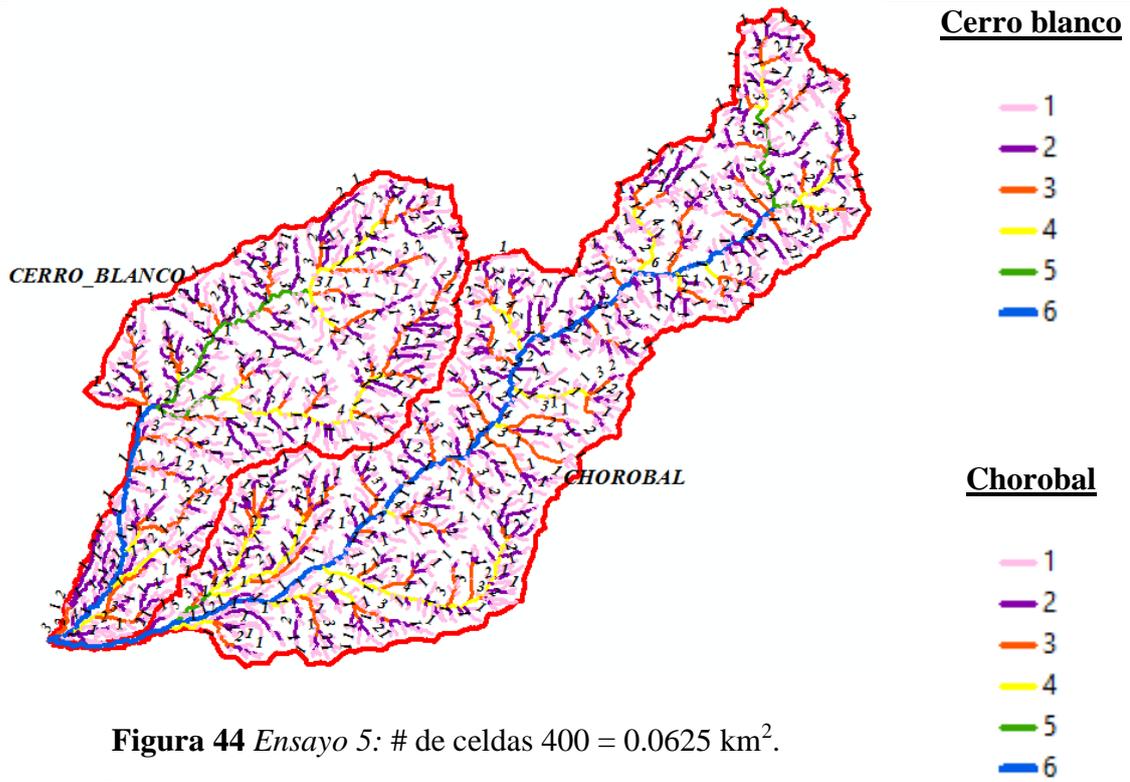


Figura 44 Ensayo 5: # de celdas 400 = 0.0625 km².

Fuente: Elaboración propia.

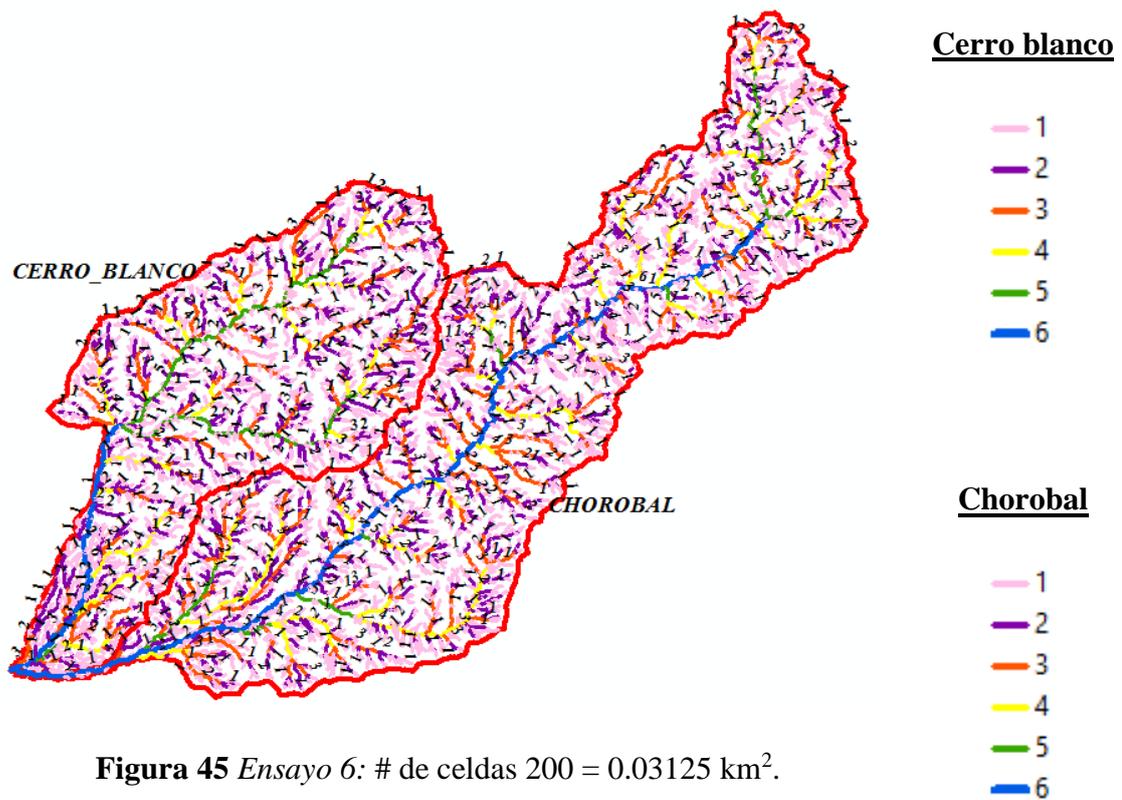


Figura 45 Ensayo 6: # de celdas 200 = 0.03125 km².

Fuente: Elaboración propia.

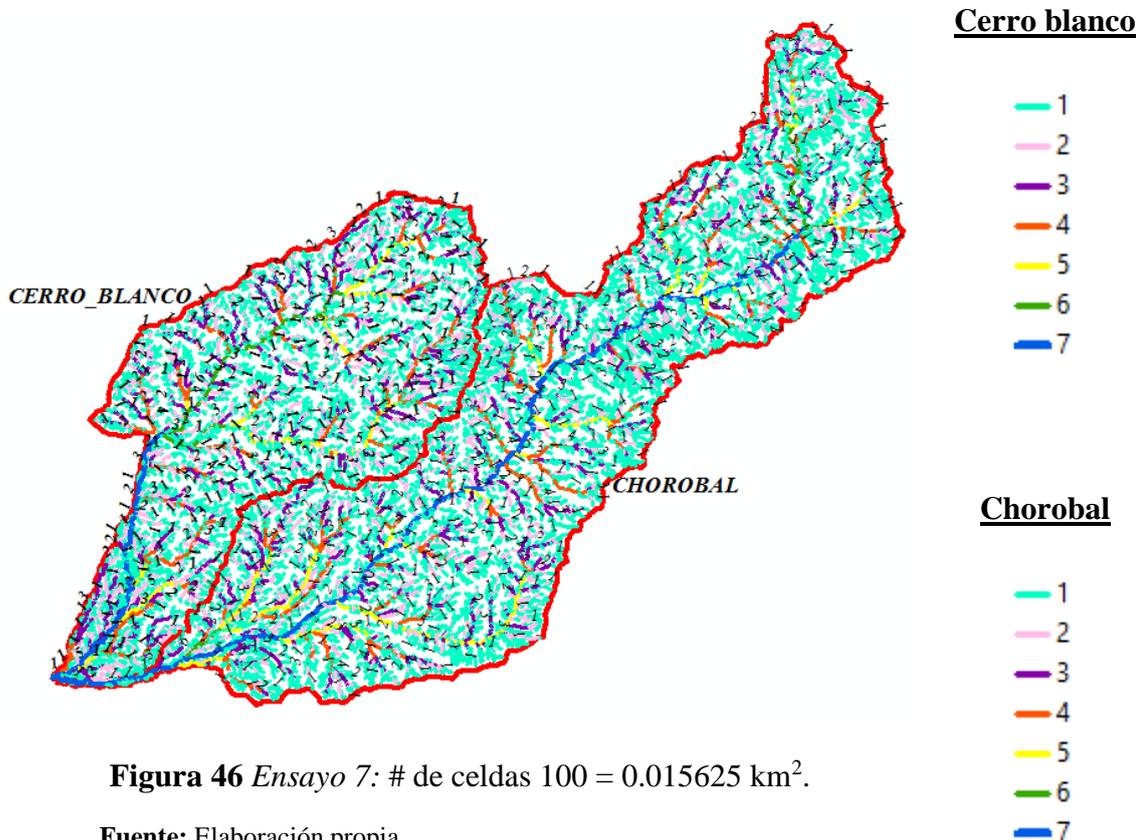


Figura 46 Ensayo 7: # de celdas 100 = 0.015625 km².

Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia en base al Modelo digital de elevación (DEM).

En la tabla 27, se puede observar que la red hídrica tiende a variar en cuanto la cantidad y longitud de los cauces, debido a la cantidad de celdas (resolución) considerada en cada ensayo.

El fin de cada ensayo es verificar cuál de estos ensayos representa de manera adecuada a la red hidrográfica de ambas sub cuencas. Como segundo fin es la de obtener la cantidad, las longitudes y las áreas de influencia de los cauces de cada ensayo, característico de ambas sub cuencas.

En las tablas del 28 al 41, se exponen la cantidad de cauces, la longitud y área de influencia acumuladas de estos por cada ensayo y orden que este representa.

Tabla 28

Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 6400.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	62	73.56	123.21	1.19	1.99
2	15	35.99	156.06	2.40	10.40
3	3	28.12	185.47	9.37	61.82
4	1	15.13	193.87	15.13	193.87

Fuente: elaboración propia.

Tabla 29

Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 3200.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	103	110.25	124.42	1.07	1.21
2	25	48.75	157.99	1.95	6.32
3	5	23.05	177.43	4.61	35.49
4	1	27.75	193.87	27.75	193.87

Fuente: elaboración propia.

Tabla 30

Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 1600.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	193	141.29	120.88	0.73	0.63
2	46	70.89	159.80	1.54	3.47
3	10	32.83	178.96	3.28	17.90
4	2	16.44	189.18	8.22	94.59
5	1	15.13	193.87	15.13	193.87

Fuente: elaboración propia.

Tabla 31

Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 800.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	401	189.73	115.81	0.47	0.29
2	88	96.81	154.41	1.10	1.75
3	20	48.34	172.98	2.42	8.65
4	4	33.06	189.93	8.26	47.48
5	1	15.13	193.87	15.13	193.87

Fuente: elaboración propia.

Tabla 32

Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 400.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	796	262.41	113.70	0.33	0.14
2	165	138.10	153.28	0.84	0.93
3	36	67.19	174.94	1.87	4.86
4	9	27.47	185.29	3.05	20.59
5	2	14.70	190.59	7.35	95.29
6	1	15.13	193.87	15.13	193.87

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 33**

Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 200.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	1647	382.50	115.17	0.23	0.07
2	359	173.04	147.56	0.48	0.41
3	82	94.81	171.12	1.16	2.09
4	22	43.07	181.63	1.96	8.26
5	3	31.69	191.60	10.56	63.87
6	1	15.13	193.87	15.13	193.87

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 34**

Características fisiográficas - Sub cuenca Cerro blanco para #celdas 100.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	3513	596.50	118.14	0.17	0.03
2	765	244.34	148.61	0.32	0.19
3	168	134.40	170.10	0.80	1.01
4	36	64.46	181.90	1.79	5.05
5	10	28.90	188.61	2.89	18.86
6	2	16.44	192.01	8.22	96.00
7	1	15.13	193.87	15.13	193.87

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35

Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 6400.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	89	126.20	212.08	1.42	2.38
2	18	59.03	269.31	3.28	14.96
3	4	40.61	311.65	10.15	77.91
4	1	15.46	317.05	15.46	317.05

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 36**

Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 3200.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	163	149.09	187.26	0.91	1.15
2	43	92.29	261.95	2.15	6.09
3	8	28.32	281.64	3.54	35.21
4	2	42.68	315.27	21.34	157.63
5	1	7.04	317.05	7.04	317.05

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 37**

Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 1600.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	319	208.30	190.23	0.65	0.60
2	75	110.96	254.20	1.48	3.39
3	17	51.76	284.57	3.04	16.74
4	4	11.07	291.66	2.77	72.91
5	1	47.31	317.05	47.31	317.05

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 38**

Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 800.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	655	280.97	187.45	0.43	0.29
2	141	143.21	246.19	1.02	1.75
3	35	88.78	284.99	2.54	8.14
4	8	23.28	295.73	2.91	36.97
5	1	47.31	317.05	47.31	317.05

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39

Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 400.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	1351	414.65	183.94	0.31	0.14
2	289	201.64	241.29	0.70	0.83
3	71	105.53	278.82	1.49	3.93
4	16	52.11	297.36	3.26	18.58
5	3	9.24	300.05	3.08	100.02
6	1	47.31	317.05	47.31	317.05

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 40**

Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 200.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	2868	672.99	190.87	0.23	0.07
2	651	257.63	237.48	0.40	0.36
3	150	157.35	274.36	1.05	1.83
4	38	86.44	297.70	2.27	7.83
5	8	23.62	303.70	2.95	37.96
6	1	47.31	317.05	47.31	317.05

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 41**

Características fisiográficas - Sub cuenca Chorobal para #celdas 100.

Orden	N°	Sum_Long	Sum_Área	Prom_Long	Prom_Área
1	6089	1,114.91	203.60	0.18	0.03
2	1358	394.45	245.61	0.29	0.18
3	302	202.83	274.83	0.67	0.91
4	75	106.38	295.02	1.42	3.93
5	21	54.54	306.37	2.60	14.59
6	3	9.24	307.84	3.08	102.61
7	1	47.31	317.05	47.31	317.05

Fuente: Elaboración propia.

Tanto en la tabla 27 como en las tablas 28 al 41, es visible que a menor número de celdas la red hidrográfica se muestra con mayor resolución, por lo que se representan una cantidad mayor de cauces en ambas cuencas.

4.3.2.1.3.2. Leyes de composición de drenaje

Al ser calculadas la fisiografía de cada sub cuenca se procede a calcular las relaciones de composición de drenaje (Relaciones de Horton y Schumm) mediante métodos analíticos y gráficos según el punto 2.2.5.1.2. (Tabla 6) para cada uno de los 7 ensayos respectivamente.

El cálculo de las de las relaciones de Horton y Schumm para cada sub cuenca y cada resolución (# de celdas) se muestra en las tablas del 42 al 83, cuya construcción de estas sigue los pasos que a continuación se describen:

- (1) Número de orden (u).
- (2) Cantidad de cauces según la resolución de cada ensayo.
- (3) Logaritmo del valor de cantidad de cauces (Log Nu), con el fin de dar una tendencia lineal a la gráfica producto del ploteo entre el número de orden (u) vs. cantidad de cauces (Nu), siendo este (u) vs. logaritmo del valor de cantidad de cauces (Log Nu).
- (4) Intersección de la ecuación lineal producida por la gráfica (u) vs. (Log Nu).
- (5) Pendiente de la ecuación lineal producida por la gráfica (u) vs. (Log Nu).
- (6) Coeficiente de correlación R^2 de la ecuación lineal producida por la gráfica (u) vs. (Log Nu).
- (7) Aplicando la ecuación lineal construida, se procede a calcular nuevos valores de (Log Nu*).

(8) Con la inversa de logaritmo se obtienen los valores de (Nu*).

(9) Es la relación de Horton y Schumm y se obtiene de la relación entre los valores de (Nu*) y (Nu*-1).

Los pasos mencionados describen el cálculo de la relación de bifurcación, para el cálculo de la relación de longitud y áreas se cambia el valor de (Nu) por el promedio de la sumatoria, según el número de orden, de las longitudes (Lu) y de las áreas (Au).

Tabla 42

Relación de bifurcación – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	N _u	Log N _u	Inter.	Pend.	R ²	Log N _u *	N _u *	R _B
1	62	1.7924				1.7728	59.2683	
2	15	1.1761	2.3804	-0.6076	0.9949	1.1652	14.6288	4.0515
3	3	0.4771				0.5576	3.6107	
4	1	0.0000				-0.0500	0.8912	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43

Relación de longitud – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	L _u	Log L _u	Inter.	Pend.	R ²	Log L _u *	L _u *	R _L
1	1.19	0.0742				0.0652	1.1620	
2	2.40	0.3801	-0.3257	0.3909	0.9685	0.4561	2.8583	2.4598
3	9.37	0.9719				0.8470	7.0307	
4	15.1	1.1799				1.2379	17.2938	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 44

Relación de área – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	A _u	Log A _u	Inter.	Pend.	R ²	Log A _u *	A _u *	R _A
1	1.99	0.2982				0.3373	2.1741	
2	10.40	1.0172	-0.3369	0.6742	0.9922	1.0114	10.2670	4.7225
3	61.82	1.7912				1.6856	48.4859	
4	193.9	2.2875				2.3598	228.975	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45

Relación de bifurcación – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	N _u	Log N _u	Inter.	Pend.	R ²	Log N _u *	N _u *	R _B
1	103	2.0128				2.0381	109.159	
2	25	1.3979	2.7118	-0.6737	0.9991	1.3643	23.1372	4.7179
3	5	0.6990				0.6906	4.9041	
4	1	0.0000				0.0168	1.0395	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46

Relación de longitud – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	L _u	Log L _u	Inter.	Pend.	R ²	Log L _u *	L _u *	R _L
1	1.07	0.0295				-0.0856	0.8211	
2	1.95	0.2900	-0.5471	0.4615	0.9369	0.3759	2.3762	2.8938
3	4.61	0.6637				0.8373	6.8762	
4	27.75	1.4432				1.2988	19.8985	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47

Relación de área – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	A _u	Log A _u	Inter.	Pend.	R ²	Log A _u *	A _u *	R _A
1	1.21	0.0821				0.0752	1.1891	
2	6.32	0.8007	-0.6614	0.7366	0.9999	0.8118	6.4832	5.4522
3	35.49	1.5501				1.5484	35.3477	
4	193.9	2.2875				2.2849	192.723	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 48

Relación de bifurcación – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	N _u	Log N _u	Inter.	Pend.	R ²	Log N _u *	N _u *	R _B
1	193	2.2856				2.2364	172.360	
2	46	1.6628				1.6432	43.9697	
3	10	1.0000	2.8297	-0.5933	0.9865	1.0499	11.2168	3.9200
4	2	0.3010				0.4566	2.8614	
5	1	0.0000				-0.1367	0.7300	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 49

Relación de longitud – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	0.73	-0.1355				-0.1389	0.7263	
2	1.54	0.1878				0.1969	1.5737	
3	3.28	0.5162	-0.4747	0.3358	0.9972	0.5327	3.4097	2.1667
4	8.22	0.9150				0.8685	7.3876	
5	15.13	1.1799				1.2043	16.0066	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 50

Relación de área – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	A_u	Log A_u	Inter.	Pend.	R²	Log A_u*	A_u*	R_A
1	0.63	-0.2032				-0.1125	0.7717	
2	3.47	0.5408				0.5291	3.3815	
3	17.90	1.2528	-0.7542	0.6416	0.9834	1.1707	14.8165	4.3817
4	94.59	1.9759				1.8124	64.9219	
5	193.9	2.2875				2.4540	284.469	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 51

Relación de bifurcación – #Celdas = 800 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	N_u	Log N_u	Inter.	Pend.	R²	Log N_u*	N_u*	R_B
1	401	2.6031				2.5999	398.002	
2	88	1.9445				1.9450	88.1078	
3	20	1.3010	3.2548	-0.6549	0.9996	1.2901	19.5049	4.5172
4	4	0.6021				0.6353	4.3179	
5	1	0.0000				-0.0196	0.9559	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 52

Relación de longitud – #Celdas = 800 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	0.47	-0.3250				-0.3378	0.4595	
2	1.10	0.0414				0.0508	1.1241	
3	2.42	0.3833	-0.7263	0.3886	0.9917	0.4394	2.7503	2.4466
4	8.26	0.9172				0.8279	6.7290	
5	15.13	1.1799				1.2165	16.4634	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 53

Relación de área – #Celdas = 800 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	A_u	Log A_u	Inter.	Pend.	R²	Log A_u*	A_u*	R_A
1	0.29	-0.5394				-0.4961	0.3191	
2	1.75	0.2442				0.2125	1.6313	
3	8.65	0.9370	-1.2047	0.7086	0.9984	0.9212	8.3398	5.1123
4	47.48	1.6765				1.6298	42.6358	
5	193.9	2.2875				2.3384	217.967	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 54

Relación de bifurcación – #Celdas = 400 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	N_u	Log N_u	Inter.	Pend.	R²	Log N_u*	N_u*	R_B
1	796	2.9009				2.8114	647.702	
2	165	2.2175				2.2155	164.244	
3	36	1.5563				1.6196	41.6490	
4	9	0.9542	3.4073	-0.5959	0.9903	1.0237	10.5613	3.9435
5	2	0.3010				0.4278	2.6781	
6	1	0.0000				-0.1681	0.6791	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 55

Relación de longitud – #Celdas = 400 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	0.33	-0.4819				-0.4372	0.3654	
2	0.84	-0.0773				-0.1128	0.7712	
3	1.87	0.2710				0.2116	1.6276	
4	3.05	0.4846	-0.7616	0.3244	0.9949	0.5359	3.4351	2.1105
5	7.35	0.8662				0.8603	7.7296	
6	15.13	1.1799				1.1847	15.2999	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 56

Relación de área – #Celdas = 400 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	A_u	Log A_u	Inter.	Pend.	R²	Log A_u*	A_u*	R_A
1	0.14	-0.8452				-0.6963	0.2012	
2	0.93	-0.0320				-0.0585	0.8741	
3	4.86	0.6866				0.5794	3.7962	
4	20.59	1.3136	-1.3341	0.6378	0.9860	1.2172	16.4880	4.3433
5	95.29	1.9791				1.8550	71.6119	
6	193.8	2.2875				2.4928	311.02	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 57

Relación de bifurcación – #Celdas = 200 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	N_u	Log N_u	Inter.	Pend.	R²	Log N_u*	N_u*	R_B
1	1,647	3.2167				3.2191	1,656.2	
2	359	2.5551				2.5651	367.40	
3	82	1.9138				1.9112	81.5030	
4	22	1.3424	3.8731	-0.6540	0.9966	1.2572	18.0804	4.5078
5	3	0.4771				0.6032	4.0109	
6	1	0.0000				-0.0507	0.8898	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58

Relación de longitud – #Celdas = 200 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	0.23	-0.6341				-0.6836	0.2072	
2	0.48	-0.3170				-0.3030	0.4978	
3	1.16	0.0630				0.0776	1.1957	
4	1.96	0.2917	-1.0642	0.3806	0.9745	0.4582	2.8721	2.4021
5	10.56	1.0238				0.8388	6.8993	
6	15.13	1.1799				1.2194	16.5729	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 59

Relación de área – #Celdas = 200 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	A_u	Log A_u	Inter.	Pend.	R²	Log A_u*	A_u*	R_A
1	0.07	-1.1553				-1.1106	0.0775	
2	0.41	-0.3861				-0.4138	0.3856	
3	2.09	0.3195	-1.8073	0.6967	0.9962	0.2829	1.9182	4.9743
4	8.26	0.9168				0.9796	9.5417	
5	63.87	1.8053				1.6764	47.463	
6	193.8	2.2875				2.3731	236.10	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 60

Relación de bifurcación – #Celdas = 100 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	N_u	Log N_u	Inter.	Pend.	R²	Log N_u*	N_u*	R_B
1	3,513	3.5457				3.4960	2,944.1	
2	765	2.8837				2.8608	725.816	
3	168	2.2253				2.2527	178.936	
4	36	1.5563	4.0771	-0.6081	0.9938	1.6446	44.1132	4.0563
5	10	1.0000				1.0364	10.8753	
6	2	0.3010				0.4283	2.6811	
7	1	0.0000				-0.1798	0.6610	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 61

Relación de longitud – #Celdas = 100 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	0.17	-0.7701				-0.7822	0.1651	
2	0.32	-0.4957				-0.4526	0.3527	
3	0.80	-0.0969				-0.1230	0.7533	
4	1.79	0.2530	-1.1119	0.3296	0.9957	0.2066	1.6092	2.1361
5	2.89	0.4610				0.5362	3.4373	
6	8.22	0.9150				0.8658	7.3424	
7	15.13	1.1799				1.1955	15.6838	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 62

Relación de área – #Celdas = 100 – Sub cuenca Cerro blanco.

u	A_u	Log A_u	Inter.	Pend.	R²	Log A_u*	A_u*	R_A
1	0.034	-1.4733				-1.3408	0.0456	
2	0.194	-0.7116				-0.7001	0.1995	
3	1.012	0.0054				-0.0594	0.8722	
4	5.053	0.7035	-1.9816	0.6407	0.9913	0.5813	3.8137	4.3725
5	18.86	1.2756				1.2221	16.675	
6	96.01	1.9823				1.8628	72.911	
7	193.9	2.2875				2.5035	318.80	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 63

Relación de bifurcación – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Chorobal.

u	N_u	Log N_u	Inter.	Pend.	R²	Log N_u*	N_u*	R_B
1	89	1.9494				1.9269	84.5061	
2	18	1.2553	2.5770	-0.6501	0.9990	1.2767	18.9125	4.4683
3	4	0.6021				0.6266	4.2326	
4	1	0.0000				-0.0235	0.9473	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 64

Relación de longitud – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Chorobal.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	1.42	0.1517				0.1753	1.4973	
2	3.28	0.5158	-0.1850	0.3603	0.9735	0.5356	3.4325	2.2925
3	10.15	1.0065				0.8959	7.8691	
4	15.46	1.1891				1.2562	18.040	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 65

Relación de área – #Celdas = 6400 – Sub cuenca Chorobal.

u	A_u	Log A_u	Inter.	Pend.	R²	Log A_u*	A_u*	R_A
1	2.38	0.3771				0.4229	2.6479	
2	14.96	1.1750	-0.2860	0.7089	0.9965	1.1318	13.545	5.1153
3	77.91	1.8916				1.8406	69.285	
4	317.1	2.5011				2.5495	354.41	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 66

Relación de bifurcación – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Chorobal.

u	N_u	Log N_u	Inter.	Pend.	R²	Log N_u*	N_u*	R_B
1	163	2.2122				2.1613	144.983	
2	43	1.6335				1.5856	38.5156	
3	8	0.9031	2.7370	-0.5757	0.9840	1.0100	10.2319	3.7643
4	2	0.3010				0.4343	2.7182	
5	1	0.0000				-0.1414	0.7221	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 67

Relación de longitud – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Chorobal.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	0.915	-0.0387				0.0497	1.1212	
2	2.146	0.3317				0.3267	2.1219	
3	3.540	0.5490	-0.2273	0.2770	0.7135	0.6038	4.0156	1.8925
4	21.34	1.3292				0.8808	7.5994	
5	7.041	0.8476				1.1578	14.382	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 68

Relación de área – #Celdas = 3200 – Sub cuenca Chorobal.

u	A_u	Log A_u	Inter.	Pend.	R²	Log A_u*	A_u*	R_A
1	1.149	0.0602				0.1591	1.4426	
2	6.092	0.7848				0.7886	6.1463	
3	35.21	1.5466	-0.4703	0.6295	0.9803	1.4181	26.186	4.2605
4	157.6	2.1976				2.0475	111.57	
5	317.1	2.5011				2.6770	475.34	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 69

Relación de bifurcación – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Chorobal.

u	N_u	Log N_u	Inter.	Pend.	R²	Log N_u*	N_u*	R_B
1	319	2.5038				2.4984	315.057	
2	75	1.8751				1.8703	74.1874	
3	17	1.2304	3.1264	-0.6281	0.9999	1.2423	17.4692	4.2468
4	4	0.6021				0.6142	4.1135	
5	1	0.0000				-0.0138	0.9686	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 70

Relación de longitud – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Chorobal.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	0.653	-0.1851				-0.2813	0.5232	
2	1.479	0.1701				0.1179	1.3119	
3	3.045	0.4835	-0.6805	0.3992	0.8128	0.5171	3.2895	2.5074
4	2.768	0.4422				0.9164	8.2481	
5	47.31	1.6749				1.3156	20.621	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 71

Relación de área – #Celdas = 1600 – Sub cuenca Chorobal.

u	A_u	Log A_u	Inter.	Pend.	R²	Log A_u*	A_u*	R_A
1	0.596	-0.2245				-0.1781	0.6635	
2	3.389	0.5301				0.5003	3.1642	
3	16.74	1.2237	-0.8565	0.6784	0.9986	1.1787	15.089	4.7687
4	72.92	1.8628				1.8571	71.954	
5	317.1	2.5011				2.5355	343.12	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 72

Relación de bifurcación – #Celdas = 800 – Sub cuenca Chorobal.

u	N_u	Log N_u	Inter.	Pend.	R²	Log N_u*	N_u*	R_B
1	655	2.8162				2.8582	721.516	
2	141	2.1492				2.1704	148.042	
3	35	1.5441	3.5461	-0.6879	0.9939	1.4825	30.3755	4.8737
4	8	0.9031				0.7947	6.2325	
5	1	0.0000				0.1068	1.2788	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 73

Relación de longitud – #Celdas = 800 – Sub cuenca Chorobal.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	0.429	-0.3676				-0.4720	0.3373	
2	1.016	0.0068				-0.0178	0.9599	
3	2.537	0.4043	-0.9262	0.4542	0.8718	0.4365	2.7319	2.8459
4	2.911	0.4640				0.8907	7.7749	
5	47.31	1.6749				1.3449	22.127	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 74

Relación de área – #Celdas = 800 – Sub cuenca Chorobal.

u	A_u	Log A_u	Inter.	Pend.	R²	Log A_u*	A_u*	R_A
1	0.286	-0.5433				-0.5473	0.2836	
2	1.746	0.2421				0.1942	1.5639	
3	8.143	0.9108	-1.2887	0.7415	0.9961	0.9357	8.6235	5.5140
4	36.97	1.5678				1.6772	47.550	
5	317.1	2.5011				2.4186	262.19	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 75

Relación de bifurcación – #Celdas = 400 – Sub cuenca Chorobal.

u	N_u	Log N_u	Inter.	Pend.	R²	Log N_u*	N_u*	R_B
1	1,351	3.1307				3.1101	1,288.5	
2	289	2.4609				2.4743	298.07	
3	71	1.8513	3.7458	-0.6358	0.9981	1.8386	68.954	4.3228
4	16	1.2041				1.2028	15.951	
5	3	0.4771				0.5670	3.6900	
6	1	0.0000				-0.0687	0.8536	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 76

Relación de longitud – #Celdas = 400 – Sub cuenca Chorobal.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	0.301	-0.5130				-0.5807	0.2626	
2	0.698	-0.1563				-0.2032	0.6264	
3	1.486	0.1721	-0.9583	0.3776	0.8807	0.1744	1.4942	2.3855
4	3.257	0.5128				0.5520	3.5644	
5	3.080	0.4886				0.9296	8.5026	
6	47.31	1.6749				1.3071	20.283	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 77

Relación de área – #Celdas = 400 – Sub cuenca Chorobal.

u	A_u	Log A_u	Inter.	Pend.	R²	Log A_u*	A_u*	R_A
1	0.136	-0.8660				-0.7928	0.1611	
2	0.835	-0.0784				-0.1143	0.7685	
3	3.927	0.5741				0.5641	3.6654	
4	18.58	1.2692	-1.4712	0.6785	0.9970	1.2426	17.481	4.7693
5	100.0	2.0001				1.9210	83.374	
6	317.1	2.5011				2.5995	397.64	

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 78**

Relación de bifurcación – #Celdas = 200 – Sub cuenca Chorobal.

u	N_u	Log N_u	Inter.	Pend.	R²	Log N_u*	N_u*	R_B
1	2,868	3.4576				3.5085	3,225.0	
2	651	2.8136				2.8338	682.00	
3	150	2.1761				2.1591	144.23	
4	38	1.5798	4.1833	-0.6747	0.9951	1.4843	30.501	4.7286
5	8	0.9031				0.8096	6.4504	
6	1	0.0000				0.1349	1.3641	

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 79**

Relación de longitud – #Celdas = 200 – Sub cuenca Chorobal.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	0.235	-0.6296				-0.7856	0.1638	
2	0.396	-0.4026				-0.3720	0.4246	
3	1.049	0.0208				0.0416	1.1006	
4	2.275	0.3569	-1.1993	0.4136	0.8958	0.4553	2.8528	2.5920
5	2.953	0.4702				0.8689	7.3945	
6	47.31	1.6749				1.2825	19.166	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 80

Relación de área – #Celdas = 200 – Sub cuenca Chorobal.

u	A_u	Log A_u	Inter.	Pend.	R²	Log A_u*	A_u*	R_A
1	0.067	-1.1768				-1.1873	0.0650	
2	0.365	-0.4379				-0.4709	0.3381	
3	1.829	0.2622				0.2455	1.7598	
4	7.834	0.8940	-1.9037	0.7164	0.9970	0.9618	9.1590	5.2046
5	37.96	1.5794				1.6782	47.669	
6	317.1	2.5011				2.3946	248.10	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 81

Relación de bifurcación – #Celdas = 100 – Sub cuenca Chorobal.

u	N_u	Log N_u	Inter.	Pend.	R²	Log N_u*	N_u*	R_B
1	6,089	3.7845				3.7770	5,984.3	
2	1,358	3.1329				3.1405	1,381.9	
3	302	2.4800				2.5039	319.11	
4	75	1.8751	4.4135	-0.6365	0.9978	1.8674	73.690	4.3305
5	21	1.3222				1.2309	17.017	
6	3	0.4771				0.5943	3.9295	
7	1	0.0000				-0.0422	0.9074	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 82

Relación de longitud – #Celdas = 100 – Sub cuenca Chorobal.

u	L_u	Log L_u	Inter.	Pend.	R²	Log L_u*	L_u*	R_L
1	0.183	-0.7373				-0.8748	0.1334	
2	0.291	-0.5369				-0.5221	0.3005	
3	0.672	-0.1729				-0.1694	0.6770	
4	1.418	0.1518	-1.2275	0.3575	0.9009	0.1833	1.5249	2.2526
5	2.597	0.4145				0.5359	3.4351	
6	3.080	0.4886				0.8886	7.7378	
7	47.31	1.6749				1.2413	17.430	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 83

Relación de área – #Celdas = 100 – Sub cuenca Chorobal.

u	A _u	Log A _u	Inter.	Pend.	R ²	Log A _u *	A _u *	R _A
1	0.033	-1.4758				-1.4244	0.0376	
2	0.181	-0.7427				-0.7586	0.1744	
3	0.910	-0.0409				0.0927	0.8077	
4	3.934	0.5948	-2.0902	0.6658	0.9978	0.5731	3.7421	4.6327
5	14.59	1.1640				1.2389	17.336	
6	102.6	2.0112				1.9048	80.312	
7	317.1	2.5011				2.5706	372.06	

Fuente: Elaboración propia.

De las tablas anteriores se puede derivar y mostrar gráficamente el cálculo de las relaciones (o leyes) de Horton y Schumm, ploteando (en el plano cartesiano) en el eje de las abscisas el N° de orden y en el eje de las coordenadas los logaritmos de los valores de (Nu), (Lu) y (Au), obteniendo una tendencia lineal facilitando el cálculo de (Nu*), (Lu*) y (Au*).

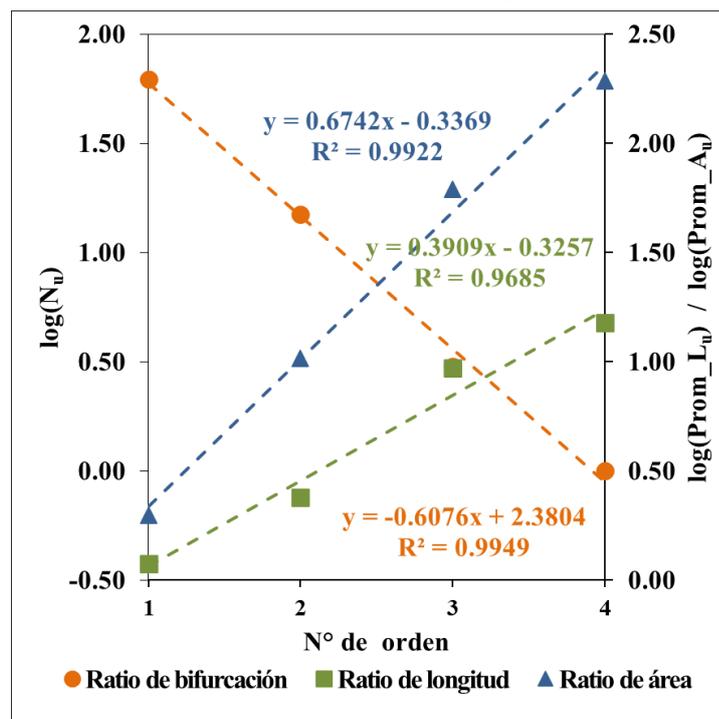


Figura 47 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 6400 = 1 km² – Sub cuenca Cerro blanco.

Fuente: Elaboración propia.

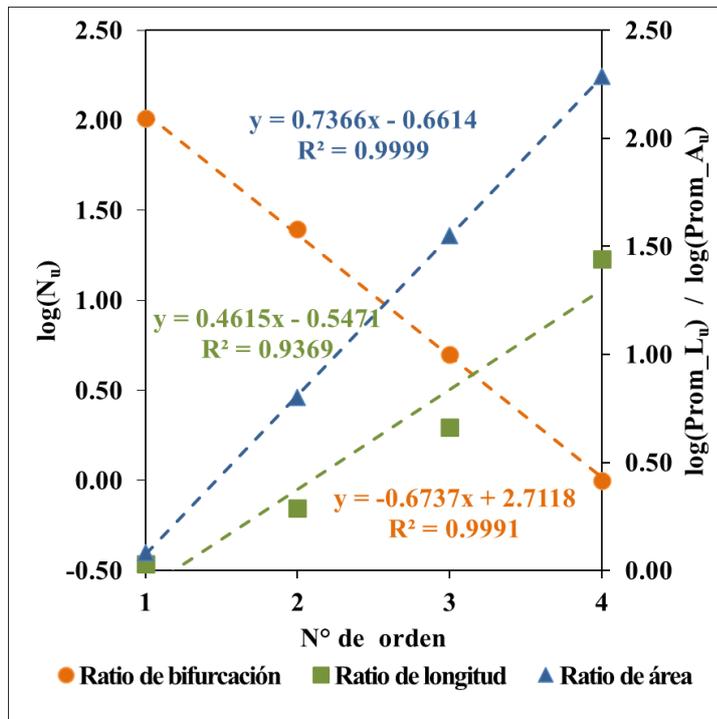


Figura 48 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 3200 = 0.5 km² – Sub cuenca Cerro blanco.

Fuente: Elaboración propia.

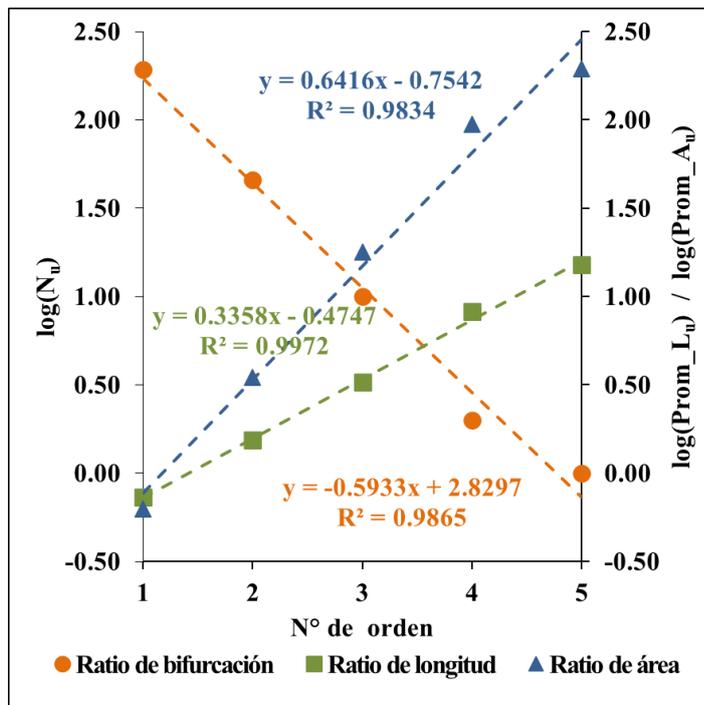


Figura 49 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 1600 = 0.25 km² – Sub cuenca Cerro blanco.

Fuente: Elaboración propia.

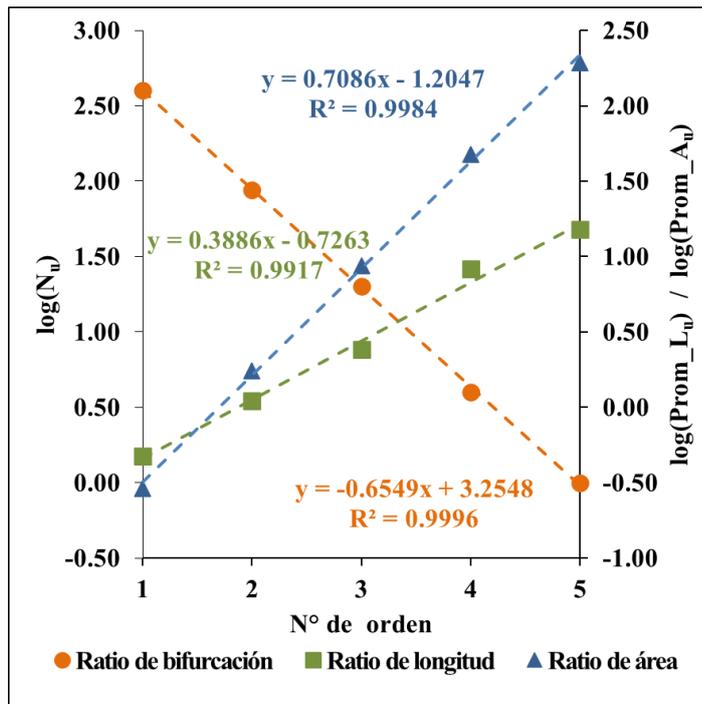


Figura 50 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 800 = 0.125 km² – Sub cuenca Cerro blanco.

Fuente: Elaboración propia.

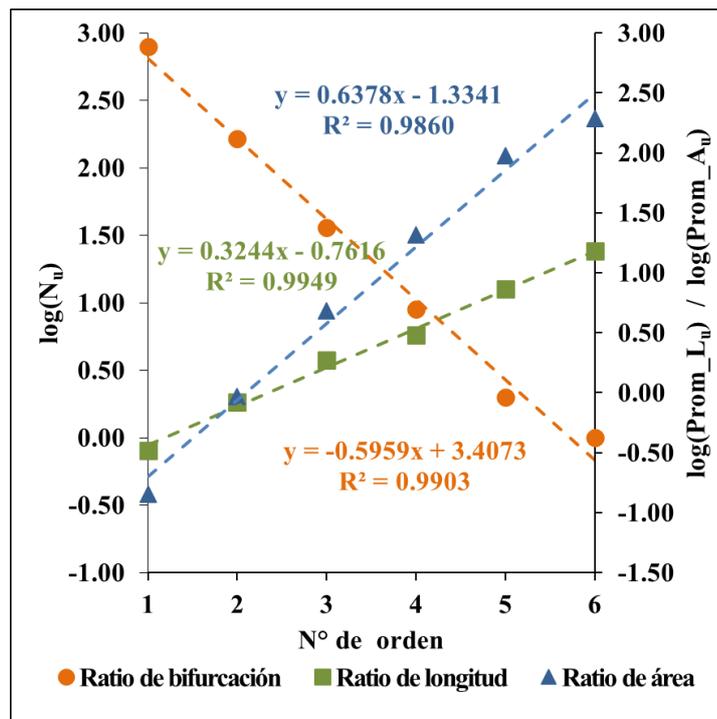


Figura 51 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 400 = 0.0625 km² – Sub cuenca Cerro Blanco.

Fuente: Elaboración propia.

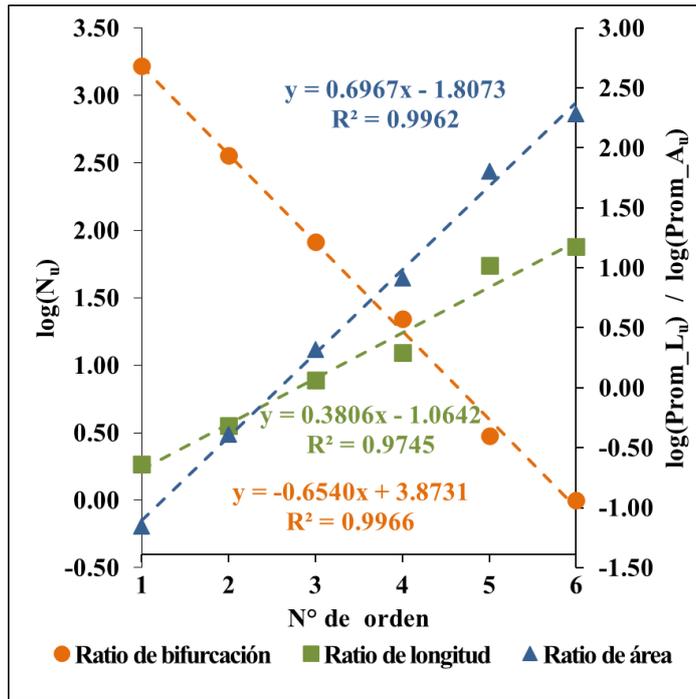


Figura 52 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 200 = 0.03125 km² – Sub cuenca Cerro blanco.

Fuente: Elaboración propia.

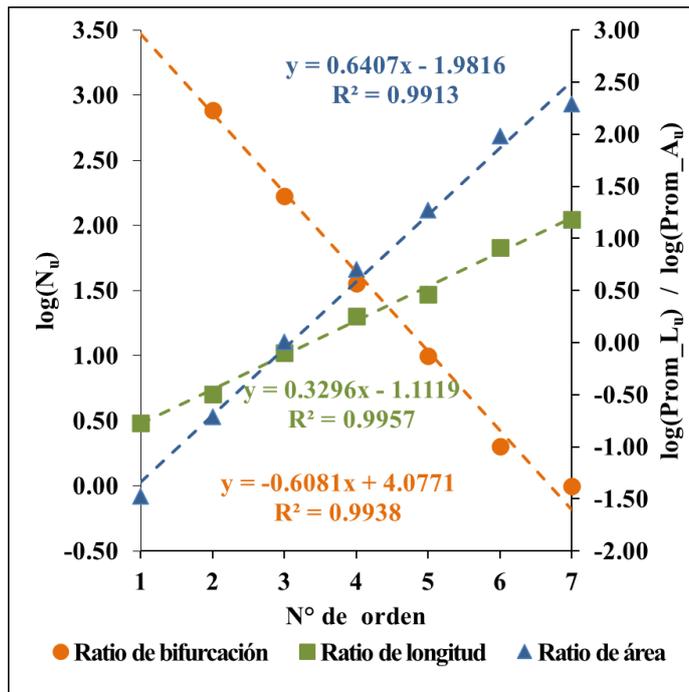


Figura 53 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 100 = 0.015625 km² – Sub cuenca Cerro blanco.

Fuente: Elaboración propia.

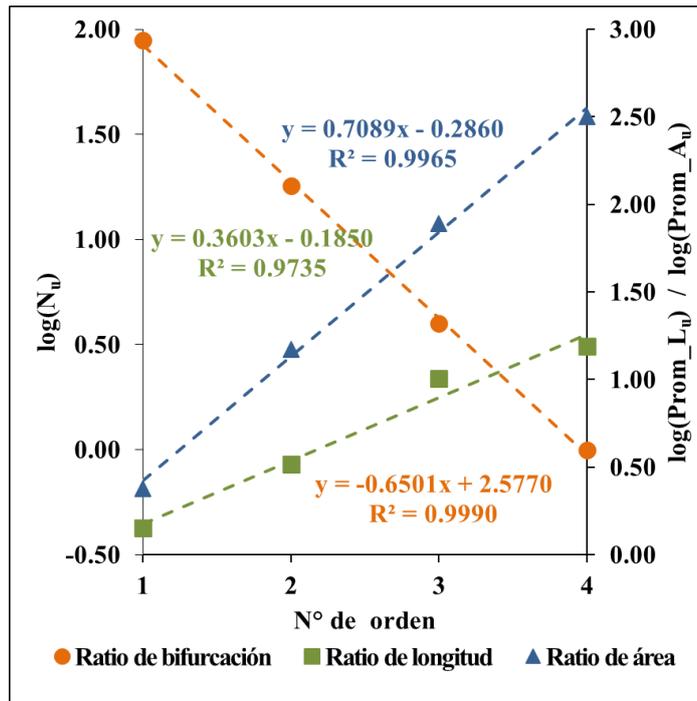


Figura 54 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 6400 = 1 km² – Sub cuenca Chorobal.

Fuente: Elaboración propia.

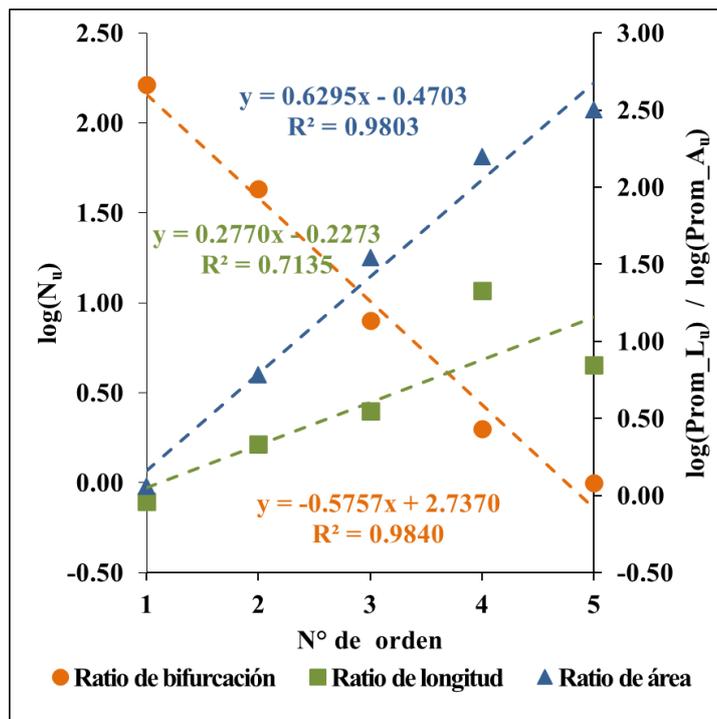


Figura 55 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 3200 = 0.5 km² – Sub cuenca Chorobal.

Fuente: Elaboración propia.

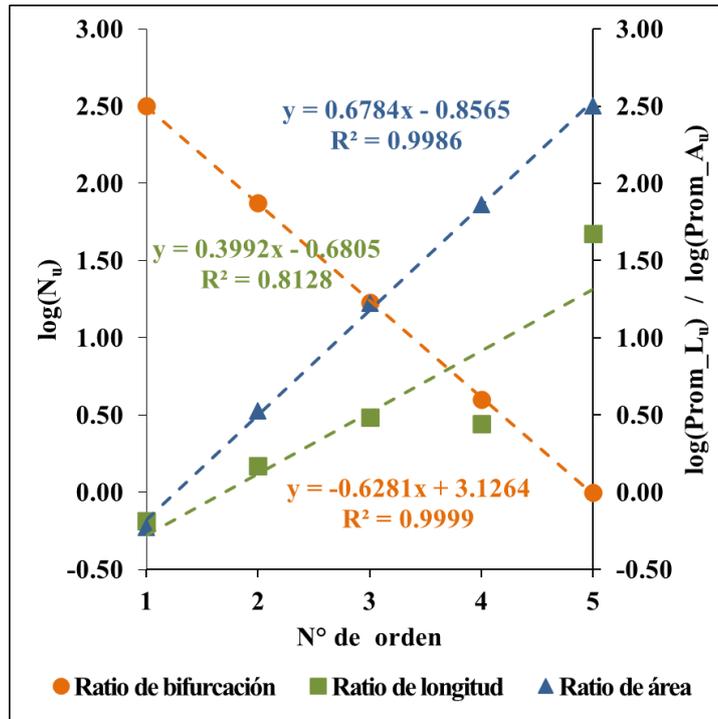


Figura 56 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 1600 = 0.25 km² – Sub cuenca Chorobal.

Fuente: Elaboración propia.

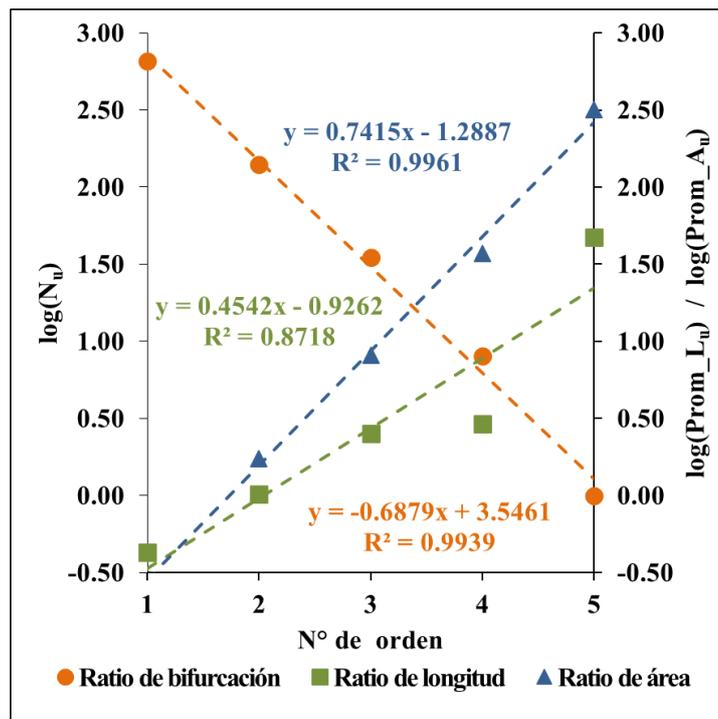


Figura 57 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 800 = 0.125 km² – Sub cuenca Chorobal.

Fuente: Elaboración propia.

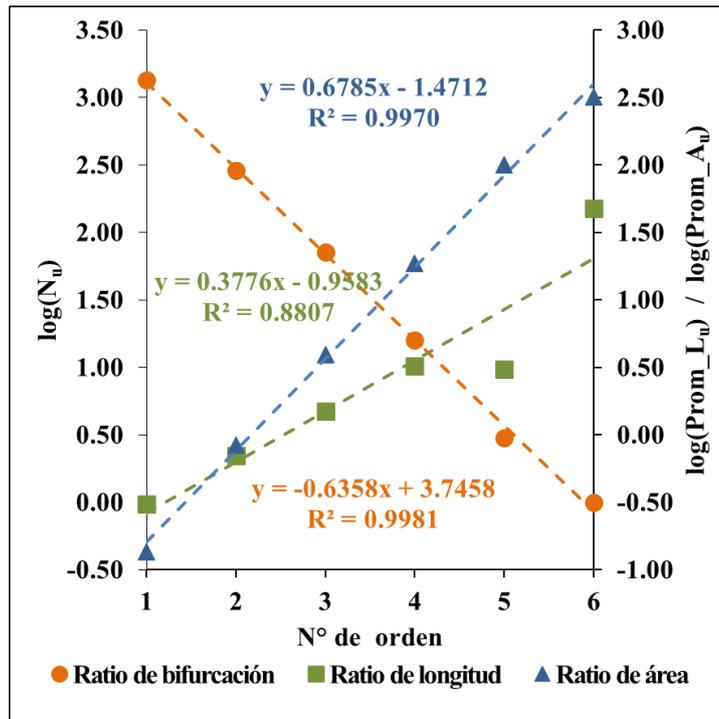


Figura 58 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 400 = 0.0625 km² – Sub cuenca Chorobal.
Fuente: Elaboración propia.

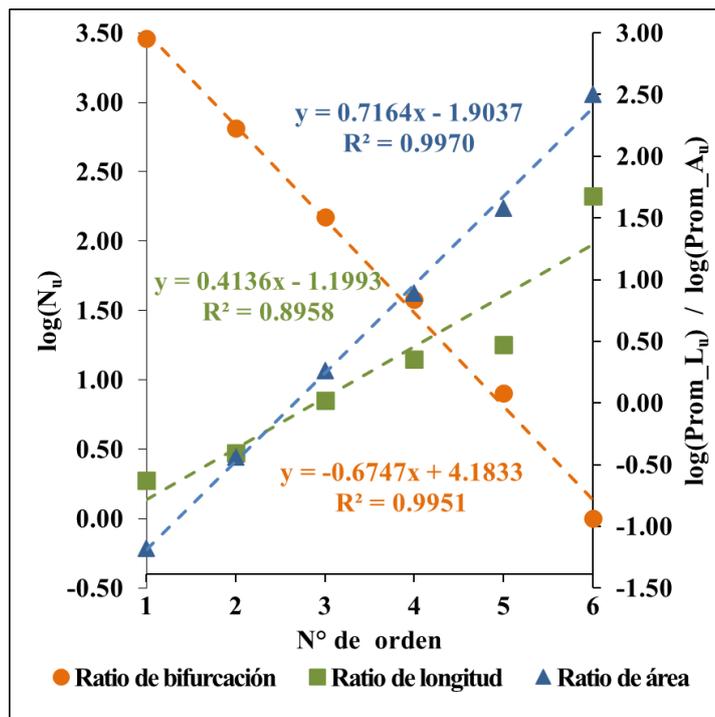


Figura 59 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 200 = 0.03125 km² – Sub cuenca Chorobal.
Fuente: Elaboración propia.

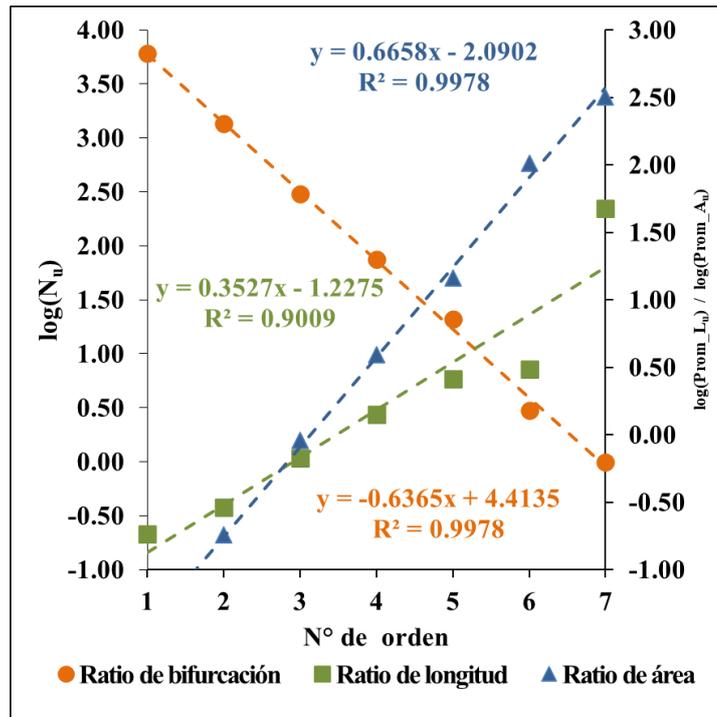


Figura 60 Cálculo gráfico de las leyes de composición de drenaje - # celdas 100 = 0.015625 km² – Sub cuenca Chorobal.

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas y figuras mostradas anteriormente, se alcanzó obtener para cada ensayo realizado un valor para las relaciones de composición de drenaje siendo estos valores sensibles al número de celdas, por lo que los valores representativos a ser considerados tienen que ser evaluados.

Además, otro criterio a considerar es la longitud del cauce de mayor orden siendo estos de 15.13 Km para la sub cuenca Cerro Blanco y 47.31 Km para la sub cuenca Chorobal (Ver figuras 42 – 48), por lo que serán considerados solo los valores de R_B , R_L y R_A de los ensayos que cumplan con este criterio.

Los cauces principales, o el cauce de mayor orden de la red hídrica, para cada sub cuenca nacen de la confluencia de dos quebradas, que en el caso de la sub cuenca Cerro blanco nace de la confluencia de las quebradas Carrizal y Purzulate a 826 m.s.n.m. y la sub cuenca Chorobal de las quebradas Melgon y

Quinual a 3656 m.s.n.m., confluyendo ambas en el río Chorobal a 257 m.s.n.m.

En las siguientes figuras se muestran los perfiles longitudinales de los cauces principales de cada sub cuenca así como los cauces de mayor orden, además de las pendientes en intervalos.

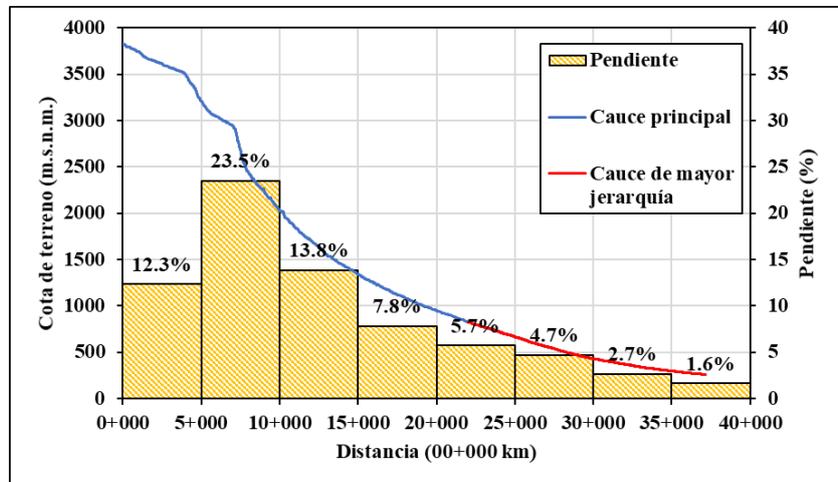


Figura 61 Perfil longitudinal del cauce principal - Sub cuenca Cerro blanco.

Fuente: Elaboración propia.

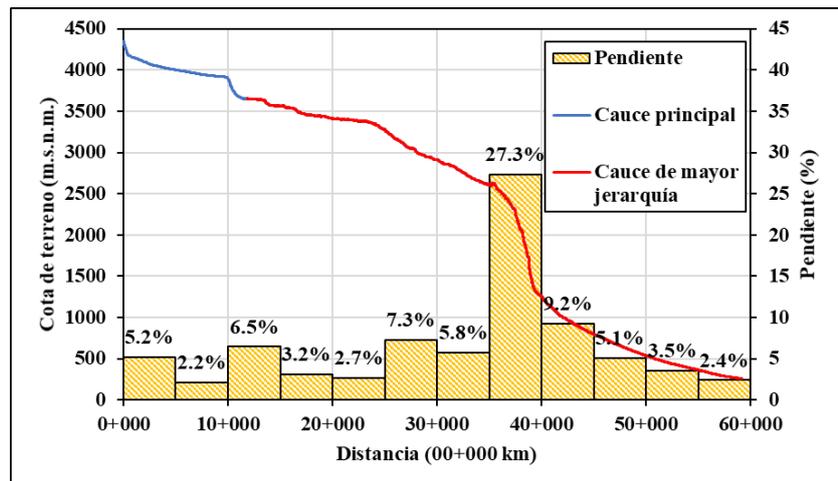


Figura 62 Perfil longitudinal del cauce principal - Sub cuenca Chorobal.

Fuente: Elaboración propia.

En las presentes tablas se observan los parámetros de la red hídrica calculados con los métodos expuestos en el ítem 2.2.1.2.2.1 del marco de referencial.

Tabla 84

Parámetros de la red de drenaje - Sub cuenca Cerro blanco.

Parámetro	Und.	Valor	Características
Número de orden de la cuenca	-	5	-
Longitud de la red hídrica (Lt)	km	276.59	-
Densidad de drenaje (Dd)	km ⁻¹	1.43	1.00 < Dd < 2.00 “Moderada”
Índice de sinuosidad (Is)	s/u	0.99	Is < 1.25 “Baja sinuosidad”
Ratio o ley de Bifurcación (R _B)	-	3.92	3.00 < R _B < 5.00 (min 2.00)
Ratio o ley de Longitud (R _L)	-	2.17	1.50 < R _L < 3.00
Ratio o ley de Área (R _A)	-	4.38	3.00 < R _L < 6.00

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 85**

Parámetros de la red de drenaje - Sub cuenca Chorobal.

Parámetro	Und.	Valor	Características
Número de orden de la cuenca	-	5	-
Longitud de la red hídrica (Lt)	km	429.39	-
Densidad de drenaje (Dd)	km ⁻¹	2.21	2.00 < Dd < 3.00 “Alta”
Índice de sinuosidad (Is)	s/u	1.13	Is < 1.25 “Baja sinuosidad”
Ratio o ley de Bifurcación (R _B)	-	4.25	3.00 < R _B < 5.00 (min 2.00)
Ratio o ley de Longitud (R _L)	-	2.51	1.50 < R _L < 3.00
Ratio o ley de Área (R _A)	-	4.77	3.00 < R _L < 6.00

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados mostrados, viene del análisis de cada ensayo mostrados en la tabla 27 con el objetivo de verificar cuál de ellos representa adecuadamente la red hídrica de cada sub cuenca, concluyendo que ambas son caracterizadas por el ensayo # 3.

4.3.3. Análisis estadístico de la data histórica

Como se mencionan en la tabla 20, en el presente trabajo encontramos 5 estaciones pluviométricas y una estación de medición de caudales (hidrológica), el cual se ha nombrado como “Acueducto Chorobal”, las

estaciones pluviométricas cuentan con una amplia cantidad y continuidad de datos históricos.

Los datos considerados en el presente estudio son los de precipitación máxima en 24 horas, siendo este registro el total de precipitación diario máximo anual, estos datos en cada estación coinciden entre el periodo de 1971 al 2018 (48 años) que es adecuado en el análisis de avenidas máximas y la estación hidrológica mencionada cuenta con datos de caudales aforados máximos anuales en un periodo de 1998 – 2018 (21 años).

El análisis estadístico realizado a continuación comprende el análisis de consistencia y el análisis de valores extremos. Ver punto 2.2.3.2.

4.3.3.1. Análisis de consistencia

4.3.3.1.2. Análisis visual gráfico

Se plotó la información en coordenadas cartesianas en el periodo de 1971 al 2018, para cada estación meteorológica en la tabla 20, ubicándose en el eje de las ordenadas los valores de precipitación máxima anual en milímetros y en el eje de las abscisas el tiempo en años. Ver los gráficos en las figuras 63 al 67.

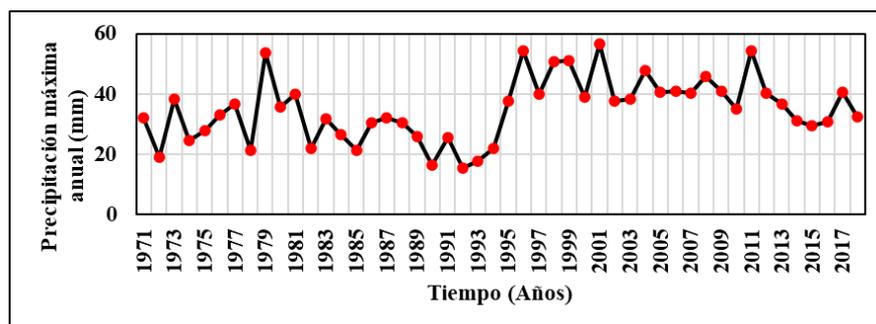


Figura 63 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Julcán.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se representa la serie histórica recopilada de la estación Julcán, en el cual se observa lo siguiente:

- Existen picos correspondientes a Marzo de 1979, Febrero del 1996, Enero de 1998, Febrero de 1999 y Marzo de 2011.

- En Marzo de 2017, mes en que aconteció el último fenómeno del Niño, se aprecia un pico menor a los picos anteriores.
- Se pueden suponer saltos en los periodos 1971 – 1994 y 1995 – 2018, además de posibles tendencias.

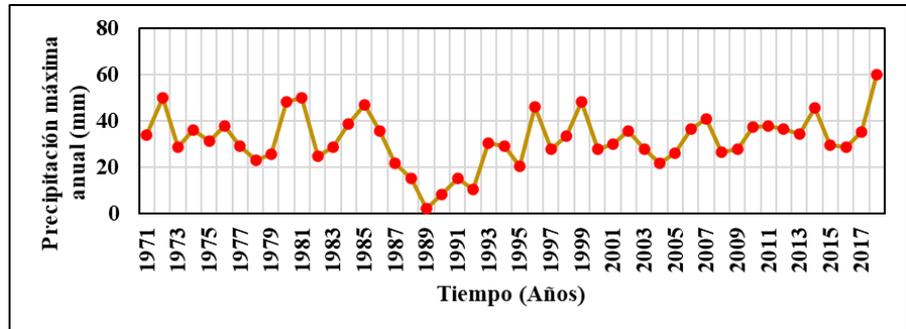


Figura 64 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Cachicadán.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se representa la serie histórica recopilada de la estación Cachicadán, en el cual se observa lo siguiente:

- Existen picos correspondientes a Abril de 1972, Enero del 1980, Marzo de 1981, Diciembre de 1985, Enero de 1996, Febrero del 1999, Febrero 2014 y Enero de 2018. En Febrero de 1989 se observa un valor muy inferior de precipitación.
- En marzo de 2017, mes en que aconteció el último fenómeno del Niño, se aprecia un pico menor a los picos anteriores.
- Se pueden suponer saltos en los periodos 1971 – 1987, 1988 – 1992 y 1993 – 2018, además de posibles tendencias.

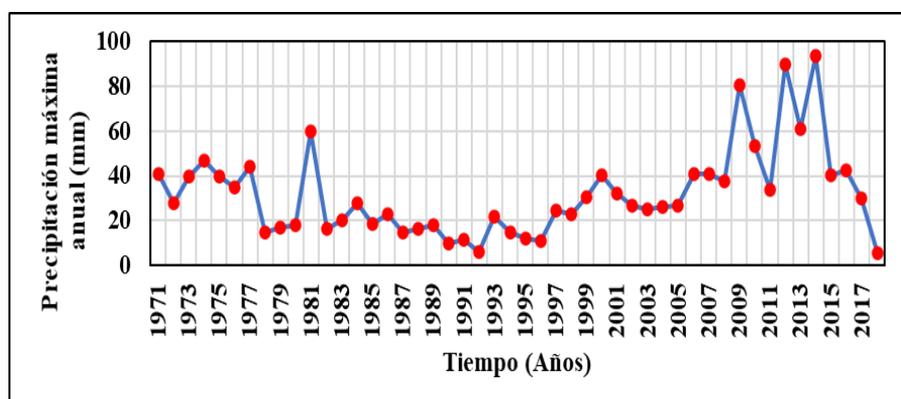


Figura 65 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Huacamarcanga.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica de la figura 67 se representa la serie histórica recopilada de la estación Huacamarcanga, en el cual se observa lo siguiente:

- Existen picos correspondientes a Marzo de 1981, Noviembre del 2009, Febrero de 2012 y Mayo de 2014.
- En marzo de 2017, mes en que aconteció el último fenómeno del Niño, se aprecia un pico menor a los picos anteriores.
- Se pueden suponer saltos en los periodos 1971 – 1977, 1978 – 2008, 2009 – 2014 y 2015 – 2018, además de posibles tendencias.

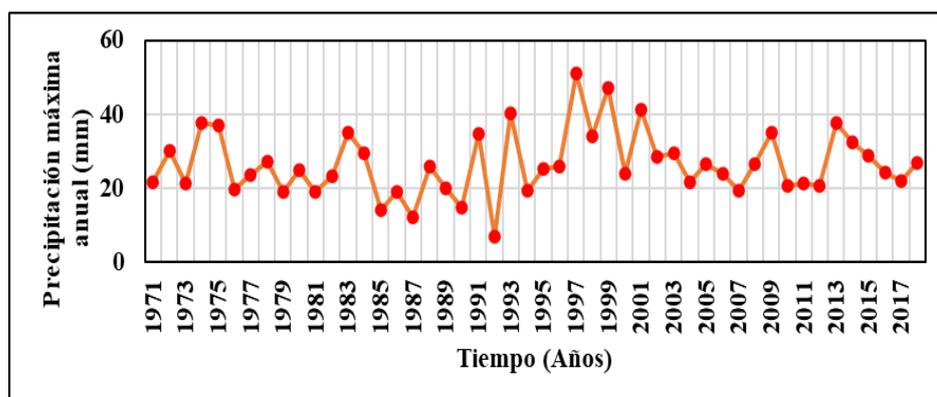


Figura 66 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Mollepata.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se representa la serie histórica recopilada de la estación Mollepata, en el cual se observa lo siguiente:

- Existen picos correspondientes a Enero de 1997 y Febrero del 1999.
- En marzo de 2017, mes en que aconteció el último fenómeno del Niño, se aprecia un pico menor a los picos anteriores.

- Se pueden suponer saltos en los periodos 1971 – 1996 y 1999 – 2018, además de posibles tendencias.

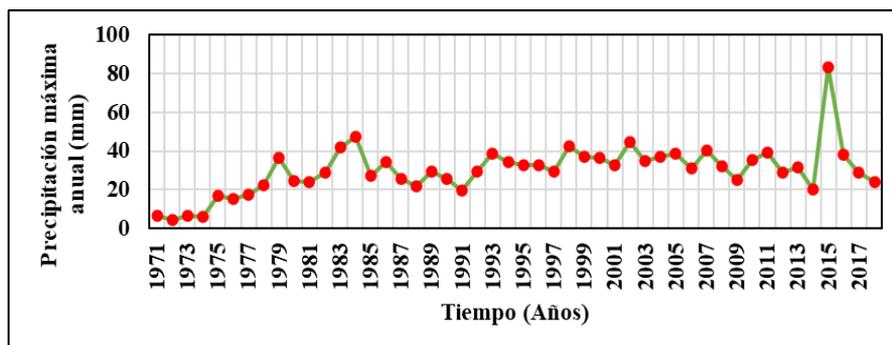


Figura 67 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Quiruvilca.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se representa la serie histórica recopilada de la estación Quiruvilca, en el cual se observa lo siguiente:

- Existen picos correspondientes a Febrero de 1984, Abril de 2002 y Diciembre de 2015.
- En marzo de 2017, mes en que aconteció el último fenómeno del Niño, se aprecia un pico menor a los picos anteriores.
- Se pueden suponer saltos en los periodos 1971 – 1974, 1975 – 1978, 1979 – 2014 y 2015 – 2018, además de posibles tendencias.

Al igual que en las gráficas mostradas, se ploteó la información de la estación hidrológica “Acueducto Chorobal” ubicándose en el eje de las ordenadas los valores de caudal promedio diario máximo anual en m³/s y en el eje de las abscisas el tiempo en años.

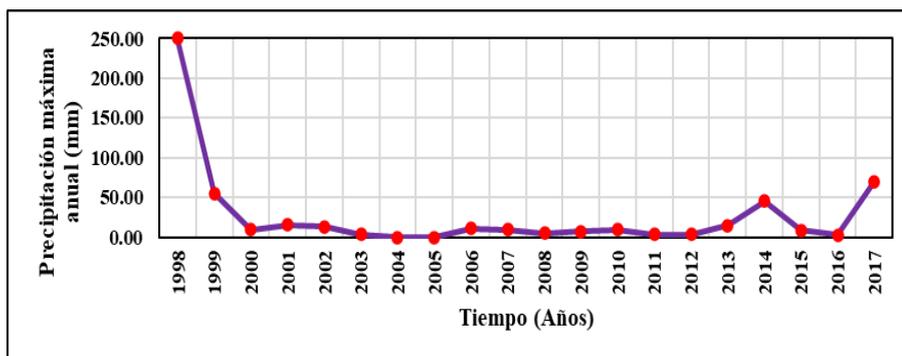


Figura 68 Caudales aforados máximos anuales – Estación de aforo “Acueducto Chorobal”.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica de la figura 68 se representa la serie histórica recopilada de la estación Acueducto Chorobal, en el cual se observa lo siguiente:

- Existen picos correspondientes a Febrero de 1998/1999 y marzo de 2014.
- En marzo de 2017, mes en que aconteció el último fenómeno del Niño, se aprecia un pico menor con respecto al fenómeno del niño 1998.
- No se consideran saltos ni tendencias en la serie, debido a que son datos tomados directamente de la lectura y procesados por lo que se consideran reales.

4.3.3.1.3. Análisis de doble masa

Debido que la estación Mollepata se encuentra a una distancia mucho mayor que las otras cuatro estaciones, tal como se observa en la figura 30, esta ha sido descartada para el análisis de doble masa. Se realizó el análisis de Doble Masa, para cuatro estaciones pluviométricas, plotenado las series históricas de precipitaciones máximas acumuladas en el eje de las coordenadas y el promedio acumulado de estas en el eje de las abcisas, como se observa en los gráficos de las siguientes figuras.

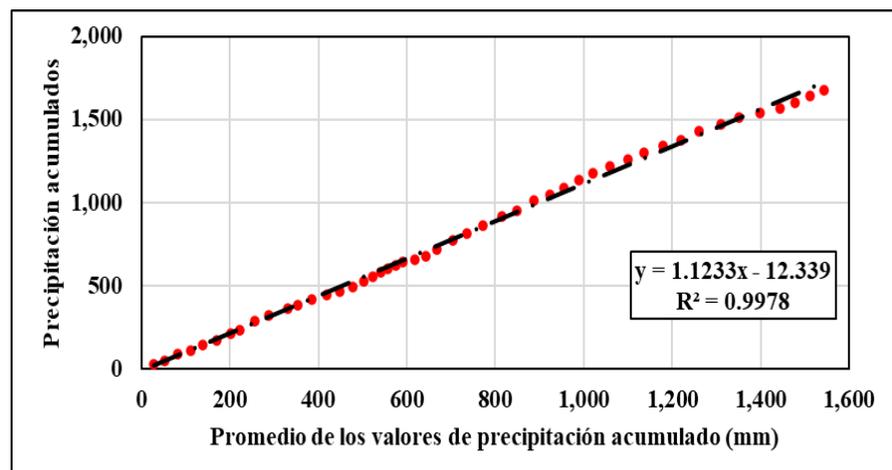


Figura 69 Análisis de doble masa para determinar la estación base - Estación Julcán.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica, se aprecia el grafico de doble masa para la estación Julcán, no se observan quiebres notables por lo que se considera que tiene una forma casi lineal.

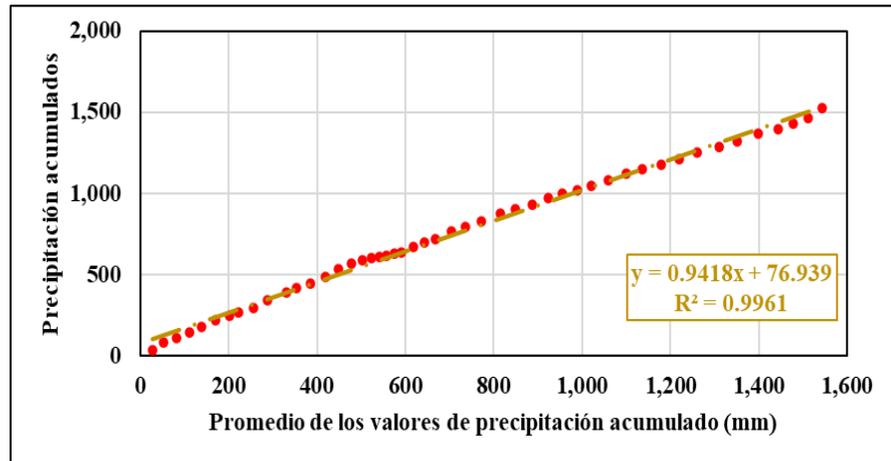


Figura 70 Análisis de doble masa para determinar la estación base - Estación Cachicadán.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica, se aprecia el grafico de doble masa para la estación Cachicadán, se observan al menos un quiebre notable.

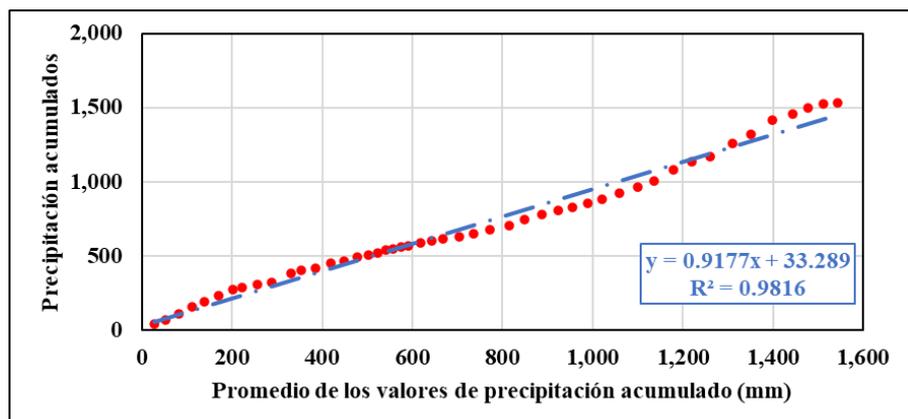


Figura 71 Análisis de doble masa para determinar la estación base - Estación Huacamarcanga.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica, se aprecia el grafico de doble masa para la estación Huacamarcanga, se observan al menos cuatro quiebres notables.

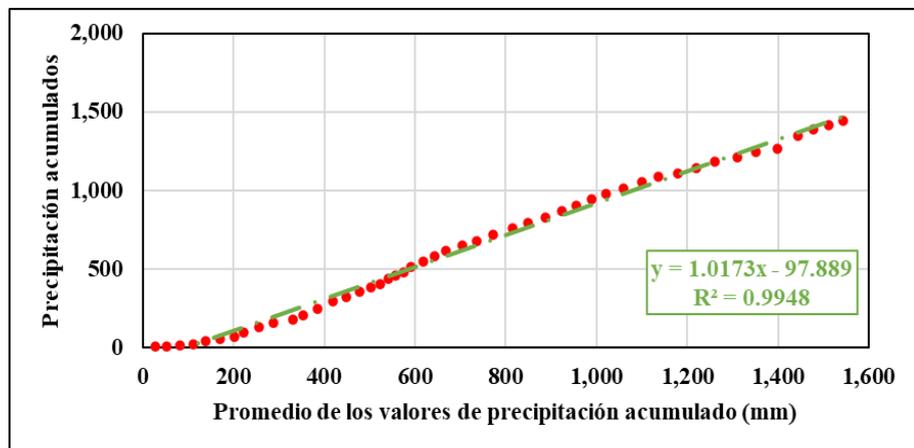


Figura 72 Análisis de doble masa para determinar la estación base - Estación Quiruvilca.

Fuente Elaboración propia.

En la gráfica, se aprecia el grafico de doble masa para la estación Quiruvilca, se observan al menos cinco quiebres notables.

De acuerdo con el análisis se tomó la estación Julcán como estación base, pues en el gráfico de la figura 69, es difícil suponer saltos y tendencias, debido a la tendencia lineal mostrando mejor tendencia de entre las cuatro estaciones analizadas.

En la figura 30 se aprecia la cercanía de las estaciones Julcán y Huacamarcanga con las sub cuencas en estudio (en referencia al centroide de cada unidad hidrográfica), por lo que las estaciones Quiruvilca y Cachicadán son descartadas para el análisis estadístico de saltos y tendencias. En la siguiente tabla se exponen las distancias mencionadas.

Tabla 86

Distancia en kilómetros de las estaciones a las unidades hidrográficas en referencia al centroide de cada sub cuenca.

Estación	Cerro Blanco	Chorobal
Julcán	34.67	36.64
Huacamarca	34.22	28.27
Quiruvilca	44.06	40.21
Cachicadán	48.07	39.56

Fuente: Elaboración propia.

Al identificar la estación base, el paso siguiente es construir un nuevo diagrama de doble masa colocando en el eje de las abscisas el acumulado de la estación base (Estación Julcán) y en el eje de las ordenadas la estación a analizar siendo esta la estación Huacamarca.

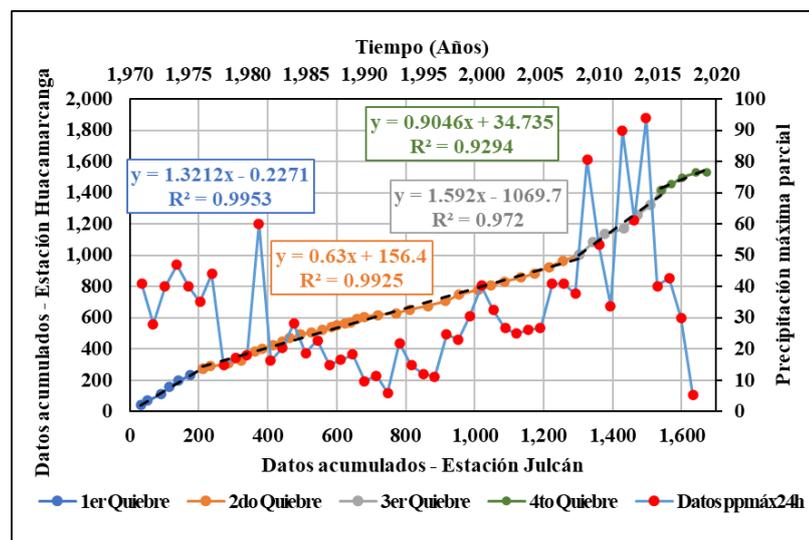


Figura 73 Análisis de doble masa para obtener los periodos de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis del gráfico de la serie histórica de la estación Huacamarca en la figura expuesta se identificó cuatro saltos en los periodos 1971 – 1977, 1978 – 2008, 2009 – 2014 y 2015 – 2018, que son confirmados en el análisis de doble masa.

4.3.3.1.4. Análisis estadístico

En los análisis visual gráfico y de doble masa se han obtenido los periodos dudosos para ser analizados estadísticamente tanto el análisis de saltos como el de tendencias y tanto en la media como en la desviación estandar.

Debido a que la estación Julcán se consideró como la estación base en el análisis de doble masa, esta será evaluada estadísticamente a partir del análisis visual gráfico debido a que es considerada como estación base, en donde se pudo suponer saltos y tendencias tanto en la media como en la desviación estandar.

A continuación en los gráficos presentados se muestran los periodos considerados para el análisis y en las siguientes tablas se muestra respectivamente el calculo de los datos necesarios para el análisis estadístico de saltos y tendencias.

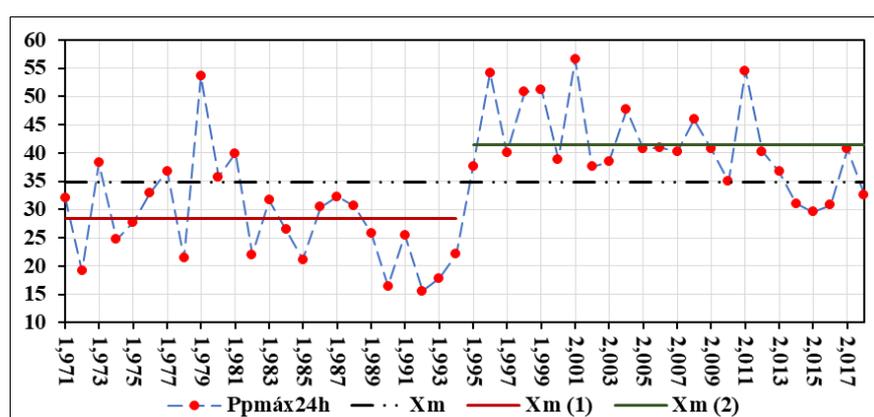


Figura 74 Representación gráfica de las medias por cada muestra – Estación Julcán.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 87

Datos necesarios para el análisis – Estación Julcán.

Descripción	Símbolo	Valor
Tamaño de la muestra total	n	48
Media de muestra total	X_m	34.87
Tamaño de la muestra del periodo 1	n_1	24
Tamaño de la muestra del periodo 2	n_2	24

Descripción	Símbolo	Valor
Tamaño de la muestra total	n	48
Media de muestra total	X_m	34.87
Media de la muestra del periodo 1	X_m^1	28.37
Media de la muestra del periodo 2	X_m^2	41.38
Desv. Estd. de la muestra del periodo 1	S_1	8.78
Desv. Estd. de la muestra del periodo 2	S_2	7.68
Varianza de la muestra del periodo 1	S^2_1	77.17
Varianza de la muestra del periodo 2	S^2_2	58.91

Fuente: Elaboración Propia.

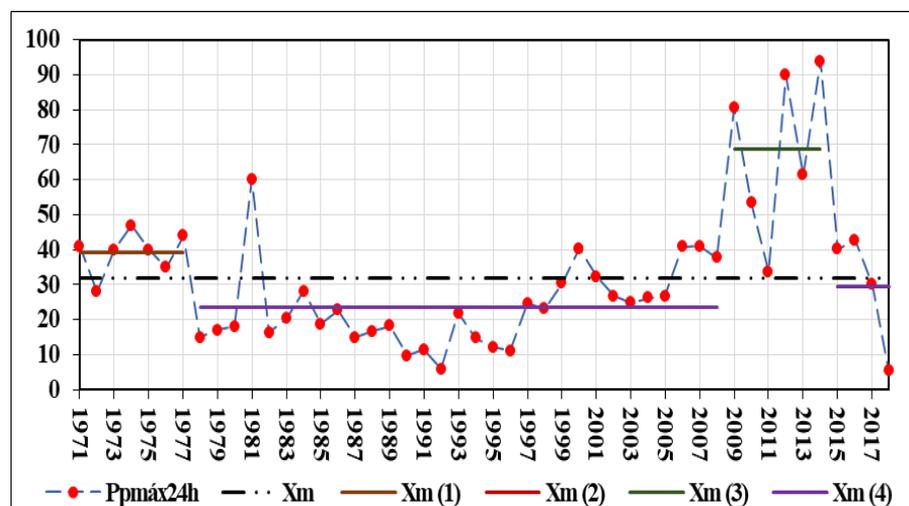


Figura 75 Representación gráfica de las medias por cada muestra – Estación Huacamarca.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 88

Datos necesarios para el análisis estadístico – Estación Huacamarca.

Descripción	Símbolo	Valor
Tamaño de la muestra total	n	48
Media de muestra total	X_m	31.96
Tamaño del muestra del periodo 1	n_1	7
Tamaño del muestra del periodo 2	n_2	31
Tamaño del muestra del periodo 3	n_3	6
Tamaño del muestra del periodo 4	n_4	4
Media del muestra del periodo 1	X_m^1	39.29
Media del muestra del periodo 2	X_m^2	23.49
Media del muestra del periodo 3	X_m^3	68.77
Media del muestra del periodo 4	X_m^4	29.60
Desv. Estd. del muestra del periodo 1	S_1	6.21
Desv. Estd. del muestra del periodo 2	S_2	11.54
Desv. Estd. del muestra del periodo 3	S_3	23.36
Desv. Estd. del muestra del periodo 4	S_4	17.05
Varianza del muestra del periodo 1	S^2_1	38.57
Varianza del muestra del periodo 2	S^2_2	133.06
Varianza del muestra del periodo 3	S^2_3	545.88
Varianza del muestra del periodo 4	S^2_4	290.80

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.3.1.4.1. Análisis estadístico de saltos

Se realizó el análisis estadístico de saltos en la media y desviación estándar según las pruebas estadísticas de “t” de Student y “F” de Fisher Snedecor, lo que nos permitió identificar, cuantificar, evaluar y corregir los periodos que se suponen dudosos en referencia a los periodos confiables, derivando en los resultados que se muestran a continuación.

Tabla 89

Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la media – Estación Julcán.

Descripción	Símbolo	Valor
-------------	---------	-------

Desv. Estd. Ponderada (p1 – p2)	$S_{P(1-2)}$	8.25
Desv. de las dif. de los promedios (p1 – p2)	$S_{d(1-2)}$	2.38
"t" calculado (p1 – p2)	$t_{c(1-2)}$	5.46
"t" tabular (p1 – p2)	$t_{t(1-2)}$	2.01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 90

Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la desviación estándar – Estación Julcán.

Descripción	Símbolo	Valor
"F" calculado (p1 – p2)	$F_{c(1-2)}$	1.31
Grado de libertad del numerador (p1 – p2)	$G.L.N.(1-2)$	23
Grado de libertad del denominador (p1 – p2)	$G.L.D.(1-2)$	23
"F" tabular (p1 – p2)	$F_{t(1-2)}$	2.01

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis estadístico de saltos de la estación Julcán, con los resultados mostrados y con un nivel de probabilidad de 95% se deduce a continuación:

- El análisis de saltos en la media entre los periodos 1971 – 1994 (p1) y 1995 – 2018 (p2) resultó “significativo” debido a que la prueba de hipótesis, el “t” calculado es mayor al “t” tabulado (valor crítico) obtenido de la tabla t de Student en base al nivel de probabilidad y a el grado de libertad del periodo en muestra.
- El análisis de saltos en la desviación estándar entre los periodos 1971 – 1994 (p1) y 1995 – 2018 (p2) resulto “no significativo” debido a que la prueba F, el “F” calculado es menor al “F” tabulado (valor crítico) obtenido de la tabla F de Fisher en base al nivel de probabilidad y a el grado de libertad del numerador y el denominador.

El periodo de 1971 – 1994 (p1) fue corregido con respecto al periodo 1995 – 2018 (p2) en base al análisis de saltos, para lo cual se empleó la siguiente fórmula.

$$X'_{(t)} = \frac{x_t - \bar{x}_1}{S_1(x)} S_2(x) + \bar{x}_2 \quad \text{Ec. 4.1}$$

En la figura siguiente se muestra gráficamente a la serie original y al periodo corregido de la estación Julcán, en donde la serie corregida muestra un nuevo pico de 63.42 mm como precipitación máxima en el año 1979.

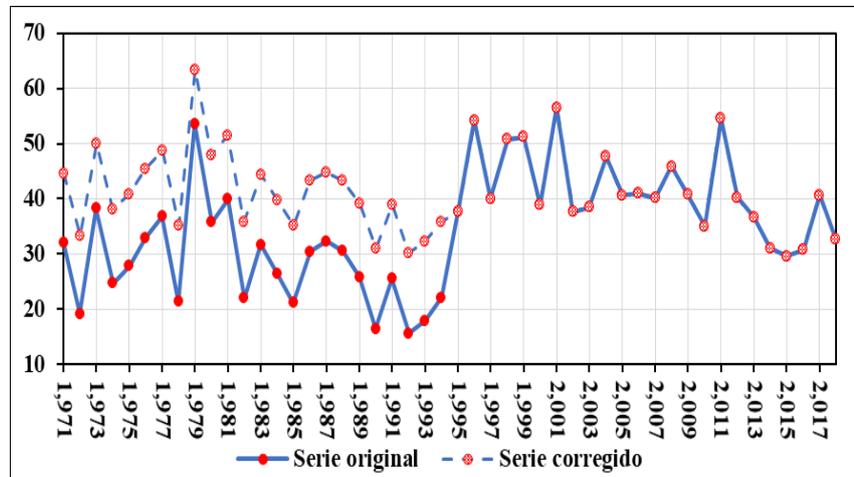


Figura 76 Serie corregida de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Julcán 1971 - 2018.

Fuente: Elaboración propia.

Considerando el análisis de doble masa (ver figura 75), se consideran 4 periodos dudosos en la estación Huacamaranga para el análisis estadístico de consistencia de saltos cuyo cálculo y resultados se exponen a continuación:

Tabla 91

Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la media – Estación Huacamaranga.

Descripción	Símbolo	Valor
Desv. Estd. Ponderada (p1 - p2)	$S_{P(1-2)}$	9.97
Desv. Estd. Ponderada (p2 - p3)	$S_{P(2-3)}$	17.18

Descripción	Símbolo	Valor
Desv. Estd. Ponderada (p3 - p4)	$S_{p(3-4)}$	28.14
Desv. de las dif. de los promedios (p1-p2)	$S_{d(1-2)}$	2.60
Desv. de las dif. de los promedios (p2-p3)	$S_{d(2-3)}$	4.10
Desv. de las dif. de los promedios (p3-p4)	$S_{d(3-4)}$	6.19
"t" calculado (p1 - p2)	$t_{c(1-2)}$	2.05
"t" calculado (p2 - p3)	$t_{c(2-3)}$	2.88
"t" calculado (p3 - p4)	$t_{c(3-4)}$	1.02
"t" tabular (p1 - p2)	$t_{t(1-2)}$	2.03
"t" tabular (p2 - p3)	$t_{t(2-3)}$	2.03
"t" tabular (p3 - p4)	$t_{t(3-4)}$	2.31

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 92

Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la desviación estándar – Estación Huacamarcanga.

Descripción	Símbolo	Valor
"F" calculado (p1 - p2)	$F_{c(1-2)}$	3.45
"F" calculado (p2 - p3)	$F_{c(2-3)}$	4.10
"F" calculado (p3 - p4)	$F_{c(3-4)}$	1.88
Grado de libertad del numerador (p1 - p2)	$G.L.N. (1-2)$	30
Grado de libertad del numerador (p2 - p3)	$G.L.N. (2-3)$	5
Grado de libertad del numerador (p3 - p4)	$G.L.N. (3-4)$	5
Grado de libertad del denominador (p1 - p2)	$G.L.D. (1-2)$	6
Grado de libertad del denominador (p2 - p3)	$G.L.D. (2-3)$	30
Grado de libertad del denominador (p3 - p4)	$G.L.D. (3-4)$	3
"F" tabular (p1 - p2)	$F_{t(1-2)}$	3.81
"F" tabular (p2 - p3)	$F_{t(2-3)}$	2.53
"F" tabular (p3 - p4)	$F_{t(3-4)}$	9.01

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis estadístico de saltos de la estación Huacamarcanga, con los resultados mostrados y con un nivel de probabilidad de 95% se deduce lo siguiente:

- El análisis de saltos en la media entre los periodos 1971 – 1977 (p1) y 1978 – 2008 (p2), 1978 – 20008 (p2) y 2009 – 2014 (p3)

resultó “significativo” debido a que la prueba de hipótesis, el “t” calculado es mayor al “t” tabulado (valor crítico) obtenido de la tabla t de Student en base al nivel de probabilidad y a el grado de libertad del periodo en muestra.

- El análisis de saltos en la media entre los periodos 2009 – 2014 (p3) y 2015 – 2018 (p4) resultó “no significativo” debido a que la prueba de hipótesis, el “t” calculado es menor al “t” tabulado (valor crítico) obtenido de la tabla t de Student en base al nivel de probabilidad y a el grado de libertad del periodo en muestra.
- El análisis de saltos en la desviación estándar entre los periodos 1971 – 1977 (p1) y 1978 – 2008 (p2), 2009 – 2014 (p3) y 2015 – 2018 (p4) resulto “no significativo” debido a que la prueba F, el “F” calculado es menor al “F” tabulado (valor crítico) obtenido de la tabla F de Fisher en base al nivel de probabilidad y a el grado de libertad del numerador y el denominador.
- El análisis de saltos en la desviación estándar entre los periodos 1978 – 20008 (p2) y 2009 – 2014 (p3) resulto “significativo” debido a que la prueba F, el “F” calculado es mayor al “F” tabulado (valor crítico) obtenido de la tabla F de Fisher en base al nivel de probabilidad y a el grado de libertad del numerador y el denominador.
- Al analizar los resultados descritos se puede considerar salto en 2 periodos, entre 1971 – 2008 y 2009 – 2018, debido a que entre el periodo p1 – p2, a pesar de que el análisis estadístico nos indica un salto “significativo”, la diferencia entre el “t” calculado y el “t” tabulado no es excesiva y entre el periodo p3 – p4 el análisis nos indica un salto “no significativo”. En la gráfica de la figura 77 se muestran las medias de cada periodo considerado para el nuevo análisis y su respectiva tabla con los datos necesarios para el cálculo.

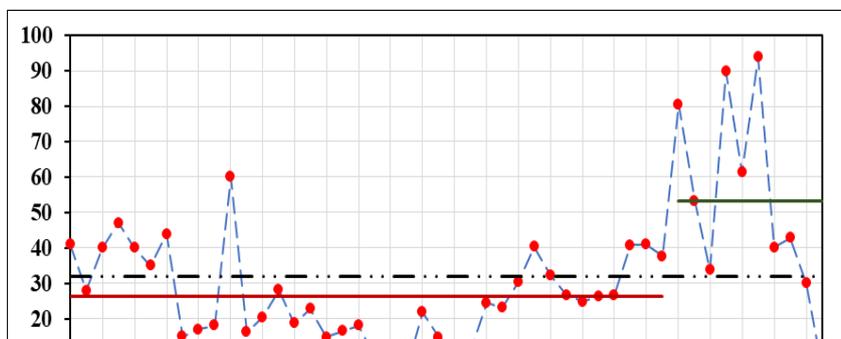


Figura 77 Representación gráfica de las medias por cada muestra – Estación Huacamaranga – 2 periodos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 93

Datos necesarios para el análisis – Estación Huacamaranga – 2 periodos.

Descripción	Símbolo	Valor
Tamaño de la muestra total	n	48
Media de muestra total	X_m	31.96
Tamaño de la muestra del periodo 1	n_1	38
Tamaño de la muestra del periodo 2	n_2	10
Media de la muestra del periodo 1	X_m^1	26.40
Media de la muestra del periodo 2	X_m^2	53.10
Desv. Estd. de la muestra del periodo 1	S_1	12.35
Desv. Estd. de la muestra del periodo 2	S_2	28.45
Varianza de la muestra del periodo 1	S^2_1	152.65
Varianza de la muestra del periodo 2	S^2_2	809.27

Fuente: Elaboración propia.

- El cálculo del análisis estadístico de consistencia de saltos de los nuevos periodos considerados para la estación Huacamaranga tanto para la media como la desviación estándar se muestran en las tablas 94 – 95.

Tabla 94

Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la media – Estación Huacamaranga – 2 periodos.

Descripción	Símbolo	Valor
Desv. Estd. Ponderada (p1 – p2)	$S_P(1-2)$	26.80
Desv. de las dif. de los promedios (p1 – p2)	$S_d(1-2)$	9.53
"t" calculado (p1 – p2)	$t_c(1-2)$	2.80
"t" tabular (p1 – p2)	$t_t(1-2)$	2.01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 95

Cálculo y resultados del análisis estadístico de Saltos en la desviación estándar – Estación Huacamaranga – 2 periodos.

Descripción	Símbolo	Valor
"F" calculado (p1 – p2)	$F_c(1-2)$	5.30
Grado de libertad del numerador (p1 – p2)	$G.L.N.(1-2)$	9
Grado de libertad del denominador (p1 – p2)	$G.L.D.(1-2)$	37
"F" tabular (p1 – p2)	$F_t(1-2)$	2.14

Fuente: Elaboración propia.

De volver a realizar el análisis estadístico de saltos de la estación Huacamaranga para los dos periodos mencionados, con los resultados mostrados y con un nivel de probabilidad de 95% se deduce lo siguiente:

- El análisis de saltos en la media entre los periodos 1971 – 2008 (p1) y 2009 – 2018 (p2) resultó “significativo” debido a que la prueba de hipótesis, el “t” calculado es mayor al “t” tabulado (valor crítico) obtenido de la tabla t de Student en base al nivel de probabilidad y a el grado de libertad del periodo en muestra.
- El análisis de saltos en la desviación estándar entre los periodos 1971 – 2008 (p1) y 2009 – 2018 (p2) resulto “significativo” debido a que la prueba F, el “F” calculado es mayor al “F” tabulado (valor crítico) obtenido de la tabla F de

Fisher en base al nivel de probabilidad y a el grado de libertad del numerador y el denominador.

El periodo de 2009 – 2018 (p2) fue corregido con respecto al periodo 1971 – 2008 (p1) en base al análisis de saltos, pues como se observa en la gráfica de la figura 77 la media del periodo p2 evidencia una menor diferencia con la media de la serie histórica, para lo cual se empleó la siguiente fórmula.

$$X'_{(t)} = \frac{x_t - \bar{x}_2}{S_2(x)} S_1(x) + \bar{x}_1 \quad \text{Ec. 4.2}$$

En la gráfica siguiente se muestra gráficamente a la serie original y al periodo corregido de la estación Huacamarcanga, en donde la serie corregida muestra un nuevo pico de 44.12 mm como precipitación máxima en el año 2014.

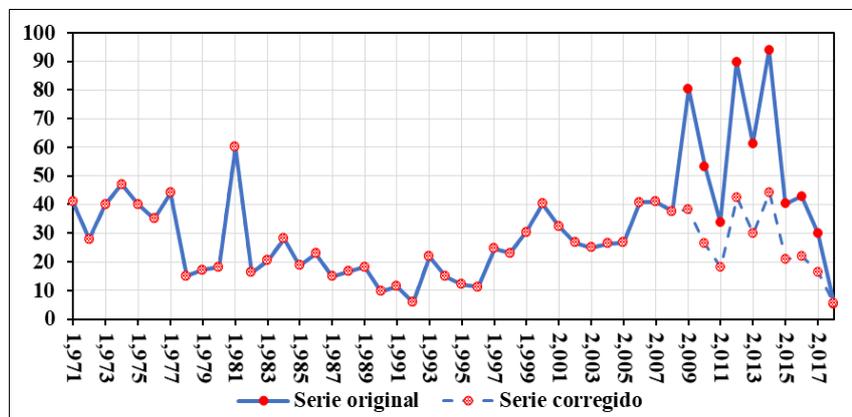


Figura 78 Serie corregida de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Huacamarcanga 1971 – 2018 – 2 periodos.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.1.4.2. Análisis estadístico de tendencias

Contando con los registros ya corregidos del análisis de saltos, se realizó el análisis estadístico de tendencias en la media y en la desviación estándar con la prueba R^2 (regresión lineal), y evaluada con la prueba de “t” de Student.

En las tablas 96 – 97 se muestra el cálculo de tendencia de la media y sus resultados de las estaciones Julcán y Huacamarcanga.

Tabla 96

Cálculo y resultados del análisis estadístico de Tendencia de la media – Estación Julcán.

Descripción	Símbolo	Valor
Promedio de las tendencias	T_m	41.38
Promedio del tiempo	t	24.50
Promedio del producto	$T_m * t$	989.10
Dv. Est. de la tendencia de la media	S_{Tm}	7.59
Dv. Est. del tiempo	S_T	14.00
Coefficiente de correlación	R	-0.23
Pendiente	B_m	-0.13
Intersección	A_m	44.45
Valor del estadístico "t" calculado	t_c	-1.61
Grado de libertad	G.L.	46.00
Valor crítico de "t"	t_t	2.01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 97

Cálculo y resultados del análisis estadístico de Tendencia de la media – Estación Huacamaranga.

Descripción	Símbolo	Valor
Promedio de las tendencias	T_m	41.38
Promedio del tiempo	t	24.50
Promedio del producto	$T_m * t$	630.58
Dv. Est. de la tendencia de la media	S_{Tm}	12.22
Dv. Est. del tiempo	S_T	14.00
Coefficiente de correlación	R	-0.09
Pendiente	B_m	-0.08
Intersección	A_m	28.43
Valor del estadístico "t" calculado	t_c	-0.65
Grado de libertad	G.L.	46.00
Valor crítico de "t"	t_t	2.01

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis estadístico de tendencias de ambas estaciones, en los resultados mostrados en las tablas 96 y 97 y con un nivel de probabilidad de 95% se deduce lo siguiente:

- El análisis de tendencias en la media en la estación Julcán resultó “no significativo” debido a que la prueba de hipótesis, el “t” calculado es menor al “t” tabulado (valor crítico) obtenido de la tabla t de Student en base al nivel de probabilidad y al grado de libertad del periodo en muestra.

- El análisis de tendencias en la media en la estación Huacamarcanga resultó “no significativo” debido a que la prueba de hipótesis, el “t” calculado es menor al “t” tabulado (valor crítico) obtenido de la tabla t de Student en base al nivel de probabilidad y al grado de libertad del periodo en muestra.

En (Villón Béjar, Hidrología Estadística, 2005), según Salas “la tendencia en la desviación estándar, generalmente se presenta en los datos semanales o mensuales, no así en datos anuales”. Por lo que al contar en el presente estudio datos de carácter anual no se realizara el análisis de tendencia en la desviación estándar.

4.3.3.2. Análisis de valores extremos

En esta parte del estudio se tiene como objetivo determinar los valores extremos, según las distribuciones estadísticas mostradas en la tabla 7 vistas en la sección 2.2.3.2.2., tanto de las estaciones meteorológicas como hidrológicas (Ver tabla 20) para periodos de retorno de 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, con la finalidad de establecer un valor para cada uno de ellos.

El análisis probabilístico y la prueba de bondad de ajuste se realizó con la ayuda software EasyFit 5.6 (Versión de prueba) de propiedad de MathWave, software que permite ajustar automáticamente distintas distribuciones a los datos de la muestra y seleccionar la mejor. En el presente trabajo se empleó un complemento del software para Microsoft Excel 2013 en la determinación de la función de distribución y la tabla 8 para la prueba de bondad de ajuste.

En los puntos siguientes se explica el procedimiento para el análisis estadístico expuesto en las tablas 98, 99 y 100.

- (1) Numero de orden de la muestra (#).
- (2) La data a analizar ordenada de menor a mayor (x).
- (3) La probabilidad empírica experimental acumulada en función de la cantidad de datos y el número de orden $P(x)$ según la fórmula de Ceibal:

$$P(x) = \frac{m}{n+1} \quad \text{E. 4.3}$$

- (4) Función de distribución acumulada (FDA) F(x) de la distribución Gamma 22 parámetros además de las filas (6) Gamma 3 parámetros, (8) Log Pearson Tipo III y (10) Zumbel.

$$F(x) = \sum_{i=0}^x f(i) \quad \text{E. 4.4}$$

- (5) Inversa de la Función de distribución acumulada x (p), en función de la probabilidad empírica experimental acumulada.

Tabla 98

Análisis de valores extremos - Estación Julcán.

#	x	P(x)	G2P		G3P		LPIII		GUM	
			F(x) α: 29.7 β: 1.39	x(p)	F(x) α: 3.66 β: 4.08 γ: 26.4	x(p)	F(x) α: 62.9 β: 0.02 γ: 2.29	x(p)	F(x) σ: 5.92 μ: 38.0	x(p)
1	29.60	0.0204	0.0479	27.36	0.0151	29.93	0.0291	28.94	0.0165	29.91
2	30.22	0.0408	0.0589	29.14	0.0257	30.88	0.0393	30.30	0.0248	31.07
3	30.80	0.0612	0.0707	30.34	0.0389	31.57	0.0511	31.23	0.0351	31.88
4	31.00	0.0816	0.0753	31.28	0.0442	32.16	0.0557	31.98	0.0393	32.52
5	31.10	0.1020	0.0775	32.06	0.0469	32.68	0.0580	32.61	0.0414	33.07
6	32.23	0.1224	0.1066	32.76	0.0841	33.15	0.0893	33.18	0.0719	33.57
7	32.60	0.1429	0.1177	33.38	0.0987	33.60	0.1016	33.70	0.0844	34.02
8	33.36	0.1633	0.1423	33.95	0.1319	34.02	0.1295	34.17	0.1138	34.44
9	35.00	0.1837	0.2047	34.48	0.2145	34.42	0.2015	34.62	0.1924	34.84
10	35.11	0.2041	0.2093	34.98	0.2205	34.81	0.2068	35.05	0.1983	35.22
11	35.28	0.2245	0.2168	35.46	0.2301	35.18	0.2154	35.47	0.2079	35.58
12	35.81	0.2449	0.2399	35.92	0.2593	35.55	0.2421	35.86	0.2375	35.94
13	35.90	0.2653	0.2438	36.36	0.2643	35.91	0.2467	36.25	0.2425	36.28
14	36.70	0.2857	0.2814	36.79	0.3103	36.27	0.2897	36.63	0.2903	36.62
15	37.60	0.3061	0.3259	37.21	0.3625	36.63	0.3399	37.00	0.3456	36.96
16	37.70	0.3265	0.3309	37.61	0.3683	36.98	0.3456	37.36	0.3519	37.29
17	38.17	0.3469	0.3549	38.01	0.3953	37.33	0.3722	37.72	0.3809	37.62
18	38.50	0.3673	0.3722	38.41	0.4143	37.68	0.3912	38.08	0.4015	37.95
19	38.87	0.3878	0.3914	38.80	0.4352	38.04	0.4122	38.44	0.4241	38.28
20	38.90	0.4082	0.3932	39.18	0.4371	38.39	0.4141	38.80	0.4262	38.61
21	39.22	0.4286	0.4099	39.57	0.4548	38.75	0.4322	39.15	0.4455	38.94
22	39.74	0.4490	0.4378	39.95	0.4838	39.11	0.4619	39.51	0.4771	39.27
23	40.00	0.4694	0.4516	40.33	0.4979	39.48	0.4765	39.87	0.4925	39.61
24	40.20	0.4898	0.4622	40.72	0.5087	39.85	0.4877	40.24	0.5042	39.95

#	x	P(x)	G2P		G3P		LPIII		GUM	
			F(x)	x(p)	F(x)	x(p)	F(x)	x(p)	F(x)	x(p)
			$\alpha: 29.7$ $\beta: 1.39$		$\alpha: 3.66$ $\beta: 4.08$ $\gamma: 26.4$		$\alpha: 62.9$ $\beta: 0.02$ $\gamma: 2.29$		$\sigma: 5.92$ $\mu: 38.0$	
25	40.30	0.5102	0.4676	41.10	0.5140	40.23	0.4933	40.61	0.5100	40.30
26	40.70	0.5306	0.4888	41.49	0.5351	40.61	0.5153	40.98	0.5330	40.66
27	40.70	0.5510	0.4888	41.89	0.5351	41.01	0.5153	41.36	0.5330	41.02
28	40.80	0.5714	0.4941	42.28	0.5403	41.41	0.5208	41.75	0.5386	41.39
29	40.88	0.5918	0.4982	42.69	0.5442	41.83	0.5249	42.15	0.5429	41.78
30	41.00	0.6122	0.5047	43.10	0.5506	42.26	0.5316	42.56	0.5498	42.17
31	43.24	0.6327	0.6189	43.52	0.6562	42.70	0.6448	42.98	0.6636	42.58
32	43.32	0.6531	0.6231	43.95	0.6600	43.16	0.6489	43.41	0.6676	43.01
33	44.28	0.6735	0.6684	44.40	0.6995	43.64	0.6917	43.86	0.7093	43.45
34	44.63	0.6939	0.6841	44.85	0.7130	44.14	0.7064	44.33	0.7234	43.92
35	44.81	0.7143	0.6918	45.33	0.7196	44.67	0.7136	44.83	0.7302	44.41
36	45.42	0.7347	0.7180	45.83	0.7417	45.22	0.7377	45.34	0.7531	44.92
37	45.90	0.7551	0.7377	46.34	0.7581	45.81	0.7555	45.89	0.7699	45.48
38	47.70	0.7755	0.8036	46.89	0.8124	46.44	0.8143	46.47	0.8246	46.07
39	47.87	0.7959	0.8090	47.47	0.8169	47.11	0.8191	47.09	0.8290	46.70
40	48.74	0.8163	0.8360	48.09	0.8389	47.85	0.8427	47.77	0.8506	47.40
41	50.05	0.8367	0.8711	48.77	0.8677	48.65	0.8732	48.51	0.8783	48.17
42	50.80	0.8571	0.8884	49.50	0.8821	49.54	0.8883	49.33	0.8920	49.03
43	51.20	0.8776	0.8969	50.32	0.8892	50.56	0.8957	50.26	0.8987	50.01
44	51.45	0.8980	0.9019	51.25	0.8934	51.73	0.9000	51.33	0.9026	51.15
45	54.20	0.9184	0.9452	52.35	0.9314	53.13	0.9385	52.61	0.9377	52.54
46	54.50	0.9388	0.9488	53.69	0.9347	54.89	0.9417	54.23	0.9407	54.31
47	56.50	0.9592	0.9679	55.49	0.9532	57.31	0.9596	56.45	0.9573	56.77
48	63.42	0.9796	0.9948	58.34	0.9861	61.28	0.9892	60.13	0.9865	60.94

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

Tabla 99

Análisis de valores extremos - Estación Huacamarcanga.

#	x	P(x)	G2P		G3P		LPIII		GUM	
			F(x)	x(p)	F(x)	x(p)	F(x)	x(p)	F(x)	x(p)
			$\alpha: 4.66$ $\beta: 5.66$		$\alpha: 5.87$ $\beta: 5.11$ $\gamma: -3.59$		$\alpha: 8.39$ $\beta: -0.18$ $\gamma: 4.67$		$\sigma: 9.53$ $\mu: 20.9$	
1	5.68	0.0204	0.0066	7.69	0.0128	6.75	0.0121	6.70	0.0072	7.95
2	5.90	0.0408	0.0076	9.39	0.0142	8.66	0.0137	8.43	0.0080	9.82
3	9.70	0.0612	0.0456	10.62	0.0558	10.03	0.0609	9.72	0.0392	11.11

#	x	P(x)	G2P		G3P		LPIII		GUM	
			F(x)	x(p)	F(x)	x(p)	F(x)	x(p)	F(x)	x(p)
			$\alpha: 4.66$ $\beta: 5.66$		$\alpha: 5.87$ $\beta: 5.11$ $\gamma: -3.59$		$\alpha: 8.39$ $\beta: -0.18$ $\gamma: 4.67$		$\sigma: 9.53$ $\mu: 20.9$	
4	11.20	0.0816	0.0725	11.63	0.0827	11.15	0.0901	10.79	0.0629	12.15
5	11.40	0.1020	0.0766	12.52	0.0867	12.12	0.0944	11.75	0.0666	13.03
6	12.10	0.1224	0.0920	13.33	0.1017	12.99	0.1102	12.61	0.0807	13.83
7	14.80	0.1429	0.1638	14.08	0.1705	13.79	0.1804	13.42	0.1501	14.55
8	14.90	0.1633	0.1668	14.78	0.1733	14.54	0.1833	14.18	0.1531	15.23
9	15.00	0.1837	0.1698	15.45	0.1762	15.26	0.1862	14.91	0.1561	15.87
10	16.30	0.2041	0.2108	16.09	0.2152	15.94	0.2246	15.62	0.1979	16.48
11	16.37	0.2245	0.2130	16.72	0.2173	16.60	0.2266	16.30	0.2001	17.07
12	16.60	0.2449	0.2207	17.32	0.2246	17.24	0.2338	16.96	0.2080	17.65
13	17.10	0.2653	0.2374	17.92	0.2405	17.86	0.2492	17.61	0.2254	18.20
14	18.02	0.2857	0.2688	18.50	0.2705	18.47	0.2782	18.25	0.2585	18.75
15	18.10	0.3061	0.2717	19.08	0.2732	19.08	0.2808	18.89	0.2615	19.29
16	18.20	0.3265	0.2752	19.65	0.2766	19.67	0.2840	19.51	0.2652	19.83
17	18.70	0.3469	0.2928	20.22	0.2934	20.26	0.3001	20.14	0.2838	20.36
18	20.40	0.3673	0.3535	20.78	0.3517	20.85	0.3555	20.76	0.3486	20.89
19	20.80	0.3878	0.3678	21.35	0.3655	21.44	0.3685	21.38	0.3640	21.41
20	21.90	0.4082	0.4074	21.92	0.4038	22.03	0.4047	22.01	0.4065	21.94
21	21.93	0.4286	0.4084	22.49	0.4047	22.61	0.4056	22.63	0.4075	22.48
22	22.80	0.4490	0.4395	23.07	0.4350	23.21	0.4340	23.26	0.4408	23.02
23	23.10	0.4694	0.4501	23.65	0.4453	23.81	0.4438	23.90	0.4521	23.56
24	24.60	0.4898	0.5020	24.24	0.4962	24.41	0.4917	24.54	0.5075	24.11
25	24.90	0.5102	0.5122	24.84	0.5062	25.02	0.5012	25.19	0.5183	24.67
26	26.30	0.5306	0.5584	25.45	0.5517	25.64	0.5443	25.85	0.5670	25.25
27	26.49	0.5510	0.5644	26.07	0.5577	26.28	0.5499	26.52	0.5733	25.83
28	26.70	0.5714	0.5712	26.71	0.5644	26.92	0.5563	27.21	0.5804	26.43
29	26.70	0.5918	0.5712	27.36	0.5644	27.59	0.5563	27.91	0.5804	27.05
30	28.00	0.6122	0.6113	28.03	0.6043	28.27	0.5944	28.63	0.6221	27.69
31	28.10	0.6327	0.6143	28.73	0.6073	28.97	0.5973	29.37	0.6252	28.34
32	29.96	0.6531	0.6673	29.44	0.6605	29.69	0.6486	30.13	0.6795	29.03
33	30.40	0.6735	0.6791	30.19	0.6723	30.44	0.6601	30.92	0.6914	29.74

#	x	P(x)	G2P		G3P		LPIII		GUM	
			F(x)	x(p)	F(x)	x(p)	F(x)	x(p)	F(x)	x(p)
			α : 4.66		α : 5.87		α : 8.39		σ : 9.53	
			β : 5.66		β : 5.11		β : -0.18		μ : 20.9	
					γ : -3.59		γ : 4.67			
34	32.40	0.6939	0.7292	30.97	0.7229	31.22	0.7098	31.74	0.7414	30.49
35	35.00	0.7143	0.7853	31.78	0.7801	32.04	0.7672	32.59	0.7963	31.28
36	37.70	0.7347	0.8336	32.64	0.8295	32.90	0.8180	33.48	0.8424	32.11
37	38.30	0.7551	0.8430	33.54	0.8392	33.81	0.8282	34.42	0.8512	33.00
38	40.00	0.7755	0.8673	34.51	0.8642	34.77	0.8546	35.41	0.8739	33.95
39	40.00	0.7959	0.8673	35.55	0.8642	35.81	0.8546	36.47	0.8739	34.98
40	40.30	0.8163	0.8712	36.67	0.8683	36.92	0.8589	37.60	0.8776	36.10
41	40.80	0.8367	0.8775	37.90	0.8748	38.14	0.8659	38.83	0.8835	37.33
42	41.00	0.8571	0.8800	39.26	0.8774	39.49	0.8686	40.18	0.8857	38.72
43	41.00	0.8776	0.8800	40.80	0.8774	41.01	0.8686	41.68	0.8857	40.30
44	42.34	0.8980	0.8954	42.58	0.8933	42.77	0.8858	43.38	0.8999	42.14
45	44.00	0.9184	0.9121	44.70	0.9105	44.85	0.9047	45.37	0.9152	44.37
46	44.12	0.9388	0.9132	47.35	0.9117	47.45	0.9060	47.81	0.9163	47.22
47	47.00	0.9592	0.9364	50.97	0.9356	50.99	0.9325	51.02	0.9374	51.19
48	60.10	0.9796	0.9861	56.91	0.9866	56.75	0.9893	55.99	0.9838	57.89

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

Tabla 100

Análisis de valores extremos - Acueducto Chorobal.

#	X	P(x)	G2P		G3P		LPIII		GUM	
			F(x)	x(p)	F(x)	x(p)	F(x)	x(p)	F(x)	x(p)
			$\alpha: 0.24$ $\beta: 114.8$		$\alpha: 0.43$ $\beta: 85.9$ $\gamma: 0.20$		$\alpha: 23.5$ $\beta: -0.34$ $\gamma: 10.09$		$\sigma: 43.5$ $\mu: 1.99$	
1	0.20	0.0476	0.2455	0.00	0.0000	0.25	0.0187	0.47	0.3527	-46.43
2	0.35	0.0952	0.2806	0.00	0.0748	0.47	0.0353	0.95	0.3540	-35.19
3	2.80	0.1429	0.4556	0.02	0.2498	0.89	0.2335	1.50	0.3747	-26.96
4	3.50	0.1905	0.4797	0.07	0.2761	1.57	0.2737	2.14	0.3806	-20.00
5	3.80	0.2381	0.4888	0.18	0.2862	2.52	0.2895	2.88	0.3832	-13.72
6	3.85	0.2857	0.4903	0.38	0.2879	3.78	0.2921	3.73	0.3836	-7.81
7	5.70	0.3333	0.5363	0.73	0.3410	5.40	0.3747	4.71	0.3992	-2.10
8	7.80	0.3810	0.5755	1.30	0.3889	7.42	0.4475	5.86	0.4168	3.54
9	9.00	0.4286	0.5941	2.15	0.4124	9.89	0.4821	7.20	0.4269	9.20
10	9.50	0.4762	0.6013	3.39	0.4216	12.89	0.4953	8.78	0.4311	14.98
11	9.50	0.5238	0.6013	5.14	0.4216	16.50	0.4953	10.66	0.4311	20.96
12	9.70	0.5714	0.6040	7.56	0.4252	20.85	0.5004	12.92	0.4327	27.24
13	11.20	0.6190	0.6234	10.85	0.4505	26.09	0.5360	15.67	0.4452	33.96
14	13.50	0.6667	0.6491	15.31	0.4849	32.46	0.5823	19.08	0.4641	41.26
15	15.00	0.7143	0.6638	21.34	0.5051	40.30	0.6083	23.41	0.4764	49.37
16	15.60	0.7619	0.6694	29.61	0.5127	50.14	0.6179	29.08	0.4812	58.63
17	46.00	0.8095	0.8252	41.17	0.7432	62.88	0.8491	36.87	0.6952	69.60
18	55.00	0.8571	0.8498	58.09	0.7817	80.23	0.8774	48.29	0.7441	83.32
19	70.00	0.9048	0.8813	85.04	0.8310	106.06	0.9099	67.14	0.8111	102.11
20	250.00	0.9524	0.9872	137.30	0.9876	152.92	0.9913	107.18	0.9967	133.36

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

De las tablas, a continuación, se deriva un análisis gráfico entre las filas (3) y (4) – (6) – (8) y (10), ver gráficas en las siguientes figuras:

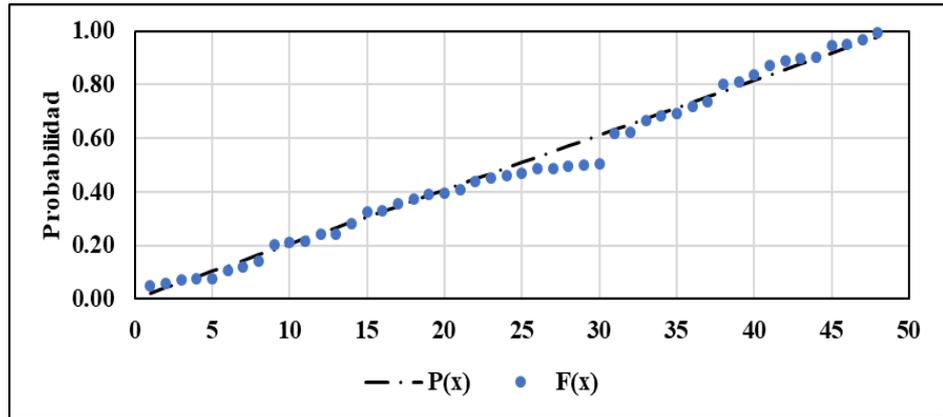


Figura 79 Ajuste gráfico – Estación Julcán – Gamma 2P.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

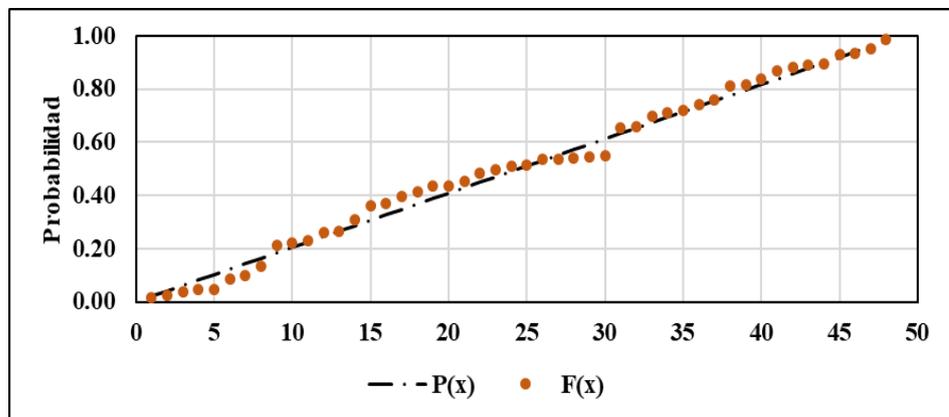


Figura 80 Ajuste gráfico – Estación Julcán – Gamma 3P.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

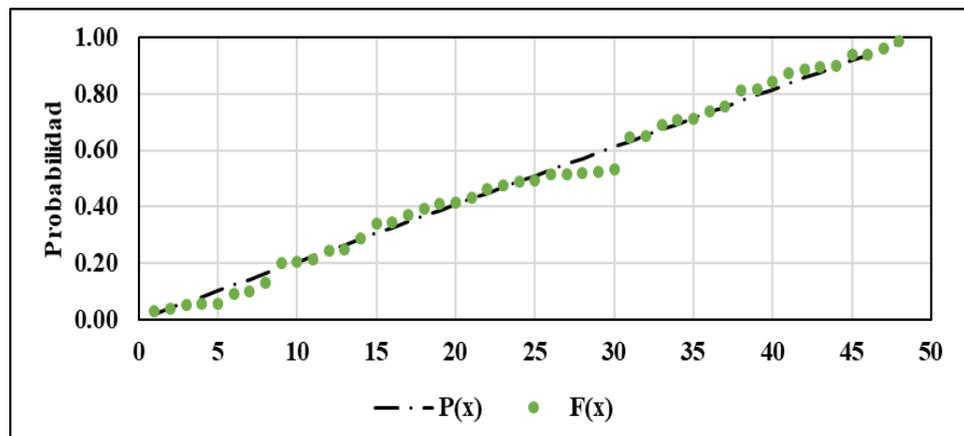


Figura 81 Ajuste gráfico – Estación Julcán – Log Pearson tipo III.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

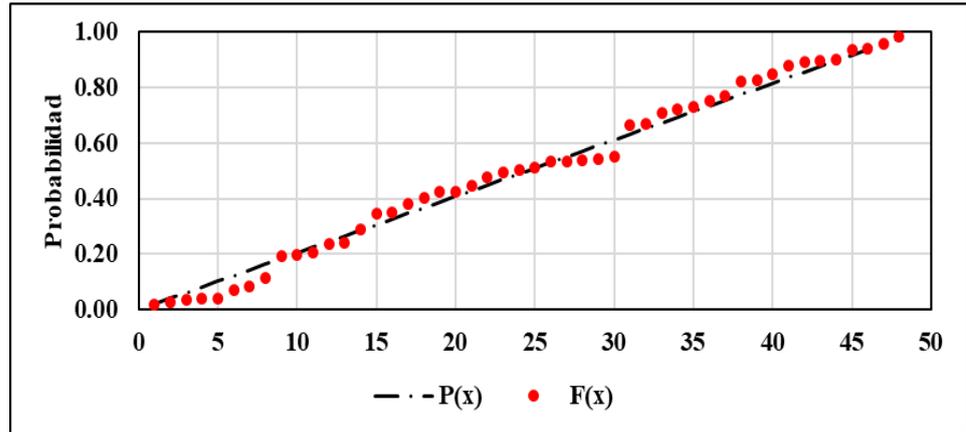


Figura 82 Ajuste gráfico – Estación Julcán – Gumbel.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

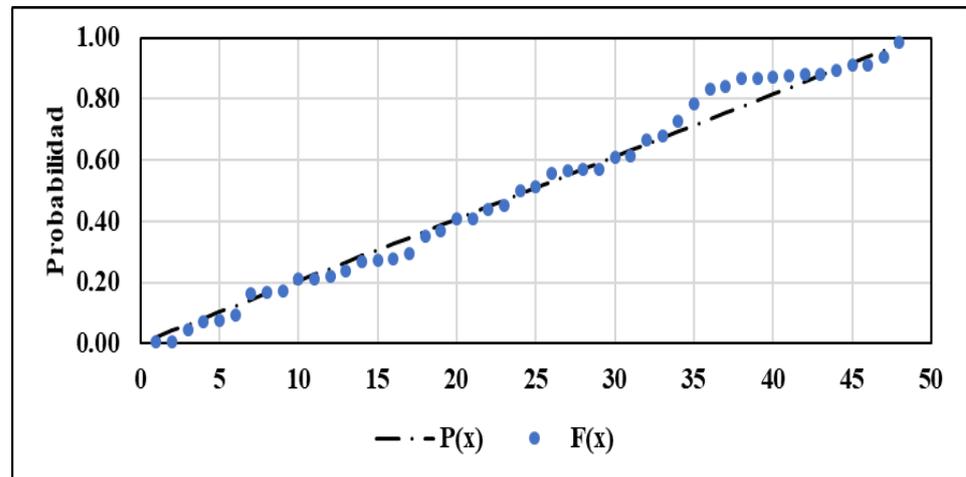


Figura 83 Ajuste gráfico – Estación Huacamarcanga – Gamma 2P.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

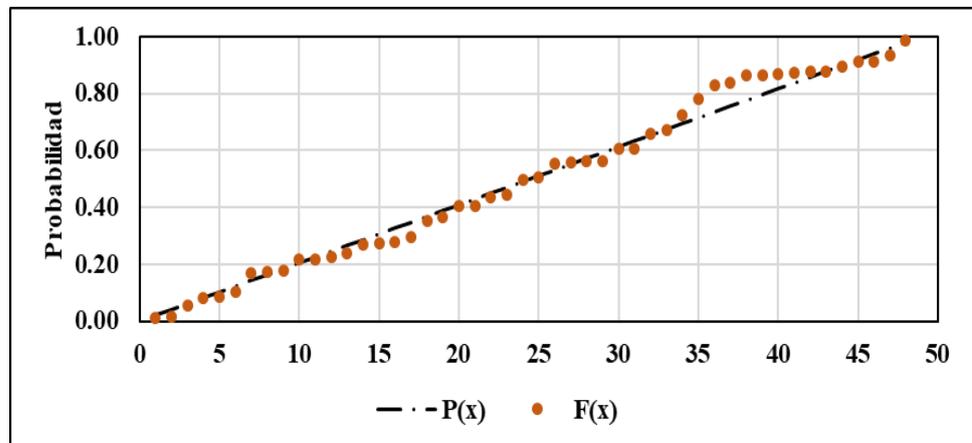


Figura 84 Ajuste gráfico – Estación Huacamarcanga – Gamma 3P.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

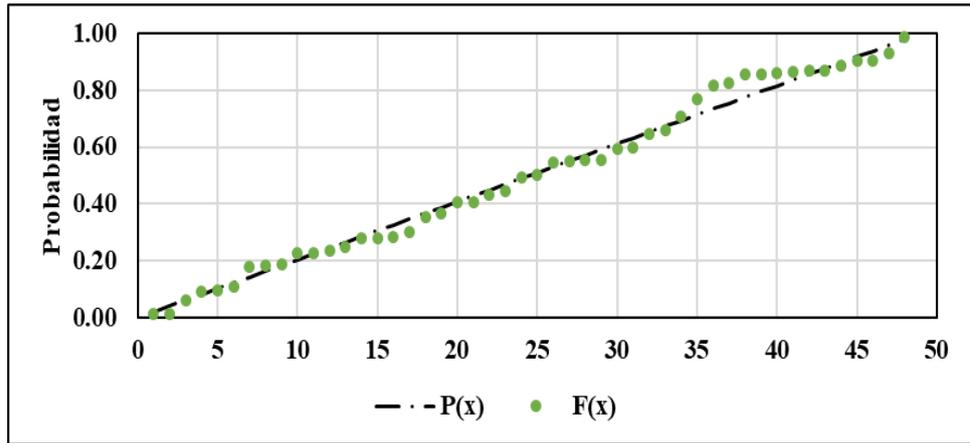


Figura 85 Ajuste gráfico – Est. Huacamarcanga – Log Pearson tipo III.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

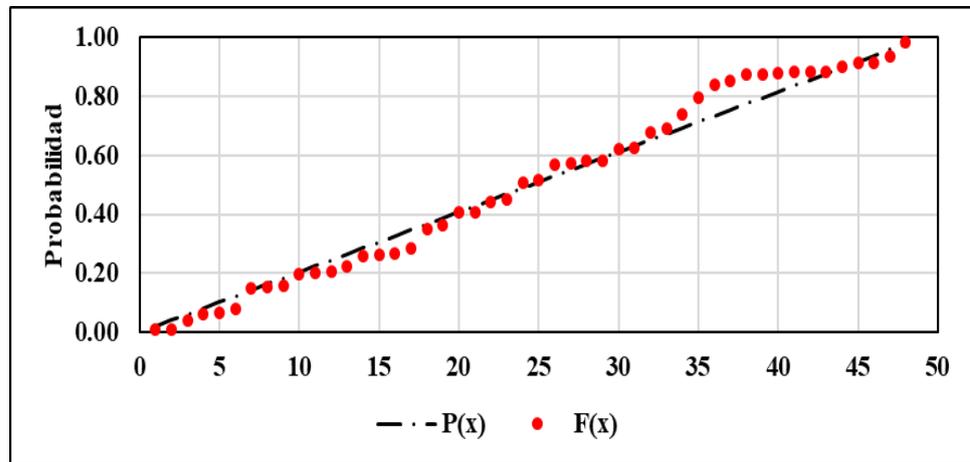


Figura 86 Ajuste gráfico – Estación Huacamarcanga – Gumbel.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

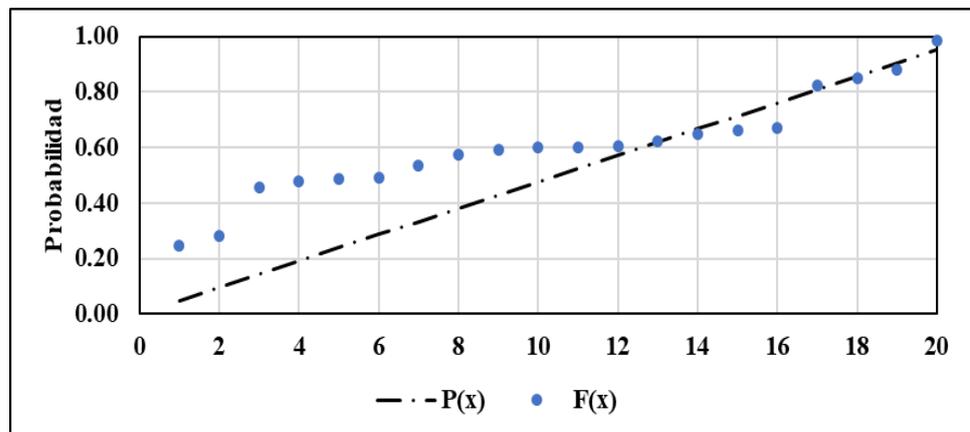


Figura 87 Ajuste gráfico – Acueducto Chorobal – Gamma 2P.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

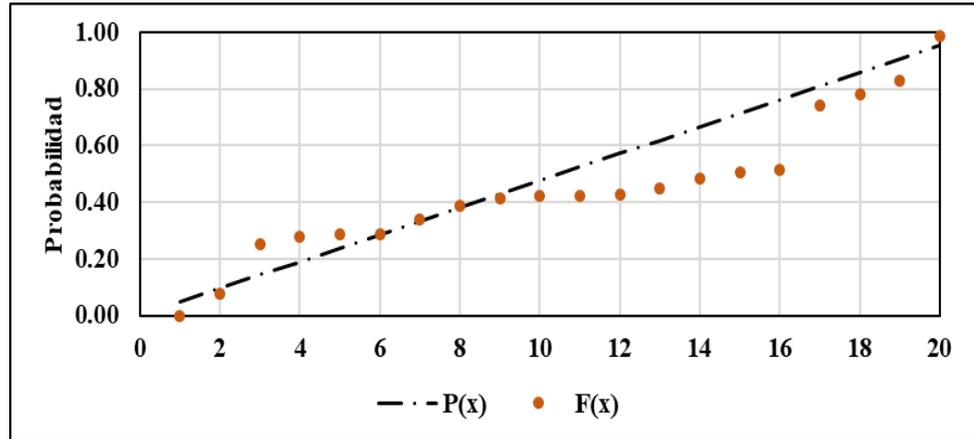


Figura 88 Ajuste gráfico – Acueducto Chorobal – Gamma 3P.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

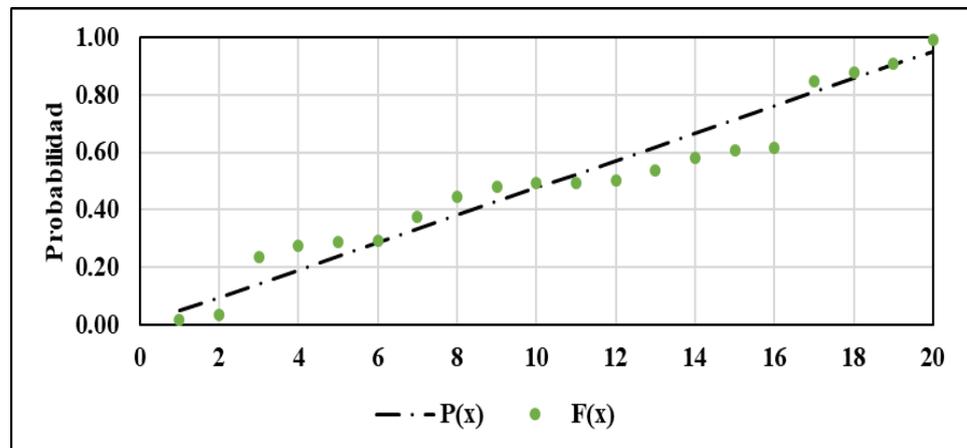


Figura 89 Ajuste gráfico – Acueducto Chorobal – Log Pearson tipo III.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

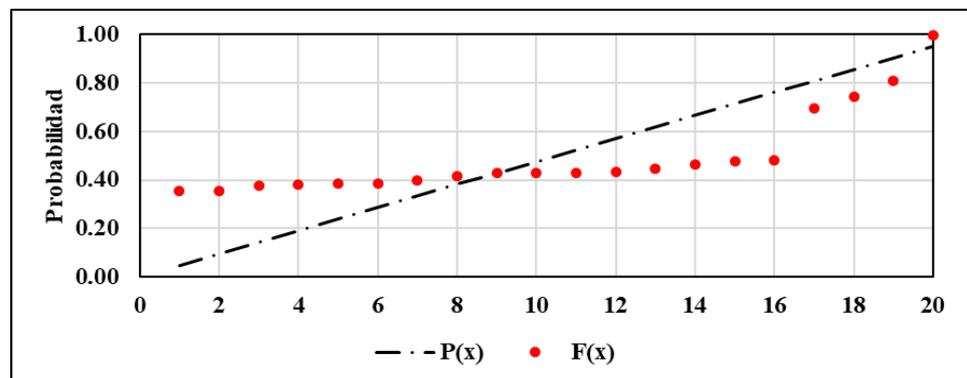


Figura 90 Ajuste gráfico – Acueducto Chorobal – Gumbel.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

De las tablas y las gráficas en las figuras mostradas, se puede deducir de manera analítica y gráfica el mejor ajuste mediante la prueba de Kolmogorov and Smirnov, a continuación, se exponen tablas resumen y el método de cálculo:

- (1) Número de orden de la muestra (#).
- (2) Distribución de probabilidad teórica.
- (3) Valor crítico ΔKS en función la cantidad de datos (muestra) y el nivel de significancia $\alpha=5\%$. Ver tabla 8.
- (4) Es la máxima diferencia entre función de distribución acumulada $F(x)$ y probabilidad empírica experimental acumulada $P(x)$. Ec 2.24.
- (5) Esta columna muestra el rango de cada distribución según la prueba KS, en donde cierta distribución es aceptada siempre que no supere el valor crítico.

Tabla 101

Resumen prueba de Kolmogorov and Smirnov - Estación Julcán.

#	Distribución	Valor crítico ΔKS	Kolmogorov - Smirnov	
			Estadística	Rango
1	Gamma	0.1963	0.1075	4
2	Gamma (3P)		0.0617	1
3	Log-Pearson 3		0.0806	3
4	Gumbel Max		0.0624	2

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

Los resultados de la prueba KS en la estación Julcán, nos indica que todas las distribuciones consideradas se ajustan a la muestra, pues ninguna es mayor que el valor crítico.

Tabla 102

Resumen prueba de Kolmogorov and Smirnov - Estación

Huacamarcanga.

#	Distribución	Valor crítico ΔKS	Kolmogorov - Smirnov	
			Estadística	Rango
1	Gamma	0.1963	0.0989	3
2	Gamma (3P)		0.0948	2
3	Log-Pearson 3		0.0833	1
4	Gumbel Max		0.1077	4

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

Los resultados de la prueba KS en la estación Huacamarcanga, nos indica que todas las distribuciones consideradas se ajustan a la muestra, pues ninguna es mayor que el valor crítico.

Tabla 103

Resumen prueba de Kolmogorov and Smirnov – Acueducto Chorobal.

#	Distribución	Valor crítico	Kolmogorov - Smirnov	
		Δ KS	Estadística	Rango
1	Gamma		0.3127	-
2	Gamma (3P)	0.2940	0.2492	2
3	Log-Pearson 3		0.1440	1
4	Gumbel Max		0.3051	-

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

En la estación de aforo Acueducto Chorobal, observamos que solo las distribuciones Gamma 3 parámetros y Log Pearson tipo III se ajustan a los datos históricos de caudal pues las demás son rechazadas debido a que superan al valor crítico para una muestra $n=20$ y un $\alpha=5\%$.

Al determinar y/o comprobar las distribuciones que se ajustan a cada muestra, se procede a determinar la predicción de valores extremos para distintos periodos de retorno.

Tabla 104

Resumen de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno - Estación Julcán.

Periodo de retorno	Probabilidad de excedencia	Distribución			
		G2P	G3P	LPIII	GUM
25yr	0.9600	55.58	57.42	56.55	56.90
50yr	0.9800	58.42	61.40	60.23	61.06
100yr	0.9900	61.06	65.23	63.82	65.19
200yr	0.9950	63.54	68.95	67.36	69.31
500yr	0.9980	66.63	73.74	72.02	74.75
1000yr	0.9990	68.85	77.29	75.54	78.85

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

En el análisis de valores extremos realizada a la estación Julcán se hace a continuación la siguiente interpretación.

- La distribución Gamma 2 parámetros es ligeramente diferente frente a las otras distribuciones teóricas.
- La prueba de bondad de ajuste KS nos indica que todas las distribuciones consideradas se ajustan a la muestra, por lo que cualquiera de ellas puede ser considerada para predecir valores extremos a distintos periodos de retorno.

Tabla 105

Resumen de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno - Estación Huacamarcanga.

Periodo de retorno	Probabilidad de excedencia	Distribución			
		G2P	G3P	LPIII	GUM
25yr	0.9600	51.15	51.16	51.17	51.38
50yr	0.9800	57.08	56.92	56.12	58.09
100yr	0.9900	62.76	62.41	60.53	64.74
200yr	0.9950	68.25	67.70	64.50	71.37
500yr	0.9980	75.30	74.45	69.16	80.12
1000yr	0.9990	80.49	79.41	72.31	86.73

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

En el análisis de valores extremos realizada a la estación Huacamarcanga se hace a continuación la siguiente interpretación:

- Los valores de cada distribución son similares en los periodos de retorno 25, 50 y 100 años y en los de 200, 500 y 1000 difieren siendo la distribución Gumbel presenta valores más altos.
- La prueba de bondad de ajuste KS nos indica que todas las distribuciones consideradas se ajustan a la muestra, por lo que cualquiera de ellas puede ser considerada para predecir valores extremos a distintos periodos de retorno.

Tabla 106

Resumen de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno – Acueducto Chorobal.

Periodo de retorno	Probabilidad de excedencia	Distribución			
		G2P	G3P	LPIII	GUM
25yr	0.9600	-	165.11	118.86	-
50yr	0.9800	-	214.80	171.93	-
100yr	0.9900	-	266.00	235.94	-
200yr	0.9950	-	318.33	311.95	-
500yr	0.9980	-	388.79	428.58	-
1000yr	0.9990	-	442.85	530.97	-

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

En el análisis de valores extremos realizada a la estación Acueducto Chorobal para ambos escenarios se analizan los resultados:

- Los valores entre las distribuciones Gamma 3 parámetros y Log Pearson tipo III difieren significativamente, siendo este último el de valores altos, sin embargo, la prueba KS nos indica que ambas distribuciones se ajustan a la muestra por lo que la elección de una está sujeto a evaluación.

Además de las estaciones meteorológicas Julcán y Huacamarcanga, se integra la estación Laredo, ubicada en el Valle de Moche cuyo clima puede ser considerado semejante a la parte baja de zona en estudio, con datos extraídos del estudio de Hidrología y Drenaje para el Expediente Técnico “Mejoramiento de la carretera Virú – Huacapongo, provincia de Virú – La Libertad” (2008) elaborado por el especialista Ing. José N. Vega Díaz.

Tabla 107

Características de la estación Laredo.

Nombre	Tipo de estación	Intervalo	Coordenadas	
			Este	Norte
Laredo	Meteorológica	1969–2003	736,933.00	9,105,833.00

Fuente: Elaboración propia, Expediente Técnico “Mejoramiento de la carretera Virú – Huacapongo, Provincia de Virú – La Libertad” (2008).

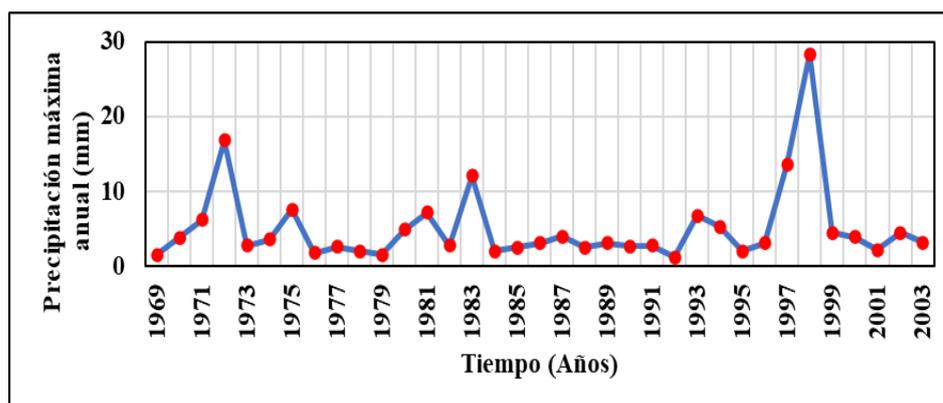


Figura 91 Serie histórica de precipitaciones máximas anuales - Estación Laredo.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se representa la serie histórica recopilada de la estación Laredo, en el cual se observa lo siguiente:

- Existen picos correspondientes a Marzo de 1972, Marzo de 1983 y Febrero de 1998.
- Se tienen datos correspondientes a los eventos de gran intensidad como son el Fenómeno del Niño de los años 1982/1983 y de 1997/1998.
- No se tiene el dato correspondiente a Marzo de 2017, correspondiente al último Fenómeno del Niño.

A esta estación no se le aplicara el análisis estadístico de consistencia, considerándose los picos como datos ajustados a la realidad y para análisis estadístico de valores extremos se aplicó la misma metodología utilizada para las anteriores estaciones.

Tabla 108

Análisis de valores extremos - Estación Laredo.

#	X	P(x)	G2P		G3P		LPIII		GUM	
			F(x) $\alpha: 0.92$ $\beta: 5.56$	x(p)	F(x) $\alpha: 0.87$ $\beta: 4.52$ $\gamma: 1.20$	x(p)	F(x) $\alpha: 4.02$ $\beta: 0.35$ $\gamma: 0.09$	x(p)	F(x) $\sigma: 4.15$ $\mu: 2.70$	x(p)
1	1.20	0.0278	0.2290	0.11	0.0000	1.27	0.0001	1.64	0.2379	-2.60
2	1.50	0.0556	0.2741	0.23	0.0969	1.36	0.0122	1.82	0.2629	-1.71
3	1.50	0.0833	0.2741	0.37	0.0969	1.45	0.0122	1.96	0.2629	-1.08
4	1.80	0.1111	0.3161	0.51	0.1715	1.55	0.0523	2.10	0.2886	-0.57
5	2.00	0.1389	0.3426	0.66	0.2158	1.66	0.0907	2.22	0.3060	-0.12
6	2.00	0.1667	0.3426	0.82	0.2158	1.78	0.0907	2.34	0.3060	0.28
7	2.00	0.1944	0.3426	0.98	0.2158	1.90	0.0907	2.46	0.3060	0.65
8	2.20	0.2222	0.3679	1.16	0.2568	2.03	0.1343	2.58	0.3235	1.01
9	2.50	0.2500	0.4039	1.34	0.3130	2.17	0.2030	2.71	0.3499	1.35
10	2.50	0.2778	0.4039	1.53	0.3130	2.31	0.2030	2.83	0.3499	1.67
11	2.60	0.3056	0.4154	1.72	0.3306	2.46	0.2259	2.96	0.3588	2.00
12	2.70	0.3333	0.4266	1.93	0.3476	2.62	0.2485	3.10	0.3676	2.31
13	2.80	0.3611	0.4376	2.15	0.3641	2.78	0.2707	3.23	0.3765	2.63
14	2.80	0.3889	0.4376	2.37	0.3641	2.96	0.2707	3.38	0.3765	2.94
15	2.80	0.4167	0.4376	2.61	0.3641	3.14	0.2707	3.53	0.3765	3.25
16	3.10	0.4444	0.4693	2.86	0.4107	3.33	0.3343	3.70	0.4030	3.57
17	3.10	0.4722	0.4693	3.13	0.4107	3.54	0.3343	3.87	0.4030	3.90
18	3.10	0.5000	0.4693	3.41	0.4107	3.76	0.3343	4.05	0.4030	4.22
19	3.20	0.5278	0.4795	3.71	0.4254	3.99	0.3544	4.25	0.4118	4.56
20	3.60	0.5556	0.5180	4.02	0.4800	4.24	0.4283	4.46	0.4468	4.91
21	3.80	0.5833	0.5361	4.36	0.5051	4.50	0.4615	4.69	0.4640	5.27
22	3.90	0.6111	0.5449	4.73	0.5171	4.79	0.4773	4.95	0.4726	5.64
23	4.00	0.6389	0.5535	5.12	0.5289	5.09	0.4924	5.23	0.4811	6.04
24	4.50	0.6667	0.5941	5.54	0.5830	5.43	0.5603	5.54	0.5227	6.45
25	4.50	0.6944	0.5941	6.00	0.5830	5.79	0.5603	5.89	0.5227	6.89
26	4.90	0.7222	0.6238	6.51	0.6215	6.19	0.6061	6.29	0.5548	7.37
27	5.30	0.7500	0.6512	7.07	0.6563	6.64	0.6457	6.75	0.5856	7.88
28	6.20	0.7778	0.7057	7.70	0.7228	7.13	0.7165	7.28	0.6500	8.44
29	6.80	0.8056	0.7370	8.41	0.7595	7.70	0.7530	7.93	0.6888	9.06
30	7.20	0.8333	0.7560	9.24	0.7812	8.36	0.7738	8.72	0.7127	9.77
31	7.60	0.8611	0.7736	10.22	0.8008	9.14	0.7921	9.73	0.7352	10.60
32	12.10	0.8889	0.9019	11.43	0.9300	10.10	0.9047	11.09	0.9012	11.59
33	13.60	0.9167	0.9256	12.98	0.9504	11.35	0.9227	13.05	0.9300	12.84
34	16.80	0.9444	0.9587	15.18	0.9761	13.11	0.9476	16.28	0.9670	14.59
35	28.30	0.9722	0.9950	18.96	0.9982	16.14	0.9810	23.38	0.9979	17.53

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

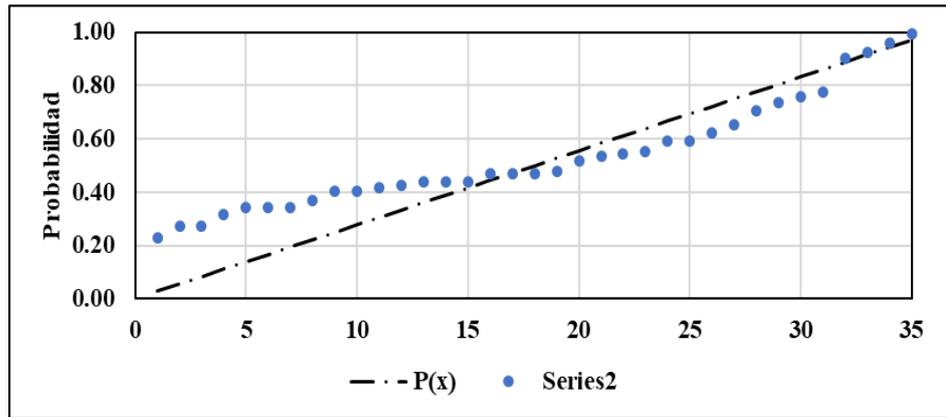


Figura 92 Ajuste gráfico – Estación Laredo – Gamma 2P.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

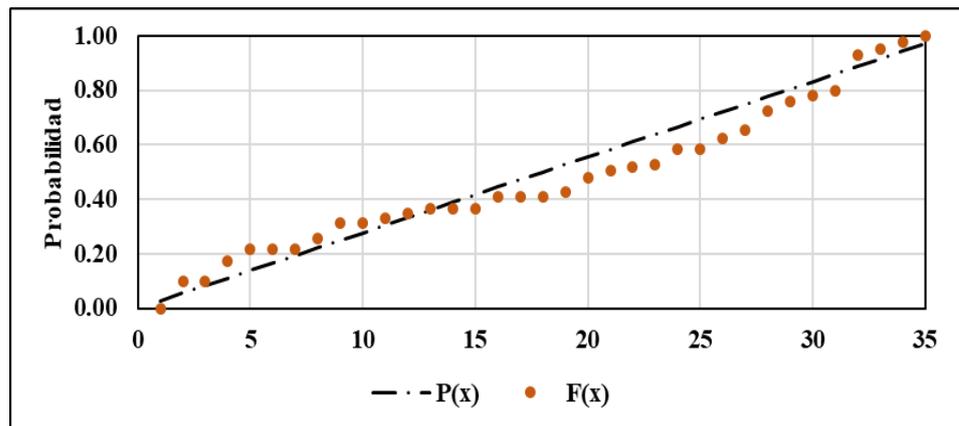


Figura 93 Ajuste gráfico – Estación Laredo – Gamma 3P.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

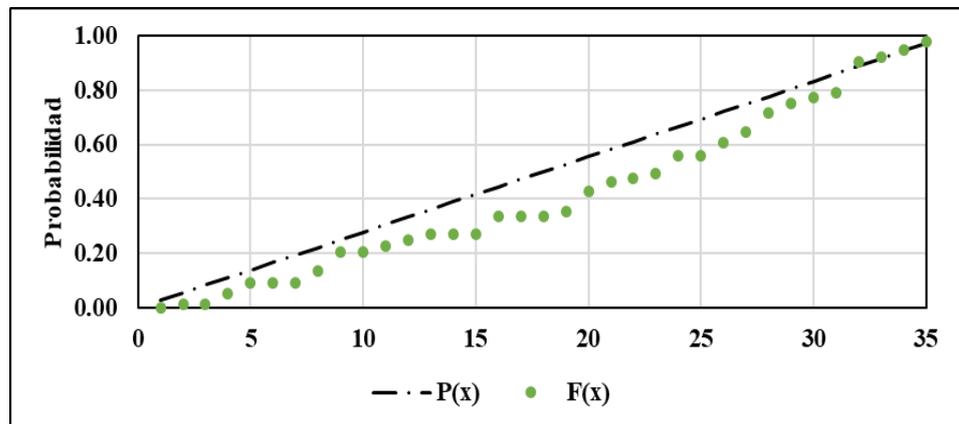
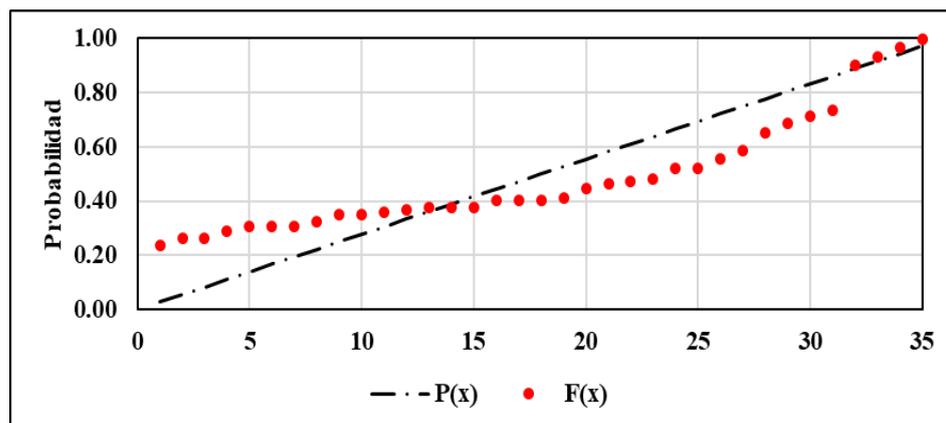


Figura 94 Ajuste gráfico – Estación Laredo – Log Pearson tipo III.

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.



De la tabla y las gráficas en las figuras mostradas, se puede deducir de manera analítica y gráfica el mejor ajuste mediante la prueba de Kolmogorov and Smirnov.

Tabla 109

Resumen prueba de Kolmogorov and Smirnov - Estación Laredo.

#	Distribución	Valor crítico ΔKS	Kolmogorov - Smirnov	
			Estadística	Rango
1	Gamma	0.2387	0.21851	4
2	Gamma (3P)		0.11142	1
3	Log-Pearson 3		0.17341	2
4	Gumbel Max		0.21013	3

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

Los resultados de la prueba KS en la estación Laredo, nos indica que todas las distribuciones consideradas se ajustan a la muestra, pues ninguna excede el valor crítico.

Tabla 110

Resumen de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno – Estación Laredo.

Periodo de retorno	Probabilidad de excedencia	Distribución			
		G2P	G3P	LPIII	GUM
25yr	0.9600	16.97	14.54	16.08	15.99
50yr	0.9800	20.75	17.58	22.91	18.91
100yr	0.9900	24.55	20.63	32.20	21.81
200yr	0.9950	28.35	23.69	44.80	24.70
500yr	0.9980	33.38	27.75	68.50	28.51
1000yr	0.9990	37.19	30.83	93.76	31.39

Fuente: Elaboración propia en base a complemento EasyFit / MS Excel 2013.

En el análisis de valores extremos realizada a la estación Laredo se hace a continuación la siguiente interpretación:

- Las distribuciones Gamma 2 y 3 parámetros y Gumbel tienen valores similares, aunque estos toman diferentes tendencias conforme aumenta la cantidad de años de periodos de retorno.
- La distribución Log Pearson tiende a tener valores elevados conforme aumenta la cantidad de años de periodo de retorno, probablemente no acordes a la realidad aun en épocas de avenidas extremas.
- La prueba de bondad de ajuste KS nos indica que todas las distribuciones consideradas se ajustan a la muestra, por lo que cualquiera de ellas puede ser considerada para predecir valores extremos a distintos periodos de retorno.

En (Ven Te Chow y Otros, 1994), se menciona que el U.S. Water Resources Council sugiere que la distribución Log Pearson tipo III sea utilizada como una distribución base para estudios de crecientes, con el fin de uniformizar el cálculo de planificación de recursos hídricos.

4.3.4. Análisis de la transformación lluvia escorrentía

4.3.4.1. Estimación de la precipitación sobre las subcuencas

En este punto se procede a determinar la precipitación media y máxima por periodo de retorno, en cada subcuenca en estudio.

Como se mencionó anteriormente la estación Laredo es considerada en el presente estudio debido a que el clima donde se encuentra ubicada puede considerarse semejante al clima de la parte baja del área de las subcuencas, además en la parte alta se considera a la estación Huacamarcanga como la representativa por encontrarse a menos distancia de los centroides de cada sub cuenca, descartando a la estación Julcán.

En la siguiente tabla, se muestran los valores de precipitación obtenidos a partir del ajuste estadístico, según lo expuesto en el punto anterior y con el fin de uniformizar la variable precipitación en el cálculo del modelo hidrológico, se selecciona la distribución Log Pearson tipo III.

Tabla 111

Precipitación máxima ajustada para cada estación.

Estaciones	Precipitación Máxima (mm) por periodo de retorno (Años)					
	25	50	100	200	500	1000
Huacamarca	51.17	56.12	60.53	64.50	69.16	72.31
Laredo	16.08	22.91	32.20	44.80	68.50	93.76

Fuente: Elaboración propia.

Al no existir un denso grupo de estaciones meteorológicas a consultar sobre el registro histórico de precipitación en la zona, siendo solo las mencionadas, no es posible aplicar métodos de interpolación espacial como es el método de la Isoyetas para determinar una precipitación media por cada periodo de retorno en las sub cuencas, por lo que se propone el método del U.S. Weather Bureau, el cual considera las estaciones más cercanas al área y/o al punto donde se requiere determinar la precipitación.

En (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009) se explica que el método consiste en ponderar los valores observados en una cantidad W , que es igual a la inversa del cuadrado de la distancia ($W=1/D^2$) entre la estación circundante y el punto en donde se desea determinar un valor de precipitación, según la ecuación 4.5.

$$P_x = \frac{\sum P_i W_i}{\sum W_i} \quad \text{Ec. 4.5}$$

En la siguiente figura, se observa las distancias entre las estaciones Laredo y Huacamarca y los centroides de cada subcuenca.

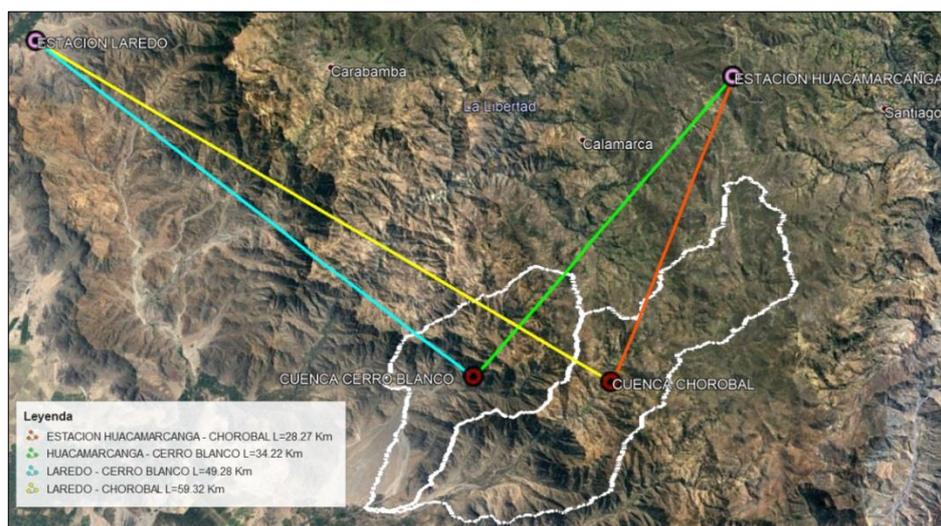


Figura 96 Estaciones consideradas en el cálculo de la precipitación media de cada sub cuenca.

Fuente: Elaboración propia.

Con la aplicación de la ecuación anterior (U.S. Weather Bureau) se determinaron los valores de precipitación en cada sub cuenca.

Tabla 112

Precipitación por cada sub cuenca.

Sub cuencas	Precipitación (mm) por periodo de retorno (Años)					
	25	50	100	200	500	1000
Cerro blanco	39.75	45.31	51.31	58.09	68.94	79.29
Chorobal	44.67	49.97	55.29	60.85	69.04	76.28

Fuente: Elaboración propia.

En el punto 2.2.4.1.5.1. Se mencionan dos correcciones a considerar para determinar un valor de precipitación de final para cada sub cuenca, se resume a continuación:

- Se multiplica el valor obtenido con la ecuación 4.5 por 1.13 para corregir la diferencia entre precipitación máxima diaria y precipitación máxima en 24 horas, según la Organización Mundial de Meteorología (OMM).
- Al ser las sub cuencas Cerro blanco y Chorobal mayores a 25 km² el valor de precipitación máxima en 24 horas debe reducirse en 8% y 10% respectivamente.

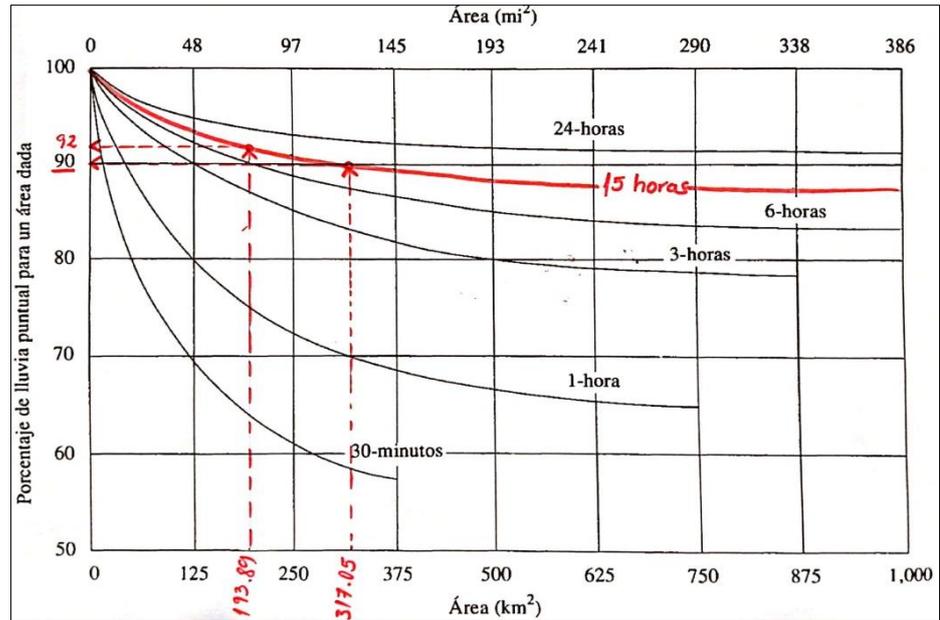


Figura 97 Determinación del factor de reducción para ambas sub cuencas.

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas 113 y 114, se muestran los valores ya corregidos para cada periodo de retorno y sub cuenca.

Tabla 113

Corrección de la precipitación en cada sub cuenca – Sub cuenca Cerro Blanco.

Período de retorno T (Años)	Corrección por intervalo fijo (mm)	Reducción por magnitud de cuenca (mm)
25	44.92	41.32
50	51.20	47.11
100	57.98	53.35
200	65.64	60.39
500	77.91	71.67
1000	89.59	82.43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 114

Corrección de la precipitación en cada sub cuenca – Sub cuenca Chorobal.

Período de retorno T (Años)	Corrección por intervalo fijo (mm)	Reducción por magnitud de cuenca (mm)
25	50.48	45.43
50	56.47	50.82
100	62.48	56.23
200	68.76	61.89
500	78.01	70.21
1000	86.19	77.57

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.2. Tormenta de diseño

En este punto se determina una tormenta representativa en cada subcuenca, para lo cual son necesarios los resultados obtenidos en las tablas anteriores. A continuación, se expone cada paso para la generación de un hidrograma de entrada discretizado para ser representado temporalmente.

4.3.4.2.1. Discretización temporal de la precipitación

La discretización temporal de la precipitación, es la variación de la precipitación en el tiempo y debido a que no se cuenta con la distribución temporal de esta, se recurre a métodos empíricos que se basan en observaciones de tormentas a nivel mundial, por ejemplo, la metodología de Dick y Peschke para la discretización de la precipitación y el método de bloques alternos para el reordenamiento de esta. A continuación, se describe el cálculo de los patrones de discretización.

- (1) Tiempo expresado en horas (hasta 24 horas).
- (2) Se modificó la fórmula expresada en la Ecuación 3, donde D es el tiempo en minutos.

$$\frac{P_D}{P_{24h}} = \left(\frac{D}{1440} \right)^{0.25} \quad \text{Ec. 4.6}$$

- (3) Representa el valor parcial, que es la diferencia entre en valor T_n y T_{n-1} .
- (4) Se aplica el método de bloques alternos, para establecer un patrón (o coeficiente) de discretización de la precipitación, que consisten en reordenar de tal forma que el valor máximo se ubica en el centro (en este caso a la hora 12) y las demás se van ubicando de manera alterna atrás y adelante.

Tabla 115

Patrón de discretización de la precipitación (24 horas).

Tiempo (hr)	Dyck y Peschke	Valor parcial	Bloques alternos	Tiempo (hr)	Dyck y Peschke	Valor parcial	Bloques alternos
1	0.4518	0.4518	0.0109	13	0.8579	0.0170	0.0855
2	0.5373	0.0855	0.0117	14	0.8739	0.0160	0.0443
3	0.5946	0.0573	0.0127	15	0.8891	0.0152	0.0315
4	0.6389	0.0443	0.0138	16	0.9036	0.0145	0.0249
5	0.6756	0.0367	0.0152	17	0.9174	0.0138	0.0209
6	0.7071	0.0315	0.0170	18	0.9306	0.0132	0.0181
7	0.7349	0.0278	0.0194	19	0.9433	0.0127	0.0160
8	0.7598	0.0249	0.0227	20	0.9554	0.0122	0.0145
9	0.7825	0.0227	0.0278	21	0.9672	0.0117	0.0132
10	0.8034	0.0209	0.0367	22	0.9785	0.0113	0.0122
11	0.8228	0.0194	0.0573	23	0.9894	0.0109	0.0113
12	0.8409	0.0181	0.4518	24	1.0000	0.0106	0.0106

Fuente: Elaboración propia.

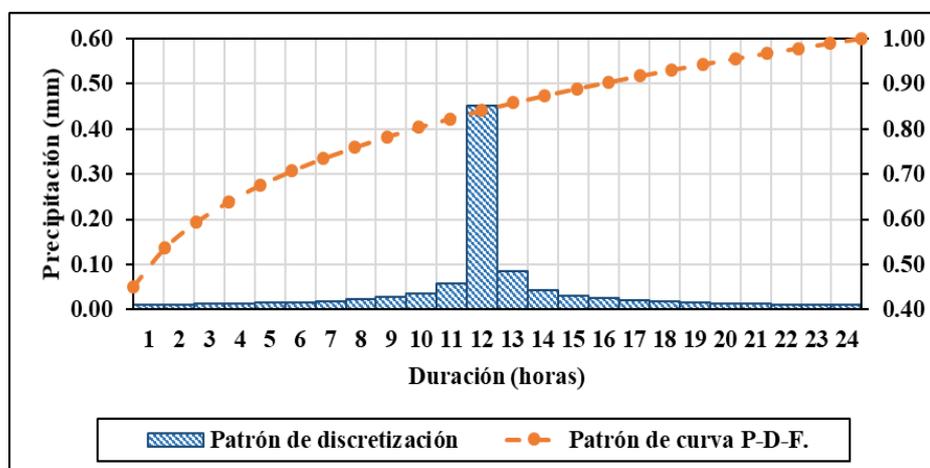


Figura 98 Patrón de curva P-D-F y Discretización de la precipitación.

Fuente: Elaboración propia.

Según el Reglamento Nacional de Edificaciones OS. 060 – Anexo N° 4: Hidrología, la duración en promedio de una tormenta en el Perú es de aproximadamente 15 horas, por lo que se procede a transformar el hietograma con duración de 24 a 15 horas.

La transformación se realizó con la metodología “Transforming 24-hour SCS rainfall distributions to shorter durations” (Transformación de distribución de tormenta de duración de 24 horas a duraciones cortas), en la figura 99 se muestra el patrón de discretización para una duración de 15 horas.

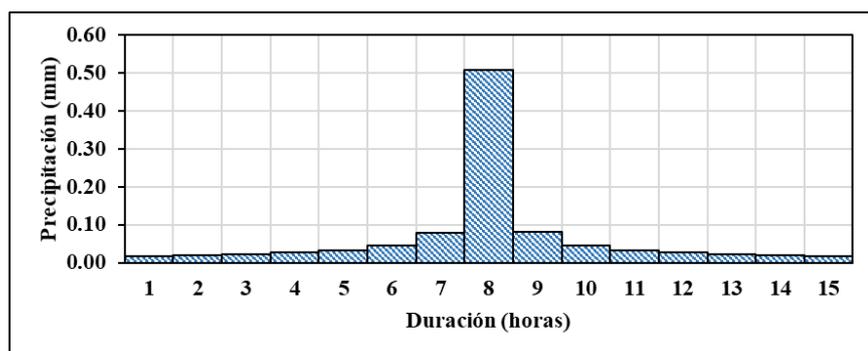


Figura 99 Patrón de discretización de precipitación para una duración de 15 horas.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.2.2. Cálculo de la abstracción y su distribución temporal

Hasta este punto se ha calculado la altura de precipitación para cada sub cuenca y diferentes periodos de retorno y además la discretización temporal.

Para el análisis de la transformación lluvia escorrentía es necesario determinar la capacidad de abstracción de cada sub cuenca (el potencial del tipo de suelo contenido en cada una de ellas) ante un aguacero, a continuación, se describen los pasos para el cálculo de la abstracción y su discretización temporal.

4.3.4.2.2.1. Cálculo de la curva número y condición de humedad antecedente

En este punto se determina la capacidad de abstracción de suelo representado por la curva número CN, el cual se procesa mediante

los mapas de suelos y cobertura vegetal ambos mostrados en la tabla 21. Estos mapas nos describen el tipo y uso de la tierra para ponderar un número de curva representativo para cada sub cuenca.

En la tabla 116, se determina el grupo hidrológico al que pertenece cada tipo de suelo contenido dentro del área de cada sub cuenca, en base al estudio “Generación del mapa temático de curva número (CN)” realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA 2015), el cual asigna una clasificación hidrológica (Ver tabla 10) según la descripción del tipo de suelo mostrado en el “Mapa de suelos del Perú” (INRENA 1996).

Tabla 116

Identificación del Grupo Hidrológico.

Tipo de suelo	Símbolo	Grupo hidrológico
<p>Arenosol háplico – Solonchak háplico Arenoso háplico: Suelos profundos de color pardo y de textura gruesa (arena o arena gruesa), muestra gravillas angulares y sub angulares.</p>	ARh-SCh	“A”
<p>Solonchak háplico: Suelos sin estructura definida de textura gruesa con dominio de arena y arena franca.</p>		
<p>Leptosol dístico – Afloramiento lítico Leptosol dístico: Suelos superficiales, ubicados generalmente en un relieve abrupto, con presencia de roca dura y son de textura media.</p>	LPd-R	
<p>Afloramiento dístico: De material sólido y compacto (roca), presencia significativa en paisajes montañosos.</p>		“B”
<p>Leptosol Lítico – Afloramiento lítico Leptosol lítico: Suelos muy superficiales, desarrollados directamente a partir de roca.</p>	LPq-R	

Fuente: Elaboración propia en base a Mapa de suelos del Perú – INRENA (1996) y Generación del mapa temático de curva número – ANA (2015) (Ver anexo N° 03).

Luego del proceso anterior, se determina el valor de la curva número, asignando valores según la cobertura de uso de tierras de acuerdo al “Mapa de cobertura vegetal” realizado por el Ministerio del Ambiente (MINAM 2015) mostrado en la tabla 21 cuyos valores son asignados en referencia a las tablas mostradas en el Anexo N° 02, que son traducción al castellano de las mostradas en el “Manual técnico referencial” del software para modelos hidrológicos Hec-HMS (Hydrologic Modeling System) creado por el US Army Corps of Engineers (2002), y que muestran valores según el uso de la tierra y su grupo hidrológico para condiciones antecedentes de humedad II.

El cálculo se describe cada columna de las tablas 117 y 118 para determinar un valor de curva número compuesto para cada sub cuenca según las características mencionadas en el párrafo anterior.

- (1) Descripción de la cobertura o uso de la tierra.
- (2) Corresponde al área que la cobertura ocupa dentro de cada subcuenca.
- (3) El grupo hidrológico de cada cobertura.
- (4) El número curva asignado a cada cobertura.
- (5) El porcentaje asignado a cada cobertura respecto al área total de cada sub cuenca.
- (6) Es el producto entre las columnas (4) y (5), cuya suma resulta un CN ponderado.

Tabla 117

Cálculo de la Curva Número - Sub cuenca Cerro Blanco.

Descripción de cobertura	Área	G.H.	CN II*	%	Producto
Agricultura costera y andina	0.29		72	0.15	0.11
Bosque seco tipo sabana	1.10	A	45	0.57	0.26
Desierto costero	0.11		45	0.06	0.03
Agricultura costera y andina	14.38		81	7.42	6.01
Bosque seco tipo sabana	0.89		66	0.46	0.30
Cardonal	40.72	B	71	21.00	14.91
Desierto costero	22.32		66	11.51	7.60
Matorral arbustivo	114.08		58	58.84	34.13

Fuente: Elaboración propia en base al Mapa de Cobertura Vegetal – MINAM (2015).

Tabla 118

Cálculo de la Curva Número - Sub cuenca Chorobal.

Descripción de cobertura	Área	G.H.	CN II*	%	Producto
Agricultura costera y andina	0.31	A	72	0.10	0.07
Bosque seco tipo sabana	0.10		45	0.03	0.01
Agricultura costera y andina	30.78		81	9.71	7.87
Bofedal	2.31		0	0.73	0.00
Bosque seco de montaña	16.12		66	5.08	3.35
Bosque seco tipo sabana	3.63		66	1.14	0.75
Cardonal	22.59	B	71	7.12	5.06
Desierto costero	5.78		66	1.82	1.20
Lagunas, lagos y cochas	0.02		100	0.01	0.01
Matorral arbustivo	123.36		58	38.91	22.57
Pajonal andino	112.07		69	35.35	24.39

Fuente: Elaboración propia en base al Mapa de Cobertura Vegetal – MINAM (2015).

Entonces de la suma resultante de la columna 6 se obtuvieron los valores ponderados de CN, siendo 63.34 para la sub cuenca Cerro Blanco y 65.28 para la sub cuenca Chorobal, valores que en condiciones normales muestran una permeabilidad regular.

4.3.4.2.2.2. Infiltración inicial para cada sub cuenca

Debido a que el presente estudio trata de modelar un evento extremo, se asume una condición de humedad antecedente AMC-III, representando el máximo potencial de escurrimiento pues la superficie de las sub cuencas se encuentran saturadas debido a precipitaciones de días anteriores (Ver tabla 9). El cálculo para condiciones de humedad AMC-I y AMC-III se realiza con las siguientes ecuaciones.

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad \text{Ec. 4.8}$$

Con el valor de CN-III se procede a calcular la retención potencial máxima S mediante la ecuación 4.9, que al hacer la conversión en milímetros se expresa:

$$S = \frac{25400}{CN(III)} - 254 \quad \text{Ec. 4.9}$$

El potencial máximo de retención comprende de una retención inicial de agua que se produce antes del inicio de la escorrentía superficial, con una relación empírica expresada en la ecuación 2.31; en la siguiente tabla se muestran los resultados.

Tabla 119

Números de curva para distintas condiciones de humedad antecedente, la retención potencial máxima y la abstracción inicial.

Sub cuenca	Curva Número			S (mm)	Ia (mm)
	AMC-I	AMC-II	AMC-III		
Cerro Blanco	42.05	63.34	79.89	63.92	12.78
Chorobal	44.13	65.28	81.22	58.73	11.75

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.2.2.3. Distribución temporal de las abstracciones

La distribución temporal de las abstracciones, para cada sub cuenca y para los diferentes periodos de retorno, es la variación en el tiempo de la intercepción de la precipitación según el tipo de superficie que presenta cada sub cuenca.

De la ecuación 2.32, derivando y asumiendo que Ia y S son constantes, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dF_a}{dt} = \frac{S^2 dP/dt}{(P - I_a - S)^2} \quad \text{Ec. 4.10}$$

Entonces se requiere que a medida que $P \rightarrow \infty$ y $dF_a/dt \rightarrow 0$, aunque si la intensidad de lluvia (dP/dt) la capacidad de retención de agua de la cuenca se incrementa (Ven Te Chow y Otros, 1994).

En el uso práctico las abstracciones acumuladas y la precipitación efectiva se pueden determinar con las ecuaciones 2.32 y 2.30. A continuación se describe cada columna de las tablas 120 al 131, donde se obtiene la distribución temporal de las abstracciones y se deriva en las gráficas de las figuras 100 al 111.

(1) Tiempo expresado en horas (15 horas).

- (2) Distribución de la precipitación discretizada en 15 horas (Precipitación distribuida de manera parcial, según el patrón de discretización mostrado en la figura 99).
- (3) Precipitación acumulada.
- (4) Variación temporal de la abstracción inicial, que sigue la ecuación 2.29 con la siguiente condición “ $P_{acum} < I_a = P_{acum}$ ” de lo contrario “ $P_{acum} > I_a = I_a$ ”
- (5) Variación temporal de las abstracciones, con la condición de $P_{acum} \geq I_a$. (Ver ecuación 2.32)
- (6) La precipitación efectiva acumulada, es la diferencia entre P_{acum} y la suma de las abstracciones.
- (7) Distribución de la precipitación efectiva parcial.
- (8) Distribución de la abstracción, diferencia entre la precipitación parcial y la precipitación efectiva (parcial) en referencia a la ecuación 2.28.

Tabla 120

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 25 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	0.71	0.71	0.71	0.00	0.00	0.00	0.71
2	0.81	1.53	1.53	0.00	0.00	0.00	0.81
3	0.93	2.46	2.46	0.00	0.00	0.00	0.93
4	1.11	3.57	3.57	0.00	0.00	0.00	1.11
5	1.37	4.94	4.94	0.00	0.00	0.00	1.37
6	1.87	6.81	6.81	0.00	0.00	0.00	1.87
7	3.28	10.10	10.10	0.00	0.00	0.00	3.28
8	21.00	31.10	12.78	13.96	4.35	4.35	16.65
9	3.36	34.46	12.78	15.83	5.84	1.49	1.87
10	1.89	36.35	12.78	16.82	6.75	0.91	0.99
11	1.38	37.73	12.78	17.51	7.44	0.69	0.69
12	1.11	38.84	12.78	18.05	8.01	0.57	0.54
13	0.94	39.78	12.78	18.50	8.50	0.49	0.44
14	0.82	40.60	12.78	18.87	8.94	0.44	0.38
15	0.73	41.32	12.78	19.21	9.33	0.40	0.33

Fuente: Elaboración propia.

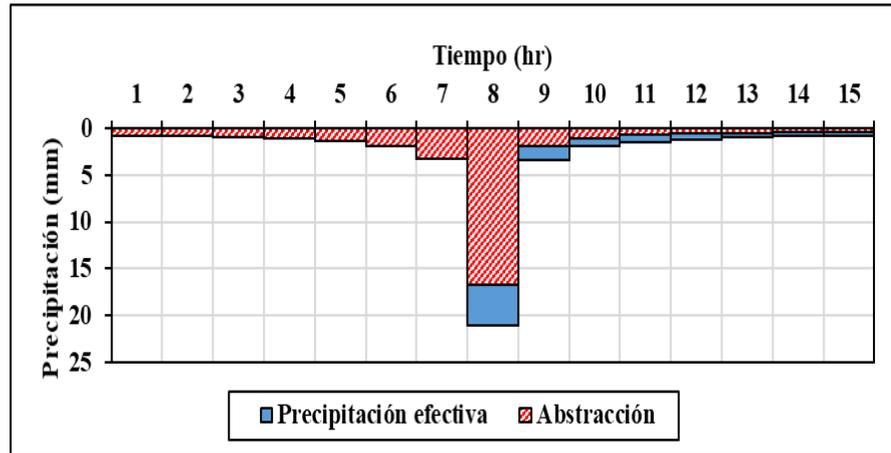


Figura 100 Hietograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 25 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 121

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 50 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	0.81	0.81	0.81	0.00	0.00	0.00	0.81
2	0.93	1.74	1.74	0.00	0.00	0.00	0.93
3	1.06	2.81	2.81	0.00	0.00	0.00	1.06
4	1.26	4.07	4.07	0.00	0.00	0.00	1.26
5	1.57	5.63	5.63	0.00	0.00	0.00	1.57
6	2.14	7.77	7.77	0.00	0.00	0.00	2.14
7	3.74	11.51	11.51	0.00	0.00	0.00	3.74
8	23.94	35.45	12.78	16.36	6.31	6.31	17.63
9	3.83	39.28	12.78	18.26	8.24	1.92	1.90
10	2.16	41.44	12.78	19.26	9.39	1.16	1.00
11	1.58	43.01	12.78	19.96	10.27	0.88	0.70
12	1.27	44.28	12.78	20.50	10.99	0.72	0.54
13	1.07	45.35	12.78	20.95	11.61	0.62	0.45
14	0.93	46.28	12.78	21.33	12.16	0.55	0.38
15	0.83	47.11	12.78	21.66	12.66	0.50	0.33

Fuente: Elaboración propia.

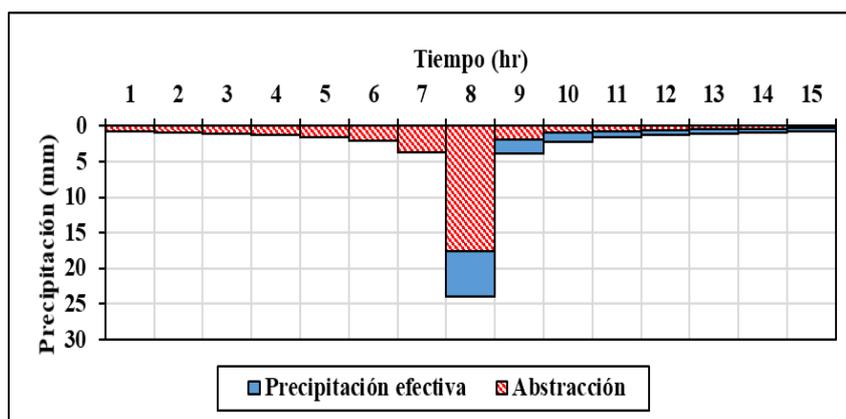


Figura 101 Hietograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 50 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 122

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 100 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	0.92	0.92	0.92	0.00	0.00	0.00	0.92
2	1.05	1.97	1.97	0.00	0.00	0.00	1.05
3	1.21	3.18	3.18	0.00	0.00	0.00	1.21
4	1.43	4.61	4.61	0.00	0.00	0.00	1.43
5	1.77	6.38	6.38	0.00	0.00	0.00	1.77
6	2.42	8.80	8.80	0.00	0.00	0.00	2.42
7	4.24	13.04	12.78	0.25	0.00	0.00	4.24
8	27.11	40.15	12.78	18.67	8.70	8.70	18.42
9	4.33	44.48	12.78	20.59	11.11	2.41	1.92
10	2.44	46.92	12.78	21.59	12.55	1.44	1.00
11	1.78	48.71	12.78	22.29	13.63	1.08	0.70
12	1.43	50.14	12.78	22.83	14.52	0.89	0.54
13	1.21	51.35	12.78	23.28	15.29	0.76	0.45
14	1.05	52.41	12.78	23.66	15.96	0.67	0.38
15	0.94	53.35	12.78	23.99	16.57	0.61	0.33

Fuente: Elaboración propia.

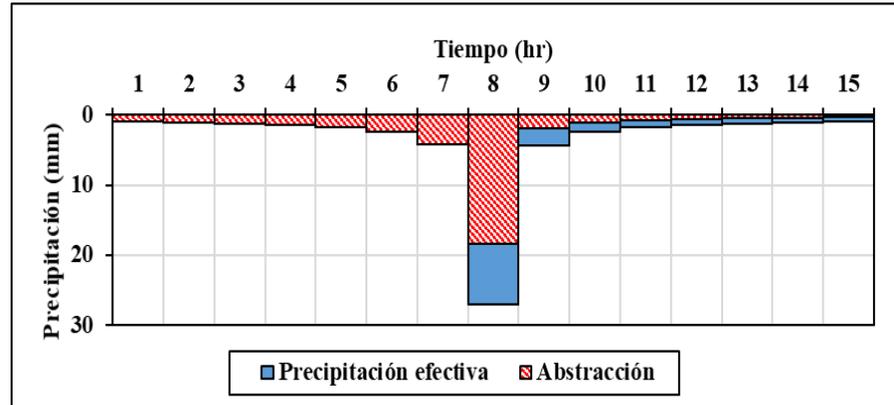


Figura 102 Hietograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 100 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 123

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 200 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	1.04	1.04	1.04	0.00	0.00	0.00	1.04
2	1.19	2.23	2.23	0.00	0.00	0.00	1.19
3	1.36	3.60	3.60	0.00	0.00	0.00	1.36
4	1.61	5.21	5.21	0.00	0.00	0.00	1.61
5	2.01	7.22	7.22	0.00	0.00	0.00	2.01
6	2.74	9.96	9.96	0.00	0.00	0.00	2.74
7	4.80	14.76	12.78	1.91	0.06	0.06	4.73
8	30.69	45.45	12.78	20.99	11.67	11.61	19.08
9	4.91	50.35	12.78	22.91	14.66	2.98	1.92
10	2.76	53.12	12.78	23.91	16.42	1.77	1.00
11	2.02	55.14	12.78	24.61	17.75	1.32	0.70
12	1.62	56.76	12.78	25.15	18.83	1.08	0.54
13	1.37	58.13	12.78	25.59	19.76	0.93	0.44
14	1.19	59.33	12.78	25.97	20.58	0.82	0.38
15	1.06	60.39	12.78	26.29	21.31	0.74	0.33

Fuente: Elaboración propia.

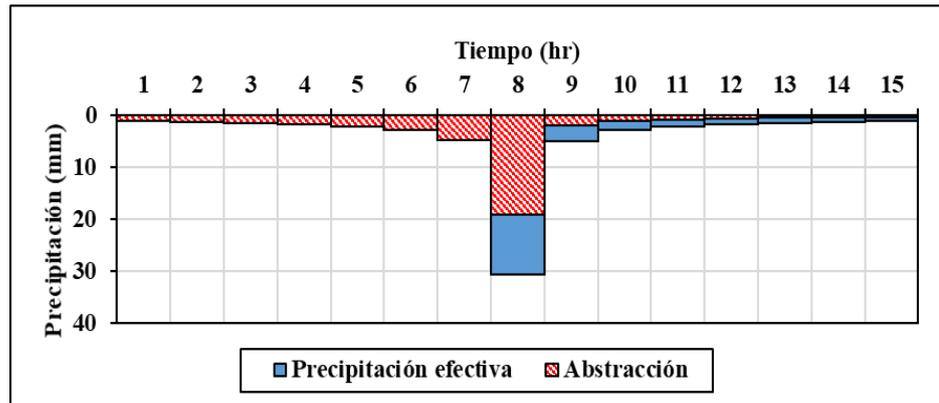


Figura 103 Histograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 200 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 124

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del histograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 500 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	1.24	1.24	1.24	0.00	0.00	0.00	1.24
2	1.41	2.65	2.65	0.00	0.00	0.00	1.41
3	1.62	4.27	4.27	0.00	0.00	0.00	1.62
4	1.92	6.19	6.19	0.00	0.00	0.00	1.92
5	2.38	8.57	8.57	0.00	0.00	0.00	2.38
6	3.25	11.82	11.82	0.00	0.00	0.00	3.25
7	5.69	17.51	12.78	4.38	0.35	0.35	5.34
8	36.43	53.94	12.78	24.20	16.96	16.61	19.82
9	5.82	59.76	12.78	26.10	20.88	3.92	1.90
10	3.28	63.05	12.78	27.08	23.18	2.30	0.98
11	2.40	65.44	12.78	27.77	24.89	1.72	0.68
12	1.93	67.37	12.78	28.29	26.29	1.40	0.53
13	1.63	69.00	12.78	28.72	27.49	1.20	0.43
14	1.42	70.41	12.78	29.09	28.54	1.05	0.37
15	1.26	71.67	12.78	29.41	29.49	0.94	0.32

Fuente: Elaboración propia.

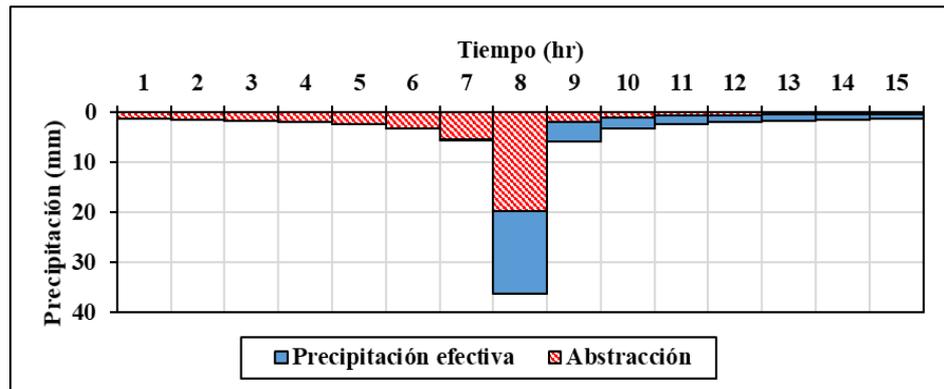


Figura 104 Hietograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 500 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 125

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 1000 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	1.42	1.42	1.42	0.00	0.00	0.00	1.42
2	1.62	3.05	3.05	0.00	0.00	0.00	1.62
3	1.86	4.91	4.91	0.00	0.00	0.00	1.86
4	2.20	7.12	7.12	0.00	0.00	0.00	2.20
5	2.74	9.86	9.86	0.00	0.00	0.00	2.74
6	3.74	13.59	12.78	0.80	0.01	0.01	3.73
7	6.55	20.14	12.78	6.54	0.82	0.81	5.74
8	41.89	62.04	12.78	26.79	22.46	21.64	20.25
9	6.70	68.73	12.78	28.65	27.29	4.83	1.87
10	3.77	72.50	12.78	29.61	30.11	2.82	0.96
11	2.76	75.26	12.78	30.27	32.20	2.10	0.66
12	2.21	77.48	12.78	30.78	33.91	1.70	0.51
13	1.87	79.35	12.78	31.20	35.36	1.45	0.42
14	1.63	80.98	12.78	31.55	36.64	1.28	0.35
15	1.45	82.43	12.78	31.86	37.78	1.14	0.31

Fuente: Elaboración propia.

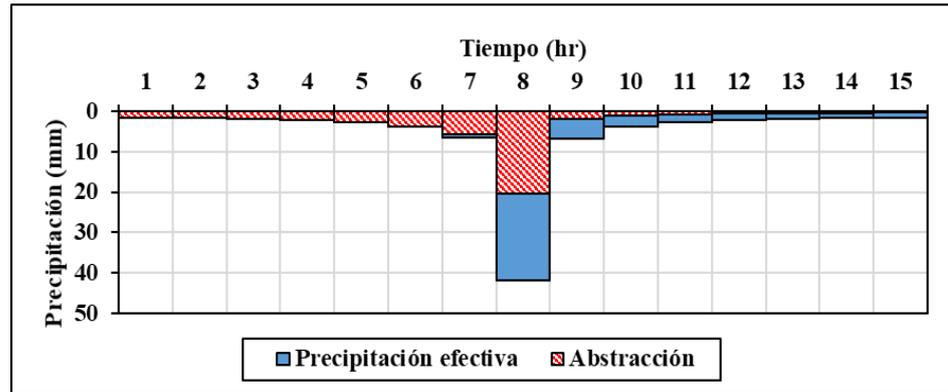


Figura 105 Hietograma de precipitación Sub cuenca Cerro Blanco – Periodo de retorno = 1000 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 126

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 25 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	0.78	0.78	0.78	0.00	0.00	0.00	0.78
2	0.90	1.68	1.68	0.00	0.00	0.00	0.90
3	1.03	2.71	2.71	0.00	0.00	0.00	1.03
4	1.21	3.92	3.92	0.00	0.00	0.00	1.21
5	1.51	5.43	5.43	0.00	0.00	0.00	1.51
6	2.06	7.49	7.49	0.00	0.00	0.00	2.06
7	3.61	11.10	11.10	0.00	0.00	0.00	3.61
8	23.09	34.19	11.75	16.24	6.21	6.21	16.88
9	3.69	37.88	11.75	18.09	8.05	1.84	1.85
10	2.08	39.96	11.75	19.06	9.16	1.11	0.97
11	1.52	41.48	11.75	19.74	10.00	0.84	0.68
12	1.22	42.70	11.75	20.27	10.69	0.69	0.53
13	1.03	43.74	11.75	20.71	11.28	0.59	0.44
14	0.90	44.63	11.75	21.08	11.80	0.53	0.37
15	0.80	45.43	11.75	21.41	12.28	0.47	0.33

Fuente: Elaboración propia.

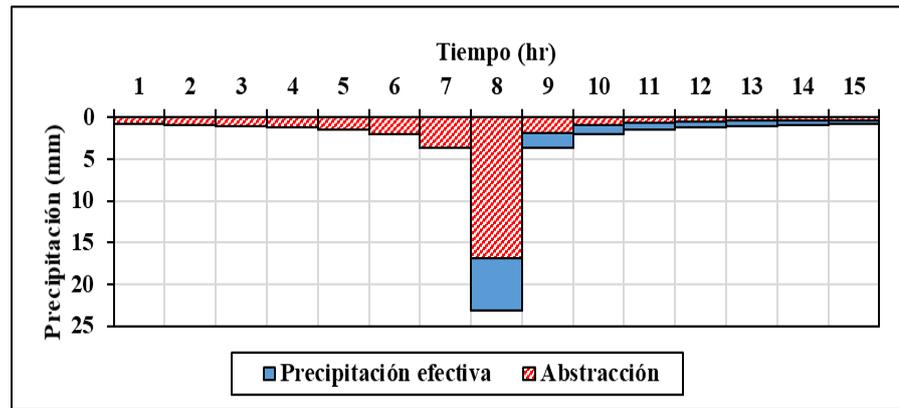


Figura 106 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal –
Periodo de retorno = 25 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 127

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 50 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	0.88	0.88	0.88	0.00	0.00	0.00	0.88
2	1.00	1.88	1.88	0.00	0.00	0.00	1.00
3	1.15	3.03	3.03	0.00	0.00	0.00	1.15
4	1.36	4.39	4.39	0.00	0.00	0.00	1.36
5	1.69	6.08	6.08	0.00	0.00	0.00	1.69
6	2.30	8.38	8.38	0.00	0.00	0.00	2.30
7	4.04	12.42	11.75	0.66	0.01	0.01	4.03
8	25.83	38.25	11.75	18.26	8.24	8.23	17.60
9	4.13	42.38	11.75	20.13	10.50	2.26	1.87
10	2.33	44.70	11.75	21.11	11.85	1.35	0.98
11	1.70	46.40	11.75	21.80	12.86	1.02	0.68
12	1.37	47.77	11.75	22.33	13.70	0.83	0.53
13	1.15	48.92	11.75	22.77	14.41	0.72	0.44
14	1.00	49.93	11.75	23.14	15.04	0.63	0.37
15	0.89	50.82	11.75	23.46	15.61	0.57	0.33

Fuente: Elaboración propia.

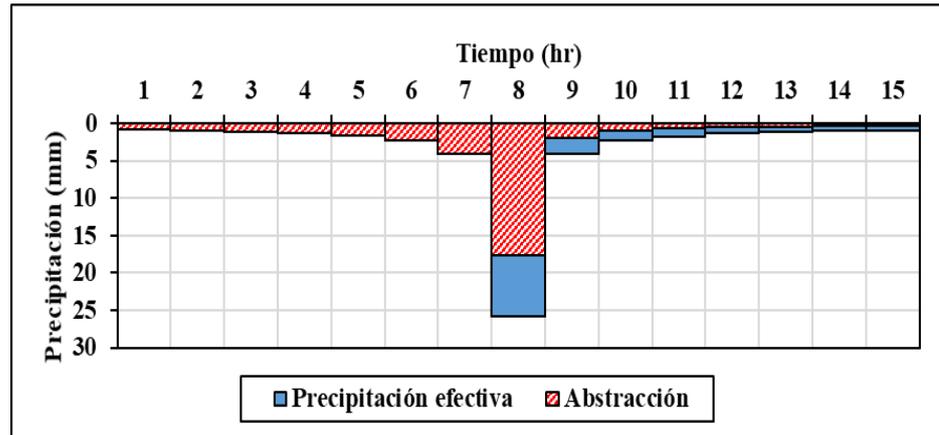


Figura 107 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal –
Periodo de retorno = 50 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 128

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 100 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	0.97	0.97	0.97	0.00	0.00	0.00	0.97
2	1.11	2.08	2.08	0.00	0.00	0.00	1.11
3	1.27	3.35	3.35	0.00	0.00	0.00	1.27
4	1.50	4.85	4.85	0.00	0.00	0.00	1.50
5	1.87	6.72	6.72	0.00	0.00	0.00	1.87
6	2.55	9.27	9.27	0.00	0.00	0.00	2.55
7	4.47	13.74	11.75	1.93	0.07	0.07	4.40
8	28.58	42.32	11.75	20.11	10.47	10.40	18.18
9	4.57	46.89	11.75	21.99	13.15	2.69	1.88
10	2.57	49.46	11.75	22.97	14.75	1.59	0.98
11	1.88	51.34	11.75	23.65	15.94	1.20	0.68
12	1.51	52.85	11.75	24.18	16.92	0.98	0.53
13	1.28	54.13	11.75	24.62	17.76	0.84	0.44
14	1.11	55.24	11.75	24.99	18.50	0.74	0.37
15	0.99	56.23	11.75	25.31	19.17	0.67	0.32

Fuente: Elaboración propia.

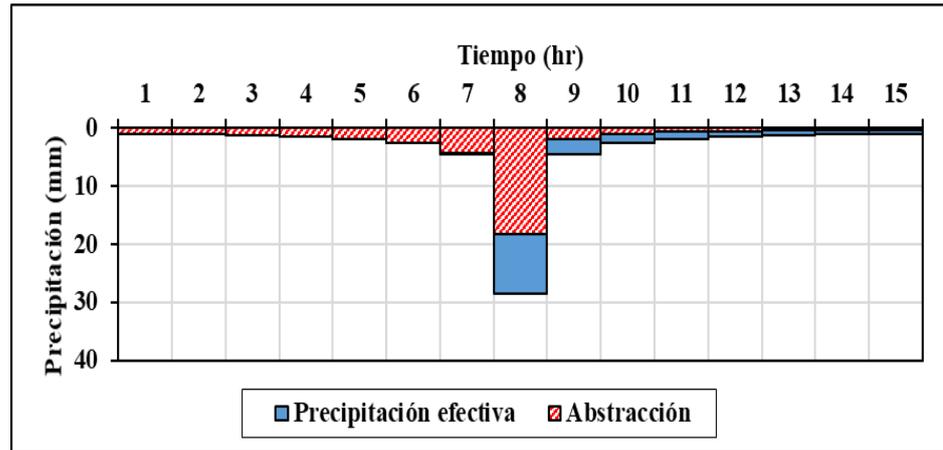


Figura 108 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal –
Periodo de retorno = 100 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 129

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 200 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	1.07	1.07	1.07	0.00	0.00	0.00	1.07
2	1.22	2.29	2.29	0.00	0.00	0.00	1.22
3	1.40	3.69	3.69	0.00	0.00	0.00	1.40
4	1.65	5.34	5.34	0.00	0.00	0.00	1.65
5	2.06	7.40	7.40	0.00	0.00	0.00	2.06
6	2.81	10.21	10.21	0.00	0.00	0.00	2.81
7	4.92	15.12	11.75	3.19	0.18	0.18	4.73
8	31.45	46.58	11.75	21.86	12.97	12.78	18.67
9	5.03	51.60	11.75	23.74	16.11	3.15	1.88
10	2.83	54.44	11.75	24.72	17.97	1.86	0.98
11	2.07	56.51	11.75	25.40	19.36	1.39	0.68
12	1.66	58.17	11.75	25.93	20.49	1.14	0.53
13	1.40	59.57	11.75	26.36	21.47	0.97	0.43
14	1.22	60.80	11.75	26.73	22.32	0.86	0.37
15	1.09	61.89	11.75	27.05	23.09	0.77	0.32

Fuente: Elaboración propia.

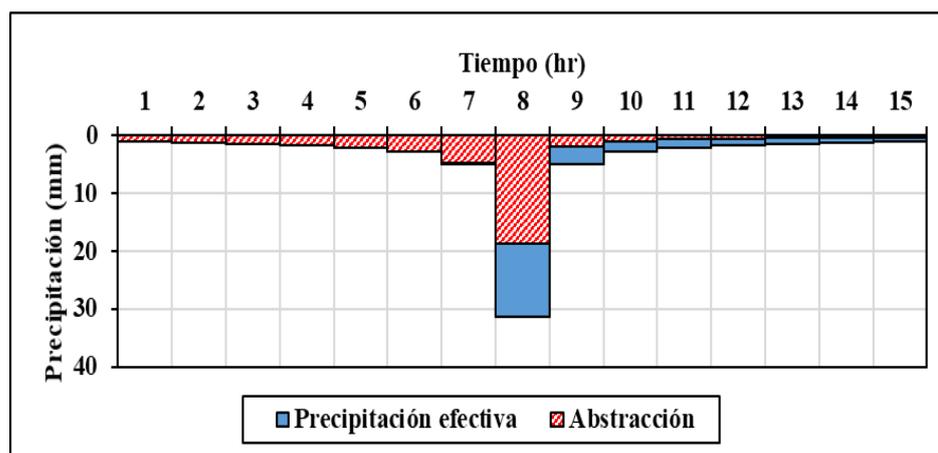


Figura 109 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 200 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 130

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 500 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	1.21	1.21	1.21	0.00	0.00	0.00	1.21
2	1.38	2.60	2.60	0.00	0.00	0.00	1.38
3	1.59	4.18	4.18	0.00	0.00	0.00	1.59
4	1.88	6.06	6.06	0.00	0.00	0.00	1.88
5	2.33	8.40	8.40	0.00	0.00	0.00	2.33
6	3.18	11.58	11.58	0.00	0.00	0.00	3.18
7	5.58	17.16	11.75	4.95	0.46	0.46	5.12
8	35.68	52.84	11.75	24.18	16.92	16.46	19.22
9	5.70	58.54	11.75	26.05	20.75	3.84	1.87
10	3.21	61.76	11.75	27.01	23.00	2.25	0.97
11	2.35	64.11	11.75	27.68	24.68	1.68	0.67
12	1.89	65.99	11.75	28.20	26.05	1.37	0.52
13	1.59	67.59	11.75	28.62	27.22	1.17	0.42
14	1.39	68.97	11.75	28.99	28.24	1.03	0.36
15	1.24	70.21	11.75	29.30	29.17	0.92	0.31

Fuente: Elaboración propia.

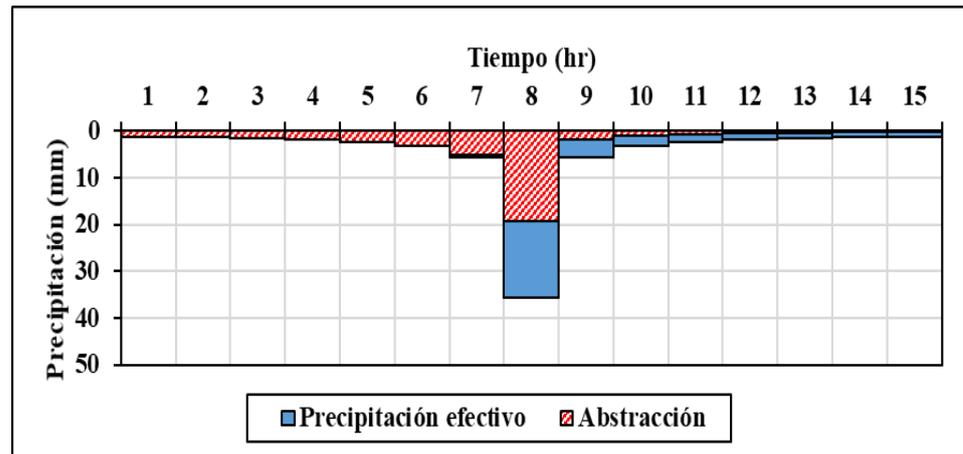


Figura 110 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 500 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 131

Cálculo de la distribución temporal de las abstracciones y del hietograma de exceso de precipitación – Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 1000 años.

Tiempo (hr)	Pp	Pacum	Ia acc	Fa acc	Pe acc	Pe	Pabst
1	1.34	1.34	1.34	0.00	0.00	0.00	1.34
2	1.53	2.87	2.87	0.00	0.00	0.00	1.53
3	1.75	4.62	4.62	0.00	0.00	0.00	1.75
4	2.07	6.70	6.70	0.00	0.00	0.00	2.07
5	2.58	9.28	9.28	0.00	0.00	0.00	2.58
6	3.52	12.79	11.75	1.03	0.02	0.02	3.50
7	6.16	18.96	11.75	6.42	0.79	0.77	5.39
8	39.43	58.38	11.75	25.99	20.64	19.85	19.57
9	6.30	64.68	11.75	27.84	25.10	4.45	1.85
10	3.55	68.24	11.75	28.79	27.69	2.60	0.95
11	2.60	70.83	11.75	29.45	29.63	1.94	0.66
12	2.08	72.92	11.75	29.96	31.21	1.58	0.51
13	1.76	74.68	11.75	30.38	32.55	1.34	0.42
14	1.53	76.21	11.75	30.73	33.73	1.18	0.35
15	1.37	77.57	11.75	31.04	34.79	1.06	0.31

Fuente: Elaboración propia.

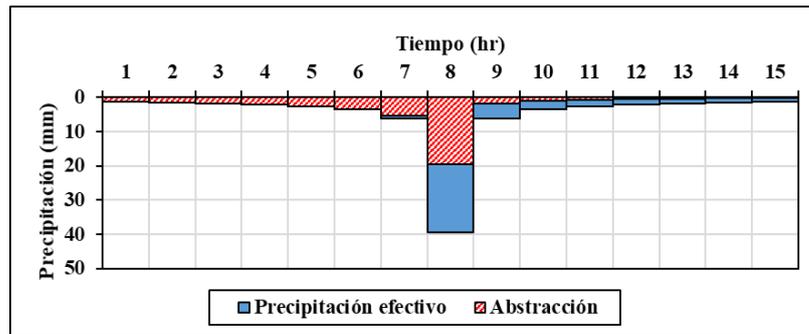


Figura 111 Hietograma de precipitación Sub cuenca Chorobal – Periodo de retorno = 1000 años.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.3. Hidrograma unitario

En este punto se procede a determinar un hidrograma unitario sintético de cada sub cuenca mediante la función gamma de 2 parámetros o modelo de Nash (1958) (Ver ecuación 2.34), donde los parámetros de forma y escala se calculan según lo expuesto por Rosso (1984) (Ver punto 2.2.5.2.) donde intervienen las relaciones de Horton y Schumm, la velocidad y longitud del cauce de mayor orden, que al ser estas características fisiográficas propias de influyen en la respuesta de estas. (Ver punto 2.2.4.2).

Debido a que no se cuenta con registros de precipitación, sino que se construye un valor de precipitación a partir de estaciones cercanas al área en estudio y que el registro de caudales medidos en la estación hidrológica Chorobal son producto de la confluencia de los cauces de ambas sub cuencas, por lo no se puede determinar el aporte de cada una y la influencia de las características fisiográficas con un hidrograma de escorrentía directa producto de una máxima avenida, por lo que se procede a determinar un hidrograma producto de la superposición de los hidrogramas resultantes a partir de la transformación lluvia – escorrentía con hidrogramas unitarios individuales.

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, a continuación, se muestran los criterios para determinar cada una de las variables que intervienen en el cálculo de los parámetros (ecuaciones 2.37 y 2.38) para la construcción del hidrograma unitario en cada sub cuenca.

4.3.4.3.1. Longitud del cauce mayor orden y velocidad del cauce

Como se mencionó en el punto 4.3.2.3.2., la longitud del cauce de mayor orden es de 15.13 Km para la sub cuenca Cerro Blanco y 47.31 Km para la sub cuenca Chorobal (Ver tabla 27 y/o figura 112), el criterio viene del análisis grafico en el cual se fija como cauce de mayor orden aquel que sigue la forma de la cuenca.

La velocidad del cauce se determina dividiendo el cauce principal en tramos (el cauce mayor orden forma parte de este) y determinando la pendiente de estos, se le asigna un valor de velocidad según la tabla 11. En las tablas 132 y 133 se muestra para cada tramo la velocidad asignada.

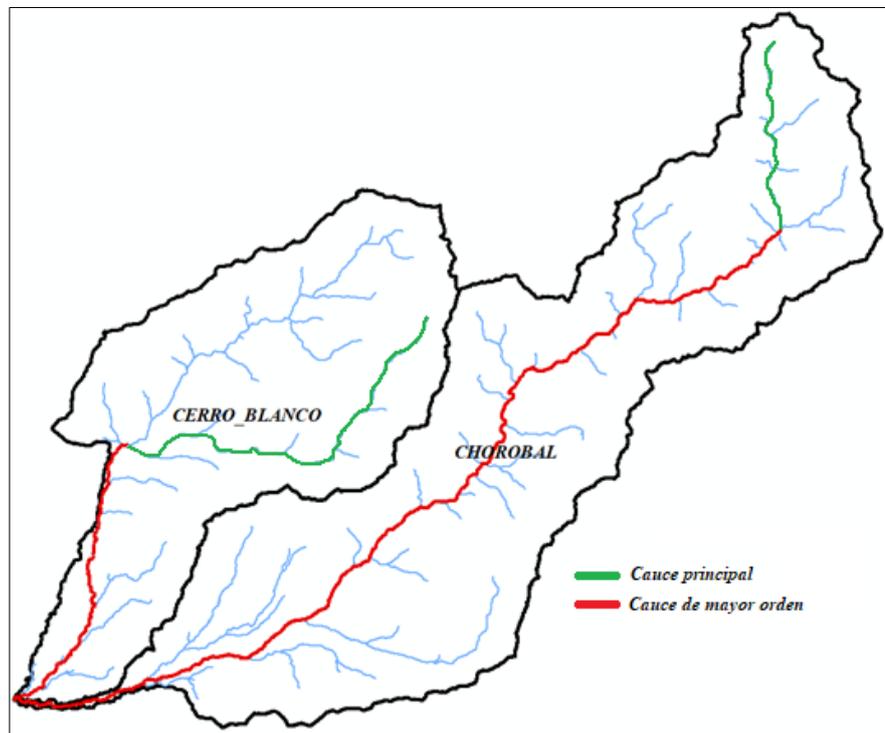


Figura 112 Sub cuencas y el cauce de mayor orden.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 132

Asignación de la velocidad promedio del cauce de orden mayor - Sub cuenca Cerro Blanco.

Tramo	P.K. 0+000.00	Cota Superior msnm	Cota Inferior msnm	Pendiente %	Velocidad pie/s	Velocidad m/s
1	5+000.00	3,825.86	3,208.63	12.30	7.20	3.00
2	5+000.00	3,208.63	2,033.68	23.50	13.71	5.00
3	5+000.00	2,033.68	1,341.50	13.80	8.08	3.00
4	5+000.00	1,341.50	952.01	7.80	3.89	2.00
5	5+000.00	952.01	666.53	5.70	2.85	1.00
6	5+000.00	666.53	431.01	4.70	2.36	1.00
7	5+000.00	431.01	296.84	2.70	1.34	1.00
8	2+258.84	296.84	260.00	1.60	0.82	1.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 133

Asignación de la velocidad promedio del cauce de orden mayor - Sub cuenca Chorobal.

Tramo	P.K. 0+000.00	Cota Superior msnm	Cota Inferior msnm	Pendiente %	Velocidad pie/s	Velocidad m/s
1	5+000.00	4,260.00	4,000.40	5.20	2.60	1.00
2	5+000.00	4,000.40	3,892.68	2.20	1.08	1.00
3	5+000.00	3,892.68	3,569.00	6.50	3.24	1.00
4	5+000.00	3,569.00	3,411.00	3.20	1.58	1.00
5	5+000.00	3,411.00	3,278.46	2.70	1.33	1.00
6	5+000.00	3,278.46	2,913.00	7.30	3.65	2.00
7	5+000.00	2,913.00	2,624.67	5.80	2.88	1.00
8	5+000.00	2,624.67	1,257.68	27.30	15.95	5.00
9	5+000.00	1,257.68	795.46	9.20	4.93	2.00
10	5+000.00	795.46	539.17	5.10	2.56	1.00
11	5+000.00	539.17	362.73	3.50	1.76	1.00
12	4+267.76	362.73	260.00	2.40	1.20	1.00

Fuente: Elaboración propia.

Con la suposición de que la velocidad es la misma en cualquier parte de la cuenca o de los cauces de esta, se toma el promedio de las velocidades asignadas a cada tramo lo que resulta en una velocidad de 3.00 m/s para la sub cuenca Cerro blanco y de 2.00 m/s para la sub cuenca Chorobal.

4.3.4.3.2. Relaciones de Horton y Schumm

En el punto 4.3.2.1.3.2., se determinaron las relaciones de Horton y Schumm en función del número de celdas del modelo digital de elevación (DEM), optando por tomar los valores calculados para el ensayo # 3 (1600 celdas) como representativos tras estimar las características fisiográficas de la red hídrica de ambas sub cuencas

Estos valores son constantes en la cuenca de análisis, sin tener en cuenta el orden de esta y esto se puede observar en las figuras 47 – 60, donde la tendencia de la gráfica es constante de un orden a otro. A continuación, se muestran los valores anteriormente presentados en las tablas 84 y 85.

Tabla 134

Relaciones de Horton y Schumm para cada sub cuenca.

Sub cuenca	R_B	R_L	R_A
Cerro Blanco	3.92	2.17	4.38
Chorobal	4.25	2.51	4.77

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.3.3. Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico

En este punto, al a ver sido calculados previamente los parámetros geomorfológicos y las características fisiográficas de las sub cuencas Cerro blanco y Chorobal, se estimó para ambas el hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.

El modelo toma la función Gamma 2 parámetros (ver ecuación 2.34) y sus parámetros moldean al hidrograma unitario, en (García-Bartual, 1989) según estudios de R. Rosso, el parámetro de forma α agrega los efectos de las leyes físicas que determinan la estructura

de la red de drenaje, y el parámetro de escala k concentra la dinámica del transporte de agua de la cuenca.

En las ecuaciones 2.37 y 2.38, se observa que los parámetros de forma y escala son sensibles a las relaciones de Horton y Schumm, la longitud del cauce de mayor orden y la velocidad de flujo. Entonces los parámetros calculados con las ecuaciones mencionadas son los siguientes.

Tabla 135

Resumen de los parámetros para el cálculo del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.

Sub cuenca	α	K (hr)
Cerro Blanco	3.18	0.71
Chorobal	3.21	3.13

Fuente: Elaboración propia.

El paso siguiente es la construcción del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico para cada sub cuenca, las gráficas mostradas a continuación son el producto de la función Gamma 2 Parámetros (1/h) y el área de la cuenca (km^2).

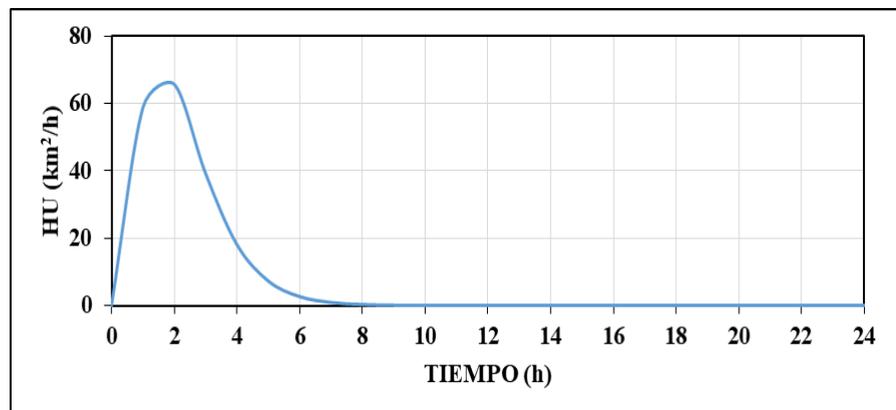


Figura 113 Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico - Cerro Blanco.

Fuente: Elaboración propia.

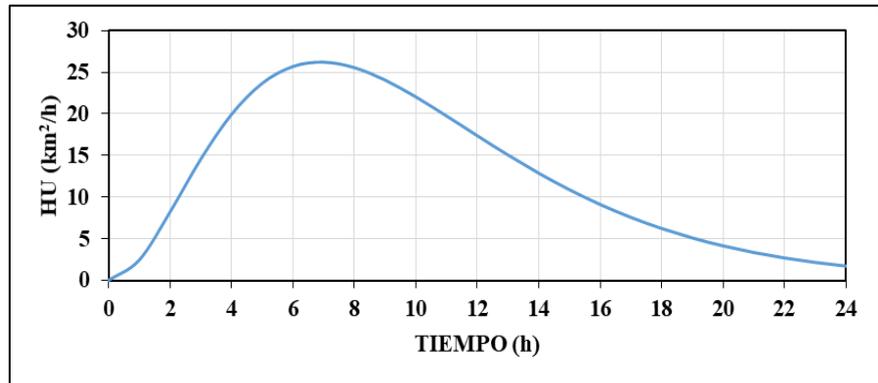


Figura 114 Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico - Chorobal.

Fuente: Elaboración propia.

En el presente estudio y como se observa en las gráficas anteriores, el hidrograma unitario instantáneo geomorfológico construido a partir de la función Gamma 2 parámetros, es notablemente más sensible a la relación entre la longitud del cauce de mayor orden y la velocidad (L/v) que a las relaciones de Horton y Schumm pues como se determina en la tabla 135 los valores entre ambas sub cuencas del parámetro de forma son similares y los valores del parámetro de escala difieren ampliamente, esta relación viene a ser el componente de tiempo de escorrentía, al analizar los valores de densidad de drenaje (Dd) mostrados en las tablas 84 y 85 podemos confirmar esa diferencia pues en la sub cuenca Chorobal esta es considerada “Alta” y en la sub cuenca Cerro blanco es “Moderada” pues a mayor densidad de drenaje el tiempo de escorrentía es menor.

Además, Los parámetros de forma y de relieve intervienen en diferente medida en el comportamiento y respuesta de la cuenca, como son aquellos que identifican la geometría del área de la cuenca y la orografía de es esta.

En las gráficas en las figuras 113 y 115, se observa que en la sub cuenca Cerro blanco el pico del hidrograma unitario es alcanzado en 1.50 horas con un valor de $72.21 \text{ km}^2/\text{h}$ y para la sub cuenca Chorobal el pico es alcanzado en 6.70 horas con un valor de $26.88 \text{ km}^2/\text{h}$.

4.3.4.4. Caudales máximos avenidas

A continuación, se detallan los procedimientos para la determinación del hidrograma de salida de la cuenca total del punto en estudio.

4.3.4.4.1. Hidrograma de escorrentía directa

En (Ven Te Chow y Otros, 1994), la precipitación efectiva es el volumen de agua que no se retiene en la superficie terrestre y que no se infiltra en el suelo y que fluye a través de la superficie de la cuenca, y su distribución en el tiempo, es un componente clave para el estudio de las relaciones lluvia escorrentía.

Para calcular el hidrograma de escorrentía directa de cada sub cuenca y periodo de retorno deseado, se relaciona el hidrograma de precipitación en exceso con el hidrograma unitario instantáneo geomorfológico, mediante la ecuación de convolución discreta.

La ecuación de convolución discreta (Ecuación 4.11) permite el cálculo de la escorrentía directa Q_n dado un exceso de lluvia P_m y el hidrograma unitario U_{n-m+1} (Ven Te Chow y Otros, 1994).

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \quad \text{Ec. 4.11}$$

Donde, M el número total de intervalos de tiempo de la precipitación efectiva, N el número de ecuaciones para Q_n y el número de intervalos de tiempo de escorrentía directa viene dado por $N - M + 1$, en el límite superior de la sumatoria se muestra la condición $n \leq M$, donde los términos de convolución a sumar son iguales a n , y cuando $n > M$ los términos de convolución se limitan a M .

A continuación, se muestra el proceso de construcción del hidrograma de escorrentía directa mediante el método de convolución de tiempo discreto.

- (1) Se establece intervalos tiempo, en el presente estudio el $\Delta t=1$ hora, siendo para estos intervalos $n=1,2,\dots,N$.
- (2) Las alturas de precipitación en exceso se colocan en la parte izquierda de la tabla.

- (3) Las ordenadas del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico se colocan en la parte superior de la tabla.
- (4) Se aplica la ecuación 4.11 y se suman horizontalmente los componentes de las ecuaciones Q_n ($n=1,2,\dots,N$) para obtener la variación del caudal en el tiempo en los intervalos mencionados en el punto (1).

En la tabla expuesta de la siguiente figura se muestran las ecuaciones para la convolución de tiempo discreto y en las gráficas de las figuras 116 – 127 se muestra el hietograma de precipitación y la escorrentía directa resultante.

$n = 1, 2, \dots, N$	
Q_1	$= P_1 U_1$
Q_2	$= P_2 U_1 + P_1 U_2$
Q_3	$= P_3 U_1 + P_2 U_2 + P_1 U_3$
...	
Q_M	$= P_M U_1 + P_{M-1} U_2 + \dots + P_1 U_M$
Q_{M+1}	$= 0 + P_M U_2 + \dots + P_2 U_M + P_1 U_{M+1}$
...	
Q_{N-1}	$= 0 + 0 + \dots + 0 + 0 + \dots + P_M U_{N-M} + P_{M-1} U_{N-M+1}$
Q_N	$= 0 + 0 + \dots + 0 + 0 + \dots + 0 + P_M U_{N-M+1}$

Figura 115 Conjunto de ecuaciones para la convolución de tiempo discreto.

Fuente: (Ven Te Chow y Otros, 1994).

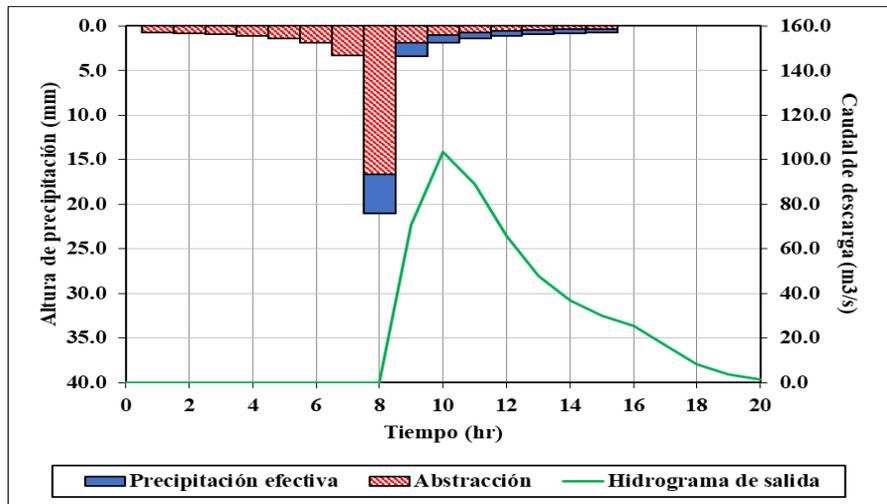


Figura 116 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco – T=25 años.

Fuente: Elaboración propia.

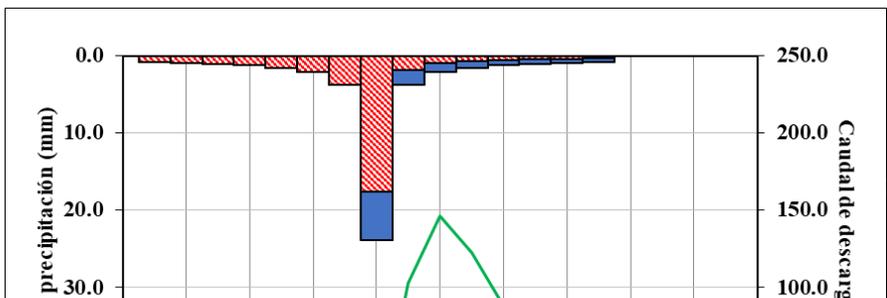


Figura 117 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco –
T=50 años.

Fuente: Elaboración propia.

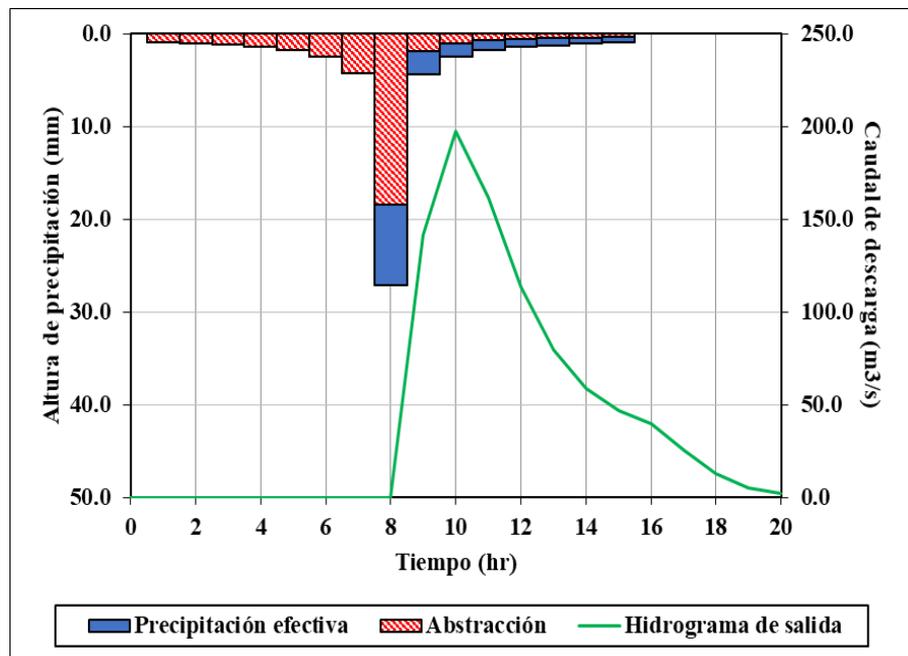


Figura 118 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco –
T=100 años.

Fuente: Elaboración propia.

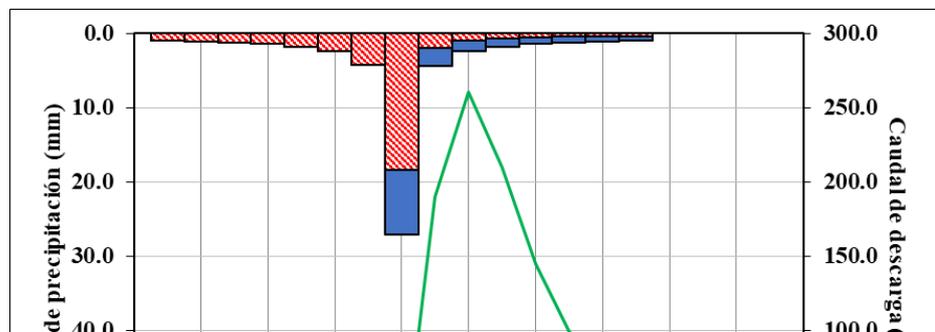


Figura 119 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco – T=200 años.

Fuente: Elaboración propia.

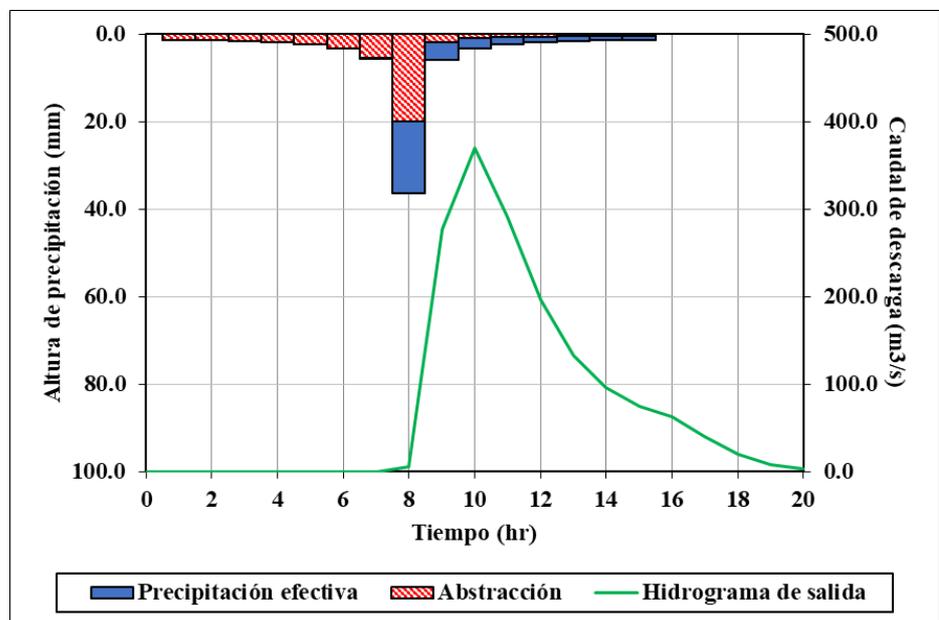


Figura 120 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco – T=500 años.

Fuente: Elaboración propia.

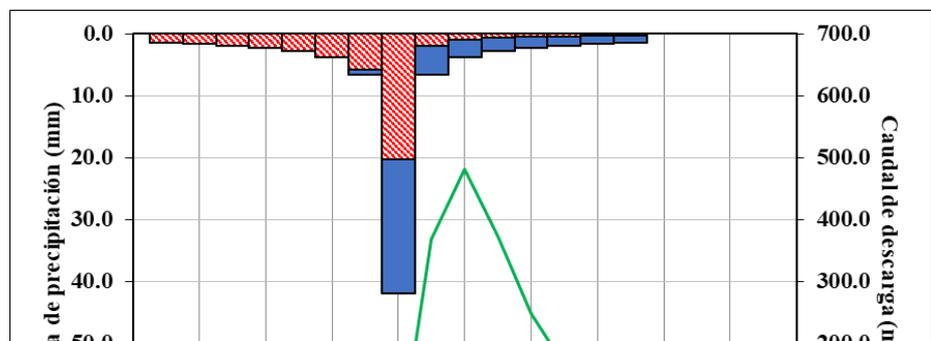


Figura 121 Transformación lluvia escorrentía – Cerro Blanco –
T=1000 años.

Fuente: Elaboración propia.

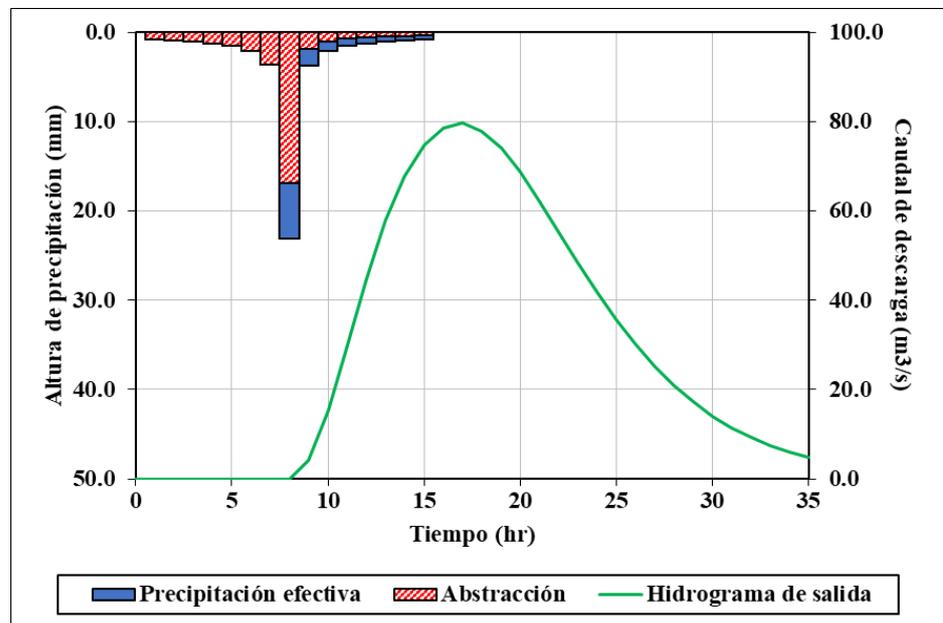


Figura 122 Transformación lluvia escorrentía – Chorobal – T=25 años.

Fuente: Elaboración propia.

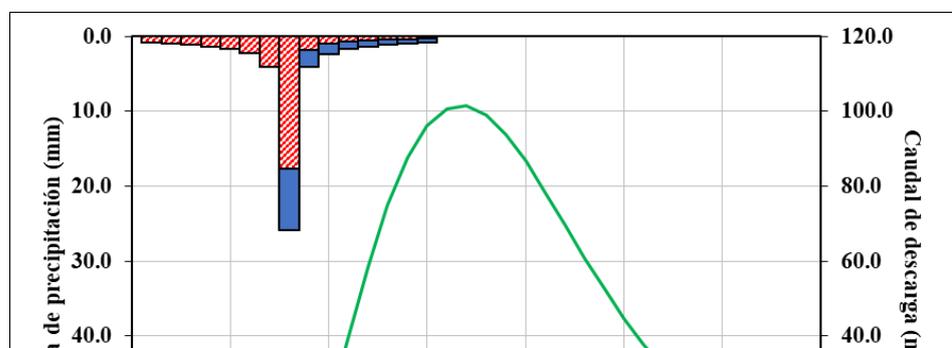


Figura 123 Transformación lluvia esorrentía – Chorobal – T=50 años.

Fuente: Elaboración propia.

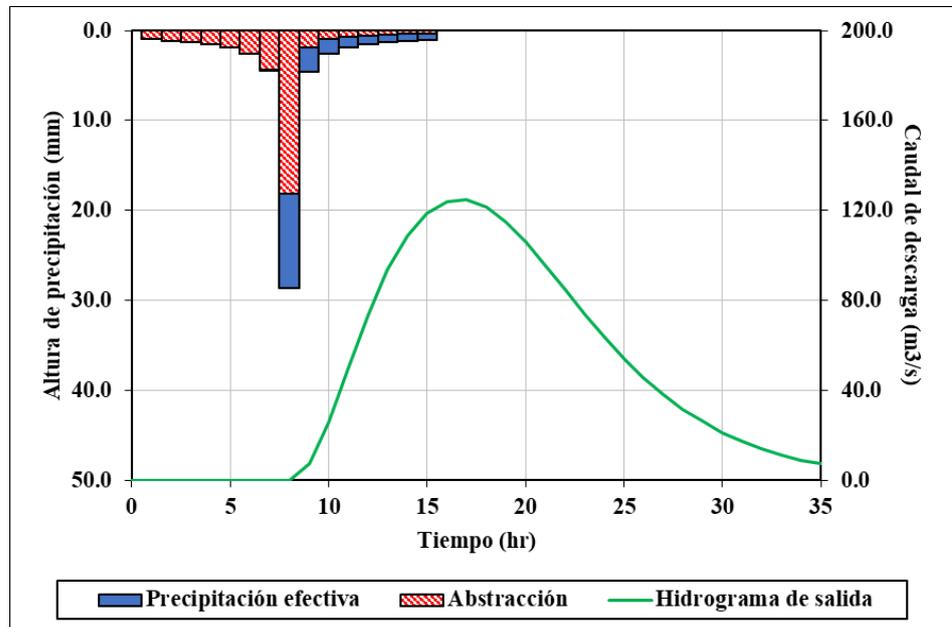


Figura 124 Transformación lluvia esorrentía – Chorobal – T=100 años.

Fuente: Elaboración propia.

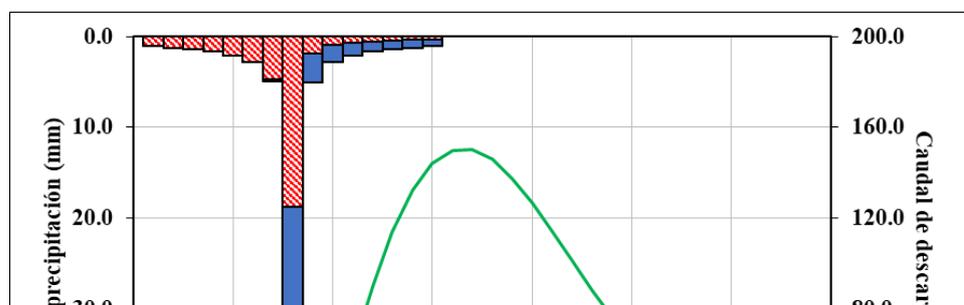


Figura 125 Transformación lluvia esorrentía – Chorobal – T=200 años.

Fuente: Elaboración propia.

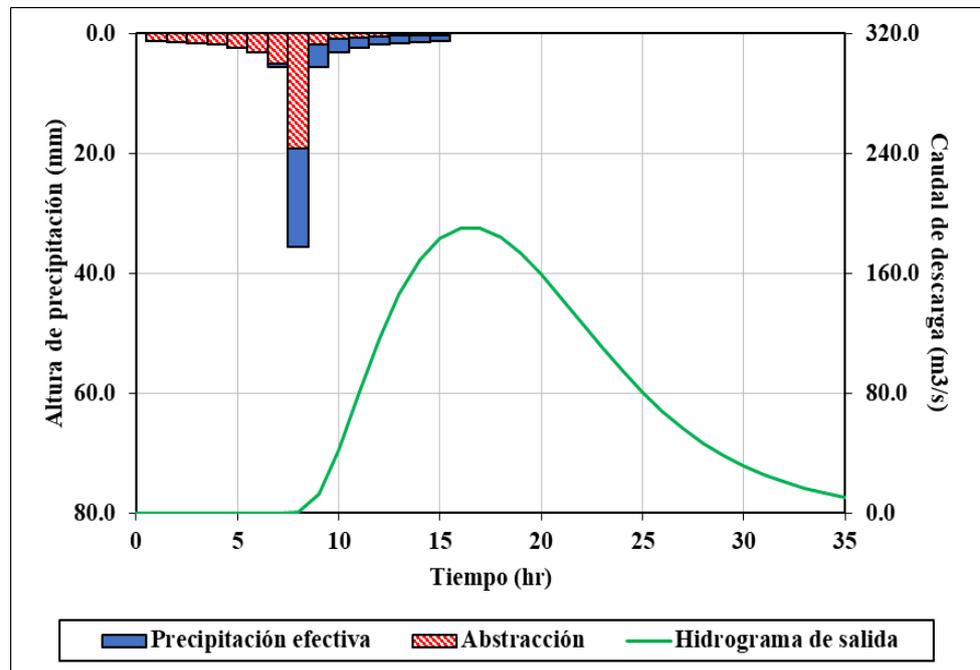


Figura 126 Transformación lluvia esorrentía – Chorobal – T=500 años.

Fuente: Elaboración propia.

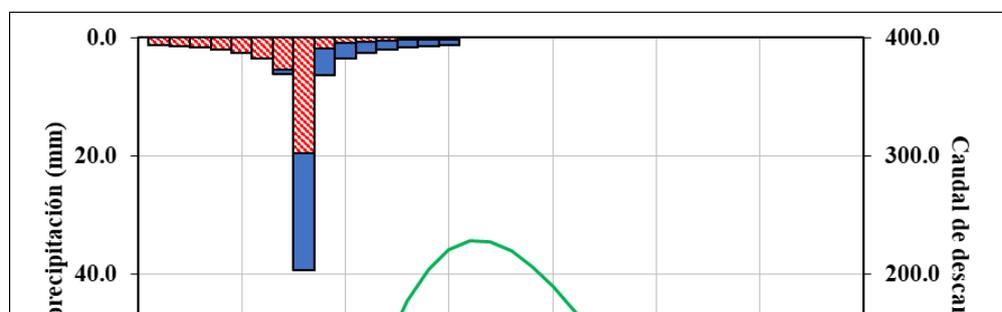


Figura 127 Transformación lluvia esorrentía – Chorobal – T=1000 años.

Fuente: Elaboración propia.

De las gráficas anteriores se extraen los valores de caudal pico (Qp) y el tiempo pico (Tp) para cada sub cuenca y periodo de retorno, mostrando a continuación un resumen en las tablas siguientes.

Tabla 136

Caudales pico para 25, 50 y 100 años de periodo de retorno.

Sub cuenca	25 años		50 años		100 años	
	Qp (m3/s)	Tp (hr)	Qp (m3/s)	Tp (hr)	Qp (m3/s)	Tp (hr)
Cerro Blanco	103.54	10.00	146.31	10.00	197.70	10.00
Chorobal	79.68	17.00	101.50	17.00	124.80	17.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 137

Caudales pico para 200, 500 y 1000 años de periodo de retorno.

Sub cuenca	200 años		500 años		1000 años	
	Qp (m3/s)	Tp (hr)	Qp (m3/s)	Tp (hr)	Qp (m3/s)	Tp (hr)
Cerro Blanco	260.74	10.00	370.14	10.00	481.74	10.00
Chorobal	150.46	17.00	190.22	16.00	227.52	16.00

Fuente: Elaboración propia.

Los hidrogramas de esorrentía directa de ambas sub cuencas se suman para determinar el hidrograma de esorrentía directa del área



total en estudio en la confluencia de los cauces, en las gráficas siguientes se muestra el hidrograma resultante de la superposición.

Figura 128 Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 25 años.

Fuente: Elaboración propia.

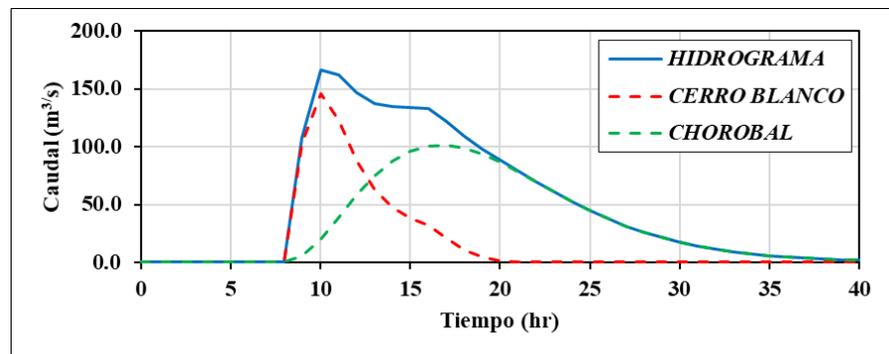


Figura 129 Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 50 años.

Fuente: Elaboración propia.

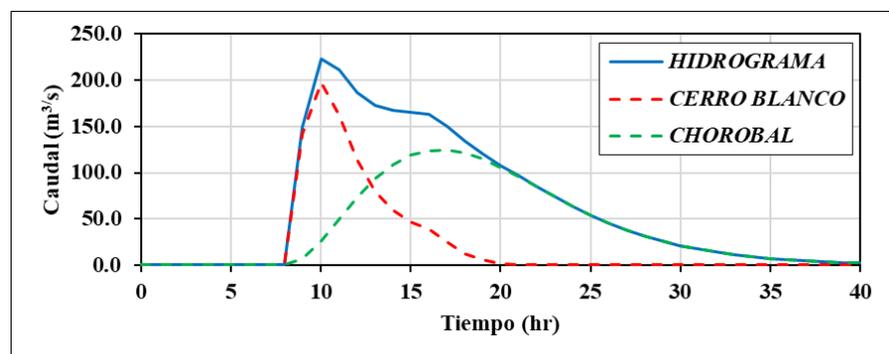


Figura 130 Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 100 años.

Fuente: Elaboración propia.

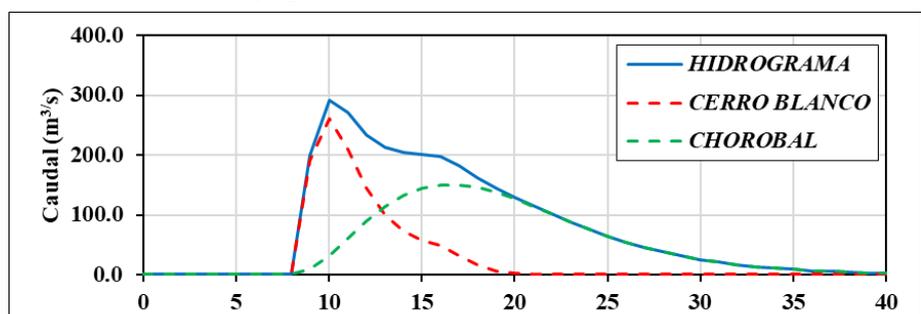


Figura 131 Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 200 años.

Fuente: Elaboración propia.

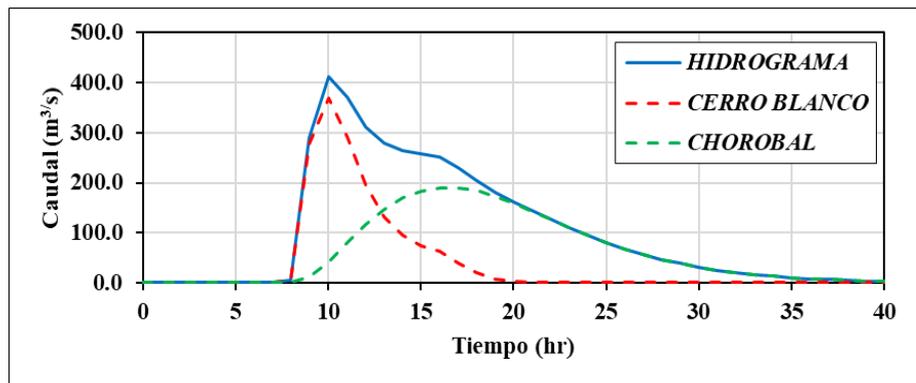


Figura 132 Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 500 años.

Fuente: Elaboración propia.

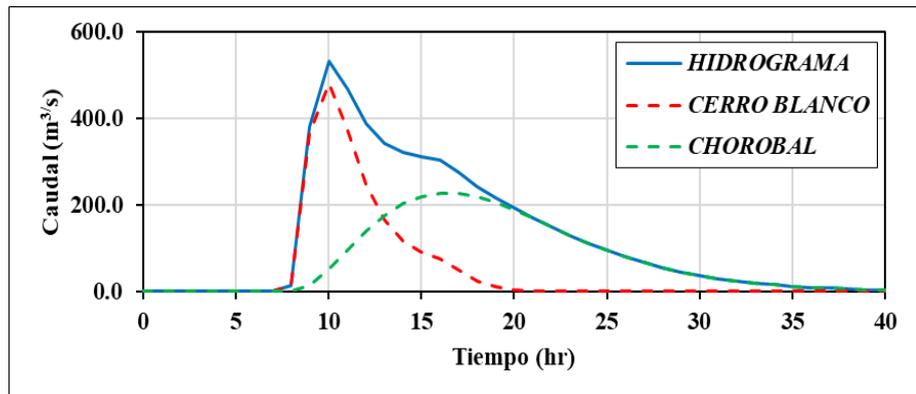


Figura 133 Superposición de hidrogramas de salida – Periodo de retorno 1000 años.

Fuente: Elaboración propia.

De las gráficas se extrae los caudales picos y el tiempo en que se alcanzan estos, resultado de la superposición temporal de los hidrogramas de escorrentía directa de cada sub cuenca y para los

periodos de retorno considerados en el presente estudio, los resultados se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 138

Resumen de resultados de caudales pico por la superposición de hidrogramas.

Periodo de retorno	25yr	50yr	100yr	200yr	500yr	1000yr
Caudal pico	119.22	166.59	223.43	292.68	412.01	533.11
Tiempo Pico	11.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.4.2. Tránsito de avenidas

En la imagen satelital se muestra que existe una longitud de tránsito entre la confluencia de los cauces de las sub cuencas en estudio y el punto en estudio (Estación hidrológica – Acueducto Chorobal) de 1,157.88 metros.



Figura 134 Tramo de tránsito hidrológico - Río Chorobal.

Fuente: Google Earth Pro versión 7.3.3.7699.

Al tener el hidrograma total en la confluencia de los cauces se procede a determinar la variación de este al recorrer la trayectoria hasta el punto en estudio, mediante el método de Muskingum (Ver punto 2.2.4.3.). De la ecuación 2.35, en (Ven Te Chow y Otros, 1994) se describe que, al despejar en función del caudal, asignar

valores de almacenamiento en el tiempo “j” y “j + 1” y simplificar se obtiene:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad \text{Ec. 4.12}$$

Dejando la expresión en función del intervalo de tiempo (I_j y I_{j+1}), y del caudal de ingreso (Q_j) cuyos valores de C_1 , C_2 y C_3 suman el valor de 1, estando las siguientes expresiones en función del almacenamiento por cuña X y el parámetro de almacenamiento K en unidades de tiempo (Ver las ecuaciones 4.13, 4.14 y 4.15).

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad \text{Ec. 4.13}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad \text{Ec. 4.14}$$

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad \text{Ec. 4.15}$$

En (Ven Te Chow y Otros, 1994), el parámetro X se encuentra entre 0 y 0.3 con un valor medio cercano a 0.2, que es el valor tomado para el presente estudio, y el parámetro K es el tiempo de tránsito de una onda decreciente a través del tramo del canal por lo que determina como el cociente entre la longitud de tránsito igual a 1,157.85 metros (Ver figura 136) y la velocidad del cauce de tránsito, que se calcula como se expone en el punto 4.3.4.3.1. ($v = 0.50$ m/s. En la siguiente tabla se muestran los componentes de la ecuación del método de Muskingum.

Tabla 139

Parámetros para el cálculo del tránsito hidrológico – Método de Muskingum.

X	K (hr)	Δt (hr)	C1	C2	C3
0.20	0.13	1.00	0.79	0.87	-0.66

Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento para determinar el hidrograma de salida en el punto en estudio se detalla a continuación (Ver tablas 140 – 145 y gráficas 135 – 140).

- (1) Tiempo expresado en horas.
- (2) Caudal de entrada, producto de la superposición de hidrogramas de salida en el punto de confluencia de los cauces de ambas sub cuencas.
- (3) Es el producto entre el coeficiente C1 y el caudal de entrada (I) en el tiempo (j+1).
- (4) Es el producto entre el coeficiente C2 y el caudal de entrada (I) en el tiempo (j).
- (5) Es el producto entre el coeficiente C3 y el caudal de salida inicial (Q) en el tiempo (j).
- (6) Es la escorrentía directa, siendo la suma de los valores de las columnas (3), (4) y (5) en el tiempo (j).

Tabla 140

Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 25 Años.

Periodo de tránsito (hr)	Escorrentía de entrada (m ³ /s)	C ₁ * I _{j+1}	C ₂ * I _j	C ₁ * Q _j	Escorrentía de salida (m ³ /s)
0	0.00				0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	75.07	59.06	0.00	0.00	59.06
10	118.90	93.53	65.46	-38.89	120.10
11	119.22	93.78	103.68	-79.10	118.36
12	110.65	87.04	103.96	-77.95	113.05
13	105.79	83.22	96.49	-74.45	105.25
14	104.58	82.26	92.25	-69.32	105.19
15	104.57	82.25	91.19	-69.28	104.17
16	104.07	81.87	91.18	-68.60	104.44
18	86.23	67.83	83.91	-64.32	87.42
20	69.94	55.02	67.64	-51.79	70.87
40	1.47	1.15	1.63	-1.27	1.51

Fuente: Elaboración propia.

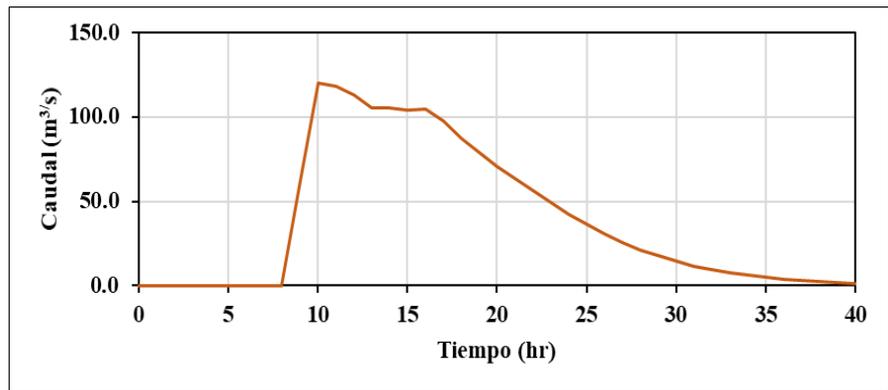


Figura 135 Hidrograma de salida – Periodo de retorno 25 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 141

Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 50 Años.

Periodo de tránsito (hr)	Escorrentía de entrada (m³/s)	$C_1 * I_{j+1}$	$C_2 * I_j$	$C_1 * Q_j$	Escorrentía de salida (m³/s)
0	0.00				0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
9	108.34	85.22	0.00	0.00	85.22
10	166.59	131.05	94.47	-56.13	169.39
11	161.91	127.36	145.26	-111.56	161.07
12	146.47	115.22	141.18	-106.08	150.32
13	137.67	108.30	127.72	-99.00	137.02
14	134.75	106.00	120.05	-90.24	135.80
15	133.91	105.34	117.50	-89.44	133.40
16	132.69	104.38	116.77	-87.85	133.29
18	109.38	86.04	106.69	-81.78	110.96
20	88.34	69.49	85.61	-65.55	89.55
40	1.82	1.44	2.03	-1.58	1.88

Fuente: Elaboración propia.

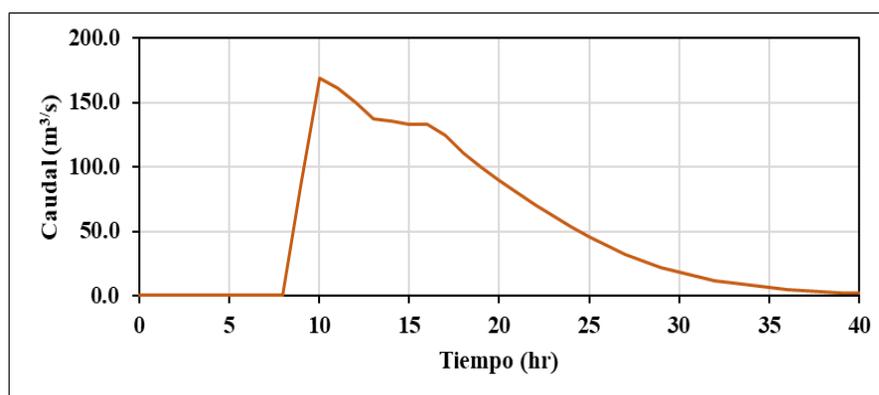


Figura 136 Hidrograma de salida – Periodo de retorno 50 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 142

Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 100 Años.

Periodo de tránsito (hr)	Escorrentía de entrada (m ³ /s)	$C_1 * I_{j+1}$	$C_2 * I_j$	$C_1 * Q_i$	Escorrentía de salida (m ³ /s)
0	0.00				0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.06	0.05	0.00	0.00	0.05
9	148.74	117.00	0.05	-0.03	117.02
10	223.43	175.76	129.70	-77.07	228.38
11	211.55	166.41	194.83	-150.41	210.82
12	187.06	147.15	184.46	-138.85	192.76
13	173.05	136.13	163.11	-126.95	172.29
14	167.78	131.98	150.90	-113.47	169.41
15	165.78	130.41	146.30	-111.57	165.13
16	163.61	128.70	144.56	-108.76	164.50
18	134.15	105.52	131.17	-100.54	136.16
20	107.88	84.86	104.76	-80.22	109.40
40	2.20	1.73	2.45	-1.91	2.27

Fuente: Elaboración propia.

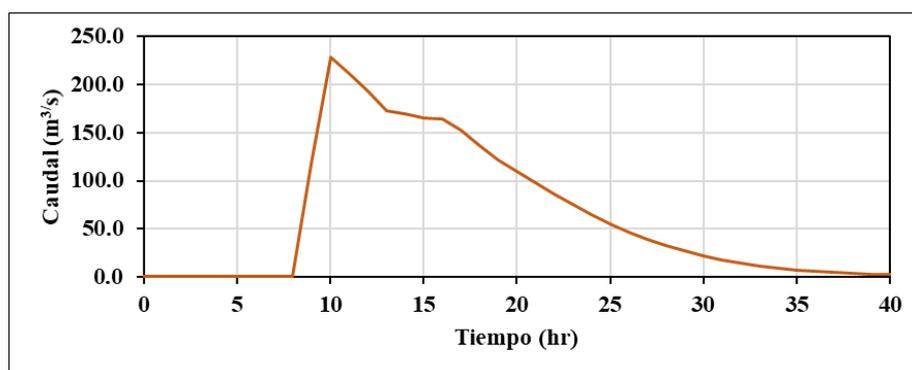


Figura 137 Hidrograma de salida – Periodo de retorno 100 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 143

Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 200 Años.

Periodo de tránsito (hr)	Escorrentía de entrada (m³/s)				Escorrentía de entrada (m³/s)
		$C_1 * I_{j+1}$	$C_2 * I_j$	$C_1 * Q_i$	
0	0.00				0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	1.17	0.92	0.00	0.00	0.92
9	199.20	156.69	1.02	-0.60	157.10
10	292.68	230.23	173.69	-103.47	300.45
11	270.74	212.97	255.21	-197.88	270.30
12	234.40	184.39	236.08	-178.02	242.45
13	213.55	167.98	204.39	-159.67	212.70
14	205.10	161.34	186.21	-140.08	207.46
15	201.51	158.52	178.84	-136.63	200.72
16	198.11	155.84	175.72	-132.20	199.36
18	161.49	127.03	158.34	-121.38	164.00
20	129.32	101.72	125.82	-96.36	131.18
40	2.61	2.05	2.90	-2.26	2.69

Fuente: Elaboración propia.

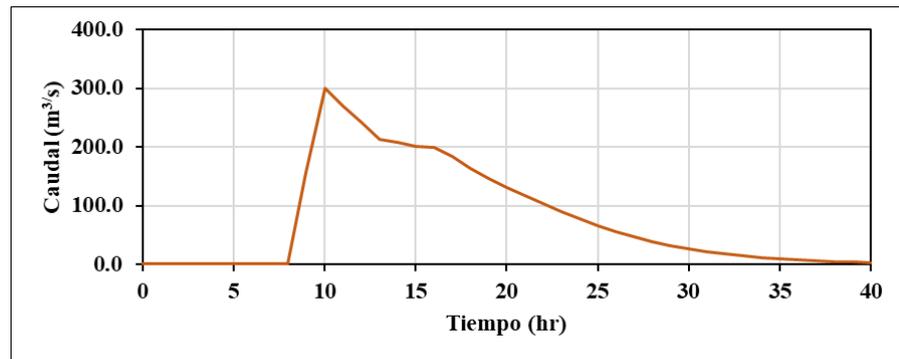


Figura 138 Hidrograma de salida – Periodo de retorno 200 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 144

Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 500 Años.

Periodo de tránsito (hr)	Escorrentía de entrada			Escorrentía de entrada	
	(m³/s)	$C_1 * I_{j+1}$	$C_2 * I_j$	$C_1 * Q_i$	(m³/s)
0	0.00				0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	6.05	4.76	0.00	0.00	4.76
9	288.87	227.23	5.27	-3.13	229.37
10	412.01	324.10	251.89	-151.06	424.92
11	370.50	291.45	359.26	-279.85	370.86
12	312.39	245.74	323.07	-244.24	324.56
13	278.96	219.44	272.40	-213.75	278.08
14	264.57	208.12	243.24	-183.14	268.22
15	257.98	202.93	230.70	-176.65	256.98
16	252.33	198.49	224.95	-169.25	254.19
18	203.96	160.44	200.80	-153.95	207.29
20	162.38	127.73	158.38	-121.32	164.79
40	3.24	2.55	3.60	-2.80	3.34

Fuente: Elaboración propia.

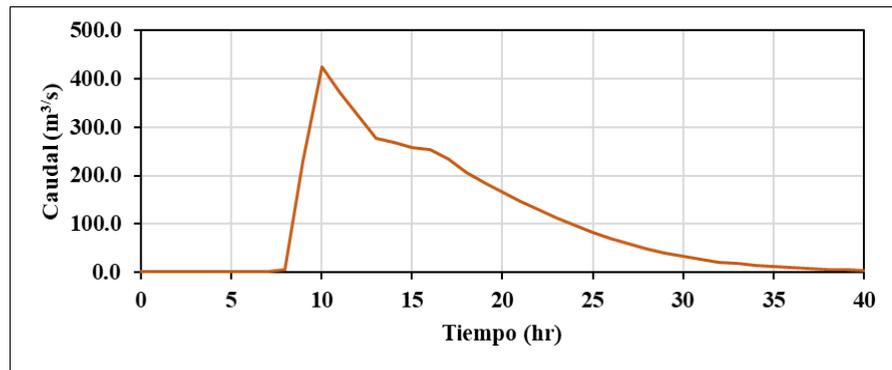


Figura 139 Hidrograma de salida – Periodo de retorno 500 años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 145

Cálculo del tránsito de caudal del tramo del río Chorobal – 1000 Años.

Periodo de tránsito (hr)	Escorrentía de entrada (m³/s)	$C_1 * I_{j+1}$	$C_2 * I_j$	$C_1 * Q_i$	Escorrentía de entrada (m³/s)
0	0.00				0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	13.92	10.95	0.17	-0.10	11.01
9	382.36	300.77	12.13	-7.25	305.65
10	533.11	419.36	333.41	-201.30	551.46
11	469.80	369.56	464.86	-363.19	471.23
12	388.52	305.62	409.66	-310.35	404.93
13	341.72	268.81	338.78	-266.69	340.90
14	320.96	252.47	297.97	-224.52	325.93
15	311.12	244.73	279.87	-214.65	309.94
16	303.12	238.44	271.28	-204.13	305.60
18	243.36	191.43	240.37	-184.33	247.47
20	192.85	151.70	188.48	-144.40	195.78
40	3.81	2.99	4.23	-3.30	3.93

Fuente: Elaboración propia.

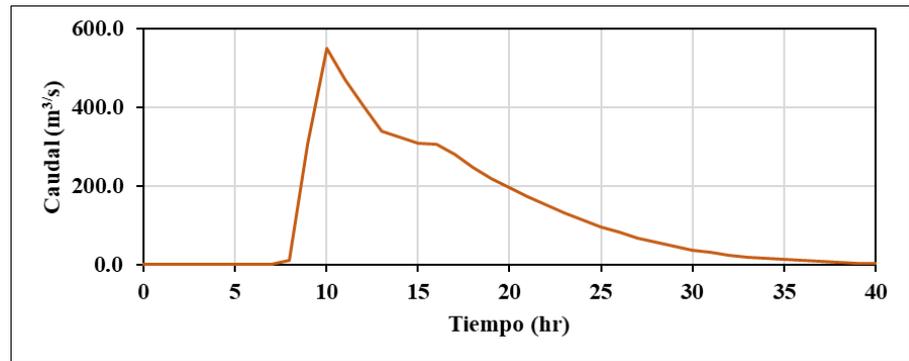


Figura 140 Hidrograma de salida – Periodo de retorno 1000 años.

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas anteriores se determinó el hidrograma de escorrentía directa producto del tránsito en el tramo desde la confluencia de cauces hasta el punto en estudio (Acueducto Chorobal, ver figura 134).

Adicional se considera un flujo base igual a $0.42 \text{ m}^3/\text{s}$, este valor es determina de los valores mínimos de precipitación máxima en 24 horas anual (1998 – 2017) calculando el promedio de estos, (Ver anexo N° 01).

Entonces el caudal de salida se define con el procedimiento mencionado a continuación:

- (1) Periodo de retorno en años.
- (2) Resumen de los caudales de escorrentía directa máximos por cada periodo de retorno.
- (3) Flujo base, descrito en el párrafo anterior.
- (4) Es la suma del caudal de escorrentía directa y el flujo base.

Tabla 146

Caudales pico a la salida del área en estudio (Estación Chorobal).

Periodo de retorno	25yr	50yr	100yr	200yr	500yr	1000yr
Escorrentía directa	120.10	169.39	228.38	300.45	424.92	551.46
Flujo base	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
Caudal de salida	120.52	169.81	228.80	300.87	425.34	551.88

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.5. Análisis de sensibilidad de parámetros, calibración y validación del modelo

4.3.4.5.1. Análisis de sensibilidad de parámetros

En este punto se procede con el análisis de sensibilidad de los parámetros manualmente, modificando parámetros y manteniendo otros, verificando los resultados según la proximidad con respecto al coeficiente de Nash y el error de balance de masas (Ver punto 2.2.6.1.).

Debido a que el modelo (HUIG) se sirve de las relaciones de Horton y Schumm, y que el hidrograma resultante depende de la precipitación en la cuenca, estos son los parámetros elegidos para sustentar la sensibilidad.

De las tablas 42 al 83, se obtienen los valores de las relaciones de Horton y Schumm que dependen de la cantidad de celdas y que a la vez determinan el grado de precisión en la obtención de la cantidad de cauces presentes en el área de cada cuenca, teniendo distintos valores de estas y dando cada una distintos resultados del modelo hidrológico, teniendo un total de 07 cómputos del modelo.

Entonces se procede a determinar el coeficiente de Nash para cada caso, según el siguiente procedimiento:

- (1) Periodo de retorno (T) en años.
- (2) Caudales producto del modelo hidrológico (Q_{sim}).
- (3) Caudales producto del análisis de valores extremos de la estación Chorobal (Q_i).
- (4) Cálculo de la expresión $(Q_{sim,i} - Q_i)^2 = N'$, para cada periodo de retorno.
- (5) Cálculo del numerador $\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2 = N$, de la ecuación 2.39.
- (6) Cálculo de la expresión $(Q_{sim,i} - \text{prom}Q_i)^2 = D'$, para cada periodo de retorno.
- (7) Cálculo del denominador $\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \text{prom}Q_i)^2 = D$, de la ecuación 2.39.
- (8) Se determina el coeficiente de Nash (E).

Tabla 147

Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 6400.

T	Qsim	Qi	N'	N	D'	D	E
25yr	262.72	118.86	20,696		1,368		
50yr	353.11	171.93	32,826		2,852		
100yr	460.34	235.94	50,356		25,804		
200yr	586.42	311.95	75,334	535,995	82,206	851,646	0.3706
500yr	795.86	428.58	134,895		246,170		
1000yr	1,002.02	530.97	221,888		493,246		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 148

Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 3200.

T	Qsim	Qi	N'	N	D'	D	E
25yr	351.84	118.86	54,278		2,718		
50yr	466.18	171.93	86,584		27,714		
100yr	591.75	235.94	126,600		85,289		
200yr	733.98	311.95	178,113	1,150,330	188,598	1,516,514	0.2415
500yr	961.80	428.58	284,319		438,364		
1000yr	1,179.38	530.97	420,437		773,830		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 149

Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 1600.

T	Qsim	Qi	N'	N	D'	D	E
25yr	120.52	118.86	2.74		32,108		
50yr	169.81	171.93	4.51		16,874		
100yr	228.80	235.94	50.92		5,027		
200yr	300.87	311.95	122.74	628.79	1.360	133,389	0.9953
500yr	425.34	428.58	10.48		15,785		
1000yr	551.88	530.97	437.39		63,594		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 150

Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 800.

T	Qsim	Qi	N'	N	D'	D	E
25yr	127.79	118.86	79.81		29,554		
50yr	179.81	171.93	62.10		14,375		
100yr	242.00	235.94	36.78		3,329		
200yr	317.84	311.95	34.65	3,112.18	329.74	148,846	0.9791
500yr	448.48	428.58	396.00		22,134		
1000yr	581.00	530.97	2,502.85		79,126		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 151

Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 400.

T	Qsim	Qi	N'	N	D'	D	E
25yr	117.90	118.86	0.93		33,054		
50yr	166.26	171.93	32.20		17,809		
100yr	224.18	235.94	138.26		5,704		
200yr	295.00	311.95	287.13	705.59	22.09	129,205	0.9945
500yr	417.47	428.58	123.52		13,868		
1000yr	542.09	530.97	123.55		58,748		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 152

Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 200.

T	Qsim	Qi	N'	N	D'	D	E
25yr	124.43	118.86	31.07		30,720		
50yr	175.33	171.93	11.59		15,468		
100yr	236.27	235.94	0.11		4,024		
200yr	310.67	311.95	1.63	1,635.72	120.3	142,519	0.9885
500yr	439.06	428.58	109.80		19,419		
1000yr	569.46	530.97	1,481.52		72,768		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 153

Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 100.

T	Qsim	Qi	N'	N	D'	D	E
25yr	116.40	118.86	6.04		33,600		
50yr	164.32	171.93	57.84		18,328		
100yr	221.79	235.94	200.35	922.26	6,071	127,751	0.9928
200yr	292.10	311.95	393.83		58.76		
500yr	413.81	428.58	218.01		13,021		
1000yr	537.77	530.97	46.19		56,673		

Fuente: Elaboración propia.

Luego se siguen los siguientes pasos para determinar el error de balance de masas:

- (1) Periodo de retorno (T) en años.
- (2) Caudales producto del modelo hidrológico (Qsim).
- (3) Caudales producto del análisis de valores extremos de la estación Chorobal (Qi).
- (4) Cálculo de la expresión $(Q_{sim,i} - Q_i) = N'$, para cada periodo de retorno.
- (5) Cálculo del numerador $\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i) = N$, de la ecuación 2.40.
- (6) Cálculo del denominador $\sum_{i=1}^n (Q_i) = D$, de la ecuación 2.40.
- (7) Se determina el error de balance de masas (m) en porcentaje.

Tabla 154

Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 6400.

T	Qsim	Qi	N'	N	D	m
25yr	262.72	118.86	143.86			
50yr	353.11	171.93	181.18			
100yr	460.34	235.94	224.40	1,662.24	1,798.23	92.44
200yr	586.42	311.95	274.47			
500yr	795.86	428.58	367.28			
1000yr	1,002.02	530.97	471.05			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 155

Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 3200.

T	Qsim	Qi	N'	N	D	m
25yr	351.84	118.86	232.98			
50yr	466.18	171.93	294.25			
100yr	591.75	235.94	355.81			
200yr	733.98	311.95	422.03	2,486.70	1,798.23	138.29
500yr	961.80	428.58	533.22			
1000yr	1,179.38	530.97	648.41			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 156

Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 1600.

T	Qsim	Qi	N'	N	D	m
25yr	120.52	118.86	1.66			
50yr	169.81	171.93	-2.12			
100yr	228.80	235.94	-7.14			
200yr	300.87	311.95	-11.08	-1.01	1,798.23	-0.06
500yr	425.34	428.58	-3.24			
1000yr	551.88	530.97	20.91			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 157

Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 800.

T	Qsim	Qi	N'	N	D	m
25yr	127.79	118.86	8.93			
50yr	179.81	171.93	7.88			
100yr	242.00	235.94	6.06			
200yr	317.84	311.95	5.89	1,798.23	1,798.23	5.49
500yr	448.48	428.58	19.90			
1000yr	581.00	530.97	50.03			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 158

Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 400.

T	Qsim	Qi	N'	N	D	m
25yr	117.90	118.86	-0.96			
50yr	166.26	171.93	-5.67			
100yr	224.18	235.94	-11.76			
200yr	295.00	311.95	-16.95	-35.34	1,798.23	-1.97
500yr	417.47	428.58	-11.11			
1000yr	542.09	530.97	11.12			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 159

Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 200.

T	Qsim	Qi	N'	N	D	m
25yr	124.43	118.86	5.57			
50yr	175.33	171.93	3.40			
100yr	236.27	235.94	0.33			
200yr	310.67	311.95	-1.28	57.00	1,798.23	3.17
500yr	439.06	428.58	10.48			
1000yr	569.46	530.97	38.49			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 160

Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 100.

T	Qsim	Qi	N'	N	D	m
25yr	116.40	118.86	-2.46			
50yr	164.32	171.93	-7.61			
100yr	221.79	235.94	-14.15			
200yr	292.10	311.95	-19.85	-52.03	1,798.23	-2.89
500yr	413.81	428.58	-14.77			
1000yr	537.77	530.97	6.80			

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas 84 y 85 se fijan los valores de las relaciones de Horton y Schumm perteneciendo estos a los valores en relación con el #Celdas = 1600, obteniendo valores considerados óptimos según la teoría en los puntos 2.2.6.1.1. y 2.2.6.1.2.

En este capítulo, se contempla que los datos de precipitación máxima anual de la estación Huacamaranga, se sometieron a un análisis de consistencia (punto 4.3.3.1.), obteniendo una serie libre de saltos y tendencias, luego estas se sometieron a un análisis de valores extremos (punto 4.3.3.2.), logrando valores de precipitación máximos para distintos periodos de retorno.

Entonces, por lo anteriormente expuesto en el párrafo anterior se puede disponer de un octavo caso, el cual contempla que la estación Huacamaranga se le aplique un análisis de valores extremos sin aplicar antes un análisis de consistencia, esto en convolución con el hidrograma unitario producto de los valores de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 1600, obteniendo:

Tabla 161

Cálculo del coeficiente de Nash – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 1600, sin considerar análisis de consistencia en la estación Huacamaranga.

T	Qsim	Qi	N'	N	D'	D	E
25yr	277.49	118.86	25,164		493.42		
50yr	398.79	171.93	51,466		9,818		
100yr	539.68	235.94	92,259		57,589		
200yr	702.72	311.95	152,702	1,045,816	162,422	1,469,028	0.2881
500yr	960.23	428.58	282,651		436,292		
1000yr	1,195.48	530.97	441,575		802,414		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 162

Cálculo del coeficiente de error de balance de masas – Relaciones de Horton y Schumm en relación con el #Celdas = 1600, sin considerar análisis de consistencia en la estación Huacamarcanga.

T	Qsim	Qi	N'	N	D	m
25yr	277.49	118.86	158.63			
50yr	398.79	171.93	226.86			
100yr	539.68	235.94	303.74	2,276.16	1,798.23	126.58
200yr	702.72	311.95	390.77			
500yr	960.23	428.58	531.65			
1000yr	1,195.48	530.97	664.51			

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.5.2. Calibración del modelo

Luego del análisis de sensibilidad del modelo en los casos propuestos, se prosigue a seleccionar cuál de estos tiene una aproximación óptima con respecto a los valores teóricos referenciales de Nash y del error de balance de masas.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de resultados determinados en el punto anterior.

Tabla 163

Resumen del análisis de sensibilidad y aproximación óptima.

#	E	m	1-E≈0.00	 m ≈0.00%
1	0.3706	92.44%	0.6294	92.44%
2	0.2415	138.29%	0.7585	138.29%
3	0.9953	-0.06%	0.0047	0.06%
4	0.9791	5.49%	0.0209	5.49%
5	0.9945	-1.97%	0.0055	1.97%
6	0.9885	3.17%	0.0115	3.17%
7	0.9928	-2.89%	0.0072	2.89%
8	0.2881	126.58%	0.7119	126.58%

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los resultados, se encuentra que en los casos del 3 al 7 los resultados se muestran claramente más próximos a los valores teóricos referenciales de Nash y del error de balance de masas.

Además, como se puede observar en este cuarto capítulo del presente estudio, el desarrollo del modelo hidrológico se realizó con una convolución entre la precipitación, aplicándosele antes los análisis estadísticos (de consistencia y de valores extremos) y el hidrograma unitario, en función de las relaciones de Horton y Shumm, siendo estos representados en el tercer caso, el cual muestra el mejor ajuste para ambos análisis en comparación con los valores producto del análisis de valores extremos del registro de caudales del río Chorobal aforados en la estación con el mismo nombre.

4.3.4.5.3. Validación del modelo

La validación del modelo se realizó según la significación del coeficiente de correlación lineal de Pearson (Ver punto 2.2.6.3.), estos para los 6 registros (para cada periodo de retorno), con un coeficiente de correlación de 95% de nivel de confianza, como se observa en la tabla 164.

El procedimiento para determinar el coeficiente de correlación lineal de Pearson se indica en los siguientes puntos:

- (1) Periodo de retorno (T) en años.
- (2) Caudales producto del análisis de valores extremos de la estación Chorobal (Q_X).
- (3) Caudales producto del modelo hidrológico (Q_Y).
- (4) Promedio de los caudales Q_X (Q_X^*).
- (5) Promedio de los caudales Q_Y (Q_Y^*).
- (6) Desviación estándar de los caudales Q_X (Q_X^*).
- (7) Desviación estándar de los caudales Q_Y (Q_Y^*).
- (8) Se aplica la ecuación 2.42.
- (9) Se aplica la ecuación 2.43.
- (10) Es el producto de los valores entre las columnas (6) y (7), para determinar el componente numerador de la ecuación del coeficiente de correlación de Pearson (Ecuación 2.41).

Tabla 164

Cálculo del coeficiente de correlación de Pearson.

T	Q _x	Q _y	Q _x *	Q _y *	S _x	S _y	Z _x	Z _y	Z _x *Z _y
25yr	118.86	120.52					-1.15	-1.10	1.26
50yr	171.93	169.81					-0.81	-0.79	0.65
100yr	235.94	228.80					-0.41	-0.43	0.18
200yr	311.95	300.87	299.71	306.81	157.06	166.99	0.08	0.01	0.00
500yr	428.58	425.34					0.82	0.77	0.63
1000yr	530.97	551.88					1.47	1.54	2.27

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el resultado de validación del modelo, el coeficiente de correlación calculado $r(x,y)$ igual a 0.832 es mayor que el coeficiente presentado en la tabla 13 $r(v,\alpha)$ con un valor de 0.811 con un 95% de nivel de confianza, por lo que se puede decir los caudales simulados tienen una buena correlación con los caudales producto del análisis de valores extremos de la estación Chorobal.

4.4. Resumen y discusión de resultados

4.4.4. Resultados de los objetivos específicos

4.4.4.1. Relaciones de Horton y Shumm

En los puntos 4.3.2.1.3. Se detalla el desarrollo de las relaciones de Horton y Schumm, del cual se deriva la siguiente tabla.

Tabla 165

Resumen de resultados del análisis para el cálculo de las relaciones de Horton y Schumm en relación del # celdas.

# Celdas	Sub cuencas							
	Cerro blanco				Chorobal			
	R _B	R _L	R _A	L _Ω	R _B	R _L	R _A	L _Ω
6400	4.0515	2.4598	4.7225	15.13	4.4683	2.2925	5.1153	15.46
3200	4.7179	2.8938	5.4522	27.75	3.7643	1.8925	4.2605	7.04
1600	3.9200	2.1667	4.3817	15.13	4.2468	2.5074	4.7687	47.31
800	4.5172	2.4466	5.1123	15.13	4.8737	2.8459	5.5140	47.31
400	3.9435	2.1105	4.3433	15.13	4.3228	2.3855	4.7693	47.31
200	4.5078	2.4021	4.9743	15.13	4.7286	2.5920	5.2046	47.31
100	4.0563	2.1361	4.3725	15.13	4.3305	2.2526	4.6327	47.31

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 27 se muestra gráficamente el área de las sub cuencas y la red de drenaje de cada una según la resolución en cantidad de celdas, observándose que en las gráficas de cantidad de celdas (#) igual a 1600, 800, 400, 200 y 100 mantienen constante el valor de longitud del cauce de mayor orden, siendo estos los de mayor consideración como variables para generar el hidrograma unitario instantáneo geomorfológico (HUIG) y validar el modelo.

En el punto 4.3.4.3.2., se determina que los valores correspondientes al análisis en función de la interfaz de la red de drenaje para el número de celdas igual a 1600 celdas.

4.4.4.2. Tormenta de diseño

En el punto 4.3.4.2. Se especifica el procedimiento para determinar los hietogramas de tormenta de diseño, a partir de los datos de precipitación y sus análisis estadístico (análisis de consistencia y de valores extremos), el posterior cálculo de la precipitación y la infiltración en toda el área de cada sub cuenca, calculo necesario para obtener la precipitación efectiva.

Tabla 166

Resumen de cálculo de la precipitación efectiva.

T	Cerro blanco			Chorobal		
	CN _{III} = 79.89 S = 63.92 Ia = 12.78			CN _{III} = 81.22 S = 58.79 Ia = 11.75		
	Pp	Fa	Pe.	Pp.	Fa	Pe
25	41.32	19.21	9.33	45.43	21.41	12.28
50	47.11	21.66	12.66	50.82	23.46	15.61
100	53.35	23.99	16.57	56.23	25.31	19.17
200	60.39	26.29	21.31	61.89	27.05	23.09
500	71.67	29.41	29.49	70.21	29.30	29.17
1000	82.43	31.86	37.78	77.57	31.04	34.79

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de precipitación efectiva entre ambas sub cuencas son similares, esto debido a que los valores de curva número (condición de lluvia antecedente III), la retención potencial máxima (S) y la abstracción inicial (Ia) toman valores cercanos.

La tormenta de diseño consiste en la distribución temporal de la precipitación total y efectiva, expresado en hietogramas de tormenta de diseño para los distintos periodos de retorno y en ambas sub cuencas como se muestra el procedimiento en el punto 4.3.4.2.1. (Ver tablas del 120 al 131 y graficas de las figuras 102 al 113).

4.4.4.3. Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico

En el punto 4.3.4.3.3. Se construye el hidrograma unitario instantáneo geomorfológico (HUIG), el cual se construye con la función gamma de dos parámetros siendo estos los parámetros de forma y escala.

Estos parámetros de forma y escala se determinaron a partir de las relaciones de Horton y Schumm del área de cada sub cuenca y de la longitud y velocidad del cauce de mayor orden (Ver tabla 167).

Tabla 167

Variables y parámetros para la construcción del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.

Variables / Sub cuencas	R_B	R_L	R_A	L	v	α	K	A
Cerro blanco	3.92	2.17	4.38	15.13	3.00	3.18	0.71	193.89
Chorobal	4.25	2.51	4.77	47.31	2.00	3.21	3.13	317.05

Fuente: Elaboración propia.

Reemplazando estas variables en las ecuaciones 2.37, 2.38 y 2.38, se construye el hidrograma unitario de las sub cuencas en estudio mostrados en la gráfica de la siguiente figura.

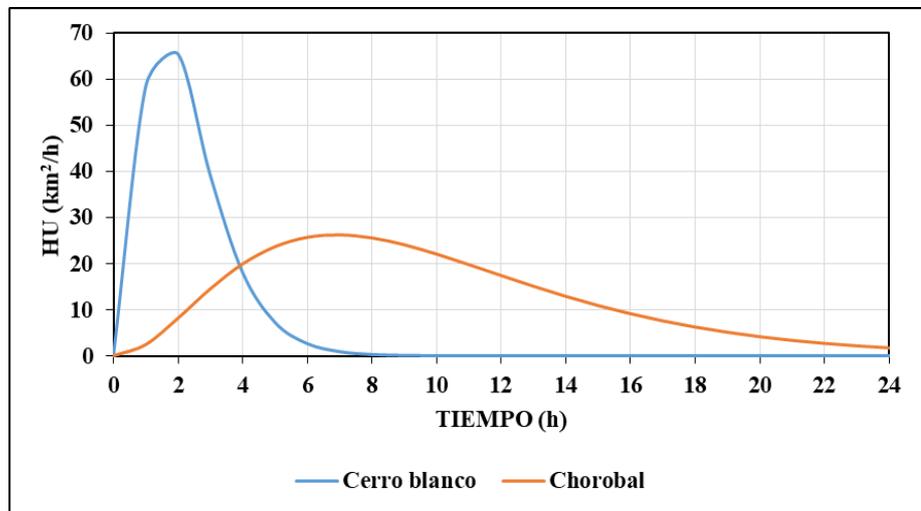


Figura 141 Hidrogramas unitarios instantáneos geomorfológicos de las sub cuencas Cerro blanco y Chorobal.

Fuente: Elaboración propia.

En (Delgadillo Santander & Moreno Barrios), las cuencas con forma ensanchada tienen mayor capacidad de generar crecidas, pues el tiempo de recorrido del agua en ellas es corto, a comparación de las cuencas con forma alargada que tienen un tiempo de viaje de las aguas más largo. En la tabla 168, se muestra una clasificación de la cuenca hidrológica según su forma.

Tabla 168

Valores interpretativos del factor de forma.

Valores aproximados	Forma de la cuenca
> 0.22	Muy alargada
0.22 – 0.30	Alargada
0.30 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.20	Muy ensanchada
> 1.20	Redondeado el desagüe

Fuente: (Delgadillo Santander & Moreno Barrios).

En la tabla 22, se calculó el valor el factor de forma de la sub cuenca Cerro blanco siendo 0.47, clasificándose como una cuenca “ligeramente ensanchada”, mostrando un hidrograma unitario con un pico pronunciado y una descarga del volumen de agua de corta duración, dando una idea previa a la convolución con la precipitación calculada para esta sub cuenca (Ver figura 5).

En la tabla 23, se calculó el valor el factor de forma de la sub cuenca Chorobal siendo 0.36, clasificándose como una cuenca “ligeramente alargada”, mostrando un hidrograma unitario con un desarrollo más largo y una descarga del volumen de agua de duración prolongada, dando una idea previa a la convolución con la precipitación calculada para esta sub cuenca (Ver figura 5).

4.4.4.4. Hidrograma de escorrentía directa

En el punto 4.3.4.4.1. se construyen los hidrogramas de escorrentía directa de ambas sub cuencas producto de la convolución entre el hietograma de precipitación efectiva y el hidrograma unitario instantáneo geomorfológico de cada una de estas, luego superponiendo estos, se obtiene un hidrograma de escorrentía directa, por cada periodo de retorno considerado en el presente estudio, en la confluencia de los cauces como se puede observar en las gráficas de las figuras 130 al 135.

El hidrograma de escorrentía directa se desarrolla en concordancia con el hidrograma unitario de cada sub cuenca, pues antes de la

superposición de estos, se observa que el desarrollo de estos es análogo entre ellos (Ver gráficos en figuras 130 al 135).

4.4.4.5. Hidrograma de escorrentía final

En el punto 4.3.4.4.2. se procede a evaluar la variación del hidrograma de escorrentía directa en la confluencia de cauces, al recorrer una trayectoria igual a 1.16 km hasta el punto en estudio (estación acueducto Chorobal) considerando la adición de un flujo base igual a 0.42 m³/s. El cálculo de esta variación del hidrograma se puede observar en las tablas 140 al 145 y en la graficas de las figuras 137 al 142.

4.4.4.6. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo

En el punto 4.3.4.5. se procede a comparar los caudales resultantes del modelo con los caudales producto del análisis de valores extremos de la estación Chorobal, por el cual se procede inicialmente a la alteración de las variables geomorfológicas y estadísticas, y luego al procedimiento a la calibración del modelo, eligiendo cuál de los casos (en total ocho) arroja resultados óptimos y aproximados a los valores teóricos referenciales de las pruebas a las que se sometió la comparación, siendo el tercer caso con los valores más óptimos (ver tabla 163).

Al elegir el caso optimo, se procede a calcular el coeficiente de correlación lineal de Pearson, obteniendo una buena correlación con un 95% de nivel de confianza entre estos datos (ver punto 4.3.4.5.3.).

4.4.5. Resultado del objetivo general

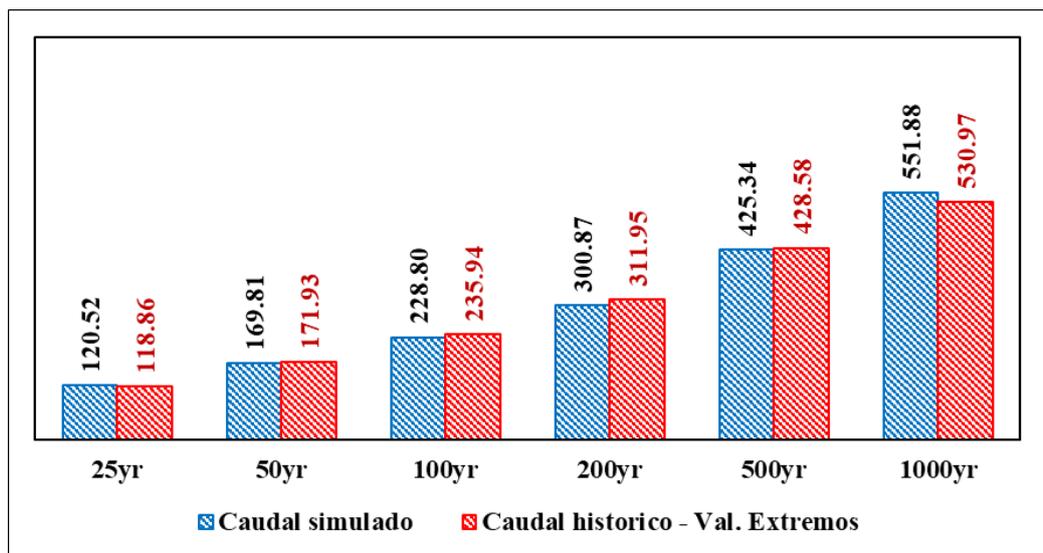
Al llegar a validar la comparación de los caudales resultantes del modelo hidrológico con los caudales producto del análisis de valores extremos de la estación Chorobal, valores de caudal que se consideran reales pues son medidos y tomados del aforo que se realiza diariamente en la sección del cauce del rio, y ya que el modelo hidrológico tiene como una variable principal al hidrograma unitario instantáneo geomorfológico (HUIG) y que a su vez este depende de las relaciones de Horton y Schumm y de las características fisiográficas de las sub cuencas en estudio, se determina la

validez de estas pues es posible aplicar el modelo a cuencas no aforadas dentro del área de estudio en la determinación de eventos extremos y de su empleo como consideración en los proyectos de mitigación y/o protección de la infraestructura como de transporte, obras de riego, planificación urbana, etc.

4.5. Prueba de hipótesis

Las características geomorfológicas y las relaciones de Horton y Schumm, inciden en la construcción del hidrograma de escorrentía directa, a través del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico (HUIG), en las sub cuencas Chorobal y Cerro blanco, en comparación con los caudales producto del análisis de valores extremos de la estación Chorobal, al validar estos mediante el coeficiente de correlación lineal de Pearson con un nivel de significancia del 5% o 95% de nivel de confianza.

Además, se puede reafirmar lo expuesto en el párrafo anterior de manera gráfica, en donde se observa la similitud entre los valores mencionados con diferencias de entre 1% a 4%, como se muestra en los gráficos de la siguiente figura.



(registro de aforo en la estación Chorobal).

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica de la figura 143, esta comparación también se puede realizar mediante la ecuación de regresión lineal y su coeficiente $R^2 \approx 1.00$.

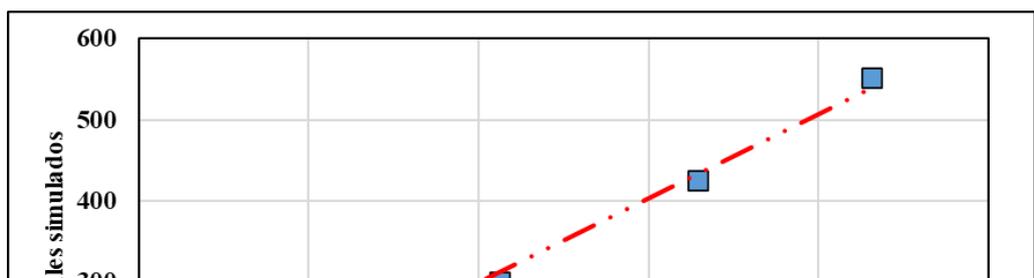


Figura 143 Comparación de caudales mediante la ecuación de regresión lineal.

Fuente: Elaboración propia.

4.6. Aplicación de la metodología de la problemática real

Según el objetivo principal, la metodología aplicada en el presente trabajo es validar las relaciones de Horton y Schumm, a través del análisis de sensibilidad, calibración y validación (expuesto en el punto anterior) del modelo del Hidrograma Unitario Geomorfológico Instantáneo (HUIG).

Para validar el modelo es necesario aplicar los métodos de expuestos en el capítulo II y la aplicación de estos en el área de estudio en el capítulo IV con el objetivo de obtener el grado de validez entre los caudales medidos y/o aforados en relación con los caudales simulados mediante el método del Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico.

Si bien el objetivo principal del presente trabajo es la validación del método, como se menciona en el párrafo anterior, es necesario mencionar la aplicación práctica en la que se puede considerar como alternativa a otros métodos comúnmente aplicados como son el método del Hidrograma Unitario Sintético del Servicio de Conservación de Suelos, método del Hidrograma Unitario de Snyder, etc.

El grado de validez es aceptable (Ver punto 4.3.4.5.3.), el modelo puede ser aplicado a cuencas y sub cuencas internas en el área de estudio. En el siguiente punto se expone un ejemplo de aplicación de una problemática real.

4.6.1. Obras de cruce, encauzamiento y/o protección

Dentro de la sub cuenca Cerro Blanco, se tienen proyectados los trabajos de “Mejoramiento de la Carretera Chao – Buena Vista – El Pie – San Pedro – Chagaganda – Uningambal – Huaynas – Los Toritos”, existiendo tramos de la carretera proyectada que cruzan con ríos y quebradas, los cuales requieren de estimar caudales para el dimensionamiento a nivel hidráulico de estas.

En las tablas siguientes se muestran los tramos de cruce de quebradas más importantes del trazo del proyecto en mención.

Puente proyectado Km. 72+140 – Quebrada Santa Clara

Con un área de 10.50 km², hasta donde su cauce se cruza con el trazo proyectado, en donde se proyecta un puente de 8.00 metros de longitud, por lo que la estimación del caudal es un dato importante como por ejemplo el nivel y/o altura del agua ante un evento de determinado periodo de retorno, el cálculo de socavación general y/o local para el diseño de estructuras de protección, etc.

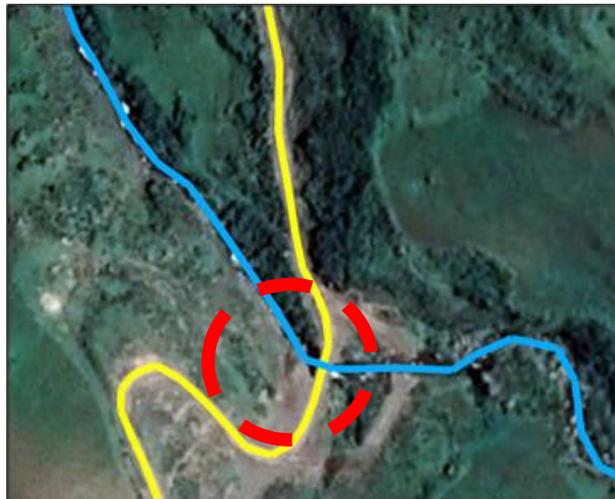


Figura 144 Cruce de la quebrada Santa Clara y el trazo proyectado de la carretera Km. 72+140.

Fuente: Elaboración propia, Mejoramiento de la Carretera Chao – Buena Vista – El Pie – San Pedro – Chagaganda – Uningambal – Huaynas – Los Toritos (Estudios básicos).



Figura 145 Estado actual de la quebrada y la estructura existente.

Fuente: Elaboración propia, Mejoramiento de la Carretera Chao – Buena Vista – El Pie – San Pedro – Chagaganda – Uningambal – Huaynas – Los Toritos (Estudios básicos).

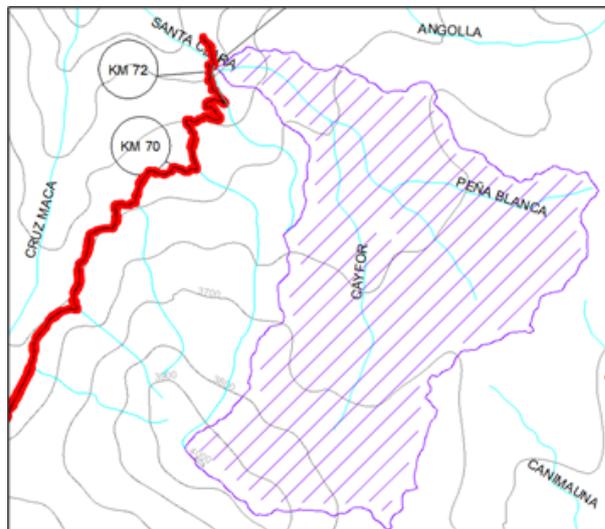


Figura 146 Cuenca y/o área de drenaje en el cruce entre el trazo proyectado y la quebrada Santa Clara.

Fuente: Elaboración propia, Mejoramiento de la Carretera Chao – Buena Vista – El Pie – San Pedro – Chagaganda – Uningambal – Huaynas – Los Toritos (Estudios básicos).

Badén proyectado Km. 30+660 – Quebrada Purzulate

Con un área de 56.62 km², hasta donde su cauce se cruza con el trazo proyectado, en este tramo se proyecta un badén de 60.00 metros de longitud, la estimación del caudal ante eventos extremos es un dato importante para el cálculo de socavación general lo que a su vez permite calcular de la profundidad de cimentación con un cierto nivel de seguridad, manteniendo la integridad de la estructura.



Figura 147 Cruce de la quebrada Purzulate y el trazo proyectado de la carretera Km. 30+660.

Fuente: Elaboración propia, Mejoramiento de la Carretera Chao – Buena Vista – El Pie – San Pedro – Chagaganda – Uningambal – Huaynas – Los Toritos (Estudios básicos).



Figura 148 Estado actual de la quebrada y la estructura existente.

Fuente: Elaboración propia, Mejoramiento de la Carretera Chao – Buena Vista – El Pie – San Pedro – Chagaganda – Uningambal – Huaynas – Los Toritos (Estudios básicos).

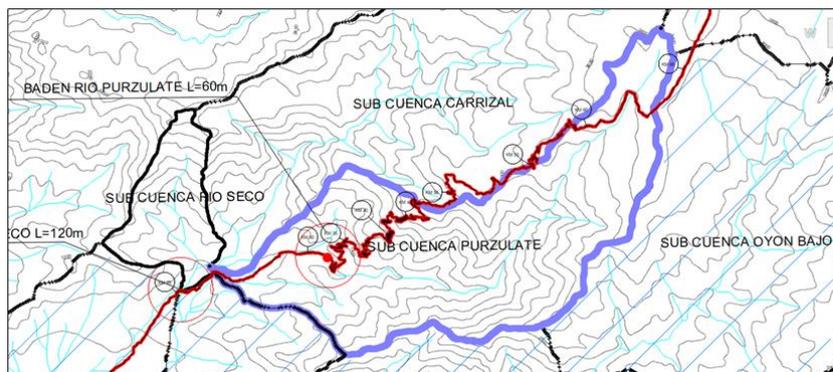


Figura 149 Cuenca y/o área de drenaje en el cruce entre el trazo proyectado y la quebrada Purzulate.

Fuente: Elaboración propia, Mejoramiento de la Carretera Chao – Buena Vista – El Pie – San Pedro – Chagaganda – Uningambal – Huaynas – Los Toritos (Estudios básicos).

Badén proyectado Km. 25+200 – Río Seco

Con un área de 114.96 km², hasta donde su cauce se cruza con el trazo proyectado, en este tramo una estructura de cruce (puente o badén) de 120.0

metros de longitud aproximadamente, la estimación del caudal ante eventos extremos es un dato importante para el cálculo de socavación general y local lo que a su vez permite calcular de la profundidad de cimentación con un cierto nivel de seguridad, manteniendo la integridad de la estructura.



Figura 150 Cruce de la quebrada Río Seco y el trazo proyectado de la carretera Km. 25+200.

Fuente: Elaboración propia, Mejoramiento de la Carretera Chao – Buena Vista – El Pie – San Pedro – Chagaganda – Uningambal – Huaynas – Los Toritos (Estudios básicos).



Figura 151 Estado actual de la quebrada y la estructura existente.

Fuente: Elaboración propia, Mejoramiento de la Carretera Chao – Buena Vista – El Pie – San Pedro – Chagaganda – Uningambal – Huaynas – Los Toritos (Estudios básicos).



Figura 152 Cuenca y/o área de drenaje en el cruce entre el trazo proyectado y la quebrada Río Seco.

Fuente: Elaboración propia, Mejoramiento de la Carretera Chao – Buena Vista – El Pie – San Pedro – Chagaganda – Uningambal – Huaynas – Los Toritos (Estudios básicos).

4.6.2. Cálculo hidráulico de estructuras

El diseño de estructuras hidráulicas que se proyectan en un cauce natural de forma longitudinal y/o transversal a este, siendo el análisis hidráulico fundamental para el dimensionamiento y posterior diseño, en el punto anterior se mencionan a estructuras viales como son puentes y/o badenes que inciden en el comportamiento del cauce natural cuando estas son colocadas tanto aguas arriba como aguas abajo.

A continuación, se describe de manera resumida sobre el análisis hidráulico de estas estructuras.

1. Análisis hidrológico, el presente estudio describe el cálculo para la determinación de avenidas máximas, partiendo desde datos de precipitación y la transformación de esta en escorrentía, los cuales son validados y luego propuestos para el cálculo de áreas de drenaje internas con punto de desagüe en algún tramo de un trazo proyectado como obra lineal, obteniendo un caudal de diseño.
2. Cálculo de socavación, en el diseño de puentes y badenes se tiene en cuenta el dimensionamiento de la cimentación que soporta la estructura donde es importante calcular la profundidad en que esta se asentará, por

lo que es necesario el cálculo de la profundidad de socavación provocado por un caudal extremo de cierto periodo de retorno.

La profundidad de socavación se analiza tanto de manera general, que es la que se genera a lo largo del cauce, y el análisis local, que en especial los puentes se generan puntualmente en los estribos y/o pilas que pueden ser parte de la estructura de este.

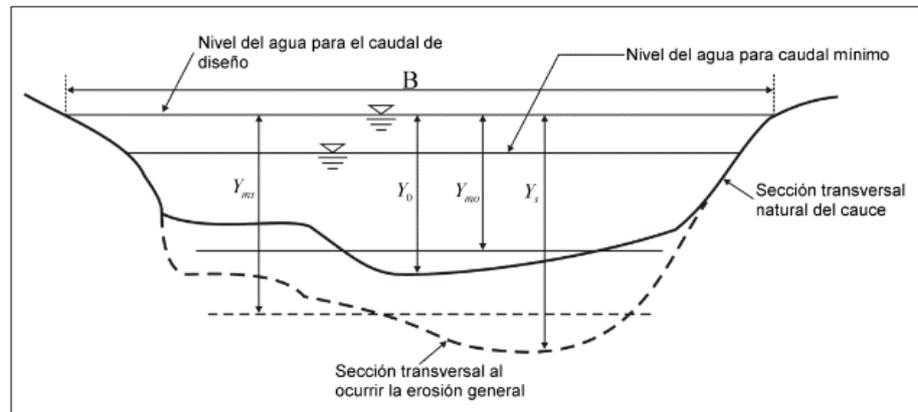


Figura 153 Parámetros de la socavación general y parámetros en una sección transversal del cauce natural.

Fuente: (Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte - República de Colombia, 2009).

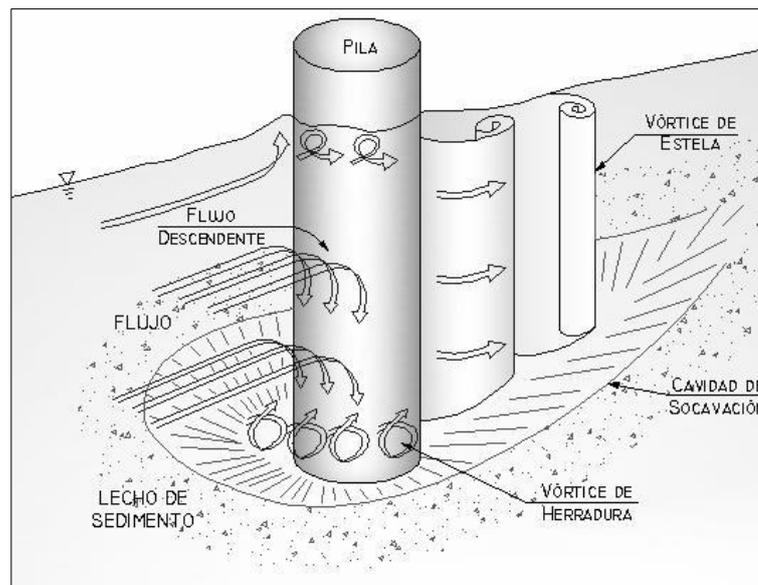


Figura 154 Efectos del flujo en las pilas y socavación local.

Fuente: (Civilgeeks, s.f.)

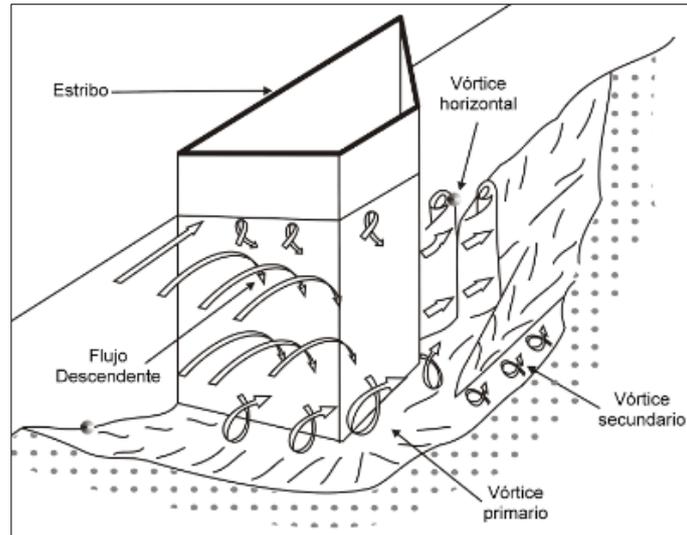


Figura 155 Patrones de flujo en un estribo.

Fuente: (Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte - República de Colombia, 2009).

3. Análisis hidráulico, al instalarse estructuras en el cauce natural estas alteran el comportamiento del flujo, y este debe ser considerado en el diseño de las estructuras para garantizar su servicio y conservación.

En el caso de puentes se analizan secciones del cauce cercanas para la predicción precisa de pérdidas de energía por expansión y contracción a través del puente aguas arriba y aguas abajo.

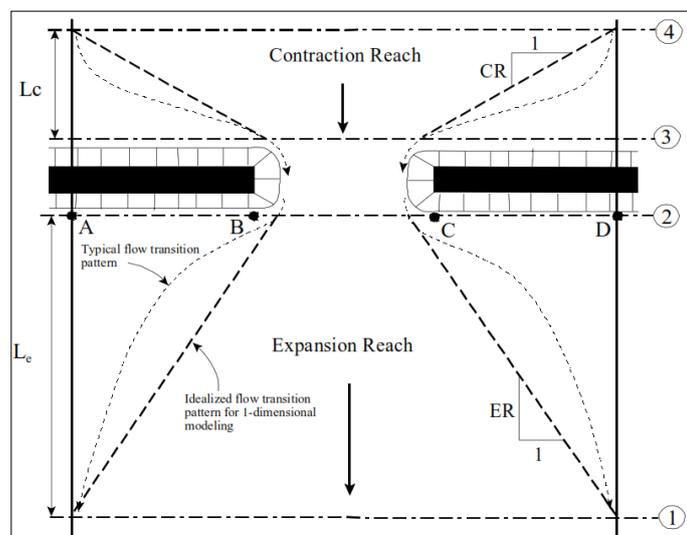


Figura 156 Secciones transversales en el análisis de un puente.

Fuente: (U.S. Army Corps of Engineers, 2010).

También se considera la clase del flujo, si este se presenta por debajo del tablero del puente, siendo considerado el cómo de canal abierto y que depende del régimen de flujo (sub crítico, mixto o supercrítico), si el flujo llega al tablero y/o lo sobrepasa este se considera como un flujo tipo compuerta y/o a presión y si el puente es totalmente sumergido se considera el comportamiento como flujo a presión y vertedero.

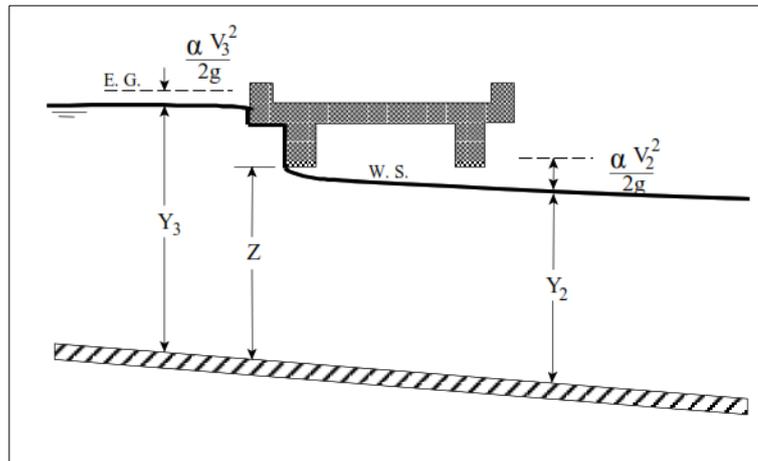


Figura 157 Flujo a presión tipo compuerta.

Fuente: (U.S. Army Corps of Engineers, 2010).

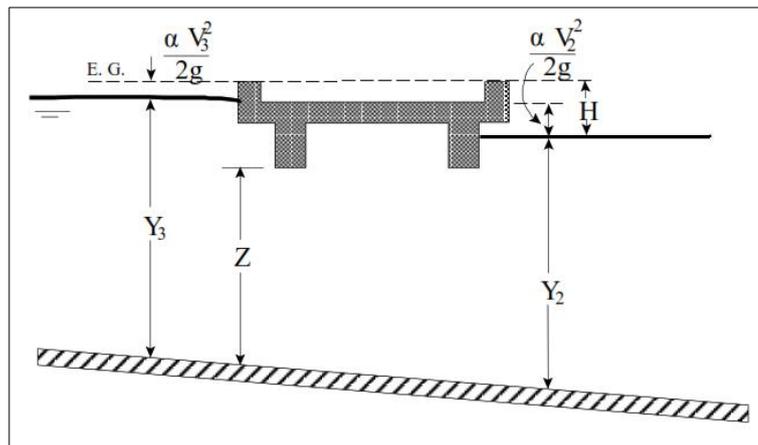


Figura 158 Flujo a presión totalmente sumergido.

Fuente: (U.S. Army Corps of Engineers, 2010).

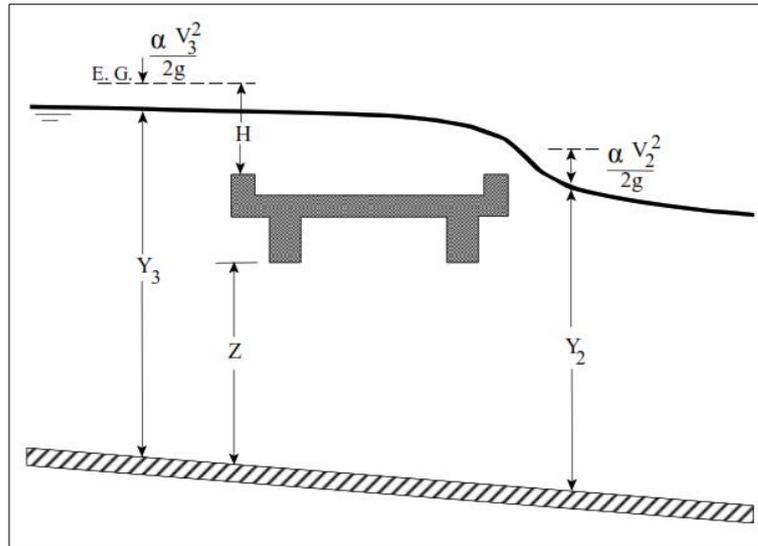


Figura 159 Flujo a presión en combinación con flujo tipo vertedero en la parte superior.

Fuente: (U.S. Army Corps of Engineers, 2010).

En el caso de un bandén, el análisis y diseño se realiza asumiendo un flujo uniforme utilizando la expresión de Manning para el dimensionamiento.

$$Q = A \frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

Ec. 4.16

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Las características geomorfológicas se relacionan directamente con el comportamiento de las sub cuencas Cerro blanco y Chorobal, ante los eventos de crecidas máximas, influyendo de manera directa en la forma del hidrograma, como respuesta ante eventos extremos y su aplicación a áreas de drenaje internos para el cálculo de caudales máximos en el diseño de obras de cruce de obras lineales a proyectarse.
2. Las funciones que describen la forma del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico de las sub cuencas Cerro blanco y Chorobal y que representan la respuesta ante una precipitación uniforme de 1.00 mm son como se muestra respectivamente:

$$HUIG = \frac{t^{2.18} e^{-\frac{t}{0.68}}}{0.68^{3.18} \Gamma(3.18)} 193.87 \quad \text{Ec. 4.17}$$

$$HUIG = \frac{t^{2.21} e^{-\frac{t}{2.95}}}{2.95^{3.21} \Gamma(3.21)} 317.05 \quad \text{Ec. 4.18}$$

3. El modelo hidrológico del Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico genera crecidas máximas en la cuenca del río Chorobal, en el tramo de la estación de aforo “Acueducto Chorobal”, obteniendo caudales máximos de 120.52, 169.81, 228.80, 300.87, 425.34 y 551.88 m³/s en comparación con el análisis de valores extremos de caudal histórico con caudales de 118.86, 171.93, 235.94, 311.95, 428.58 y 530.97 m³/s para períodos de retorno de 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente, cuyo proceso de validación del modelo obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson r(x,y) de 0.832, que según la tabla 13 indica un modelamiento válido para un 95% de nivel de confianza.

En la tabla 13 se muestran valores de 98% y 99% de nivel de confianza, los cuales tienen un valor crítico de r(v,α) igual a 0.882 y 0.917 respectivamente, para los cuales el modelo ya no es válido, esto se debe a que el tamaño de las muestras es de solo 6, aun así, con una validez del 95% de nivel de confianza o 5% de nivel de significancia el modelo es considerado valido.

4. Al concluir con la valides del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico en el presente estudio, se sugiere tomar en cuenta para evaluar y/o consignar el método como una alternativa viable para la generación de crecidas máximas en cuencas hidrográficas del país.

Sin embargo, se podría afirmar que el modelo se puede aplicar en el análisis de cuencas cuya área no requiera de una sub división, esto debido a que en un área de drenaje de transición (cuenca media) el cauce de mayor no podría definirse y estaría limitado por el cauce que conecta un área drenante en la parte alta y otra en la parte baja, por lo que se plantea la duda de aplicarlo en cuencas de gran extensión (macrocuencas).

5. En el punto 4.6, se exponen algunas aplicaciones del modelo, entonces la validación de este y su consideración en el cálculo de caudales en cuencas sin información, puede formar parte de una metodología de diseño de estructuras con cierta seguridad.

BIBLIOGRAFÍA

Aparicio Mijares, F. J. (2012). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México D.F.: Limusa S.A.

- Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Generación del mapa temático de curva número (CN)*. Obtenido de www.ana.gob.pe.
- Cabrera, J. (2011). <http://www.imefen.uni.edu.pe>. Obtenido de <http://www.imefen.uni.edu.pe>: http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Cachuán Dávila, J. (2017). *Modelo hidrológico para la generación de crecidas máximas empleando el hidrograma unitario instantáneo geomorfológico en la sub cuenca del río Shullcas*. Huancayo, Perú: Universidad nacional del centro del Perú, Facultad de Ingeniería Civil.
- Cahuana Andía, A., & Yugar Morales, W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233*. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Civil.
- Campos Aranda, D. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis de Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis de Potosí.
- Campos Aranda, D. F. (1987). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Potosí - México: Universidad Autónoma San Luis Potosí.
- Carrasco Días, S. (2005). *Metodología de la investigación científica*. Lima: San Marcos.
- Ccanto, D. (2010). *Metodología de la investigación científica en Ingeniería Civil*. Lima. Civilgeeks. (s.f.). <https://civilgeeks.com/2012/04/15/erosion-el-pilares-y-estribos-de-puentes-conferencia/>.
- De Pedraza Gilzans, J. (1996). *Geomorfología Principios, métodos y aplicaciones*. Madrid: Rueda S.L.
- Delgadillo Santander, A., & Moreno Barrios, A. (s.f.). *Morfometría de cuencas*. Lima.
- EasyFit Technologies MathWave. (2015). *EasyFit Professional*. MathWave Technologies.
- Echeverri Vélez, C. A. (Setiembre de 2007). ESTUDIO DE LAS CRECIENTES EN LAS CUENCAS DE LA COSTA DEL ESTADO DE CHIAPAS. *ESTUDIO DE LAS CRECIENTES EN LAS CUENCAS DE LA COSTA DEL ESTADO DE CHIAPAS*. México D.F., México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- García-Bartual, R. (1989). ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA SOBRE LA BASE DE LA TEORÍA DEL HIDROGRAMA UNITARIO GEOMORFOLÓGICO. *Cuaternario y Geomorfología*, 1-7.
- Gaspari, F. J., & otros. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. En F. Gaspari, & otros, *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas* (pág. 48). Buenos Aires, Argentina: Curso de manejo de cuencas hidrográficas Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales Universidad Nacional de La Plata.

- <https://www.uv.es/meliajl/Docencia/Tablas/TablaR.PDF>. (s.f.). Obtenido de <https://www.uv.es/meliajl/Docencia/Tablas/TablaR.PDF>.
- Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte - República de Colombia. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*.
- JIMÉNEZ, P. S. (2011). *MODELACIÓN DE LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA EN LA CUENCA DEL RÍO MALA, MEDIANTE EL MODELO PRECAUD v.1*. LIMA: UNALM.
- López, Ángel;. (5 de Diciembre de 2013). <http://cuatrageografosyundestino.blogspot.com>. Obtenido de <http://cuatrageografosyundestino.blogspot.com>: http://cuatrageografosyundestino.blogspot.com/2013/12/introduccion-los-riesgos-hidrologicos-i_5.html
- Morad, M., & Triviño Pérez, A. (2001). SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y MODELIZACIONES HIDROLÓGICAS: UNA APROXIMACIÓN A LAS VENTAJAS Y DIFICULTADES DE SU APLICACIÓN. *Boletín de la A.G.E. N° 31*, 23-46.
- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). *Global Water Partnership*. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf
- Ramos Taípe, C. L., Apaella Nalvarte, R., & Ochoa Acuña, R. (2010). *ESTUDIO DE MAXIMAS AVENIDAS EN LAS CUENCAS DE LA VERTIENTE DEL PACÍFICO*. Lima: MINISTERIO DE AGRICULTURA - AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA.
- Roncal Muñante, A. (2008). *Estudio de Hidrología y Drenaje - Elaboración del expediente técnico para la obra: "Mejoramiento de la carretera Virú - Huacapongo - Provincia de Virú - La Libertad"*. Trujillo - Perú: Gobierno Regional La Libertad.
- Sau Soto, N. (s/f). *Estudio topohidráulico e hidrológico para el cruce del km .0 + 20 sobre el río Altar estado de Sonora, México*. Sonora - México.
- SENAMHI;. (- de - de -). www.senamhi.gob.pe. Obtenido de www.senamhi.gob.pe: www.senamhi.gob.pe
- U.S. Army Corps of Engineers. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual*. Washington, DC: Arlen D. Feldman.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2010). *River Analysis System HEC-RAS - Hydraulic Reference Manual*. Davis CA.
- Ven Te Chow y Otros. (1994). *Hidrología Aplicada*. Illinois: Universidad de Illinois.
- Vikrant, J., & Rajiv, S. (2003). Derivation of Unit Hydrograph from GIUH - Analisis for a Himalayan River. *Water Resources Management* 17, 355-375.
- Villón Bejar, M. (2002). *Hidrología*. Lima: MaxSoft.
- Villón Béjar, M. (2005). *Hidrología Estadística*. Lima: MaxSoft.

Villón Béjar, M. (2012). *Hidroesta*. Cartago - Costa Rica: MaxSoft.

wikipedia. (31 de Octubre de 2013). *www.wikipedia.org*. Obtenido de *www.wikipedia.org*:
<https://es.wikipedia.org/wiki/Geomorfolog%C3%ADa>

Wikipedia. (s.f.). *Cuenca hidrográfica*. Obtenido de
https://es.wikipedia.org/wiki/Cuenca_del_Amazonas

wikipedia. (S/F). *www.wikipedia.org*. Obtenido de *www.wikipedia.org*:
[https://es.wikipedia.org/wiki/Avenida_\(hidrolog%C3%ADa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Avenida_(hidrolog%C3%ADa))

ANEXOS

Anexo 1. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Julcán.

DATOS DE ESTACION		LOCALIZACION POLITICA												
CODIGO :	154101	DEPARTAMENTO :										LA LIBERTAD		
NOMBRE :	JULCAN	PROVINCIA :										JULCAN		
TIPO DE ESTACION :	CONVENCIONAL	DISTRITO :										JULCAN		
SUB-TIPO DE ESTACION :	METEOROLOGICA	UBICACION ADMINISTRATIVA												
OPERACION		AAA :												
INSTITUCION :	SENAMHI	VERTIENTE :												
AÑO DE ALTA :		CUENCA HIDROGRAFICA :												
AÑO DE BAJA :		UBICACION GEOGRAFICA												
ESTADO :	FUNCIONANDO	LATITUD :										8° 2' 32.23"		
		LONGITUD :										78° 29' 9.85"		
		ALTURA :												3385.00

AÑO \ MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp. Max
1971	8.90	28.30	32.10	8.20	7.40	4.20	4.70	9.60	9.20	8.30	7.30	8.40	32.10
1972	12.40	11.30	19.20	12.30	11.50	4.70	3.20	9.20	7.30	7.20	9.50	15.70	19.20
1973	38.30	9.80	16.20	29.50	23.10	7.30	11.70	4.70	8.50	13.50	12.80	9.60	38.30
1974	13.40	11.40	24.70	12.80	5.40	12.70	6.40	13.40	12.40	11.20	15.20	11.50	24.70
1975	18.80	27.80	11.20	17.80		0.00	4.20	18.70	19.70	25.70	13.50	10.20	27.80
1976	23.00	13.40	33.00	13.70	5.40	6.90	0.00	9.50	0.40	0.00	4.50	9.50	33.00
1977	14.70			19.20	4.20	0.00	0.00	0.00	0.00	6.20	14.00	36.80	36.80
1978	15.00	14.70	21.40	15.30	7.20	3.40	1.30	0.00	15.60	7.40	18.80	11.00	21.40
1979	26.10	16.00	53.60	0.00	3.40	3.50	0.00	12.20	12.30	0.00	3.00	4.70	53.60
1980	11.30	8.20	35.80	7.20	2.50	0.00	0.00	2.00	0.00	25.00	28.20	25.50	35.80
1981	39.90	26.10	30.50	10.20	18.20	10.50	0.00	10.50	2.20	15.20	10.20	16.70	39.90
1982	5.60	3.20	22.00	14.70	11.30	0.00	6.10	7.00	0.01	11.60	16.50	19.70	22.00
1983	21.50	30.20	19.50	19.80	0.00	0.00	0.00	0.01	24.60	31.70	16.00	21.40	31.70
1984	20.80	26.50											26.50
1985	2.20	21.20	13.60	0.00	0.00	3.00	0.00	0.30	8.60	11.10	0.01	19.20	21.20
1986	30.50	13.80	16.40	12.00	2.10	0.00	0.00	4.80	27.50	9.10	8.20	22.40	30.50
1987	24.60	13.50	32.30	22.10	3.20	4.00	4.20	0.01	4.50	5.10	15.90	10.20	32.30
1988	30.60	15.40	11.20	7.50	9.10	7.40	0.00	9.30	8.20	24.70	11.90	7.30	30.60
1989	19.00	25.90	18.50	6.50	3.00	0.00	0.00	1.20	9.30	15.70	0.00	0.00	25.90
1990	10.20	15.40	16.50	7.50									16.50
1991	0.00	10.20	12.00	25.50	16.50	0.01	0.00	7.10	0.00	9.60	10.20	12.50	25.50
1992	11.90	15.60	14.70	12.10	12.20	8.80	5.60	0.00					15.60
1993								0.50	17.90	10.70	7.30	15.20	17.90
1994	10.40	14.10	22.10	11.60	4.70	3.50	1.00	0.50	7.80	6.40	14.40	21.10	22.10
1995	17.30	11.50	20.70	8.40	13.50	2.50	1.90	2.10	14.00	23.70	20.10	37.70	37.70
1996	21.80	54.20	23.30	22.90	14.30	3.60	0.60	10.50	9.70	18.20	15.70	22.60	54.20
1997	7.10	26.90	24.50	26.60	12.90	1.50	0.00	5.20	14.30	15.00	22.50	40.00	40.00
1998	50.80	31.20	37.40	26.00	7.70	5.00	0.70	8.80	21.00	16.50	11.60	17.30	50.80
1999	35.90	51.20	30.00	24.20	15.30	12.90	19.90	9.30	26.90	18.40	12.50	17.00	51.20
2000	38.90	33.70	33.80	33.10	22.00	12.90	5.30	32.60	7.40	11.20	18.20	22.10	38.90
2001	37.70	18.50	56.50	18.10	14.70	13.10	4.30	0.00	13.00	18.00	10.80	15.90	56.50
2002	14.90	33.70	37.60	28.90	6.10	8.00	2.30	0.00	0.00	12.00	26.90	10.00	37.60
2003	20.00	24.50	25.00	24.80	4.70	3.90	4.50	5.50	3.50	13.10	12.60	38.50	38.50
2004	8.00	47.70	21.30	12.20	12.50	4.20	7.70	0.00	12.20	19.20	25.70	22.00	47.70
2005	24.50	21.90	40.70	14.00	5.30	2.20	0.00	3.50	2.20	18.70	6.60	17.50	40.70
2006	19.70	28.40	34.10	18.00	2.90	8.80	2.10	8.10	14.70	9.50	41.00	26.60	41.00
2007	25.70	22.90	40.20	27.30	20.70	3.70	4.90	11.20	20.50	22.90	14.40	26.10	40.20
2008	24.50	45.90	25.10	20.60	5.60	13.50	2.00	3.10	29.00	29.60	25.40	22.00	45.90
2009	26.30	24.10	40.80	24.00	17.90	13.20	8.60	9.40	8.30	21.60	26.30	15.90	40.80
2010	35.00	32.00	19.20	31.20	10.20	9.60	18.40	3.60	12.30	3.30	12.00	22.60	35.00
2011	34.10	19.60	54.50	47.40	8.70	3.80	12.70	0.00	15.40	8.60	16.80	22.10	54.50
2012	31.50	36.40	40.30	23.10	12.40	3.50	0.00	2.30	13.80	17.00	14.50	36.10	40.30
2013	13.10	30.40	36.70	10.80	9.70	19.80	0.00	2.50	2.00	29.80	16.90	22.50	36.70
2014	12.90	13.60	25.40	29.90	9.60	4.60	2.70	1.70	17.10	22.70	16.90	31.10	31.10
2015	23.60	18.20	26.00	26.00	29.60	3.20	3.70	0.00	10.10	16.30	28.90	26.80	29.60
2016	18.20	30.80	17.60	25.50	6.80	3.90	0.00	0.70	8.30	16.20	5.10	17.90	30.80
2017	20.80	24.10	40.70	21.50	18.30	6.50	0.80	9.00	3.70	11.00	12.90	14.10	40.70
2018	32.60	30.00	15.80	22.00	13.80	4.90	7.50	1.50	20.90	14.20	24.80	26.20	32.60
Nº DATOS	53.00	52.00	51.00	52.00	50.00	51.00	51.00	52.00	51.00	50.00	51.00	51.00	54.00
MAX	50.80	54.20	56.50	47.40	29.60	19.80	19.90	32.60	29.00	31.70	41.00	40.00	56.50
MIN	0.00	0.00	11.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.30
MEDIA	20.95	22.45	26.27	17.85	10.13	5.51	3.33	5.46	10.55	14.18	14.48	18.74	33.44
DESV EST	10.77	11.71	11.56	9.23	6.29	4.52	4.53	5.85	7.57	7.52	8.23	9.16	10.84

Fuente: Elaboración propia en base a datos de libre descarga en www.senamhi.gob.pe.

Anexo 2. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Cachicadán.

DATOS DE ESTACION		LOCALIZACION POLITICA												
CODIGO :	154103	DEPARTAMENTO :										LA LIBERTAD		
NOMBRE :	CACHICADAN	PROVINCIA :										SANTIAGO DE CHUCO		
TIPO DE ESTACION :	CONVENCIONAL	DISTRITO :										CACHICADAN		
SUB-TIPO DE ESTACION :	METEOROLOGICA	UBICACION ADMINISTRATIVA												
OPERACION		AAA :												
INSTITUCION :	SENAMHI	VERTIENTE :												
AÑO DE ALTA :		CUENCA HIDROGRAFICA :												
AÑO DE BAJA :		UBICACION GEOGRAFICA												
ESTADO :	FUNCIONANDO	LATITUD :										8° 5' 30.64"		
		LONGITUD :										78° 8' 57.78"		
		ALTURA :												2900.00

AÑO \ MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp. Max
1971	29.80	18.30	26.20	16.10	7.50	6.00	5.00	3.60	4.80	14.00	33.80	30.00	33.80
1972	18.70	31.20	34.20	50.20	13.10	3.20	4.60	6.70	13.50	12.10	10.60	20.00	50.20
1973	24.00	17.70	28.50	22.10	9.40	6.30	8.40	2.30	25.00	12.80	24.70	16.30	28.50
1974	31.00	36.20	26.00	11.00	12.70	8.40	1.40	4.10	12.60	11.30	8.50	7.00	36.20
1975	30.00	31.10	27.90	27.50	8.00	6.80	1.30	7.70	16.00	10.00	18.50	11.00	31.10
1976	15.90	21.60	38.00	18.50	33.30	13.00	6.10	3.90	11.80	11.40	8.00	13.90	38.00
1977	27.20	23.20	29.00	17.20	12.40	17.70	12.00	1.30	4.20	15.20	8.00	20.00	29.00
1978	10.00	23.00	10.00	16.50	17.90	0.01	5.00	0.20	10.50	14.60	10.00	21.70	23.00
1979	18.70	11.10	25.70	21.50	4.40	3.40	2.20	2.10	14.10	6.20	8.70	12.70	25.70
1980	48.10	8.90	10.80	7.30	7.00	1.00	0.10	3.50	0.01	21.60	15.00	16.70	48.10
1981	21.90	26.00	50.10	8.40	3.20	5.30	0.20	11.30	4.00	14.60	11.60	16.70	50.10
1982	24.30	16.50	14.00	24.70									24.70
1985	17.20	22.00	24.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.70	29.00	35.00	47.00	47.00
1986	30.10	10.00	30.00	30.00	35.50	0.00	0.00	10.00	9.50	8.00	10.40	21.50	35.50
1987	17.90	21.70	17.00	10.20	0.00	0.00	0.00	0.00	10.40	15.20	20.40	15.00	21.70
1988	12.00	15.00	1.20	1.50	8.00	0.80	0.00	0.00	0.00	9.00	1.50	1.70	15.00
1989	1.50	2.00	1.50	1.50	0.90	0.90	0.70	0.70	1.00	1.80	0.80	0.00	2.00
1990	5.80	5.20	8.20	3.40	0.00	1.80	0.00	0.00	2.60	4.80	1.20	7.20	8.20
1991	9.50	15.00	14.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	0.00	15.00	15.00	15.00
1992	8.00	7.50	10.60	10.30	2.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.60
1993	10.20	30.50	30.00	30.50	19.50	15.00	12.00	3.00	20.00	20.00	16.00	24.00	30.50
1994	15.00	29.00	23.00	20.00	10.00	8.00	0.00	4.90	10.50	18.90	10.50	11.10	29.00
1995	17.80	17.20	11.20	19.00	13.80	6.50	9.50	0.00	3.20	17.20	20.10	20.50	20.50
1996	46.00	34.80	33.70	19.00	4.40	4.70	2.40	0.00	3.80	15.30	9.80	15.60	46.00
1997	12.70	27.80	16.20	28.00	21.20	5.20	0.00	2.40	11.20	22.00	18.20	27.70	28.00
1998	32.00	30.10	33.50	31.00	9.20	4.20	0.00	9.90	15.30	20.40	27.10	20.30	33.50
1999	33.20	48.50	17.10	17.10	22.60	8.30	4.20	10.00	11.60	9.30	13.20	16.60	48.50
2000	26.50	27.80	27.90	12.40	9.20	6.50	0.00	10.00	10.60	25.80	12.00	25.30	27.90
2001	30.00	26.40	24.80	18.70	15.50	0.00	0.00	0.00	14.20	22.70	10.00	21.80	30.00
2002	8.00	18.20	30.90	17.40	13.40	0.00	0.00	0.00	0.00	19.70	35.50	22.50	35.50
2003	22.50	27.70	14.60	24.50	22.40	5.00	2.80	0.00	7.60	8.20	4.60	18.70	27.70
2004	7.50	17.70	16.40	18.60	13.80	4.20	4.20	0.00	18.40		21.70	17.50	21.70
2005	19.50	22.00	25.90	22.00	2.10	0.00	0.00	0.00	0.00	18.00	10.20	10.40	25.90
2006	35.10	26.10	34.60	36.40	12.00	15.00	1.00	0.50	6.20	12.40	19.80	20.90	36.40
2007	40.80	19.00	27.70	33.90	16.80	2.20	5.20	8.70	16.80	17.20	14.50	38.10	40.80
2008	14.00	16.40	18.30	23.40	4.80	5.30	1.20	10.00	1.90	26.40	8.30	15.20	26.40
2009	25.60	28.00	17.00	18.00	22.00	4.70	4.40	2.00	4.50	20.80	22.60	20.80	28.00
2010	31.60	37.60	16.30	16.80	20.60	1.20	3.20	0.00	9.80	11.40	12.60	9.40	37.60
2011	21.00	16.40	32.40	37.80	1.80	6.00	0.00						37.80
2012	22.40	34.80	36.60	24.20	12.40	1.20	0.00	1.20	12.20	16.50	18.70	23.90	36.60
2013	20.60	17.50	34.20	20.00	2.80	13.00	0.00	10.20	1.80	24.90	2.80	21.70	34.20
2014	18.40	45.80	31.10	24.20	24.60	1.60	3.60	0.00	13.00	12.00	15.90	18.60	45.80
2015	18.40	16.60	29.60	22.00	17.30	1.20	2.60	1.50	8.20	22.20	14.60	23.40	29.60
2016	15.00	23.40	26.20	25.90	4.00	8.40	0.50	8.00	12.20	28.50	4.20	26.80	28.50
2017	20.20	25.60	31.80	22.00	15.60	2.00	0.10	7.20	25.60	25.80	7.80	35.40	35.40
2018	60.00	24.60	34.60	33.80	22.40	0.00	0.00	4.50	13.80	24.20	17.40	30.80	60.00
N° DATOS	53.00	53.00	53.00	53.00	52.00	52.00	52.00	51.00	52.00	51.00	52.00	52.00	54.00
MAX	60.00	48.50	50.10	50.20	35.50	17.70	18.90	17.90	25.60	36.00	35.50	47.00	60.00
MIN	1.50	2.00	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00
MEDIA	21.94	22.37	23.85	19.99	11.59	4.60	3.24	4.08	9.46	16.50	14.47	18.84	31.22
DESVEST	11.02	9.34	9.81	9.66	8.34	4.50	4.38	4.38	6.54	7.93	8.38	8.86	10.93

Fuente: Elaboración propia en base a datos de libre descarga en www.senamhi.gob.pe.

Anexo 3. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Huacamarcanga.

DATOS DE ESTACION		LOCALIZACION POLITICA												
CODIGO :	154112	DEPARTAMENTO :										LA LIBERTAD		
NOMBRE :	HUACAMARCANGA	PROVINCIA :										SANTIAGO DE CHUCO		
TIPO DE ESTACION :	CONVENCIONAL	DISTRITO :										QUIRUVILCA		
SUB-TIPO DE ESTACION :	METEOROLOGICA	UBICACION ADMINISTRATIVA												
OPERACION		AAA :												
INSTITUCION :	SENAMHI	VERTIENTE :												
AÑO DE ALTA :		CUENCA HIDROGRAFICA :												
AÑO DE BAJA :		UBICACION GEOGRAFICA												
ESTADO :	FUNCIONANDO	LATITUD :										8° 7' 17"		
		LONGITUD :										78° 17' 35"		
		ALTURA :												3883.00

AÑO \ MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp. Max
1971						22.00	3.00	5.00	5.00	16.00	27.00	41.00	41.00
1972	28.00	27.00	28.00	18.00	15.00	6.00	1.00	16.00	7.00	4.00	12.00	27.00	28.00
1973	40.00	22.00	28.00	18.00	6.00	7.00	15.00	17.00	18.00	26.00	23.00	14.00	40.00
1974	13.00	20.00	47.00	23.00	7.00	9.00	4.00	2.00	7.00	6.00	22.00	17.00	47.00
1975	14.00	38.00	40.00	20.00	6.00	6.00	0.00	10.00	18.00	23.00	7.00	8.00	40.00
1976	11.00	23.00	35.00	12.00	4.00	4.00	5.00	2.00	5.00	3.00	5.00	7.00	35.00
1977	22.00	44.00	12.00	10.00	5.00	6.00	5.10	2.00	0.00	8.00	14.00	19.00	44.00
1978	6.00	9.00	15.00	11.40	14.20	4.10	6.90	5.80	12.70	5.60	5.30	10.90	15.00
1979	16.20	14.80	17.10	5.10	7.40	3.50	3.10	5.10	5.60	10.70	6.50	4.60	17.10
1980	4.20	5.80	5.60	2.50	2.50	0.00	1.20	0.00	0.00	18.10	17.20	9.50	18.10
1981	13.50	10.30	60.10	3.40	3.80	3.10	0.00	5.10	3.80	8.40	12.40	10.10	60.10
1982	15.90	12.40	8.90	5.60	5.80	4.80	4.00	5.70	4.00	6.10	7.40	16.30	16.30
1983	13.10	12.40	15.50	20.40	8.30	9.10	4.30	3.50	2.50	9.70	7.80	5.80	20.40
1984	19.70	28.10	13.50	12.10	5.90	3.20	5.70	7.60	2.30	5.30	13.20	6.40	28.10
1985	12.40	5.80	18.70	7.90	9.10	6.90	3.70	8.50	9.40	13.40	9.70	10.30	18.70
1986	18.10	22.80	17.10	12.40	8.10	7.90	4.50	6.70	5.00	3.50	11.50	8.60	22.80
1987	14.90	12.80	10.40	11.40	12.10	6.70	4.50	6.10	8.50	3.40	5.30	6.40	14.90
1988	11.50	16.40	16.60	7.10	10.10	7.80	4.60	4.50	9.30	12.40	10.10	10.10	16.60
1989	16.00	18.20	16.90	12.70	5.80	0.00	0.00	0.00	1.40	8.10	10.50	12.60	18.20
1990	3.80	4.30	5.50	8.60	2.40	1.70	0.00	3.70	2.40	8.50	9.70	0.00	9.70
1991	4.10	4.00	7.80	1.40	3.40	1.90	0.00	2.40	2.40	9.80	11.40	6.00	11.40
1992	3.50	4.20	5.90	3.90	3.40	1.80	0.00	0.00	5.60	5.30	5.60	3.80	5.90
1993	13.60	14.20	21.90	18.60	4.20	2.80	1.70	1.60	1.60	6.60	8.70	7.40	21.90
1994	6.30	7.80	10.50	6.30	4.50	4.10	4.40	1.90	8.70	14.80	4.30	5.40	14.80
1995	8.50	9.90	12.10	7.10	8.90	10.90	4.70	2.40	1.60	2.10	3.60	5.80	12.10
1996	11.20	6.80	8.60	6.00	3.80	2.40	1.90	2.70	2.40	5.80	5.60	4.10	11.20
1997	2.40	14.30	3.90	4.60	2.90	24.60	0.10	3.40	5.90	9.20	16.40	11.70	24.60
1998	23.10	18.20	14.20	14.10	4.40	6.00	0.00	1.70	9.60	15.80	21.10	19.90	23.10
1999	13.50	24.50	16.30	17.70	13.00	9.30	2.80	7.90	12.90	10.00	18.70	30.40	30.40
2000	23.70	21.40	40.30	18.60	16.90	4.30	3.60	4.10	3.80	10.40	9.00	20.50	40.30
2001	19.70	19.90	32.40	11.30	8.80	5.70	3.80	0.00	11.40	26.20	22.70	24.50	32.40
2002	3.70	20.80	26.70	22.90	13.90	5.30	8.90	0.00	0.00	10.80	11.70	15.50	26.70
2003	17.70	24.90	16.60	19.10	8.30	8.90	8.50	3.10	7.80	18.90	9.20	23.30	24.90
2004	8.90	13.10	11.80	12.30	14.20	3.60	6.30	6.90	11.90	19.80	26.30	14.00	26.30
2005	8.60	26.70	25.90	10.90	8.30	3.20	1.90	2.60	8.90	18.50	18.10	24.80	26.70
2006	24.90	27.90	40.80	15.90	1.40	9.30	0.40	4.20	14.90	9.50	14.30	18.30	40.80
2007	28.30	41.00	28.70	25.50	21.40	5.10	8.10	5.10	7.50	30.90	15.60	20.80	41.00
2008	36.90	27.00	37.70	26.00	6.80	7.50	0.60	1.40	15.20	15.60	16.30	6.60	37.70
2009	33.80	20.10	31.20	34.50	12.50	14.30	5.80	5.10	15.30	24.50	80.50	19.10	80.50
2010	20.60	27.20	30.20	53.20	53.30	6.90	8.40	1.80	10.10	8.00	11.80	18.90	53.30
2011	17.90	16.40	33.80	32.10	10.20	4.20	8.50	0.90	6.90	15.90	18.10	29.10	33.80
2012	32.70	89.80	43.90	13.60	8.10	1.40	7.40	8.50	14.50	13.30	18.40	89.80	89.80
2013	30.30	25.30	61.30	10.20	9.70	14.10	7.30	10.80	4.60	26.40	10.00	50.80	61.30
2014	21.60	29.30	41.00	23.50	93.90	2.30	0.90	3.20	17.60	14.50	21.90	25.00	93.90
2015	27.30	10.50	40.20	26.30	34.80	8.10	3.90	1.40	12.40	12.60	34.50	30.60	40.20
2016	42.80	20.70	19.70	5.80	10.20	2.80	3.20	3.20	12.80	23.50	1.60	30.10	42.80
2017	16.10	19.60	30.00	10.30	10.40	4.10	6.20	9.00	2.30	4.20	3.00	5.20	30.00
2018	5.40	3.50	4.70	4.70	3.50	2.50	2.30	2.50	3.10	3.00	3.90	3.20	5.40
Nº DATOS	46.00	46.00	46.00	47.00	47.00	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00
MAX	40.00	89.80	61.30	53.20	93.90	24.60	15.00	17.00	18.00	30.90	80.50	50.80	93.90
MIN	2.40	3.50	3.90	1.40	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	2.10	1.60	0.00	5.40
MEDIA	16.47	20.70	23.18	15.37	11.38	6.46	3.77	4.44	7.35	12.21	14.04	15.37	31.96
DESV EST	9.49	14.54	14.33	10.63	15.09	4.77	3.15	3.73	5.04	7.36	12.12	10.56	19.88

Fuente: Elaboración propia en base a datos de libre descarga en www.senamhi.gob.pe.

Anexo 4. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Mollepata.

DATOS DE ESTACION		LOCALIZACION POLITICA												
CODIGO :	154106	DEPARTAMENTO :										LA LIBERTAD		
NOMBRE :	MOLLEPATA	PROVINCIA :										SANTIAGO DE CHUCO		
TIPO DE ESTACION :	CONVENCIONAL	DISTRITO :										MOLLEPATA		
SUB-TIPO DE ESTACION :	METEOROLOGICA	UBICACION ADMINISTRATIVA												
OPERACION		VERTIENTE :												
INSTITUCION :	SENAMHI	CUENCA HIDROGRAFICA :												
AÑO DE ALTA :		UBICACION GEOGRAFICA												
AÑO DE BAJA :		LATITUD :										8° 11' 28.93"		
ESTADO :	FUNCIONANDO	LONGITUD :										77° 57' 14.3"		
		ALTURA :												2708.00

AÑO \ MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp. Max
1971	9.80	15.40	20.00	8.60	5.40	13.50	5.00	0.01	2.00	7.20	10.50	21.80	21.80
1972	9.20	30.00	18.50	10.30	9.10	2.80	0.00	3.10	0.00	3.60	14.90	6.50	30.00
1973	18.30	10.20	21.20	17.90	9.70	2.40	0.00	2.10	9.60	17.60	17.70	18.10	21.20
1974	12.00	37.70	22.00	10.40	0.00	2.30	0.00	0.50	2.30	3.80	1.70	5.80	37.70
1975	20.20	36.90	34.00	17.20	3.70	0.00	0.00	6.30	5.50		5.50	7.90	36.90
1976	9.80	10.60	19.70	0.90	6.50	0.00	0.00	0.80	1.30	1.30	1.20	10.20	19.70
1977	23.50	18.70	15.80	10.80	2.10	0.00	0.00	0.00	0.00	14.70	14.90	9.00	23.50
1978	10.00	27.10	15.20	12.40	13.40	0.00	0.00	0.00	0.00	8.30	5.30	11.80	27.10
1979	9.90	12.60	18.90	13.10	5.70	0.00	0.00	0.00	5.40	1.60	4.10	0.00	18.90
1980	18.00	6.50	24.90	0.00	5.20	0.00	0.00	0.00	0.00	23.20	10.40	16.40	24.90
1981	10.50	19.00	17.10	5.60	2.30	0.00	0.00	1.70	0.00	9.60	15.30	13.00	19.00
1982	11.70	16.60	15.00	22.00	1.90	0.00	0.00	0.00	2.40	15.80	12.80	23.30	23.30
1983	29.50	9.00	32.50	23.80	17.40	5.80	0.00	2.20	1.20	9.20	6.80	35.20	35.20
1984	20.20	29.60	22.50	16.90	8.50	5.10	4.50	0.00	2.70	14.40	17.30	0.00	29.60
1985	7.00	9.30	14.20	9.80	4.20	0.00	0.00	0.00	6.00	13.80	0.00	12.00	14.20
1986	17.10	9.90	19.10	17.40	3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	14.00	19.10
1987	10.00	10.50	12.20	11.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.00	9.50	12.20
1988	18.00	26.00	13.00										26.00
1989	20.00	18.50	17.50	10.50	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00				20.00
1990	14.70	12.00	0.00	11.40	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.70
1991	0.00	0.00	21.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.40	34.70	34.70
1992	0.00	0.00	0.00	7.00	2.00	0.60	0.70	0.80	0.00	0.60	3.40	5.50	7.00
1993	40.30	31.00	37.10	24.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.20	16.00	16.10	9.30	40.30
1994	13.10	19.20	17.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.00	19.20
1995	17.40	15.20	11.80	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80	25.30	14.70	17.00	25.30
1996	26.00	25.80	22.50	19.70	2.40	5.30	0.00	0.00	1.60	13.20	10.30	5.10	26.00
1997	51.20	11.00	12.00	10.50	3.90	3.00	0.00	0.00	7.70	5.50	9.50	16.50	51.20
1998	26.90	34.10	33.40	8.10	3.00	3.60	0.00	1.20	1.50	12.50	21.20	9.80	34.10
1999	15.20	47.10	14.00	10.70	9.40	2.30	2.80	0.00	5.70	3.90	6.80	17.80	47.10
2000	20.60	24.00	17.60	10.00	8.70	4.10	0.00	3.30	4.90	4.50	8.30	20.50	24.00
2001	15.00	30.50	41.30	12.30	4.10	0.00	0.00	0.00	5.50	14.20	17.00	15.10	41.30
2002	11.30	15.70	24.00	14.20	4.50	1.80	0.60	0.00	3.10	8.60	28.60	9.40	28.60
2003	7.50	15.00	13.60	11.10	4.60	4.70	1.80	0.00	6.90	11.40	13.30	29.60	29.60
2004	14.30	10.70	11.50	21.60	3.30	3.10	4.00	0.00	7.40	19.20	10.60	14.20	21.60
2005	9.90	26.70	24.00	5.80	3.80	0.00	0.00	1.10	0.40	8.60	4.40	15.10	26.70
2006	24.00	16.80	18.40	19.00	7.10	3.20	0.00	0.00	2.20	6.70	6.10	14.00	24.00
2007	9.20	10.40	15.80	19.50	5.80	0.00	0.60	0.00	0.90	15.80	9.40	11.40	19.50
2008	18.50	15.30	26.50	17.50	3.70	5.00	0.00	1.20	6.20	9.80	8.60	18.90	26.50
2009	18.20	23.20	27.10	10.30	3.30	0.00	2.40	0.00	1.10	10.50	12.90	35.20	35.20
2010	11.50	20.70	14.90	14.90	14.60	1.10	0.90	0.00	3.10	7.80	11.50	15.80	20.70
2011	9.90	5.70	16.10	21.20	0.00	3.60	2.60	0.00	7.80	8.10	7.70	19.50	21.20
2012	19.30	20.80	19.90	20.00	2.50	2.00	0.00	0.00	3.40	14.00	6.80	9.30	20.80
2013	18.10	13.10	37.70	10.90	6.30	1.50	2.30	4.10	2.00	12.80	5.30	15.70	37.70
2014	17.40	32.50	19.10	9.50	7.30	0.00	0.00	2.00	5.20	9.50	5.30	19.50	32.50
2015	15.40	10.70	21.10	28.70	14.10	1.60	1.90	0.20	1.20	2.70	7.60	16.40	28.70
2016	11.20	23.60	24.30	9.10	0.90	1.20	0.10	0.50	2.70	6.60	2.30	12.50	24.30
2017	14.00	22.00	19.70	6.80	9.70	0.80	0.00	1.00	3.20	16.70	7.20	15.90	22.00
2018	8.20	21.40	19.50	26.80	5.40	1.10	2.50	1.60	7.30	12.20	2.30	18.10	26.80
Nº DATOS	55.00	55.00	55.00	54.00	54.00	54.00	54.00	54.00	55.00	53.00	54.00	54.00	56.00
MAX	51.20	47.10	41.30	28.70	17.40	13.50	7.60	6.30	13.10	25.30	28.60	35.20	51.20
MIN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.00
MEDIA	15.62	18.57	19.62	12.36	5.31	1.78	0.89	0.87	3.07	9.45	9.28	14.14	25.64
DESV EST	8.62	9.74	8.00	6.75	4.34	2.52	1.62	1.52	3.14	5.94	5.77	7.83	8.76

Fuente: Elaboración propia en base a datos de libre descarga en www.senamhi.gob.pe.

Anexo 5. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Quiruvilca.

DATOS DE ESTACION		LOCALIZACION POLITICA												
CODIGO :	154102	DEPARTAMENTO :										LA LIBERTAD		
NOMBRE :	QUIRUVILCA	PROVINCIA :										SANTIAGO DE CHUCO		
TIPO DE ESTACION :	CONVENCIONAL	DISTRITO :										QUIRUVILCA		
SUB-TIPO DE ESTACION :	METEOROLOGICA	UBICACION ADMINISTRATIVA												
OPERACION		AAA :												
INSTITUCION :	SENAMHI	VERTIENTE :												
AÑO DE ALTA :		CUENCA HIDROGRAFICA :												
AÑO DE BAJA :		UBICACION GEOGRAFICA												
ESTADO :	FUNCIONANDO	LATITUD :										8° 0' 15.2"		
		LONGITUD :										78° 18' 28.48"		
		ALTURA :												4047.00

AÑO \ MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp. Max
1971	3.50	5.00	5.50	6.00	3.50	3.50	2.00	5.00	6.00	4.00	5.50	6.50	6.50
1972	4.50	4.50	4.50	3.00	4.50	4.00	3.00	2.00	3.00	4.00	3.50	4.50	4.50
1973	6.50	4.50	4.50	4.50	6.50	3.00	5.00	5.50	3.50	4.00	5.50	4.00	6.50
1974	3.50	5.00	6.00		3.00	3.50	2.50	1.50	3.00	3.50	3.50	5.00	6.00
1975	6.00	10.50	17.00	7.00	5.00	3.00	4.00	4.50	4.50	4.00	4.00	4.50	17.00
1976	4.50	6.00	9.50	9.80	9.70	6.50	3.50	4.50	5.50	7.00	4.50	15.50	15.50
1977	10.80	17.50	11.50	14.50	11.00	6.00	12.30	7.00	6.00	10.00	9.50	7.50	17.50
1978	6.50	8.50	10.50	10.50	9.50	4.00	8.00	2.50	11.50	22.30	16.80	13.70	22.30
1979	9.70	15.50	36.30	22.80	12.70	7.30	12.50	6.70	15.70	8.80	6.00	9.50	36.30
1980	14.50	14.40	19.40	24.40	22.80	9.50	0.00	6.50	5.30	19.70	18.50	17.60	24.40
1981	14.00	23.90	15.20	11.60	7.50	11.30	0.00	8.00	12.80	14.30	14.50	19.80	23.90
1982	14.00	15.30	16.60	16.20	13.20	3.60	0.00	10.50	12.20	28.60	16.90	20.20	28.60
1983	27.10	15.60	42.00	27.70	15.90	10.80	3.20	3.80	10.40	15.20	8.80	10.70	42.00
1984	20.90	47.50	27.80	21.60	11.80	22.60	9.70	5.20	16.20	17.40	16.30	7.80	47.50
1985	4.30	16.60	27.30	15.50	11.50	8.70	6.30	7.30	7.80	23.80	8.40	21.70	27.30
1986	34.30	23.20	24.50	27.70	20.70	9.60	10.80	5.30	11.20	23.70	22.70	29.60	34.30
1987	22.50	22.90	7.70	12.80	17.70	0.00	3.50	5.60	21.70	25.40	22.00	19.40	25.40
1988	19.70	21.40	14.80	21.60	18.20	8.30	0.00	3.50	17.30	16.30	11.80	17.80	21.60
1989	20.40	24.80	29.50	24.40	23.80	7.70	0.00	3.20	14.70				29.50
1990	14.30	16.80	25.50	22.90	20.90	2.30	0.00	0.00	10.50	18.80	25.80	20.90	25.80
1991	9.20	18.90	16.70	18.30	19.40	8.50	5.60	0.00	7.60	6.20	0.00	8.00	19.40
1992	5.50	9.20	29.50	24.40	23.80	7.70	0.00	3.20	18.60	16.30	11.80	17.80	29.50
1993	17.80	27.50	35.10	30.40	27.50	12.90	5.50	7.30	23.60	25.60	35.80	38.60	38.60
1994	22.50	29.50	29.50	30.70	33.70	24.80	9.30	5.30	18.50	24.20	5.10	34.20	34.20
1995	22.70	10.00	12.70	18.80	13.80	9.00	6.60	4.30	12.20	20.80	32.40	17.30	32.40
1996	32.90	25.40	31.80	19.50	7.80	3.30	1.10	12.20	9.50	18.70	11.60	12.50	32.90
1997	10.00	29.30	24.00		10.30	11.90	7.10	7.70	16.20	14.60	23.00	28.60	29.30
1998	23.70	32.50	42.60	16.70	9.70	2.50	2.50	24.90	16.70	26.50	4.30	12.90	42.60
1999	19.80	37.20	24.10	33.20	20.60	17.00	11.60	4.30	26.60	11.50	12.20	21.30	37.20
2000	28.60	23.00	30.30	18.00	21.90	11.00	7.90	7.50	11.40	7.20	28.90	36.30	36.30
2001	20.90	16.80	32.30	27.70	26.30	9.70	5.00		14.20	23.60	32.40	25.70	32.40
2002	32.30	17.60	24.00	44.70	8.00	19.10	12.40	0.00	30.10	30.90	22.50	28.80	44.70
2003	34.60	24.40	24.50	14.10	13.60	12.60	5.00	0.00	10.60	14.60	11.20	26.60	34.60
2004	37.00	29.30	27.40	28.80	17.20		17.70	0.00	16.30	24.80	22.60	26.30	37.00
2005	20.40	38.50	29.30	14.00	6.40	3.50	9.20	14.70	18.40	22.70	17.00	26.20	38.50
2006	18.10	22.90	27.50	13.30	14.10	11.30	4.80	8.10	12.90	31.20	14.80	21.70	31.20
2007	28.90	21.60	35.30	17.70	22.40	4.80	11.10	6.00	9.80	16.30	12.40	40.40	40.40
2008	31.40	25.50	32.20	20.80	21.50	13.50	10.70	8.80	17.50	16.00	19.30	9.20	32.20
2009	25.20	15.90	24.50	23.40	22.00	3.80	8.60	10.20	3.10	13.70	19.30	23.20	25.20
2010	12.60	18.80	35.30	19.40	32.40	9.20	9.90	17.50	18.40	9.70	22.40	17.10	35.30
2011	21.60	9.80	25.40	26.10	9.90	5.50	12.00	2.70	10.30	17.30	23.20	39.20	39.20
2012	20.70	24.70	28.90	26.80	17.90	4.50	0.00	4.30	7.80	22.70	16.20	16.50	28.90
2013	14.10	17.10	31.70	20.90	13.90	5.90	7.50	9.00	31.80	10.00	1.60	10.00	31.80
2014	9.00	10.10	6.70	11.90	20.00	10.00	10.00	3.60	10.10	12.80	11.60	12.80	20.00
2015	11.60	12.80	15.20	8.90	5.10	2.90	3.00	0.00	11.30	30.90	16.20	83.30	83.30
2016	21.60	32.20	32.40	23.50	4.20	10.40	9.60	5.20	28.90	12.30	5.60	38.20	38.20
2017	25.70	22.10	26.20	19.00	28.30	12.10	0.70	6.50	20.10	19.60	16.20	29.10	29.10
2018	23.70							3.60	13.50				23.70
Nº DATOS	53.00	52.00	52.00	50.00	52.00	51.00	52.00	53.00	54.00	52.00	52.00	52.00	54.00
MAX	37.00	47.50	42.60	44.70	33.70	24.80	17.70	24.90	31.80	31.20	35.80	83.30	83.30
MIN	3.00	4.00	4.50	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	3.50	0.00	4.00	4.50
MEDIA	17.12	18.63	21.88	18.26	14.31	7.85	5.75	5.98	12.76	15.91	13.86	19.42	28.01
DESV EST	9.41	9.61	10.60	8.69	8.24	5.26	4.38	4.97	7.04	8.00	8.61	13.68	13.44

Fuente: Elaboración propia en base a datos de libre descarga en www.senamhi.gob.pe.

Anexo 6. Datos de caudal máximo - Acueducto Chorobal.



PROYECTO ESPECIAL CHAVIMOCHIC
DIRECCION DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO
DMSION DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE REGO E HIDROMETRIA

CAUDAL MAXIMO DIARIO MENSUAL DEL RIO CHOROBAL (En m³/s)

ESTACION: CHOROBAL
RIO: CHOROBAL

Norte: 9,063,001 m
Este: 764,844 m

PERIODO: 1998-2013

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Maximo
1998	15.000	250.000	80.000	4.700	4.000	0.430	0.400	0.190	0.165	0.080	0.070	0.070	250.000
1999	0.020	55.000	6.900	1.150	0.120	0.100	0.070	0.060	0.060	0.030	0.010	0.000	55.000
2000	0.000	9.700	7.500	1.850	0.150	0.080	0.080	0.060	0.060	0.000	0.000	0.000	9.700
2001	7.405	5.645	15.600	9.740	0.130	0.060	0.045	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	15.600
2002	0.000	6.800	13.500	4.874	0.400	0.050	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.845	13.500
2003	0.000	0.000	0.000	3.850	0.400	0.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.850
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046	0.353	0.353
2005	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
2006	0.000	2.800	11.200	7.200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	11.200
2007	2.400	9.400	5.800	9.500	1.600	0.080	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9.500
2008	2.500	4.500	5.700	3.700	0.200	0.150	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.700
2009	3.684	3.800	5.000	7.800	0.300	0.200	0.100	0.100	0.000	0.000	0.000	5.300	7.800
2010	1.000	9.500	0.600	2.200	3.000	0.100	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9.500
2011	0.000	0.000	0.000	3.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.500
2012	0.000	3.800	3.500	0.700	0.300	0.150	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.800
2013	0.200	0.700	15.000	1.000	0.100	0.100	0.100	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	15.000
2014	0.400	22.500	46.000	1.000	6.700	0.100	0.100	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	46.000
2015	3.600	3.000	9.000	1.000	3.000	0.300	0.080	0.050	0.000	0.000	0.000	0.000	9.000
2016	1.000	2.800	1.600	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.800
2017	0.000	15.000	70.000	0.000	0.000	0.000	0.300	0.300	0.200	0.100	0.100	0.020	70.000
2018	0.000	1.000	1.040	2.000	0.100	0.100							2.000
MAXIMO	15.00	250.00	80.00	9.74	6.70	0.43	0.40	0.30	0.20	0.20	0.20	5.30	250.00

Fuente: Proyecto Especial Chavimochic.

Anexo 7. Datos de precipitación máxima en 24 horas - Estación Laredo.

LATITUD : 08° 05' S		DEPARTAMENTO: La Libertad											
LONGITUD: 78° 51' W		PROVINCIA : Trujillo											
ALTITUD : 100 msnm		DISTRITO : Laredo											
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Máxima
1966	0,0	0,0	S/D	S/D	S/D	S/D	T	T	T	T	T	T	0,0
1967	3,2	3,5	T	T	0,0	T	T	T	T	1,2	T	T	3,5
1968	T	T	T	T	0,0	T	T	T	T	T	T	0,0	0,0
1969	T	0,5	1,5	0,4	0,4	T	T	T	T	1,2	1,0	T	1,5
1970	3,2	0,0	1,5	0,6	1,2	T	T	T	0,0	3,8	T	T	3,8
1971	0,0	0,8	6,2	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2
1972	4,4	8,8	16,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	T	3,6	16,8
1973	2,8	1,6	2,4	2,6	0,0	0,0	0,0	T	0,0	0,0	0,0	1,9	2,8
1974	3,4	3,6	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6
1975	2,3	2,6	7,6	1,4	T	0,0	0,0	2,8	0,4	1,8	0,0	0,0	7,6
1976	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	1,8
1977	2,6	1,8	0,0	1,6	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6
1978	0,0	2,0	T	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	S/D	S/D	0,0	0,0	2,0
1979	0,0	0,0	1,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
1980	0,0	0,0	4,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	0,3	1,1	4,9
1981	1,9	7,2	0,5	0,7	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	2,1	0,0	0,2	7,2
1982	0,3	2,8	0,4	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,4	0,7	2,8
1983	3,7	1,2	12,1	2,7	6,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,1
1984	1,4	2,0	2,0	0,4	0,4	0,2	0,4	0,0	0,0	0,1	0,3	0,7	2,0
1985	0,0	1,6	0,0	0,0	1,5	0,0	0,3	0,0	1,3	0,0	0,0	2,5	2,5
1986	3,1	0,0	1,7	0,9	0,2	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1
1987	1,8	1,4	1,6	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,6	0,0	0,0	4,0
1988	2,5	0,4	0,5	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5
1989	0,3	1,7	3,1	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	3,1
1990	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	2,7	0,0	2,7
1991	0,0	2,2	2,8	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	2,4	2,8
1992	0,0	1,0	0,3	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	1,2
1993	0,4	3,9	6,8	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	6,8
1994	0,0	4,2	1,9	3,8	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	5,3
1995	1,0	0,6	2,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
1996	2,8	3,1	1,6	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	3,1
1997	0,0	0,7	0,4	2,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,9	0,8	13,6	13,6
1998	7,0	28,3	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	28,3
1999	2,4	4,5	0,0	0,6	0,8	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	2,1	4,5
2000	0,9	1,1	2,6	3,0	3,9	1,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	3,9

Fuente: (Roncal Muñante, 2008)

Anexo 8. Valores CN para áreas urbanas.

SCR TR-55 Tabla 2-2a - Números de curva de escurrimiento para áreas urbanas ¹					
Descripción de la cobertura		Número de curva para el grupo de suelos hidrológicos			
Tipo de cobertura y condición hidrológica	Promedio porcentual de área impermeable ²	A	B	C	D
<i>Zonas urbanas plenamente desarrolladas</i>					
Espacios abiertos (césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.) ³ :					
Condición mala (cobertura vegetal < 50%)		68	79	86	89
Condición regular (cobertura vegetal del 50% al 75%)		49	69	79	84
Condición buena (cobertura vegetal > 75%)		39	61	74	80
Áreas impermeables:					
Estacionamientos pavimentados, tejados, calzadas (excluyendo derecho de vía)		98	98	98	98
Calle y carreteras:					
Pavimentadas; con cunetas y alcantarillado (excluyendo derecho de vía)		98	98	98	98
Pavimentadas; con zanjas abiertas (incluyendo derecho de vía)		83	89	92	93
Caminos de grava (incluyendo derecho de vía)		76	85	89	91
Caminos de terracería		72	82	87	89
Áreas urbanas del desierto occidental:					
Desierto natural (sólo áreas permeables) ⁴		63	77	85	88
Desierto artificial (con barreras de maleza impermeable, matorral desértico con 1 a 2 pulgadas de arena o grava y bordes de cuenca)		96	96	96	96
Distritos urbanos:					
Áreas comerciales y de negocios	85	89	92	94	95
Áreas industriales	72	81	88	91	93
Distritos residenciales por tamaño promedio de lote					
1/8 de acre o menos (Casas de pueblo) = 505.86 m ²	65	77	85	90	92
1/4 de acre = 1011.71 m ²	38	61	75	83	87
1/3 de acre = 1348.95 m ²	30	57	72	81	86
1/2 de acre = 2023.43 m ²	25	54	70	80	85
1 acre = 4046.85 m ²	20	51	68	79	84
2 acres = 8093.71 m ²	12	46	65	77	82
Áreas urbanas en desarrollo					
Áreas recién clasificadas (sólo áreas permeables, sin vegetación) ⁵		77	86	91	94
Tierras inactivas (El valor CN se determinan usando tipos de cubierta similares a los de la tabla 2-2c)		-	-	-	-

¹ Condición de escurrimiento medio, y $I_a = 0.2 S$

² Muestra el promedio porcentual de área impermeable que fue utilizado para desarrollar un NC. Otros supuestos son los siguientes: áreas impermeables directamente conectados con el sistema de drenaje, áreas impermeables tienen un NC de 98, y las áreas permeables son consideradas equivalentes a espacios abiertos en condición hidrológica buena.

³ Muestra el NC que es equivalente para aquellos pastos. Un NC compuesto puede ser calculado por otras combinaciones de espacio abierto-tipo de cobertura.

⁴ Un NC compuesto para paisaje de desierto natural debería ser calculado utilizándolas figuras 2.3 o 2.4 basadas en el porcentaje de área impermeable (NC=98) y el NC para el porcentaje de área permeable. El NC para área permeable se asume al equivalente para desierto en condición hidrológica pobre.

⁵ Un NC compuesto usado para designar medidas temporales durante la clasificación y construcción puede ser calculado usando la figura 2.3 o 2.4 basados en el grado de desarrollo (porcentaje de área impermeable) y el NC es para las nuevas áreas permeables clasificadas.

Fuente: (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).

Anexo 9. Valores CN para tierras agrícolas cultivadas.

SCR TR-55 Tabla 2-2b - Números de curva de escurrimiento para tierras agrícolas cultivadas ¹							
Descripción de la cobertura			Número de curva para el grupo de suelos hidrológicos				
Tipo de cobertura	Tratamiento ²	Condición hidrológica ³	A	B	C	D	
Barbecho	Suelo desnudo	-	77	86	91	94	
	Cubertura de residuos de cultivos (CR)	Pobre	76	85	90	93	
		Buena	74	83	88	90	
	Cultivos en fila	Fila recta (SR)	Pobre	72	81	88	91
			Buena	67	78	85	89
		SR + CR	Pobre	71	80	87	90
Buena			64	75	82	85	
Contomeados (C)		Pobre	70	79	84	88	
		Buena	65	75	82	86	
Grano pequeño	C + CR	Pobre	69	78	83	87	
		Buena	64	74	81	85	
	Contomeados y terrazas (C & T)	Pobre	66	74	80	82	
		Buena	62	71	78	81	
	C&T + CR	Pobre	65	73	79	81	
		Buena	61	70	77	80	
Cerca de semilla de leguminosa o legumbres por difusión	SR	Pobre	65	76	84	88	
		Buena	63	75	83	87	
	SR + CR	Pobre	64	75	83	86	
		Buena	60	72	80	84	
	C	Pobre	63	74	82	85	
		Buena	61	73	81	84	
	C + CR	Pobre	62	73	81	84	
		Buena	60	72	80	83	
	C & T	Pobre	61	72	79	82	
		Buena	59	70	78	81	
	C & T + CR	Pobre	60	71	78	81	
		Buena	58	69	77	80	
Cerca de semilla de leguminosa o legumbres por difusión	SR	Pobre	66	77	85	89	
		Buena	58	72	81	85	
	C	Pobre	64	75	83	85	
		Buena	55	69	78	83	
	C & T	Pobre	63	73	80	83	
		Buena	51	67	76	80	

¹ Condición de escurrimiento medio, y $I_a = 0.2 S$

² Residuos de cultivo de cobertura aplica sólo si el residuo es al menos el 5% de la superficie a lo largo del año.

³ La condición hidráulica está basada en la combinación de factores que afectan el escurrimiento y la infiltración, incluyendo (a) densidad y cubierta de áreas vegetativas, (b) cantidad cubierta en todo el año, (c) cantidad de hierba o cerca de semilla de leguminosa, (d) porcentaje del residuo que cubre la superficie de la tierra (buena $\geq 20\%$), y (e) grado de rugosidad de la superficie.

Pobre: Factores que perjudican la infiltración y tienden a incrementar el escurrimiento.

Buena: Factores que mejoran los promedios de infiltración y tienden a decrecer el escurrimiento.

Fuente: (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).

Anexo 10. Valores CN para otras tierras agrícolas.

SCR TR-55 Tabla 2-2c - Número de curva de escurrimiento para otras tierras agrícolas ¹					
Descripción de la cobertura		Número de curva para el grupo de suelos hidrológicos			
Tipo de cubetura y condición hidrológica	Condición hidrológica	A	B	C	D
Pasturas, praderas o semejantes (áreas continuas de forraje para pastoreo). ²	Pobre	68	79	86	89
	Media	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Prado (pastos continuos, protegida del pastoreo y generalmente cortado para heno)	-	30	58	71	78
Maleza (maleza - mala hierba - hierba mezclada con maleza como elemento principal): maleza con vegetación de característica arbustiva y leñosa. ³	Pobre	48	67	77	83
	Media	35	56	70	77
	Buena	30 ⁴	48	65	73
Bosques combinados con pasto (huerto o arboles cultivados). ⁵	Pobre	57	73	82	86
	Media	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosques. ⁶	Pobre	45	66	77	83
	Media	36	60	73	79
	Buena	30 ⁴	55	70	77
Granjas-edificios, calles, caminos, y predios circundantes.	-	59	74	82	86

¹ Condición de escurrimiento medio, y $I_a = 0.2 S$

² Pobre: <50% de cobertura del terreno o fuertemente pastoreado con poco martillo.

Media: 50 a 75% de cobertura del terreno o no tan pastoreado.

Buena: >75% de cobertura del terreno y ligeramente o solo ocasionalmente pastoreado.

³ Pobre: <50% de cobertura del terreno.

Media: 50 a 75% de cobertura del terreno.

Buena: >75% de cobertura del terreno.

⁴ El Número de Curva actual es menor que 30; usar $NC=30$ para cálculos de escurrimiento.

⁵ Los NC's mostrados fueron calculados para áreas cubiertas con 50% bosque y 50% hierba (pasto). Otra combinación de condiciones puede ser calculada de los NC's para bosques y pasturas.

⁶ Pobre: Areas con hojarasca (basura forestal), pequeños árboles, y vegetación de brush que son destruidos por un intenso pastoreo o la quema regular.

Media: Bosques que son pastoreados pero no quemados, y algunas hojarasca cubriendo el suelo.

Buena: Bosques protegidos del pastoreo, y la hojarasca y vegetación de brush cubren adecuadamente el suelo.

Fuente: (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).

Anexo 11. Valores CN para pastizales áridos y semiáridos.

SCR TR-55 Tabla 2-2d - Números de curva de escorrentía para pastizales áridos y semiáridos ¹					
Descripción de la cobertura		Número de curva para el grupo de suelos hidrológicos			
Tipo de cobertura	Condición hidrológica ²	A ³	B	C	D
Vegetación Herbácea - mezcla de hierba, mala hierba y maleza de arbustos leñosos maleza de bajo crecimiento, siendo este último el de menor elemento.	Pobre		80	87	93
	Media		71	81	89
	Buena		62	74	85
Roble - Álamo Temblón - vegetación leñosa de montaña mezcla de Roble, Caoba de montaña, Maple y otros con características leñosas.	Pobre		66	74	79
	Media		48	57	63
	Buena		30	41	49
Piñón - Enebro - Piñón, Enebro o ambos; hierba de sotobosque.	Pobre		75	85	89
	Media		58	73	80
	Buena		67	61	71
Artemisa con hierba de sotobosque.	Pobre		67	80	85
	Media		51	63	70
	Buena		35	47	55
Arbustos o Matomal de desierto (Plantas principales que incluyen Palo verde, Mezquite, A triplex, Jamilla, Prieto y Cactus)	Pobre	63	77	85	88
	Media	55	72	81	86
	Buena	49	68	79	84

¹ Condición de escurrimiento medio, y Ia = 0.2 S

² Pobre: <30% de cobertura (hojarasca, hierba y dosel (copa del árbol) de características leñosas).

Media: 30 a 70% de cobertura.

Buena: >70% de cobertura.

³ Los NC's para el grupo A han sido desarrollados solo para arbustos de desierto.

Fuente: (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).

Anexo 12. Grupo hidrológico según descripción del suelo.

DESCRIPCION DE SUELOS	SIMBOLOGIA	GRUPO
Acrisol háplico - Alisol háplico - Lixisol háplico	ACh-ALh-LXh	C
Acrisol háplico - Alisol háplico - Luvisol háplico	ACh-ALh-LVx	C
Arenosol háplico - Solonchak háplico	ARh-SCh	A
Cambisol déstrico - Acrisol háplico	CMd-ACh	C
Cambisol déstrico - Acrisol háplico - Lixisol háplico	CMd-ACh-LXh	C
Cambisol déstrico - Alisol háplico	CMd-ALh	C
Cambisol déstrico - Nitisol háplico	CMd-NTh	C
Cambisol éútrico - Phaeozem háplico	CMe-PHh	B
Cambisol éútrico - Vertisol éútrico	CMe-VRe	C
Fluvisol éútrico - Gleysol éútrico	FLe-GLe	B
Fluvisol éútrico - Regosol éútrico	FLe-RGe	B
Gleysol déstrico - Cambisol déstrico	GLd-CMd	B
Gleysol déstrico - Histosol déstrico	GLd-HSf	D
Gleysol déstrico - Lixisol háplico - Fluvisol déstrico	GLd-LXh-FLd	A
Leptosol déstrico - Afloramiento lítico	LPd-R	B
Leptosol déstrico - Andosol ámbrico - Afloramiento lítico	LPd-ANu-R	B
Leptosol déstrico - Andosol vítrico	LPd-ANz	B
Leptosol déstrico - Cambisol déstrico - Regosol déstrico	LPd-CMd-RGd	B
Leptosol déstrico - Regosol déstrico - Afloramiento lítico	LPd-RGd-R	B
Leptosol éútrico - Afloramiento lítico	LPe-R	B
Leptosol éútrico - Cambisol éútrico	LPe-CMe	C
Leptosol éútrico - Cambisol éútrico - Regosol éútrico	LPe-CMe-RGe	B
Leptosol éútrico - Kastanozem háplico - Afloramiento lítico	LPe-KSh-R	B
Leptosol éútrico - Regosol éútrico - Afloramiento lítico	LPe-RGe-R	B
Leptosol lítico - Afloramiento lítico	LPq-R	B
Lixisol háplico - Gleysol déstrico	LXh-GLd	B
Luvisol crómico - Cambisol éútrico	LVx-CMe	C
Regosol déstrico - Afloramiento lítico	RGd-R	B
Regosol déstrico - Cambisol déstrico	RGd-CMd	C
Regosol éútrico - Andosol móllico	RGe-ANm	C
Regosol éútrico - Calcisol háplico	RGe-CLh	C
Regosol éútrico - Cambisol éútrico	RGe-CMe	C
Solonchak háplico - Leptosol éútrico	SCh-LPe	A

Fuente: (Autoridad Nacional del Agua, 2015).