Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

Estimación y análisis hidrológico de precipitaciones extremas y caudales de máximas avenidas en las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, cuenca del río Chillón

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Miguel Angel HERRERA MORENO

ASESOR

Juan Miguel DE LA TORRE OSTOS

Lima, Perú

2026



Reconocimiento − No Comercial − Compartir Igual − Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Herrera, M. (2026). *Estimación y análisis hidrológico de precipitaciones extremas y caudales de máximas avenidas en las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, cuenca del río Chillón*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Miguel Angel Herrera Moreno
Tipo de documento de identidad	Documento Nacional de Identidad
Número de documento de identidad	73093214
URL de ORCID	**https://orcid.org/0009-0004-6896-6028**
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Juan Miguel De la Torre Ostos
Tipo de documento de identidad	Documento Nacional de Identidad
Número de documento de identidad	09634918
URL de ORCID	**https://orcid.org/0000-0001-8226-5376**
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Douglas Donal Sarango Julca
Tipo de documento	Documento Nacional de Identidad
Número de documento de identidad	07136313
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Miguel Astorayme Valenzuela
Tipo de documento	Documento Nacional de Identidad
Número de documento de identidad	45516060
Datos de investigación	
Línea de investigación	Hidrología
Grupo de investigación	
Agencia de financiamiento	

Ubicación geográfica de la investigación	Lima - Perú
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2025-2026
URL de disciplinas OCDE	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11

UNMSM
Firmado digitalmente por ARAMBULO MANRIQUE Miguel Ernesto FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 12.10.2026 12:38:46 -05:00

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO DE FLUIDOS

Siendo las 18:00 horas del lunes 21 de setiembre del 2026, en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del DR. ING. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA y con la asistencia del asesor MG. ING. JUAN MIGUEL DE LA TORRE OSTOS, y miembro DR. ING. MIGUEL ASTORAYME VALENZUELA se dio inicio a la sesión pública de sustentación de tesis para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la sustentación y aprobación de una tesis del Bachiller:

MIGUEL ANGEL HERRERA MORENO

El presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la tesis, así corno del resumen del expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su tesis titulada "ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE PRECIPITACIONES EXTREMAS Y CAUDALES DE MÁXIMAS AVENIDAS EN LAS SUBCUENCAS CULLHUAY, MINACANCHA Y HUAROS, CUENCA DEL RÍO CHILLÓN".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el presidente del mismo, invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la Sala de Sesión, para dar lectura a la calificación obtenida por el Bachiller, la misma que es:

17	DIECISIETE	APROBADO CON HONORES
(NUMERO)	(LETRAS)	(MENCIÓN)

El presidente del Jurado Dr. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller MIGUEL ANGEL HERRERA MORENO, Ingeniero Mecánico de Fluidos.
Siendo las 19:00 horas del mismo día, se levanta la sesión.

Dr. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA
PRESIDENTE

Dr. Ing. MIGUEL ASTORAYME VALENZUELA
MIEMBRO TITULAR

Mg. Ing. JUAN MIGUEL DE LA TORRE OSTOS
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Juan Miguel de la Torre Ostos mediante Dictamen N°008-EPIMF-2026-FCF-UNMSM de la tesis, cuyo título es "ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE PRECIPITACIONES EXTREMAS Y CAUDALES DE MÁXIMAS AVENIDAS EN LAS SUBCUENCAS CULLHUAY, MINACANCHA Y HUAROS, CUENCA DEL RÍO CHILLÓN", presentado por el bachiller Miguel Angel Herrera Moreno para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos,

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 8% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Lima,16 de octubre de 2026

Firma del Asesor _____

Nombres y Apellidos del asesor: Juan Miguel de la Torre Ostos

DNI: 09634918

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

Dedicatoria

A Dios, por la vida y la guía. A mi familia, por ser mi motor y mi refugio incondicional. Y al club Universitario de Deportes, porque de la garra aprendí que los grandes objetivos se logran luchando hasta el último minuto.

Agradecimientos

En primer lugar, expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesor de tesis, el MSc. Juan Miguel De La Torre Ostos, por su invaluable guía, su paciencia y el rigor académico que me brindó a lo largo de todo este proceso. Sus conocimientos y observaciones fueron fundamentales para estructurar y culminar con éxito esta investigación.

Asimismo, agradezco profundamente al Dr. Douglas Sarango Julca y el MSc. Miguel Angel Astorayme Valenzuela. Sus valiosos comentarios, correcciones y agudas observaciones enriquecieron notablemente el contenido y la calidad de esta tesis.

Finalmente, hago extensivo este agradecimiento a mis compañeros de trabajo. Agradezco sinceramente su comprensión, el apoyo diario en el entorno laboral y las facilidades brindadas durante este tiempo. Compartir las responsabilidades cotidianas con un equipo tan profesional y empático fue clave para lograr la culminación de mis estudios y de este proyecto.

RESUMEN

Este estudio propone un análisis hidrológico y la estimación de precipitaciones extremas y caudales de máximas avenidas en las subcuencas de Cullhuay, Minacancha, y Huaros, ubicadas en la cuenca alta del río Chillón en Perú. La región, caracterizada por su topografía accidentada, sufre de intensas precipitaciones estacionales entre diciembre y marzo, lo que provoca inundaciones y pérdidas materiales y humanas. La ausencia de registros de caudales máximos en la zona ha impedido la implementación de medidas preventivas efectivas, lo que aumenta el riesgo de desastres.

El trabajo busca estimar las precipitaciones y caudales máximos para diferentes periodos de retorno, usando datos grillados de precipitación PISCO v2.1 y modelos de precipitación-escorrentía como el SCS, Snyder y Clark. Los resultados servirán como base técnica para el diseño de futuras infraestructuras de contención y planificación de medidas de prevención y mitigación. La aplicación de los modelos se realizará de forma directa mediante su formulación matemática, utilizando los caudales estimados mediante análisis probabilístico en la estación hidrométrica Obrajillo como valores de referencia para la evaluación comparativa de los métodos empleados. El objetivo final es contribuir a la mejora de la eficiencia operativa y la sostenibilidad en la gestión del recurso hídrico en la cuenca del Alto Chillón.

Palabras clave: Precipitaciones extremas, caudales de avenidas, cuenca del río Chillón, análisis hidrológico, modelamiento hidrológico, PISCO v2.1.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 18

1.1 Realidad problemática 18

1.1.1 Problema general 19

1.1.2 Problemas específicos 19

1.2 Objetivos 20

1.2.1 Objetivos Generales 20

1.2.2 Objetivos Específicos 20

1.3 Justificación 21

CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO 22

2.1 Hidrología 22

2.2 Eventos Extremos y Caudales de Máximas Avenidas 22

2.3 Precipitación Grillada 23

2.4 Modelos Digitales de Elevación (DEM) 23

2.5 Producto de Precipitación Grillada PISCOp v2.1 23

2.6 Análisis de Frecuencia y Desagregación Lluvia-Intensidad 24

2.7 Funciones de Distribución de Probabilidad 24

2.8 Desagregación Temporal y Curvas IDF 25

2.9 Modelamiento Lluvia-Escorrentía y Ruteo en Cauces 25

2.10 Método de Pérdidas por Infiltración (SCS-CN)..... 25

2.11 Métodos de Transformación Lluvia-Escorrentía 26

2.12 Tránsito de Avenidas en Cauces (Método de Muskingum)..... 27

2.13 Calibración y Evaluación del Desempeño del Modelo..... 27

CAPÍTULO 3: HIPÓTESIS Y VARIABLES..... 29

3.1 Hipótesis 29

3.1.1 Hipótesis general..... 29

3.1.2 Hipótesis específicas 29

3.2 Variables 30

3.2.1 Variable independiente 30

3.2.2 Variable dependiente..... 30

CAPÍTULO 4: MATERIALES Y MÉTODOS 32

4.1 Área de estudio 32

4.2 Tipo de investigación..... 32

4.3 Diseño de investigación 32

4.4 Método de investigación 33

4.5 Población..... 33

4.6 Tamaño de muestra 33

CAPÍTULO 5: METODOLOGIA 35

5.1 Procedimiento para el objetivo especifico 1 35

5.1.1 Obtención de data (mediante el uso de un Sistema de información Geográfica) en formato Shapefile. 35

5.1.2 Procesar la data mediante el uso de un Sistema de información Geográfica 36

5.1.3 Determinación de elevaciones mediante la plataforma Alaska Satellite Facility 38

5.1.4 Procesamiento inicial del DEM y delimitación hidrográfica mediante ArcSWAT 40

5.1.5 Agrupación y verificación de consistencia cartográfica de las subcuencas delimitadas 47

5.1.6 Determinación de parámetros geomorfológicos y fisiográficos 54

5.1.6.1 Parámetros geomorfológicos 54

5.1.7 Ingreso de información al modelo hidrológico HEC-HMS 75

5.2 Procedimiento para el objetivo especifico 2 76

5.2.1 Descarga y caracterización del producto PISCOp v2.1 76

5.2.2 Definición espacial e intersección de las grillas con las subcuencas 78

5.2.3 Extracción automatizada y agregación espacial de precipitación 80

5.2.4 Generación de series de precipitación máxima y ajuste probabilístico 82

5.2.5 Construcción de curvas IDF e implementación al programa HEC-HMS 86

5.3 Procedimiento para el objetivo especifico 3 97

5.3.1 Identificación de estación hidrométrica y procesamiento de datos históricos 97

5.3.2 Configuración hidromorfológica del modelo HEC-HMS.....103

5.3.3 Implementación de métodos de transformación lluvia – escorrentía 114

5.3.4 Método de transformación de hidrograma unitario de SCS.....114

5.3.5 Método de transformación de Hidrograma Unitario de Sneyder115

5.3.6 Método de transformación Hidrograma Unitario de Clark.....116

5.3.7 Simulaciones preliminares y evaluación comparativa del modelo117

5.3.8 Análisis de respuesta del método de Hidrograma Unitario SCS120

5.3.9 Determinación de parámetros del método de Hidrograma Unitario de Snyder 123

5.3.10 Análisis de sensibilidad del método de Hidrograma Unitario de Clark 125

5.3.11 Evaluación comparativa del desempeño de los modelos 127

5.4 Procedimiento para el objetivo especifico 4 128

5.4.1 Procedimiento de evaluación del desempeño del modelo hidrológico 128

5.4.2 Comparación de caudales simulados y observados 129

5.4.3 Evaluación estadística del desempeño 130

5.4.4 Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) 132

5.4.5 Análisis comparativo del comportamiento hidrológico 133

5.4.6 Matriz multicriterio de selección del modelo 133

CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....134

6.1 Resultado para el objetivo específico 1 134

6.2 Resultado para el objetivo específico 2 135

6.3 Resultado para el objetivo específico 3 137

6.4 Resultado para el objetivo específico 4 137

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 138

7.1 Conclusiones..... 138

7.2 Recomendaciones 140

CAPÍTULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2 Exportación de la subcuenca Alto Chillón en formato shapefile mediante ArcGIS 10.5 35

Figura 3 Delimitación de la subcuenca Alto Chillón y unidades hidrográficas adyacentes 35

Figura 4 Propiedades del sistema de coordenadas de la subcuenca Alto Chillón en ArcGIS 10.5 36

Figura 5 Conversión de la subcuenca Alto Chillón a formato KML mediante la herramienta Layer To KML en ArcGIS 10.5 37

Figura 6 Interfaz de búsqueda y definición del área de interés en la plataforma ASF Data Search – Vertex 38

Figura 7 Selección y descarga de modelos digitales de elevación ALOS PALSAR en la plataforma ASF Data Search – Vertex 39

Figura 8 Generación del mosaico de modelos digitales de elevación (DEM) para la subcuenca Alto Chillón 40

Figura 9 Recorte del modelo digital de elevación (DEM) de la subcuenca Alto Chillón mediante la herramienta Clip en ArcGIS 10.5 41

Figura 10 Modelo digital de elevación (DEM) recortado al ámbito de la subcuenca Alto Chillón 42

Figura 11 Delimitación de la subcuenca Alto Chillón mediante el módulo Watershed Delineation de ArcSWAT 43

Figura 12 Red de drenaje generada a partir del modelo digital de elevación en la subcuenca Alto Chillón 44

Figura 13 Delimitación de la subcuenca Alto Chillón y red de drenaje sobre el modelo digital de elevación 45

Figura 14 Identificación del cauce principal del río Chillón en la subcuenca Alto Chillón.....45

Figura 15 Subcuencas internas y trayectorias de flujo máximo (Longest Flow Path) en la subcuenca Alto Chillón.....46

Figura 16 Agrupación de unidades hidrográficas delimitadas para la conformación de las subcuencas de estudio.....48

Figura 17 Unificación de unidades hidrográficas para la conformación de la subcuenca Huaros mediante la herramienta Dissolve.....48

Figura 18 Subcuencas delimitadas y numeradas previo al ajuste de límites en la subcuenca Alto Chillón.....49

Figura 19 Corrección y verificación de consistencia de los límites de las subcuencas de estudio mediante imágenes satelitales.....51

Figura 20 Ajuste del divisor de aguas entre subcuencas a partir del análisis del relieve 52

Figura 21 Simplificación geométrica del polígono de la subcuenca Cullhuay mediante la herramienta Simplify Polygon.....52

Figura 22 Subcuencas de estudio Cullhuay, Minacancha y Huaros en la cuenca alta del río Chillón 53

Figura 23 Cálculo del perímetro de la subcuenca Huaros mediante la herramienta Calculate Geometry en ArcGIS 55

Figura 24 Determinación de la longitud del cauce principal en las subcuencas de estudio 56

Figura 25 Aplicación del Raster Calculator para la identificación de áreas de alta altitud en la subcuenca Alto Chillón.....58

Figura 26 Red de drenaje y delimitación final de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros 59

Figura 27 Conversión de resultados raster a formato vectorial mediante la herramienta Raster to Polyline en ArcGIS 60

Figura 28 Recorte de la red hídrica general al ámbito de la subcuenca Minacancha mediante la herramienta Clip 60

Figura 29 Red de drenaje final asociada a las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros 61

Figura 30 Cálculo y análisis estadístico de la longitud de tramos de la red de drenaje en la subcuenca Huaros 62

Figura 31 Determinación del orden de corrientes de la red de drenaje mediante el método de Strahler 63

Figura 32 Conversión del raster de orden de corrientes a formato vectorial mediante la herramienta Raster to Polyline 65

Figura 33 Recorte del orden de corrientes al ámbito de la subcuenca Huaros mediante la herramienta Clip 65

Figura 34 Orden de corrientes de la red de drenaje en las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros 66

Figura 35 Cauces principales de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros 68

Figura 36 Obtención de parámetros altitudinales y de pendiente de los cauces principales mediante la herramienta Add Surface Information 68

Figura 37 Cálculo del mapa de pendientes a partir del modelo digital de elevación en las subcuencas de estudio 70

Figura 38 Cálculo de estadísticas zonales de pendiente para la subcuenca Minacancha 71

Figura 39 Resultados estadísticos de pendiente para la subcuenca Cullhuay.....71

Figura 40 Cálculo de estadísticas zonales de altitud para la subcuenca Huaros.....72

Figura 41 Resultados estadísticos de altitud para la subcuenca Huaros.....73

Figura 42 Plataforma SENAMHI HSR–PISCO para la obtención de datos climáticos interpolados.....77

Figura 43 Visualización espacial de la precipitación PISCO en la cuenca alta del río Chillón.....78

Figura 44 Superposición de las subcuencas de estudio sobre la grilla espacial de los datos climáticos PISCO.....79

Figura 45 Selección de puntos representativos de la grilla PISCO dentro de las subcuencas de estudio.....80

Figura 46 Base de datos de estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis hidrológico.....81

Figura 47 Procesamiento y extracción de datos climáticos PISCO mediante el software R.....81

Figura 48 Intersección de la grilla PISCO con las subcuencas de estudio y áreas asociadas.....82

Figura 49 Análisis y ajuste de series hidrológicas a la distribución Normal mediante el software HIDROESTA 2.....85

Figura 50 Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) de precipitación para la subcuenca de estudio.....93

Figura 51 Hietograma de precipitación de diseño para la subcuenca Cullhuay.....93

Figura 52 Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) de precipitación para la subcuenca Cullhuay.....94

Figura 53 Hietograma de precipitación de diseño para la subcuenca Minacancha....95

Figura 54 Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) de precipitación para la subcuenca Minacancha 95

Figura 55 Hietograma de precipitación de diseño para la subcuenca Huaros 96

Figura 56 Ubicación y ficha de la estación hidrométrica Obrajillo en el Visor por Cuencas del SNIRH–ANA 97

Figura 57 Modelo de cuenca "AltoChillón" en HEC-HMS 4.12: importación del DEM y configuración inicial del terreno. 103

Figura 58 Preprocesamiento del DEM en HEC-HMS 4.12: relleno de sumideros (Preprocess Sinks) previo a la definición de drenaje 104

Figura 59 Red de drenaje y puntos de control definidos en HEC-HMS: subcuenca Huaros y estación Obrajillo 105

Figura 60 Delimitación de subcuencas en HEC-HMS mediante Delineate Elements (10 subcuencas) 106

Figura 61 Corrección y ajuste de subcuencas en HEC-HMS mediante Merge usando shapefiles de referencia (ArcGIS) 106

Figura 62 Distribución espacial del Número de Curva (CN) en condición de humedad normal (AMC II) en las subcuencas del área de estudio 108

Figura 63 Parámetros de pérdida SCS–Curve Number en HEC-HMS: CN y abstracción inicial por subcuenca (AltoChillón) 109

Figura 64 Configuración del Modelo Meteorológico en HEC-HMS para la evaluación comparativa: hietograma especificado (TR = 25 años) 111

Figura 65 Hietograma de diseño TR = 25 años en HEC-HMS: serie temporal de precipitación horaria (mm) 112

Figura 66 Hietograma de diseño TR = 25 años en HEC-HMS: distribución temporal de la precipitación (mm) 113

Figura 67 Definición del periodo e intervalo de simulación en HEC-HMS: Control Specifications (10 minutos) 113

Figura 68 Parámetros del hidrograma unitario SCS en HEC-HMS: tiempo de retardo (Lag Time) por subcuenca 114

Figura 69 Parámetros del hidrograma unitario Snyder en HEC-HMS: Lag Time y coeficiente de pico por subcuenca 115

Figura 70 Parámetros del hidrograma unitario Clark en HEC-HMS: tiempo de concentración y coeficiente de almacenamiento por subcuenca. 116

Figura 71 Punto de control en HEC-HMS: Junction "Obrajillo" como umbral de referencia hidrométrica (TR = 25 años) 118

Figura 72 Asignación de hietogramas de diseño TR = 25 años por subcuenca en HEC-HMS (Specified Hyetograph) 119

Figura 73 Creación de la corrida de simulación en HEC-HMS: asignación del nombre "TR25" (Create Simulation Run) 120

Figura 74 Ingreso de parámetros de pérdidas SCS–Curve Number en HEC-HMS: CN e Ia por subcuenca (AltoChillón) 121

Figura 75 Ingreso del tiempo de retardo. Lag Time en el modelo de transformación SCS Unit Hydrograph – HEC-HMS AltoChillón 122

Figura 76 Resultados globales de la simulación TR25 en HEC-HMS: caudal pico en el Junction "Obrajillo" 122

Figura 77 Parámetros del método Snyder Unit Hydrograph en HEC-HMS (AltoChillón): Lag Time y coeficiente de pico (Cp) por subcuenca 124

Figura 78 Resultados globales de la simulación TR25 con Snyder en HEC-HMS: caudal pico en el nodo Obrajillo 124

Figura 79 Parámetros del método Clark Unit Hydrograph en HEC-HMS (AltoChillón): Tc y coeficiente de almacenamiento (R) por subcuenca.....125

Figura 80 Resultados globales de la simulación TR25 con Clark en HEC-HMS: caudal pico en el nodo Obrajillo 126

Figura 81 Curvas de caudal máximo vs. período de retorno: comparación entre estación Obrajillo y simulaciones HEC-HMS (SCS, Snyder y Clark 130

Figura 1 Ubicación y delimitación de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros en la cuenca alta del río Chillón.....135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros geomorfológicos y fisiográficos de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros 75

Tabla 2 Distribución espacial de los valores de precipitación PISCO y sus pesos por subcuenca 83

Tabla 3 Distribuciones probabilísticas seleccionadas para las series de precipitación máxima por subcuenca 85

Tabla 4 Valores de precipitación extrema (mm) por período de retorno y subcuenca 86

Tabla 5 Precipitación máxima estimada para distintos periodos de retorno en las subcuencas Cullhuay, Huaros y Minacancha 87

Tabla 6 Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) de precipitación para la subcuenca Cullhuay 88

Tabla 7 Valores de intensidad de precipitación para distintos periodos de retorno y duraciones en la subcuenca Huaros 89

Tabla 8 Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) de precipitación para la subcuenca Minacancha 89

Tabla 9 Intensidades de precipitación (mm/h) para distintos periodos de retorno y duraciones en la subcuenca Cullhuay 90

Tabla 10 Intensidades de precipitación (mm/h) para distintos periodos de retorno y duraciones en la subcuenca Minacancha 91

Tabla 11 Intensidades de precipitación (mm/h) para distintos periodos de retorno y duraciones en la subcuenca Huaros 92

Tabla 12 Caudales medios diarios máximos mensuales y máximo anual (m^3/s) – Estación hidrométrica Obrajillo (1997–2019) 98

Tabla 13 Caudales máximos instantáneos mensuales y máximo anual (m^3/s) – Estación hidrométrica Obrajillo (1997–2019) 100

Tabla 14 Histograma histórico de caudales máximos instantáneos anuales – Estación hidrométrica Obrajillo (1997–2019) 101

Tabla 15 Caudales máximos instantáneos de diseño (Qmax) por período de retorno – Estación hidrométrica Obrajillo (Hidroesta) 102

Tabla 16 Estimación del tiempo de concentración (Tc) y tiempo de retardo (Tl) por subcuenca según metodologías empíricas (SCS) 110

Tabla 17 Parámetros de entrada y rangos técnicos recomendados para los métodos de transformación en HEC-HMS 117

Tabla 18 Cálculo del Número de Curva (CN) representativo por subcuenca (AMC II) y parámetros derivados (S e Ia) 120

Tabla 19 Comparación de caudales pico simulados para TR = 25 años y evaluación del error por método de transformación 127

Tabla 20 Comparación de caudales máximos observados y simulados por período de retorno (SCS, Snyder y Clark) 129

Tabla 21 Error porcentual de caudales simulados respecto al observado por período de retorno (SCS, Snyder y Clark) 131

Tabla 22 Cálculo de errores cuadrados y RMSE para la evaluación de caudales simulados 131

Tabla 23 Cálculo del índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE): sumas cuadráticas y resultado por método 132

Tabla 24 Evaluación multicriterio de métodos de transformación (SCS, Snyder y Clark) para la selección del mejor desempeño 134

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad problemática

La región andina del Perú, y en particular la cuenca alta del río Chillón, se ve afectada de manera recurrente por precipitaciones estacionales intensas entre los meses de diciembre y marzo (SENAMHI, 2022; Vilcano et al., 2022). Estas lluvias generan incrementos bruscos en los caudales de los ríos y quebradas principales, provocando desbordes e inundaciones en las localidades asentadas a lo largo del valle (MINAM, 2014; CENEPRED, 2014). Como consecuencia, se registran daños frecuentes en áreas de cultivo, viviendas e infraestructura vial, además de la afectación de servicios básicos como el abastecimiento de agua potable (INDECI, 2024).

La cuenca del Alto Chillón, que comprende principalmente los distritos de Huaros, Canta y San Buenaventura, presenta una topografía fuertemente accidentada y una densa red de drenaje, con numerosas quebradas que confluyen hacia el cauce principal (ANA, 2003; INGEMMET, 2021). En este contexto físico, los eventos de lluvia intensa se traducen rápidamente en avenidas súbitas que incrementan la peligrosidad hidrológica del territorio. A ello se suma la presencia de infraestructura crítica –puentes, carreteras, redes eléctricas y de saneamiento– localizada en zonas potencialmente inundables, lo que amplifica el impacto de cada evento extremo (MINAM, 2014).

Un aspecto crítico de la problemática es la ausencia de registros sistemáticos de caudales máximos en la parte alta de la cuenca del río Chillón, donde la red hidrométrica es escasa y presenta discontinuidades temporales (ANA, 2003; MINAM, 2014). La escasez de estaciones hidrométricas y series históricas de calidad limita la posibilidad de caracterizar las avenidas para distintos periodos de retorno y, en consecuencia, dificulta el diseño de obras de contención, defensas ribereñas y otras medidas estructurales de protección. Esta brecha de información hidrológica también restringe la elaboración de mapas de peligro y vulnerabilidad,

lo que deja a la población local en una situación de riesgo permanente frente a eventos extremos (MINAM, 2014; UNISDR, 2011).

Además de los daños materiales, las inundaciones favorecen la proliferación de enfermedades de origen hídrico y de vectores, así como la ocurrencia de accidentes por la caída de taludes, arrastre de árboles y colapso de líneas eléctricas (MINAM, 2014). La ausencia de un análisis hidrológico integral y de estimaciones confiables de precipitaciones extremas y caudales de máximas avenidas constituye, por tanto, una limitación significativa para la seguridad y el desarrollo sostenible de la cuenca del Alto Chillón. En este escenario, se hace necesaria una investigación que, a partir de productos de precipitación grillada como PISCO v2.1 y del uso de modelos lluvia–escorrentía, permita estimar caudales máximos para distintos periodos de retorno y genere una base técnica sólida para la planificación y la implementación de medidas de prevención y mitigación de inundaciones en las subcuencas de Cullhuay, Minacancha y Huaros (Aybar et al., 2020; Vilcano et al., 2022).

Formulación del problema

1.1.1 Problema general

¿Cuál es el comportamiento hidrológico de las precipitaciones extremas y los caudales de máximas avenidas en las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros?

1.1.2 Problemas específicos

Problema específico 1. ¿Cómo se obtienen y caracterizan los parámetros geomorfológicos de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros para su incorporación en el modelo hidrológico?

Problema específico 2. ¿Cómo se utilizan los datos de precipitación PISCOp V.2?1 para estimar las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) en las subcuencas de estudio?

Problema específico 3. ¿Qué modelo de precipitación-escorrentía es el más adecuado para la estimación de los caudales de máximas avenidas en las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros?

Problema específico 4 ¿Cómo se evalúa la consistencia y precisión de los caudales simulados por el modelo frente a los registros hidrométricos de la Estación Obrajillo?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Generales

Analizar el comportamiento hidrológico de las precipitaciones extremas y los caudales de máximas avenidas en las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, mediante la aplicación de modelos de simulación para distintos periodos de retorno.

1.2.2 Objetivos Específicos

1.2.2.1 Objetivo Específico 1. Obtener y caracterizar los parámetros geomorfológicos y fisiográficos de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, para su posterior incorporación en el modelo hidrológico.

1.2.2.2 Objetivo Específico 2. Utilizar los datos de precipitación grillados PISCOp V.2.1 para la estimación de las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) para cada subcuenca.

1.2.2.3 Objetivo Específico 3. Determinar el modelo de precipitación-escorrentía más adecuado para la estimación de los caudales de máximas avenidas en el área de estudio.

1.2.2.4 Objetivo Específico 4. Contrastar la respuesta hidrológica del modelo frente a los registros históricos observados en la Estación Hidrométrica Obrajillo.

1.3 Justificación

La presente investigación es fundamental debido a la carencia de registros hidrométricos detallados en la cuenca alta del río Chillón, una región que presenta un elevado riesgo frente a precipitaciones intensas y avenidas súbitas. La estimación de precipitaciones extremas y caudales máximos mediante el uso de información grillada (PISCO v2.1) y modelos hidrológicos reconocidos internacionalmente, como SCS, Snyder y Clark, permite suplir la limitación de datos observados y generar información clave para la gestión del riesgo hídrico. Este estudio aporta evidencia científica y técnica que contribuye al diseño de obras de prevención, tales como defensas ribereñas, canales de derivación y sistemas de alerta temprana, constituyéndose como un insumo relevante para municipalidades distritales, gobiernos regionales, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y Defensa Civil. Asimismo, fortalece la investigación en hidrología de montaña en el Perú, demostrando la aplicabilidad de datos satelitales y modelos de simulación en cuencas con escasa instrumentación.

CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO

2.1 Hidrología

La cuenca hidrográfica se define como la unidad territorial delimitada por la divisoria de aguas donde el ciclo del agua interactúa de forma sistémica. Weis (2021) señala que la cuenca es el espacio óptimo para la planificación y gestión de los recursos hídricos. En este espacio, la cantidad y distribución de la escorrentía están condicionadas por las características climáticas, la fisiografía del terreno y los patrones de precipitación. Al respecto, L'vovich (1979) destaca que la comprensión global del balance hídrico es fundamental para prever la disponibilidad del agua y los eventos extremos.

En zonas andinas de alta montaña, las cuencas presentan pendientes pronunciadas y marcados gradientes altitudinales. En su estudio sobre la cuenca del río Ilave, Zubieta et al. (2018) explican que la variabilidad espacial de las lluvias en regiones de gran elevación dificulta la estimación precisa de caudales. Esta condición genera respuestas hidrológicas rápidas ante tormentas severas, convirtiendo a las subcuencas de cabecera en zonas vulnerables a crecidas repentinas

2.2 Eventos Extremos y Caudales de Máximas Avenidas

Un evento hidrológico extremo es un fenómeno de alta intensidad y baja frecuencia de ocurrencia. El caudal de máxima avenida (Q_{pico}) representa el pico de descarga en un hidrograma producido por una tormenta de diseño. En la tesis de Baltazar Miranda (2021), realizada en la subcuenca del río Shullcas, se resalta que la estimación adecuada de estos

caudales máximos es indispensable para zonificar áreas de peligro por inundación y diseñar infraestructuras de protección ribereña.

De igual manera, Bolaños Saravia y Castillo Castillo (2024) investigaron el tránsito de avenidas máximas en la zona del lago Chinchaycocha utilizando el modelo HEC-HMS. En dicho trabajo concluyen que el análisis riguroso de las avenidas máximas permite prever la magnitud de inundaciones futuras y optimizar el dimensionamiento de las obras hidráulicas.

2.3 Precipitación Grillada

2.4 Modelos Digitales de Elevación (DEM)

Los Modelos Digitales de Elevación son representaciones discretas de la topografía que permiten obtener la geometría de la red de drenaje. Según Maidment (1993), el procesamiento de datos ráster en Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilita la automatización en el cálculo de parámetros morfológicos como el área, perímetro, pendiente media y longitud del cauce principal.

Chow et al. (1994) mencionan que la precisión de la delimitación hidrológica depende directamente de la resolución del modelo espacial utilizado. En este sentido, un DEM de alta resolución (como ALOS PALSAR de 12.5 metros) ofrece un nivel de detalle óptimo para subcuencas andinas con relieve complejo.

2.5 Producto de Precipitación Grillada PISCOp v2.1

En el Perú, la escasez y desigual distribución de estaciones meteorológicas en las zonas altas dificultan el monitoreo hidrológico tradicional. Para superar esta limitación, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2017) desarrolló el producto grillado PISCOp v2.1 (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations).

Aybar et al. (2020) detallan que PISCOp v2.1 combina datos observados de estaciones meteorológicas con productos satelitales (como CHIRPS), generando un registro de precipitación diaria a una resolución espacial de 0.1° (~10 km). Asimismo, Zubieta et al. (2018) evaluaron el desempeño de datos observados y satelitales, concluyendo que los productos grillados procesados son representativos para el modelamiento de caudales en cuencas andinas con escasa instrumentación.

2.6 Análisis de Frecuencia y Desagregación Lluvia-Intensidad

2.7 Funciones de Distribución de Probabilidad

Para estimar las lluvias extremas asociadas a diferentes Periodos de Retorno (T), se ajustan las series de precipitación máxima en 24 horas a funciones teóricas de probabilidad. Chow et al. (1994) y Viessman y Lewis (2002) describen las formulaciones matemáticas más extendidas en hidrología:

- **Distribución Gumbel (Valores Extremos Tipo I):**

Modela el comportamiento de los valores máximos anuales independientes. Su función de acumulación viene dada por:

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\alpha}{\beta}\right)\right)$$

donde α es el parámetro de ubicación y β el de escala.

- **Distribución Log-Pearson Tipo III:**

Esta distribución aplica una transformación logarítmica a la variable original $y = \log(x)$ y toma en cuenta el coeficiente de asimetría. Es la distribución estándar recomendada para eventos máximos de precipitación y caudales en cuencas complejas.

- **Prueba de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov:**

Permite contrastar si los datos observados se ajustan a la función probabilística teórica seleccionada. Evalúa la diferencia máxima absoluta entre la distribución empírica $F_o(x)$ y la teórica $F_t(x)$:

$$D_{máx} = \max |F_o(x) - F_t(x)|$$

2.8 Desagregación Temporal y Curvas IDF

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2011), en su Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje, señala que la conversión de lluvias diarias a duraciones menores se realiza mediante métodos de desagregación empírica. Entre ellos, la ecuación de Dick y Peschke relaciona la precipitación para una duración t (en minutos) con la precipitación máxima diaria (P_{24h}):

$$P_t = P_{24h} \cdot \left(\frac{t}{1440}\right)^n$$

donde n es el exponente de desagregación característico.

A partir de las intensidades calculadas, Chow et al. (1994) indican que se construyen las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Posteriormente, mediante el método del Bloque Alterno, las intensidades de las curvas IDF se reordenan de forma simétrica para generar el hietograma de la tormenta de diseño sintética.

2.9 Modelamiento Lluvia-Escorrentía y Ruteo en Cauces

2.10 Método de Pérdidas por Infiltración (SCS-CN)

El modelo de abstracciones del *U.S. Soil Conservation Service* (1985) es uno de los métodos más difundidos para cuantificar la precipitación efectiva o escorrentía directa (P_e). Viessman y Lewis (2002) resumen la ecuación de infiltración del SCS de la siguiente forma:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

donde P es la lluvia total, I_a la abstracción inicial ($I_a = 0.2S$) y S la retención potencial máxima del suelo. El parámetro S se calcula a través del Número de Curva (CN):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

El U.S. Soil Conservation Service (1985) establece que el valor de CN depende del uso de la tierra, la cobertura vegetal, el estado hidrológico y el Grupo Hidrológico del Suelo (A, B, C o D).

2.11 Métodos de Transformación Lluvia-Escorrentía

El manual técnico del U.S. Army Corps of Engineers (2025) para el software HEC-HMS contempla diversas metodologías para transformar la lluvia efectiva en un hidrograma de escorrentía directa:

- **Hidrograma Unitario del SCS:** El U.S. Soil Conservation Service (1985) desarrolló este modelo sintético adimensional que relaciona el caudal pico (Q_p) con el tiempo al pico (T_p):

  $$Q_p = \frac{2.08 \cdot A \cdot P_e}{T_p}$$

  donde A representa el área de la subcuenca.

- **Hidrograma Unitario de Snyder:** En su trabajo seminal, Snyder (1938) propuso ecuaciones empíricas para derivar el hidrograma sintético a partir de la geometría de la cuenca. Snyder determina el tiempo de retardo (t_p) y el caudal pico (Q_p) mediante los coeficientes regionales C_t y C_p:

  $$t_p = C_t \cdot (L \cdot L_c)^{0.3}$$

$$Q_p = \frac{2.75 \cdot C_p \cdot A}{t_p}$$

donde L es la longitud del cauce principal y L_c es la distancia desde la salida hasta el centroide de la cuenca.

- **Hidrograma Unitario de Clark:** Clark (1945) introdujo un método de transformación que contempla dos procesos independientes: la traducción del flujo mediante un histograma área-tiempo y el almacenamiento o atenuación lineal en la cuenca mediante el tiempo de concentración (T_c) y un coeficiente de almacenamiento (R).

2.12 Tránsito de Avenidas en Cauces (Método de Muskingum)

Chow et al. (1994) explican que el tránsito hidrológico de ondas de avenida en un cauce permite determinar la atenuación y el desfase temporal del hidrograma a lo largo del río. El U.S. Army Corps of Engineers (2025) señala que el método de Muskingum resuelve la ecuación de continuidad junto con la relación de almacenamiento prismático y de cuña:

$$S = K \cdot [X \cdot I + (1 - X) \cdot O]$$

donde K es el tiempo de tránsito del flujo en el tramo, X es un factor de ponderación de la forma del flujo ($0 \leq X \leq 0.5$), I es el caudal de entrada y O es el caudal de salida.

2.13 Calibración y Evaluación del Desempeño del Modelo

Para verificar la capacidad predictiva de las simulaciones frente a los registros de caudales observados en la estación hidrométrica, se aplican criterios estadísticos de bondad de ajuste.

Salas-Martínez et al. (2014), al modelar la cuenca del río Mixteco, indican que el Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es una métrica estándar en hidrología para comparar la varianza de las desviaciones respecto a los datos observados:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}\right)^2}$$

Según Riccardi et al. (2013), valores de NSE cercanos a 1 demuestran una excelente concordancia entre la simulación y los caudales reales. Asimismo, la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) cuantifica el promedio de las diferencias absolutas:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}\right)^2}$$

Un valor de $RMSE$ próximo a cero indica una baja magnitud global del error en las estimaciones del modelo hidrológico.

CAPÍTULO 3: HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

3.1.1.1 El análisis hidrológico, mediante la aplicación de modelos de simulación, permite estimar con precisión el comportamiento de las precipitaciones extremas y los caudales de máximas avenidas en las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, para distintos periodos de retorno.

3.1.2 Hipótesis específicas

3.1.2.1 Hipótesis especifica 1.

3.1.2.2 La caracterización de los parámetros geomorfológicos y fisiográficos de las subcuencas, utilizando sistemas de información geográfica, es un paso fundamental para la modelación hidrológica.

3.1.2.3 Hipótesis especifica 2.

3.1.2.4 Es posible estimar las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) a partir de los datos de precipitación grillados PISCOp V.2.1, obteniendo resultados fiables para el área de estudio.

3.1.2.5 Hipótesis específica 3.

3.1.2.6 El modelo HEC-HMS, al presentar una estructura que permite la aplicación directa de los métodos de precipitación-escorrentía seleccionados, es la herramienta más adecuada para simular y estimar los caudales de máximas avenidas en las subcuencas de estudio.

3.1.2.7 Hipótesis específica 4.

3.1.2.8 Los caudales de máximas avenidas simulados por el modelo hidrológico presentan una alta concordancia con los registros históricos de la Estación Hidrométrica Obrajillo.

3.2 Variables

3.2.1 Variable independiente

Precipitación Extrema.

a) Definición de la Variable:

La precipitación extrema es la cantidad de lluvia que excede significativamente los promedios históricos, medida en milímetros (mm). Esta variable es el factor principal que genera el incremento en el caudal de los ríos y, por lo tanto, es clave para la estimación de las avenidas máximas. Se obtiene a partir de datos grillados y registros de estaciones terrestres.

Dimensiones e Indicadores:

D1: Precipitación Diaria Máxima

Indicadores: Valor de la precipitación máxima diaria registrada en las subcuencas (mm), para diferentes periodos de retorno.

D2: Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Indicadores: Relación entre la intensidad de la lluvia, su duración y su frecuencia (periodo de retorno), que permite caracterizar el comportamiento de la precipitación en la cuenca.

3.2.2 Variable dependiente

Caudal de Avenidas Máximas.

b) Definición de la Variable:

El caudal de avenidas máximas es el volumen de agua que pasa por un punto de la cuenca en un periodo determinado, medido en metros cúbicos por segundo (m3/s), durante un

evento de precipitación extrema. La estimación de este caudal es el objetivo principal del estudio, ya que es el parámetro clave para el diseño de medidas de prevención de inundaciones

Dimensiones e Indicadores:

D1: Caudal Máximo Estimado

Indicadores: Valor del caudal máximo (m3/s) calculado para las subcuencas, utilizando modelos hidrológicos y los datos de precipitación extrema.

D2: Hidrograma de Crecida

Indicadores: Representación gráfica del caudal en función del tiempo, que muestra el comportamiento de la escorrentía superficial en respuesta a un evento de precipitación.

CAPÍTULO 4: MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio

El área de estudio abarca las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, localizadas en la parte alta de la cuenca del río Chillón, dentro de los distritos de San Buenaventura, Huaros y Canta (Provincia de Canta, Departamento de Lima). Se trata de una región con relieve topográfico complejo de alta montaña andina, cuyas altitudes varían aproximadamente entre los 2,700 m s.n.m. en el punto de control/salida y superan los 4,800 m s.n.m. en las divisorias de aguas, caracterizándose por pendientes pronunciadas y un régimen de escorrentía alimentado por precipitaciones estacionales y aportes glaciarios o lagunares en sus cabeceras.

4.2 Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada e hidrológica-tecnológica, enfocada en la resolución del problema de estimación de caudales de máximas avenidas en cuencas de alta montaña con escasa información pluviométrica. El nivel de investigación fue descriptivo-explicativo y de enfoque cuantitativo, al caracterizar los parámetros geomorfológicos del sistema hidrológico y evaluar cuantitativamente la relación causa-efecto entre eventos de lluvia extrema y las avenidas resultantes mediante modelamiento numérico determinístico.

4.3 Diseño de investigación

El estudio presentó un diseño no experimental, de corte transversal y observacional. No se realizaron intervenciones físicas ni manipulación de variables en laboratorio; el análisis se fundamentó en la recopilación, procesamiento y simulación computacional de datos históricos de precipitación, cartografía digital y registros hidrométricos observados en su entorno natural.

4.4 Método de investigación

Se empleó el método analítico-sintético y cuantitativo. El método analítico permitió descomponer el sistema hidrológico en sus componentes principales (geomorfología de subcuencas, precipitación grillada PISCOp v2.1 y registro de caudales de la Estación Obrajillo). El método sintético se utilizó para integrar dichos componentes mediante la configuración del modelo hidrológico lluvia-escorrentía en el software HEC-HMS 4.12, evaluando su precisión mediante la comparación estadística de los hidrogramas simulados con los registros de la estación de aforo.

4.5 Población

La población de este estudio es la cuenca hidrográfica del Alto Chillón. Específicamente, el universo de estudio se centra en las subcuencas de Cullhuay, Minacancha y Huaros, que son las áreas con mayor riesgo por eventos hidrológicos extremos. El análisis se enfocará en el sistema hidrológico de estas subcuencas y en su relación con la generación de caudales de avenidas máximas, con el fin de obtener datos para la planificación de medidas de prevención.

4.6 Tamaño de muestra

Para este estudio, el área de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros constituye la muestra principal. A pesar de que el estudio se limita a estas subcuencas, el modelo hidrológico y la metodología desarrollada son aplicables a otras áreas que presentan problemas similares con la falta de datos hidrométricos. La muestra se define por la disponibilidad de datos de precipitación grillados PISCO v2.1 para la región de estudio y por la presencia de una estación de aforo (Obrajillo), la cual permitirá obtener los valores de referencia necesarios para la evaluación comparativa del modelo. Este enfoque permite generar un modelo de análisis hidrológico que puede ser replicado en otras cuencas con características similares en la región

La técnica principal de esta investigación es el análisis de fuentes secundarias, enfocada en la recopilación de datos técnicos y científicos. Se utilizarán registros de información de diversas fuentes, incluyendo datos grillados de precipitación PISCO v2.1 y datos históricos de la estación hidrométrica de Obrajillo.

Estos datos son esenciales para alimentar, construir y evaluar el desempeño de los modelos hidrológicos computacionales. Dicha verificación se llevará a cabo contrastando los resultados del modelo con los registros reales de la estación hidrométrica, así como a través de la revisión técnica por especialistas en hidrología.

CAPÍTULO 5: METODOLOGIA

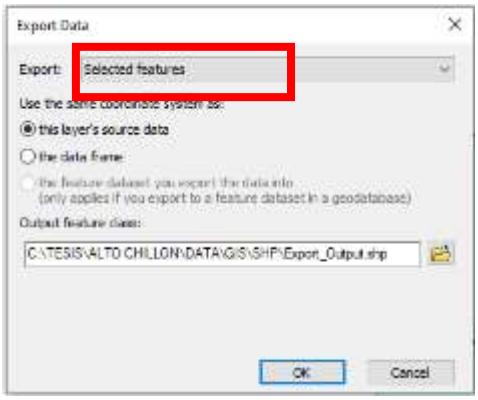
5.1 Procedimiento para el objetivo especifico 1

5.1.1 Obtención de data (mediante el uso de un Sistema de información Geográfica) en formato Shapefile.

Con el software de Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS 10.5 se visualizó el shapefile correspondiente a las subcuencas de la cuenca del río Chillón. A partir de ello, se seleccionó específicamente la subcuenca Alto Chillón y se procedió a extraerla mediante la herramienta “Export Data”, utilizando la opción “Selected Features”, con lo cual se obtuvo el archivo delimitado exclusivamente para dicha unidad hidrográfica.

Figura 1

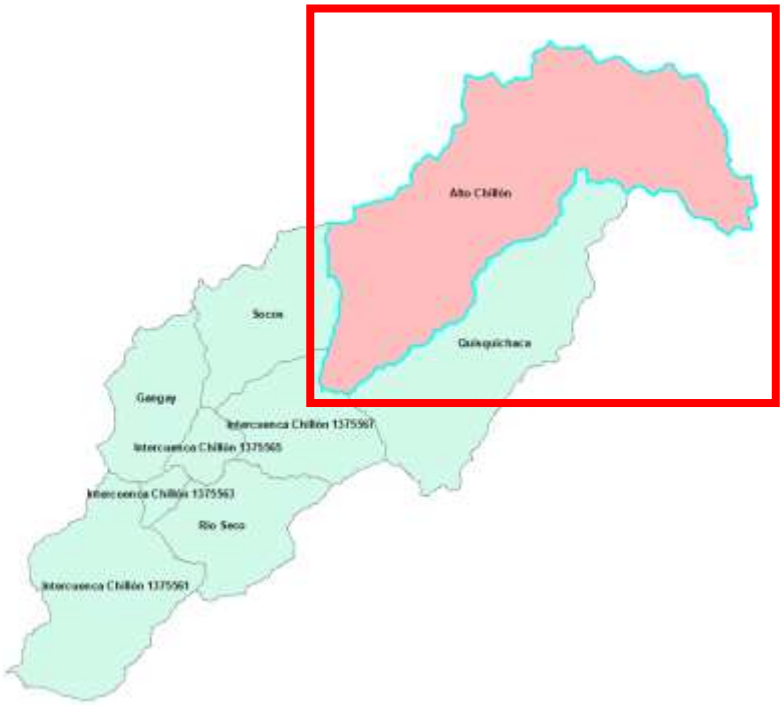
Exportación de la subcuenca Alto Chillón en formato shapefile mediante ArcGIS 10.5



Nota. Proceso de exportación de la subcuenca Alto Chillón como shapefile a partir de entidades seleccionadas en ArcGIS 10.5, conservando el sistema de coordenadas original. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2

Delimitación de la subcuenca Alto Chillón y unidades hidrográficas adyacentes



Nota. Delimitación de la subcuenca Alto Chillón y unidades hidrográficas vecinas de la cuenca del río Chillón.

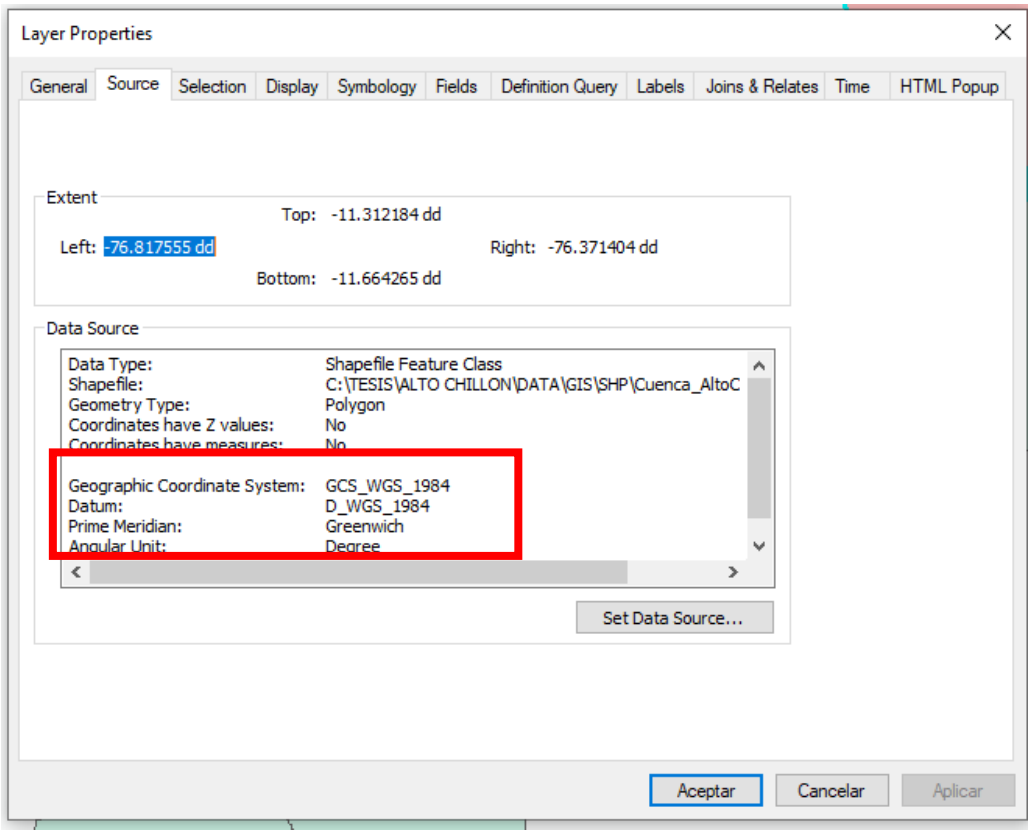
Fuente: *Elaboración propia.*

5.1.2 Procesar la data mediante el uso de un Sistema de información Geográfica

Se verificaron las coordenadas del shapefile correspondiente a la subcuenca Alto Chillón mediante la opción Properties > Source, constatándose que dicho archivo se encuentra en el sistema de coordenadas geográficas GCS WGS 1984. Dado que el área del proyecto se ubica en coordenadas proyectadas UTM 18S, pero la plataforma de descarga de información de elevación de la Alaska Satellite Facility (ASF) opera adecuadamente con sistemas geográficos, se decidió mantener el sistema GCS WGS 1984 para el proceso de importación y consulta de datos en dicha plataforma.

Figura 3

Propiedades del sistema de coordenadas de la subcuenca Alto Chillón en ArcGIS 10.5



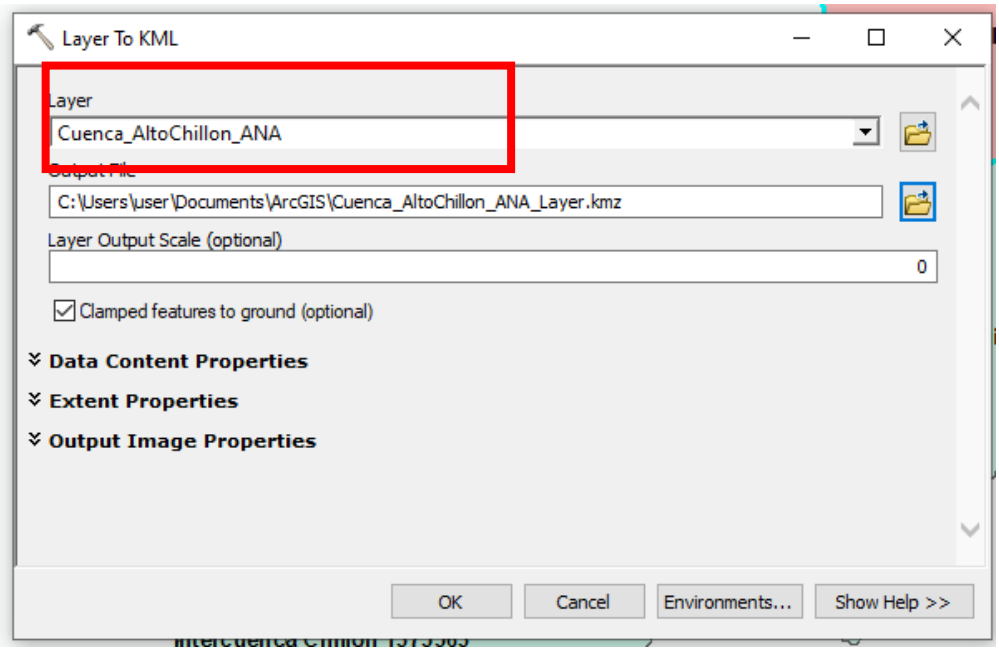
Nota. Verificación del sistema de coordenadas geográficas (GCS WGS 1984) de la subcuenca Alto Chillón en ArcGIS 10.5.

Fuente: *Elaboración propia.*

Se realizó la conversión del shapefile correspondiente a la subcuenca Alto Chillón al formato KML empleando la herramienta "Layer to KML" del software ArcGIS 10.5. Para ello, se seleccionó como capa de entrada ("Layer") el shapefile de la subcuenca previamente verificado, configurando los parámetros requeridos para garantizar la correcta exportación y compatibilidad con plataformas externas de descarga de información, como la ASF Data Search.

Figura 4

Conversión de la subcuenca Alto Chillón a formato KML mediante la herramienta Layer To KML en ArcGIS 10.5



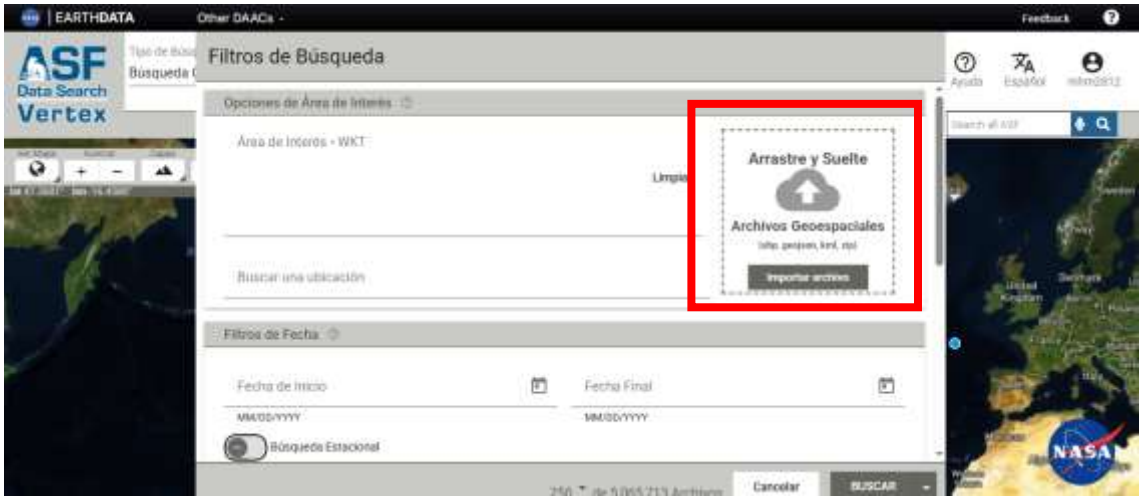
Nota. Proceso de conversión de la subcuenca Alto Chillón a formato KML/KMZ mediante ArcGIS 10.5. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

5.1.3 Determinación de elevaciones mediante la plataforma Alaska Satellite Facility

Se accedió a la plataforma de descarga satelital Alaska Satellite Facility – ASF Data Search. Tras iniciar sesión y configurar los parámetros de búsqueda en modalidad geográfica, así como seleccionar el conjunto de datos correspondiente al satélite ALOS PALSAR, se procedió a importar el archivo KML asociado a la subcuenca del Alto Chillón para su identificación dentro del visor y posterior descarga de los productos requeridos.

Figura 5

Interfaz de búsqueda y definición del área de interés en la plataforma ASF Data Search – Vertex

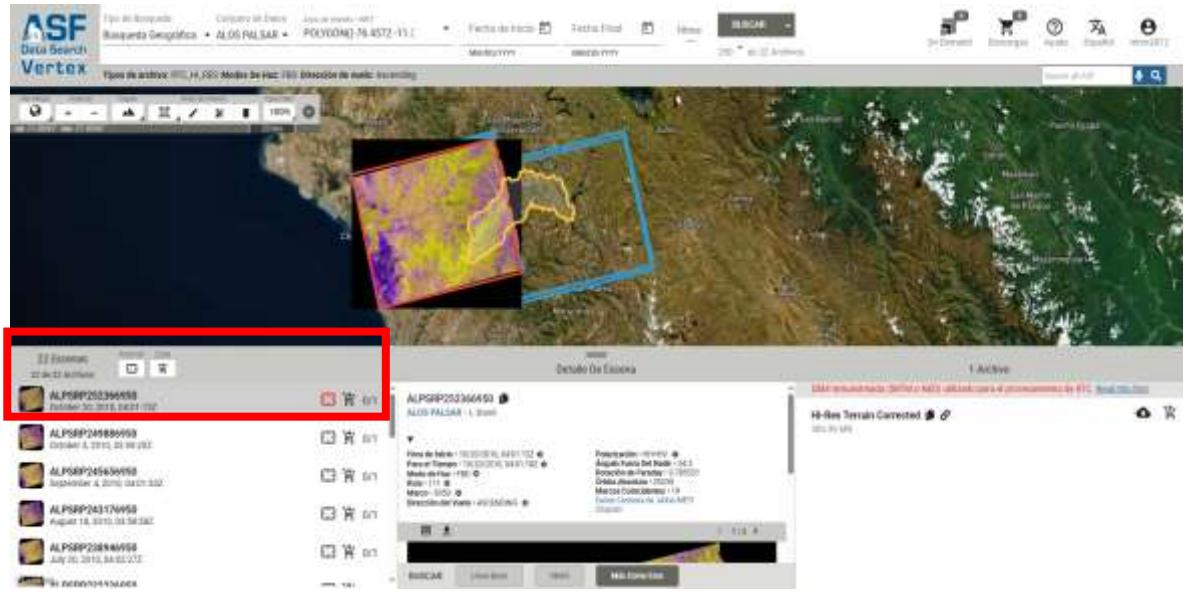


Nota. Interfaz de la plataforma ASF–Vertex empleada para la definición del área de interés y la descarga de información topográfica. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Adicionalmente, se seleccionó como tipo de producto Hi-Res Terrain Corrected (RTC), el modo de haz FBD y la dirección de adquisición ascendente, procediéndose luego a ejecutar la búsqueda. Como resultado, se identificó que la subcuenca se encuentra cubierta por dos modelos digitales de elevación (DEM), cuya extensión conjunta es de aproximadamente 6300 km², con una resolución espacial de 12.5 m × 12.5 m. Por tal motivo, se descargaron ambos archivos, identificados con los códigos ALPSRP252366950 y ALPSRP249886950.

Figura 6

Selección y descarga de modelos digitales de elevación ALOS PALSAR en la plataforma ASF Data Search – Vertex



Nota. Selección de escenas ALOS PALSAR (DEM RTC) para el área de estudio en la plataforma ASF–Vertex.

Fuente: *Elaboración propia.*

5.1.4 Procesamiento inicial del DEM y delimitación hidrográfica mediante ArcSWAT

Habiéndose completado la descarga de los dos modelos digitales de elevación, ambos DEM fueron visualizados en el software ArcGIS 10.5 para su verificación preliminar. Posteriormente, se empleó la herramienta Mosaic To New Raster con el fin de integrar los dos modelos en un único raster continuo que cubriera la totalidad del área de interés.

Figura 7

Generación del mosaico de modelos digitales de elevación (DEM) para la subcuenca Alto Chillón

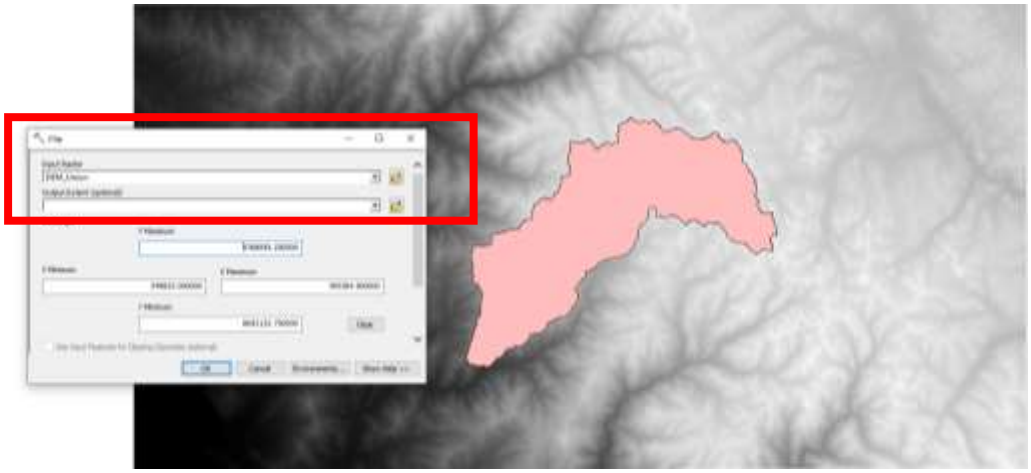


Nota. Mosaico de modelos digitales de elevación (DEM) empleado para el análisis hidrológico del área de estudio. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Una vez generado el DEM unificado, se procedió a recortarlo utilizando la herramienta Clip, tomando como límite el polígono de la subcuenca del Alto Chillón. Esta operación permitió obtener únicamente el sector requerido, optimizando así la eficiencia computacional para los procesos posteriores.

Figura 8

Recorte del modelo digital de elevación (DEM) de la subcuenca Alto Chillón mediante la herramienta Clip en ArcGIS 10.5

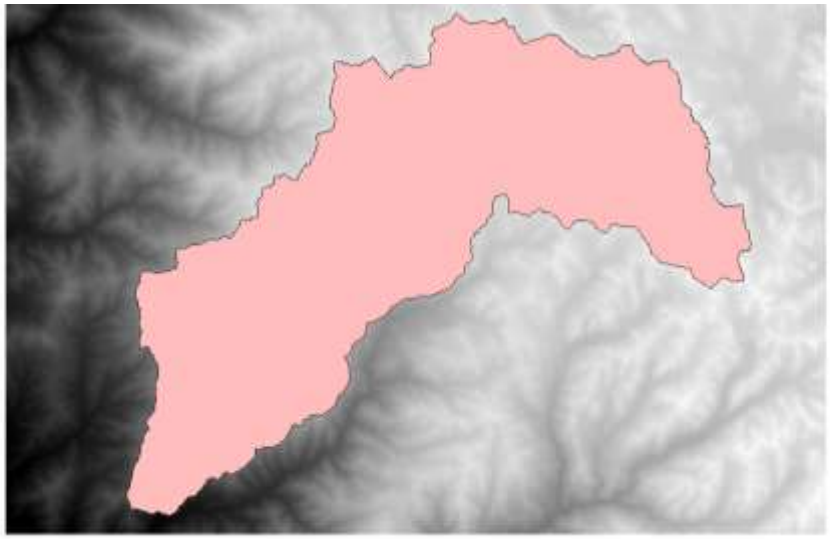


Nota. Recorte del DEM al ámbito de la subcuenca Alto Chillón para el análisis hidrológico.

Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 9

Modelo digital de elevación (DEM) recortado al ámbito de la subcuenca Alto Chillón



Nota. DEM recortado correspondiente a la subcuenca Alto Chillón.

Fuente: *Elaboración propia.*

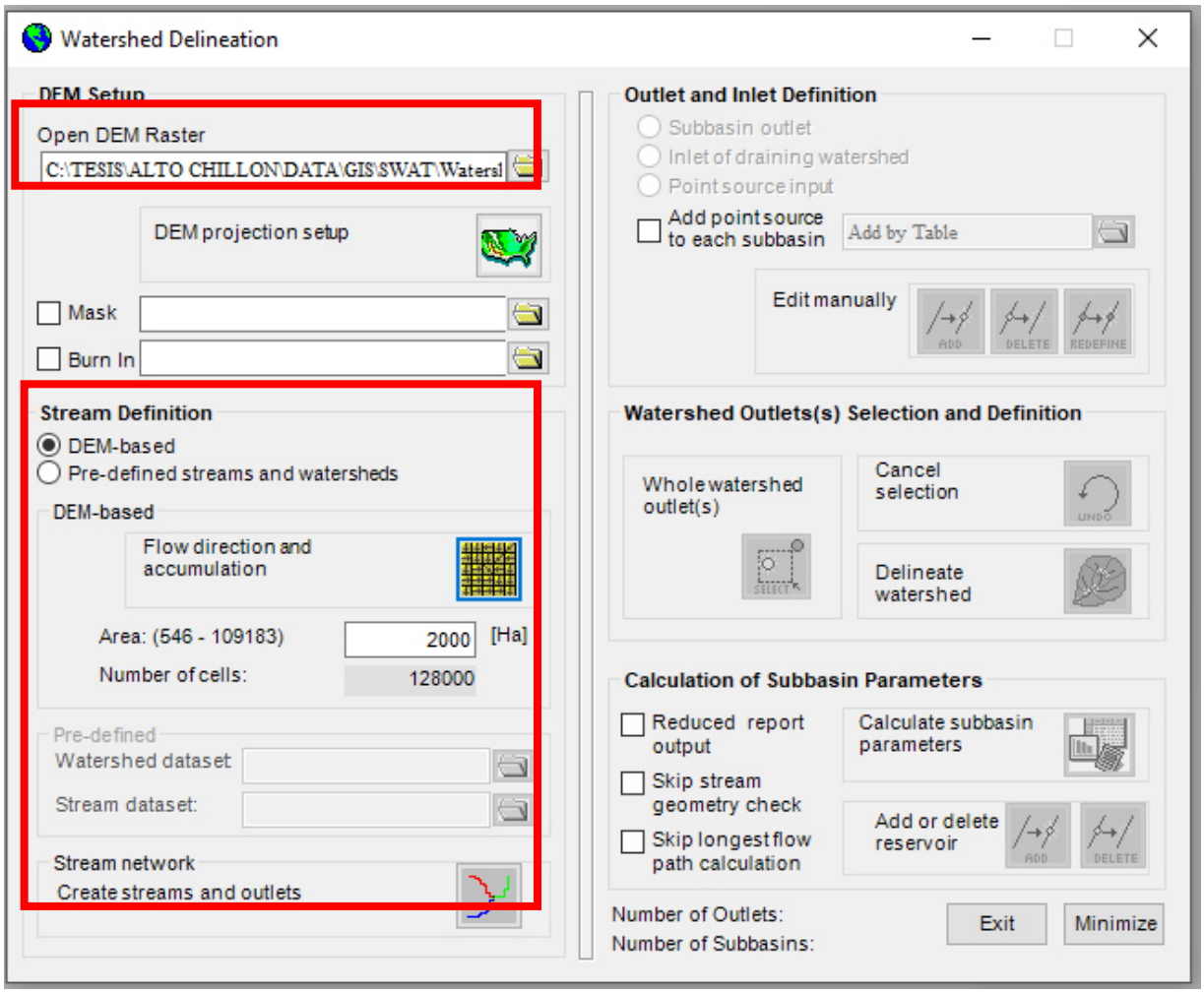
Para la delimitación se empleará la herramienta ArcSWAT, integrada en el software ArcGIS 10.5. En primera instancia, se generará un nuevo proyecto mediante la opción "New SWAT Project", la cual crea automáticamente un archivo GIS (.mxd) y una geodatabase destinada a almacenar todos los archivos resultantes del proceso de delimitación. Una vez creado el proyecto, se accederá al módulo Watershed Delineator y, mediante la opción "Open DEM Raster", se importará el modelo digital de elevación (DEM) correspondiente al ámbito de la subcuenca del Alto Chillón.

Luego, en Stream Definiton, seleccionamos la opción DEM-based, ya que se delimitará en función al DEM previamente generado. Se procederá a calcular los DEMs de Flow direction and Accumulation, tomando como base un valor fijo de 2000 Ha. Posterior a ello en la opción

de Stream Network calcularemos lasde corrientes de flujo (streams) y sus salidas (outlets). Obteniendose así un shapefile de polilínea Reach, el cual representa a la corriente de flujo y otro shapefile de puntos MonitoringPoint el cual representa las salidas de estas corrientes (outlets).

Figura 10

Delimitación de la subcuenca Alto Chillón mediante el módulo Watershed Delineation de ArcSWAT

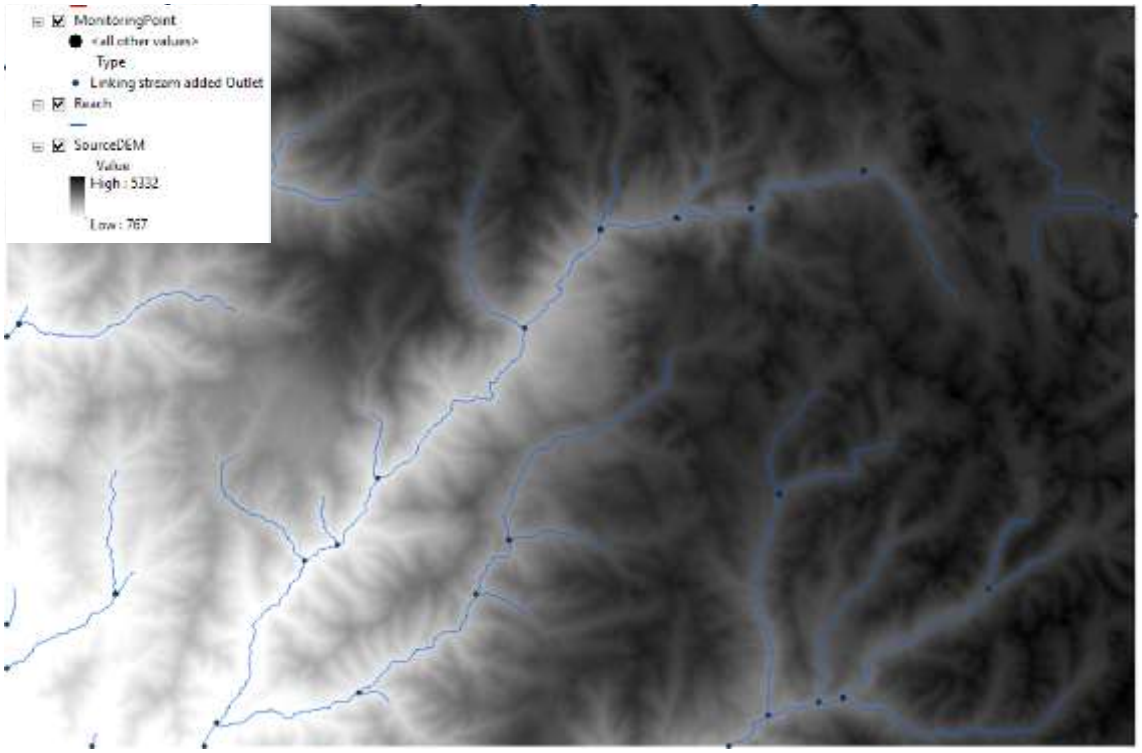


Nota. La figura muestra la interfaz del módulo Watershed Delineation de ArcSWAT, utilizado para la delimitación automática de la subcuenca Alto Chillón a partir del modelo digital de

elevación (DEM), mediante el cálculo de la dirección y acumulación de flujo y la definición de la red de drenaje. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 11

Red de drenaje generada a partir del modelo digital de elevación en la subcuenca Alto Chillón

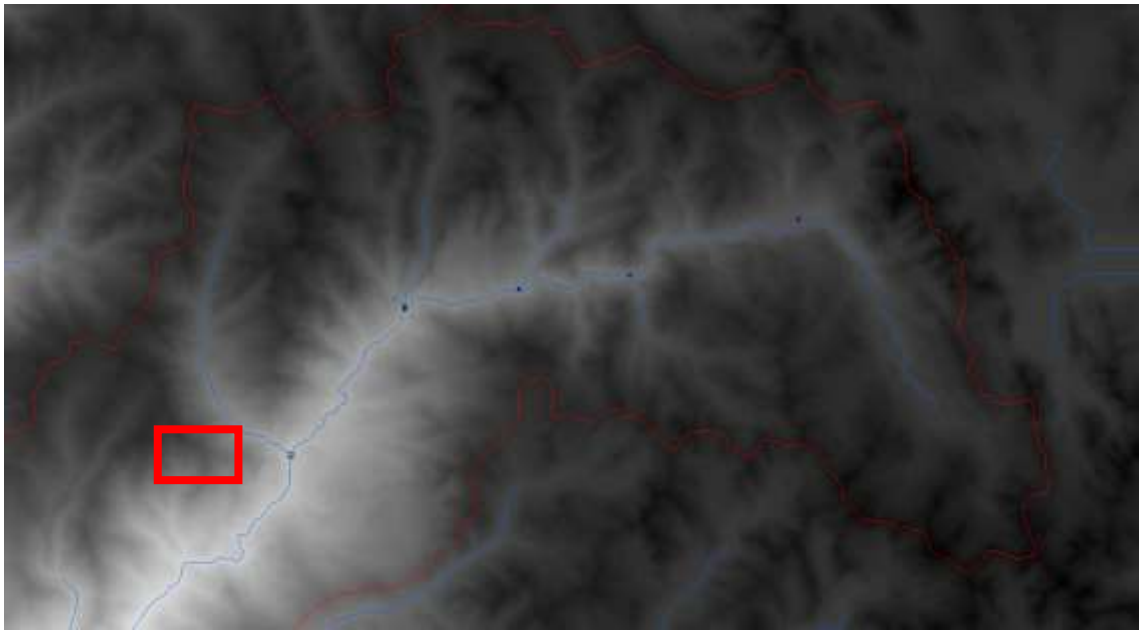


Nota. La figura muestra la red de drenaje obtenida mediante el análisis del modelo digital de elevación (DEM), a partir del cálculo de la dirección y acumulación de flujo en ArcSWAT, la cual representa el sistema de escorrentía superficial de la subcuenca Alto Chillón. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Posterior a lo anterior en Outlet and Inlet Definition, utilizando la opcion de Edit Manually -> Add, se agregará el punto de salida para la delimitación de las subcuencas a analizar. Para ello agregaremos a este proyecto el shapefile de la subcuenca de Alto Chillon, de tal manera de que se ubique dicho punto de la manera correcta.

Figura 12

Delimitación de la subcuenca Alto Chillón y red de drenaje sobre el modelo digital de elevación

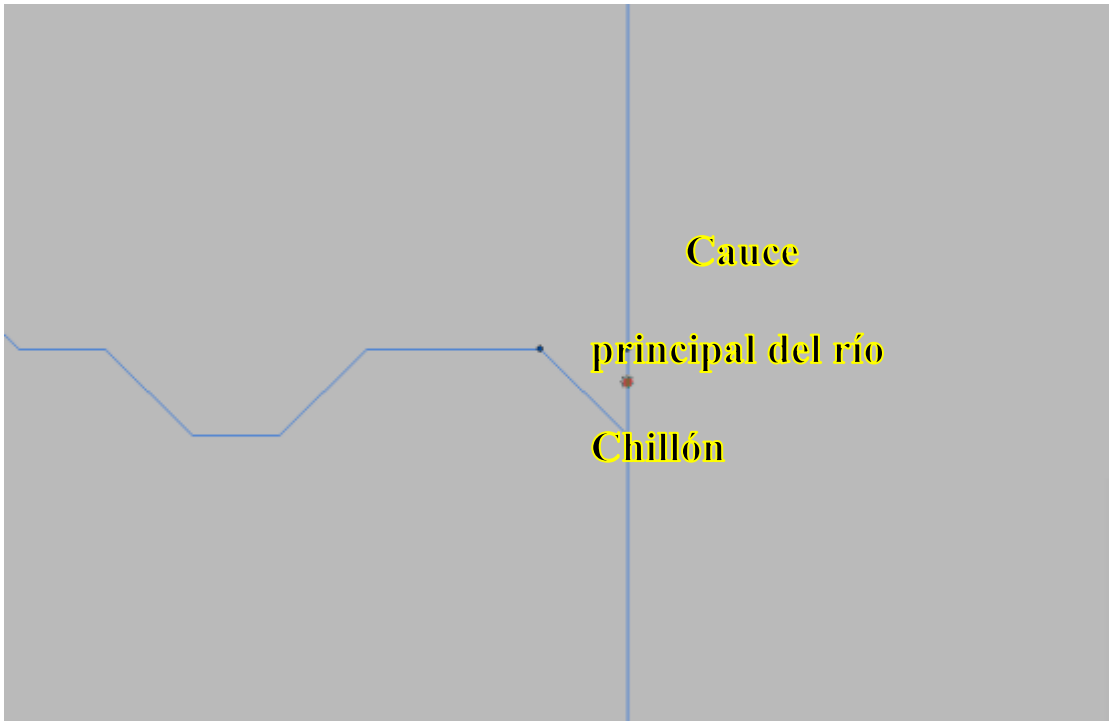


Nota. La figura muestra el límite de la subcuenca Alto Chillón y su red de drenaje principal, obtenidos a partir del procesamiento del modelo digital de elevación (DEM) mediante herramientas de análisis hidrológico en ArcSWAT. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

En la imagen anterior se observa un total de 5 afluentes en la parte alta de la subcuenca, se seleccionará como punto de salida el tramo correspondiente al cauce principal aguas abajo del afluente N°5 (el cual según la Figura 2 del estudio del ANA, correspondería a la subcuenca Huacho, la cual no es parte de nuestra área de interés) para una correcta delimitación. Una vez definido este punto, con la opción Whole Watershed Outlet(s) se seleccionará dicho punto, y luego seleccionaremos la opción Delineate Watershed con el fin de delimitar las subcuencas hasta ese punto.

Figura 13

Identificación del cauce principal del río Chillón en la subcuenca Alto Chillón

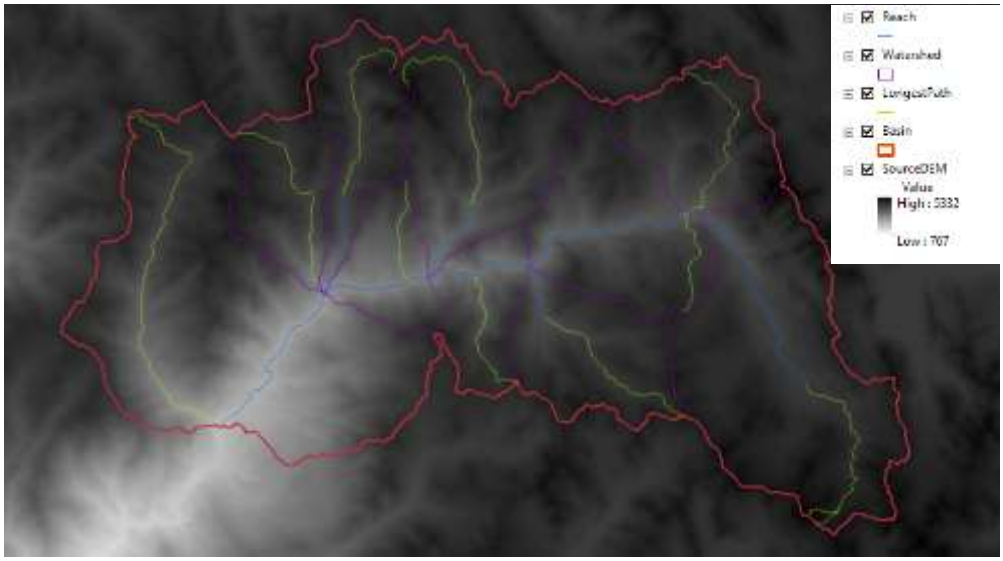


Nota. La figura muestra la identificación del cauce principal del río Chillón, utilizado como referencia para la determinación de la longitud del cauce principal y otros parámetros hidrológicos derivados en el análisis de la subcuenca Alto Chillón. ***Fuente:*** *Elaboración propia*.

Se identificó que las unidades hidrográficas menores generadas presentaban áreas reducidas, por lo que posteriormente serían integradas con el propósito de conformar las subcuencas de estudio. Antes de dicha integración, se empleó la opción Calculate Subbasin Parameters para obtener los shapefiles de polilíneas correspondientes a los tramos de flujo más largos (Longest Flow Path) de cada unidad hidrográfica. Esta información resultará fundamental para el cálculo posterior de los parámetros geomorfológicos y fisiográficos de las subcuencas Huaros, Minacancha y Cullhuay.

Figura 14

Subcuencas internas y trayectorias de flujo máximo (Longest Flow Path) en la subcuenca Alto Chillón



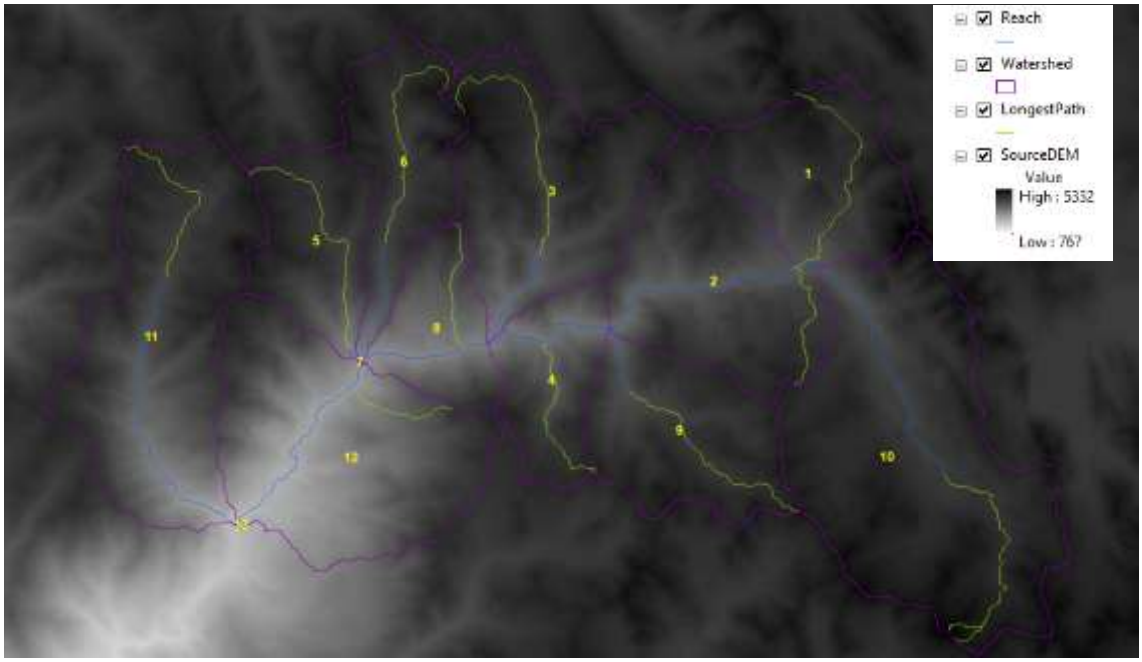
Nota. Subcuencas internas y Longest Flow Path derivados del DEM para la subcuenca Alto Chillón. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

5.1.5 Agrupación y verificación de consistencia cartográfica de las subcuencas delimitadas

Habiéndose exportado los archivos generados mediante ArcSWAT, se procedió a revisar las unidades hidrográficas resultantes del proceso de delimitación, identificándose un total de diez unidades. A partir de ello, y tomando como referencia la Figura 2 del Estudio Hidrológico de la Unidad Hidrográfica Chillón elaborado por la ANA (2019), se realizó la agrupación de dichas unidades con el fin de conformar las tres subcuencas de estudio. De esta manera, la subcuenca Cullhuay quedó conformada por las unidades hidrográficas 1, 2, 4, 9 y 10; la subcuenca Minacancha quedó representada íntegramente por la unidad hidrográfica 3; y la subcuenca Huaros se conformó por las unidades hidrográficas 5, 6, 7, 8 y 11. Asimismo, se identificó que la unidad hidrográfica 12 corresponde a la subcuenca Huaucho, la cual no forma parte del área de estudio, mientras que la unidad hidrográfica 13 pertenece a un pequeño tributario asociado a la subcuenca San Buenaventura, también fuera del ámbito considerado.

Figura 15

Agrupación de unidades hidrográficas delimitadas para la conformación de las subcuencas de estudio

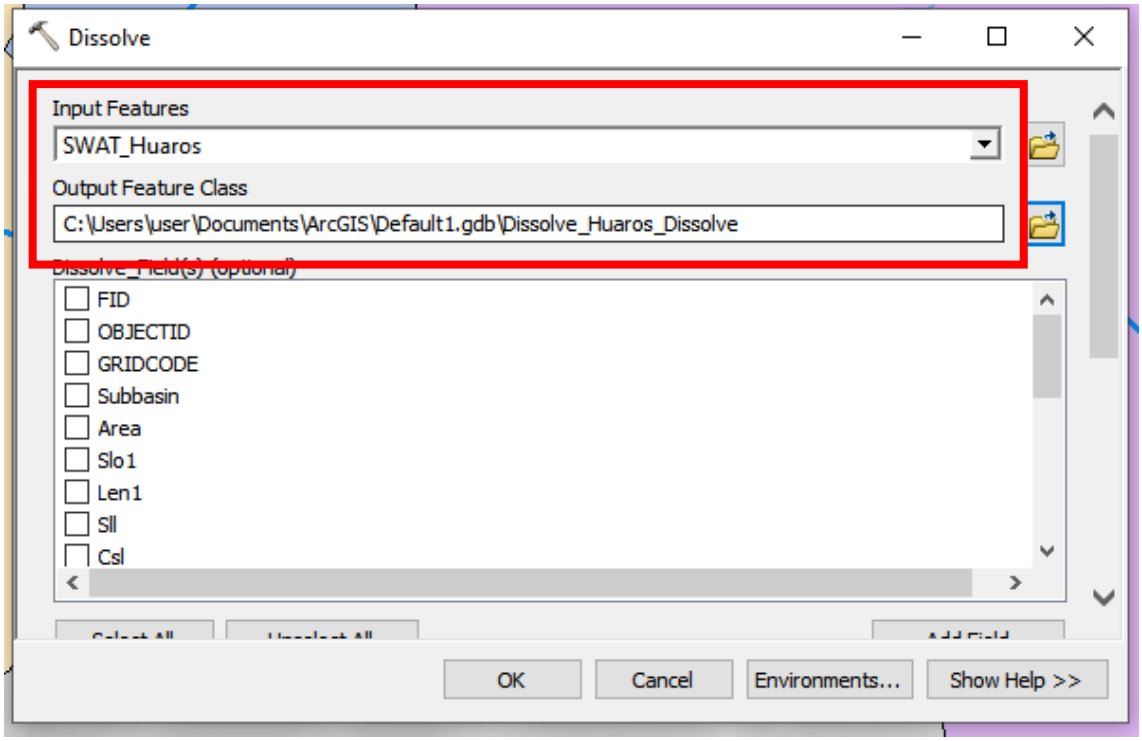


Nota. Agrupación de las unidades hidrográficas delimitadas en ArcSWAT para la conformación de las subcuencas de estudio. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Una vez definidas las unidades hidrográficas que conforman cada subcuenca, se procederá a unirlas en un solo shapefile con la herramienta Disolve (a excepción de Minacancha, ya que la unidad hidrográfica la representa en su totalidad) , este procedimiento se realizará para cada una de las subcuencas, obteniéndose así una delimitación preliminar.

Figura 16

Unificación de unidades hidrográficas para la conformación de la subcuenca Huaros mediante la herramienta Dissolve

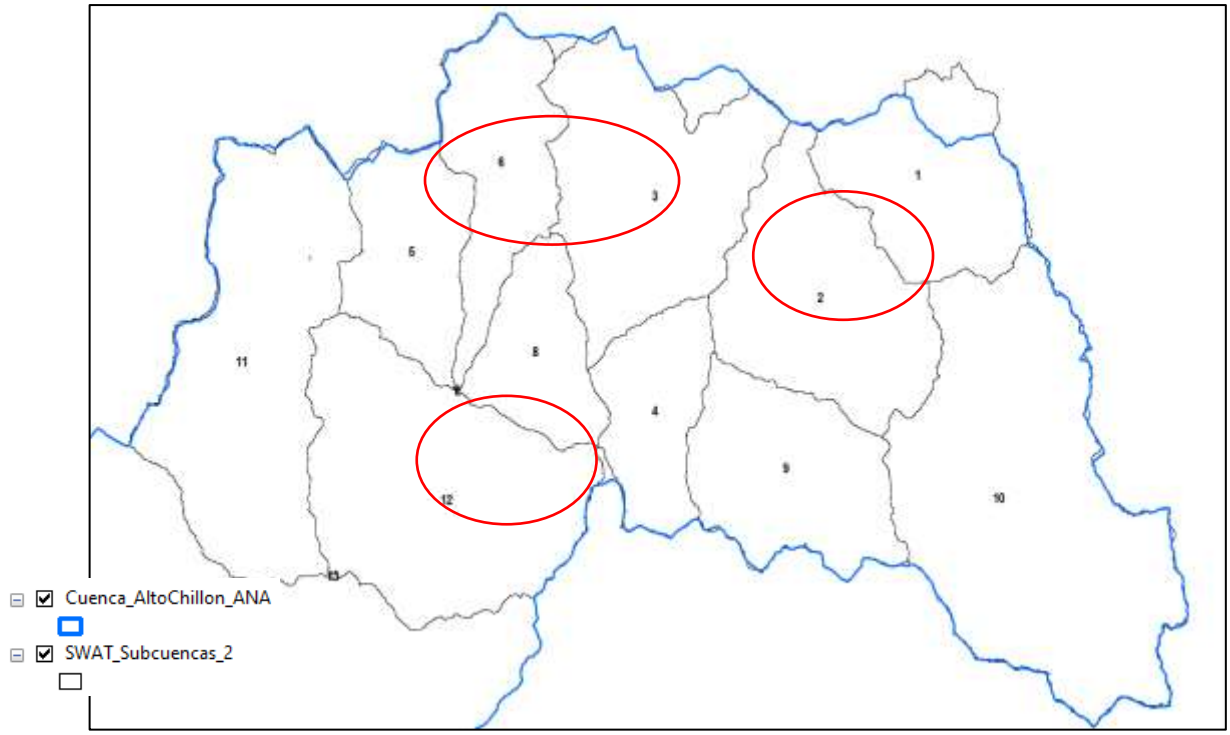


Nota. La figura muestra el uso de la herramienta Dissolve en ArcGIS para la integración de las unidades hidrográficas previamente delimitadas, con el fin de conformar la subcuenca Huaros como una única unidad espacial continua, de acuerdo con la agrupación establecida en la metodología del estudio. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Se identificaron ciertas diferencias en los bordes delimitados entre las subcuencas de estudio y la subcuenca del Alto Chillón. Es por ello que se realizará la corrección de los bordes de en base a la imagen satelital que nos brinda el programa Google Earth y con el shapefile de la subcuenca Alto Chillón.

Figura 17

Subcuencas delimitadas y numeradas previo al ajuste de límites en la subcuenca Alto Chillón



Nota. La figura muestra las subcuencas internas numeradas obtenidas a partir del proceso de delimitación automática en ArcSWAT, previo a la corrección manual de sus límites. Dichas correcciones se realizaron mediante la comparación con imágenes satelitales de Google Earth y con información cartográfica oficial de la subcuenca Alto Chillón, a fin de mejorar la precisión espacial del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Figura 18

Corrección y verificación de consistencia de los límites de las subcuencas de estudio mediante imágenes satelitales

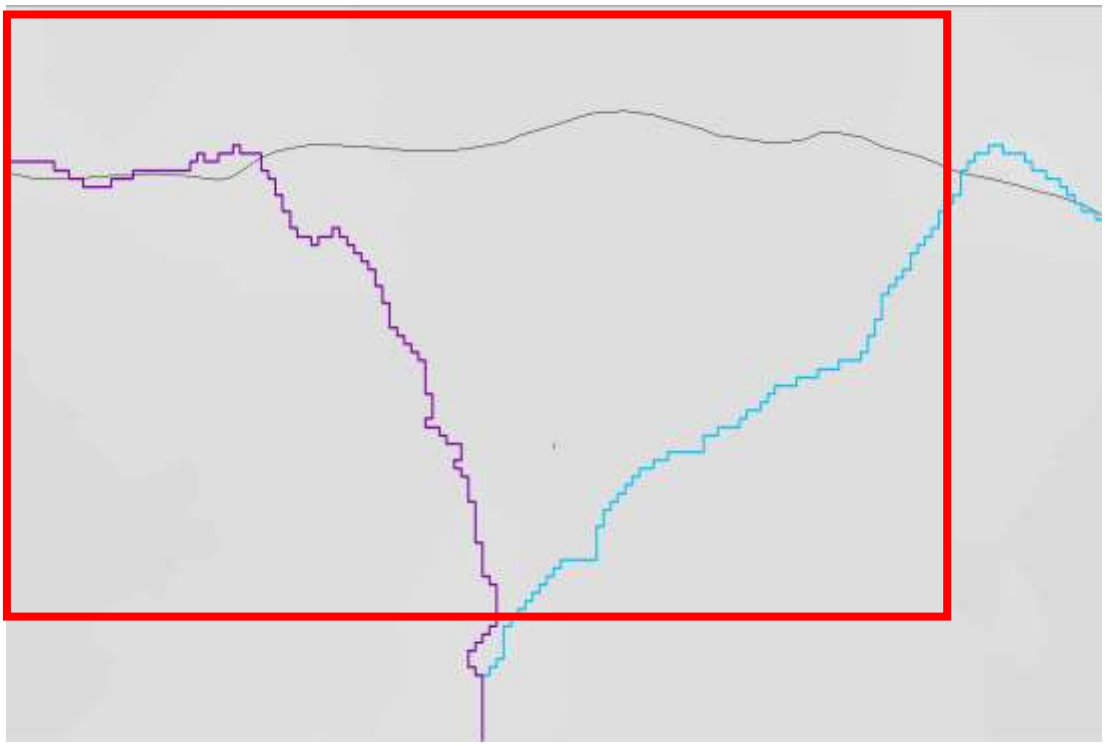


Nota. La figura muestra la verificación de consistencia y corrección final de los límites de las subcuencas de estudio, realizada mediante la superposición de los polígonos delimitados sobre imágenes satelitales de alta resolución de Google Earth, con el fin de asegurar la coherencia espacial de los bordes con la topografía y la red de drenaje real. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Previo al proceso de corrección, se verificó que los límites de las subcuencas presentaban quiebres y discontinuidades, producto de la resolución espacial del DEM empleado (12.5 m). Por tal motivo, se aplicó la herramienta Simplify Polygon para suavizar los bordes, estableciendo una tolerancia de 25 m, con el fin de obtener contornos más uniformes y geométricamente consistentes para las subcuencas delimitadas.

Figura 19

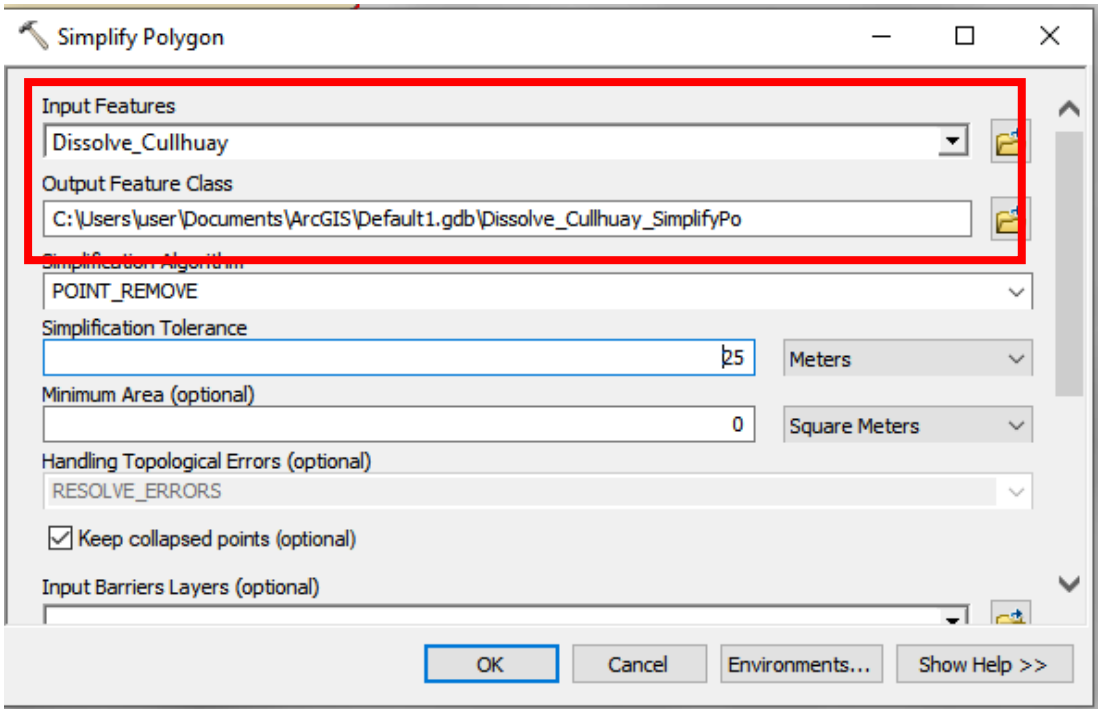
Ajuste del divisor de aguas entre subcuencas a partir del análisis del relieve



Nota. La figura muestra el ajuste del divisor de aguas entre subcuencas, realizado mediante la comparación del límite delimitado con el perfil topográfico derivado del modelo digital de elevación (DEM), con el fin de asegurar la correcta correspondencia del límite con las divisorias naturales del terreno. ***Fuente:*** *Elaboración propia*

Figura 20

Simplificación geométrica del polígono de la subcuenca Cullhuay mediante la herramienta Simplify Polygon

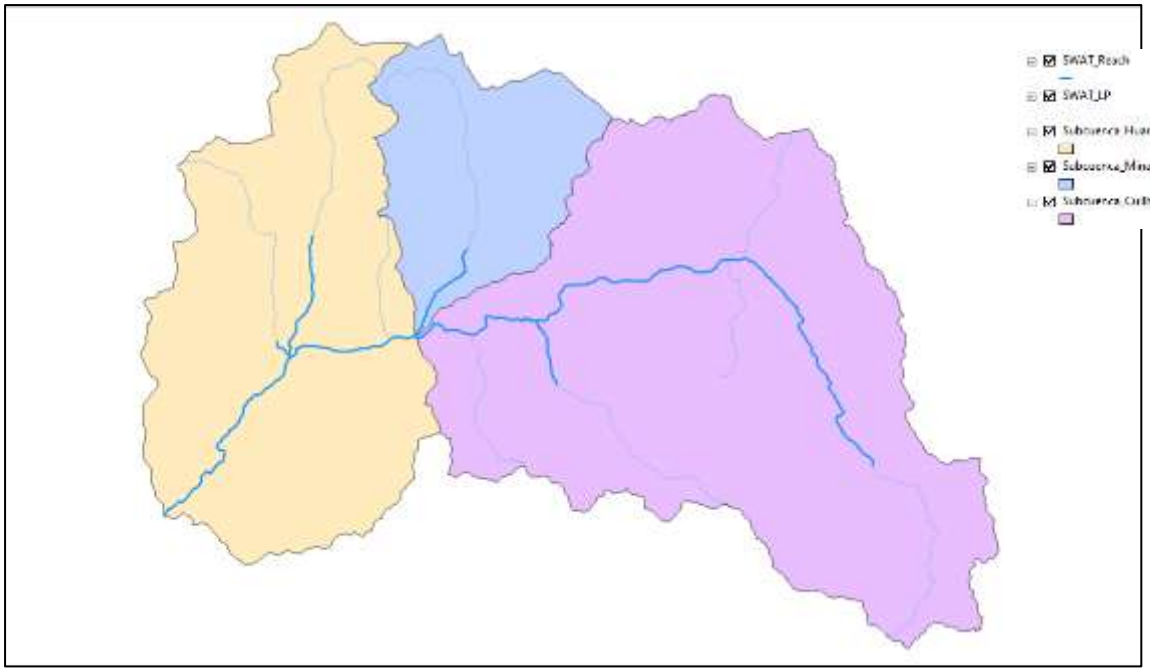


Nota. La figura muestra el uso de la herramienta Simplify Polygon de ArcGIS para la simplificación geométrica del polígono correspondiente a la subcuenca Cullhuay, aplicando el algoritmo Point Remove con una tolerancia de 25 m, con el fin de suavizar los bordes y optimizar la representación cartográfica sin alterar significativamente la delimitación hidrológica. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Una vez suavizados los bordes de los polígonos correspondientes a las subcuencas, se procedió a realizar la corrección manual de sus límites, obteniéndose así las delimitaciones definitivas para cada una de ellas. Estos polígonos, junto con las polilíneas que representan el cauce principal del río Chillón y sus afluentes, así como el modelo digital de elevación que abarca el área de interés, constituyen los insumos fundamentales para el cálculo de los parámetros geomorfológicos y fisiográficos requeridos en el análisis hidrológico.

Figura 21

Subcuencas de estudio Cullhuay, Minacancha y Huaros en la cuenca alta del río Chillón



Nota. La figura muestra la delimitación final de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, obtenida a partir del procesamiento del modelo digital de elevación (DEM), la delimitación hidrológica en ArcSWAT y la posterior corrección y verificación de consistencia cartográfica de los límites mediante herramientas SIG. Estas subcuencas constituyen el área de estudio empleada para el análisis hidrológico y la modelación precipitación–escorrentía. Fuente: Elaboración propia.

5.1.6 Determinación de parámetros geomorfológicos y fisiográficos

Los parámetros geomorfológicos describen la forma, configuración del relieve y organización del sistema de drenaje de una subcuenca; mientras que los parámetros fisiográficos se refieren a las propiedades físicas del terreno—como pendiente, elevación o longitud del cauce—que influyen directamente en los procesos hidrológicos y en la respuesta de la cuenca frente a los eventos de precipitación.

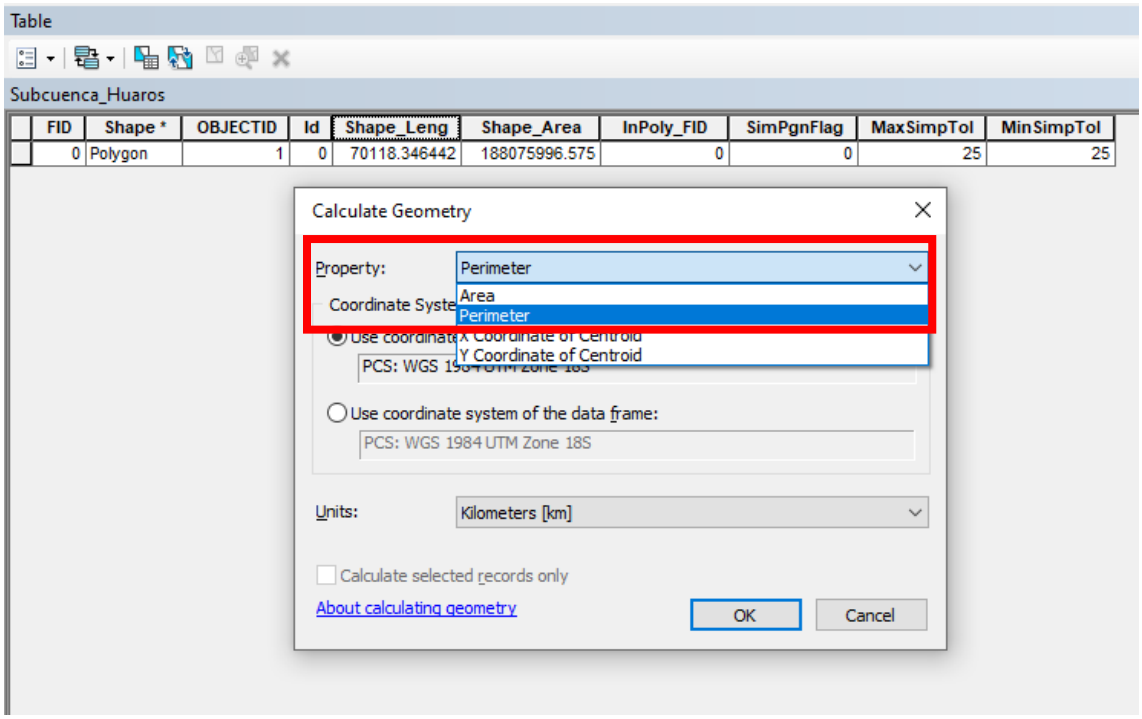
5.1.6.1 Parámetros geomorfológicos

a) ***Área y Perímetro:*** Como se cuenta con los shapefiles correspondientes a las subcuencas, los parámetros geométricos fundamentales se obtuvieron directamente

desde la tabla de atributos mediante la herramienta Calculate Geometry del software ArcGIS 10.5. Para cada polígono se seleccionaron las propiedades Área (expresada en km²) y Perímetro (expresado en km). Como resultado, se obtuvieron áreas de 203.3 km², 49.3 km² y 127.4 km², así como perímetros de 75.3 km, 34.9 km y 58.0 km, correspondientes a las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, respectivamente.

Figura 22

Cálculo del perímetro de la subcuenca Huaros mediante la herramienta Calculate Geometry en ArcGIS



Nota. La figura muestra el uso de la herramienta Calculate Geometry *de ArcGIS para el cálculo del perímetro de la subcuenca Huaros, empleando el sistema de coordenadas proyectadas WGS 1984 UTM Zona 18S y expresando los resultados en kilómetros. Los valores obtenidos fueron utilizados para el cálculo de parámetros geomorfológicos, tales como el coeficiente de compacidad y la relación de circularidad.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

b) Coeficiente de compacidad (Kc): El coeficiente de compacidad se determinó en función del área y el perímetro de cada subcuenca, aplicando la fórmula de Gravelius. Los valores obtenidos fueron 1.5, 1.4 y 1.5 para las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, respectivamente. Cabe señalar que valores próximos a la unidad indican una geometría más circular, lo cual implica tiempos de concentración menores y una respuesta hidrológica más rápida.

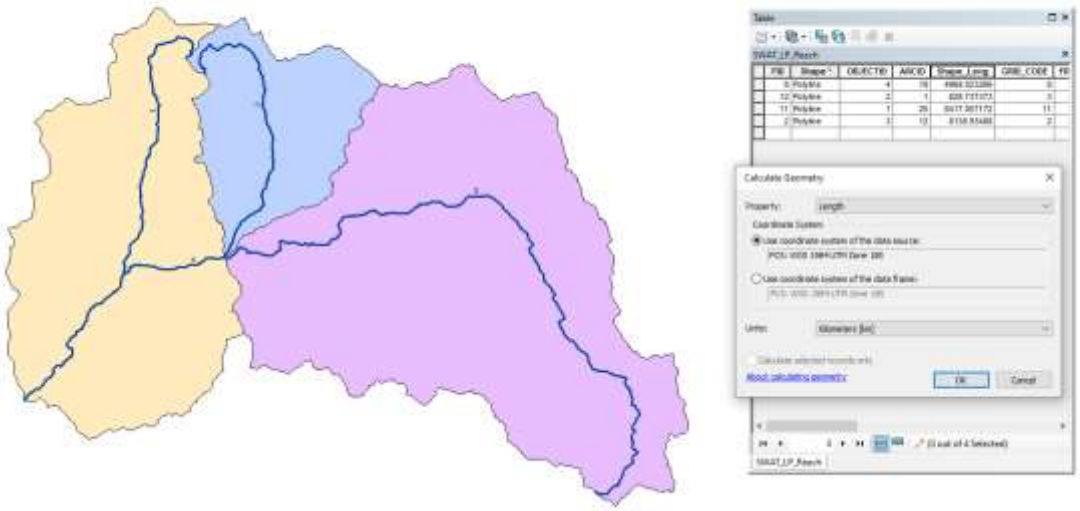
$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

c) **Longitud del cauce Principal (L):** La longitud del cauce principal de cada subcuenca (km) se define como la distancia medida desde la desembocadura hasta la cabecera más alejada dentro de su red de drenaje. Este parámetro se obtuvo a partir de los shapefiles generados por ArcSWAT (Reach y Longest Flow Path). Para su determinación, ambos shapefiles fueron integrados en una sola capa mediante la unión y edición de sus polilíneas, identificándose posteriormente el tramo correspondiente al cauce principal en cada subcuenca.

Una vez delimitados los cauces principales, se calculó su longitud mediante la opción Calculate Geometry (propiedad: Length) en ArcGIS 10.5, obteniéndose valores de 0.18 km, 0.23 km y 0.25 km para las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, respectivamente. Estos valores indican que las subcuencas presentan cauces relativamente cortos en su tramo principal, lo cual puede relacionarse con una respuesta hidrológica más rápida frente a eventos de precipitación, especialmente en terrenos de alta pendiente como los presentes en la zona de estudio.

Figura 23

Determinación de la longitud del cauce principal en las subcuencas de estudio



Nota. La figura muestra el cálculo de la longitud del cauce principal de cada subcuenca mediante la herramienta Calculate Geometry *de ArcGIS, aplicado a la red de drenaje generada en ArcSWAT y utilizando el sistema de coordenadas proyectadas WGS 1984 UTM Zona 18S. Los valores obtenidos fueron empleados para el cálculo de parámetros geomorfológicos y para la modelación hidrológica precipitación–escorrentía.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

d) Factor de forma (Ff): El factor de forma se obtuvo a partir de la relación entre el área (km²) y la longitud del cauce principal (km). La longitud del cauce principal, medida desde la desembocadura hasta la cabecera más distante, se determinó empleando los shapefiles generados por ArcSWAT (Reach y Longest Flow Path), los cuales fueron unificados en una sola capa para identificar los tramos principales por subcuenca y luego calcular su longitud mediante Calculate Geometry.

Con esta información, los factores de forma resultaron en 0.18, 0.23 y 0.25 para las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, respectivamente. En términos interpretativos, valores bajos indican cuencas alargadas, las cuales suelen presentar menor concentración de

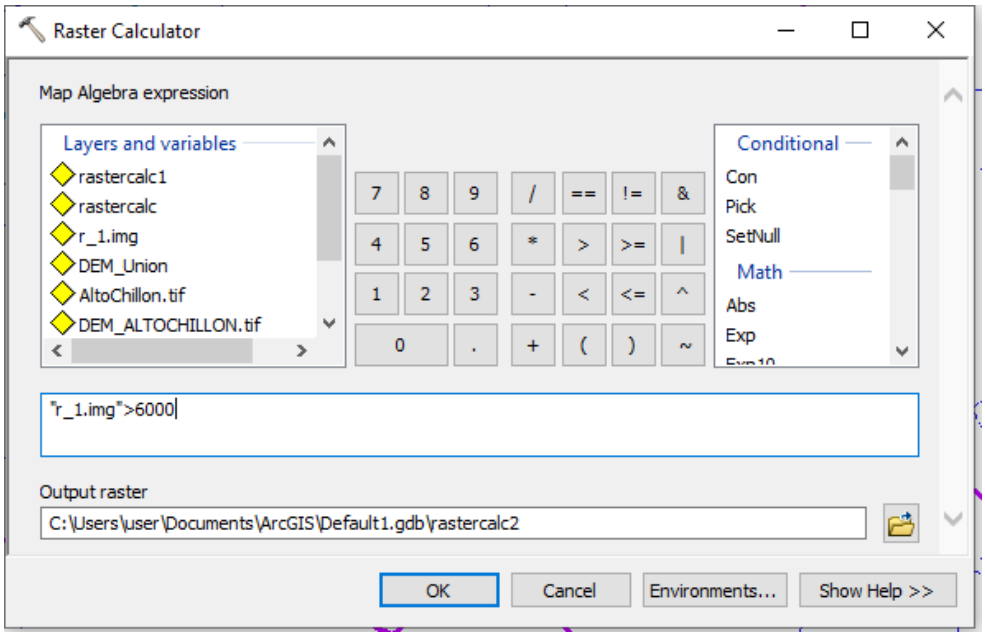
caudales pico, mientras que valores mayores reflejan cuencas relativamente más compactas, con una respuesta hidrológica más rápida frente a eventos de lluvia.

$$F_f = \frac{A}{L^2}$$

e) **Densidad de drenaje (Dd*):*** La densidad de drenaje (Dd) se define como la razón entre la longitud total de la red de drenaje (ΣL) y el área de la cuenca (A). Para obtener dicha longitud, primero fue necesario generar la red de drenaje a partir del modelo digital de elevaciones procesado. Para ello, se empleó el raster de Flow Accumulation previamente calculado. Con este raster, se utilizó la herramienta Raster Calculator en ArcGIS 10.5, estableciendo un umbral de acumulación mayor a 6000 celdas, con el fin de identificar únicamente los trazos donde el escurrimiento superficial se concentra y define la red hídrica; resultando así un raster binario representativo de la red de drenaje.

Figura 24

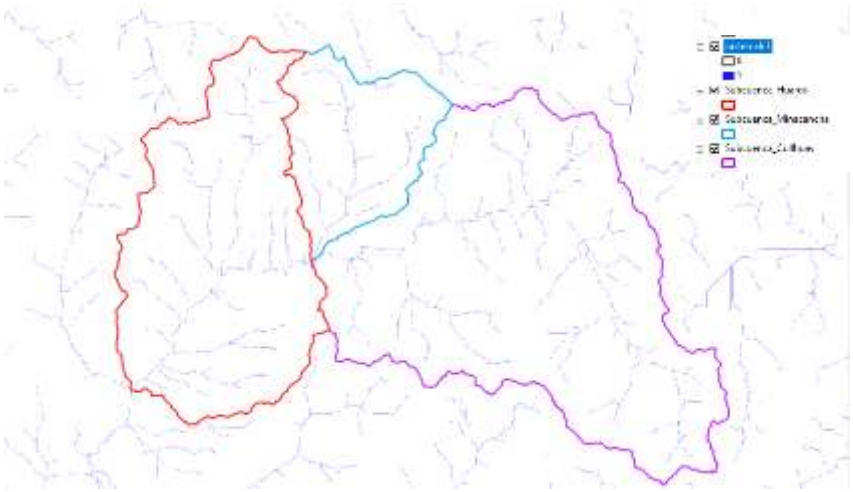
Aplicación del Raster Calculator para la identificación de áreas de alta altitud en la subcuenca Alto Chillón



Nota. La figura muestra el uso de la herramienta Raster Calculator *de ArcGIS para la aplicación de una expresión de álgebra de mapas, mediante la cual se identificaron las áreas con altitudes superiores a 6 000 m s. n. m. a partir del modelo digital de elevación (DEM). El resultado obtenido fue utilizado para el análisis fisiográfico y la caracterización altitudinal del área de estudio.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 25

Red de drenaje y delimitación final de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros



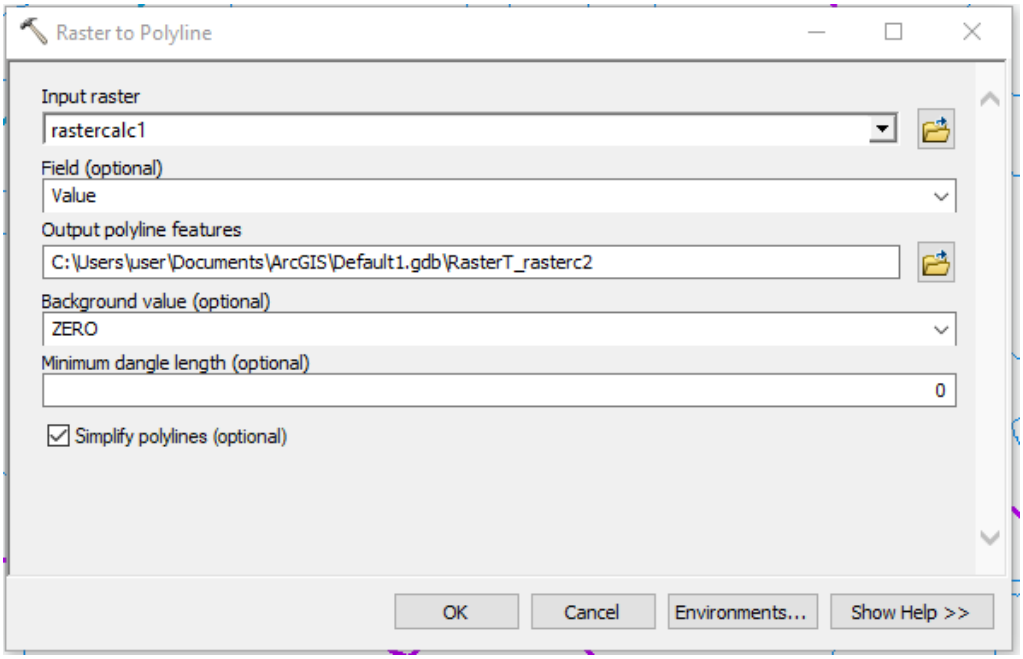
Nota. La figura muestra la red de drenaje superficial superpuesta a los límites finales de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, obtenidas a partir del procesamiento del modelo digital de elevación (DEM) y la delimitación hidrológica mediante herramientas SIG. La red de drenaje representa el sistema de escorrentía que estructura el comportamiento hidrológico de cada subcuenca. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Una vez obtenido el raster de red de drenaje, este fue convertido a polilíneas mediante la herramienta Raster to Polyline de ArcGIS 10.5. Posteriormente, dichas polilíneas fueron recortadas utilizando la herramienta Clip, empleando como límites los polígonos correspondientes a cada subcuenca. De este modo, se generó un shapefile independiente para

la red hídrica de cada subcuenca, permitiendo calcular con precisión la longitud total de drenaje requerida para la estimación de la densidad de drenaje.

Figura 26

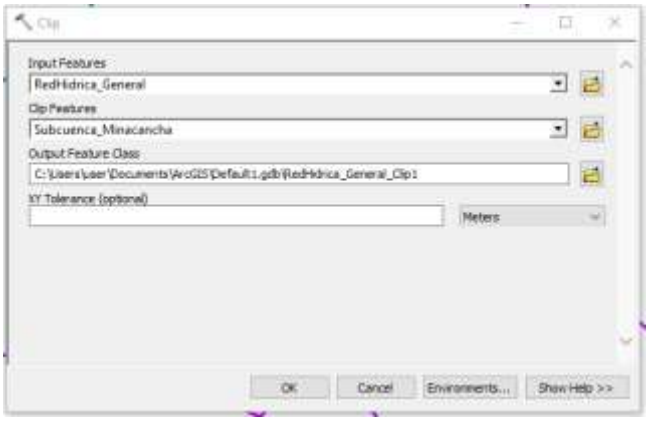
Conversión de resultados raster a formato vectorial mediante la herramienta Raster to Polyline en ArcGIS



Nota. La figura muestra el uso de la herramienta Raster to Polyline de ArcGIS para convertir el raster resultante del análisis espacial en entidades lineales vectoriales, permitiendo representar de forma continua las características derivadas del modelo digital de elevación (DEM) y facilitar su análisis y visualización en el entorno SIG. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 27

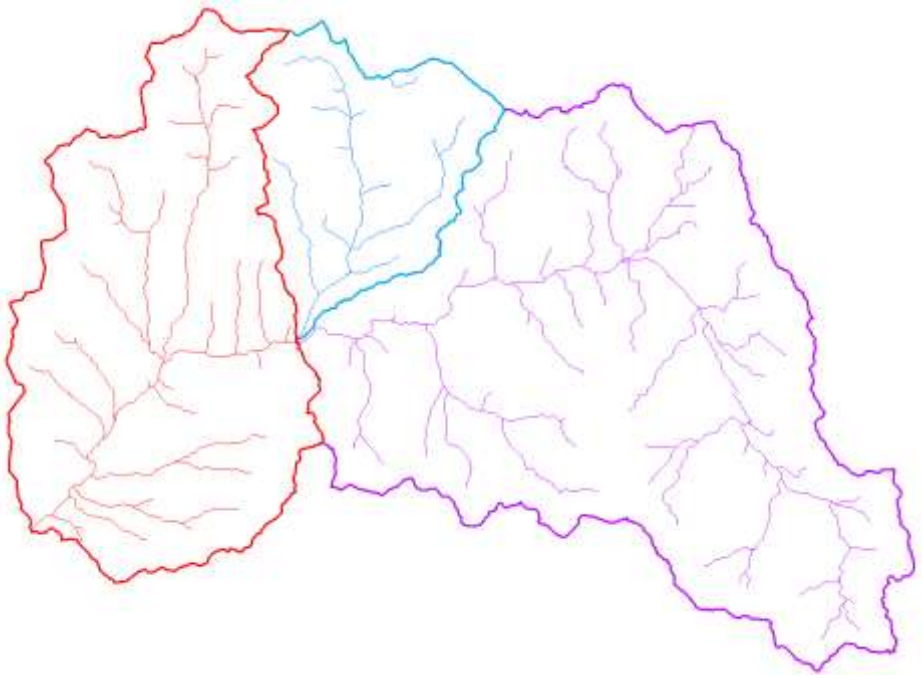
Recorte de la red hídrica general al ámbito de la subcuenca Minacancha mediante la herramienta Clip



Nota. La figura muestra el uso de la herramienta Clip de ArcGIS para recortar la red hídrica general al límite de la subcuenca Minacancha, obteniendo así la red de drenaje específica del área de estudio, empleada en el cálculo de parámetros geomorfológicos e hidrológicos. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 28

Red de drenaje final asociada a las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros



Nota. La figura muestra la red de drenaje superficial correspondiente a las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, obtenida a partir del recorte de la red hídrica general según

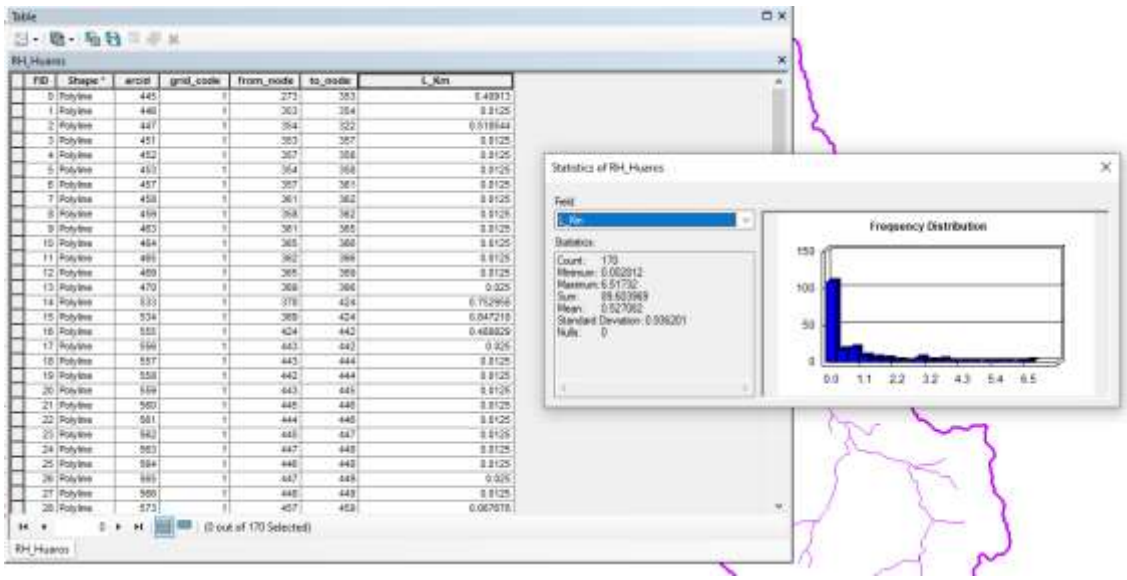
los límites finales de cada subcuenca. Esta red fue utilizada para el cálculo de parámetros geomorfológicos, tales como la densidad de drenaje, la frecuencia de corrientes y la razón de bifurcación.

Fuente: Elaboración propia.

Ya definidas las redes hidrográficas correspondientes a cada subcuenca, se procedió a calcular la longitud de todos los cauces identificados. Para ello, en la tabla de atributos de cada shapefile se empleó la herramienta Calculate Geometry, obteniendo la longitud de cada segmento de drenaje. Posteriormente, mediante la opción Statistics, se realizó la sumatoria de todas las longitudes por subcuenca, obteniéndose así la longitud total de la red de drenaje, necesaria para el cálculo de la densidad de drenaje.

Figura 29

Cálculo y análisis estadístico de la longitud de tramos de la red de drenaje en la subcuenca Huaros



Nota. La figura muestra la tabla de atributos de la red hídrica de la subcuenca Huaros y el análisis estadístico de la longitud de los tramos de drenaje, obtenido a partir del campo L_{km}*. La distribución de frecuencias permitió caracterizar la estructura del sistema de drenaje y fue*

utilizada como insumo para el cálculo de parámetros geomorfológicos, tales como la densidad de drenaje y la razón de bifurcación. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Con ello se calcularon valores de densidad de drenaje, con la siguiente formula:

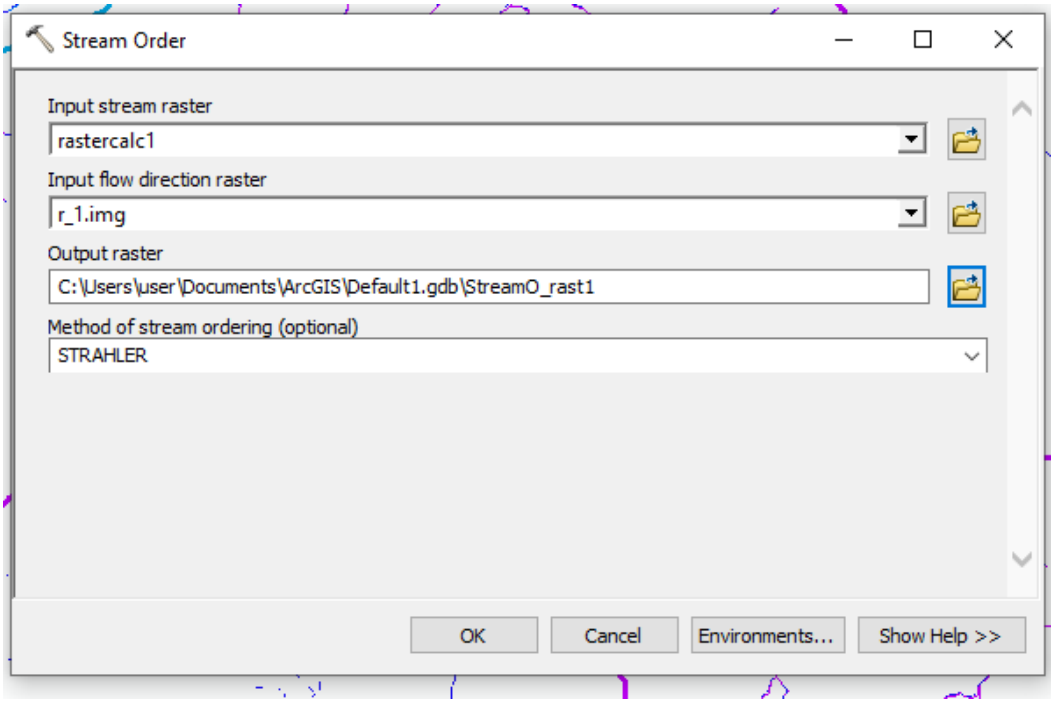
$$D_d = \frac{\sum L}{A}$$

Se obtuvieron valores de 0.69, 0.70 y 0.69 para las subcuencas de Cullhuay, Minacancha y Huaros, respectivamente. Estos resultados muestran una consistencia significativa entre las tres subcuencas, lo cual indica que presentan características hidrológicas y físicas similares según el parámetro evaluado. Esta cercanía en los valores sugiere que su respuesta ante los procesos de escorrentía y precipitación podría ser comparable.

f) **Orden de ríos:** El orden de ríos se calculó mediante la herramienta Stream Order. Para ello, se importaron el DEM de dirección de flujo (Flow Direction) generado previamente con la herramienta ArcSWAT y el ráster de la red hídrica obtenido mediante Raster Calculator. Adicionalmente, se seleccionó el método de Strahler para la clasificación jerárquica de los cursos de agua.

Figura 30

Determinación del orden de corrientes de la red de drenaje mediante el método de Strahler



Nota. La figura muestra el uso de la herramienta Stream Order *de ArcGIS para la determinación del orden de corrientes de la red de drenaje, a partir del raster de corrientes y del raster de dirección de flujo derivados del modelo digital de elevación (DEM). El método de* ***Strahler*** *fue empleado para clasificar jerárquicamente los cursos de agua, información utilizada en el análisis de la estructura del drenaje y en el cálculo de parámetros geomorfológicos de las subcuencas de estudio.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

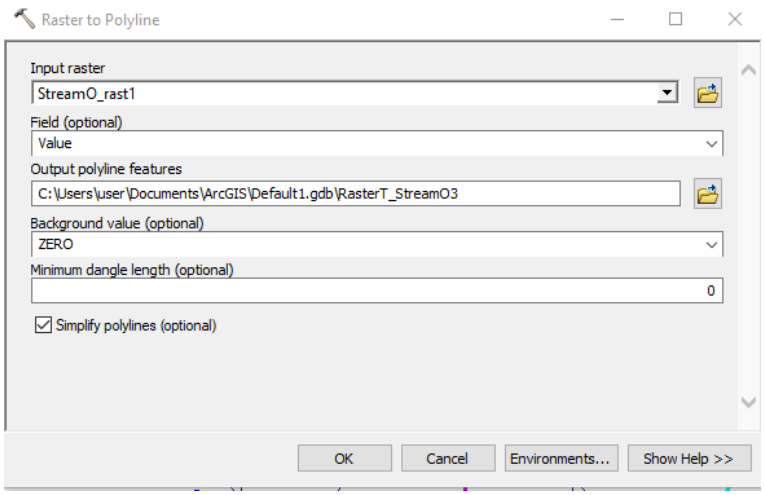
El orden de ríos se calculó mediante la herramienta Stream Order, utilizando el DEM de dirección de flujo generado con ArcSWAT y el ráster de la red hídrica obtenido con Raster Calculator. Se aplicó el método de Strahler para la clasificación jerárquica de los cursos de agua. El ráster resultante fue convertido a polilínea mediante Raster to Polyline y posteriormente recortado para cada subcuenca con la herramienta Clip.

Como resultado, se obtuvieron órdenes de río de 4, 3 y 4 para las subcuencas de Cullhuay, Minacancha y Huaros, respectivamente, lo cual indica la presencia de redes de

drenaje bien desarrolladas y jerarquizadas, especialmente en Cullhuay y Huaros, donde se alcanzan órdenes más altos.

Figura 31

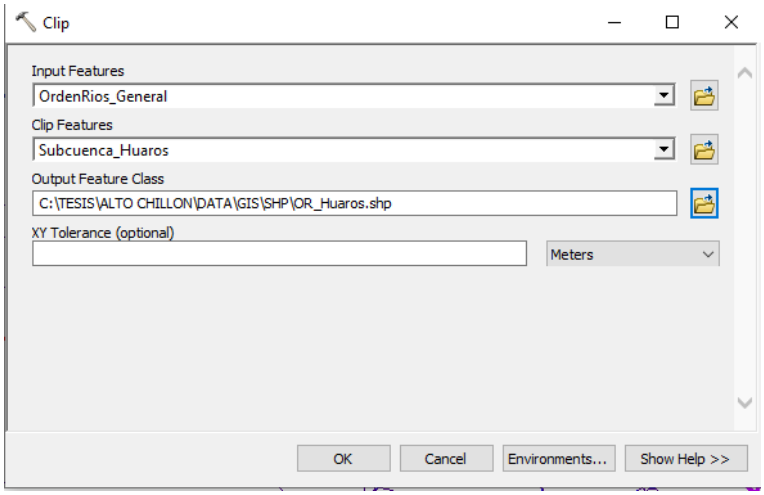
Conversión del raster de orden de corrientes a formato vectorial mediante la herramienta Raster to Polyline



Nota. La figura muestra el uso de la herramienta Raster to Polyline *de ArcGIS para convertir el raster del orden de corrientes, obtenido mediante el método de Strahler, en entidades lineales vectoriales. Esta conversión permitió realizar el análisis cuantitativo de la red de drenaje, incluyendo el cálculo de longitudes y la clasificación de corrientes por orden.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 32

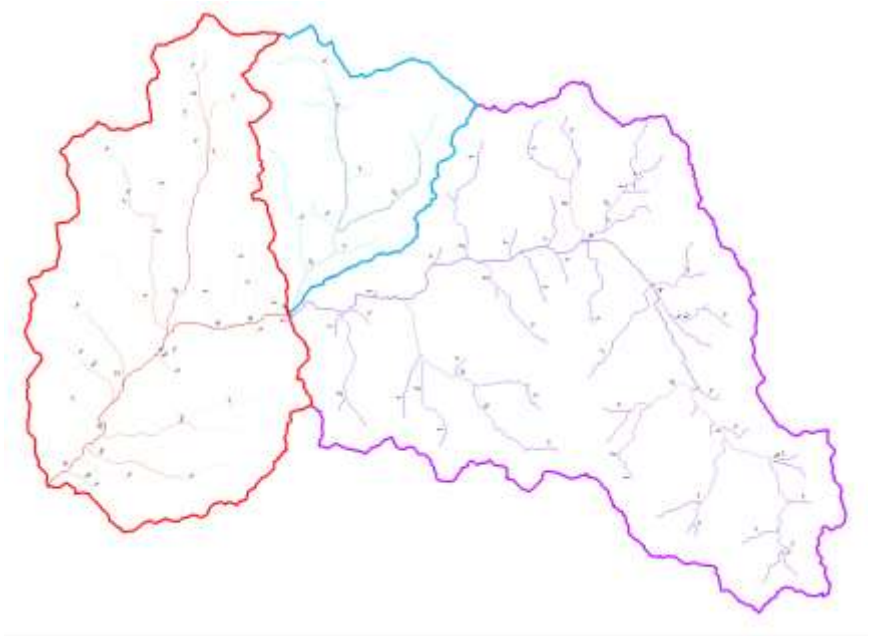
Recorte del orden de corrientes al ámbito de la subcuenca Huaros mediante la herramienta Clip



Nota. La figura muestra el uso de la herramienta Clip *de ArcGIS para recortar la capa del orden de corrientes general al límite de la subcuenca Huaros, obteniendo así la información específica del orden de ríos dentro del área de estudio. Esta información fue utilizada para el análisis del número y longitud de corrientes por orden y para la caracterización geomorfológica de la subcuenca.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 33

Orden de corrientes de la red de drenaje en las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros



Nota. La figura muestra la red de drenaje clasificada según el orden de corrientes, obtenida mediante el método de Strahler y representada de forma individual para cada una de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros. Esta información fue utilizada para el análisis de la estructura jerárquica del drenaje y el cálculo de parámetros geomorfológicos, tales como la razón de bifurcación y la relación de textura. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

g) **Relación de bifurcación (Rb):** Se calcula directamente a partir del orden de ríos por Strahler, por la siguiente formula:

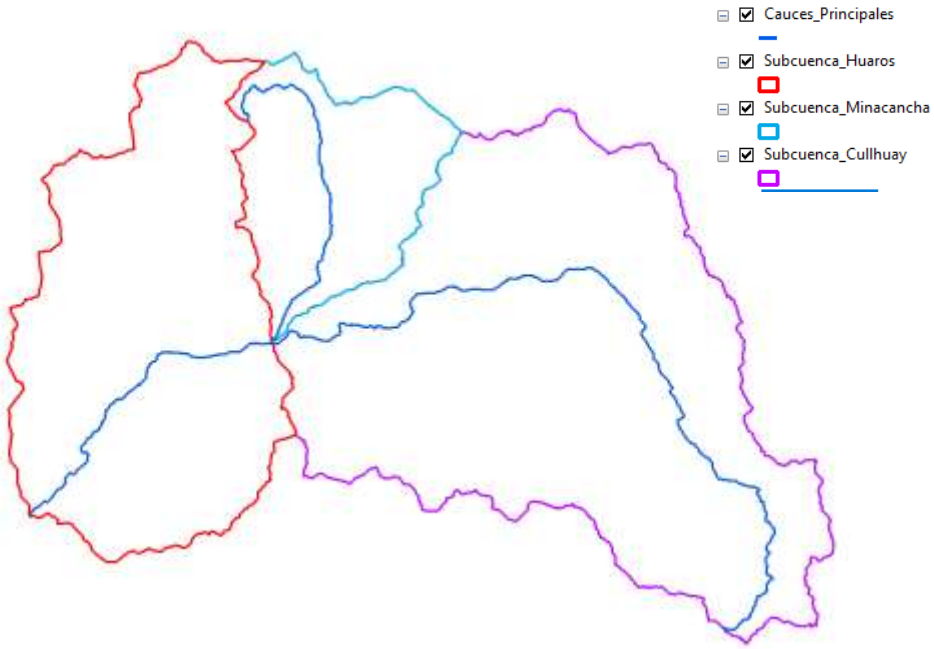
$$Rb = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

Donde Nu es el número de corrientes de orden "u", y Nu+1 es el número de corrientes del siguiente orden, Para ello, se extrajo la cantidad de tramos de río por orden a partir de la tabla de atributos de los shapefiles de ordenamiento de ríos de cada subcuenca. Luego, se aplicó la fórmula a los pares de órdenes correspondientes, obteniéndose valores de relación de bifurcación de 1.54, 1.78 y 2.26 para las subcuencas de Cullhuay, Minacancha y Huaros, respectivamente. Valores de Rb cercanos a 2 son típicos de redes de drenaje relativamente ramificadas y con una estructura fluvial bien definida. En este caso, Minacancha y Huaros muestran mayor grado de divergencia y complejidad en su red de drenaje en comparación con Cullhuay, cuyo valor ligeramente menor sugiere una red más simple o menos ramificada.

h) **Pendiente media del cauce:** Previamente, se utilizó el shapefile de cauces principales, pero esta vez seleccionando únicamente un cauce representativo para cada subcuenca. Una vez obtenido este shapefile depurado, se incorporó información de elevaciones, longitudes reales (3D) y pendientes mediante la herramienta Add Surface Information, empleando el mismo shapefile junto con el DEM del área de estudio.

Figura 34

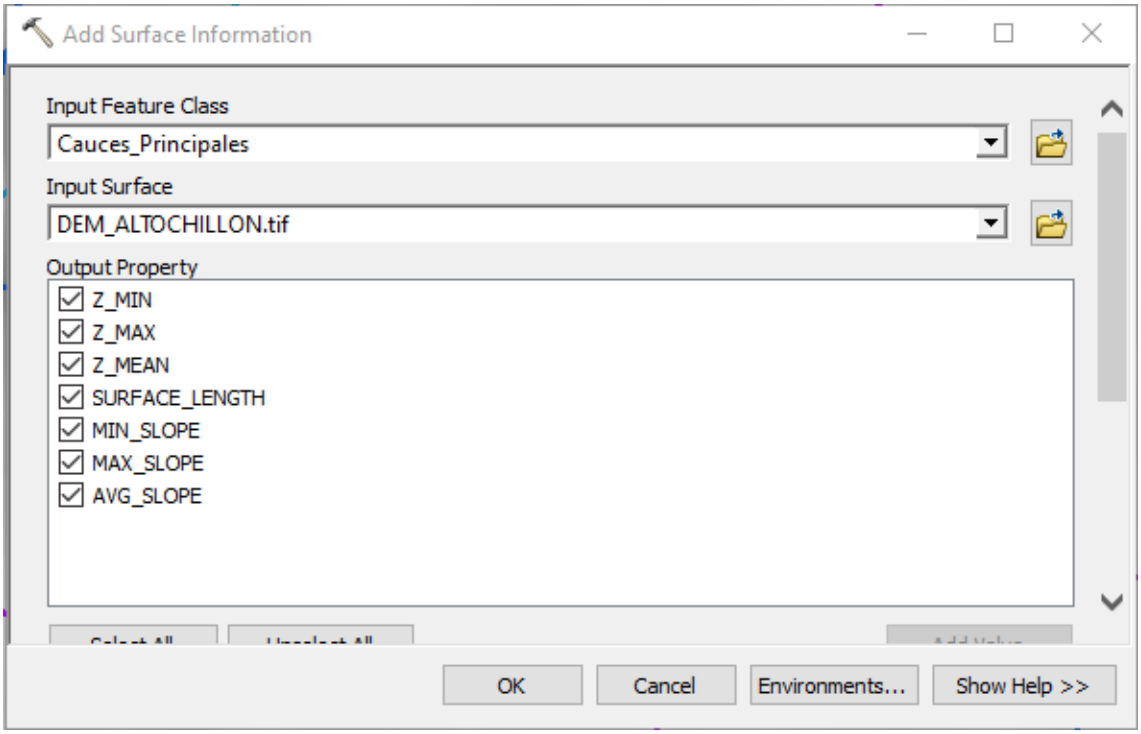
Cauces principales de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros



Nota. La figura muestra la identificación de los cauces principales correspondientes a las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros, definidos a partir de la red de drenaje jerarquizada mediante el método de Strahler y el análisis del Longest Flow Path*. Estos cauces fueron utilizados para el cálculo de la longitud del cauce principal y otros parámetros geomorfológicos relevantes.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 35

Obtención de parámetros altitudinales y de pendiente de los cauces principales mediante la herramienta Add Surface Information



Nota. Cálculo de parámetros altitudinales y de pendiente de los cauces principales a partir del DEM mediante ArcGIS. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Habiéndose obtenido esta información, se calculó la pendiente del cauce principal dividiendo el desnivel (Zmax – Zmin) entre la longitud real del tramo (3D). De este modo, se obtuvieron pendientes de 31.82%, 8.7% y 13.58% para las subcuencas de Cullhuay, Minacancha y Huaros, respectivamente. Los resultados muestran que la subcuenca Cullhuay presenta un cauce principal notablemente más abrupto, lo que sugiere mayor energía del flujo y potencial erosivo. En contraste, Minacancha posee la pendiente más baja, indicando un cauce más estable y menos energético. Huaros presenta una pendiente intermedia con comportamiento moderadamente inclinado.

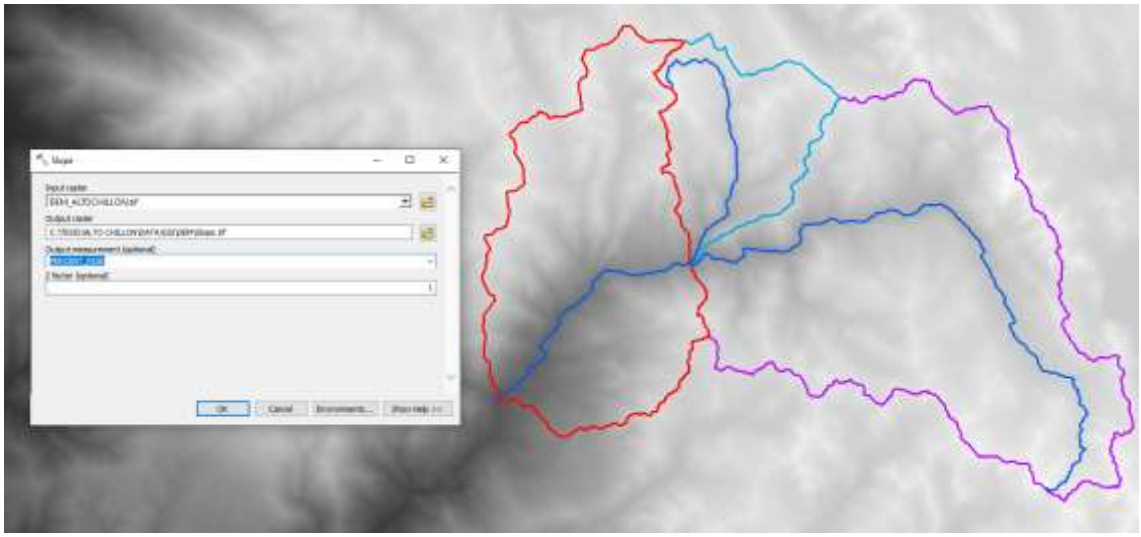
5.1.6.2 Parámetros fisiográficos

a) **Pendiente media*:*** Primero, se calculó la pendiente a partir del DEM de toda el área de estudio mediante la herramienta Slope, obteniéndose valores en unidades de m/m (Percent Rise). Posteriormente, se aplicó la herramienta Zonal Statistics as Table, la

cual permitió obtener el valor promedio de pendiente (MEAN) para cada shapefile de subcuenca. Los resultados muestran pendientes medias de 48.10 m/m, 41.58 m/m y 39.09 m/m para las subcuencas de Cullhuay, Minacancha y Huaros, respectivamente. Estos valores indican que todas las subcuencas presentan pendientes relativamente altas, propias de zonas de montaña. Cullhuay muestra la pendiente media más pronunciada, lo que sugiere una mayor energía del flujo y una mayor capacidad erosiva, mientras que Huaros presenta la menor pendiente relativa, aunque sigue siendo considerable.

Figura 36

Cálculo del mapa de pendientes a partir del modelo digital de elevación en las subcuencas de estudio

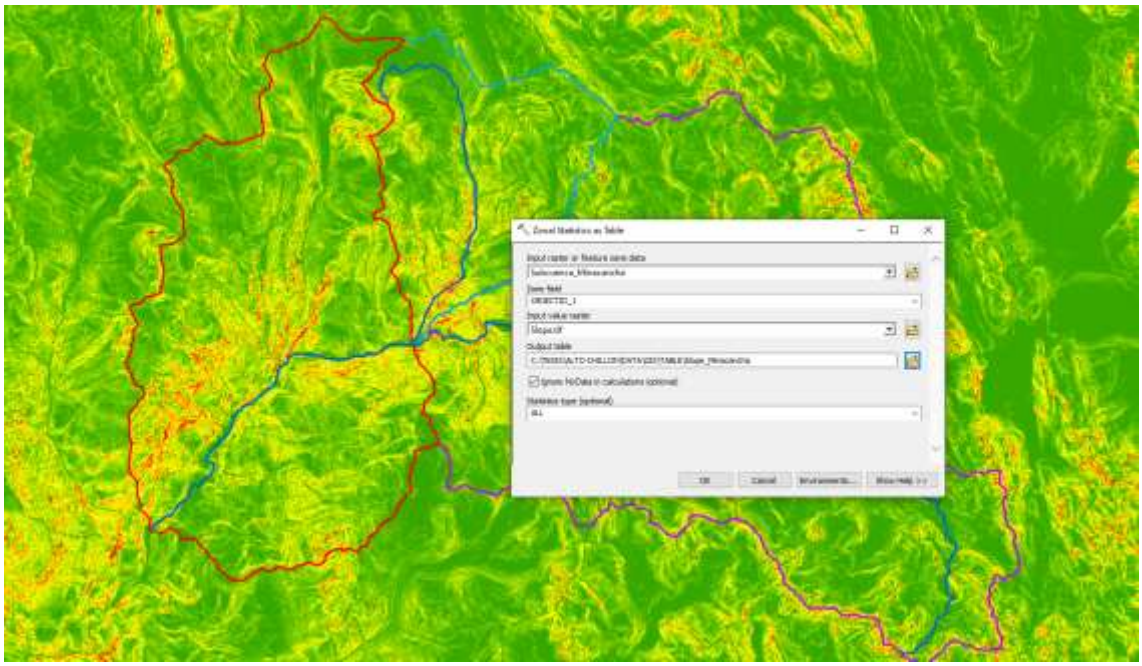


Nota. La figura muestra el cálculo del mapa de pendientes mediante la herramienta Slope *de ArcGIS, utilizando el modelo digital de elevación (DEM) de la subcuenca Alto Chillón. El mapa de pendientes obtenido fue empleado para la caracterización fisiográfica del área de estudio y para la determinación de la pendiente media de la cuenca y de los cauces principales.*

Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 37

Cálculo de estadísticas zonales de pendiente para la subcuenca Minacancha



Nota. La figura muestra la aplicación de la herramienta Zonal Statistics as Table *de ArcGIS para el cálculo de estadísticas de pendiente dentro del ámbito de la subcuenca Minacancha, utilizando como insumo el mapa de pendientes derivado del modelo digital de elevación (DEM). Los valores obtenidos fueron empleados para la determinación de la pendiente media de la subcuenca y para la caracterización fisiográfica del área de estudio.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 38

Resultados estadísticos de pendiente para la subcuenca Cullhuay

Table

Slope_Cullhuay

Rowid	OBJECTID	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	1	1300743	203241093.75	0	446.658691	446.658691	39.08645	26.314051	50841426.332374

Nota. La figura muestra la tabla de resultados obtenida a partir del análisis de estadísticas zonales de pendiente para la subcuenca Cullhuay, donde se presentan los valores mínimo, máximo, rango, pendiente media y desviación estándar, calculados a partir del mapa de pendientes derivado del modelo digital de elevación (DEM). Estos resultados fueron utilizados para la caracterización fisiográfica de la subcuenca.

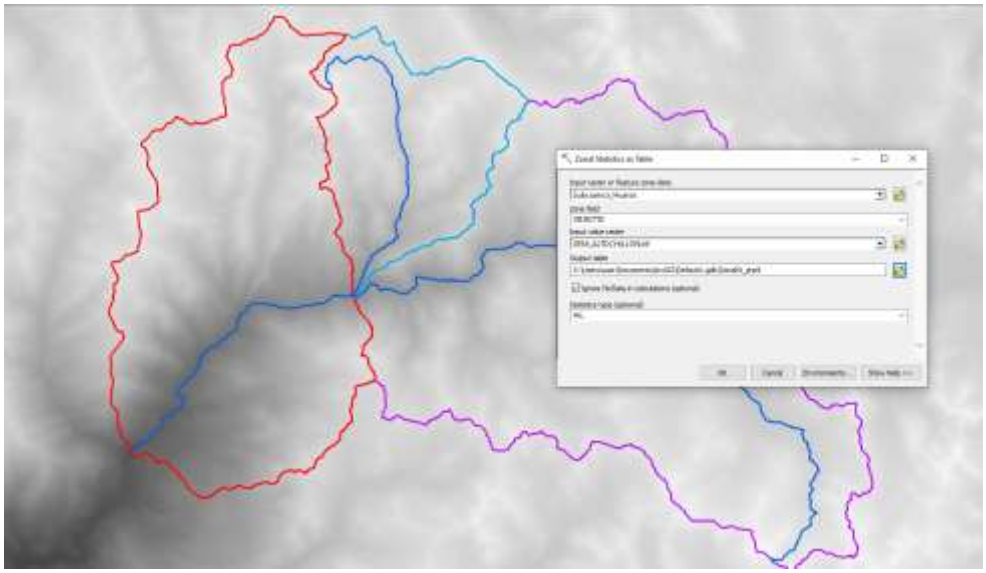
Fuente: *Elaboración propia.*

b) **Elevación máxima, media y mínima*:*** Con el DEM del área de estudio se aplicó la herramienta Zonal Statistics as Table, utilizando los shapefiles de las subcuencas para obtener los valores mínimos, máximos y promedio de elevación dentro de cada una. Como resultado, se obtuvieron elevaciones máximas de 5196, 5197 y 5329 m; promedios de 4091.63, 4560.21 y 4575.19 m; y mínimas de 2557, 3462 y 3460 m para las subcuencas de Huaros, Minacancha y Cullhuay, respectivamente.

Estos valores reflejan la marcada variabilidad altitudinal del área, característica de cuencas andinas con topografía abrupta. La subcuenca de Cullhuay presenta la elevación máxima más alta, lo que sugiere un relieve más escarpado, mientras que Huaros muestra el rango altitudinal más amplio, indicando una mayor amplitud topográfica interna. Esta variación influye directamente en parámetros hidrológicos como pendiente, velocidad de flujo y tiempo de concentración.

Figura 39

Cálculo de estadísticas zonales de altitud para la subcuenca Huaros



Nota. La figura muestra la aplicación de la herramienta Zonal Statistics as Table *de ArcGIS para el cálculo de estadísticas altitudinales (altitud mínima, máxima, media y rango) dentro del ámbito de la subcuenca Huaros, utilizando como insumo el modelo digital de elevación (DEM) de la cuenca alta del río Chillón. Los resultados obtenidos fueron empleados para la caracterización fisiográfica de la subcuenca.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 40

Resultados estadísticos de altitud para la subcuenca Huaros

Table

Elev_Huaros

Rowid	OBJECTID	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	1	815038	127349687.5	2557	5196	2639	4091.625279	600.155318	3334830084

Nota. La figura muestra la tabla de resultados obtenida a partir del análisis de estadísticas zonales de altitud para la subcuenca Huaros, donde se presentan los valores de altitud mínima, máxima, media, rango y desviación estándar, calculados a partir del modelo digital de elevación (DEM) de la cuenca alta del río Chillón. Estos resultados fueron utilizados para la caracterización fisiográfica de la subcuenca. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

c) **Tiempo de concentración*:*** La fórmula de Kirpich fue seleccionada para estimar el tiempo de concentración debido a que es uno de los métodos empíricos más utilizados para cuencas pequeñas y de fuerte pendiente, condiciones que coinciden con las características físicas de las subcuencas analizadas. Este método relaciona la longitud del cauce principal (m) y la pendiente media (m/m) del mismo mediante una expresión derivada de observaciones hidrológicas en cuencas naturales con respuestas rápidas.

$$t_c = 0.01947 L^{0.77} S^{-0.385}$$

Dado que las subcuencas de Cullhuay, Minacancha y Huaros presentan pendientes elevadas, cauces estrechos y tiempos de respuesta hidrológica cortos, la aplicación de la ecuación de Kirpich es coherente y apropiada. Además, este método es recomendado cuando la escorrentía superficial domina sobre los procesos de almacenamiento y cuando la red de drenaje es definida, lo cual se cumple en el presente análisis.

El uso de esta fórmula permitió obtener tiempos de concentración de 13.4, 7.53 y 10.69 minutos para las subcuencas de Cullhuay, Minacancha y Huaros respectivamente, valores consistentes con cuencas de alta pendiente y de respuesta rápida ante eventos de precipitación.

d) **Tiempo de retardo*:*** Para estimar el tiempo de retardo tl en cada subcuenca, se empleó la relación empírica Tl = 0.6 · Tc, propuesta en hidrología para vincular el tiempo de concentración con el desfase entre el centroide de la lluvia efectiva y el pico del hidrograma de salida. Aplicando esta relación a los tiempos de concentración previamente calculados mediante la fórmula de Kirpich, se obtuvieron tiempos de retardo de 8.04 min, 4.52 min y 6.41 min para las subcuencas de Cullhuay, Minacancha y Huaros, respectivamente.

Los resultados muestran que Minacancha presenta el menor tiempo de retardo, lo cual indica una respuesta más rápida del sistema ante eventos de lluvia, asociada generalmente a

pendientes más pronunciadas o cauces más eficientes en el transporte del flujo. Por el contrario, Cullhuay manifiesta el mayor retardo, reflejando un sistema ligeramente más lento, probablemente debido a mayores longitudes de cauce o pendientes menores, lo que atenúa el tiempo necesario para que el pico de flujo se manifieste aguas abajo.

5.1.7 Ingreso de información al modelo hidrológico HEC-HMS

Al modelo hidrológico HEC-HMS se ingresaron los parámetros geomorfológicos correspondientes al área de cada subcuenca, la longitud y la pendiente del cauce principal, así como el tiempo de concentración y el tiempo de retardo estimados para cada una de ellas. Estos parámetros describen la forma, tamaño y respuesta hidrológica de las subcuencas, permitiendo que el modelo represente adecuadamente el proceso de transformación lluvia–escorrentía.

A modo de resumen se presenta un cuadro generar de los parámetros geomorfológicos y fisiográficos de las subcuencas de estudio:

Tabla 1

Parámetros geomorfológicos y fisiográficos de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros

	Parametros	Unidad	Subcuencas		
			Cullhuay	Minacancha	Huaros
Parámetros Geomorfológicos	Area	Km2	203.30	49.25	127.38
	Perímetro	Km	75.29	34.85	58.04
	Coeficiente de compacidad (Kc)		1.49	1.40	1.45
	Longitud del cauce principal	Km	33.61	14.78	22.59

Parámetros Fisiográficos	Factor de Forma (Ff)		0.18	0.23	0.25
	Densidad de drenaje (Dd)	Km/Km2	0.70	0.69	0.70
	Orden de ríos (Strahler)		4	3	4
	Relación de bifurcación (Rb)		1.54	1.78	2.26
	Pendiente media del cauce (S)	m/m	31.82	8.70	13.58
	Pendiente media	m/m	48.10	41.58	39.09
	Elevación máxima	m	5196	5197	5329
	Elevación media	m	4091.63	4560.21	4575.19
	Elevación mínima	m	2557	3462	3460
	Tiempo de concentración	min	13.40	7.53	10.69
	Tiempo de retardo	min	8.04	4.52	6.41

Nota. Los parámetros geomorfológicos y fisiográficos fueron obtenidos a partir del procesamiento del modelo digital de elevación (DEM), la delimitación hidrológica en ArcSWAT y el análisis espacial en ArcGIS. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

5.2 Procedimiento para el objetivo especifico 2

5.2.1 Descarga y caracterización del producto PISCOp v2.1

Se accedió al portal de la Biblioteca de Datos SENAMHI – HSR PISCO disponible en la plataforma IRI (IrIDL). En la sección Bases de Datos y Variables, se seleccionó Prec v2p1 stable, correspondiente a la versión más reciente y de mayor estabilidad del conjunto de datos de precipitación PISCO. Esta plataforma permite la descarga de series en resolución diaria y mensual; no obstante, para el presente estudio enfocado en la estimación de máximas avenidas,

se empleó la precipitación diaria, ya que a partir de ella es posible obtener el valor máximo mensual requerido para el análisis extremo.

Figura 41

Plataforma SENAMHI HSR–PISCO para la obtención de datos climáticos interpolados



Nota. La figura muestra la interfaz de la biblioteca de datos SENAMHI HSR–PISCO, utilizada para la obtención de información climática interpolada a nivel nacional, incluyendo precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y caudales. Los datos PISCO fueron empleados como insumo principal para la caracterización climática y la modelación hidrológica de la cuenca alta del río Chillón.

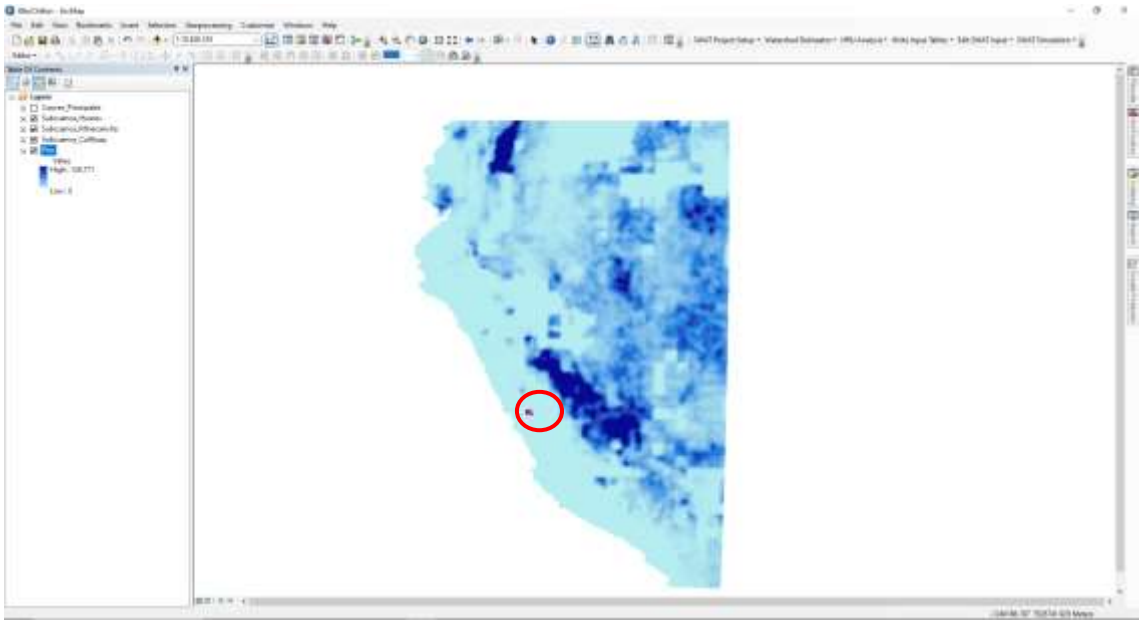
Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Esta información se descargó en formato netCDF, el cual contiene datos de precipitación diaria desde el 1/01/1981 hasta el 31/12/2016 para toda la extensión del Perú. El producto grillado presenta una resolución espacial aproximada de 11 km × 11 km por celda, donde cada celda almacena el valor de precipitación diaria correspondiente a cada fecha del periodo mencionado. Este formato permite manejar series temporales continuas y

espacialmente distribuidas, facilitando la extracción de datos por coordenadas o por áreas específicas como las subcuencas del estudio.

Figura 42

Visualización espacial de la precipitación PISCO en la cuenca alta del río Chillón



Nota. La figura muestra la visualización de la información de precipitación interpolada del producto PISCO dentro del entorno ArcGIS, superpuesta a los límites de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros. Esta información climática raster fue empleada como insumo para la caracterización espacial de la precipitación y para la modelación hidrológica en el área de estudio. ***Fuente:*** *Elaboración propia a partir de datos PISCO–SENAMHI.*

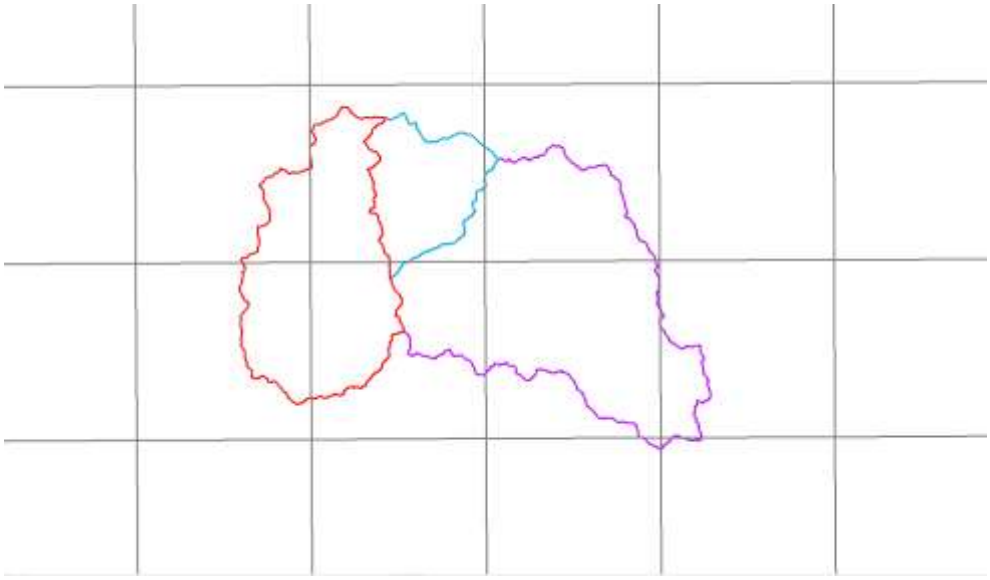
5.2.2 Definición espacial e intersección de las grillas con las subcuencas

Una vez definida la extensión de cada celda del producto PISCO, se generó una capa ráster a partir del archivo NetCDF mediante la herramienta Make NetCDF Raster Layer. El ráster resultante se convirtió posteriormente en un polígono utilizando la herramienta Raster to Polygon, con el propósito de visualizar los contornos de cada celda. Esto permitió identificar

con precisión la ubicación y el número de celdas que debían extraerse del producto PISCOp para el análisis correspondiente.

Figura 43

Superposición de las subcuencas de estudio sobre la grilla espacial de los datos climáticos PISCO



Nota. La figura muestra la ubicación de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros respecto a la grilla espacial de los datos climáticos interpolados del producto PISCO. ***Fuente:*** *Elaboración propia a partir de datos PISCO–SENAMHI.*

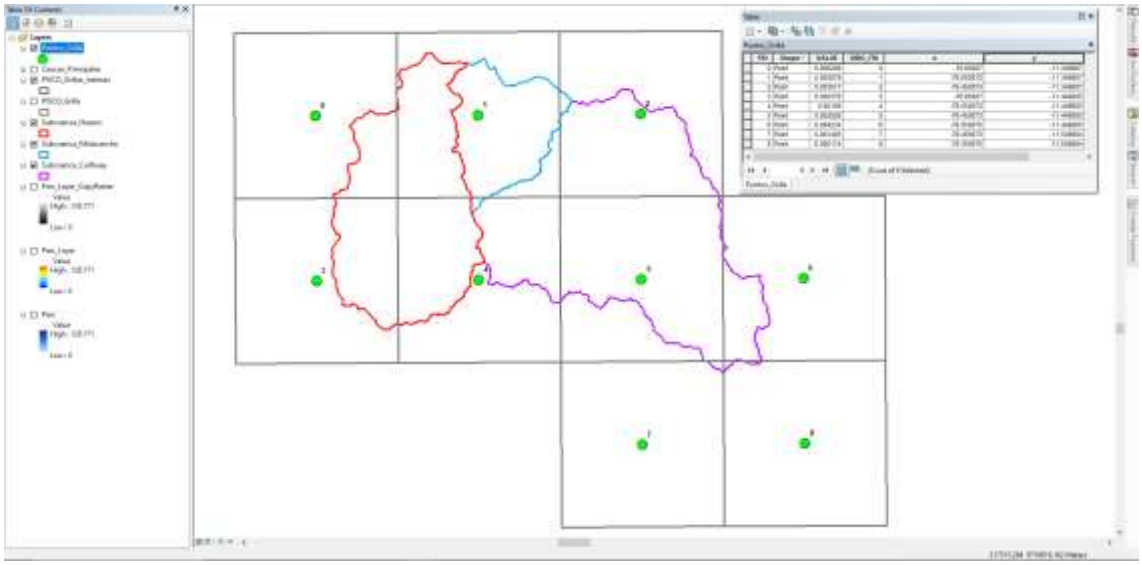
Esta superposición permitió verificar la correcta correspondencia espacial entre las subcuencas y las celdas climáticas, garantizando una adecuada extracción y asignación de la información de precipitación para el análisis hidrológico.

Se identificó que un total de nueve celdas del producto PISCO intersectan la extensión completa de las tres subcuencas de estudio. Estas celdas fueron seleccionadas y extraídas en un shapefile independiente, con el propósito de obtener sus centroides mediante la herramienta Feature to Point. Posteriormente, se generaron sus coordenadas en el sistema geográfico

decimal (latitud y longitud) utilizando la herramienta Calculate Geometry, creando para ello campos específicos en la tabla de atributos.Esta información permitió, finalmente, realizar la extracción de los datos puntuales de precipitación diaria correspondientes a cada una de las nueve celdas seleccionadas.

Figura 44

Selección de puntos representativos de la grilla PISCO dentro de las subcuencas de estudio



Nota. La figura muestra la superposición de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros con la grilla de datos climáticos PISCO y la selección de puntos representativos ubicados dentro de cada celda. Estos puntos fueron utilizados para la extracción de valores de precipitación correspondientes a cada subcuenca y para la generación de series climáticas empleadas en el análisis hidrológico. Fuente: Elaboración propia a partir de datos PISCO–SENAMHI.

5.2.3 Extracción automatizada y agregación espacial de precipitación

Ya habiendo obtenido las coordenadas de los centroides de las celdas de la grilla de precipitación, estas se ordenaron en una tabla Excel y se guardaron en formato CSV (tabulación

delimitada por comas), para posteriormente ser importadas en un código de Rstudio el cual servirá para extraer los datos de precipitación diaria del archivo NetCDF.

Figura 45

Base de datos de estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis hidrológico



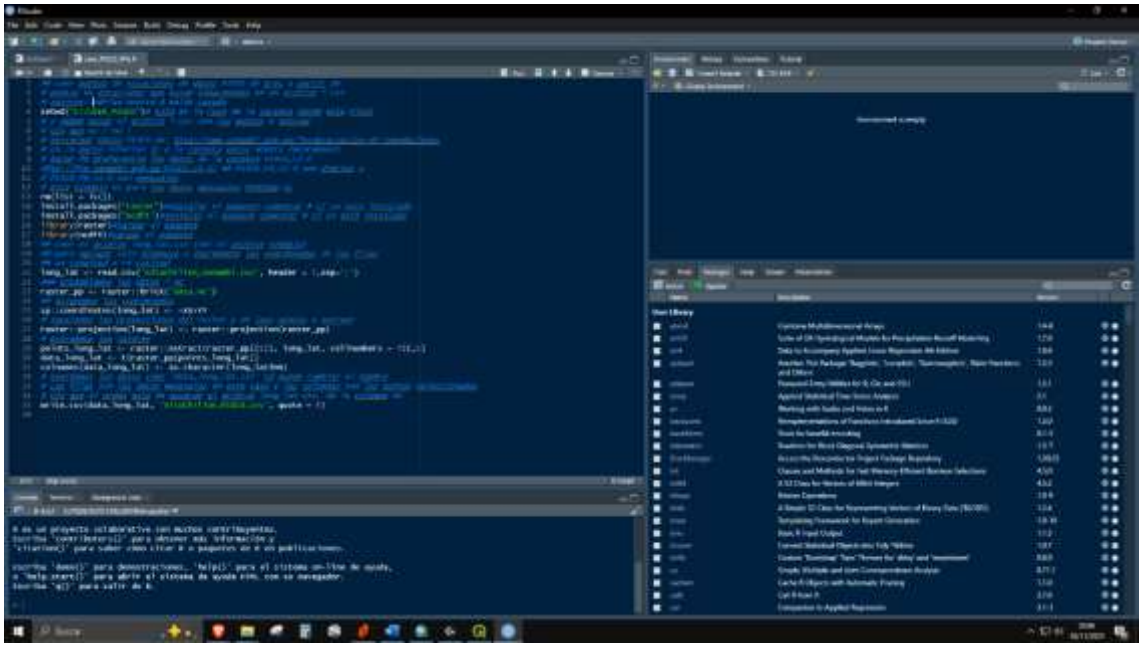
N	ESTACION	DEPARTAME	PROVINCIA	DISTRITO	LATITUD	LONGITUD	ESTE	NORTE	ALTITUD	PERIODO
1	CANTA	LIMA	CANTA	CANTA	-11.471111	-76.625833	322568.18	8746668.56	2832	1964-2023
2	PARIACANCHA	LIMA	CANTA	HUAROS	-11.383333	-76.5	322599.1	8741137.84	3800	1969-2023
3	YANTAC	JUNIN	YAULI	MARCAPOM	-11.333333	-76.4	347218.91	8746796.51	4600	1969-2019
4	HUAROS	LIMA	CANTA	HUAROS	-11.4	-76.566667	329066.41	8739329.79	3585	1964-2023
5	MILLOC	LIMA	HUAROCHIRI	CARAMPOM	-11.571278	-76.35	352799.47	8720504.99	4398	1986-2017

Nota. La figura muestra la base de datos elaborada en Microsoft Excel que contiene la información de las estaciones meteorológicas consideradas en el estudio, incluyendo su ubicación geográfica (latitud, longitud, coordenadas UTM), altitud y periodo de registro. Esta información fue utilizada para la evaluación de la disponibilidad de datos observados y como referencia para el contraste y control de calidad de los datos climáticos interpolados del producto PISCO. Fuente: Elaboración propia a partir de información del SENAMHI.

El código genera un archivo en formato CSV, donde cada fila corresponde a un día del periodo analizado y cada columna representa los valores de precipitación obtenidos en los puntos seleccionados (en este caso, los centroides de las celdas equivalentes a “estaciones”). Con esta base de datos estructurada, se procedió al procesamiento temporal, mediante el cual se identificó y extrajo el registro de precipitaciones máximas para cada celda.

Figura 46

Procesamiento y extracción de datos climáticos PISCO mediante el software R



Nota. Procesamiento de datos climáticos PISCO mediante programación en R.

Fuente: *Elaboración propia.*

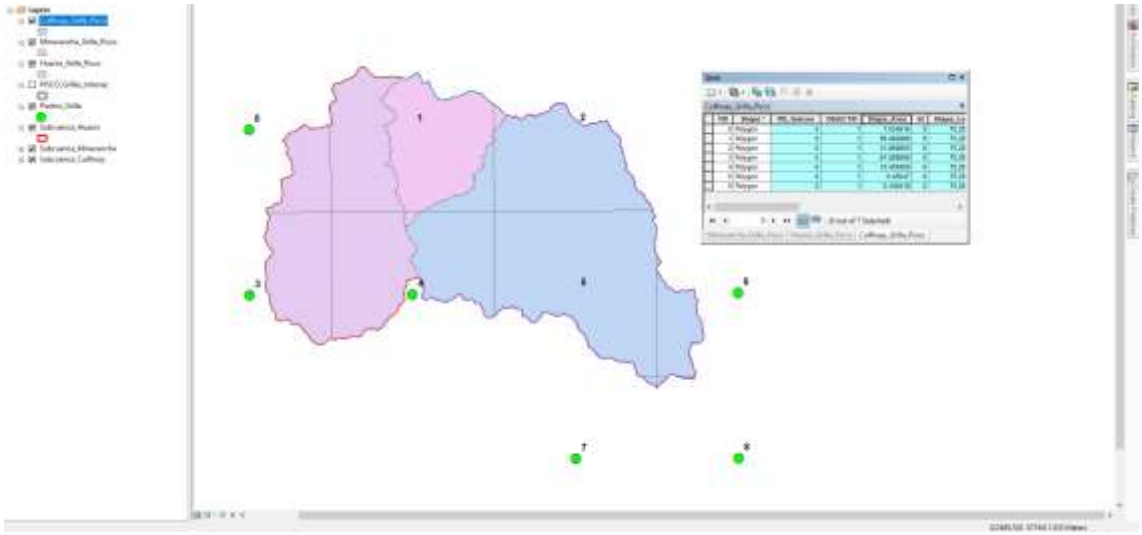
5.2.4 Generación de series de precipitación máxima y ajuste probabilístico

5.2.4.1 Generación de series de precipitación máxima

Una vez definidos los valores de precipitación correspondientes a cada celda, se procedió a obtener un valor representativo para cada subcuenca. Para ello fue necesario ponderar las áreas parciales aportadas por cada celda en función de la proporción de su superficie dentro de cada subcuenca. Este proceso se realizó intersectando los shapefiles de las nueve celdas con los shapefiles de cada subcuenca mediante la herramienta Intersect, lo que permitió calcular el área específica aportada por cada celda dentro de cada polígono de subcuenca.

Figura 47

Intersección de la grilla PISCO con las subcuencas de estudio y áreas asociadas



Nota. Intersección de las subcuencas de estudio con la grilla PISCO para el cálculo de precipitación media. ***Fuente:*** *PISCO–SENAMHI.*

Con estos valores de areas se determinó el porcentaje de influencia de cada celda, que posteriormente se utilizó para realizar la ponderación del registro de precipitaciones y así obtener un valor representativo para cada subcuenca, generándose así las series de precipitación máxima.

Tabla 2

Distribución espacial de los valores de precipitación PISCO y sus pesos por subcuenca

Subcuenca	Area(Km2)	CeldaPISCO	Peso
CullHuay	7.75	1	0.037
	61.86	2	0.297
	31.77	4	0.153
CullHuay	91.00	5	0.437
	15.09	6	0.073

	0.45	7	0.002
	0.18	8	0.001
	45.12	1	0.969
Minacancha	0.81	2	0.017
	0.62	4	0.013
	17.45	0	0.150
	36.20	1	0.312
Huaros	32.61	3	0.977
	40.69	4	0.561

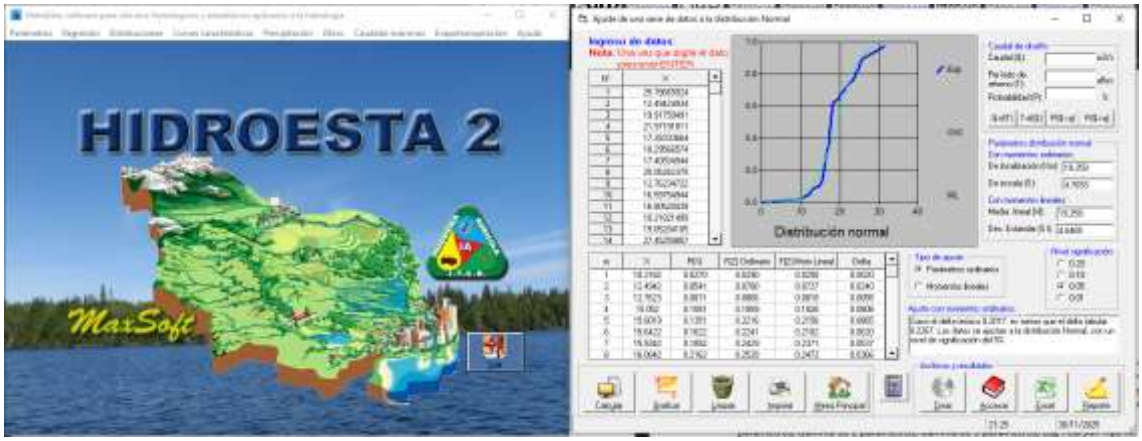
Nota. Los valores de precipitación de cada celda PISCO fueron ponderados en función de su área de intersección con cada subcuenca, con el fin de obtener un valor representativo de la precipitación media por subcuenca. ***Fuente:*** *Elaboración propia a partir de datos PISCO–SENAMHI.*

5.2.4.2 Ajuste probabilístico

Se realizó primero un análisis preliminar de datos dudosos para cada serie de precipitaciones máximas, sin identificarse valores atípicos (outliers) en ninguna de las series evaluadas. Posteriormente, se aplicó un análisis de ajuste probabilístico utilizando el software Hidroesta 2.0, considerando un total de ocho distribuciones recomendadas por el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del MTC: Normal, Log Normal de 2 parámetros, Log Normal de 3 parámetros, Gamma de 2 parámetros, Gamma de 3 parámetros, Log Pearson Tipo III, Gumbel y Log Gumbel.

Figura 48

Análisis y ajuste de series hidrológicas a la distribución Normal mediante el software HIDROESTA 2



Nota. La figura muestra la interfaz del software HIDROESTA 2, utilizado para el análisis estadístico de series hidrológicas, donde se realiza el ajuste de los datos a la distribución Normal y se evalúa su comportamiento probabilístico. Este procedimiento fue empleado para el análisis de eventos hidrológicos extremos y la estimación de variables hidrológicas asociadas a distintos periodos de retorno. ***Fuente:*** *Elaboración propia mediante el software HIDROESTA 2.*

Para cada serie, se evaluó el desempeño de las distribuciones mediante la comparación entre los valores teóricos y los valores calculados (delta), seleccionándose como distribución óptima aquella que presentó el mejor ajuste estadístico. En el siguiente cuadro se resumen las distribuciones con mejor ajuste para cada serie representativa de la subcuenca:

Tabla 3

Distribuciones probabilísticas seleccionadas para las series de precipitación máxima por subcuenca

Serie de precipitación máxima	Distribución Probabilística
Huaros	Gumbel
Minacancha	Log-Pearson 2
Cullhuay	Gamma 2

Nota. La selección de la distribución probabilística se realizó a partir del ajuste estadístico de las series de precipitación máxima y la evaluación de criterios de bondad de ajuste mediante el software HIDROESTA 2. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Una vez determinadas las distribuciones de probabilidad con mejor ajuste para cada subcuenca, se procedió a calcular las precipitaciones máximas asociadas a distintos períodos de retorno. Para ello, se empleó nuevamente el software Hidroesta 2, el cual permite generar valores de precipitación extrema a partir de la distribución seleccionada. Se obtuvieron así las precipitaciones máximas para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 300, 500 y 1000 años

Tabla 4

Valores de precipitación extrema (mm) por período de retorno y subcuenca

TR	CullHuay	Huaros	Minacancha
2	27.56	18.00	21.57
5	32.44	21.79	26.77
10	35.20	24.30	29.97
20	37.59	26.71	32.90
25	38.30	27.48	33.80
50	40.40	29.83	36.54
100	42.35	32.17	39.19
200	44.17	34.50	41.78
300	45.19	35.86	43.28
500	46.43	37.57	45.15
1000	48.04	39.89	47.68

Nota. La precipitación máxima (mm) para cada período de retorno se obtuvo mediante Hidroesta 2, usando como entrada la distribución probabilística de mejor ajuste definida para cada subcuenca.

5.2.5 Construcción de curvas IDF e implementación al programa HEC-HMS

Previo a la construcción de las curvas IDF, se debe tener en cuenta que las lluvias máximas en 24 horas generadas y observadas para diferentes periodos de retorno tomadas en un único y fijo intervalo de observación, para la duración comprendida entre 1 y 24 horas.

Según la Organización Mundial de Meteorología, estos valores deben ser incrementados en un 13%, es decir, multiplicados por el factor 1.13, generando magnitudes más apropiadas y verdaderas.

Tabla 5

Precipitación máxima estimada para distintos periodos de retorno en las subcuencas Cullhuay, Huaros y Minacancha

TR	CullHuay	Huaros	Minacancha
2	31.96	23.67	25.72
5	39.91	29.67	32.06
10	45.14	33.62	36.18
20	50.19	37.46	39.97
25	51.79	38.70	41.15
50	56.53	42.63	44.80
100	61.70	46.56	48.55
200	66.68	50.78	51.78
300	69.60	53.36	53.89
500	73.31	56.59	56.55
1000	78.41	61.26	59.77

Nota. Los valores de precipitación máxima fueron estimados a partir del ajuste de distribuciones probabilísticas a las series históricas de precipitación máxima, considerando distintos periodos de retorno (TR). Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la corrección de las precipitaciones máximas para los diferentes períodos de retorno, se procedió a calcular las precipitaciones de diseño para duraciones menores a 24 horas mediante el método de Dick y Peschke. Este procedimiento permitió desagregar las precipitaciones máximas diarias en valores correspondientes a diversas duraciones, necesarios para el posterior análisis hidrológico y la estimación de hidrogramas de diseño.

Tabla 6

Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) de precipitación para la subcuenca Cullhuay

DURACIÓN		SUBCUENCA CULLHUAY										
		PERÍODO DE RETORNO (años)										
Hr	Min	2	5	10	20	25	50	100	200	300	500	1000
0.17	10.00	9.23	11.52	13.03	14.49	14.95	16.32	17.81	19.25	20.09	21.16	22.63
0.33	20.00	10.97	13.70	15.49	17.23	17.78	19.41	21.18	22.89	23.89	25.17	26.92
0.50	30.00	12.14	15.16	17.15	19.07	19.68	21.48	23.44	25.33	26.44	27.85	29.79
0.67	40.00	13.05	16.29	18.43	20.49	21.14	23.08	25.19	27.22	28.41	29.93	32.01
0.83	50.00	13.80	17.23	19.48	21.67	22.36	24.40	26.63	28.78	30.04	31.65	33.85
1.00	60.00	14.44	18.03	20.39	22.68	23.40	25.54	27.87	30.12	31.44	33.12	35.43
1.50	90.00	15.98	19.96	22.57	25.10	25.90	28.26	30.85	33.34	34.80	36.66	39.20
2.00	120.00	17.17	21.44	24.25	26.97	27.83	30.37	33.15	35.82	37.39	39.39	42.13
4.00	240.00	20.42	25.50	28.84	32.07	33.09	36.12	39.42	42.60	44.47	46.84	50.10
6.00	360.00	22.60	28.22	31.92	35.49	36.62	39.97	43.63	47.15	49.21	51.84	55.44
7.00	420.00	23.49	29.33	33.17	36.89	38.06	41.54	45.34	49.00	51.14	53.88	57.62
8.00	480.00	24.29	30.33	34.30	38.14	39.35	42.95	46.88	50.66	52.88	55.70	59.58
10.00	600.00	25.68	32.07	36.26	40.33	41.61	45.42	49.57	53.57	55.91	58.90	63.00
11.00	660.00	26.30	32.84	37.14	41.30	42.61	46.51	50.76	54.86	57.26	60.32	64.51
12.00	720.00	26.88	33.56	37.95	42.21	43.55	47.54	51.88	56.07	58.52	61.65	65.93
24.00	1440.00	31.96	39.91	45.14	50.19	51.79	56.53	61.70	66.68	69.60	73.31	78.41

Nota. Las intensidades de precipitación fueron estimadas a partir de la precipitación máxima para distintos periodos de retorno y duraciones, utilizando el ajuste probabilístico seleccionado para la subcuenca Cullhuay. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Tabla 7

Valores de intensidad de precipitación para distintos periodos de retorno y duraciones en la subcuenca Huaros

DURACIÓN		SUBCUENCA HUAROS-1 PERÍODO DE RETORNO (años)										
Hr	min	2	5	10	20	25	50	100	200	300	500	1000
0.17	10.00	6.83	8.56	9.70	10.82	11.17	12.31	13.44	14.66	15.40	16.34	17.68
0.33	20.00	8.13	10.18	11.54	12.86	13.29	14.63	15.98	17.43	18.32	19.43	21.03
0.50	30.00	8.99	11.27	12.77	14.23	14.70	16.19	17.69	19.29	20.27	21.50	23.27
0.67	40.00	9.66	12.11	13.72	15.29	15.80	17.40	19.01	20.73	21.78	23.10	25.01
0.83	50.00	10.22	12.81	14.51	16.17	16.71	18.40	20.10	21.92	23.03	24.43	26.44
1.00	60.00	10.69	13.40	15.19	16.93	17.49	19.26	21.04	22.94	24.11	25.57	27.68
1.50	90.00	11.83	14.83	16.81	18.73	19.35	21.31	23.28	25.39	26.68	28.29	30.63
2.00	120.00	12.72	15.94	18.06	20.13	20.79	22.90	25.02	27.28	28.67	30.40	32.91
4.00	240.00	15.12	18.95	21.48	23.94	24.73	27.24	29.75	32.45	34.09	36.16	39.14
6.00	360.00	16.74	20.98	23.77	26.49	27.37	30.14	32.93	35.91	37.73	40.01	43.32
7.00	420.00	17.39	21.80	24.71	27.53	28.44	31.33	34.22	37.32	39.21	41.58	45.02
8.00	480.00	17.98	22.54	25.54	28.47	29.41	32.39	35.38	38.59	40.55	43.00	46.55
10.00	600.00	19.02	23.83	27.01	30.10	31.09	34.25	37.41	40.80	42.87	45.46	49.22
11.00	660.00	19.47	24.41	27.66	30.83	31.84	35.07	38.31	41.78	43.91	46.56	50.40
12.00	720.00	19.90	24.95	28.27	31.50	32.54	35.85	39.16	42.70	44.87	47.58	51.51
24.00	1440.00	23.67	29.67	33.62	37.46	38.70	42.63	46.56	50.78	53.36	56.59	61.26

Nota. Las intensidades de precipitación fueron estimadas a partir de la precipitación máxima para distintos periodos de retorno y duraciones, utilizando el ajuste probabilístico seleccionado para la subcuenca Huaros.

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 8

Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) de precipitación para la subcuenca Minacancha

DURACIÓN		SUBCUENCA MINACANCHA PERÍODO DE RETORNO (años)										
Hr	min	2	5	10	20	25	50	100	200	300	500	1000
0.17	10.00	7.42	9.25	10.44	11.54	11.88	12.93	14.01	14.95	15.56	16.33	17.26
0.33	20.00	8.83	11.00	12.42	13.72	14.13	15.38	16.67	17.78	18.50	19.41	20.52
0.50	30.00	9.77	12.18	13.75	15.18	15.63	17.02	18.44	19.67	20.47	21.49	22.71

0.67	40.00	10.50	13.09	14.77	16.32	16.80	18.29	19.82	21.14	22.00	23.09	24.40
0.83	50.00	11.10	13.84	15.62	17.25	17.76	19.34	20.96	22.35	23.26	24.41	25.80
1.00	60.00	11.62	14.48	16.35	18.06	18.59	20.24	21.93	23.40	24.35	25.55	27.01
1.50	90.00	12.86	16.03	18.09	19.98	20.57	22.40	24.27	25.89	26.95	28.28	29.89
2.00	120.00	13.82	17.22	19.44	21.47	22.11	24.07	26.08	27.82	28.95	30.38	32.12
4.00	240.00	16.43	20.48	23.12	25.54	26.29	28.63	31.02	33.09	34.43	36.13	38.19
6.00	360.00	18.19	22.67	25.58	28.26	29.10	31.68	34.33	36.62	38.11	39.99	42.27
7.00	420.00	18.90	23.56	26.59	29.37	30.24	32.93	35.68	38.05	39.60	41.56	43.93
8.00	480.00	19.54	24.36	27.49	30.37	31.27	34.04	36.89	39.35	40.95	42.97	45.42
10.00	600.00	20.66	25.75	29.07	32.11	33.06	36.00	39.00	41.60	43.30	45.44	48.02
11.00	660.00	21.16	26.38	29.77	32.88	33.86	36.87	39.94	42.61	44.34	46.53	49.18
12.00	720.00	21.63	26.96	30.42	33.61	34.60	37.68	40.82	43.54	45.32	47.56	50.26
24.00	1440.00	25.72	32.06	36.18	39.97	41.15	44.80	48.55	51.78	53.89	56.55	59.77

Nota. Las intensidades de precipitación fueron estimadas a partir de la precipitación máxima para distintos periodos de retorno y duraciones, utilizando el ajuste probabilístico seleccionado para la subcuenca Minacancha. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Ya teniendo los valores de precipitaciones de diseño para cada duración, se procedió a calcular las intensidades correspondientes. Posteriormente, mediante un análisis de regresión múltiple, se obtuvieron las ecuaciones IDF (Intensidad–Duración–Frecuencia) para cada subcuenca, las cuales permiten estimar de manera continua la intensidad de lluvia en función del periodo de retorno y la duración considerada.

Tabla 9

Intensidades de precipitación (mm/h) para distintos periodos de retorno y duraciones en la subcuenca Cullhuay

DURACIÓN		SUBCUENCA CULLHUAY									
		PERÍODO DE RETORNO (años)									
Hr	min	2	5	10	20	25	50	100	200	500	1,000
0.17	10.00	55.36	69.13	78.18	86.94	89.70	97.91	106.86	115.48	126.98	135.81
0.33	20.00	32.92	41.10	46.48	51.69	53.34	58.22	63.54	75.50	75.50	80.75
0.50	30.00	24.29	30.33	34.30	38.14	39.35	42.95	46.88	55.70	55.70	59.58
0.67	40.00	19.57	24.44	27.64	30.74	31.71	34.62	37.78	44.89	44.89	48.02
0.83	50.00	16.56	20.67	23.38	26.00	26.83	29.28	31.96	37.98	37.98	40.62
1.00	60.00	14.44	18.03	20.39	22.68	23.40	25.54	27.87	33.12	33.12	35.43
1.50	90.00	10.65	13.30	15.05	16.73	17.26	18.84	20.57	24.44	24.44	26.14
2.00	120.00	8.59	10.72	12.13	13.48	13.91	15.19	16.57	19.69	19.69	21.06

4.00	240.00	5.11	6.38	7.21	8.02	8.27	9.03	9.85	11.71	11.71	12.52
6.00	360.00	3.77	4.70	5.32	5.92	6.10	6.66	7.27	8.64	8.64	9.24
7.00	420.00	3.36	4.19	4.74	5.27	5.44	5.93	6.48	7.70	7.70	8.23
8.00	480.00	3.04	3.79	4.29	4.77	4.92	5.37	5.86	6.96	6.96	7.45
10.00	600.00	2.57	3.21	3.63	4.03	4.16	4.54	4.96	5.89	5.89	6.30
11.00	660.00	2.39	2.99	3.38	3.75	3.87	4.23	4.61	5.48	5.48	5.86
12.00	720.00	2.24	2.80	3.16	3.52	3.63	3.96	4.32	5.14	5.14	5.49
24.00	1440.00	1.33	1.66	1.88	2.09	2.16	2.36	2.57	2.78	3.05	3.27

Nota. Las intensidades de precipitación fueron obtenidas a partir de la precipitación máxima estimada para distintos periodos de retorno, dividiendo el monto de precipitación entre la duración correspondiente, conforme a las curvas IDF desarrolladas para la subcuenca Cullhuay.

Fuente: *Elaboración propia.*

$$I = \frac{10^{2.4904} \; T^{0.1412}}{t^{0.75}}$$

Tabla 10

Intensidades de precipitación (mm/h) para distintos periodos de retorno y duraciones en la subcuenca Minacancha

		SUBCUENCA MINACANCHA									
DURACIÓN		PERÍODO DE RETORNO (años)									
Hr	min	2	5	10	20	25	50	100	200	500	1,000
0.17	10.00	44.54	55.52	62.66	69.22	71.27	77.60	84.09	89.69	97.95	103.53
0.33	20.00	26.49	33.01	37.26	41.16	42.38	46.14	50.00	58.24	58.24	61.56
0.50	30.00	19.54	24.36	27.49	30.37	31.27	34.04	36.89	42.97	42.97	45.42
0.67	40.00	15.75	19.63	22.16	24.47	25.20	27.44	29.73	34.63	34.63	36.60
0.83	50.00	13.32	16.61	18.74	20.70	21.31	23.21	25.15	29.29	29.29	30.96
1.00	60.00	11.62	14.48	16.35	18.06	18.59	20.24	21.93	25.55	25.55	27.01
1.50	90.00	8.57	10.69	12.06	13.32	13.72	14.93	16.18	18.85	18.85	19.92
2.00	120.00	6.91	8.61	9.72	10.74	11.05	12.04	13.04	15.19	15.19	16.06
4.00	240.00	4.11	5.12	5.78	6.38	6.57	7.16	7.75	9.03	9.03	9.55
6.00	360.00	3.03	3.78	4.26	4.71	4.85	5.28	5.72	6.66	6.66	7.04
7.00	420.00	2.70	3.37	3.80	4.20	4.32	4.70	5.10	5.94	5.94	6.28
8.00	480.00	2.44	3.04	3.44	3.80	3.91	4.26	4.61	5.37	5.37	5.68
10.00	600.00	2.07	2.58	2.91	3.21	3.31	3.60	3.90	4.54	4.54	4.80
11.00	660.00	1.92	2.40	2.71	2.99	3.08	3.35	3.63	4.23	4.23	4.47
12.00	720.00	1.80	2.25	2.54	2.80	2.88	3.14	3.40	3.96	3.96	4.19
24.00	1440.00	1.07	1.34	1.51	1.67	1.71	1.87	2.02	2.16	2.36	2.49

Nota. *Las intensidades de precipitación fueron obtenidas a partir de la precipitación máxima estimada para distintos periodos de retorno, dividiendo el monto de precipitación entre la duración correspondiente, conforme a las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia desarrolladas para la subcuenca Minacancha.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

$$I = \frac{10^{2.4022} * T^{0.1321}}{t^{0.75}}$$

Tabla 11

Intensidades de precipitación (mm/h) para distintos periodos de retorno y duraciones en la subcuenca Huaros

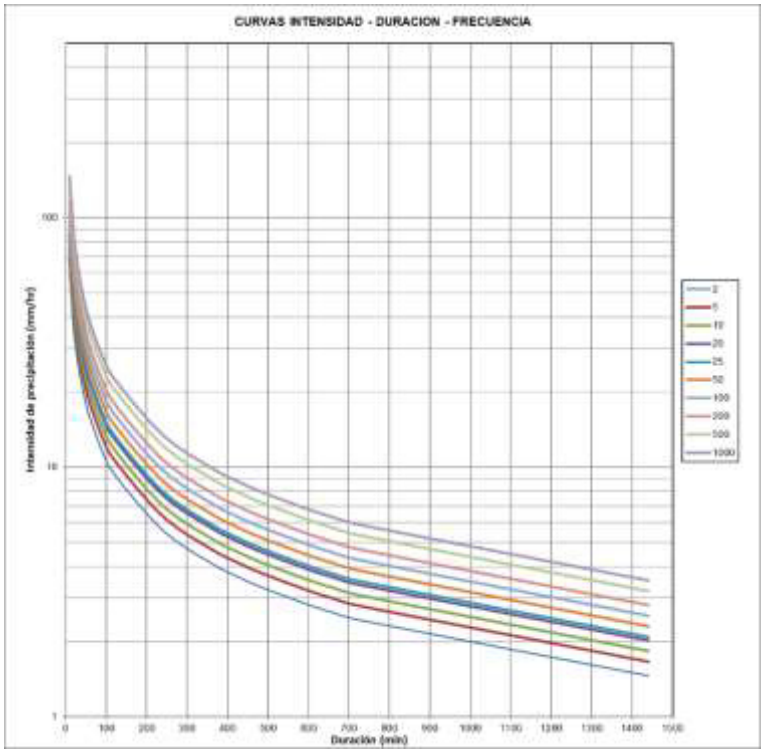
		SUBCUENCA HUAROS-1									
DURACIÓN		PERÍODO DE RETORNO (años)									
Hr	min	2	5	10	20	25	50	100	200	500	1,000
0.17	10.00	40.99	51.38	58.23	64.89	67.03	73.83	80.65	87.96	98.01	106.11
0.33	20.00	24.38	30.55	34.62	38.58	39.86	43.90	47.95	58.28	58.28	63.09
0.50	30.00	17.98	22.54	25.54	28.47	29.41	32.39	35.38	43.00	43.00	46.55
0.67	40.00	14.49	18.17	20.59	22.94	23.70	26.10	28.51	34.65	34.65	37.51
0.83	50.00	12.26	15.37	17.41	19.41	20.05	22.08	24.12	29.31	29.31	31.73
1.00	60.00	10.69	13.40	15.19	16.93	17.49	19.26	21.04	25.57	25.57	27.68
1.50	90.00	7.89	9.89	11.21	12.49	12.90	14.21	15.52	18.86	18.86	20.42
2.00	120.00	6.36	7.97	9.03	10.06	10.40	11.45	12.51	15.20	15.20	16.46
4.00	240.00	3.78	4.74	5.37	5.98	6.18	6.81	7.44	9.04	9.04	9.79
6.00	360.00	2.79	3.50	3.96	4.42	4.56	5.02	5.49	6.67	6.67	7.22
7.00	420.00	2.48	3.11	3.53	3.93	4.06	4.48	4.89	5.94	5.94	6.43
8.00	480.00	2.25	2.82	3.19	3.56	3.68	4.05	4.42	5.37	5.37	5.82
10.00	600.00	1.90	2.38	2.70	3.01	3.11	3.42	3.74	4.55	4.55	4.92
11.00	660.00	1.77	2.22	2.51	2.80	2.89	3.19	3.48	4.23	4.23	4.58
12.00	720.00	1.66	2.08	2.36	2.63	2.71	2.99	3.26	3.97	3.97	4.29
24.00	1440.00	0.99	1.24	1.40	1.56	1.61	1.78	1.94	2.12	2.36	2.55

Nota. Las intensidades de precipitación fueron obtenidas a partir de la precipitación máxima estimada para distintos periodos de retorno, dividiendo el monto de precipitación entre la duración correspondiente, conforme a las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia desarrolladas para la subcuenca Huaros. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Con estas ecuaciones se graficaron las curvas IDF para cada subcuenca, y a su vez se obtuvieron los hietogramas de diseño que serán incorporados al modelo HEC-HMS:

Figura 49

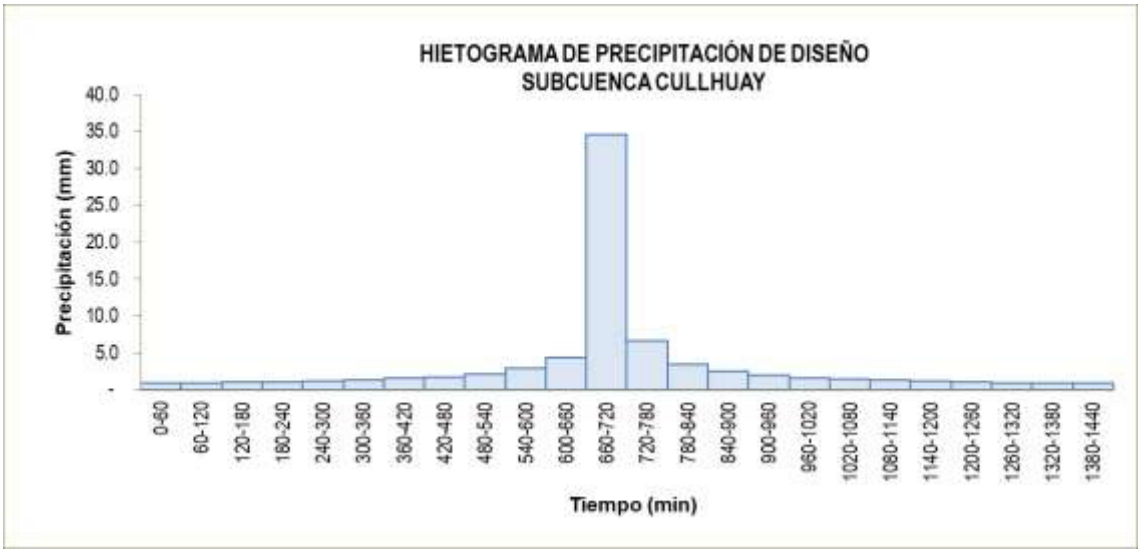
Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) de precipitación para la subcuenca de estudio



Nota. La figura muestra la relación entre la intensidad de precipitación, la duración del evento y el periodo de retorno, evidenciando la disminución de la intensidad conforme aumenta la duración y su incremento para mayores periodos de retorno. ***Fuente:*** *Elaboración propia*.

Figura 50

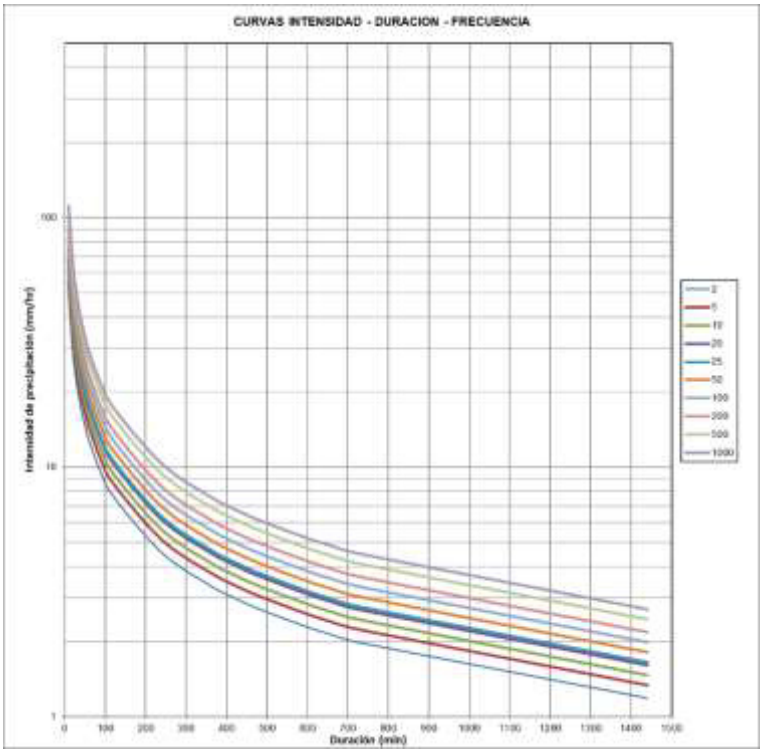
Hietograma de precipitación de diseño para la subcuenca Cullhuay



Nota. El hietograma representa la distribución temporal de la precipitación de diseño, obtenida a partir de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) y aplicada para la simulación hidrológica de la subcuenca Cullhuay. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 51

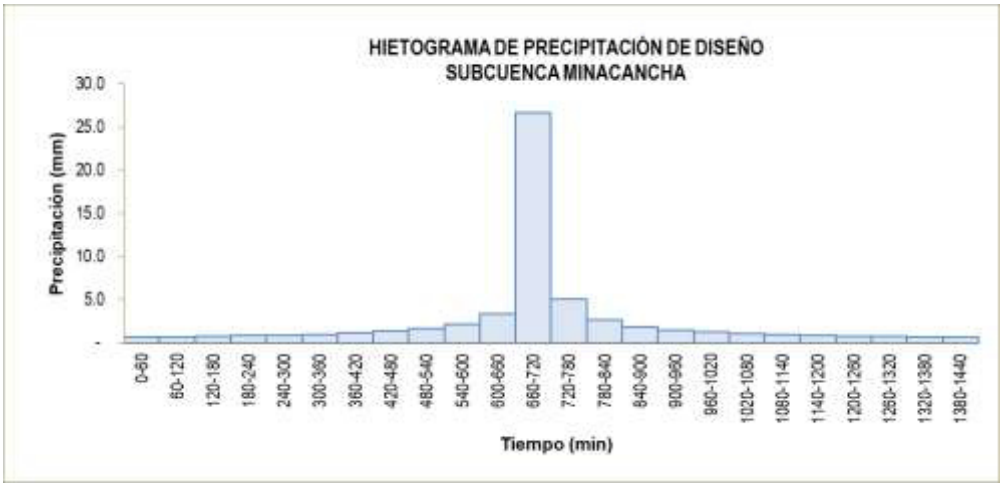
Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) de precipitación para la subcuenca Cullhuay



Nota. La figura muestra la relación entre la intensidad de precipitación, la duración del evento y el periodo de retorno, evidenciando la disminución de la intensidad conforme aumenta la duración y su incremento para mayores periodos de retorno. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 52

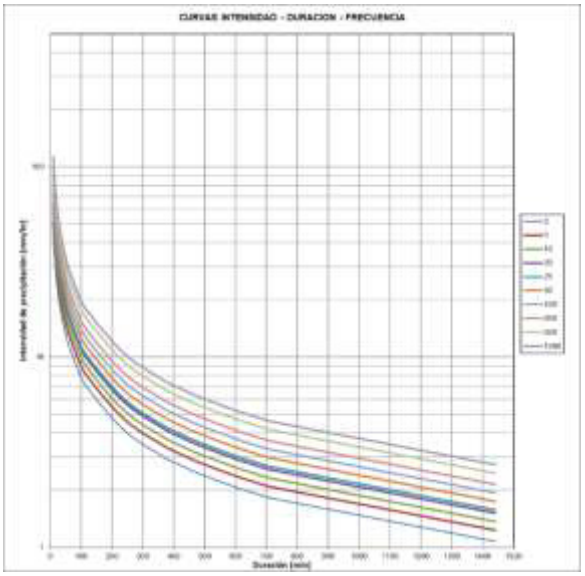
Hietograma de precipitación de diseño para la subcuenca Minacancha



Nota. *El hietograma representa la distribución temporal de la precipitación de diseño, obtenida a partir de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) y utilizada como insumo para la simulación hidrológica de la subcuenca Minacancha.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 53

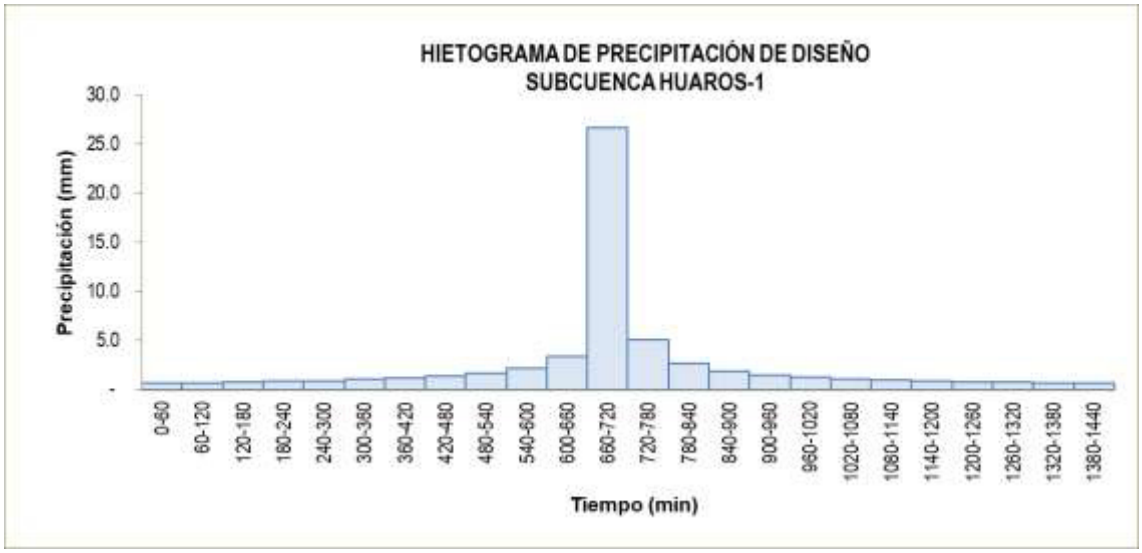
Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) de precipitación para la subcuenca Minacancha



Nota. La figura muestra la relación entre la intensidad de precipitación, la duración del evento y el periodo de retorno, evidenciando la disminución de la intensidad conforme aumenta la duración y su incremento para mayores periodos de retorno. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Figura 54

Hietograma de precipitación de diseño para la subcuenca Huaros



Nota. La precipitación de diseño fue discretizada en intervalos de tiempo regulares, concentrando la mayor intensidad alrededor del centro del evento, conforme al método de distribución temporal adoptado en el análisis hidrológico. ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

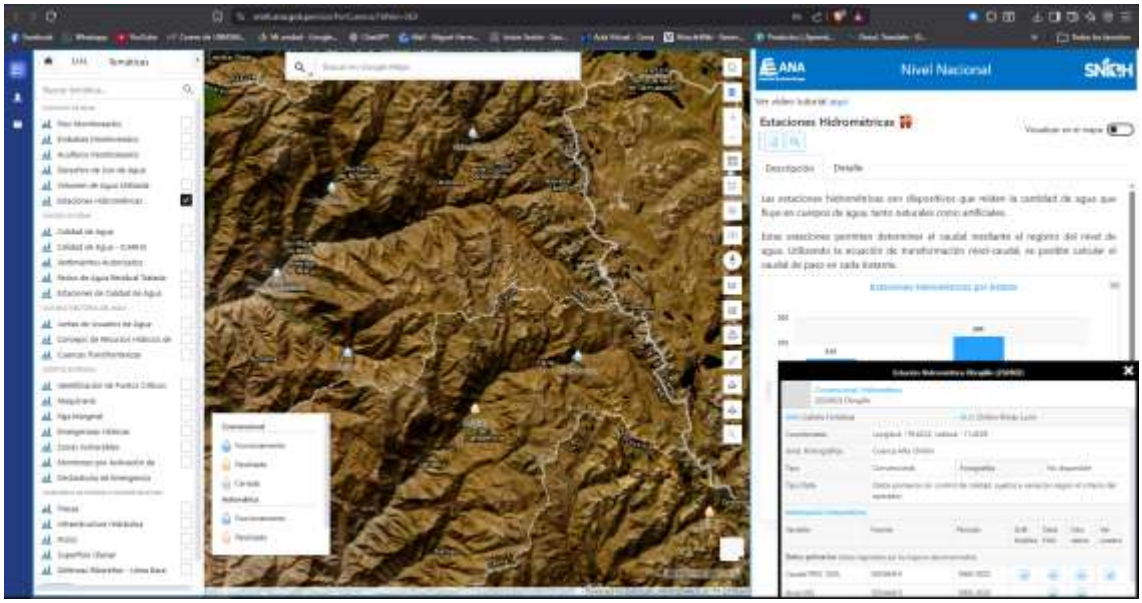
5.3 Procedimiento para el objetivo especifico 3

5.3.1 Identificación de estación hidrométrica y procesamiento de datos históricos

Se realizó la búsqueda de información hidrométrica en las plataformas web de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), identificándose la estación hidrométrica Obrajillo, ubicada dentro del área de estudio, la cual registra datos de caudales medios diarios correspondientes a los periodos 1968–1984 y 1997–2021. Los datos fueron descargados en formato Excel a través de la plataforma del Observatorio del Agua del ANA, utilizando la opción Visor por Cuencas. (https://snirh.ana.gob.pe/visorPorCuenca/?IdVar=263)

Figura 55

Ubicación y ficha de la estación hidrométrica Obrajillo en el Visor por Cuencas del SNIRH–ANA



Nota. Captura de pantalla del Observatorio del Agua (SNIRH) – Autoridad Nacional del Agua (ANA) utilizada para la identificación de la estación hidrométrica Obrajillo dentro del área de estudio y la

verificación de disponibilidad de datos hidrométricos (caudales). Fuente: SNIRH–ANA, Visor por Cuencas.

De toda la información recopilada, se procedió a ordenarla mediante tablas dinámicas, con el fin de obtener el caudal medio diario máximo de cada año. Para el presente análisis se utilizaron los datos correspondientes al período 1997–2019, siendo este un periodo suficiente para el análisis correspondiente. Además de ello, estos años presentan menor cantidad de datos faltantes y, constituyen la información más actualizada disponible.

Tabla 12

Caudales medios diarios máximos mensuales y máximo anual (m³/s) – Estación hidrométrica Obrajillo (1997–2019)

Caudales Máximos Diario (m3/s) - Estación Obrajillo													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MAX
1997		35.7	20.0	2.8	2.1	1.8	5.3	3.0	2.7	4.7	4.8	13.3	35.7
1998	22.9	37.3	63.8	14.0	3.5	2.5	1.9	1.7	2.2	2.9	3.8	3.3	63.8
1999	5.5	12.9	10.6	6.0	4.3	1.3	1.1	0.9	1.1	2.4	2.6	4.3	12.9
2000	10.9	12.6	11.1	11.1	5.2	2.8	1.6	1.9	4.0	4.6	7.0	20.9	20.9
2001	28.1	27.3	31.5	20.9	4.8	3.2	2.2	1.9	6.0	3.7	11.3	10.5	31.5
2002	6.3	13.1	19.2	13.5	5.2	3.0	1.8	3.8	5.4	6.5	12.4	9.0	19.2
2003	13.7	18.5	24.9	15.3	4.6	2.9	1.8	1.7	3.7	5.2	3.1	8.4	24.9
2004	5.4	16.4	11.3	8.6	2.6	1.2	1.3	1.0	1.3	10.9	12.9	14.8	16.4

2005	21.0	11.5	20.6	16.4	3.2	1.8	3.9	1.9	2.9	3.9	3.7	5.4	21.0
2006	10.4	19.0	25.2	23.8	4.1	1.8	1.4	1.3	2.8	4.9	4.2	14.6	25.2
2007	14.6	18.2	21.1	28.2	8.8	2.0	1.3	1.3	3.1	6.3	6.0	10.9	28.2
2008	16.5	23.3	17.2	11.4	3.4	1.9	1.4	1.2	3.5	5.3	5.2	15.2	23.3
2009	17.3	22.7	26.2	20.0	6.4	3.5	2.2	1.8	4.0	9.5	16.2	22.9	26.2
2010	30.0	22.2	24.8	20.7	5.4	2.6	2.5	4.0	3.0	3.2	4.1	17.4	30.0
2011	28.2	26.1	19.0	32.5	6.5	2.6	2.2	3.1	3.2	3.2	7.5	16.9	32.5
2012	13.9	24.5	21.2	18.9	13.5	3.0	2.6	2.3	3.4	3.4	9.2	20.9	24.5
2013	15.0	21.4	25.8	11.0	3.2	2.2	1.4	2.4	2.4	3.5	6.8	15.9	25.8
2014	26.2	22.2	29.5	11.8	8.8	3.2	2.0	1.5	2.1	2.4	8.4	14.3	29.5
2015	14.9	12.6	20.8	11.9	7.3	2.8	1.6	2.4	2.2	2.4	2.7	10.1	20.8
2016	4.3	10.7	11.2	8.3	2.6	1.6	1.6	1.8	3.6	3.8	2.7	2.8	11.2
2017	25.9	22.2	21.1	19.8	6.0	2.8	1.4	1.1	2.4	2.7	3.2	3.8	25.9
2018	13.1	12.7	18.7	15.1	10.5	3.5	1.8	2.5	2.1	3.0	3.6	4.4	18.7
2019	25.5	24.3	23.8	13.0	5.5	2.3	1.8	2.5	2.5	1.6	2.7	6.2	25.5

Nota. Los valores fueron obtenidos a partir de los registros de caudal medio diario de la estación Obrajillo y organizados mediante tablas dinámicas para identificar, en cada año, el máximo caudal medio diario por mes. La columna "MAX" corresponde al máximo anual (mayor valor mensual de ese año). Para el análisis se empleó el período 1997–2019 por presentar menor cantidad de datos faltantes y representar la información más actual disponible. Unidades: m³/s.

Para la estimación de caudales asociados a diferentes períodos de retorno, es necesario disponer de registros de caudales instantáneos máximos. Sin embargo, en la mayoría de estaciones hidrométricas solo se cuenta con información de caudales medios diarios, situación que también se presenta en la estación Obrajillo, la cual únicamente dispone de este tipo de registros. A partir de dicha información, se obtuvo el máximo caudal medio diario anual para cada año del periodo analizado.

Según el Manual de Hidrología del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), en estaciones hidrométricas donde no se cuenta con registros de caudales máximos instantáneos, se emplean extrapolaciones mediante relaciones empíricas. Estas consisten en multiplicar los valores máximos de caudales medios diarios por un coeficiente que depende del área de la cuenca aportante.En el caso de cuencas con superficies comprendidas entre 200 y 400 km², el MTC recomienda utilizar un factor de conversión de 2.5 para transformar los caudales máximos medios diarios en caudales máximos instantáneos.

Tabla 13

Caudales máximos instantáneos mensuales y máximo anual (m³/s) – Estación hidrométrica Obrajillo (1997–2019)

AÑO	CAUDALES MÁXIMOS INSTANTANEOS (M3/S) - ESTACIÓN OBRAJILLO												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MAX
1997		89.2	50.0	6.9	5.3	4.6	13.2	7.4	6.7	11.7	12.1	33.3	89.2
1998	57.3	93.3	159.4	35.0	8.8	6.1	4.6	4.1	5.6	7.2	9.5	8.3	159.4
1999	13.7	32.2	26.5	14.9	10.6	3.4	2.7	2.2	2.7	6.0	6.4	10.6	32.2
2000	27.4	31.5	27.7	27.7	13.0	7.0	4.0	4.7	10.0	11.5	17.6	52.1	52.1
2001	70.2	68.2	78.7	52.1	12.1	8.0	5.6	4.7	14.9	9.2	28.1	26.2	78.7
2002	15.8	32.9	48.0	33.8	13.0	7.6	4.5	9.4	13.5	16.3	31.0	22.6	48.0
2003	34.2	46.2	62.2	38.2	11.5	7.3	4.6	4.3	9.3	13.1	7.7	21.1	62.2
2004	13.4	41.0	28.1	21.6	6.5	3.1	3.2	2.6	3.2	27.4	32.3	37.1	41.0
2005	52.4	28.8	51.5	41.0	8.1	4.6	9.7	4.8	7.3	9.7	9.2	13.5	52.4
2006	26.0	47.5	63.1	59.4	10.3	4.5	3.6	3.2	6.9	12.2	10.4	36.5	63.1
2007	36.5	45.5	52.8	70.5	21.9	5.0	3.2	3.3	7.9	15.8	15.0	27.3	70.5
2008	41.3	58.4	43.0	28.6	8.6	4.8	3.5	2.9	8.7	13.4	12.9	38.1	58.4
2009	43.3	56.8	65.5	50.0	16.1	8.8	5.5	4.6	10.0	23.7	40.5	57.2	65.5

2010	75.0	55.5	61.9	51.9	13.6	6.5	6.2	10.0	7.5	8.1	10.3	43.6	75.0
2011	70.5	65.4	47.6	81.3	16.3	6.4	5.4	7.7	7.9	8.0	18.8	42.3	81.3
2012	34.9	61.3	53.0	47.3	33.7	7.4	6.6	5.8	8.4	8.4	23.0	52.2	61.3
2013	37.6	53.5	64.5	27.5	8.0	5.6	3.6	6.0	6.0	8.8	17.0	39.7	64.5
2014	65.6	55.5	73.8	29.6	22.0	8.1	4.9	3.8	5.2	6.1	21.0	35.8	73.8
2015	37.3	31.4	52.0	29.8	18.4	7.0	4.0	6.1	5.6	6.1	6.6	25.2	52.0
2016	10.8	26.7	27.9	20.7	6.5	4.0	3.9	4.5	9.1	9.4	6.9	7.1	27.9
2017	64.8	55.4	52.8	49.6	15.0	6.9	3.4	2.7	6.1	6.8	7.9	9.4	64.8
2018	32.7	31.9	46.7	37.8	26.2	8.7	4.5	6.3	5.2	7.5	9.0	11.1	46.7
2019	63.7	60.9	59.5	32.5	13.7	5.7	4.4	6.2	6.3	4.0	6.8	15.5	63.7

Nota: La tabla presenta los máximos caudales instantáneos (m³/s) por mes para cada año en la estación hidrométrica Obrajillo. La columna "MAX" corresponde al máximo anual (mayor valor mensual registrado en ese año). Los datos fueron organizados mediante tablas dinámicas a partir de los registros históricos de la estación, para el período 1997–2019, seleccionado por su mayor completitud y representatividad de la información más reciente disponible. Unidades: m³/s.

Tabla 14

Histograma histórico de caudales máximos instantáneos anuales – Estación hidrométrica Obrajillo (1997–2019)



Nota. El gráfico muestra, para cada año del período 1997–2019, el máximo caudal instantáneo anual registrado en la estación Obrajillo. Los valores sobre cada barra corresponden al

caudal máximo (m³/s) de ese año, obtenido a partir del procesamiento de la serie histórica (organización y extracción de máximos anuales mediante tablas dinámicas). Unidades: m³/s

Se debe precisar que el valor de caudal máximo correspondiente al año 1998 está asociado al evento extraordinario del Fenómeno El Niño ocurrido en dicho año. Debido a su carácter excepcional y atípico respecto al comportamiento hidrológico habitual de la cuenca, este valor será excluido de los análisis posteriores, a fin de evitar distorsiones en la evaluación estadística y en la representatividad de los resultados.

Contando con el registro de caudales máximos instantáneos, se seleccionaron los valores máximos anuales para su asociación con los diferentes tiempos de retorno. Este procedimiento se realizó de manera similar al análisis de precipitaciones máximas, utilizando el software Hidroesta. Como resultado del análisis de bondad de ajuste, se determinó que la distribución probabilística que mejor representó el comportamiento de los datos fue la Log-Gumbel de dos parámetros, obteniéndose así los caudales de diseño correspondientes a los distintos periodos de retorno. Estos valores serán empleados como referencia para la evaluación y contraste de los caudales obtenidos mediante el modelo hidrológico HEC-HMS.

Tabla 15

Caudales máximos instantáneos de diseño (Qmax) por período de retorno – Estación hidrométrica Obrajillo (Hidroesta)

T (años)	Q_{MAX} (m3/s)
25	104.5
50	122.34
100	143.07
200	167.21
500	205.4
1000	239.95

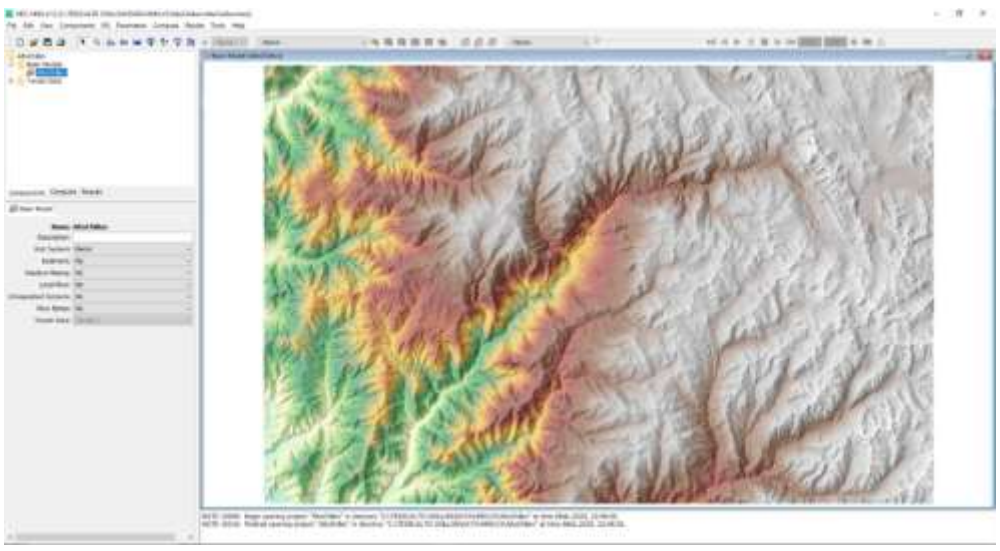
Nota: Los valores de Q_{max} (m^3/s) fueron estimados a partir de la serie de máximos anuales de caudales instantáneos de la estación Obrajillo, asociándolos a períodos de retorno mediante el software Hidroesta. Según el análisis de bondad de ajuste, la distribución que mejor representó los datos fue la Log-Gumbel de dos parámetros. Los caudales de diseño obtenidos se emplearán como valores de referencia para la evaluación comparativa de los caudales simulados en el modelo hidrológico HEC-HMS.

5.3.2 Configuración hidromorfológica del modelo HEC-HMS

La modelación hidrológica de caudales máximos se realizará utilizando el modelo HEC-HMS versión 4.12. Para ello, se creó el modelo de cuenca llamado "AltoChillon" y se configuró el sistema de coordenadas al UTM WGS84 18S; luego se importo el DEM correspondiente al área de estudio con la opción Terrain Data Manager.

Figura 56

Modelo de cuenca "AltoChillón" en HEC-HMS 4.12: importación del DEM y configuración inicial del terreno.



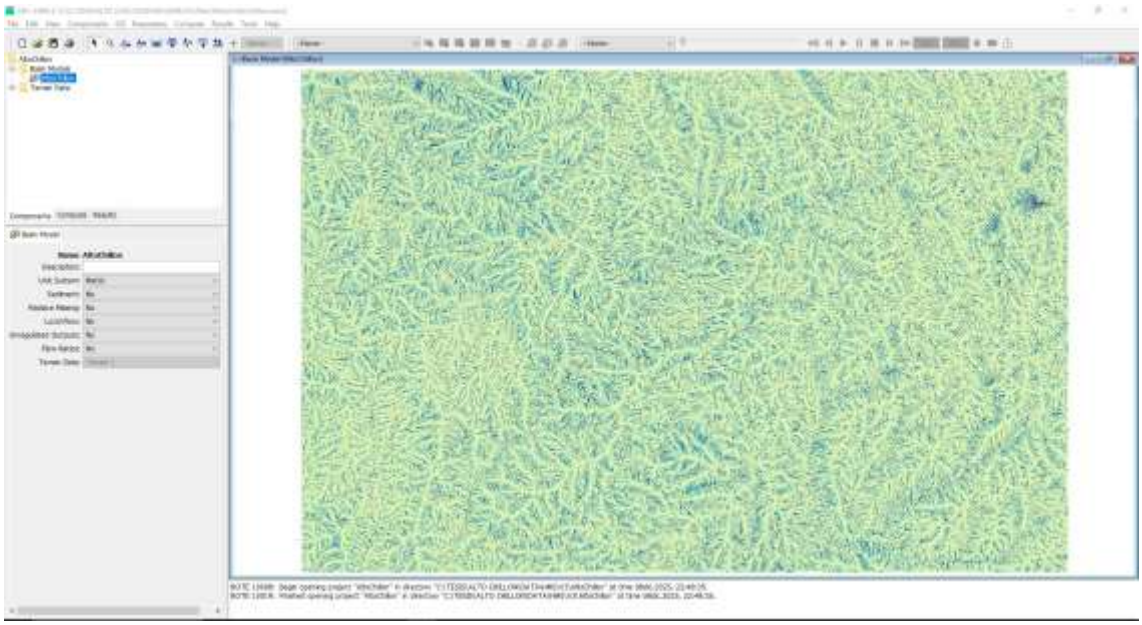
Nota. Captura de pantalla del entorno de trabajo en HEC-HMS v4.12 donde se creó el modelo de cuenca "AltoChillón", se configuró el sistema de coordenadas UTM WGS84 Zona 18S y se

importó el Modelo Digital de Elevación (DEM) del área de estudio mediante la herramienta Terrain Data Manager, como base para la parametrización hidromorfológica del modelo.

Una vez importada la información de elevaciones, se procedió a rellenar los valores nulos del DEM incorporado, con la opción Preprocess Sinks, para luego definir la red de drenaje con la herramienta Preprocessing Drainage.

Figura 57

Preprocesamiento del DEM en HEC-HMS 4.12: relleno de sumideros (Preprocess Sinks) previo a la definición de drenaje



Nota. Tras la importación del DEM, se aplicó la herramienta Preprocess Sinks para rellenar valores nulos y depresiones (sumideros) del modelo de elevación, asegurando la continuidad del flujo. Este paso es previo a la delimitación de la red de drenaje mediante Preprocessing Drainage, necesaria para la correcta representación hidrológica de la cuenca en HEC-HMS.

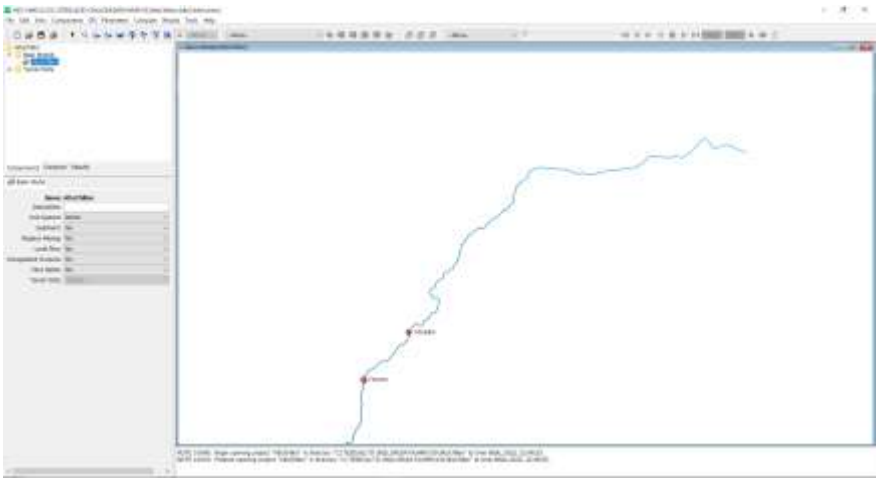
Una vez definida la red de drenaje, se identificaron las corrientes de agua mediante la herramienta Define Streams, estableciendo un umbral mínimo de 20 km² de área aportante para la generación de cauces. Posteriormente, y habiéndose definido la red hídrica dentro del área

de estudio, se procedió a la asignación de puntos de control para la delimitación mediante la herramienta Break Points Manager.

En este proceso, se asignó como punto de control la salida de la subcuenca Huaros y, adicionalmente, el punto adyacente al cauce del río correspondiente a la ubicación de la estación hidrométrica Obrajillo. Esta asignación se realizó con la finalidad de utilizar dicha estación como punto de contraste para la evaluación de los caudales máximos obtenidos mediante el modelamiento hidrológico, comparándolos con los caudales previamente determinados para los distintos períodos de retorno.

Figura 58

Red de drenaje y puntos de control definidos en HEC-HMS: subcuenca Huaros y estación Obrajillo

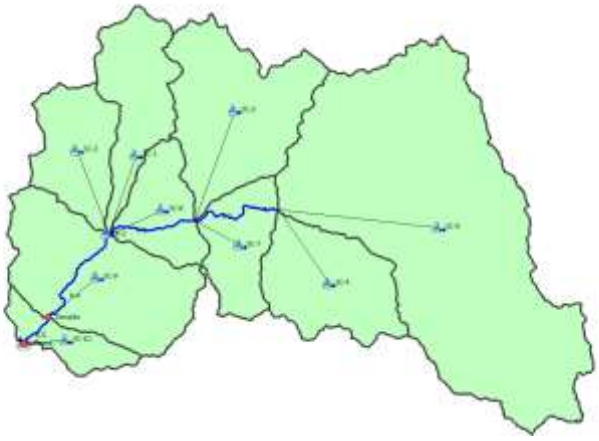


Nota: La red hídrica se generó con Define Streams usando un umbral de 20 km² de área aportante. Se asignaron puntos de control en la salida de Huaros y en la ubicación de la estación Obrajillo para la delimitación y la evaluación comparativa del modelo.

Ya habiéndose definido estos puntos de control, se procedió con la delimitación correspondiente utilizando la opción Delineate Elements, resultando un total de 10 subcuencas delimitadas.

Figura 59

Delimitación de subcuencas en HEC-HMS mediante Delineate Elements (10 subcuencas)

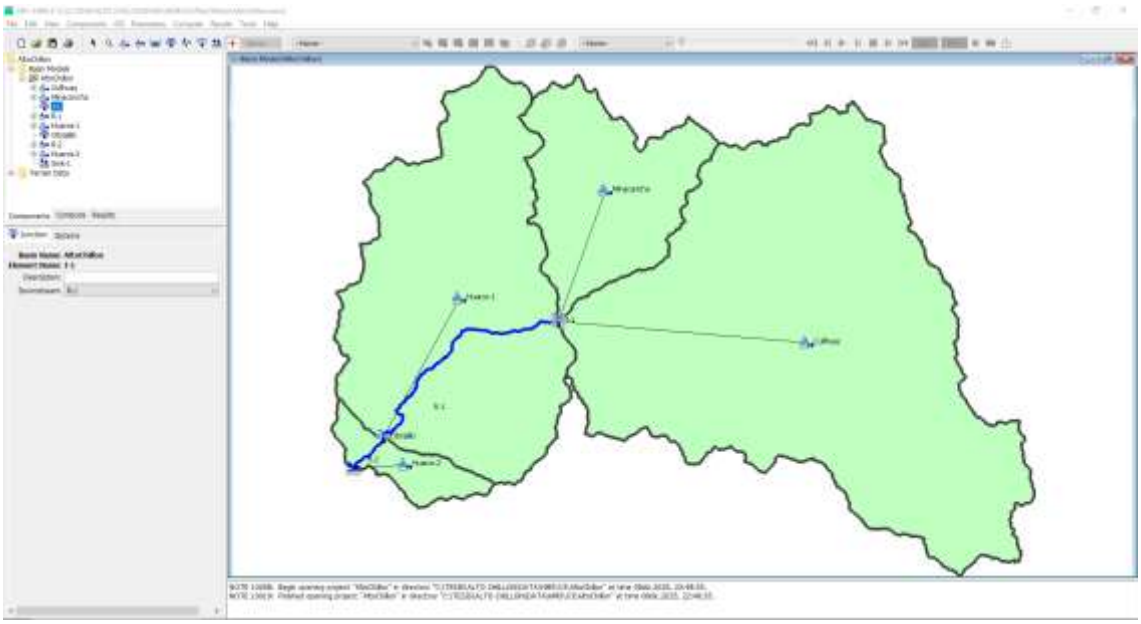


Nota. Resultado de la delimitación automática con Delineate Elements, obteniéndose 10 subcuencas a partir de los puntos de control definidos y la red de drenaje.

Se corrigió la delimitación de las unidades hidrográficas mediante la herramienta Merge, para lo cual se importaron previamente los shapefiles de las subcuencas delimitadas en ArcGIS, utilizándolos como referencia espacial. A partir de este procedimiento, la subcuenca Huaros fue subdividida en Huaros 1 y Huaros 2, siendo esta última el área aportante ubicada aguas abajo de la estación hidrométrica Obrajillo. Esta zona fue representada mediante un nodo de control, en el cual se podrán visualizar y analizar los caudales simulados en el tramo del río correspondiente a la ubicación de dicha estación.

Figura 60

Corrección y ajuste de subcuencas en HEC-HMS mediante Merge usando shapefiles de referencia (ArcGIS)



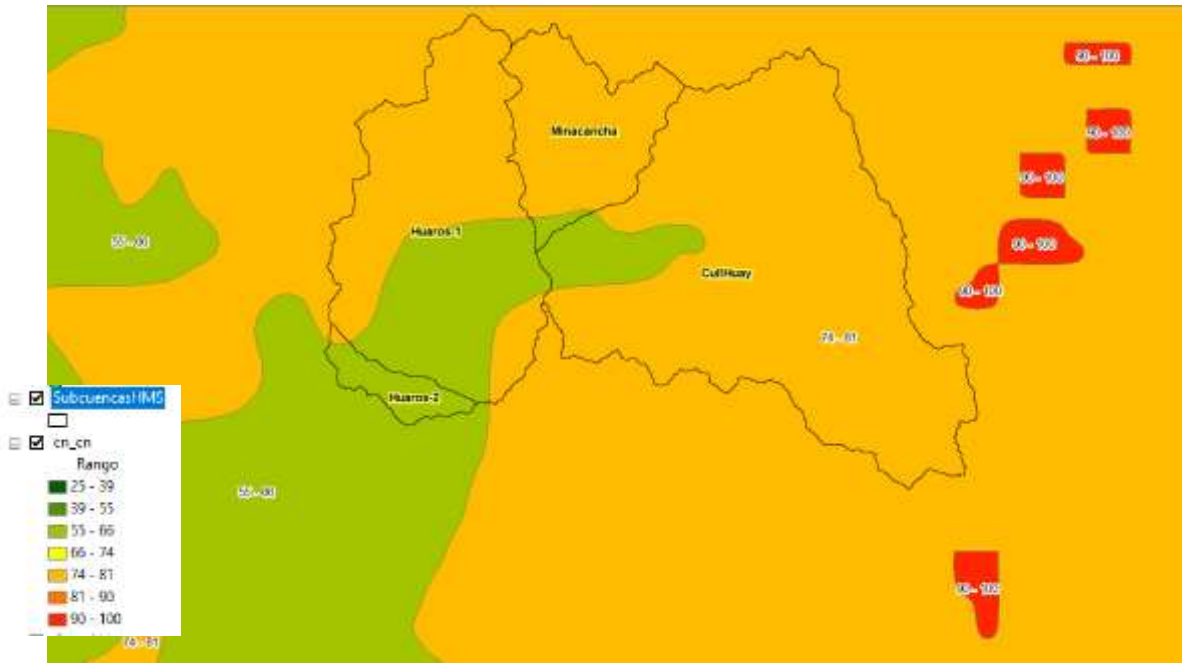
Nota. Se ajustó la delimitación con Merge tomando como referencia shapefiles de ArcGIS. La subcuenca Huaros se subdividió en Huaros 1 y Huaros 2, ubicándose Huaros 2 aguas abajo de la estación Obrajillo y representándose mediante un nodo de control para análisis de caudales simulados.

En relación con el Número de Curva (CN), se adoptó la información contenida en el estudio elaborado por la Autoridad Nacional del Agua (2015), en el cual se clasifican los valores de CN bajo tres condiciones de humedad antecedente: seca, normal y húmeda. Considerando la ubicación geográfica de las subcuencas de estudio y sus características hidrometeorológicas, se seleccionaron los valores correspondientes a la condición de humedad húmeda (AMC III), por representar un escenario conservador acorde con el análisis de avenidas máximas.

Para la determinación del Número de Curva (CN), se procedió a la descarga del shapefile correspondiente a condiciones de humedad normal (https://www.geogpsperu.com/2019/04/numero-de-curva-descargar-mapa.html),), el cual fue incorporado y procesado en el software ArcGIS 10. Posteriormente, esta capa temática fue superpuesta sobre las subcuencas delimitadas del área de estudio, con el fin de identificar la distribución espacial de los valores de CN dentro de cada unidad hidrográfica.

Figura 61

Distribución espacial del Número de Curva (CN) en condición de humedad normal (AMC II) en las subcuencas del área de estudio



Nota. La capa de CN (humedad normal) fue descargada en formato shapefile y procesada en ArcGIS 10, superponiéndose a las subcuencas delimitadas para identificar la variación espacial de CN en Huaros-1, Huaros-2, Minacancha y CullHuay. Fuente: GEO GPS Perú (2019).

Del análisis preliminar se observó que todas las subcuencas se encuentran parcialmente cubiertas por rangos de Número de Curva comprendidos entre 56–66 y 74–81. En virtud de ello, se realizó la intersección (intersect) entre la capa de subcuencas y la capa de Número de Curva en condiciones normales, con el objetivo de cuantificar el porcentaje de influencia de cada rango en función del área correspondiente dentro de cada subcuenca. Como resultado de dicho procedimiento, se obtuvo la distribución porcentual de las áreas asociadas a cada rango de CN, la cual se presenta en la tabla resumen siguiente.

Cuenca	Area (km)	Influencia (%)	Rango CN (condiciones normales)
CullHuay	16.45	0.08	55-66
	191.70	0.92	74-81
Minacancha	1.83	0.04	55-66
	44.73	0.96	74-81
Huaros-1	44.84	0.39	55-66
	71.38	0.61	74-81
Huaros-2	10.30	0.96	55-66
	0.44	0.04	74-81

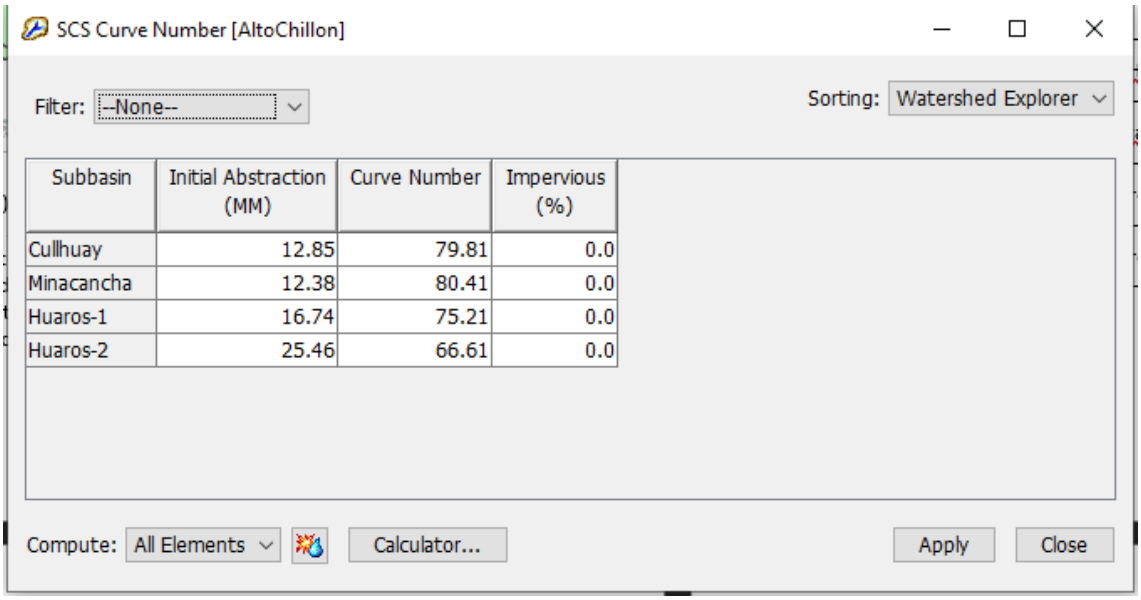
Nota. La tabla resume las áreas y su influencia (%) por rango de CN (condiciones normales) obtenidas mediante la operación Intersect entre la capa de subcuencas y la capa temática de CN en ArcGIS 10.

Estos valores se agregarán en la opción de parámetros de perdida, previamente a ello se debe calcular los valores de abstracción inicial que están en función del número de curva.

$$I_a = 0.2\left(\frac{25400}{CN} - 254\right)$$

Figura 62

Parámetros de pérdida SCS–Curve Number en HEC-HMS: CN y abstracción inicial por subcuenca (AltoChillón)



Nota. Los valores de CN por subcuenca se incorporan en los parámetros de pérdida del método SCS-CN. La abstracción inicial se calculó como $I_a = 0.2\ (25400/CN - 254)$*(en mm) y se asignó a cada subcuenca antes de ejecutar la simulación.*

El tiempo de retardo se determinó en función del tiempo de concentración, empleando la relación Tl = 0.6·Tc, conforme a las recomendaciones metodológicas del SCS. En la tabla siguiente se presentan los valores finales asumidos para el tiempo de concentración y el tiempo de retardo en la modelación, para las subcuencas.

Tabla 16

Estimación del tiempo de concentración (Tc) y tiempo de retardo (Tl) por subcuenca según metodologías empíricas (SCS)

Subcuenca		SC-Cullhuay	SC-Minacancha	SC-Huaros-1	SC-Huiaros-2
Tiempo de Concentración (horas)	SCS-Ranser	3.12	1.06	1.72	0.57
	California	0.20	0.15	0.15	0.11
	Kirpich	3.17	1.22	1.59	0.55
	Temez	3.25	1.47	1.90	0.77
	Giandotti	3.24	1.49	1.93	0.71
	Ven te chow	2.36	0.96	1.44	0.57

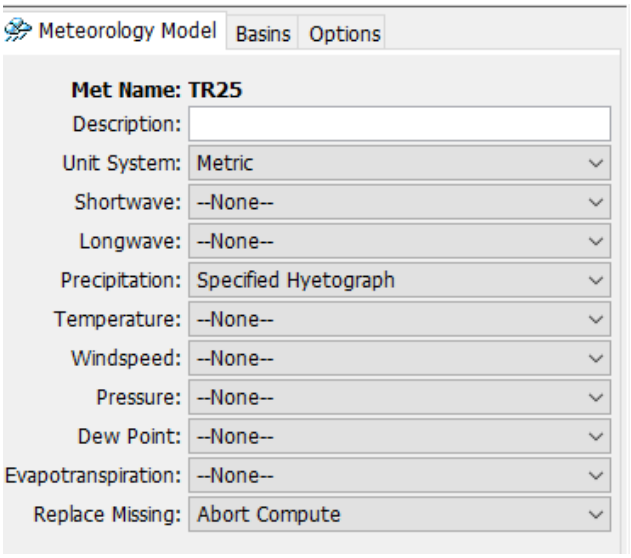
	Clark	19.10	6.19	10.78	2.08
	Ventura-Heron	3.53	1.02	1.35	0.36
	Passini	1.59	0.64	0.97	0.28
Tc asumido (h)		4.40	1.58	2.43	0.67
Lag time (h)		2.64	0.95	1.46	0.40
Lag time (min)		158.27	56.78	87.36	24.01

Nota. Se evaluaron distintos métodos empíricos para Tc. Para la modelación se adoptó un Tc asumido por subcuenca y se calculó el tiempo de retardo como $T_l = 0.6\,T_c$*(SCS), reportándose en horas y minutos*.

Una vez definidos los parámetros hidrológicos, se procedió a su incorporación en el modelo HEC-HMS. Como parte del proceso de verificación y contraste, se utilizó el periodo de retorno de 25 años como evento representativo para la simulación. En ese sentido, dentro del componente correspondiente al Modelo Meteorológico, se configuró el ingreso de la precipitación mediante un hietograma específico, correspondiente al evento de diseño seleccionado.

Figura 63

Configuración del Modelo Meteorológico en HEC-HMS para la evaluación comparativa: hietograma especificado (TR = 25 años)



Nota. En el Modelo Meteorológico se definió la precipitación como Specified Hyetograph para ingresar el hietograma de diseño del evento TR = 25 años, utilizado como escenario de referencia para la evaluación y contraste del modelo.

Para el ingreso de los hietogramas de diseño de las precipitaciones en las subcuencas, en la opción de Time-Series Data se ingresaron estos valores en Precipitation Gages.

Figura 64

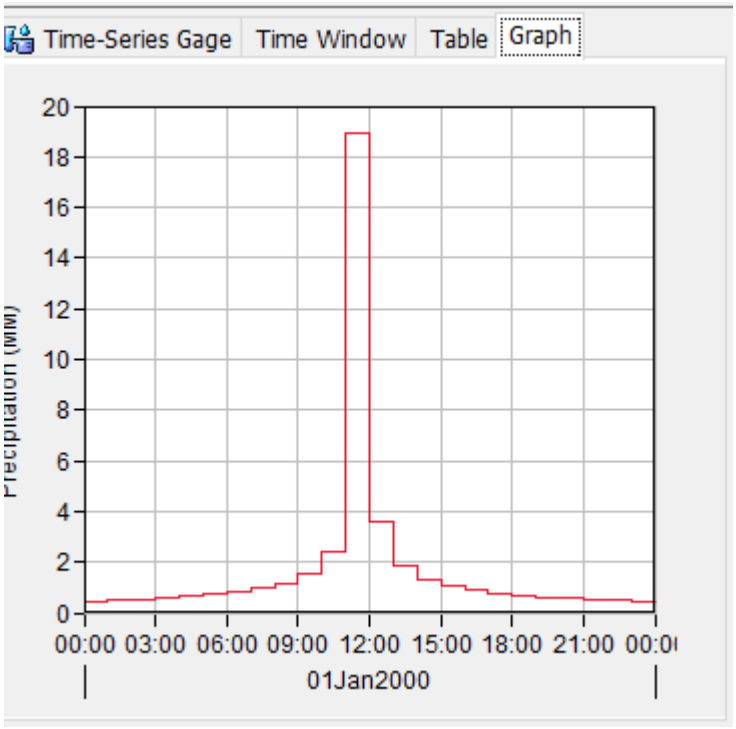
Hietograma de diseño TR = 25 años en HEC-HMS: serie temporal de precipitación horaria (mm)



Nota. Vista de la tabla de la serie temporal del pluviómetro (Time-Series Gage) con la precipitación horaria (mm) del evento de diseño TR = 25 años, utilizada como entrada del Modelo Meteorológico en HEC-HMS.

Figura 65

Hietograma de diseño TR = 25 años en HEC-HMS: distribución temporal de la precipitación (mm)

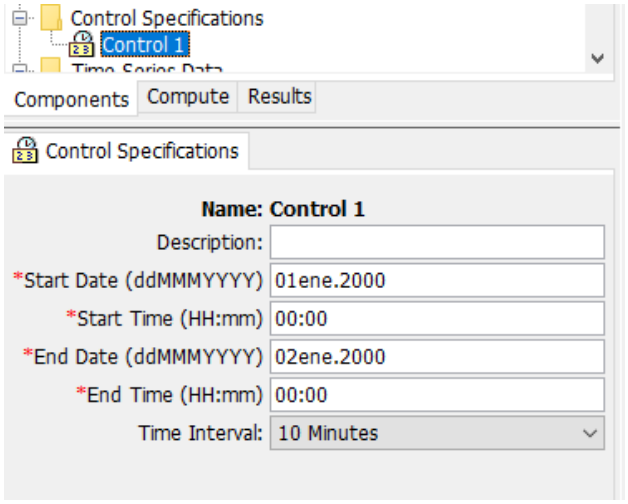


Nota. Gráfico del hietograma horario del evento de diseño TR = 25 años, mostrando la variación de la precipitación (mm) durante el periodo simulado.

Una vez ingresado todos los datos de precipitaciones, en la opción de Control Specification se definio el tiempo de modelamiento, y en intervalo de 10 minutos.

Figura 66

Definición del periodo e intervalo de simulación en HEC-HMS: Control Specifications (10 minutos)



Nota. En Control Specifications se estableció el tiempo de modelamiento (fecha/hora de inicio y fin) y el intervalo de cálculo de la simulación en 10 minutos, conforme al evento de precipitación ingresado.

5.3.3 Implementación de métodos de transformación lluvia – escorrentía

Con el fin de evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de precipitación extrema, se implementaron tres métodos de transformación lluvia–escorrentía en 3 modelos HEC-HMS por separado: el método del Hidrograma Unitario del SCS, el método de Hidrograma Unitario de Snyder y el método Hidrograma Unitario de Clark.

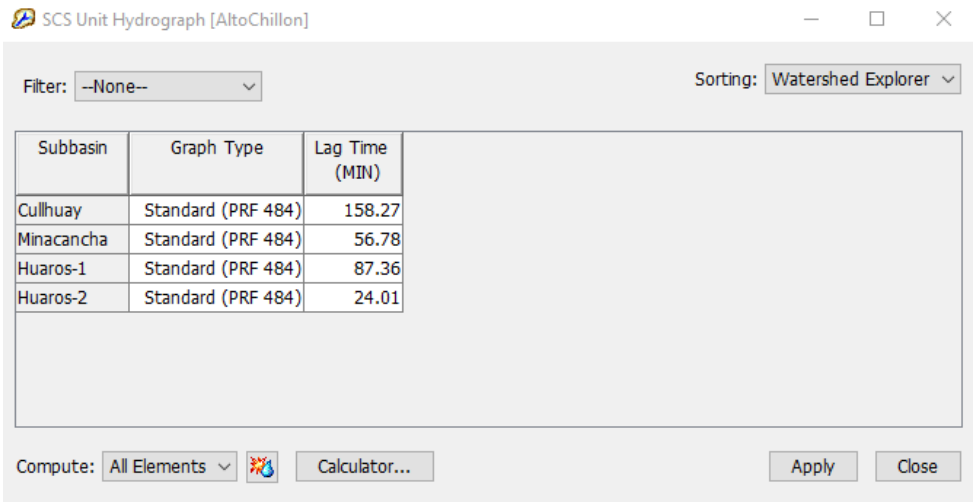
5.3.4 Método de transformación de hidrograma unitario de SCS

El método SCS considera como parámetros principales el tiempo de concentración (Tc), el tiempo de retardo (Tl) y el Número de Curva (CN). El tiempo de concentración fue estimado mediante la aplicación de diversas fórmulas empíricas, adoptándose como valor representativo el promedio de los resultados obtenidos.

En la sección de Transformación se seleccionó la opción de Hidrograma Unitario SCS, ingresándose los valores Tiempo de retardo (Lag Time) para cada subcuenca.

Figura 67

Parámetros del hidrograma unitario SCS en HEC-HMS: tiempo de retardo (Lag Time) por subcuenca



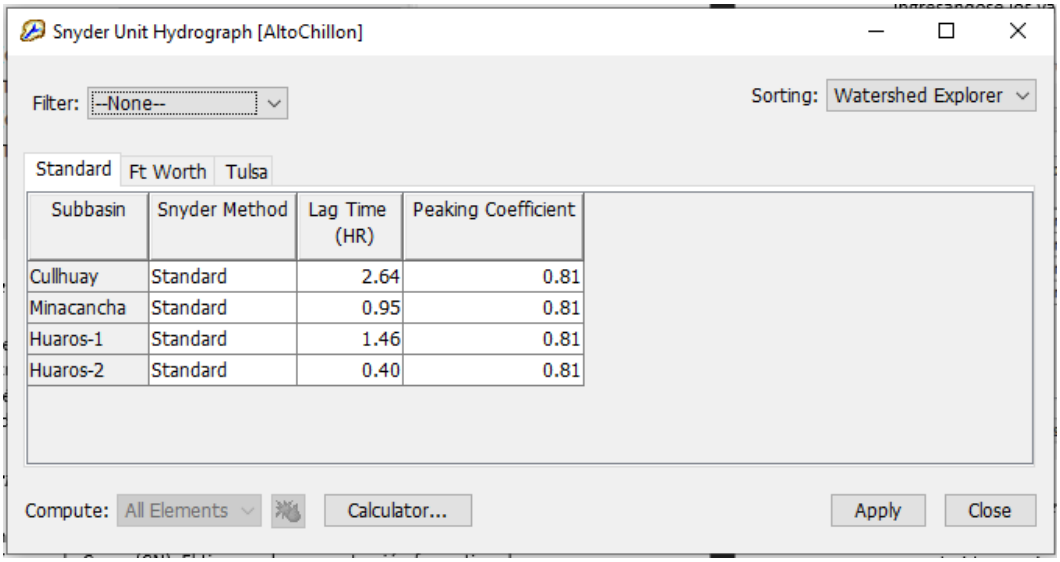
Nota. Configuración del método SCS Unit Hydrograph (Standard PRF 484) en HEC-HMS, mostrando los valores de Lag Time (min) asignados a las subcuencas Cullhuay, Minacancha, Huaros-1 y Huaros-2.

5.3.5 Método de transformación de Hidrograma Unitario de Sneyder

Se utilizó la versión estándar del método de transformación de Hidrograma Unitario de Snyder. Entre los parámetros fundamentales se encuentran el tiempo de retardo (*lag time*) en horas y el coeficiente pico (*Peaking Coefficient*), el cual, según la formulación clásica (Natural Resources Conservation Service (NRCS), 2007), está comprendido en el rango de 0.4 a 1. Estos valores se seleccionaron dentro del rango técnico recomendado para la cuenca durante la fase de modelamiento. Ambos parámetros se ingresaron en la opción de Hidrograma Unitario de Snyder en la sección de Método de Transformación.

Figura 68

Parámetros del hidrograma unitario Snyder en HEC-HMS: Lag Time y coeficiente de pico por subcuenca



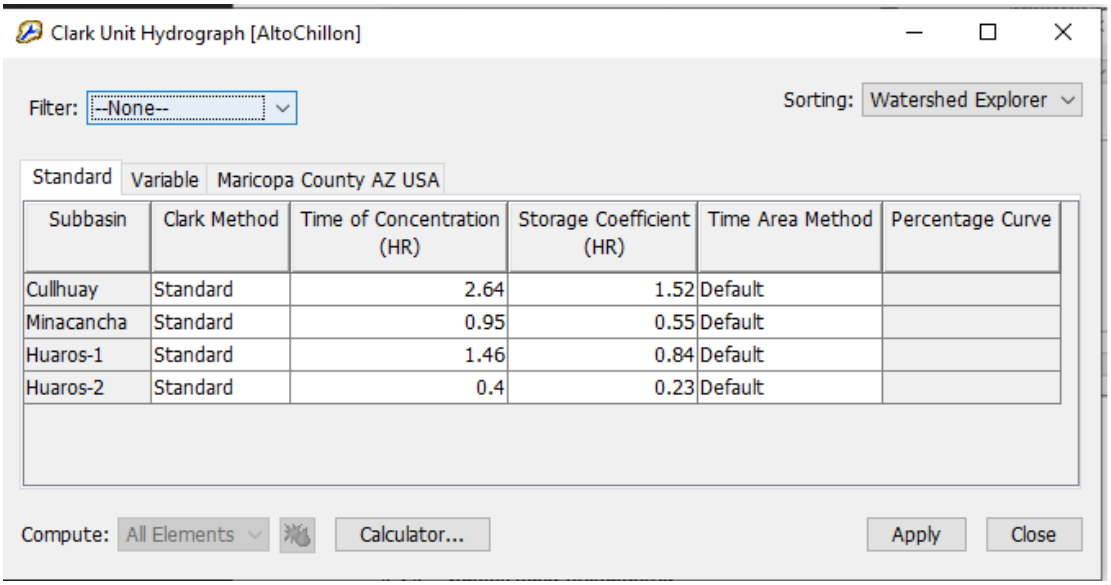
Nota. Configuración del método Snyder Unit Hydrograph (Standard) en HEC-HMS para el modelo AltoChillón, mostrando el Lag Time (h) y el Peaking Coefficient asignados a las subcuencas Cullhuay, Minacancha, Huaros-1 y Huaros-2.

5.3.6 Método de transformación Hidrograma Unitario de Clark

Se empleó la versión estándar del método de transformación mediante Hidrograma Unitario de Clark. Entre los parámetros fundamentales requeridos se encuentran el tiempo de concentración (Time of Concentration), expresado en horas, y el coeficiente de almacenamiento (Storage Coefficient), también en horas. Este último se encuentra directamente relacionado con el tiempo de concentración y representa el efecto de atenuación del flujo dentro de la cuenca. De acuerdo con el HEC-HMS Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual (U.S. Army Corps of Engineers, 2023), el coeficiente de almacenamiento suele adoptarse dentro de un rango comprendido entre el 10 % y el 100 % del tiempo de concentración, en función de las características hidrológicas de la cuenca.Ambos parámetros se ingresaron en la opción de Hidrograma Unitario de Clark en la sección de Metodo de Transformación.

Figura 69

Parámetros del hidrograma unitario Clark en HEC-HMS: tiempo de concentración y coeficiente de almacenamiento por subcuenca.



Nota. Configuración del método Clark Unit Hydrograph (Standard) en HEC-HMS para el modelo AltoChillón, mostrando el Time of Concentration (h) y el Storage Coefficient (h) asignados a las subcuencas Cullhuay, Minacancha, Huaros-1 y Huaros-2.

5.3.7 Simulaciones preliminares y evaluación comparativa del modelo

Se han ejecutado simulaciones preliminares mediante los tres métodos de transformación: Hidrograma Unitario SCS, Hidrograma unitario Snyder y Hidrograma Unitario Clark; los valores de los parámetros base empleados para cada uno se resumen en la siguiente tabla."

Tabla 17

Parámetros de entrada y rangos técnicos recomendados para los métodos de transformación en HEC-HMS

Método de Transformación	Parámetro	Rango Típico	Influencia Principal
H.U. SCS	Número de Curva (CN) (condiciones normales)	55-66 74-81	Controla el volumen de escorrentía y, por ende, el caudal pico. Valores mayores generan mayor escorrentía.
H.U. Snyder	Coeficiente de pico (Cp)	0.4 – 1	Controla directamente la magnitud del caudal máximo. Valores mayores producen picos más altos.

H.U. Clark	Coeficiente de almacenamiento (R)	0.1Tc – 1.0 Tc	Controla la atenuación del hidrograma. Valores mayores generan mayor amortiguamiento y menor caudal pico.

Nota. Se consolidan los parámetros de modelamiento técnico considerados para las simulaciones iniciales con los métodos Hidrograma Unitario SCS, Snyder y Clark, precisando su rango de aplicación estándar y el impacto estimado en la respuesta hidrológica (volumen de escorrentía, caudal pico y atenuación).

El valor de caudal estimado para el periodo de retorno de TR = 25 años (104.5\ m^3/s) se ha definido como un criterio de contraste analítico para los modelos hidrológicos. Este parámetro actúa como un valor de referencia para el caudal obtenido en el Junction 'Obrajillo', el cual representa la estación hidrométrica donde se cuenta con el registro de caudales máximos instantáneos, ubicado en la subcuenca Huaros.

Figura 70

Punto de control en HEC-HMS: Junction "Obrajillo" como umbral de referencia hidrométrica (TR = 25 años)

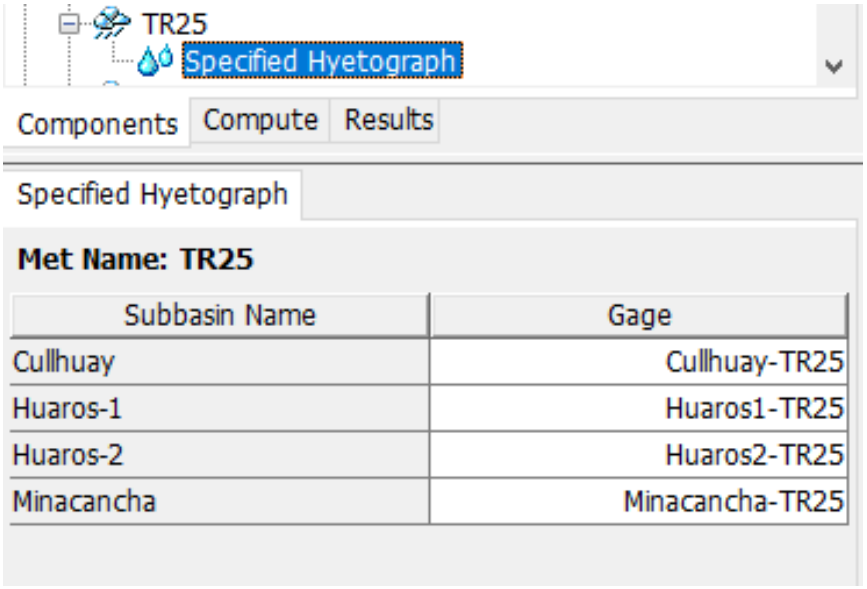


Nota. Se adoptó el valor Q(TR=25) = 104.5\ m^3/s como parámetro de referencia para la verificación de la respuesta del modelo, contrastándolo con el caudal simulado en el Junction "Obrajillo", ubicado en la subcuenca Huaros y asociado a la estación hidrométrica con registros de máximos instantáneos.

Una vez establecidos los parámetros técnicos de los métodos de transformación, se procedió a ejecutar las simulaciones en el módulo *Compute*, seleccionando la opción Create Compute → Simulation *Run*. En esta etapa, se incorporaron los modelos meteorológicos mediante la alternativa Specified Hyetograph, integrando las series de tiempo (hietogramas de diseño) correspondientes a cada subcuenca bajo el escenario del período de retorno de 25 años.

Figura 71

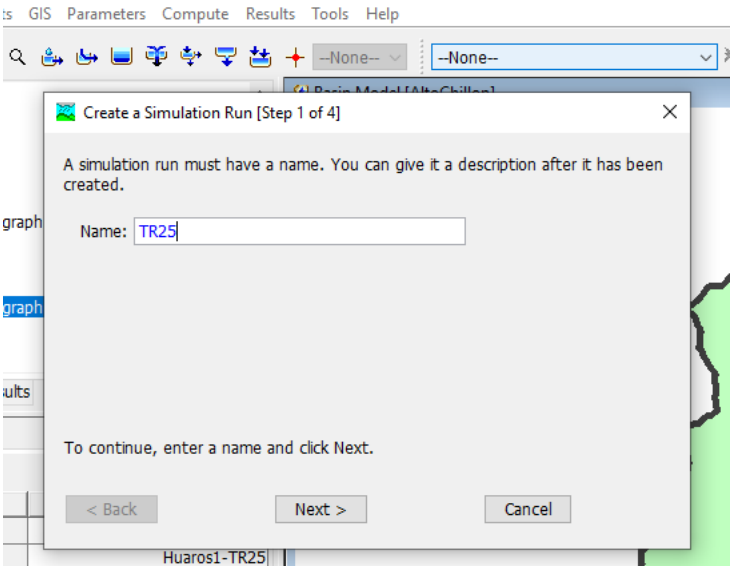
Asignación de hietogramas de diseño TR = 25 años por subcuenca en HEC-HMS (Specified Hyetograph)



Nota. En el modelo meteorológico TR25 se asignaron las series de tiempo (hietogramas) a cada subcuenca (Cullhuay, Huaros-1, Huaros-2 y Minacancha) mediante Specified Hyetograph, para ejecutar la simulación en Compute, Simulation Run.

Figura 72

Creación de la corrida de simulación en HEC-HMS: asignación del nombre "TR25" (Create Simulation Run)



Nota: En Compute, Create Compute, Simulation Run, se definió la corrida de simulación con el nombre "TR25", correspondiente al evento de diseño con período de retorno de 25 años.

5.3.8 Análisis de respuesta del método de Hidrograma Unitario SCS

Tal como se describió previamente, las subcuencas de estudio se encuentran comprendidas dentro de zonas cuyos rangos de Número de Curva varían entre 55–66 y 74–81. Para el presente análisis, se adoptaron los valores máximos de cada rango y posteriormente se realizó una ponderación en función del porcentaje de área de influencia dentro de cada subcuenca, con la finalidad de obtener un Número de Curva representativo para cada unidad hidrográfica.

Tabla 18

Cálculo del Número de Curva (CN) representativo por subcuenca (AMC II) y parámetros derivados (S e Ia)

Cuenca	Area (km)	Influencia (%)	CN asumido	CN	S	Ia(mm)

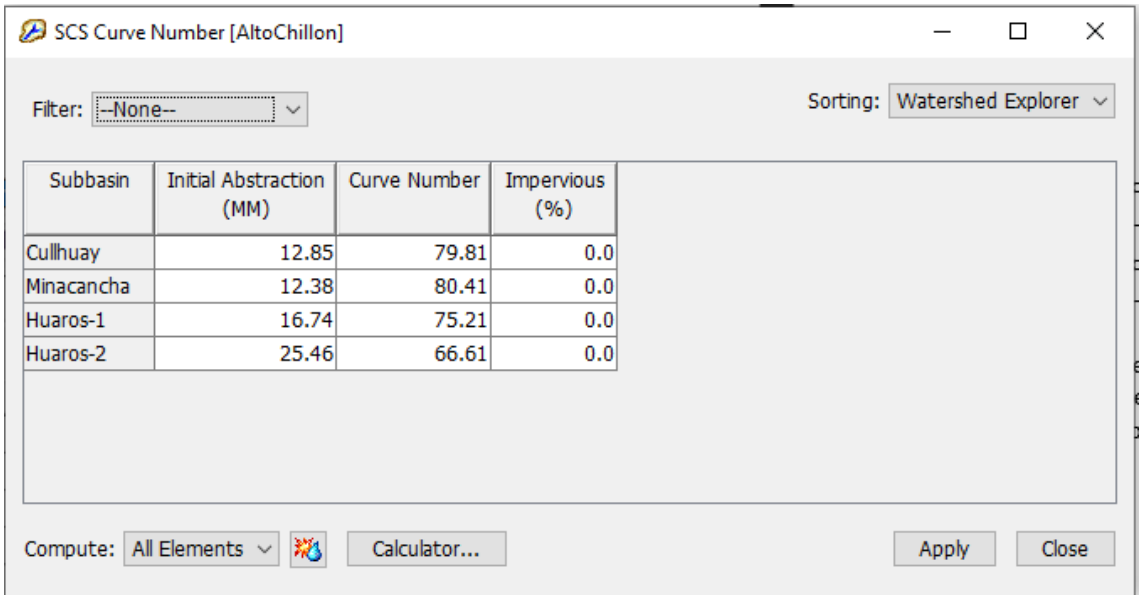
			Rango CN (condiciones normales)	(Max)			
CullHuay	16.45	0.08	55-66	66	79.81	64.24	12.85
	191.70	0.92	74-81	81			
Minacancha	1.83	0.04	55-66	66	80.41	61.88	12.38
	44.73	0.96	74-81	81			
Huaros-1	44.84	0.39	55-66	66	75.21	83.71	16.74
	71.38	0.61	74-81	81			
Huaros-2	10.30	0.96	55-66	66	66.61	127.32	25.46
	0.44	0.04	74-81	81			

Nota. Para cada subcuenca se consideraron los rangos CN = 55–66 y 74–81; se adoptó el valor máximo de cada rango y se realizó una ponderación por el porcentaje de influencia areal para obtener el CN representativo. Con dicho CN se calcularon S y la abstracción inicial I_a(mm) mediante la relación del método SCS-CN.

Además de ello se ha calculado el valor de abstracción Inicial (Ia) representativo para cada subcuenca, el cual en conjunto con el valor de número de curva (CN) se han ingresado en el modelo de pérdidas por el método de Número de Curva SCS

Figura 73

Ingreso de parámetros de pérdidas SCS–Curve Number en HEC-HMS: CN e Ia por subcuenca (AltoChillón)

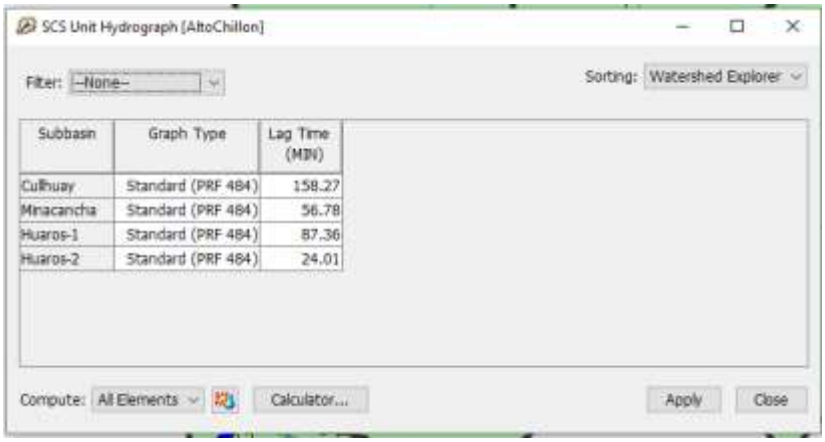


Nota. Se ingresaron en el método de pérdidas SCS Curve Number los valores representativos de CN y la abstracción inicial I_a(mm) para cada subcuenca (Cullhuay, Minacancha, Huaros-1 y Huaros-2), calculados previamente para la modelación hidrológica.

Respecto al modelo de transformación se añadieron los valores de tiempo de retardo (lag time) en minutos, previamente calculados.

Figura 74

Ingreso del tiempo de retardo. Lag Time en el modelo de transformación SCS Unit Hydrograph – HEC-HMS AltoChillón

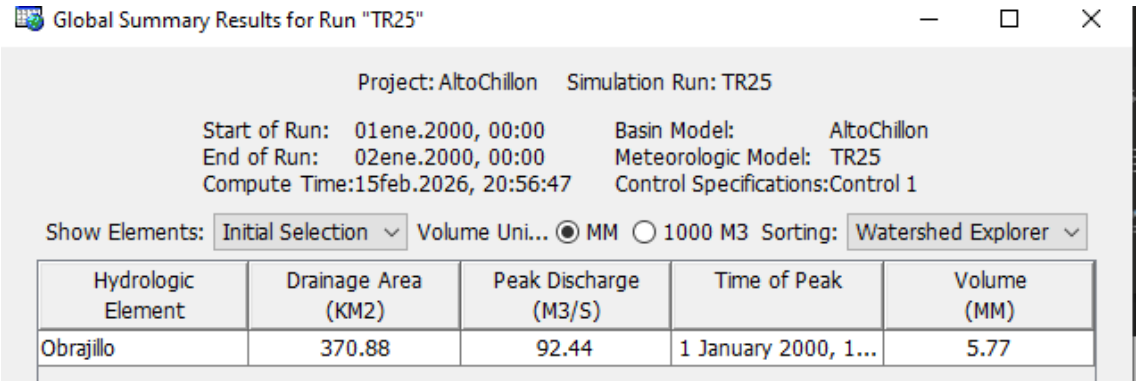


Nota. Se incorporaron en HEC-HMS los valores de Lag Time (min) previamente calculados para cada subcuenca (Cullhuay, Minacancha, Huaros-1 y Huaros-2) dentro del método de transformación SCS Unit Hydrograph (Standard PRF 484).

Una vez definidos estos parámetros, se procedió a la compilación y ejecución del modelo, obteniéndose un caudal pico de 92.44 m³/s. Este valor representa una condición máxima estimada, dado que para el cálculo se adoptaron los valores superiores correspondientes a los rangos de Número de Curva presentes en las subcuencas, lo que implica un escenario conservador en la estimación de la escorrentía.

Figura 75

Resultados globales de la simulación TR25 en HEC-HMS: caudal pico en el Junction "Obrajillo"



Nota. Resumen global de la corrida TR25 (proyecto AltoChillón), donde el nodo Obrajillo registra un caudal pico de 92.44 m³/s. El resultado corresponde a un escenario conservador, al haberse adoptado valores superiores de CN para estimar la escorrentía.

5.3.9 Determinación de parámetros del método de Hidrograma Unitario de Snyder

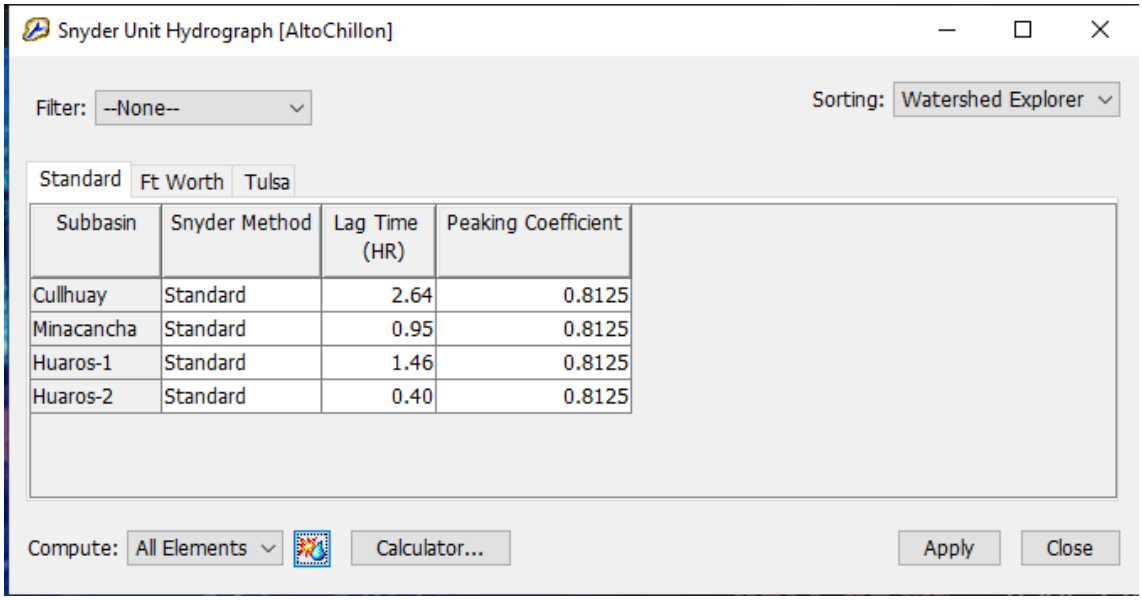
Para el modelo de pérdidas se adoptaran los valores superiores correspondientes a los rangos de Número de Curva presentes en las subcuencas, ya que en base al método de Hidrograma Unitario SCS se ha corroborado que son los máximos admisibles para representaran condiciones máximas.

Respecto al modelo de transformación mediante el método de Snyder, se adoptó el coeficiente de pico (Cp) como variable principal de ajuste, debido a su influencia directa en la magnitud del caudal máximo del hidrograma. Este parámetro regula la forma y agudeza del hidrograma unitario, permitiendo modificar la respuesta del modelo conforme a las características geomorfológicas de la cuenca.

De acuerdo con la literatura técnica y la documentación del HEC-HMS, el coeficiente Cp suele encontrarse dentro de un rango aproximado de 0.4 a 0.8, dependiendo de las características fisiográficas de la cuenca, tales como pendiente, forma y capacidad de almacenamiento.

Figura 76

Parámetros del método Snyder Unit Hydrograph en HEC-HMS (AltoChillón): Lag Time y coeficiente de pico (Cp) por subcuenca

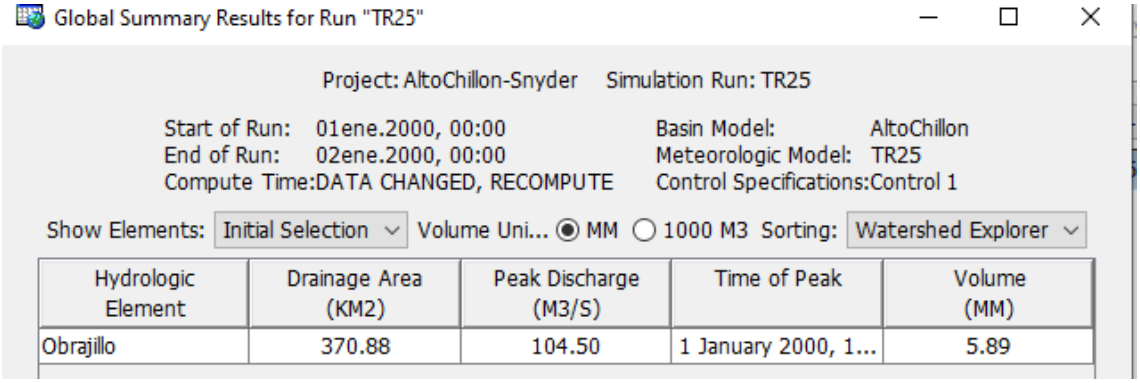


Nota. Configuración del Snyder Unit Hydrograph (Standard) para la corrida TR25, mostrando el Lag Time (h) y el Peaking Coefficient (Cp) asignados a Cullhuay, Minacancha, Huaros-1 y Huaros-2.

Se adoptó un valor de Cp = 0.8125, el cual se encuentra ligeramente por encima del rango típico recomendado, justificándose en las condiciones morfológicas de las subcuencas analizadas, caracterizadas por pendientes pronunciadas y respuesta hidrológica relativamente rápida, lo que favorece la generación de hidrogramas más agudos y picos elevados de escorrentía., con este mismo se obtiene un valor de caudal pico de 104.5 m3/s, similar al caudal máximo instantáneo obtenido del registro histórico de la estación Obrajillo.

Figura 77

Resultados globales de la simulación TR25 con Snyder en HEC-HMS: caudal pico en el nodo Obrajillo



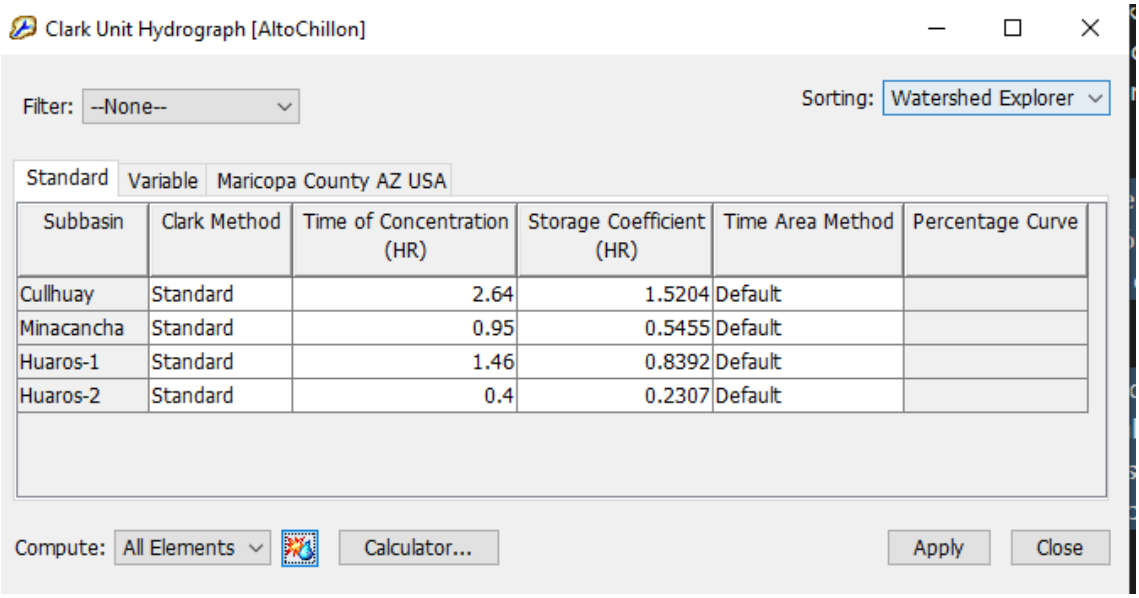
Nota. En la corrida TR25 con el método Snyder Unit Hydrograph (Cp = 0.8125), el nodo Obrajillo registra un caudal pico de 104.50 m³/s, valor consistente con el caudal máximo instantáneo de referencia obtenido del registro histórico para TR = 25 años.

5.3.10 Análisis de sensibilidad del método de Hidrograma Unitario de Clark

Para el análisis de sensibilidad del método, se adoptó el coeficiente de almacenamiento (R) como variable de control, debido a su influencia directa en la magnitud del caudal pico y en la morfología del hidrograma resultante. Valores mayores de R generan una mayor atenuación y, por tanto, picos más bajos y curvas más extendidas en el tiempo, mientras que valores menores producen hidrogramas más agudos y con mayor caudal máximo.

Figura 78

Parámetros del método Clark Unit Hydrograph en HEC-HMS (AltoChillón): Tc y coeficiente de almacenamiento (R) por subcuenca

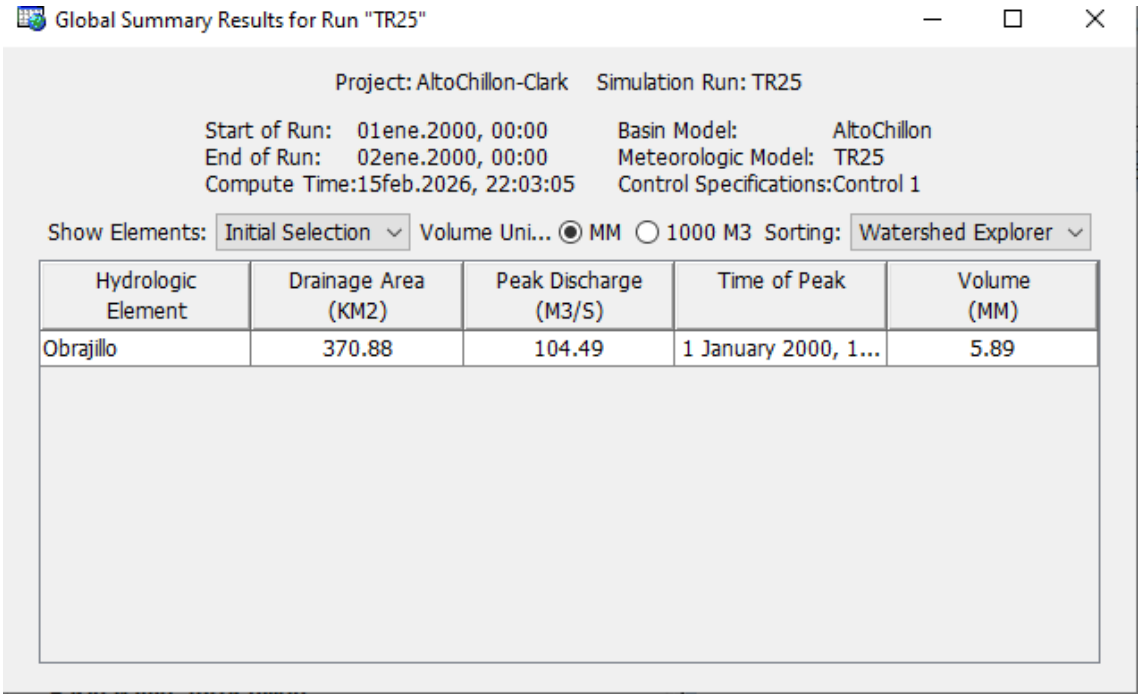


Nota. Detalle de la parametrización del Clark Unit Hydrograph (Standard) empleada en las simulaciones, presentando el tiempo de concentración (Tc) y el coeficiente de almacenamiento (R) asignados a Cullhuay, Minacancha, Huaros-1 y Huaros-2. Se identifica al coeficiente R como variable de control dada su incidencia directa en la atenuación y el caudal pico.

Como se hizo mención en apartados anteriores, este paramero esta relacionado con el tiempo de concentración por medio de un factor C que está relacionado al tiempo de retardo (lag time), el cual se considera como el 60% del tiempo de concentración. Obteniendose un valor de 0.96065, de tal manera que con este valor se obtiene el valor de 104.5 m3/s similar al caudal máximo instantáneo obtenido del registro histórico de la estación Obrajillo.

Figura 79

Resultados globales de la simulación TR25 con Clark en HEC-HMS: caudal pico en el nodo Obrajillo



Nota. En la corrida TR25 con el método Clark Unit Hydrograph, el nodo Obrajillo registra un caudal pico de 104.49 m³/s, valor comparable al caudal máximo instantáneo de referencia (≈104.5 m³/s). El parámetro de almacenamiento R se vinculó a $T_c$mediante el factor C, considerando $T_l = 0.6\,T_c$.

5.3.11 Evaluación comparativa del desempeño de los modelos

Con el objetivo de evaluar el desempeño de los métodos de transformación implementados, se compararon los caudales pico simulados para un periodo de retorno de 25 años (TR = 25) con el valor de referencia registrado en la estación hidrométrica, correspondiente a 104.50 m³/s. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 19

Comparación de caudales pico simulados para TR = 25 años y evaluación del error por método de transformación

Método	Caudal Pico Simulado (m³/s)	Error Absoluto (m³/s)	Error Porcentual (%)
H.U. SCS	92.44	12.06	11.54
H.U. Snyder	104.5	0	0
H.U. Clark	104.49	0.01	0.01

Nota. Se compararon los caudales pico simulados por los métodos H.U. SCS, H.U. Snyder y H.U. Clark con el valor de referencia de la estación hidrométrica Obrajillo para TR = 25 años (Qref = 104.50 m³/s). El error absoluto corresponde a $|Q_{sim} - Q_{ref}|$ *y el error porcentual a* $\frac{|Q_{sim} - Q_{ref}|}{Q_{ref}} \times 100$.

El error absoluto fue calculado como la diferencia entre el caudal observado y el caudal simulado, mientras que el error porcentual corresponde a la relación entre dicha diferencia y el valor observado.

5.4 Procedimiento para el objetivo especifico 4

Contrastar los caudales simulados por el modelo hidrológico frente a los registros históricos de la Estación Hidrométrica Obrajillo.

5.4.1 Procedimiento de evaluación del desempeño del modelo hidrológico

La evaluación del desempeño del modelo hidrológico se realizó mediante la comparación de los caudales pico simulados con los valores máximos obtenidos a partir del análisis estadístico de los registros históricos de la Estación Hidrométrica Obrajillo.

El proceso de parametrización técnica se efectuó utilizando el periodo de retorno de 25 años (TR = 25), determinando los valores característicos para cada método de transformación lluvia–escorrentía. Posteriormente, para la etapa de análisis de respuesta, dichos parámetros se mantuvieron constantes, sin realizar modificaciones adicionales, con la finalidad de evaluar la consistencia predictiva del modelo ante eventos de mayor recurrencia.

Los periodos de retorno considerados para el análisis de diseño y comparación fueron: 50, 100, 200, 500 y 1000 años, representando escenarios progresivamente más extremos y de interés en estudios hidrológicos de diseño.

La evaluación del desempeño se realizó mediante los siguientes indicadores estadísticos:

- Error absoluto

- Error porcentual
- Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)
- Índice de Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE)

5.4.2 Comparación de caudales simulados y observados

En la siguiente tabla se presenta la comparación entre los caudales máximos observados en la estación hidrométrica y los caudales simulados mediante los métodos de Hidrogramas Unitarios SCS, Snyder y Clark.

Tabla 20

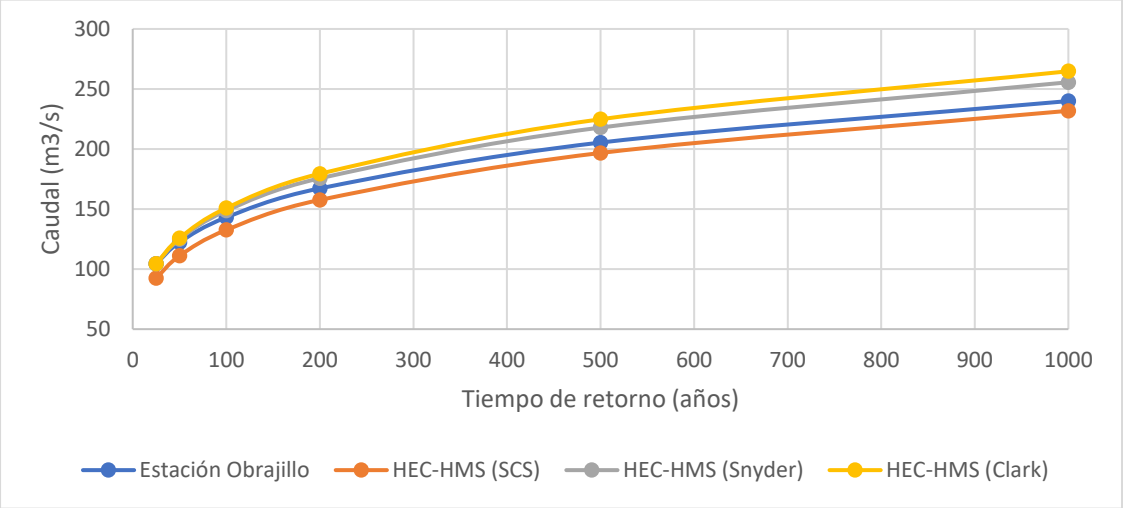
Comparación de caudales máximos observados y simulados por período de retorno (SCS, Snyder y Clark)

TR (años)	Q observado (m^3/s)	SCS (m^3/s)	Snyder (m^3/s)	Clark (m^3/s)
25	104.5	92.44	104.5	104.49
50	122.34	111.12	124.88	125.82
100	143.07	132.6	148.61	150.82
200	167.21	157.61	175.6	179.41
500	205.4	196.74	217.9	224.8
1000	239.95	231.84	255.62	264.79

Nota. Se presentan los caudales máximos observados en la estación hidrométrica (Q observado) y los caudales simulados con los métodos Hidrograma Unitario SCS, Snyder y Clark para distintos períodos de retorno (TR). Los valores se emplean para evaluar consistencia y diferencias entre enfoques de transformación lluvia–escorrentía.

Figura 80

Curvas de caudal máximo vs. período de retorno: comparación entre estación Obrajillo y simulaciones HEC-HMS (SCS, Snyder y Clark



Nota. El gráfico compara los caudales máximos (m³/s) observados en la estación Obrajillo con los caudales simulados en HEC-HMS usando los métodos de transformación SCS, Snyder y Clark para distintos tiempos de retorno (TR).

Se observa que para el evento de diseño seleccionado (TR = 25 años), los métodos de Snyder y Clark presentan una convergencia prácticamente exacta respecto al valor objetivo, mientras que el método SCS muestra una tendencia a la subestimación de dicho caudal.

Para los periodos de retorno mayores, se identifican tendencias diferenciadas en el comportamiento de los métodos.

5.4.3 Evaluación estadística del desempeño

5.4.3.1 Error porcentual promedio

Permite cuantificar la magnitud relativa de la diferencia entre los caudales observados y simulados, expresada en términos porcentuales. Este indicador facilita la interpretación directa del grado de desviación promedio del modelo respecto a los valores de referencia,

siendo deseable que su valor sea lo más cercano posible a cero. El método Snyder presenta el menor error promedio global

$$Error\% = \frac{|Q_{obs} - Q_{sim}|}{Q_{obs}} x100$$

Tabla 21

Error porcentual de caudales simulados respecto al observado por período de retorno (SCS, Snyder y Clark)

TR	Error Porcentual		
	SCS	Snyder	Clark
25	11.5%	0.0%	0.0%
50	9.2%	2.1%	2.8%
100	7.3%	3.9%	5.4%
200	5.7%	5.0%	7.3%
500	4.2%	6.1%	9.4%
1000	3.4%	6.5%	10.4%
Promedio	6.9%	3.9%	5.9%

Nota. El error porcentual se calculó como $|\frac{Q_{sim}-Q_{obs}}{Q_{obs}}|\times 100$ *para cada TR, comparando los métodos SCS, Snyder y Clark. La fila "Promedio" corresponde al promedio de los errores porcentuales del conjunto de períodos de retorno evaluados.*

5.4.3.2 Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

Mide la dispersión global de los errores, penalizando en mayor medida las diferencias más grandes debido a su formulación cuadrática. Un menor valor de RMSE indica una mejor precisión del modelo en la reproducción de los caudales observados. El método Snyder presenta el menor RMSE, lo que indica menor dispersión global respecto a los valores observados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{n}}$$

Tabla 22

Cálculo de errores cuadrados y RMSE para la evaluación de caudales simulados

TR	(Qobs-Qsim)^2		
	SCS	Snyder	Clark
25	145.4	0.0	0.0
50	125.9	6.5	12.1
100	109.6	30.7	60.1
200	92.2	70.4	148.8
|500	75.0	156.3	376.4
1000	65.8	245.5	617.0
RMSE	10.1	9.2	14.2

Nota. Se presentan los errores al cuadrado $(Q_{obs}-Q_{sim})^2$*para cada TR y el RMSE calculado como* $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}$*. Este indicador penaliza más los errores grandes; por ello, un RMSE menor implica mejor ajuste global. En el conjunto evaluado, Snyder muestra el menor RMSE, indicando menor dispersión respecto a los caudales observados.*

5.4.4 Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Evalúa la capacidad predictiva del modelo comparando el error cuadrático del modelo con la variabilidad natural de los datos observados. Sus valores oscilan entre $-\infty$ y 1, siendo 1 el ajuste perfecto; valores superiores a 0.75 se consideran buenos, y mayores a 0.90 indican un desempeño excelente.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Todos los métodos presentan valores de NSE superiores a 0.9, lo que indica excelente desempeño. No obstante, el método Snyder obtiene el mayor índice de eficiencia.

Tabla 23

Cálculo del índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE): sumas cuadráticas y resultado por método

TR	(Qobs-Q'obs)^2		
	SCS	Snyder	Clark
25	3510.0	5084.4	3510.0
50	1714.4	2769.4	1510.5
100	427.5	970.0	229.1
200	12.0	37.6	140.5
500	1735.1	1088.7	2932.8
1000	5807.2	4636.9	8441.0
NSE	0.95	0.97	0.93

Nota. El NSE se calculó como $NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$. *La tabla presenta los términos cuadráticos empleados en el denominador* $(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2$ *y el valor final de NSE para SCS, Snyder y Clark. Valores cercanos a 1 indican mejor ajuste; en este caso, todos superan 0.90 (desempeño excelente), destacando Snyder con el mayor NSE.*

5.4.5 Análisis comparativo del comportamiento hidrológico

El método SCS presenta una subestimación sistemática en todos los periodos de retorno, aunque con tendencia decreciente a medida que aumenta el TR, evidenciando estabilidad estructural pero menor precisión en el ajuste del caudal pico.

El método Clark muestra una convergencia precisa respecto al valor de referencia para el periodo de diseño base (TR = 25 años); sin embargo, presenta una sobreestimación progresiva más marcada en eventos extremos, particularmente para TR \ge 500 años. Este comportamiento indica una mayor sensibilidad del coeficiente de almacenamiento (R) ante incrementos en la intensidad de la precipitación de diseño.

El método Snyder mantiene un comportamiento equilibrado, con una convergencia precisa en el evento de diseño base y sobreestimaciones moderadas y proporcionales en eventos de mayor recurrencia, sin una amplificación excesiva de las diferencias respecto a los valores esperados.

5.4.6 Matriz multicriterio de selección del modelo

Con el objetivo de seleccionar el método más adecuado, se realizó una evaluación comparativa considerando los siguientes criterios:

- Error porcentual promedio (menor es mejor)
- RMSE (menor es mejor)
- NSE (mayor es mejor)
- Estabilidad de tendencia en TR altos

En la siguiente tabla se resume la evaluación comparativa multicriterio, evidenciando que el método Snyder presenta el mejor desempeño global.

Tabla 24

Evaluación multicriterio de métodos de transformación (SCS, Snyder y Clark) para la selección del mejor desempeño

Método	Error Prom.	RMSE	NSE	Tendencia en TR altos	Evaluación Global
SCS	Medio	Medio	Alto	Subestimación estable	Bueno
Snyder	Bajo	Bajo	Muy alto	Sobreestimación moderada	Muy bueno
Clark	Medio	Alto	Alto	Sobreestimación creciente	Bueno

Nota. La calificación se realizó comparando error porcentual promedio y RMSE (menor es mejor), NSE (mayor es mejor) y la estabilidad de la tendencia en TR altos (sesgo de sub/sobreestimación). En conjunto, el método Snyder muestra el mejor desempeño global.

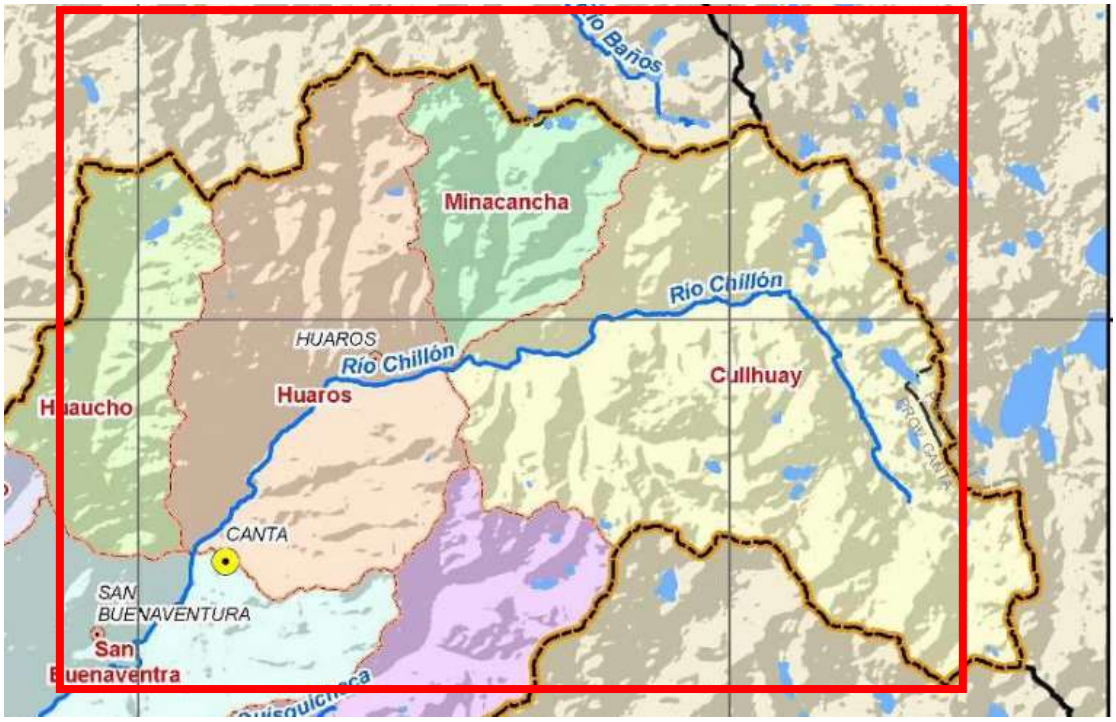
CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Resultado para el objetivo específico 1

Tomando como referencia la Figura 2: Mapa de subcuencas del río Chillón (p. 14) del Estudio Hidrológico de la Unidad Hidrográfica Chillón, elaborado por la Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos de la ANA (2019), se identificaron en el sector alto de la cuenca las tres subcuencas consideradas en este estudio: Cullhuay, Minacancha y Huaros.

Figura 81

Ubicación y delimitación de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros en la cuenca alta del río Chillón



Nota. Delimitación de las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros en la cuenca alta del río Chillón, obtenida mediante el procesamiento de información cartográfica oficial de la ANA en entorno SIG. Fuente: Elaboración propia.

6.2 Resultado para el objetivo específico 2

Para la caracterización climática del área de estudio, se extrajo la serie continua de precipitación diaria (1981–2016) del producto grillado PISCOp v2.1 (SENAMHI) en formato NetCDF, identificando en ArcGIS 10.8 nueve celdas (0.1° × 0.1°) intersectadas con las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros. La extracción de los 13,149 días de registro se realizó mediante scripts en RStudio y se determinaron las series de precipitación máxima anual mediante ponderación por área de influencia en cada subcuenca. Tras verificar la ausencia de datos atípicos, el análisis de frecuencia en HIDROESTA 2.0 determinó que las

distribuciones de mejor ajuste estadístico fueron Gamma 2 Parámetros para Cullhuay, Log-Pearson Tipo III para Minacancha y Gumbel para Huaros. Finalmente, los valores teóricos estimados se afectaron por el factor de corrección de 1.13 de la OMM y se desagregaron con el método de Dick y Peschke para estructurar las curvas IDF y los hietogramas de diseño empleados en el modelamiento hidrológico.

Tabla 1

Ajuste probabilístico y precipitaciones máximas extremas corregidas (mm) por periodo de retorno

TR (años)	Cullhuay (Gamma 2)	Minacancha (Log-Pearson III)	Huaros (Gumbel)
2	31.96	25.72	23.67
5	39.91	32.06	29.67
10	45.14	36.18	33.62
20	50.19	39.97	37.46
25	51.79	41.15	38.70
50	56.53	44.80	42.63
100	61.70	48.55	46.56
200	66.68	51.78	50.78
300	69.60	53.89	53.36
500	73.31	56.55	56.59
1000	78.41	59.77	61.26

Nota. Valores de precipitación máxima diaria en 24 horas corregidos por el factor 1.13 de la OMM. Fuente: Elaboración propia a partir de datos PISCO–SENAMHI.

6.3 Resultado para el objetivo específico 3

Determinar el modelo de precipitación – escorrentía más adecuada para la estimación de los caudales de máximas avenidas en el área de estudio.

A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que los métodos de Snyder y Clark presentan un ajuste prácticamente exacto respecto al valor registrado en la estación hidrométrica, con errores porcentuales menores al 0.01 %, lo que indica un excelente desempeño en la reproducción del caudal pico para el periodo de retorno analizado.

En contraste, el método SCS presenta una subestimación del caudal pico del orden de 11.54 %, lo que sugiere una menor capacidad de ajuste bajo las condiciones evaluadas. Esta diferencia puede atribuirse a la sensibilidad del método frente al Número de Curva (CN), parámetro que controla principalmente el volumen de escorrentía y cuya estimación puede influir significativamente en la magnitud del pico simulado.

En consecuencia, para el periodo de retorno de 25 años, los métodos de Snyder y Clark muestran un desempeño superior en términos de reproducción del caudal máximo observado, constituyéndose en alternativas más representativas para la modelación hidrológica de la cuenca de estudio bajo condiciones de diseño.

6.4 Resultado para el objetivo específico 4

Del análisis estadístico y comparativo realizado se concluye que los tres métodos presentan buen desempeño hidrológico, con valores de NSE superiores a 0.9, lo cual indica adecuada capacidad de simulación.

No obstante, el método de Snyder destaca por:

- Presentar el menor error porcentual promedio.
- Obtener el menor RMSE.
- Registrar el mayor índice de eficiencia (NSE).

- Mantener estabilidad y coherencia hidrológica en eventos extremos.
- Reproducir con precisión el caudal correspondiente al evento de diseño base.

En consecuencia, el método de Snyder se considera el más adecuado para la estimación de caudales máximos de diseño en la cuenca de estudio, garantizando precisión estadística, estabilidad estructural y confiabilidad en escenarios de distinta recurrencia.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

El La caracterización hidrológica desarrollada para las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros permitió describir el comportamiento de las precipitaciones extremas y su traducción en respuesta de escorrentía, evidenciando una dinámica compatible con cuencas altoandinas de rápida respuesta, asociada a su configuración morfológica y a la estructura de su red de drenaje.

La delimitación hidrográfica y la determinación de parámetros geomorfológicos y fisiográficos mediante herramientas SIG y un modelo digital de elevación constituyeron un componente determinante para la implementación del modelo HEC-HMS, confirmando que la representación física de la cuenca condiciona la confiabilidad de los caudales de máximas avenidas.

El empleo del producto de precipitación grillada PISCO v2.1 permitió suplir la limitación de información pluviométrica local, generando series de precipitación máxima y curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) por subcuenca con consistencia hidrológica y soporte estadístico para diversos períodos de retorno, lo cual hizo posible la construcción de hietogramas de diseño para la modelación.

Los análisis de bondad de ajuste evidenciaron que el comportamiento extremo de la precipitación presenta variabilidad espacial dentro del área de estudio; por ello, las distribuciones de mejor ajuste difieren entre subcuencas (por ejemplo, Gumbel en Cullhuay,

Log-Pearson tipo III en Minacancha y Normal en Huaros). En consecuencia, la adopción de una única distribución para toda la cuenca introduciría sesgos en la estimación de precipitaciones de diseño.

Las curvas IDF y los hietogramas obtenidos muestran que las mayores intensidades se concentran en duraciones cortas y aumentan con el período de retorno, lo cual sustenta el potencial de ocurrencia de avenidas súbitas y justifica la definición de un intervalo de simulación fino en el modelo.

A partir del registro de máximos instantáneos de la estación Obrajillo, se estimaron los caudales de diseño para distintos períodos de retorno; adicionalmente, el evento TR = 25 años (Qref = 104.50\ m^3/s) se adoptó como valor de referencia para la parametrización inicial del modelo hidrológico, al constituir un dato representativo y directamente contrastable con la salida del nodo Junction 'Obrajillo'.

La evaluación de los métodos de transformación (Hidrograma Unitario SCS, Snyder y Clark) implementados en HEC-HMS, evidenció divergencias sistemáticas en la representación del caudal pico. En particular, el método SCS mostró una tendencia a la subestimación del pico respecto a la condición de diseño base, mientras que los métodos de Snyder y Clark lograron una convergencia precisa con el caudal de referencia.

Los indicadores de desempeño (error porcentual, RMSE y NSE) muestran un desempeño excelente para los tres métodos (NSE > 0.90). Sin embargo, la evaluación multicriterio, que incorpora además la estabilidad de la tendencia en períodos de retorno altos, identifica al método Snyder como el de mejor desempeño global por presentar menor dispersión, mayor eficiencia y una tendencia más consistente respecto a los caudales observados.

En conjunto, la metodología aplicada (PISCO v2.1, construcción de curvas IDF e hietogramas, procesamiento SIG/DEM, modelación en HEC-HMS y contraste de resultados

con los registros de la estación Obrajillo) constituye una base técnica reproducible para la estimación de caudales de máximas avenidas en la cuenca alta del río Chillón, aportando criterios objetivos para sustentar el diseño hidráulico y la gestión del riesgo hidrometeorológico en el área de estudio.

7.2 Recomendaciones

Se recomienda que las entidades competentes, tales como la Autoridad Nacional del Agua, así como los gobiernos locales y regionales, utilicen los caudales de máximas avenidas y las curvas IDF obtenidas como insumo técnico para el diseño y dimensionamiento de defensas ribereñas, puentes, alcantarillas y demás obras hidráulicas en la cuenca alta del río Chillón.

Se sugiere fortalecer y ampliar la red de monitoreo hidrometeorológico en las subcuencas Cullhuay, Minacancha y Huaros mediante la instalación y operación sostenida de estaciones pluviométricas y de aforo, a fin de reducir la incertidumbre asociada al uso de información grillada y perfeccionar la capacidad predictiva y el ajuste de los modelos hidrológicos ante registros observados in situ.

Se recomienda complementar el análisis hidrológico con estudios hidráulicos detallados, mediante modelos como HEC-RAS en una y dos dimensiones, orientados a delimitar áreas potencialmente inundables, estimar niveles de agua, identificar zonas críticas y evaluar impactos sobre infraestructura y centros poblados expuestos.

Para investigaciones posteriores, se plantea incorporar escenarios de cambio climático y variabilidad hidrológica, evaluando posibles cambios en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones extremas, con el propósito de analizar su efecto en los caudales de diseño y en la seguridad hidráulica de las obras proyectadas.

Se sugiere replicar la metodología aplicada —integración de PISCO v2.1, procesamiento SIG y modelación hidrológica en HEC-HMS— en otras cuencas altoandinas

con limitada instrumentación, priorizando la verificación local de la precisión del modelo y el contraste riguroso frente a los registros hidrométricos disponibles, para garantizar resultados consistentes y comparables."

CAPÍTULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arias Gonzáles, J. L., & Covinos Gallardo, M. (2021). Diseño y metodología de la investigación. Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC). https://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/2260.

Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. Hydrological Sciences Journal, 65(5), 770–785. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411.

Baltazar Miranda, M. S. (2021). Modelamiento hidrológico de máximas avenidas para estimar los niveles de peligro a inundación en la subcuenca del río Shullcas [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Los Andes]. Repositorio ALICIA (CONCYTEC). https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UPLA_dc8f313994d5d5642dc693daafd6e9dc.

Bolaños Saravia, S. T., & Castillo Castillo, S. (2024). Análisis de tránsito de máximas avenidas en el lago Chinchaycocha usando el software HEC-HMS para estudiar el comportamiento de futuras inundaciones [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/682919.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Applied hydrology. McGraw-Hill.

Clark, C. O. (1945). Storage and the unit hydrograph. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 110(1), 1419–1446. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/TACEAT.0005800.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación. McGraw-Hill Education. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008.

L'vovich, M. I. (1979). World water resources and their future. American Geophysical Union. https://books.google.com/books/about/World_Water_Resources_and_Their_Future.html?id=7rpPAQAAIAAJ.

Maidment, D. R. (Ed.). (1993). Handbook of hydrology. McGraw-Hill. https://books.google.com/books/about/Handbook_of_Hydrology.html?id=4_9OAAAAMAAJ.

Mejía, E. (2005). Técnicas e instrumentos de investigación (1.ª ed.). Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2011). Manual de carreteras: Hidrología, hidráulica y drenaje (Resolución Directoral N.° 20-2011-MTC/14). Gobierno del Perú. https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/4443017-20-2011-mtc-14.

Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C., Basile, P., Zimmermann, E., & Trivisonno, F. (2013). Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real. Tecnología y Ciencias del Agua, 4(1), 83–105. https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n1/v4n1a4.pdf.

Salas-Martínez, R., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2014). Modelado hidrológico de la cuenca del Río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. Agrociencia, 48(1), 1–15. https://www.redalyc.org/pdf/302/30245661001.pdf.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2017). PISCO v2.1: Reconstrucción de la precipitación diaria para el Perú (documento técnico). SENAMHI. https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf.

Snyder, F. F. (1938). Synthetic unit-graphs. Eos, Transactions American Geophysical Union, 19(1), 447–454. https://doi.org/10.1029/TR019i001p00447.

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2025). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual (CPD-74A, Version 4.13, July 2025). U.S. Army Corps of Engineers. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx.

U.S. Soil Conservation Service. (1985). National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. U.S. Department of Agriculture. https://archive.org/download/CAT71334647003/CAT71334647003.pdf.

Viessman, W., & Lewis, G. L. (2002). Introduction to hydrology (5th ed.). Prentice Hall. https://openlibrary.org/books/OL7670189M/Introduction_to_Hydrology_Fifth_Edition.

Weis, M. (2021, noviembre 22). Cuencas hidrográficas para gestión de recursos hídricos. Escenarios Hídricos 2030. https://escenarioshidricos.cl/noticia/cuenca-hidrografica-la-unidad-territorial-optima-para-gestionar-recursos-hidricos/.

Zubieta, R., Laqui, W., & Lavado, W. (2018). Modelación hidrológica de la cuenca del río Ilave a partir de datos de precipitación observada y de satélite (2011–2015). Tecnología y Ciencias del Agua, 9(5), 85–105. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-04.