UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL

Tesis

Modelado hidrológico e hidráulico para un sistema de alerta temprana ante inundaciones en la Quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba - 2025

Asesor:

Ph.D. Vásquez Ramírez, Abbon Alex

Autor:

Salinas Quezada, Jorge Antonio

Para optar el Título Profesional:

Ingeniero Civil

Abancay - Apurímac - Perú

2026

Acta de Sustentación

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Acta N°: 062

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Abancay, a los treinta (30) días del mes de octubre del 2026, siendo las 09: 00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0813-2026-EPIC-FI-UTEA-SA de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería:

Presidente	:	Mag. ROLDÁN JUÁREZ, Américo
Dictaminante:		Mag. LEGUÍA VALVERDE, Willy Silvestre
Replicante	:	Mag. HERRERA PONCE, Veriosca

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada: **Modelado hidrológico e hidráulico para un sistema de alerta temprana ante inundaciones en la Quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba - 2025**

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: SALINAS QUEZADA, Jorge Antonio

Para optar el Tituló Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO(S) ☒ o DESAPROBADO(S) ☐:

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller	Nota	Detalle (**)
Br. : **SALINAS QUEZADA, Jorge Antonio**	17	APROBADO NOTABLE

Siendo las 10:30 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. ROLDÁN JUÁREZ, Américo (.....)

Dictaminante: Mag. LEGUÍA VALVERDE, Willy Silvestre (.....)

Replicante: Mag. HERRERA PONCE, Veriosca (.....)

Nota: Desaprobado: 0-10; **Aprobado:** 11-20
(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de Similitud

15% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 9 palabras)

Fuentes principales

12% Fuentes de Internet
10% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

turnitin Página 2 de 324 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:650629622

Metadatos

Datos del autor		
Apellidos y nombres	:	Salinas Quezada, Jorge Antonio
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	44549958
URL ORCID	:	orcid.org/0009-0003-3520-1910
Datos del asesor		
Apellidos y nombres	:	Ph.D. Vásquez Ramírez, Abbon Alex
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	06532658
URL ORCID	:	orcid.org/0000-0001-7299-5367
Datos de la investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	:	Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	:	2025-2026
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	15%
URL de OCDE	:	purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A Dios, por ser la luz que alumbra mi camino, por concederme vida, fortaleza y sabiduría para alcanzar esta meta.

A mis padres, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional, quienes, con sus valores me impulsaron siempre a seguir adelante en mi formación profesional.

A mi familia, por su constante apoyo, sus palabras de aliento y el respaldo que me brindaron a lo largo de todo este proceso.

Agradecimientos

A Dios, por acompañarme en cada etapa de este camino académico, concediéndome salud, determinación y la bendición de lograr esta meta profesional.

A mis hermanos, por su constante solidaridad y la fraternidad que siempre demostraron, convirtiéndose en una fuente constante de motivación para seguir adelante.

A mi asesor de tesis, por su orientación, paciencia y valiosos aportes, que fueron esenciales para la elaboración y culminación de esta investigación.

Resumen

El estudio tuvo como objetivo desarrollar el modelado hidrológico e hidráulico para proponer un Sistema de Alerta Temprana (SAT) ante inundaciones por desbordamiento de la quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac - 2025. Presentó un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, de nivel descriptivo-explicativo y de diseño no experimental, transversal y propositivo. Para el análisis se emplearon registros hidrometeorológicos, información cartográfica, modelo digital de elevación y datos topográficos del cauce, procesados mediante Sistemas de Información Geográfica. Asimismo, se realizó la simulación hidrológica mediante HEC-HMS para estimar caudales máximos y el modelado hidráulico con HEC-RAS para evaluar el comportamiento del flujo y delimitar las zonas expuestas ante diferentes escenarios. Los resultados evidenciaron que la cuenca presentó condiciones favorables para la generación de escorrentía superficial, con una pendiente media de 33.27 % y un número de curva de diseño de 87.816. Bajo condiciones húmedas, se obtuvieron caudales máximos de 415.60 m^3/s, 660.20 m^3/s y 790.90 m^3/s para periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, respectivamente. Además, el análisis hidráulico identificó una limitada capacidad de conducción del cauce, generando desbordamientos y zonas con peligro muy alto en los sectores Totora y Oropesa, donde se identificaron 90 viviendas expuestas. Se concluyó que el modelado hidrológico e hidráulico permitió definir escenarios críticos de inundación y establecer parámetros técnicos para la propuesta de un SAT Comunitario (SAT-COM) basado en monitoreo hidrometeorológico, comunicación oportuna de alertas y fortalecimiento de la capacidad de respuesta comunitaria, orientado a reducir el riesgo ante eventos extremos.

Palabras clave: modelado hidrológico, modelado hidráulico, inundaciones, caudales máximos, sistema de alerta temprana comunitario.

Abstract

The study aimed to develop hydrological and hydraulic modeling to propose an Early Warning System (EWS) for flooding caused by the overflowing of the Totora stream in the Oropesa district, Antabamba province, Apurímac (2025). The research employed a quantitative approach, was applied in nature, descriptive-explanatory in scope, and followed a non-experimental, cross-sectional, and proposal-oriented design. The analysis utilized hydrometeorological records, cartographic information, a digital elevation model, and topographic data of the stream channel, all processed using Geographic Information Systems (GIS). Hydrological simulation was conducted using HEC-HMS to estimate peak flows, while hydraulic modeling was performed using HEC-RAS to evaluate flow behavior and delineate areas exposed to various scenarios. The results indicated that the basin is highly conducive to surface runoff, with an average slope of 33.27% and a design curve number of 87.816. Under saturated (wet) conditions, peak flows of 415.60 m³/s, 660.20 m³/s, and 790.90 m³/s were calculated for return periods of 10, 50, and 100 years, respectively. Furthermore, the hydraulic analysis revealed limited conveyance capacity in the stream channel, leading to overflows and areas of very high risk in the Totora and Oropesa sectors, where 90 dwellings were identified as being exposed. It was concluded that the hydrological and hydraulic modeling enabled the definition of critical flood scenarios and the establishment of technical parameters for a Community-based Early Warning System (EWS-COM). This system focuses on hydrometeorological monitoring, the timely communication of alerts, and the strengthening of community response capacity, all aimed at reducing risk in the face of extreme events.

Key words: hydrological modeling, hydraulic modeling, floods, peak flows, community-based early warning system.

Índice General

Portada i
Acta de Sustentación ii
Reporte de Similitud iii
Metadatos iv
Dedicatoria v
Agradecimientos vi
Resumen vii
Abstract viii
Índice General ix
Índice de Tablas xvii
Índice de Figuras xxi
Índice de Anexos xxvi
Lista de Abreviaturas xxvii
I. Introducción 30
II. Planteamiento del Problema 32
2.1. Descripción y Formulación del Problema 32
2.2. Objetivos 42
2.2.1. Objetivo General 42
2.2.2. Objetivos Específicos 42
2.3. Justificación e Importancia 43
2.4. Hipótesis 47
2.5. Variables 47
III. Marco Teórico 49
3.1. Antecedentes 49
3.2. Bases Teóricas 59
3.2.1. Modelamiento Hidrológico 59

3.2.1.1. Concepto de Modelamiento Hidrológico. 59
3.2.1.2. Tipos de Modelos Hidrológicos. 60
3.2.1.3. Fundamentos del Software HEC-HMS. 61
3.2.1.4. Estructura del Modelo HEC-HMS. 62
3.2.1.4.1. Modelo de Cuenca (Basin Model). 63
3.2.1.4.2. Modelo Meteorológico. 64
3.2.1.4.3. Especificaciones de Control. 65
3.2.1.5. Procesos Hidrológicos en HEC-HMS. 65
3.2.1.5.1. Método de Pérdidas (SCS-CN). 66
3.2.1.5.2. Método de Transformación Lluvia-Escorrentía. 67
3.2.1.5.3. Flujo Base. 67
3.2.1.5.4. Tránsito de Caudales. 68
3.2.1.5.5. Calibración y Validación de Modelos Hidrológicos. 69
3.2.2. Modelamiento Hidráulico 69
3.2.2.1. Concepto de Modelamiento Hidráulico. 70
3.2.2.2. Tipos de Modelos Hidráulicos. 70
3.2.2.3. Fundamentos del Flujo en Cauces. 71
3.2.2.4. Modelamiento con HEC-RAS. 73
3.2.2.4.1. Eje del Río. 74
3.2.2.4.2. Geometría del Cauce. 74
3.2.2.4.3. Secciones Transversales. 75
3.2.2.4.4. Condiciones de Flujo Permanente y no Permanente. 76
3.2.2.4.5. Condiciones de Frontera. 77
3.2.2.5. Parámetros Hidráulicos. 77
3.2.2.5.1. Coeficiente de Rugosidad de Manning. 78
3.2.2.5.2. Régimen de Flujo. 79
3.2.2.6. Simulación de Inundaciones. 80
3.2.2.6.1. Modelación de Escenarios. 80

3.2.2.6.2. Determinación de Zonas Inundables. 81
3.2.3. Inundaciones y Gestión del Riesgo 82
3.2.3.1. Definición de Inundación. 83
3.2.3.2. Tipos de Inundación. 83
3.2.3.3. Factores Condicionantes. 84
3.2.3.4. Evaluación del Riesgo. 84
3.2.3.5. Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo. 85
3.2.4. Sistema de Alerta Temprana (SAT) ante Inundaciones 86
3.2.4.1. Definición del SAT. 86
3.2.4.2. Importancia de los SAT en la Gestión del Riesgo. 86
3.2.4.3. Tipos de SAT. 87
3.2.4.4. Componentes del SAT. 88
3.2.4.5. Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SAT-COM). 88
3.2.4.6. Características del SAT-COM. 89
3.2.4.7. Diseño e Implementación del SAT-COM. 90
3.2.4.7.1. Conocimiento del Riesgo. 90
3.2.4.7.2. Monitoreo y Seguimiento. 91
3.2.4.7.3. Difusión y Comunicación de la Alerta. 91
3.2.4.7.4. Capacidad de Respuesta. 91
3.2.4.8. Integración del Modelamiento Hidrológico e Hidráulico en los SAT. 92
3.2.4.9. Umbrales de Alerta Hidrológica. 93
3.3. Definición de Términos 95
IV. Metodología 99
4.1. Tipo y Nivel de Investigación 99
4.2. Ámbito Temporal y Espacial 101
4.3. Población y Muestra 102
4.4. Instrumentos 104
4.5. Procedimientos 108

4.6. Análisis de Datos.....110
4.7. Consideraciones Éticas.....112
V. Resultados y Discusión.....115
5.1. Resultados Descriptivos.....115
5.1.1. Caracterización Geoespacial e Hidrológica de la Cuenca de Estudio.....115
5.1.1.1. Área de Estudio.....115
5.1.1.2. Modelo Digital de Elevación (DEM) para Delimitar la Cuenca.....116
5.1.1.3. Configuración Geoespacial del Modelo Hidrológico en HEC-HMS.....117
5.1.1.3.1. Configuración Inicial del Entorno de Modelación.....118
5.1.1.3.2. Representación del Modelo de Cuenca (Basin Model).....119
5.1.1.3.3. Delimitación Hidrológica de la Cuenca de la Quebrada Totora.....119
5.1.1.4. Parámetros Morfométricos y Fisiográficos de la Cuenca de la Quebrada Totora.....126
5.1.1.4.1. Parámetros de Forma.....127
5.1.1.4.2. Parámetros de Relieve.....130
5.1.1.4.3. Parámetros de la Red de Drenaje.....133
5.1.1.5. Delimitación y Caracterización de Subcuencas.....134
5.1.1.6. Parámetros Hidrológicos Aplicados en el Modelo HEC-HMS.....138
5.1.1.6.1. Método de Pérdida (Loss Method).....139
5.1.1.6.2. Transformación Lluvia-Escorrentía mediante el Hidrograma Unitario SCS.....142
5.1.1.6.3. Modelación del Flujo Base.....144
5.1.1.6.4. Tránsito de Caudales en Cauces.....145
5.1.2. Resultados del Procesamiento de Datos Hidrometeorológicos.....146
5.1.2.1. Selección y Caracterización de Estaciones Pluviométricas.....146
5.1.2.2. Análisis de Precipitaciones Máximas Diarias (24 Horas).....147
5.1.2.3. Análisis Estadístico y Ajuste de Distribuciones de Precipitación Máxima.....149

5.1.2.4. Evaluación de la Bondad de Ajuste de las Distribuciones Probabilísticas. 153
5.1.2.5. Determinación de Periodos de Retorno y Estimación de Precipitaciones Máximas de Diseño.....154
5.1.2.6. Estimación de Precipitaciones Máximas en 24 horas para distintos Periodos de Retorno. 155
5.1.2.7. Determinación de la Precipitación Media en la Cuenca y Subcuencas. 156
5.1.2.8. Construcción de Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). 158
5.1.2.8.1. Definición del Hietograma de Diseño (Perfil Temporal de Lluvia). 159
5.1.2.9. Tormenta de Diseño para Distintos Períodos de Retorno. 162
5.1.3. Resultados del Modelamiento Hidrológico mediante el Software HEC-HMS 170
5.1.3.1. Configuración del Modelo de Cuenca. 170
5.1.3.2. Configuración del Modelo Meteorológico. 174
5.1.3.3. Especificaciones de Control. 174
5.1.3.4. Resultados de la Simulación Hidrológica. 176
5.1.3.5. Caudales Máximos obtenidos en la Subcuenca 01. 183
5.1.4. Resultados del Modelamiento Hidráulico mediante el Software HEC-RAS ..185
5.1.4.1. Delimitación del Tramo de Estudio. 185
5.1.4.2. Información Base Utilizada. 187
5.1.4.3. Caracterización Topográfica. 187
5.1.4.4. Definición de Secciones Hidráulicas. 189
5.1.4.5. Coeficientes de Rugosidad de Manning. 190
5.1.4.6. Condiciones de Flujo Simuladas. 191
5.1.4.7. Resultados de la Simulación Hidráulica. 192
5.1.5. Propuesta del Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SAT-COM) 201
5.1.5.1. Descripción General de la Propuesta. 202
5.1.5.2. Componentes del SAT-COM. 203

5.1.5.3. Conocimiento del Riesgo. 203
5.1.5.3.1. Identificación del Peligro. 204
5.1.5.3.2. Análisis de Vulnerabilidad. 211
5.1.5.3.3. Estimación del Riesgo. 212
5.1.5.4. Monitoreo y Seguimiento. 214
5.1.5.5. Difusión y Comunicación de la Alerta. 226
5.1.5.5.1. Niveles de Alerta y Umbrales. 227
5.1.5.5.2. Difusión de la Alerta o Alarma 229
5.1.5.6. Capacidad de Respuesta. 231
5.1.5.7. Esquema Funcional del SAT-COM. 234
5.1.5.8. Mecanismos de Financiamiento del SAT-COM. 236
5.2. Análisis e Interpretación de los Resultados 239
5.2.1. Análisis del Comportamiento Hidrológico de la Cuenca 239
5.2.1.1. Caracterización morfométrica y fisiográfica de la cuenca 239
5.2.1.2. Delimitación de subcuencas y red de drenaje 241
5.2.1.3. Características morfométricas de las subcuencas 242
5.2.1.4. Características hidráulicas de los cauces principales 244
5.2.2. Evaluación de Parámetros del Modelo HEC-HMS 245
5.2.2.1. Análisis del Número de Curva (CN) de la cuenca de la Quebrada Totora. 245
5.2.2.2. Evaluación de las abstracciones iniciales y retención potencial máxima 247
5.2.2.3. Análisis de los tiempos de concentración de las subcuencas 247
5.2.2.4. Evaluación de los parámetros hidráulicos del método de Muskingum .249
5.2.3. Interpretación de la Información Hidrometeorológica 250
5.2.3.1. Análisis de las precipitaciones máximas registradas en estaciones pluviométricas 250
5.2.3.2. Interpretación del análisis de frecuencia de precipitaciones máximas .252

5.2.3.3. Evaluación de la distribución espacial de precipitación en las subcuencas 254
5.2.4. Interpretación del Modelamiento Hidrológico con HEC-HMS 255
5.2.4.1. Comportamiento general de los hidrogramas simulados 255
5.2.4.2. Análisis del escenario para período de retorno de 5 años 256
5.2.4.3. Análisis del escenario para período de retorno de 10 años 258
5.2.4.4. Análisis de los escenarios para períodos de retorno de 50 y 100 años259
5.2.4.5. Análisis de los escenarios extremos para períodos de retorno de 140 y 500 años 262
5.2.4.6. Interpretación integral de los resultados hidrológicos 264
5.2.5. Interpretación del Modelamiento Hidráulico con HEC-RAS....265
5.2.5.1. Evaluación general del comportamiento hidráulico 265
5.2.5.2. Interpretación de escenarios para períodos de retorno bajos (5 y 10 años) 267
5.2.5.3. Interpretación de escenarios intermedios (50 y 100 años)....267
5.2.5.4. Interpretación de escenarios extremos (140 y 500 años) 268
5.2.5.5. Implicancias para la gestión del riesgo de inundación 268
5.2.5.6. Interpretación integral del modelamiento hidráulico 269
5.2.6. Evaluación de la Propuesta del SAT-COM 269
5.2.6.1. Evaluación técnica de la propuesta 269
5.2.6.2. Evaluación del riesgo y relación funcional del SAT-COM 270
5.2.6.3. Evaluación del monitoreo hidrometeorológico y niveles de alerta 271
5.2.6.4. Evaluación del sistema de difusión y capacidad de respuesta comunitaria 274
5.2.6.5. Evaluación institucional y funcional de la propuesta 274
5.2.6.6. Interpretación integral de la propuesta SAT-COM 276
5.3. Contrastación de Hipótesis....277
5.4. Discusiones....278

VI. Conclusiones **289**

VII. Recomendaciones **292**

VIII. Referencias **294**

IX. Anexos **309**

Índice de Tablas

Tabla 1 *Distribución de zonas críticas por provincia y distrito en el departamento de Apurímac* 37

Tabla 2 *Caracterización del distrito de Oropesa como zona crítica por fenómenos de geodinámica externa* 39

Tabla 3 *Nivel de riesgo por inundaciones en el distrito de Oropesa* 40

Tabla 4 *Matriz de operacionalización de variables* 48

Tabla 5 *Clasificación de modelos hidrológicos* 61

Tabla 6 *Componentes del modelo de cuenca* 64

Tabla 7 *Componentes del modelo HEC-HMS* 65

Tabla 8 *Procesos hidrológicos en HEC-HMS* 68

Tabla 9 *Indicadores de desempeño del modelo* 69

Tabla 10 *Tipos de modelos hidráulicos* 71

Tabla 11 *Parámetros de la geometría del cauce* 75

Tabla 12 *Condiciones de frontera en HEC-RAS* 77

Tabla 13 *Valores referenciales del coeficiente de Manning* 79

Tabla 14 *Escenarios de simulación de inundaciones* 81

Tabla 15 *Importancia de los SAT en la gestión del riesgo* 87

Tabla 16 *Componentes del SAT* 88

Tabla 17 *Características del SAT-COM* 89

Tabla 18 *Rol del modelamiento en los SAT* 93

Tabla 19 *Clasificación de niveles de alerta hidrológica* 94

Tabla 20 *Instrumentos de recolección de datos* 106

Tabla 21 *Componentes del área de estudio* 116

Tabla 22 *Unidad hidrográfica principal* 116

Tabla 23 *Parámetros morfométricos de la cuenca de la Quebrada Totora* 129

Tabla 24 *Distribución altitudinal de la cuenca de la Quebrada Totora* 130

Tabla 25 *Parámetros fisiográficos de las subcuencas de la cuenca de la Quebrada Totora* 137
Tabla 26 *Características geométricas de los cauces principales* 138
Tabla 27 *Número de Curva (CN) de diseño de la cuenca de la Quebrada Totora*.....140
Tabla 28 *Retención potencial y abstracción inicial de la cuenca de la Quebrada Totora*142
Tabla 29 *Tiempo de concentración (Tc) de las subcuencas (minutos)*.....143
Tabla 30 *Tiempo de retraso (Lag Time) de las subcuencas (minutos)* 144
Tabla 31 *Parámetros del método de Muskingum para los cauces principales* 145
Tabla 32 *Ubicación y características de las estaciones pluviométricas utilizadas* 146
Tabla 33 *Serie histórica de precipitaciones máximas diarias (24 horas) por estación (mm)* 148
Tabla 34 *Distribución de probabilidad de mejor ajuste para precipitaciones máximas en 24 horas* 150
Tabla 35 *Resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para las distribuciones de probabilidad* 154
Tabla 36 *Precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retorno*.....155
Tabla 37 *Precipitación media en 24 horas para la cuenca de la Quebrada Totora según periodos de retorno (mm)* 157
Tabla 38 *Precipitación media en 24 horas para las subcuencas de la cuenca de la Quebrada Totora (mm)* 158
Tabla 39 *Coeficientes acumulados del hietograma tipo II del SCS para el periodo de retorno de 140 años*.....160
Tabla 40 *Precipitación máxima areal para diferentes duraciones y periodos de retorno (mm)*.....161
Tabla 41 *Intensidades de diseño para la cuenca de la Quebrada Totora según duración y periodo de retorno (mm/h)* 161
Tabla 42 *Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 5 años (mm)*.....163
Tabla 43 *Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 10 años (mm)*.....164

Tabla 44 *Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 50 años (mm)* 165
Tabla 45 *Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 100 años (mm)* 165
Tabla 46 *Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 140 años (mm)* 166
Tabla 47 *Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 500 años (mm)* 167
Tabla 48 *Caudales máximos y tiempo al pico para diferentes períodos de retorno en la cuenca de la quebrada Totora.* 183
Tabla 49 *Caudales máximos para diferentes períodos de retorno en la subcuenca SC-01.* 184
Tabla 50 *Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n) adoptados para el modelamiento hidráulico* 191
Tabla 51 *Caudales máximos para diferentes períodos de retorno bajo condiciones normales y de humedad* 193
Tabla 52 *Resultados de velocidad y tirante hidráulico en las secciones transversales 01, 07 y 12 para los diferentes períodos de retorno.* 201
Tabla 53 *Resultados de velocidad y tirante hidráulico en las secciones transversales 22, 28 y 33 para los diferentes períodos de retorno.* 201
Tabla 54 *Población expuesta y elementos vulnerables localizados en los sectores de Totora y Oropesa.* 206
Tabla 55 *Viviendas expuestas según material de construcción predominante.* 207
Tabla 56 *Infraestructura educativa ubicada en zonas de influencia del peligro.* 207
Tabla 57 *Infraestructura de servicios ubicada en zonas expuestas.* 208
Tabla 58 *Evaluación de la vulnerabilidad por dimensiones en el área de estudio* 211
Tabla 59 *Clasificación del nivel de riesgo según condiciones de peligro y vulnerabilidad* 213
Tabla 60 *Umbrales hidrometeorológicos y niveles operativos de alerta del SAT-COM para la quebrada Totora* 228
Tabla 61 *Niveles operativos de alerta y acciones de respuesta ante inundaciones en la quebrada Totora* 229

Tabla 62 *Recursos para respuesta ante emergencias* 233
Tabla 63 *Parámetros morfológicos y fisiográficos de la cuenca de la Quebrada Totora*.239
Tabla 64 *Características morfométricas de las subcuencas de la cuenca de la Quebrada Totora* 242
Tabla 65 *Características hidráulicas de los cauces principales de la cuenca de la Quebrada Totora* 244
Tabla 66 *Áreas parciales y Número de Curva (CN) de la cuenca de la Quebrada Totora* 246
Tabla 67 *Abstracciones iniciales (Ia) y retención potencial máxima (S) de la cuenca de la Quebrada Totora* 247
Tabla 68 *Tiempos de concentración (Tc) de las subcuencas de la cuenca de la Quebrada Totora* 248
Tabla 69 *Parámetros de tránsito hidrológico mediante el método Muskingum* 249
Tabla 70 *Precipitación máxima de 24 horas (mm) para el periodo 1990-2025* 250
Tabla 71 *Precipitaciones máximas estimadas para diferentes periodos de retorno* 252
Tabla 72 *Precipitación máxima media en 24 horas para las subcuencas de la cuenca de la Quebrada Totora según períodos de retorno* 254
Tabla 73 *Resultados del modelamiento hidráulico para diferentes períodos de retorno*.265
Tabla 74 *Relación entre escenarios hidráulicos y niveles operativos de alerta del SAT-COM* 273
Tabla 75 *Evaluación integral de la propuesta del SAT-COM para la quebrada Totora*...275

Índice de Figuras

Figura 1 *Esquema del modelo HEC-HMS*.....62

Figura 2 *Estructura del modelo HEC-HMS*.....63

Figura 3 *Procesos hidrológicos en HEC-HMS* 66

Figura 4 *Régimen de flujo en cauces*.....73

Figura 5 *Esquema general del modelamiento en HEC-RAS* 74

Figura 6 *Sección transversal del cauce* 76

Figura 7 *Delimitación de zonas inundables*.....82

Figura 8 *Relación entre peligro, vulnerabilidad y riesgo* 85

Figura 9 *Componentes del SAT-COM* 90

Figura 10 *Integración del modelamiento hidrológico e hidráulico en un SAT* 92

Figura 11 *Relación entre caudal y niveles de alerta*.....94

Figura 12 *Modelo Digital de Elevación (DEM) del área de estudio*.....117

Figura 13 *Configuración del software HEC-HMS v.4.13*.....118

Figura 14 *Modelo digital de elevación de la cuenca de la Quebrada Totora* 119

Figura 15 *Ráster de sumideros identificados en el DEM procesado* 120

Figura 16 *Dirección de flujo en la cuenca de la Quebrada Totora*.....121

Figura 17 *Acumulación de flujo en la cuenca de la Quebrada Totora* 122

Figura 18 *Red de drenaje de la cuenca de la Quebrada Totora*.....123

Figura 19 *Ubicación del punto de salida (aforo) de la cuenca de la Quebrada Totora*....124

Figura 20 *Modelo hidrológico de la cuenca de la Quebrada Totora en HEC-HMS* 125

Figura 21 *Áreas parciales para la obtención de los parámetros de relieve*.....132

Figura 22 *Curva hipsométrica de la cuenca de la Quebrada Totora*.....132

Figura 23 *Polígono de frecuencias altitudinales de la cuenca de la Quebrada Totora*....133

Figura 24 *Modelo hidrológico de la cuenca de la Quebrada Totora en HEC-HMS* 135

Figura 25 *Delimitación de subcuencas en la cuenca de la Quebrada Totora* 136

Figura 26 *Distribución espacial del Número de Curva (CN) en la cuenca de la Quebrada Totora* 141
Figura 27 *Ubicación espacial de las estaciones pluviométricas utilizadas en* el análisis 147
Figura 28 *Ajuste de distribución de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 h - Estación Chilcayoc* 151
Figura 29 *Ajuste de distribución de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 h - Estación Cotahuasi*.....151
Figura 30 *Ajuste de distribución de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 h - Estación Curahuasi*.....152
Figura 31 *Ajuste de distribución de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 h - Estación Paruro* 152
Figura 32 *Ajuste de distribución de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 h - Estación Puquio*.....153
Figura 33 *Mapa de isoyetas de precipitación máxima para un periodo de retorno de 140 años*.....157
Figura 34 *Hietograma tipo II del SCS utilizado para la distribución temporal de la lluvia* 159
Figura 35 *Curvas IDF para intensidades máximas de 24 horas de la cuenca de la Quebrada Totora* 162
Figura 36 *Curva IDF para un período de retorno de 5 años en la subcuenca SC-01* 168
Figura 37 *Hietograma de precipitación de diseño para un período de retorno de 5 años en la subcuenca SC-01* 169
Figura 38 *Curva IDF para un período de retorno de 10 años en la subcuenca SC-01* ...169
Figura 39 *Hietograma de precipitación de diseño para un período de retorno de 10 años en la subcuenca SC-01*.....170
Figura 40 *Modelo hidrológico de la cuenca de la Quebrada Totora implementado en HEC-HMS* 172
Figura 41 *Hietograma de precipitación de diseño utilizado en el modelo HEC-HMS*.....174
Figura 42 *Especificaciones de control del modelo hidrológico en HEC-HMS* 175

Figura 43 *Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 5 años.*.....177
Figura 44 *Caudal pico para un período de retorno de 5 años.* 177
Figura 45 *Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 10 años.*....178
Figura 46 *Caudal pico para un período de retorno de 10 años.* 178
Figura 47 *Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 50 años.*....179
Figura 48 *Caudal pico para un período de retorno de 50 años.* 179
Figura 49 *Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 100 años.*..180
Figura 50 *Caudal pico para un período de retorno de 100 años.* 180
Figura 51 *Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 140 años.*..181
Figura 52 *Caudal pico para un período de retorno de 140 años.* 181
Figura 53 *Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 500 años.*..182
Figura 54 *Caudal pico para un período de retorno de 500 años.* 182
Figura 55 *Hidrograma unitario triangular del SCS para la subcuenca SC-01.* 184
Figura 56 *Hidrograma unitario adimensional del SCS para la subcuenca SC-01.* 185
Figura 57 *Ubicación del tramo de estudio en los sectores Totora y Oropesa* 186
Figura 58 *Modelo digital de elevación (DEM) del área de estudio obtenido a partir del levantamiento fotogramétrico.*.....188
Figura 59 *Superficie topográfica del tramo de estudio utilizada en el modelamiento hidráulico* 189
Figura 60 *Secciones transversales del tramo de estudio en HEC-RAS* 190
Figura 61 *Condiciones hidráulicas de entrada en HEC-RAS (Steady Flow Data)* 194
Figura 62 *Distribución de velocidad del flujo para Tr = 5 años* 194
Figura 63 *Distribución de velocidad del flujo para Tr = 10 años* 195
Figura 64 *Distribución de velocidad del flujo para Tr = 50 años* 195
Figura 65 *Distribución de velocidad del flujo para Tr = 100 años* 196
Figura 66 *Distribución de velocidad del flujo para Tr = 140 años* 196
Figura 67 *Distribución de velocidad del flujo para Tr = 500 años* 197
Figura 68 *Distribución de profundidad del flujo para Tr = 5 años* 197

Figura 69 *Distribución de profundidad del flujo para Tr = 10 años* 198

Figura 70 *Distribución de profundidad del flujo para Tr = 50 años* 198

Figura 71 *Distribución de profundidad del flujo para Tr = 100 años* 199

Figura 72 *Distribución de profundidad del flujo para Tr = 140 años* 199

Figura 73 *Distribución de profundidad del flujo para Tr = 500 años* 200

Figura 74 *Mapa comunitario de riesgo por inundación en los sectores Totora y Oropesa.* 210

Figura 75 *Matriz de peligro y vulnerabilidad de los sectores Totora y Oropesa*.....214

Figura 76 *Estación meteorológica Huacullo operada por el SENAMHI* 215

Figura 77 *Estructura del Sistema de Observación de Inundaciones Potenciales (SONICS)* 217

Figura 78 *Estado hidrológico actual del sistema SONICS para el área de estudio*.....218

Figura 79 *Pronóstico hidrológico del sistema SONICS para el área de estudio* 219

Figura 80 *Tramo fluvial en evaluación identificado con COMID 9081006 en el sistema SONICS*.....220

Figura 81 *Comparación entre el estado hidrológico actual y el pronóstico a 7 días para el COMID 9081006*.....221

Figura 82 *Propuesta de implementación del Centro de Operaciones de Emergencia Local (COEL)* 225

Figura 83 *Medios de difusión de la alerta o alarma en el SAT-COM*.....230

Figura 84 *Diagrama funcional del SAT-COM para la quebrada Totora* 235

Figura 85 *Esquema de los mecanismos de financiamiento del SAT-COM*.....238

Figura 86 *Delimitación de subcuencas y red de drenaje de la cuenca de la Quebrada Totora* 241

Figura 87 *Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 5 años* 256

Figura 88 *Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 5 años*.....257

Figura 89 *Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 10 años*.....258

Figura 90 *Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 10 años*.....258

Figura 91 *Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 50 años*.....259
Figura 92 *Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 50 años*.....260
Figura 93 *Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 100 años*.....260
Figura 94 *Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 100 años*.....261
Figura 95 *Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 140 años*.....262
Figura 96 *Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 140 años*.....262
Figura 97 *Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 500 años*.....263
Figura 98 *Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 500 años*.....263
Figura 99 *Modelamiento hidráulico de la cuenca de la Quebrada Totora para distintos períodos de retorno* 266
Figura 100 *Modelamiento hidráulico de la cuenca de la Quebrada Totora mediante el visor RAS 3D Viewer de HEC-RAS* 266
Figura 101 *Relación entre el comportamiento hidrológico de la cuenca y la activación del SAT-COM propuesto.* 271

Índice de Anexos

Anexo 1. Matriz de consistencia 309

Anexo 2. Solicitud de información meteorológica al SENAMHI 309

Anexo 3. Datos meteorológicos proporcionados por el SENAMHI 309

Anexo 4. Carta de autorización de la Municipalidad Distrital de Oropesa.....309

Anexo 5. Panel fotográfico del levantamiento de información del área de estudio 309

Anexo 6. Plataformas web utilizadas 309

Anexo 7. Software utilizado.....309

Anexo 8. Información complementaria - Modelado hidrológico 309

Anexo 9. Información complementaria - Modelado hidráulico 309

Anexo 10. Planos - Modelado hidrológico 309

Anexo 11. Planos - Modelado hidráulico 309

Anexo 12. Planos - Componentes del SAT-COM.....309

Anexo 13. Planos - Propuesta del SAT-COM 309

Lista de Abreviaturas

ANA	:	Autoridad Nacional del Agua
ArcGIS	:	Sistema de Información Geográfica de Esri
ArcGIS Desktop	:	Plataforma de escritorio ArcGIS
ArcGIS Pro	:	Plataforma avanzada de SIG de escritorio
ArcMap	:	Aplicación de cartografía de ArcGIS Desktop
ARNOVIC+RAPID	:	*Automated Rating Curve and River Analysis Package for Inundation Detection* (Paquete automatizado para análisis hidrológico e identificación de inundaciones)
ASF	:	*Alaska Satellite Facility* (Instalación Satelital de Alaska)
AutoCAD Civil 3D	:	Software de diseño y modelado para ingeniería civil
CENEPRED	:	Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres
CEPLAN	:	Centro Nacional de Planeamiento Estratégico
CGBVP	:	Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú
CN	:	*Curve Number* (Número de Curva)
COEL	:	Centro de Operaciones de Emergencia Local
COMID	:	*Catchment and Ocean Reach Flowline Information Dataset* (Base de datos de información de cauces y drenajes)
DEM	:	*Digital Elevation Model* (Modelo Digital de Elevación)
D.S.	:	Decreto Supremo
ENFEN	:	Estudio Nacional del Fenómeno El Niño
FLO-2D	:	*Flood Routing Model in Two Dimensions* (Modelo bidimensional de flujo e inundación)
FONDES	:	Fondo para Intervenciones ante la Ocurrencia de Desastres Naturales
GFS	:	*Global Forecast System* (Sistema Global de Pronóstico)
GNSS	:	*Global Navigation Satellite System* (Sistema Global de Navegación por Satélite)
HEC-HMS	:	*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (Software Centro de Ingeniería Hidrológica - Sistema de Modelado Hidrológico)
HEC-RAS	:	*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System* (Software Centro de Ingeniería Hidrológica - Sistema de Análisis Fluvial)
IBER	:	Modelo numérico bidimensional para simulación hidráulica
IDF	:	Intensidad - Duración - Frecuencia
INDECI	:	Instituto Nacional de Defensa Civil
INEI	:	Instituto Nacional de Estadística e Informática
INGEMMET	:	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico
Invierte.pe	:	Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones

IPCC	:	*Intergovernmental Panel on Climate Change* (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático)
MDT	:	Modelo Digital del Terreno
MIDAGRI	:	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego
MINAM	:	Ministerio del Ambiente
MINEDU	:	Ministerio de Educación
MTC	:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
NASA	:	*National Aeronautics and Space Administration* (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio)
NRCS	:	*Natural Resources Conservation Service* (Servicio de Conservación de Recursos Naturales)
NSE	:	*Nash-Sutcliffe Efficiency* (Eficiencia de Nash-Sutcliffe)
OMM	:	Organización Meteorológica Mundial
ONG	:	Organización No Gubernamental
ONU	:	Organización de las Naciones Unidas
ONU-Hábitat	:	Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos
PCM	:	Presidencia del Consejo de Ministros
PISCO	:	*Peruvian Interpolated Data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations* (Datos interpolados de observaciones climatológicas e hidrológicas del SENAMHI)
PLANAGERD	:	Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres
PNP	:	Policía Nacional del Perú
PNGRD	:	Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres al 2050
PNUD	:	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
POE	:	Plan de Operaciones de Emergencia
QGIS	:	*Quantum Geographic Information System* (Sistema de Información Geográfica Quantum)
RAPID	:	*Routing Application for Parallel computatIon of Discharge* (Aplicación para el cálculo paralelo de caudales)
RMSE	:	*Root Mean Square Error* (Raíz del Error Cuadrático Medio)
RNAT	:	Red Nacional de Alerta Temprana
R.M.	:	Resolución Ministerial
SAT	:	Sistema de Alerta Temprana
SAT-COM	:	Sistema de Alerta Temprana Comunitario
SCS	:	*Soil Conservation Service* (Servicio de Conservación de Suelos)
SCS-CN	:	*Soil Conservation Service - Curve Number* (Método del Número de Curva del SCS)
SENAMHI	:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SIG	:	Sistema de Información Geográfica
SINAGERD	:	Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres

SONICS	:	Sistema de Observación de Inundaciones Potenciales del SENAMHI
SOUTH	:	*Strengthening Opportunities for Unified Territorial Hydrology* (Fortalecimiento de oportunidades para la gestión hidrológica territorial)
UNDRR	:	*United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres)
UNSDG	:	*United Nations Sustainable Development Group* (Grupo de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas)
USACE	:	*United States Army Corps of Engineers* (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos)
USDA-SCS	:	*United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service* (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - Servicio de Conservación de Suelos)
USGS	:	*United States Geological Survey* (Servicio Geológico de los Estados Unidos)
UTM	:	*Universal Transverse Mercator* (Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator)
VHF	:	*Very High Frequency* (Frecuencia Muy Alta)
WMO	:	*World Meteorological Organization* (Organización Meteorológica Mundial)

I. Introducción

Las inundaciones representan uno de los peligros naturales con mayor impacto sobre la población debido a la interacción entre factores hidrometeorológicos, geomorfológicos y condiciones de vulnerabilidad presentes en el territorio. Estos eventos pueden ocasionar pérdidas humanas, daños en infraestructura y afectación de actividades económicas, principalmente en zonas próximas a cauces naturales. En los últimos años, el incremento de eventos hidrometeorológicos extremos asociados a la variabilidad climática ha evidenciado la necesidad de fortalecer el conocimiento del riesgo, monitoreo y preparación frente a escenarios de inundación (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [IPCC], 2021; Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2023).

En las cuencas andinas, las pendientes pronunciadas, la ocurrencia de precipitaciones intensas y las condiciones limitadas para gestionar eventos extremos favorecen la formación de avenidas con elevados caudales, capaces de ocasionar erosión, desbordamientos y daños en áreas próximas a los cauces. Bajo este contexto, la quebrada Totora, ubicada en el distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, región Apurímac, presenta condiciones que pueden favorecer la ocurrencia de incrementos súbitos del flujo durante periodos de lluvia intensa, superando la capacidad de conducción del cauce y afectando potencialmente a los sectores Totora y Oropesa. Además, la limitada disponibilidad de información técnica relacionada con la respuesta hidrológica y el comportamiento hidráulico de la quebrada dificulta la planificación de medidas preventivas y la implementación de mecanismos de alerta ante escenarios de inundación.

Ante esta situación, el modelamiento hidrológico e hidráulico constituye una herramienta técnica que permite analizar el comportamiento de una cuenca a partir de la relación entre la precipitación, la generación de escorrentía y la propagación del flujo dentro del cauce. Mediante la simulación de diferentes escenarios asociados a periodos de retorno, es posible estimar caudales máximos, identificar áreas expuestas y establecer criterios técnicos orientados a la reducción del riesgo.

En ese sentido, la presente investigación planteó desarrollar el modelamiento hidrológico e hidráulico para proponer un Sistema de Alerta Temprana (SAT) ante inundaciones por desbordamiento de la quebrada Totora. Para alcanzar este propósito, se determinaron las características morfométricas e hidrológicas de la cuenca, se estimaron los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno mediante el software HEC-HMS, se evaluó el comportamiento del flujo con HEC-RAS y se delimitaron las áreas susceptibles a inundación en los sectores Totora y Oropesa. A partir de estos resultados, se establecieron parámetros técnicos para la propuesta de un Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SAT-COM) orientado al monitoreo hidrometeorológico, la comunicación oportuna de alertas y el fortalecimiento de la capacidad de respuesta comunitaria.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada, con un nivel descriptivo-explicativo y un diseño no experimental, transversal y propositivo. Para ello, se utilizaron registros hidrometeorológicos, información cartográfica, datos topográficos y herramientas de Sistemas de Información Geográfica, complementados con modelos computacionales de simulación hidrológica e hidráulica. La aplicación de estas metodologías permitió generar escenarios de avenida, determinar condiciones críticas de inundación y establecer una base técnica para fortalecer la gestión preventiva del riesgo.

Finalmente, la investigación se encuentra estructurada en nueve capítulos. El Capítulo I presenta la introducción general de la investigación. El Capítulo II desarrolla el planteamiento del problema, objetivos, justificación, hipótesis y variables de estudio. El Capítulo III comprende los antecedentes, fundamentos teóricos y conceptos relacionados con la investigación. El Capítulo IV describe la metodología aplicada, incluyendo el diseño, población, muestra, técnicas e instrumentos utilizados. El Capítulo V presenta los resultados obtenidos, el análisis correspondiente, la contrastación de hipótesis y la discusión. Finalmente, los capítulos VI y VII contienen las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio, mientras que los capítulos VIII y IX incluyen las referencias bibliográficas y anexos.

II. Planteamiento del Problema

2.1. Descripción y Formulación del Problema

En el ámbito internacional, las inundaciones se han consolidado como uno de los desastres naturales de mayor recurrencia e impacto, estrechamente vinculados al cambio climático y a la variabilidad climática. En las últimas décadas, estos eventos han incrementado tanto en frecuencia como en intensidad, afectando de manera significativa a poblaciones vulnerables y generando impactos relevantes en los sistemas sociales, económicos y ambientales (OMM, 2023).

Desde una perspectiva científica, esta problemática se explica por la alteración del ciclo hidrológico como consecuencia del incremento sostenido de la temperatura global. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) señala que este proceso favorece la ocurrencia de precipitaciones más intensas y eventos extremos más frecuentes, lo que incrementa el riesgo de inundaciones en diversas regiones del mundo (IPCC, 2021; IPCC, 2022). A ello se suman factores de origen antrópico, como la expansión urbana no planificada, la deforestación y la ocupación de zonas naturalmente inundables, los cuales amplifican la exposición al riesgo.

En el ámbito global, diversos organismos internacionales advierten que el agua se ha convertido en un elemento central en la generación de desastres, siendo las inundaciones, tormentas y sequías los eventos más recurrentes, particularmente en entornos urbanos con alta densidad poblacional y limitada planificación territorial (Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos [ONU-Hábitat], 2021). Esta situación incrementa la presión sobre la infraestructura y los servicios básicos, elevando los niveles de vulnerabilidad.

De manera complementaria, proyecciones recientes del Grupo de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible (UNSDG) indican una alta probabilidad de que los próximos años registren temperaturas récord, lo que intensificará la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, incluyendo lluvias intensas e inundaciones (UNSDG, 2023). En este escenario, regiones como América Latina han sido identificadas como altamente

vulnerables debido a la convergencia de factores climáticos, sociales y económicos que agravan los impactos del cambio climático (UNSDG, 2021).

La evidencia empírica respalda esta tendencia. Eventos recientes, como las inundaciones registradas en México en 2025, evidencian la magnitud del problema y la necesidad de fortalecer las estrategias de prevención y adaptación (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2025). En conjunto, los desastres asociados al agua continúan generando pérdidas humanas, económicas y ambientales a escala global, consolidándose como un desafío prioritario en la gestión del riesgo (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2026).

En consecuencia, la problemática de las inundaciones a nivel internacional no se limita a la ocurrencia de fenómenos extremos, sino que refleja una brecha persistente entre el conocimiento científico disponible y su aplicación efectiva en la planificación territorial, las políticas públicas y los SAT, lo que mantiene elevados niveles de vulnerabilidad en diversas regiones del mundo.

En el contexto nacional, el Perú se caracteriza por su amplia diversidad climática, al albergar 28 de los 32 tipos de clima existentes en el mundo. Esta condición, junto con su compleja geomorfología, su ubicación en el borde suroriental del océano Pacífico y su pertenencia al Cinturón de Fuego del Pacífico, configura un territorio de gran riqueza natural, étnica y cultural. Sin embargo, estas mismas características también lo convierten en un país altamente vulnerable frente a diversos peligros naturales, lo que ha llevado a su población a convivir históricamente con múltiples escenarios de riesgo (Presidencia del Consejo de Ministros [PCM], 2021).

En este contexto, las inundaciones constituyen una de las principales manifestaciones del riesgo de desastres de origen hidrometeorológico, debido a su frecuencia, intensidad y efectos acumulativos sobre la población, la infraestructura y los medios de vida. Esta problemática se encuentra estrechamente vinculada a la variabilidad climática y a las características hidrológicas del territorio, donde las cuencas presentan

comportamientos diferenciados frente a eventos de precipitación intensa, incrementando la probabilidad de desbordes y afectaciones (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2021).

Desde el enfoque técnico, el modelamiento hidrológico desarrollado a nivel nacional evidencia que numerosas cuencas, particularmente aquellas de menor escala, presentan respuestas rápidas ante lluvias intensas, generando incrementos súbitos de caudal que pueden desencadenar inundaciones en cortos periodos de tiempo (SENAMHI, 2021). No obstante, la precisión de estas herramientas se ve limitada cuando no se dispone de información detallada a nivel local, lo que dificulta la adecuada representación de los procesos hidrológicos en microcuencas y afecta la estimación de eventos extremos.

A nivel histórico, el inventario nacional de inundaciones confirma que estos eventos son recurrentes en diversas regiones del país, particularmente en territorios con condiciones de vulnerabilidad física y social (SENAMHI, 2022). Esta recurrencia evidencia una problemática estructural asociada tanto a patrones climáticos como a deficiencias en la planificación territorial.

Desde una perspectiva prospectiva, el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2023a), ha desarrollado escenarios que identifican amplias zonas del país con niveles de riesgo alto y muy alto frente a inundaciones y movimientos en masa, especialmente durante eventos asociados al fenómeno El Niño. Estos resultados ponen de manifiesto que el riesgo no depende exclusivamente de la amenaza climática, sino de la exposición de la población y de las condiciones de ocupación del territorio.

De manera complementaria, las proyecciones del Plan Multisectorial 2025-2027 advierten que las lluvias intensas continuarán generando inundaciones en distintas regiones del país, lo que evidencia la persistencia del riesgo en el tiempo (CENEPRED, 2024). Esta tendencia se refuerza en los escenarios de lluvias para el periodo diciembre 2025 - febrero 2026, donde se advierte la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en zonas con antecedentes históricos de inundación (CENEPRED, 2025).

En el plano normativo, el Estado peruano, mediante el Decreto Supremo N.° 038-2021-PCM, artículo 1, aprueba la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PNGRD) al 2050, la cual reconoce que el país presenta una alta exposición a peligros naturales y plantea la necesidad de fortalecer la gestión prospectiva y correctiva del riesgo basada en el uso de información científica y técnica, así como el fortalecimiento de mecanismos de prevención, incluyendo los SAT (PCM, 2021). Sin embargo, a pesar de este marco normativo, persisten limitaciones en su implementación a nivel territorial.

En esa misma línea, el Decreto Supremo N.° 115-2022-PCM aprueba el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PLANAGERD) 2022-2030, señala que uno de los principales desafíos del país es la limitada incorporación de información técnica en los procesos de toma de decisiones, lo que restringe la reducción efectiva del riesgo (PCM, 2022). Esta situación evidencia una desconexión entre la generación de conocimiento y su aplicación práctica en la gestión del territorio.

Desde el enfoque operativo, el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI, 2025), a través del Compendio Estadístico “Gestión Reactiva 2025”, evidencia que las inundaciones continúan siendo uno de los eventos más frecuentes atendidos en el país, generando impactos recurrentes en viviendas, infraestructura y actividades económicas. Este documento pone en evidencia que la gestión del riesgo en el Perú mantiene un enfoque predominantemente reactivo.

Por su parte, el Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN, 2024), en el Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres 2024-2026, señala que la gestión del riesgo de desastres debe integrarse de manera transversal en la planificación del desarrollo; sin embargo, reconoce la existencia de limitaciones en la articulación institucional y en la implementación de estrategias preventivas, lo que reduce la eficacia de la gestión del riesgo a nivel nacional.

En síntesis, la problemática a nivel nacional no radica en la ausencia de información técnica o normativa, sino en su limitada aplicación, particularmente en el uso de

herramientas como el modelado hidrológico e hidráulico y los SAT, lo que mantiene elevados niveles de vulnerabilidad frente a eventos extremos.

Desde una perspectiva regional, Apurímac presenta una problemática compleja asociada a la ocurrencia recurrente de inundaciones y movimientos en masa, originada por la interacción de factores geológicos, geomorfológicos e hidrometeorológicos característicos del sur del Perú. Estas condiciones configuran un territorio altamente susceptible a eventos extremos, especialmente durante periodos de lluvias intensas. En ese sentido, Luque et al. (2023) en el estudio del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) identificaron múltiples zonas críticas expuestas a peligros geológicos, tales como deslizamientos, huaicos e inundaciones, donde coinciden condiciones de amenaza con elementos vulnerables como población e infraestructura. Estas áreas corresponden a espacios donde las características del terreno, sumadas a factores climáticos, favorecen la ocurrencia de procesos de geodinámica externa.

Asimismo, se reconoce que las precipitaciones intensas constituyen el principal factor detonante de estos procesos, al generar inestabilidad en laderas, incrementar la escorrentía superficial y acelerar la concentración de flujos en cauces naturales. Esta dinámica contribuye al aumento súbito de caudales en ríos y quebradas, lo que incrementa la probabilidad de desbordamientos e inundaciones en cortos periodos de tiempo (Luque et al., 2023). De este modo, las inundaciones en la región no deben analizarse de forma aislada, sino como parte de un sistema multiamenaza donde interactúan procesos hidrológicos y geológicos.

De manera complementaria, la información disponible en la plataforma de zonas críticas del INGEMMET (s. f.) confirma la existencia de numerosos puntos vulnerables distribuidos en la región Apurímac, los cuales presentan condiciones favorables para la ocurrencia de eventos peligrosos durante la temporada de lluvias, evidenciando una exposición territorial significativa. En la Tabla 1 se presenta la distribución de las zonas

críticas por provincia y distrito en el departamento de Apurímac, asociadas a peligros geológicos y geohidrológicos.

Tabla 1

Distribución de zonas críticas por provincia y distrito en el departamento de Apurímac

Provincia	Distrito	Sector	Cantidad	Total de zonas
Antabamba	Oropesa	Totora y Oropesa	1	2
	Huaquirca	-	1	
Abancay	-			5
Andahuaylas	-			5
Aymaraes	-			11
Chincheros	-			6
Cotabambas	-			3
Grau	-			8
			Total	**40**

Nota. Adaptado de *"Zonas críticas por peligros geológicos en la zona sur del Perú"* (pp. 9-10), por Luque et al. (2023).

Desde el enfoque prospectivo, el CENEPRED (2023b), en el análisis del escenario de riesgo por inundaciones de la cuenca Alto Apurímac, identifica sectores con niveles de riesgo alto y muy alto, producto de la combinación de precipitaciones intensas, pendientes pronunciadas y características geomorfológicas que favorecen la rápida concentración de escorrentía. Este comportamiento hidrológico evidencia que las cuencas de la región presentan respuestas rápidas ante eventos de lluvia, lo que incrementa significativamente la probabilidad de desbordamientos.

Desde una perspectiva territorial, el Gobierno Regional de Apurímac (GORE Apurímac, 2023) elaboró el Plan Regional de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres de Apurímac 2023-2027, en el que señala que uno de los principales problemas es la alta exposición de la población asentada en zonas de riesgo, especialmente en áreas cercanas a ríos y quebradas, donde se desarrollan viviendas y actividades económicas sin criterios adecuados de ordenamiento territorial. Esta ocupación inadecuada del territorio incrementa considerablemente la vulnerabilidad frente a eventos hidrometeorológicos

extremos. Adicionalmente, de acuerdo con el análisis de los registros de emergencias asociados a peligros a nivel nacional, la región Apurímac se posiciona en el primer lugar en cuanto a ocurrencia de eventos adversos, lo que evidencia la alta recurrencia e intensidad de los fenómenos que afectan al territorio. A ello se suma una limitación crítica: la escasa disponibilidad y aplicación de estudios hidrológicos e hidráulicos a escala local, lo que dificulta la delimitación precisa de áreas inundables y restringe la implementación de medidas preventivas (GORE Apurímac, 2023).

En consecuencia, la problemática regional no se explica únicamente por la ocurrencia de fenómenos naturales, sino por la interacción de tres factores fundamentales: alta peligrosidad natural, elevada exposición de la población y limitada capacidad técnica para la gestión del riesgo. Esta combinación configura un escenario de vulnerabilidad estructural que incrementa la probabilidad de daños ante eventos de inundación.

En el entorno local, en el distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, la problemática de inundaciones presenta un carácter recurrente y estructural, resultado de la interacción entre condiciones naturales del territorio y limitaciones en la gestión del riesgo, lo que configura un escenario de alta vulnerabilidad frente a lluvias intensas.

La Municipalidad Provincial de Antabamba (2022) elaboró el instrumento técnico Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres de la provincia de Antabamba 2022-2026, precisa que el territorio presenta una elevada susceptibilidad a inundaciones y movimientos en masa, debido a factores como pendientes pronunciadas, características geomorfológicas complejas y un régimen pluviométrico estacional intenso. A ello se suma la ocupación progresiva de áreas cercanas a cauces naturales, lo que incrementa significativamente la exposición de la población frente a desbordes.

A nivel más específico, el estudio de Identificación de sectores críticos en la zona urbana de Totora-Oropesa, realizado por el GORE Apurímac (2015), evidencia la existencia de múltiples áreas altamente vulnerables ubicadas en proximidad a quebradas y cursos de agua, donde predominan riesgo asociadas a desbordamientos, procesos de

erosión y acumulación de sedimentos. Estas condiciones responden a factores geomorfológicos, como las pendientes del terreno, y a factores desencadenantes de carácter meteorológico, principalmente las lluvias intensas, que incrementan la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos. Asimismo, esta situación refleja un patrón de ocupación del territorio sin criterios técnicos adecuados, lo que incrementa significativamente la exposición de la población. En este sentido, el estudio resalta la necesidad de fortalecer la planificación territorial como medida clave para reducir la vulnerabilidad frente a eventos naturales.

En este contexto el GORE Apurímac (2023), a través del Plan regional de prevención y reducción del riesgo de desastres de la región de Apurímac 2023-2027, presenta información técnica que permite identificar de manera específica las condiciones de peligro y riesgo en el ámbito de estudio. En la Tabla 2 se muestra la caracterización del distrito de Oropesa como zona crítica originada por fenómenos de geodinámica externa.

Tabla 2

Caracterización del distrito de Oropesa como zona crítica por fenómenos de geodinámica externa

Ubicación		Antecedentes / (Elementos expuestos)	Tipo de peligro
Distrito	**Ámbito referencial**		
Oropesa	Totora y Oropesa	Terrenos de cultivo, viviendas y puentes del centro poblado Oropesa	Inundación, erosión fluvial

Nota. Adaptado de *"Plan Regional de prevención y reducción del riesgo de desastres de la región de Apurímac 2023-2027"* (pp. 91-92), por GORE Apurímac (2023).

De manera complementaria, en la Tabla 3 se presenta el nivel de riesgo por exposición y por ocurrencia de emergencias en el distrito de Oropesa, evidenciándose una clasificación predominantemente muy alta.

Tabla 3

Nivel de riesgo por inundaciones en el distrito de Oropesa

Provincia	Distrito	Nivel de riesgo por exposición			Nivel de riesgo según N.º de emergencias	Nivel de riesgo
		Población y vivienda	Establecimientos de salud	Instituciones Educativas		
Antabamba	Oropesa	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Muy alto

Nota. Adaptado de *"Plan Regional de prevención y reducción del riesgo de desastres de la región de Apurímac 2023-2027"* (pp. 125-126), por GORE Apurímac (2023).

La problemática descrita no es únicamente potencial, sino que se manifiesta de manera concreta y reiterada. Según reportes oficiales del INDECI (2024a), durante enero de 2024 se registró un evento de inundación por desborde de río en el distrito de Oropesa, generado por lluvias intensas que ocasionaron el incremento del caudal y afectaciones a viviendas e infraestructura vial. Informes complementarios del mismo periodo evidencian la continuidad de las precipitaciones y la persistencia del riesgo en la zona (INDECI, 2024b; INDECI, 2024c).

Esta situación se repite en el año 2026, donde se reportan nuevamente eventos de inundación asociados al desbordamiento de ríos. En enero de dicho año, el COEN-INDECI informa afectaciones a viviendas e infraestructura debido al incremento de caudales producto de precipitaciones intensas (INDECI, 2026a). Posteriormente, en marzo, nuevos reportes confirman la continuidad del evento y la persistencia de condiciones de riesgo activo en el territorio (INDECI, 2026b; INDECI, 2026c).

La magnitud de esta problemática se evidencia en la declaratoria de Estado de Emergencia mediante el D.S. N.° 003-2026-PCM, emitido ante el peligro inminente generado por precipitaciones intensas, medida que incluyó al distrito de Oropesa. Dicha condición fue posteriormente prorrogada mediante el D.S. N.° 032-2026-PCM, lo que confirma la persistencia y gravedad del riesgo en el tiempo (PCM, 2026a; PCM, 2026b).

Desde el enfoque climático, los reportes de la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) advierten que las condiciones

oceánico-atmosféricas del periodo diciembre 2025 - marzo 2026 favorecen la ocurrencia de lluvias intensas, incrementando la probabilidad de eventos extremos en zonas vulnerables (ENFEN, 2025a; ENFEN, 2025b). Esta situación es consistente con los avisos de corto plazo emitidos por el INDECI (2026d), los cuales alertan sobre precipitaciones intensas con potencial de seguir generando emergencias por inundaciones, evidenciando la continuidad del riesgo.

En conjunto, el análisis evidencia que la problemática de inundaciones en los sectores Totora y Oropesa no responde únicamente a la ocurrencia de lluvias intensas, sino a la convergencia de factores naturales, territoriales y técnicos que configuran un riesgo persistente en el tiempo. A pesar de contar con diagnósticos técnicos, reportes de emergencia y declaratorias oficiales, persiste una brecha significativa entre la identificación del riesgo y la implementación de medidas efectivas de prevención y reducción.

En ese sentido, la limitada aplicación de herramientas técnicas, como el modelado hidrológico e hidráulico, así como la insuficiente implementación de los SAT, restringe la capacidad de anticipación y respuesta frente a eventos de desbordamiento en la quebrada Totora. Esta situación evidencia la falta de información detallada sobre los parámetros hidrológicos y morfológicos de la cuenca, el comportamiento de los caudales máximos para distintos periodos de retorno y la delimitación precisa de las áreas inundables.

Bajo este escenario, surge la necesidad de desarrollar un análisis técnico que permita comprender el comportamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada Totora y, a partir de ello, proponer medidas de prevención orientadas a la implementación de un SAT. En consecuencia, esta problemática da origen a la formulación de las preguntas de investigación:

Problema General

- ¿De qué manera el modelado hidrológico e hidráulico permite proponer un sistema de alerta temprana ante inundaciones por desbordamiento de la Quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac - 2025?

Problemas Específicos

- ¿Cuáles son los parámetros hidrológicos y morfométricos de la cuenca de la Quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba - 2025?
- ¿Cuáles son los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno en la quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba - 2025?
- ¿Cuál es el comportamiento hidráulico de la Quebrada Totora ante caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno en el distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac - 2025?
- ¿Cuáles son las áreas de inundación generadas en los sectores Totora y Oropesa por caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno en la Quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac - 2025?
- ¿Qué sistema de alerta temprana puede proponerse, a partir de los resultados del modelado hidrológico e hidráulico, para reducir el riesgo de inundaciones en los sectores Totora y Oropesa, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac - 2025?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

- Desarrollar el modelado hidrológico e hidráulico para proponer un sistema de alerta temprana ante inundaciones por desbordamiento de la Quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac - 2025.

2.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros hidrológicos y morfométricos de la cuenca de la Quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba - 2025.
- Determinar los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno mediante el modelado hidrológico con HEC-HMS en la quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba - 2025

- Simular y evaluar el comportamiento hidráulico de la Quebrada Totora mediante el software HEC-RAS para caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac - 2025.
- Delimitar las áreas de inundación en los sectores Totora y Oropesa mediante modelación hidráulica para caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno en la Quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac - 2025.
- Proponer un Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SAT-COM) basado en los resultados del modelado hidrológico e hidráulico para reducir el riesgo de inundaciones en los sectores Totora y Oropesa, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac - 2025.

2.3. Justificación e Importancia

Justificación de la Investigación

La presente investigación se justifica por la necesidad de generar información técnica que permita evaluar el comportamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada Totora frente a eventos extremos de precipitación y escenarios potenciales de inundación por desbordamiento en los sectores Totora y Oropesa, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac. La ocurrencia de lluvias intensas en zonas de montaña puede ocasionar incrementos significativos de los caudales, cambios en la dinámica del flujo y afectación de áreas cercanas al cauce, por lo que resulta necesario desarrollar estudios que permitan anticipar estos escenarios y fortalecer las acciones de prevención y preparación frente al riesgo de desastres.

Desde la perspectiva teórica, la investigación aporta conocimiento aplicado sobre la relación existente entre las características físicas de una cuenca hidrográfica, la respuesta hidrológica ante precipitaciones extremas y el comportamiento hidráulico del flujo dentro del cauce. Mediante el modelamiento hidrológico e hidráulico se representa la transformación de la precipitación en escorrentía superficial y posteriormente la

propagación del flujo, permitiendo obtener información cuantitativa como caudales máximos, niveles de agua, velocidades, profundidades de inundación y extensión de áreas afectadas. En ese sentido, el estudio contribuye al análisis del peligro por inundación mediante una interpretación técnica basada en escenarios asociados a diferentes períodos de retorno.

Asimismo, la investigación adquiere relevancia dentro del enfoque de gestión del riesgo de desastres, debido a que la Ley N.° 29664, Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), promulgada en 2011 (Congreso de la República del Perú, 2011), establece la importancia de desarrollar conocimiento sobre los peligros existentes y generar información que permita implementar medidas orientadas a la prevención, reducción del riesgo y preparación ante emergencias. Bajo este enfoque, los resultados obtenidos mediante la simulación hidrológica e hidráulica constituyen una base técnica para la identificación de zonas expuestas y la formulación de medidas de gestión.

Desde la perspectiva práctica, el estudio permitió obtener información específica de la quebrada Totora mediante la caracterización morfométrica de la cuenca, análisis de precipitaciones máximas, determinación de precipitaciones de diseño y estimación de caudales máximos mediante el modelo hidrológico HEC-HMS versión 4.13. Posteriormente, mediante la simulación hidráulica con HEC-RAS versión 6.6, se evaluó el comportamiento del cauce ante diferentes escenarios de caudal, permitiendo identificar niveles de agua, profundidades de inundación, áreas inundables y sectores con mayor exposición dentro de los sectores Totora y Oropesa.

Los resultados obtenidos representan un insumo técnico para la toma de decisiones, debido a que permiten conocer cómo responde la quebrada ante eventos extremos y establecer criterios para la formulación de medidas preventivas. Asimismo, la información generada constituye la base para la propuesta de un SAT-COM, considerando umbrales hidrometeorológicos, mecanismos de monitoreo, comunicación de alertas y acciones de respuesta.

Desde la perspectiva metodológica, la investigación se justifica porque integra procedimientos de análisis geoespacial, procesamiento hidrológico y simulación hidráulica mediante herramientas especializadas. La utilización de información hidrometeorológica, modelos digitales de elevación, cartografía temática, levantamiento topográfico fotogramétrico mediante dron y modelos computacionales permitió transformar datos espaciales y ambientales en resultados medibles. Según Hernández y Mendoza (2018), la investigación científica requiere procesos sistemáticos que permitan obtener información válida y coherente con los objetivos planteados; por ello, la metodología aplicada permitió desarrollar un procedimiento organizado y reproducible para evaluar escenarios de inundación.

Finalmente, desde la dimensión social, la investigación se justifica porque busca contribuir a la reducción de los posibles impactos generados por inundaciones en la población ubicada en el área de influencia de la quebrada Totora. La propuesta del SAT-COM busca fortalecer la preparación comunitaria mediante mecanismos de alerta, comunicación y respuesta organizada, en concordancia con los lineamientos establecidos en la R.M. N.° 173-2015-PCM (PCM, 2015) y en la Guía técnica para la implementación del SAT-COM (INDECI, 2018).

Importancia de la Investigación

La importancia de la presente investigación radica en que genera información técnica específica sobre el comportamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada Totora, permitiendo evaluar de manera cuantitativa la respuesta del sistema ante eventos extremos de precipitación. A diferencia de una evaluación basada únicamente en antecedentes históricos o apreciaciones generales, el estudio proporciona resultados obtenidos mediante simulaciones hidráulicas e hidrológicas que representan diferentes escenarios asociados a períodos de retorno.

El aporte principal de la investigación consiste en la generación de información relacionada con la dinámica de inundación de la quebrada Totora, incluyendo caudales

máximos estimados, comportamiento hidráulico del flujo, niveles de agua, profundidades y delimitación de áreas inundables. Estos resultados permiten identificar zonas críticas y sectores con mayor exposición, proporcionando elementos técnicos para orientar medidas de prevención y reducción del riesgo en el distrito de Oropesa.

Asimismo, la investigación es importante porque integra el modelamiento hidrológico e hidráulico con la propuesta de un SAT-COM. Esta articulación permite convertir los resultados técnicos del estudio en una herramienta práctica de gestión, mediante la definición de umbrales de precipitación, niveles de alerta, procedimientos de monitoreo, mecanismos de comunicación y acciones de preparación frente a posibles inundaciones.

La relevancia del estudio también se relaciona con la necesidad de fortalecer la capacidad preventiva frente a eventos hidrometeorológicos extremos. La identificación de escenarios de riesgo permite orientar decisiones relacionadas con la planificación territorial, preparación comunitaria y organización de la respuesta. En este sentido, los resultados obtenidos pueden servir como soporte técnico para autoridades locales, instituciones vinculadas a la gestión del riesgo de desastres y población organizada.

Los principales beneficiarios de la investigación serán los habitantes de los sectores Totora y Oropesa, debido a que la propuesta desarrollada busca mejorar la capacidad de anticipación y respuesta ante posibles eventos de inundación. Asimismo, los resultados pueden constituir una referencia para futuras investigaciones relacionadas con modelamiento hidrológico, simulación hidráulica y diseño de los SAT en cuencas con características similares dentro de la región Apurímac.

En consecuencia, la importancia de esta investigación se encuentra en que no solo permite analizar el comportamiento de una amenaza natural, sino que propone una herramienta orientada a reducir sus posibles efectos mediante información científica, procedimientos técnicos y mecanismos organizados de alerta temprana.

2.4. Hipótesis

Hipótesis General

El desarrollo del modelado hidrológico e hidráulico permitirá proponer un sistema de alerta temprana para la gestión de riesgo de inundaciones por desbordamiento de la Quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac - 2025.

2.5. Variables

Variable Independiente

- Modelado hidrológico e hidráulico

Variable Dependiente

- Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SAT-COM) ante inundaciones

Operacionalización de variables

La operacionalización de variables permite establecer la correspondencia entre los conceptos teóricos de la investigación y los elementos que pueden ser observados, medidos y analizados de manera objetiva. En este estudio, dicho proceso se desarrolló para ambas variables, tomando como base sus definiciones conceptuales y operacionales. A partir de ello, se definieron dimensiones e indicadores específicos que facilitan la evaluación de los resultados del modelado en la identificación de escenarios de inundación y su aplicación en la formulación de mecanismos de alerta temprana orientados a fortalecer la gestión del riesgo en la quebrada Totora.

Tabla 4

Matriz de operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Independiente Modelado hidrológico e hidráulico	El modelado hidrológico e hidráulico constituye un proceso de análisis y simulación que integra métodos matemáticos, información hidrometeorológica, características físicas de la cuenca y herramientas computacionales especializadas para representar la transformación de la precipitación en escorrentía y el comportamiento del flujo en los cauces naturales. Su aplicación permite estimar caudales, niveles de agua, velocidades de flujo y áreas potencialmente inundables, generando información técnica fundamental para la evaluación del riesgo de inundaciones y la formulación de medidas de prevención y gestión del riesgo de desastres (Odey & Cho, 2025; Gupta et al., 2026).	Se operacionalizó mediante la caracterización morfométrica e hidrológica de la cuenca, el análisis de precipitaciones, la simulación lluvia-escorrentía mediante HEC-HMS v.4.13 y la modelación hidráulica mediante HEC-RAS v.6.6. Su evaluación se realizó a través de parámetros físicos de la cuenca, variables hidrológicas y resultados hidráulicos obtenidos para diferentes períodos de retorno, tales como caudales máximos, niveles de agua, velocidades de flujo y áreas inundables.	Características morfométricas e hidrológicas de la cuenca	Área de la cuenca (km²), perímetro (km), pendiente media (%), longitud del cauce principal (km), red de drenaje, uso del suelo (%), tipo de suelo, tiempo de concentración (min).	Razón
			Análisis hidrológico	Precipitación máxima en 24 horas (mm), intensidad de lluvia (mm/h), curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia), precipitación de diseño (mm).	
			Modelamiento hidrológico (HEC-HMS v.4.13)	Precipitación de diseño (mm), caudal máximo (m³/s), hidrograma de avenida, tiempo al pico (h), períodos de retorno (años).	
			Modelamiento hidráulico (HEC-RAS v.6.6)	Tirante hidráulico (m), nivel de agua (msnm), velocidad del flujo (m/s), profundidad de inundación (m), área inundada (ha), extensión del desbordamiento (m o km).	
Dependiente Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SAT-COM) ante inundaciones	El SAT-COM ante inundaciones es un conjunto articulado de capacidades, procedimientos, mecanismos de monitoreo, análisis de amenazas, comunicación de alertas y acciones de respuesta que involucra a la comunidad y a las instituciones responsables, con el propósito de advertir oportunamente sobre la posible ocurrencia de inundaciones y facilitar la toma de decisiones para reducir los riesgos, daños y pérdidas en la población expuesta. Su funcionamiento se sustenta en información técnica e hidrometeorológica que permite establecer umbrales de alerta, fortalecer la preparación comunitaria y mejorar la capacidad de respuesta frente a eventos extremos (INDECI, 2018; PCM, 2015; Mkhonta et al., 2026).	Se operacionalizó a partir de los resultados obtenidos mediante el modelado hidrológico e hidráulico, considerando la identificación de escenarios de inundación, áreas expuestas y zonas críticas, los cuales sirvieron de base para la formulación de una propuesta de SAT-COM. Su evaluación comprendió la definición de umbrales hidrometeorológicos, mecanismos de monitoreo y seguimiento, procedimientos de difusión y comunicación de alertas, así como acciones de preparación y respuesta comunitaria frente a eventos de inundación en los sectores Totora y Oropesa.	Conocimiento del riesgo	Áreas inundables identificadas (ha), zonas críticas expuestas, escenarios de inundación según período de retorno, profundidad máxima de inundación (m), población o infraestructura expuesta.	Nominal, Ordinal y Razón
			Monitoreo y seguimiento	Umbrales de precipitación (mm), umbrales de nivel de agua (m), umbrales de caudal (m³/s), frecuencia de monitoreo y vigilancia comunitaria.	
			Difusión y comunicación de la alerta	Niveles de alerta establecidos, protocolos de emisión de alertas y medios de comunicación disponibles.	
			Capacidad de respuesta	Protocolos de actuación ante niveles de alerta, rutas de evacuación, zonas seguras establecidas, organización propuesta para la respuesta comunitaria y tiempo de respuesta estimado.	

Nota. La matriz sintetiza las variables de estudio, sus dimensiones, indicadores y escalas de medición.

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

A Nivel Internacional

Méndez y Vásquez (2021) desarrollaron la investigación “Modelación hidrológica e hidráulica de la cuenca del río Machángara para evaluar zonas de inundación”, en Cuenca, Ecuador, con el objetivo de analizar el comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca ante eventos extremos y determinar áreas expuestas a inundaciones mediante modelos de simulación. El estudio empleó un enfoque mixto y aplicó herramientas de modelamiento como HEC-HMS, HEC-RAS y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para representar la dinámica del flujo y estimar zonas de peligro dentro de la cuenca del río Machángara.

Los resultados evidenciaron que la cuenca presenta una respuesta crítica frente a precipitaciones intensas, alcanzando caudales máximos de 166.8 m^3/s, 194.8 m^3/s y 224.6 m^3/s para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, respectivamente. Del mismo modo, el análisis hidráulico determinó que, bajo un escenario extremo de 100 años, las profundidades del flujo pueden llegar hasta 7.62 m y alcanzar velocidades aproximadas de 4.5 m/s, generando condiciones de alta peligrosidad. De manera complementaria, la evaluación espacial permitió identificar que los eventos de mayor magnitud producen desbordamientos que afectan viviendas cercanas al cauce y vías aledañas, con zonas de influencia de hasta 100 metros. Con base en estos resultados, los autores concluyeron que parámetros como el Número de Curva (*Curve Number*, CN), el tiempo de retraso y el coeficiente de rugosidad de Manning tienen una influencia determinante en la generación y propagación de caudales de avenida. Bajo esta perspectiva, resaltaron que el modelamiento hidrológico e hidráulico constituye una herramienta fundamental para la planificación territorial y la implementación de medidas preventivas frente a inundaciones.

Por su parte, Quito y Picón (2022) realizaron la investigación “Evaluación hidrológica e hidráulica del río San Francisco en el cantón Gualaceo”, en Ecuador, cuyo propósito fue analizar el comportamiento del río ante precipitaciones intensas, identificar sectores vulnerables a inundaciones y plantear alternativas para mejorar el monitoreo

hidrometeorológico. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo y empleó información topográfica, datos climáticos y modelos computacionales mediante HEC-HMS y HEC-RAS para estimar caudales y representar las zonas susceptibles a desbordamiento.

Los hallazgos demostraron que el uso del modelo HEC-HMS permitió obtener resultados más confiables que los métodos tradicionales, debido a que incorpora características físicas de la cuenca con mayor detalle. En la cuenca alta se obtuvieron caudales máximos entre 76.1 m³/s y 132.8 m³/s para periodos de retorno de 2 y 50 años, mientras que en la zona media alcanzaron valores de hasta 248.4 m³/s. El análisis hidráulico identificó como punto crítico la zona urbana baja del cantón Gualaceo, donde incluso eventos de baja recurrencia generaron manchas de inundación con afectación directa a viviendas próximas al cauce. De igual forma, la simulación logró reproducir con alta similitud un evento real ocurrido en julio de 2022, confirmando la capacidad predictiva del modelo empleado. A partir del análisis realizado, los autores concluyeron que el sector urbano cercano a la desembocadura del río San Francisco presenta una elevada exposición ante inundaciones recurrentes debido a la ausencia de estudios técnicos previos y medidas de control suficientes. Finalmente, señalaron que la investigación constituye una base técnica para la implementación de los SAT, estaciones de monitoreo y obras de mitigación orientadas a reducir el riesgo para la población.

En esa misma línea, Saca (2025) desarrolló el estudio denominado “Estudio hidrológico e hidráulico de la quebrada Quilloyacu para la prevención y mitigación de inundaciones y flujo de sedimentos”, en Loja, Ecuador, con la finalidad de evaluar el comportamiento de la quebrada frente a eventos extremos y plantear medidas de prevención y control ante inundaciones y transporte de sedimentos. La investigación se realizó bajo un enfoque cuantitativo, empleando información topográfica, características del suelo y herramientas de modelamiento como QGIS y AutoCAD Civil 3D para analizar las condiciones hidrológicas, hidráulicas y sedimentológicas de la cuenca.

Los resultados evidenciaron que la quebrada Quilloyacu presenta una elevada susceptibilidad a procesos erosivos debido a sus fuertes pendientes y a la composición

predominante de materiales granulares, identificándose aproximadamente un 88.68% de gravas en el lecho del cauce. Complementariamente, mediante la estimación de caudales de crecida para un periodo de retorno de 50 años, se obtuvieron valores de 23.06 m³/s en la parte alta y 31.49 m³/s en la parte baja de la quebrada, evidenciando un incremento del flujo hacia aguas abajo. El análisis de sedimentos permitió determinar una producción considerable de material sólido, por lo que se planteó la implementación de presas abiertas de retención (Slit Dams), las cuales demostraron una capacidad de reducción del transporte de sedimentos de 22% en la zona alta y 31% en la zona baja. Considerando los resultados obtenidos, el autor concluyó que la quebrada representa una amenaza potencial para la población debido a la combinación de altas pendientes, caudales elevados y presencia significativa de sedimentos. Sin embargo, destacó que las medidas estructurales propuestas permiten disminuir los efectos de los flujos de lodos y piedras, constituyendo una alternativa técnica viable para la gestión del riesgo y la protección de las zonas expuestas.

Bajo una perspectiva similar, Álvarez (2025) realizó la investigación titulada “Estudio hidrológico e hidráulico de la quebrada Chinguilanchi para la prevención y mitigación de inundaciones”, en Loja, Ecuador, cuyo objetivo fue analizar las condiciones de la quebrada y proponer una obra de control hidráulico para reducir el riesgo generado por precipitaciones intensas. El estudio empleó un enfoque cuantitativo con un diseño técnico-propositivo, utilizando información topográfica, ensayos de caracterización del suelo y modelamiento mediante herramientas como QGIS y Civil 3D para evaluar el comportamiento del flujo.

Los resultados determinaron que los caudales de diseño para un periodo de retorno de 50 años fueron de 7.68 m³/s, 7.20 m³/s y 5.77 m³/s en los puntos evaluados, evidenciando la necesidad de establecer medidas de regulación hidráulica. De igual manera, el análisis morfométrico mostró que la cuenca presenta condiciones favorables para una rápida concentración del escurrimiento debido a sus pendientes medias entre 13.7% y 15.3%. Por otra parte, se obtuvo un CN promedio de 62 y un coeficiente de

escorrentía de 0.46, parámetros que permitieron diseñar azudes con alturas entre 0.39 m y 0.48 m orientados a controlar la energía del flujo. Estos resultados permitieron concluir que la evaluación hidrológica e hidráulica permite identificar los factores que influyen en la generación de avenidas y facilita el diseño de soluciones estructurales eficientes. Finalmente, destacó que la implementación de azudes contribuye a disminuir la probabilidad de desbordamientos y fortalece la planificación urbana frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

Finalmente, Vásquez y Constante (2023) realizaron el estudio “Propuesta de un plan de gestión de riesgos ante deslizamientos e inundaciones en la comunidad de Marianza perteneciente a la parroquia Sayausí”, en Cuenca, Ecuador, con el objetivo de establecer medidas preventivas y estrategias de respuesta frente a amenazas naturales que afectan a la población. La investigación tuvo un enfoque cualitativo y utilizó información territorial, observación de campo, análisis documental y herramientas SIG para determinar niveles de susceptibilidad y vulnerabilidad en la comunidad.

Los resultados evidenciaron que el territorio presenta una importante exposición a amenazas naturales, identificándose que el 35.24% del área posee susceptibilidad alta frente a deslizamientos. Del mismo modo, se determinó un nivel elevado de exposición ante este fenómeno con una valoración de 7/9, mientras que la vulnerabilidad poblacional alcanzó una categoría alta (6/9). El análisis también reveló que elementos esenciales como vías, sistemas de abastecimiento de agua, infraestructura eléctrica y servicios de salud presentan condiciones críticas de vulnerabilidad, incrementando los posibles impactos ante eventos adversos. En función de estos resultados, los autores concluyeron que la combinación de pendientes pronunciadas, suelos arcillosos y condiciones de saturación incrementa considerablemente el riesgo en la comunidad de Marianza. Los autores también señalaron que la ausencia de una planificación preventiva aumenta la vulnerabilidad de la población, por lo que el plan de gestión propuesto constituye una herramienta para fortalecer la capacidad de respuesta, reducir daños y mejorar la resiliencia comunitaria frente a futuros desastres.

A Nivel Nacional

Canales y Córdova (2023) desarrollaron la investigación “Modelamiento hidrológico e hidráulico para un sistema de alerta temprana en la Quebrada Chasqui, Distrito Sihuas, Provincia Sihuas, Áncash”, con el propósito de evaluar el comportamiento de la quebrada frente a eventos extremos y establecer criterios técnicos para la implementación de un SAT-COM. El estudio tuvo un enfoque aplicado y empleó información hidrometeorológica, levantamientos topográficos y herramientas de simulación como HEC-HMS y HEC-RAS para representar el comportamiento del flujo y delimitar zonas expuestas dentro del tramo urbano evaluado.

Los resultados determinaron que, para un periodo de retorno de 100 años, la quebrada Chasqui puede alcanzar un caudal máximo de 45.9 m³/s. De acuerdo con el análisis hidráulico realizado, se evidenció que el flujo de agua sin presencia de sedimentos no genera inundaciones significativas en el área urbana de Sihuas; sin embargo, al considerar escenarios asociados a movimientos en masa y flujos de detritos, se incrementa considerablemente la capacidad destructiva del evento debido al aumento del volumen y velocidad del flujo. Por otra parte, mediante la modelación espacial se identificaron sectores con diferentes niveles de afectación, permitiendo establecer zonas críticas de inundación. Bajo estas condiciones, los autores concluyeron que la principal amenaza en la quebrada no está relacionada únicamente con el incremento del caudal líquido, sino con la ocurrencia de flujos de detritos que modifican las condiciones hidráulicas del cauce. Por ello, señalaron que la implementación de un SAT constituye una medida preventiva viable para reducir la exposición de la población, evitar ocupaciones en áreas vulnerables y orientar futuras obras de protección.

Siguiendo este enfoque, Esquives y Velazco (2023) realizaron el estudio “Modelamiento hidrológico e hidráulico para sistema de alerta temprana aplicando el software HEC-HMS en la Quebrada Pedregal, provincia de Huarmey”, cuyo objetivo fue analizar la respuesta de la subcuenca ante eventos de precipitación extrema y establecer una base técnica para implementar un sistema de alerta frente a inundaciones. La

investigación utilizó un enfoque cuantitativo y aplicó información pluviométrica, modelos digitales de elevación y parámetros hidráulicos del cauce, procesados mediante herramientas como ArcGIS, HEC-HMS y HEC-RAS.

Los resultados evidenciaron que la subcuenca Pedregal posee características que favorecen una rápida concentración del escurrimiento superficial, debido a su pendiente del cauce principal de 9.01% y una red hidrográfica de orden 5. El análisis hidrológico permitió estimar caudales para distintos periodos de retorno, mientras que el modelamiento hidráulico identificó sectores críticos de inundación en las progresivas 2+800 y 4+000. En dichas zonas se determinaron tirantes de agua que alcanzan hasta 15 metros, generando una amenaza directa para el Centro Poblado Tayca, donde las viviendas y áreas agrícolas presentan alta vulnerabilidad. En función de la evidencia encontrada, los autores concluyeron que el uso combinado de HEC-HMS y HEC-RAS permite obtener mapas de inundación confiables y definir umbrales técnicos para los SAT. De igual forma, destacaron que el empleo de información satelital como el producto PISCO representa una alternativa eficiente cuando existe limitada disponibilidad de estaciones hidrometeorológicas, contribuyendo a mejorar la gestión preventiva frente a eventos extremos como el Fenómeno de El Niño.

Asimismo, Valderrama y Yataco (2024) desarrollaron la investigación “Estudio hidrológico de la quebrada Cascajal con fines de prevención de inundación CP. Cascajal-Santa-Ancash”, cuyo propósito fue determinar las zonas vulnerables ante eventos de máxima avenida mediante modelamiento hidrológico e hidráulico, así como plantear medidas preventivas frente a posibles inundaciones. El estudio presentó un enfoque cuantitativo y empleó información topográfica, registros pluviométricos y herramientas de simulación como HEC-HMS, HEC-RAS y ArcGIS para analizar la respuesta de la quebrada y representar espacialmente las áreas expuestas.

Los resultados evidenciaron que la cuenca presenta condiciones favorables para la generación de avenidas, obteniéndose un CN ponderado de 78 y un tiempo de concentración de 1.41 horas. El modelamiento hidrológico determinó caudales máximos de

16.5 m³/s para un periodo de retorno de 25 años y 29.2 m³/s para un periodo de 50 años. De manera adicional, el análisis hidráulico permitió establecer que las áreas potencialmente inundables alcanzan 9.19 km² y 9.24 km² para dichos escenarios, respectivamente. Un aspecto relevante fue la identificación de afectación sobre aproximadamente 5.03 km² de zonas agrícolas, evidenciando un impacto económico considerable para la población asentada en el área de influencia. Tomando como referencia estos resultados, los autores concluyeron que el Centro Poblado Cascajal presenta un nivel elevado de peligro frente a precipitaciones extremas debido a la cercanía de viviendas y áreas productivas respecto al cauce. Por ello, plantearon la necesidad de implementar medidas estructurales como gaviones y enrocados, complementadas con acciones no estructurales como mantenimiento del cauce y fortalecimiento de la cultura preventiva, constituyendo el estudio una base técnica para la planificación de obras de reducción del riesgo.

Desde esta perspectiva, Rodas (2024) realizó la investigación “Modelamiento hidrológico e hidráulico empleando el software HEC-RAS para determinación de peligrosidad ante eventos de máximas avenidas en la quebrada Hatunhuayco-Cusco”, con el objetivo de evaluar el nivel de peligro asociado al flujo de detritos y determinar alternativas de mitigación para la zona urbana expuesta. La investigación empleó un enfoque cuantitativo y utilizó información topográfica, características del suelo, datos hidrometeorológicos y modelos computacionales mediante ArcGIS, HEC-HMS y HEC-RAS para simular el comportamiento del flujo.

Los resultados determinaron que la quebrada Hatunhuayco presenta una condición de peligro “muy alto” debido a la presencia de materiales erosionables, pendientes pronunciadas y ocurrencia de precipitaciones intensas. Para un periodo de retorno de 100 años, el modelamiento hidráulico evidenció que el flujo puede alcanzar tirantes de hasta 1.12 m y velocidades aproximadas de 2.78 m/s en la zona urbana, afectando directamente a viviendas ubicadas en el área vulnerable. Complementariamente, la validación del modelo con un evento real ocurrido en 2022 permitió comprobar la capacidad predictiva de

la simulación realizada. Bajo los resultados obtenidos, el autor concluyó que el modelamiento numérico constituye una herramienta eficaz para diagnosticar la peligrosidad y estimar el comportamiento de flujos de detritos en microcuencas andinas. De esta manera, determinó que la implementación de obras de protección, como muros de encauzamiento, resulta necesaria para reducir la exposición de la población y controlar los efectos generados por eventos extremos.

Finalmente, Godoy (2022) desarrolló el estudio “Modelización hidrológica e hidráulica para establecer las zonas inundables en la cuenca del río Vizcarra, del área urbana de los distritos de La Unión y Ripán, Huánuco”, con la finalidad de identificar sectores vulnerables ante inundaciones y generar información técnica para la planificación de medidas de protección. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo y utilizó información topográfica mediante fotogrametría, datos hidrometeorológicos y herramientas de modelamiento como HEC-HMS e IBER para representar el comportamiento del río en el tramo urbano evaluado.

Los resultados evidenciaron que la cuenca del río Vizcarra alcanza una extensión aproximada de 1127.48 km² y presenta condiciones que favorecen la generación de caudales elevados. La simulación hidrológica determinó caudales máximos de 146.4 m³/s, 165.9 m³/s y 259.6 m³/s para periodos de retorno de 100, 140 y 500 años, respectivamente. Por otra parte, el modelamiento hidráulico bidimensional identificó tres sectores críticos de inundación en el distrito de La Unión, con un área total afectada de 3.7749 hectáreas. Del mismo modo, se registraron tirantes máximos de hasta 4.32 m y velocidades de flujo cercanas a 4.15 m/s, principalmente en zonas con reducción del cauce y ausencia de defensas ribereñas. A partir del análisis realizado, el autor concluyó que la combinación de condiciones topográficas, estrechamiento del cauce y falta de infraestructura de protección incrementa significativamente el riesgo de inundación en la zona urbana. Por ello, destacó que la modelización hidrológica e hidráulica permite delimitar áreas críticas y constituye una herramienta fundamental para orientar la ejecución de obras de encauzamiento, protección ribereña y planificación territorial.

A Nivel Regional y Local

Paredes (2024) desarrolló la investigación “Efecto de las precipitaciones máximas en el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay”, con el objetivo de analizar la influencia de las precipitaciones extremas sobre el comportamiento de los flujos hiperconcentrados mediante modelamiento bidimensional. El estudio tuvo un enfoque cuantitativo y empleó registros históricos de precipitación, modelamiento hidrológico mediante HEC-HMS y simulación hidráulica con FLO-2D para representar los escenarios de peligro asociados a eventos extremos.

Los resultados evidenciaron una relación significativa entre las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados, obteniéndose coeficientes de correlación muy altos ($r = 0.988$ y $r = 0.994$), lo que confirma que el incremento de la lluvia influye directamente en la magnitud del fenómeno. De igual forma, el modelamiento determinó caudales máximos de hasta 168 m^3/s, áreas de amenaza que alcanzaron aproximadamente el 60.13% del sector evaluado y velocidades de flujo de hasta 9.83 m/s para escenarios con periodo de retorno de 1000 años. Con base en la simulación desarrollada, la autora concluyó que las precipitaciones intensas representan un factor determinante en la generación de flujos hiperconcentrados en la quebrada Sahuanay. Finalmente, destacó que la aplicación del modelo FLO-2D permite delimitar zonas críticas, estimar niveles de peligrosidad y generar información técnica necesaria para la prevención de desastres y la protección de poblaciones vulnerables en Tamburco y Abancay.

De forma complementaria, Batallanos (2023) realizó el estudio “Análisis del comportamiento hidráulico del canal Sahuanay para la evacuación de flujo de detritos en el distrito de Tamburco, Abancay”, cuyo propósito fue evaluar la capacidad hidráulica del canal frente al transporte de flujos de detritos y determinar puntos vulnerables ante eventos extremos. La investigación empleó un enfoque cuantitativo y utilizó información topográfica,

características del suelo y modelamiento computacional mediante HEC-HMS, HEC-RAS y ArcGIS para analizar la dinámica del flujo dentro del canal.

Los resultados demostraron que el canal Sahuanay presenta limitaciones hidráulicas durante eventos de alta intensidad, identificándose cuatro sectores críticos asociados a estructuras como badenes, un culvert y un pontón, donde se generan condiciones favorables para el desborde. Del mismo modo, el análisis determinó valores máximos de tirante de 5.88 m y velocidades de flujo de 7.33 m/s, además de parámetros asociados al comportamiento del flujo de detritos, como una concentración volumétrica de 51%, esfuerzo de cedencia de 42.77 Pa y viscosidad de 431.04 Pa·s. Considerando la información obtenida, la autora concluyó que la configuración actual del canal no garantiza una adecuada evacuación frente a eventos extremos similares a los registrados históricamente en la zona. Ante esta situación, señaló que el estudio constituye un aporte técnico relevante para la implementación de medidas de mitigación, mejoras en el sistema de drenaje y toma de decisiones orientadas a reducir el riesgo por flujos de detritos en Tamburco.

Como último antecedente regional, Alarcón y Alarcón (2022) desarrollaron la investigación titulada “Análisis fluvial y geomorfológico en la erosión del río Apurímac, para la propuesta de defensa ribereña en el balneario turístico de Ccónoc-Curahuasi”, en la región Apurímac, con el propósito de evaluar la influencia de las condiciones hidráulicas y geomorfológicas del río sobre los procesos erosivos y plantear alternativas de protección ribereña. El estudio presentó un enfoque cuantitativo y empleó registros históricos de caudales, análisis geomorfológico, información de suelos y modelamiento hidráulico mediante herramientas como HEC-RAS y ArcGIS para evaluar el comportamiento del río frente a eventos extremos.

Los resultados determinaron que el río Apurímac presenta una elevada dinámica fluvial, estableciéndose un caudal de diseño de 3057.27 m^3/s para un periodo de retorno de 100 años mediante el método estadístico Log Pearson Tipo III. Además, el análisis identificó una acumulación aproximada de 57 628 toneladas de sedimentos, generando la

formación de bancos de arena que modifican la trayectoria del flujo y favorecen la erosión de las márgenes. De igual manera, se determinó la necesidad de considerar una profundidad de socavación que requiere cimentaciones con una uña de protección de aproximadamente 5 metros en sectores críticos del tramo evaluado. Los resultados permitieron concluir que la erosión fluvial representa una amenaza directa para la infraestructura y actividades desarrolladas en el balneario Ccónoc debido a la interacción entre altos caudales, transporte de sedimentos y ausencia de obras de protección suficientes. Bajo esta consideración, propusieron la implementación de defensas ribereñas mediante gaviones y espigones como medidas estructurales para reducir la vulnerabilidad, resaltando que el estudio constituye una base técnica para futuros proyectos hidráulicos y de gestión del riesgo en la región Apurímac.

3.2. Bases Teóricas

3.2.1. Modelamiento Hidrológico

El modelamiento hidrológico constituye una herramienta esencial para la simulación del comportamiento del agua dentro de una cuenca hidrográfica. A través de modelos matemáticos, es posible representar los procesos fundamentales del ciclo hidrológico, tales como la precipitación, infiltración, escorrentía y almacenamiento, lo que permite analizar la respuesta hidrológica frente a distintos escenarios climáticos y territoriales (Beven, 2012; Chow et al., 1988).

En la actualidad, los modelos hidrológicos son ampliamente utilizados en la planificación de los recursos hídricos, el diseño de infraestructura hidráulica y la gestión del riesgo de inundaciones. Su aplicación resulta particularmente relevante en el desarrollo de los SAT, donde se requiere anticipar eventos extremos con suficiente precisión (Odey & Cho, 2025).

3.2.1.1. Concepto de Modelamiento Hidrológico.

El modelamiento hidrológico se define como el proceso de representación del comportamiento del ciclo hidrológico mediante ecuaciones matemáticas y algoritmos

computacionales, con el propósito de simular la relación entre la precipitación y la escorrentía, así como otros procesos asociados dentro de una cuenca (Singh, 1995; Singh et al., 2024).

Un modelo hidrológico integra diversas variables físicas y ambientales, entre las que destacan la precipitación, temperatura, topografía, uso del suelo y características del suelo. A partir de estos datos de entrada, el modelo genera resultados como caudales, volúmenes de escorrentía y niveles de agua (Baran-Gurgul & Rutkowska, 2024; Keller et al., 2023).

El uso del modelamiento hidrológico permite:

- Predecir eventos hidrometeorológicos extremos.
- Evaluar escenarios futuros asociados al cambio climático.
- Apoyar la toma de decisiones en la gestión hídrica.
- Diseñar los SAT.

3.2.1.2. Tipos de Modelos Hidrológicos.

Los modelos hidrológicos pueden clasificarse en función de diferentes criterios, tales como su estructura conceptual, representación espacial y comportamiento temporal (Bihon et al., 2024).

a. Según su representación del sistema
    - Modelos empíricos: se basan en relaciones estadísticas derivadas de datos históricos.
    - Modelos conceptuales: representan la cuenca mediante reservorios interconectados con parámetros simplificados.
    - Modelos físicos o distribuidos: se fundamentan en ecuaciones físicas que describen los procesos hidrológicos con mayor detalle.
b. Según la variabilidad espacial
    - Modelos agregados (lumped): consideran la cuenca como una unidad homogénea.

- Modelos distribuidos: representan la variabilidad espacial de los parámetros en toda la cuenca.
- Modelos semi-distribuidos: subdividen la cuenca en subunidades o subcuencas.

c. Según el comportamiento temporal

- Modelos continuos: simulan procesos hidrológicos a lo largo del tiempo.
- Modelos de evento: se enfocan en eventos específicos, como tormentas intensas.

Tabla 5

Clasificación de modelos hidrológicos

Tipo de modelo	Característica principal	Aplicación
Empírico	Basado en datos históricos	Análisis estadístico
Conceptual	Representación simplificada	Simulación general
Distribuido	Alta resolución espacial	Modelación detallada
Agregado	Simplificación del sistema	Estudios preliminares

Nota. Se presentan las características y aplicaciones de cada tipo de modelo hidrológico

3.2.1.3. Fundamentos del Software HEC-HMS.

El software Centro de Ingeniería Hidrológica - Sistema de Modelado Hidrológico (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*, HEC-HMS) es una herramienta desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (*United States Army Corps of Engineers*, USACE), ampliamente utilizada para simular procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas (Mkhonta et al., 2026; USACE, 2025).

Este software permite modelar la transformación de la precipitación en escorrentía mediante la integración de diferentes componentes que representan los procesos hidrológicos:

- Modelo de pérdidas: estima la infiltración. Por ejemplo, el Método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos (*Soil Conservation Service - Curve Number*, SCS-CN).

- Modelo de transformación: convierte la lluvia efectiva en escorrentía mediante hidrogramas unitarios.
- Modelo de propagación: simula el tránsito del flujo en cauces.
- Modelo meteorológico: define las condiciones de entrada de precipitación.

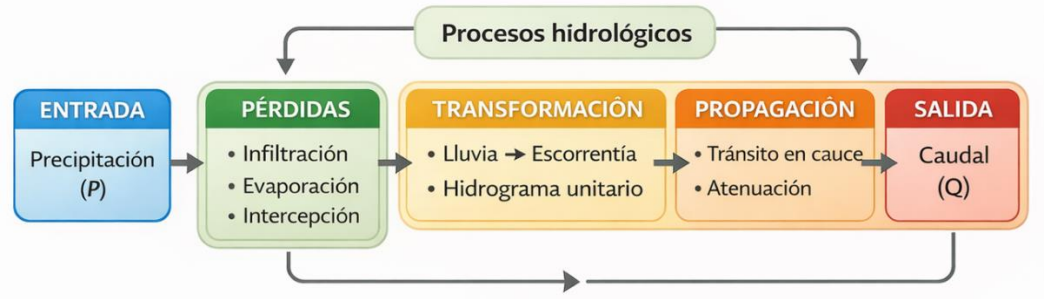
HEC-HMS opera generalmente bajo un enfoque semi-distribuido, dividiendo la cuenca en subcuencas que permiten representar la variabilidad espacial de los parámetros. Además, puede integrarse con herramientas SIG, facilitando el procesamiento de información geoespacial.

Entre sus principales ventajas destacan:

- Flexibilidad en la selección de métodos hidrológicos
- Capacidad para simular eventos históricos y escenarios futuros
- Integración con modelos hidráulicos (como HEC-RAS)
- Aplicación en estudios de gestión del riesgo y los SAT.

Figura 1

Esquema del modelo HEC-HMS



Nota. Ilustra los componentes principales del modelo HEC-HMS

3.2.1.4. Estructura del Modelo HEC-HMS.

El modelo HEC-HMS presenta una estructura modular que permite representar de manera integrada los diferentes procesos hidrológicos que ocurren dentro de una cuenca. Esta organización facilita la simulación de la transformación de la precipitación en escorrentía, mediante la interacción de componentes espaciales y temporales (USACE, 2025).

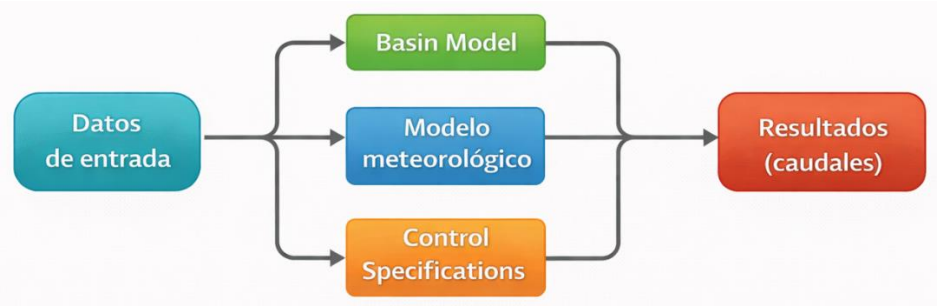
El funcionamiento del modelo se basa en tres componentes principales:

- Modelo de cuenca (Basin Model)
- Modelo meteorológico
- Especificaciones de control

Estos elementos interactúan entre sí para reproducir el comportamiento hidrológico de la cuenca, permitiendo simular distintos escenarios y analizar la respuesta del sistema frente a eventos de precipitación.

Figura 2

Estructura del modelo HEC-HMS



Nota. Se presenta la secuencia de procesos del modelo HEC-HMS desde los datos de entrada hasta la obtención de caudales.

3.2.1.4.1. Modelo de Cuenca (Basin Model).

El modelo de cuenca constituye el componente central del HEC-HMS, ya que representa la estructura física del sistema hidrológico. En este módulo se definen los elementos que conforman la cuenca, tales como subcuencas, cauces, embalses y nodos de unión, los cuales se conectan para simular la red de drenaje.

Cada subcuenca es caracterizada mediante parámetros hidrológicos que permiten modelar procesos fundamentales como:

- Pérdidas por infiltración. Por ejemplo, método SCS-CN)
- Transformación de la precipitación en escorrentía (hidrograma unitario)
- Enrutamiento del flujo en cauces

Este componente permite representar la conectividad hidráulica del sistema, lo cual resulta esencial para simular la propagación del flujo a lo largo de la cuenca (Chow et al., 1988).

Tabla 6

Componentes del modelo de cuenca

Componente	Función principal
Subcuenca	Generación de escorrentía
Cauce	Transporte de flujo
Unión (Junction)	Confluencia de caudales
Embalse	Almacenamiento y regulación

Nota. Componentes utilizados para representar los procesos hidrológicos y la conectividad de una cuenca.

3.2.1.4.2. Modelo Meteorológico.

El modelo meteorológico define las condiciones climáticas que actúan como entrada en el sistema hidrológico, siendo la precipitación la variable principal. Este componente permite especificar tanto la distribución temporal como espacial de la lluvia (Labade et al., 2025).

Entre los métodos más utilizados se encuentran:

- Hietogramas de tormenta
- Precipitación uniforme
- Precipitación distribuida basada en estaciones meteorológicas

La precisión de este componente es determinante en la calidad de los resultados del modelo, ya que errores en la caracterización de la precipitación pueden generar desviaciones significativas en la estimación de caudales. Asimismo, permite incorporar tormentas de diseño para evaluar escenarios extremos (USACE, 2025).

3.2.1.4.3. Especificaciones de Control.

Las especificaciones de control establecen el marco temporal de la simulación hidrológica, definiendo los parámetros necesarios para el cálculo del modelo en el tiempo (USACE, 2023).

Este componente incluye:

- Fecha y hora de inicio y fin de la simulación
- Intervalo de tiempo (minutos u horas)
- Paso de cálculo

Las especificaciones de control garantizan la coherencia temporal del modelo, permitiendo que los resultados obtenidos representen adecuadamente la evolución del evento hidrológico simulado.

Tabla 7

Componentes del modelo HEC-HMS

Componente	Función
Basin Model	Representa la estructura física de la cuenca
Modelo meteorológico	Define las condiciones de precipitación
Control Specifications	Establece el tiempo de simulación

Nota. Se describen los principales componentes que integran la estructura del modelo HEC-HMS y su función dentro de la simulación hidrológica.

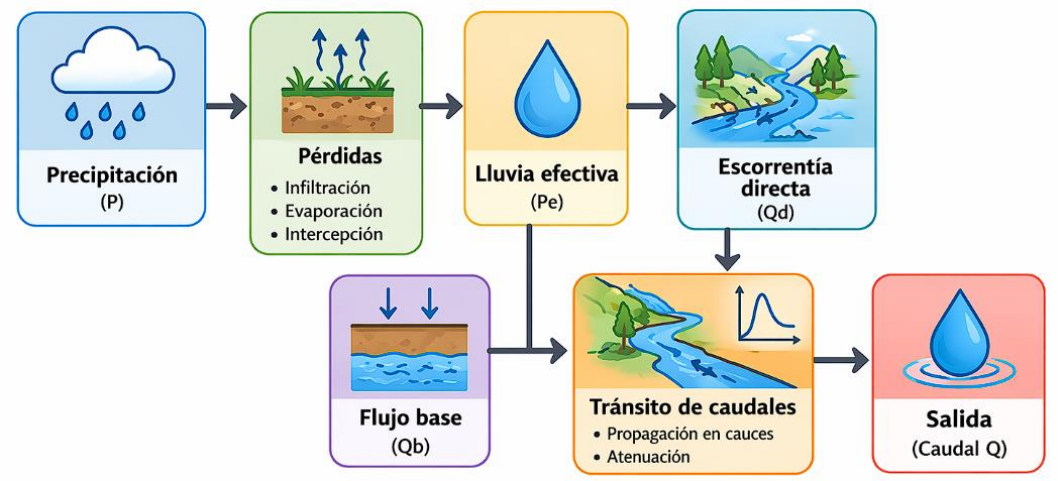
3.2.1.5. Procesos Hidrológicos en HEC-HMS.

El modelo HEC-HMS permite representar de manera integrada los principales procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca hidrográfica, desde la precipitación hasta la generación y propagación del caudal en la red de drenaje. Estos procesos se simulan mediante diferentes métodos que describen las pérdidas por infiltración, la transformación de la lluvia en escorrentía, el aporte de flujo base y el tránsito de caudales a través de los cauces (Beven, 2012; USACE, 2025; Labade et al., 2025).

La adecuada selección y parametrización de estos métodos resulta fundamental para garantizar la representatividad física del modelo y la confiabilidad de los resultados obtenidos, especialmente en aplicaciones orientadas a la gestión del riesgo de inundaciones y la planificación hidrológica (Moriasi et al., 2015; USACE, 2023).

Figura 3

Procesos hidrológicos en HEC-HMS



Nota. Diagrama que representa la transformación de la precipitación en escorrentía mediante los procesos hidrológicos simulados en HEC-HMS.

3.2.1.5.1. Método de Pérdidas (SCS-CN).

El Método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos (*Soil Conservation Service - Curve Number*, SCS-CN), desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (*Soil Conservation Service*, SCS), actualmente denominado Servicio de Conservación de Recursos Naturales (*Natural Resources Conservation Service*, NRCS), es uno de los enfoques más utilizados para estimar las pérdidas por infiltración en cuencas hidrográficas. Este método establece una relación entre la precipitación total y la escorrentía directa, considerando factores como el tipo de suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad antecedente (USDA-SCS, 1986; NRCS, 2025).

La expresión fundamental del método es:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Donde:

- *Q*: escorrentía directa
- *P*: precipitación
- *S*: almacenamiento potencial

La relación entre *S* y el CN se expresa como:

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

Valores elevados de CN indican superficies con baja infiltración y alta escorrentía, típicas de zonas urbanizadas o con suelos compactados. En contraste, valores bajos corresponden a áreas con mayor cobertura vegetal y alta capacidad de infiltración (El-Bagoury & Gad, 2024).

3.2.1.5.2. Método de Transformación Lluvia-Escorrentía.

El proceso de transformación consiste en convertir la lluvia efectiva en escorrentía directa mediante funciones de respuesta hidrológica. Uno de los métodos más utilizados es el hidrograma unitario del SCS, el cual permite estimar el caudal generado a partir de una precipitación distribuida en el tiempo (Chow et al., 1988; Marasini & Pokhrel, 2024; USDA-SCS, 1986).

Este enfoque considera parámetros como el tiempo de concentración, el tiempo al pico y el volumen de escorrentía, permitiendo obtener hidrogramas representativos del comportamiento de la cuenca. Su aplicación es fundamental en la simulación de eventos de tormenta y en la estimación de caudales máximos.

3.2.1.5.3. Flujo Base.

El flujo base corresponde al aporte de agua subterránea que mantiene el caudal de los ríos durante periodos sin precipitación. Este componente es esencial para representar

el comportamiento hidrológico real, especialmente en simulaciones continuas (Dingman, 2015).

En HEC-HMS, el flujo base puede modelarse mediante métodos como: Recesión exponencial y reservorio lineal

Estos métodos permiten simular la descarga gradual del agua almacenada en el subsuelo hacia los cauces, contribuyendo a la estabilidad del caudal.

3.2.1.5.4. Tránsito de Caudales.

El tránsito de caudales describe la propagación del flujo a través de los cauces, considerando los efectos de almacenamiento y atenuación. Este proceso es fundamental para analizar la evolución temporal del caudal en la red de drenaje (Mukhopadhyay & Singh, 2024; USACE, 2023).

Entre los métodos más utilizados se encuentran:

- Método de Muskingum
- Método de onda cinemática

Estos enfoques permiten simular la variación del caudal a lo largo del tiempo y su desplazamiento en el espacio, siendo especialmente relevantes en estudios de inundaciones.

Tabla 8

Procesos hidrológicos en HEC-HMS

Proceso	Método común	Función principal
Pérdidas	SCS-CN	Estimación de infiltración
Transformación	Hidrograma unitario	Generación de escorrentía
Flujo base	Recesión exponencial	Aporte de agua subterránea
Tránsito de caudales	Muskingum	Propagación y atenuación del flujo

Nota. Se describen los principales procesos hidrológicos representados en HEC-HMS y los métodos utilizados para su simulación.

3.2.1.5.5. Calibración y Validación de Modelos Hidrológicos.

La calibración y validación constituyen etapas esenciales en el desarrollo de modelos hidrológicos, ya que permiten ajustar y verificar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento observado de la cuenca (Beven, 2012; Moriasi et al., 2015).

La calibración implica la modificación de parámetros del modelo utilizando datos observados, con el objetivo de minimizar las diferencias entre valores simulados y medidos. Por su parte, la validación consiste en evaluar el desempeño del modelo utilizando un conjunto de datos independiente.

Para cuantificar el grado de ajuste, se emplean indicadores estadísticos como:

- Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)
- Error cuadrático medio (RMSE)
- Coeficiente de correlación (R)

Un modelo adecuadamente calibrado y validado proporciona resultados confiables para la simulación de escenarios futuros y la evaluación de eventos extremos.

Tabla 9

Indicadores de desempeño del modelo

Indicador	Descripción	Interpretación
NSE	Eficiencia del modelo	1 = ajuste perfecto
RMSE	Error promedio cuadrático	Valores bajos = mejor ajuste
R	Correlación entre datos	Cercano a 1 = alta correlación

Nota. Se describen los indicadores utilizados para evaluar el desempeño y la capacidad predictiva de un modelo hidrológico.

3.2.2. Modelamiento Hidráulico

El modelamiento hidráulico constituye una herramienta esencial en la ingeniería de recursos hídricos, ya que permite simular el comportamiento del flujo de agua en cauces naturales y estructuras hidráulicas mediante la aplicación de ecuaciones físicas y modelos numéricos. A través de estos modelos es posible estimar variables como niveles de agua,

velocidades, perfiles hidráulicos y zonas potenciales de inundación (Brunner, 2016; Chow, 1994).

En la actualidad, el modelamiento hidráulico es ampliamente utilizado en la gestión del riesgo de desastres, el diseño de obras hidráulicas y la planificación territorial, especialmente en contextos donde es necesario prever el comportamiento del flujo ante eventos extremos (Brunner, 2021).

3.2.2.1. Concepto de Modelamiento Hidráulico.

El modelamiento hidráulico se define como la representación matemática y computacional del movimiento del agua en sistemas abiertos, como ríos y canales, mediante ecuaciones que describen la conservación de masa y energía (Chow, 1994).

Estos modelos consideran variables fundamentales como:

- Caudal
- Velocidad del flujo
- Profundidad del agua
- Pendiente del cauce
- Rugosidad del lecho

El objetivo principal es reproducir el comportamiento del flujo bajo diferentes condiciones hidráulicas, permitiendo anticipar fenómenos como desbordes, remansos o inundaciones (Jafarzadegan et al., 2023).

3.2.2.2. Tipos de Modelos Hidráulicos.

Los modelos hidráulicos pueden clasificarse en función de su nivel de detalle, comportamiento temporal y enfoque de simulación (Brunner et al., 2020; Gupta et al., 2026):

a. Según la dimensionalidad

- Modelos unidimensionales (1D): representan el flujo en la dirección longitudinal del cauce.

- Modelos bidimensionales (2D): consideran variaciones en longitud y ancho, permitiendo simular inundaciones en planicies.
- Modelos tridimensionales (3D): incorporan variaciones en las tres dimensiones, utilizados en estudios complejos.

b. Según el régimen de flujo

- Flujo permanente: las variables hidráulicas permanecen constantes en el tiempo.
- Flujo no permanente: las variables cambian con el tiempo, típico en eventos de crecida.

c. Según el enfoque

- Modelos físicos: representaciones a escala en laboratorio.
- Modelos numéricos: simulaciones computacionales basadas en ecuaciones hidráulicas.

Tabla 10

Tipos de modelos hidráulicos

Tipo de modelo	Característica principal	Aplicación
1D	Flujo longitudinal	Ríos y canales
2D	Flujo en superficie	Inundaciones
3D	Alta resolución espacial	Estudios complejos
Permanente	Variables constantes	Diseño hidráulico
No permanente	Variables dependientes del tiempo	Crecidas e inundaciones

Nota. Se presentan los principales tipos de modelos hidráulicos y sus características según la representación del flujo y el propósito de aplicación.

3.2.2.3. Fundamentos del Flujo en Cauces.

El flujo en cauces abiertos se rige por los principios de conservación de masa (ecuación de continuidad) y conservación de energía, los cuales permiten describir el comportamiento hidráulico del agua en movimiento (Brunner, 2016; Chow, 1994).

Uno de los modelos más utilizados para estimar el caudal en flujo uniforme es la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde:

- *Q*: caudal (m³/s)
- *n*: coeficiente de rugosidad de Manning
- *A*: área hidráulica (m²)
- *R*: radio hidráulico (m)
- *S*: pendiente del canal

Esta ecuación es ampliamente utilizada en el diseño y análisis de canales, ya que permite estimar la capacidad de conducción del flujo.

Otro parámetro clave es el número de Froude, que permite clasificar el régimen del flujo:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

Donde:

- *Fr*: número de Froude
- *V*: velocidad del flujo
- *g*: gravedad
- *D*: profundidad hidráulica

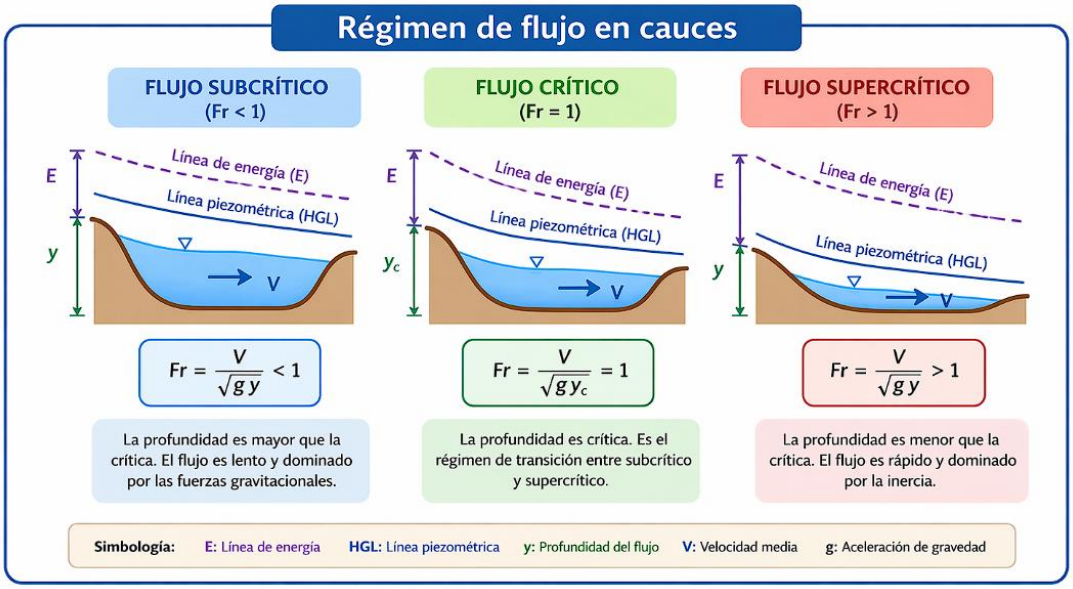
Según el valor de *Fr,* el flujo se clasifica en:

- Subcrítico (Fr < 1): flujo lento y controlado aguas abajo
- Crítico (Fr = 1): condición de transición
- Supercrítico (Fr > 1): flujo rápido y controlado aguas arriba

Este criterio es fundamental para analizar fenómenos como saltos hidráulicos y cambios en el régimen del flujo.

Figura 4

Régimen de flujo en cauces



Nota. Esquema comparativo de los regímenes de flujo en cauces según sus características hidráulicas.

3.2.2.4. Modelamiento con HEC-RAS.

El software Centro de Ingeniería Hidrológica - Sistema de Análisis Fluvial (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*, HEC-RAS) es una herramienta desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (*United States Army Corps of Engineers*, USACE), ampliamente utilizada para simular el comportamiento hidráulico del flujo en ríos, canales y planicies de inundación. Este software permite analizar condiciones de flujo permanente y no permanente, integrando información geométrica del cauce con parámetros hidráulicos para estimar niveles de agua, velocidades y extensión de zonas inundables (Brunner, 2024).

En su versión más reciente, HEC-RAS incorpora capacidades bidimensionales (2D), lo que permite representar con mayor precisión la dinámica del flujo en áreas inundables, siendo una herramienta clave en estudios de gestión del riesgo, ordenamiento territorial y el desarrollo de los SAT (Brunner, 2021).

Figura 5

Esquema general del modelamiento en HEC-RAS



Nota. Esquema del flujo de trabajo utilizado para la simulación hidráulica mediante HEC-RAS.

3.2.2.4.1. Eje del Río.

El eje del río corresponde a la línea central del cauce principal y constituye el elemento base para la construcción del modelo hidráulico en HEC-RAS. Este eje define la dirección del flujo y permite organizar espacialmente las secciones transversales a lo largo del sistema fluvial (Brunner, 2024).

Generalmente, el eje se obtiene a partir de modelos digitales de elevación (DEM) o levantamientos topográficos, siendo fundamental para establecer la conectividad hidráulica entre los distintos tramos del río.

3.2.2.4.2. Geometría del Cauce.

La geometría del cauce describe las características físicas del canal por donde fluye el agua, constituyendo uno de los componentes más importantes del modelo hidráulico. Incluye parámetros como:

- Ancho del cauce
- Profundidad
- Pendiente longitudinal
- Rugosidad (coeficiente de Manning)

En HEC-RAS, esta información se integra a partir de datos topográficos, batimétricos y levantamientos de campo, permitiendo representar con precisión la morfología del río y calcular las variables hidráulicas asociadas al flujo (Brunner, 2021).

Tabla 11

Parámetros de la geometría del cauce

Parámetro	Descripción
Ancho	Distancia lateral del cauce
Profundidad	Altura del flujo
Pendiente	Inclinación longitudinal del canal
Rugosidad (n)	Resistencia al flujo

Nota. Se describen los principales parámetros geométricos utilizados para representar las características físicas de un cauce en el análisis hidráulico.

3.2.2.4.3. Secciones Transversales.

Las secciones transversales son perfiles del terreno tomados perpendicularmente al eje del río, que permiten representar la forma del cauce y las zonas adyacentes. Estas secciones constituyen la base del cálculo hidráulico en modelos unidimensionales (1D).

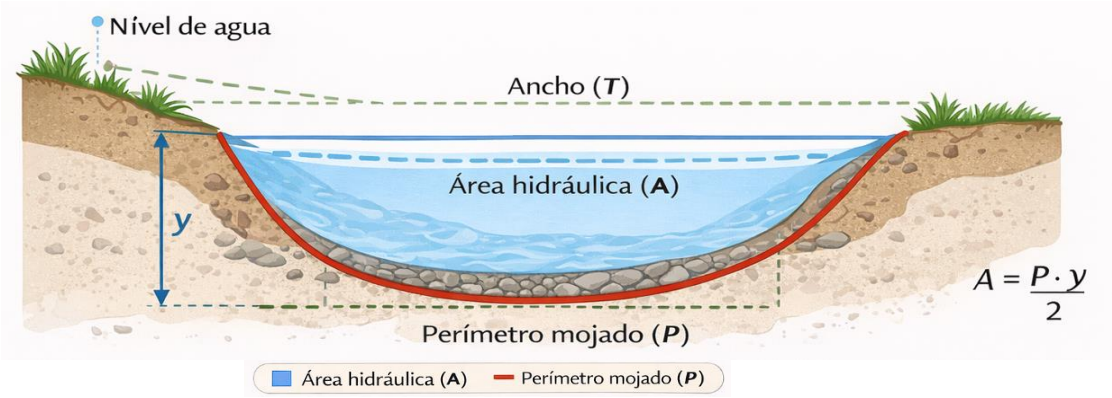
A partir de ellas se determinan parámetros fundamentales como:

- Área hidráulica
- Perímetro mojado
- Radio hidráulico
- Nivel de agua

En HEC-RAS, las secciones se introducen mediante pares de coordenadas (distancia-elevación), lo que permite capturar la variabilidad geométrica del cauce y su entorno.

Figura 6

Sección transversal del cauce



Nota. Representación de la sección transversal de un cauce y sus elementos hidráulicos principales, como nivel de agua, perímetro mojado y área de flujo.

3.2.2.4.4. Condiciones de Flujo Permanente y no Permanente.

HEC-RAS permite simular distintos regímenes de flujo, dependiendo de la variación temporal de las variables hidráulicas (Zainal & Abu Talib, 2024).

Flujo permanente (steady flow):

Se caracteriza por mantener constantes en el tiempo variables como caudal, profundidad y velocidad. Este tipo de análisis se utiliza principalmente en el diseño hidráulico y en la determinación de perfiles de agua.

Flujo no permanente (unsteady flow):

Considera la variación temporal del flujo, permitiendo simular fenómenos dinámicos como crecidas, avenidas e inundaciones.

El flujo no permanente se modela mediante las ecuaciones de Saint-Venant, que representan la conservación de masa y cantidad de movimiento en canales abiertos (Brunner, 2024).

3.2.2.4.5. Condiciones de Frontera.

Las condiciones de frontera son necesarias para resolver las ecuaciones hidráulicas del modelo, ya que definen el comportamiento del flujo en los límites del sistema (Alipour et al., 2022).

Entre las principales se encuentran:

- Caudal aguas arriba: define la entrada del flujo al sistema
- Nivel de agua aguas abajo: establece la condición de salida
- Curvas gasto-nivel: relación entre caudal y altura
- Pendiente normal: estimación del nivel en ausencia de datos

La correcta definición de estas condiciones es esencial para obtener resultados confiables en la simulación hidráulica, especialmente en escenarios de inundación.

Tabla 12

Condiciones de frontera en HEC-RAS

Tipo de condición	Ubicación	Función
Caudal	Aguas arriba	Entrada del flujo
Nivel de agua	Aguas abajo	Condición de salida
Curva gasto-nivel	Puntos específicos	Relación hidráulica
Pendiente normal	Aguas abajo	Estimación del nivel

Nota. Se describen las principales condiciones de frontera utilizadas en HEC-RAS para definir la entrada, salida y comportamiento del flujo durante la simulación hidráulica.

3.2.2.5. Parámetros Hidráulicos.

Los parámetros hidráulicos constituyen variables fundamentales para la descripción y análisis del comportamiento del flujo en cauces naturales y artificiales. Estos parámetros permiten cuantificar la interacción entre el agua en movimiento y las características físicas del canal, influyendo directamente en la velocidad, profundidad, energía y capacidad de transporte del flujo (Chow, 1994).

En el contexto del modelamiento hidráulico, especialmente mediante herramientas como HEC-RAS, la adecuada definición de estos parámetros es determinante para la

precisión de los resultados, particularmente en la simulación de niveles de agua, velocidades y zonas inundables (Brunner, 2016).

Entre los parámetros más relevantes se encuentran el coeficiente de rugosidad de Manning y el régimen de flujo, los cuales controlan la resistencia al escurrimiento y la dinámica del flujo en el sistema hidráulico.

3.2.2.5.1. Coeficiente de Rugosidad de Manning.

El coeficiente de rugosidad de Manning (n) es un parámetro empírico que representa la resistencia que ofrece el lecho y las márgenes del cauce al flujo de agua. Este coeficiente depende de factores como la textura del material del fondo, la presencia de vegetación, irregularidades geométricas y obstáculos dentro del canal (Chow, 1994).

La ecuación de Manning, ampliamente utilizada en hidráulica de canales abiertos, permite estimar el caudal en función de las características del flujo y del cauce:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde:

- Q: caudal (m^3/s)
- n: coeficiente de rugosidad de Manning
- A: área hidráulica (m^2)
- R: radio hidráulico (m)
- S: pendiente del cauce

Valores elevados de n indican mayor resistencia al flujo, lo que reduce la velocidad y aumenta la profundidad del agua. Por el contrario, valores bajos corresponden a superficies más lisas, donde el flujo se desplaza con mayor facilidad.

Estudios recientes destacan que la estimación adecuada del coeficiente de Manning es uno de los principales factores de incertidumbre en modelos hidráulicos, especialmente en ríos naturales con alta variabilidad geomorfológica (Balocchi et al., 2021).

Tabla 13

Valores referenciales del coeficiente de Manning

Tipo de superficie del cauce	Rango de n
Canal de concreto liso	0.010 - 0.015
Canal revestido	0.013 - 0.020
Río natural limpio y recto	0.025 - 0.035
Río con vegetación moderada	0.035 - 0.050
Cauces irregulares o con obstáculos	0.050 - 0.080

Nota. Valores referenciales del coeficiente de Manning según el tipo de superficie hidráulica, adaptado de Chow (1994) y Brunner (2024).

3.2.2.5.2. Régimen de Flujo.

El régimen de flujo describe el comportamiento dinámico del agua en función de la relación entre las fuerzas inerciales y gravitacionales. Este comportamiento se evalúa mediante el número de Froude, el cual es un parámetro adimensional ampliamente utilizado en hidráulica (Chow, 1994).

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

Donde:

- *Fr*: número de Froude
- *V*: velocidad del flujo (m/s)
- *g*: aceleración de la gravedad (m/s²)
- *D*: profundidad hidráulica (m)

Según el valor de este parámetro, el flujo se clasifica en:

- Flujo subcrítico (*Fr* < 1): caracterizado por velocidades bajas y mayor profundidad, donde predominan las fuerzas gravitacionales.
- Flujo crítico (*Fr* = 1): condición de transición energética entre los regímenes.
- Flujo supercrítico *(Fr* > 1): flujo rápido y poco profundo, dominado por fuerzas inerciales.

La identificación del régimen de flujo es fundamental en el modelamiento hidráulico, ya que condiciona la dirección de propagación de las ondas y la estabilidad numérica de los modelos. En aplicaciones como HEC-RAS, este parámetro influye directamente en la definición de condiciones de frontera y en la simulación de eventos de crecida (Brunner, 2024).

3.2.2.6. Simulación de Inundaciones.

La simulación de inundaciones es un proceso hidrodinámico que permite representar la propagación del flujo de agua desde el cauce principal hacia las áreas adyacentes, como consecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos o incrementos significativos del caudal (Brunner, 2024; Maranzoni et al., 2022). Este tipo de análisis constituye una herramienta clave en la gestión del riesgo de desastres, ya que permite anticipar escenarios de afectación y apoyar la planificación territorial sostenible.

A través del uso de modelos hidráulicos, como HEC-RAS, es posible estimar variables fundamentales tales como la extensión de la inundación, la profundidad del flujo y la velocidad del agua, considerando la interacción entre la topografía, la geometría del cauce y las condiciones hidráulicas del sistema (Chow, 1994; Brunner, 2021).

En los últimos años, la integración de modelos hidráulicos con SIG ha permitido mejorar significativamente la precisión en la delimitación de zonas inundables, facilitando la toma de decisiones en contextos de riesgo (Oo & Humphries, 2026; Teng et al., 2017).

3.2.2.6.1. Modelación de Escenarios.

La modelación de escenarios consiste en la simulación de diferentes condiciones hidrológicas e hidráulicas con el propósito de evaluar la respuesta del sistema fluvial ante eventos de diversa magnitud y probabilidad de ocurrencia (Brunner, 2024).

Estos escenarios se construyen generalmente a partir de caudales asociados a distintos periodos de retorno, permitiendo analizar el comportamiento del flujo bajo condiciones normales, de diseño y extremas. Esta metodología es fundamental para el dimensionamiento de infraestructura hidráulica y la evaluación del riesgo de inundaciones (Tufano et al., 2023).

Los escenarios comúnmente considerados incluyen:

- Eventos frecuentes (2 a 10 años): representan condiciones hidrológicas habituales.
- Eventos de diseño (25 a 100 años): utilizados en el dimensionamiento de obras hidráulicas.
- Eventos extremos (>100 años): empleados en la evaluación de riesgos máximos y planificación ante desastres.

En HEC-RAS, estos escenarios se implementan mediante la modificación de variables como el caudal de entrada, las condiciones de frontera y los parámetros hidráulicos, lo que permite analizar la sensibilidad del sistema ante diferentes condiciones.

Tabla 14

Escenarios de simulación de inundaciones

Escenario	Periodo de retorno	Propósito
Frecuente	2 - 10 años	Evaluación de eventos ordinarios
Diseño	25 - 100 años	Dimensionamiento de infraestructura
Extremo	> 100 años	Evaluación de riesgo máximo

Nota. Escenarios de simulación empleados para evaluar diferentes magnitudes de eventos de inundación, adaptado de Brunner (2024).

3.2.2.6.2. Determinación de Zonas Inundables.

La determinación de zonas inundables consiste en identificar espacialmente las áreas susceptibles de ser afectadas por el desbordamiento de un cauce durante eventos hidrológicos extremos. Este proceso se basa en los resultados obtenidos a partir de la simulación hidráulica, los cuales son integrados y analizados mediante herramientas SIG (Brunner, 2016; Desalegn & Mulu, 2021).

Los principales parámetros utilizados para la delimitación de estas zonas son:

- Profundidad del flujo: permite evaluar el nivel de afectación potencial en infraestructura y población.

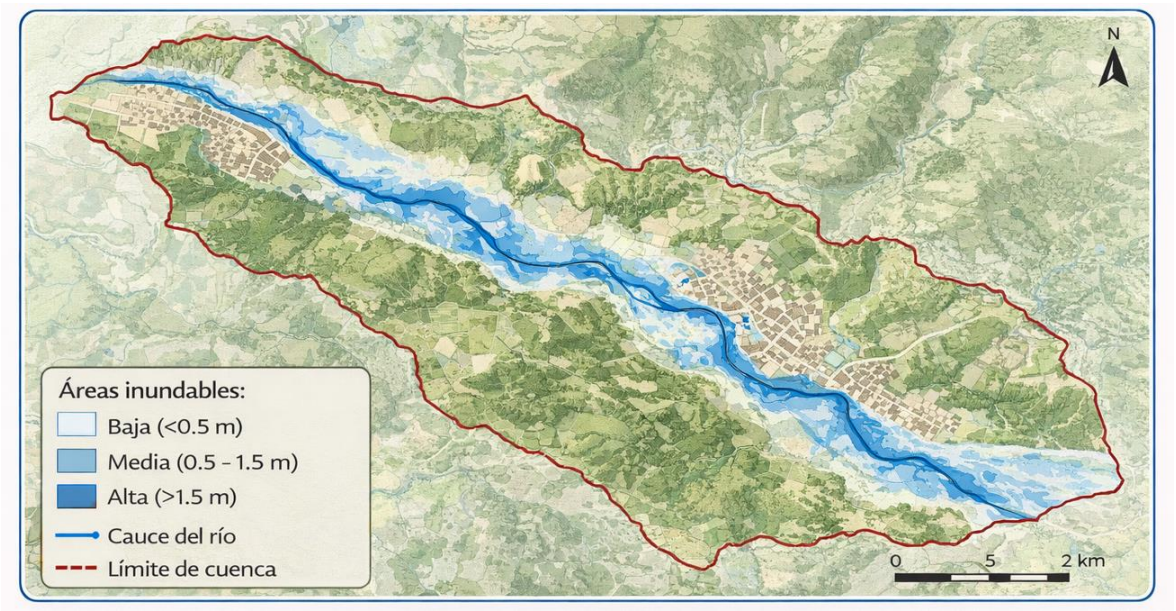
- Velocidad del flujo: relacionada con la capacidad destructiva del agua y el transporte de sedimentos.
- Extensión del área inundada: define el alcance espacial del evento.

A partir de estos parámetros, es posible clasificar las zonas inundables en diferentes niveles de peligro (bajo, medio y alto), lo cual constituye un insumo esencial para la gestión del riesgo, la planificación urbana y la implementación de los SAT.

Estudios recientes destacan que la incorporación de modelos bidimensionales (2D) en HEC-RAS mejora significativamente la representación de la dinámica de inundación en planicies aluviales, permitiendo una mejor estimación de las áreas afectadas (Vashist & Singh, 2023).

Figura 7

Delimitación de zonas inundables



Nota. Mapa temático utilizado para representar la extensión y profundidad de áreas potencialmente afectadas por inundaciones.

3.2.3. Inundaciones y Gestión del Riesgo

Las inundaciones constituyen uno de los fenómenos hidrometeorológicos más recurrentes y con mayor impacto a nivel global, afectando tanto a entornos urbanos como

rurales. Su análisis bajo el enfoque de gestión del riesgo permite comprender no solo la dinámica física del evento, sino también las condiciones sociales, económicas y territoriales que determinan su nivel de impacto (UNDRR, 2015; IPCC, 2021).

La gestión del riesgo de desastres implica un proceso sistemático orientado a la identificación, evaluación y reducción de los factores que generan vulnerabilidad frente a amenazas naturales, integrando componentes físicos, ambientales y socioeconómicos. En este contexto, las inundaciones representan un caso crítico debido a su frecuencia, magnitud y capacidad de generar pérdidas significativas (Dobrovičová et al., 2015).

3.2.3.1. Definición de Inundación.

Una inundación se define como el desbordamiento temporal de agua sobre áreas que, en condiciones normales, no se encuentran cubiertas por ella. Este fenómeno puede originarse por precipitaciones intensas, deshielos, fallas en infraestructuras hidráulicas o la saturación de sistemas de drenaje (IPCC, 2021; Adams et al., 2024).

La magnitud y duración de una inundación dependen de factores como la intensidad de la lluvia, la capacidad de infiltración del suelo, la morfología de la cuenca y la eficiencia del sistema de drenaje. En cuencas hidrográficas, este fenómeno está directamente relacionado con la capacidad del sistema fluvial para almacenar y evacuar el exceso de agua (Wohl et al., 2025).

3.2.3.2. Tipos de Inundación.

Las inundaciones pueden clasificarse según su origen y comportamiento hidrológico:

- Inundaciones fluviales: se producen por el desbordamiento de ríos debido a precipitaciones prolongadas (Bischiniotis et al., 2019).
- Inundaciones pluviales: ocurren cuando la lluvia excede la capacidad del sistema de drenaje urbano o natural.
- Inundaciones repentinas (flash floods): eventos de rápida ocurrencia, alta energía y corta duración, frecuentes en cuencas pequeñas o con pendientes pronunciadas.

- Inundaciones costeras: asociadas a marejadas, tormentas o incremento del nivel del mar.

Cada tipo presenta características particulares en términos de velocidad de respuesta, extensión y nivel de peligro, lo que implica la necesidad de enfoques diferenciados en su análisis y gestión (Smith & Ward, 1998; IPCC, 2021).

3.2.3.3. Factores Condicionantes.

La ocurrencia e intensidad de las inundaciones están determinadas por la interacción de factores naturales y antrópicos:

- Factores naturales: incluyen la intensidad y duración de la precipitación, la pendiente del terreno, la geomorfología de la cuenca, el tipo de suelo y la cobertura vegetal.
- Factores antrópicos: comprenden la urbanización no planificada, la deforestación, la ocupación de zonas inundables y la modificación de cauces naturales.

Estos factores influyen en la generación de escorrentía superficial y en la capacidad de infiltración del suelo, modificando la respuesta hidrológica de la cuenca y aumentando la probabilidad de inundación (Reed, 1999; IPCC, 2021).

3.2.3.4. Evaluación del Riesgo.

La evaluación del riesgo de inundación consiste en analizar la probabilidad de ocurrencia de un evento y sus posibles consecuencias sobre los elementos expuestos, como la población, infraestructura y ecosistemas.

De manera conceptual, el riesgo se expresa como:

$$R = P \times V$$

Donde:

- R: riesgo
- P: peligro (probabilidad de ocurrencia del evento)
- V: vulnerabilidad (grado de susceptibilidad al daño)

En enfoques más integrales, el riesgo también incorpora el concepto de exposición, entendida como la presencia de elementos susceptibles en áreas potencialmente afectadas. La evaluación del riesgo constituye una herramienta fundamental para la planificación territorial, el diseño de medidas de mitigación y la implementación de los SAT (UNDRR, 2015; IPCC, 2021).

3.2.3.5. Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo.

El análisis del riesgo de desastres se fundamenta en la interacción de tres componentes principales:

- Peligro: probabilidad de ocurrencia de un evento natural potencialmente dañino, como una inundación de determinada magnitud.
- Vulnerabilidad: grado de susceptibilidad de los elementos expuestos, influenciado por factores físicos, sociales, económicos y ambientales.
- Exposición: presencia de población, infraestructura o actividades económicas en zonas susceptibles.

El riesgo resulta de la interacción de estos componentes, por lo que su reducción implica no solo disminuir la amenaza, sino también reducir la vulnerabilidad y controlar la exposición. Este enfoque integral es promovido por organismos internacionales y constituye la base de la gestión moderna del riesgo de desastres (UNDRR, 2015).

Figura 8

Relación entre peligro, vulnerabilidad y riesgo



Nota. Representación conceptual de la relación entre peligro, vulnerabilidad y exposición como factores que determinan el nivel de riesgo.

3.2.4. Sistema de Alerta Temprana (SAT) ante Inundaciones

Los SAT constituyen instrumentos esenciales en la gestión del riesgo de desastres, particularmente frente a fenómenos hidrometeorológicos como las inundaciones. Estos sistemas permiten anticipar la ocurrencia de eventos potencialmente peligrosos mediante el monitoreo continuo de variables ambientales, el análisis de datos y la comunicación oportuna de alertas dirigidas a la población expuesta (UNDRR, 2015; WMO, 2018).

En el caso específico de inundaciones, los SAT integran información hidrológica, meteorológica e hidráulica para estimar el comportamiento de los caudales y niveles de agua, lo que facilita la toma de decisiones orientadas a la reducción de pérdidas humanas y económicas. En este contexto, el uso de modelos predictivos y sistemas de pronóstico ha incrementado la capacidad de anticipación y respuesta ante eventos extremos (Shi et al., 2020; WMO, 2025; WMO, 2026).

3.2.4.1. Definición del SAT.

Un SAT se define como el conjunto de capacidades institucionales, técnicas y sociales orientadas a la generación, procesamiento y difusión de información oportuna y eficaz sobre amenazas, con el propósito de que la población expuesta pueda adoptar medidas preventivas para reducir posibles daños (UNDRR, 2015).

Desde una perspectiva técnica, un SAT implica la integración de redes de monitoreo, herramientas de modelamiento y sistemas de comunicación que operan de manera coordinada para anticipar eventos extremos. En el ámbito hidrológico, estos sistemas se sustentan en el análisis de variables como la precipitación, el caudal y el nivel del agua, permitiendo emitir alertas ante posibles escenarios de inundación (Alfieri et al., 2012; WMO, 2018).

3.2.4.2. Importancia de los SAT en la Gestión del Riesgo.

Los SAT desempeñan un rol estratégico en la reducción del riesgo de desastres, al permitir la adopción de medidas preventivas antes de la ocurrencia de eventos peligrosos. Su implementación contribuye significativamente a disminuir la vulnerabilidad de las

poblaciones y a fortalecer su capacidad de adaptación frente a condiciones climáticas extremas (Field et al., 2014; IPCC, 2021).

Entre los principales beneficios de los SAT destacan la reducción de la mortalidad, la minimización de pérdidas económicas y el fortalecimiento de la resiliencia comunitaria. Asimismo, estos sistemas favorecen la planificación territorial y la toma de decisiones basada en información científica confiable (Basher, 2006; WMO, 2018).

Tabla 15

Importancia de los SAT en la gestión del riesgo

Aspecto	Descripción
Prevención	Permiten anticipar la ocurrencia de eventos peligrosos
Protección	Reducen pérdidas humanas y daños materiales
Respuesta	Mejoran la toma de decisiones en situaciones de emergencia
Resiliencia	Fortalecen la capacidad adaptativa de la población

Nota. Adaptado de UNDRR (2015) y WMO (2018)

3.2.4.3. Tipos de SAT.

Los SAT pueden clasificarse según su estructura organizativa, nivel tecnológico y grado de participación social, lo cual permite su adaptación a diferentes contextos territoriales (Basher, 2006).

Entre los principales tipos se encuentran:

- Sistemas institucionales: gestionados por entidades gubernamentales o instituciones técnicas, basados en redes de monitoreo y herramientas de modelamiento avanzado.
- Sistemas comunitarios: fundamentados en la participación activa de la población local, incorporando conocimientos tradicionales y mecanismos de comunicación directa.
- Sistemas híbridos: integran capacidades técnicas e institucionales con la participación comunitaria, optimizando la eficiencia del sistema.

Estos enfoques permiten mejorar la efectividad de los SAT en función de las características del territorio y la disponibilidad de recursos (Bhardwaj et al., 2021).

3.2.4.4. Componentes del SAT.

Un SAT efectivo se estructura sobre cuatro componentes fundamentales que funcionan de manera articulada, de acuerdo con el marco internacional para la reducción del riesgo de desastres (Acosta-Coll et al., 2018; UNDRR, 2015).

Tabla 16

Componentes del SAT

Componente	Descripción
Conocimiento del riesgo	Identificación de amenazas, vulnerabilidad y exposición
Monitoreo y seguimiento	Observación continua de variables hidrometeorológicas
Difusión y comunicación	Transmisión oportuna de alertas
Capacidad de respuesta	Preparación y acción frente a eventos

Nota. Componentes fundamentales de un SAT para la gestión del riesgo. Adaptado de UNDRR (2015); WMO (2018)

3.2.4.5. Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SAT-COM).

El SAT-COM constituye un enfoque participativo dentro de la gestión del riesgo de desastres, en el cual la población local desempeña un rol activo en la identificación, monitoreo y respuesta ante amenazas, particularmente aquellas de origen hidrometeorológico como las inundaciones. A diferencia de los sistemas convencionales de carácter institucional, el SAT-COM se fundamenta en la organización social, el fortalecimiento de capacidades locales y el uso de conocimientos tradicionales para la reducción del riesgo (INDECI, 2018).

De acuerdo con la Guía Técnica para la Implementación del SAT-COM del INDECI, este sistema se define como un conjunto articulado de acciones, procedimientos y mecanismos desarrollados por la comunidad en coordinación con entidades técnicas, con el objetivo de anticipar la ocurrencia de eventos peligrosos y facilitar una respuesta oportuna (INDECI, 2019). Este enfoque ha demostrado ser eficaz en contextos rurales o

zonas con limitada infraestructura tecnológica, donde la participación comunitaria resulta clave para la sostenibilidad del sistema (UNDRR, 2015).

Asimismo, diversos estudios destacan que los sistemas comunitarios incrementan significativamente la capacidad de respuesta local y reducen la mortalidad asociada a eventos extremos, al mejorar la comunicación del riesgo y la apropiación social de las medidas preventivas (WMO, 2025). En el caso del Perú, este enfoque se enmarca dentro del SINAGERD, establecido mediante la Ley N.º 29664, el cual promueve la participación activa de la población en los procesos de gestión prospectiva, correctiva y reactiva del riesgo de desastres (Congreso de la República del Perú, 2011; PCM, 2011).

En este contexto, el SAT-COM se consolida como un instrumento clave para la gestión descentralizada del riesgo, especialmente en zonas con alta vulnerabilidad, al integrar el conocimiento local con el soporte técnico institucional y fortalecer la resiliencia comunitaria frente a eventos adversos.

3.2.4.6. Características del SAT-COM.

El SAT-COM presenta características particulares que lo diferencian de los SAT convencionales, destacando su enfoque social, territorial y participativo. Estas características favorecen la apropiación del sistema por parte de la comunidad y garantizan su sostenibilidad en el tiempo (INDECI, 2015a).

Tabla 17

Características del SAT-COM

Característica	Descripción
Participativo	Involucra activamente a la población en todas las fases del sistema
Inclusivo	Considera grupos vulnerables (niños, adultos mayores y personas con discapacidad)
Territorial	Adaptado a las condiciones físicas, sociales y culturales del entorno
Preventivo	Enfocado en la reducción del riesgo antes de la ocurrencia del desastre
Sostenible	Utiliza recursos locales y promueve la autogestión comunitaria
Articulado	Coordinado con las instituciones del SINAGERD

Nota. Características principales de un SAT-COM orientado a la participación comunitaria y la gestión del riesgo.

Estas características permiten que el SAT-COM trascienda su función de alerta, convirtiéndose en una herramienta integral para el fortalecimiento de la resiliencia comunitaria y la reducción del riesgo de desastres (PCM, 2015).

3.2.4.7. Diseño e Implementación del SAT-COM.

El diseño e implementación del SAT-COM constituye un proceso integral que articula componentes técnicos, organizativos y sociales. Este proceso debe desarrollarse de manera progresiva, participativa y contextualizada, garantizando la apropiación del sistema por parte de la comunidad (INDECI, 2015a).

El SAT-COM se estructura en cuatro componentes fundamentales, los cuales deben ser implementados de manera articulada para asegurar su funcionamiento adecuado y su efectividad en la gestión del riesgo.

Figura 9

Componentes del SAT-COM



Nota. Componentes principales del SAT-COM y su articulación dentro de la gestión del riesgo. Adaptado de INDECI (2018).

3.2.4.7.1. Conocimiento del Riesgo.

El conocimiento del riesgo constituye la base del SAT-COM, ya que permite identificar y analizar las amenazas, vulnerabilidades y niveles de exposición presentes en el territorio. Este componente incluye la elaboración de mapas de riesgo, la identificación de zonas inundables y el análisis de factores condicionantes que incrementan la probabilidad de ocurrencia de desastres (INDECI, 2018).

Asimismo, este proceso integra información técnica y conocimiento local, lo cual contribuye a una mejor comprensión del comportamiento de los fenómenos naturales y fortalece la participación comunitaria.

3.2.4.7.2. Monitoreo y Seguimiento.

El monitoreo y seguimiento consiste en la observación continua de variables hidrometeorológicas que permiten identificar cambios en las condiciones de riesgo. En el caso de inundaciones, estas variables incluyen la precipitación, el nivel del agua y el caudal de los ríos. Según INDECI (2018), este proceso puede realizarse mediante instrumentos técnicos, como pluviómetros y estaciones hidrométricas, así como a través de sistemas comunitarios de vigilancia, lo que permite una respuesta más rápida y adaptada al contexto local.

3.2.4.7.3. Difusión y Comunicación de la Alerta.

Este componente se refiere a la transmisión oportuna, clara y efectiva de la información de alerta hacia la población. La comunicación debe ser accesible y comprensible para todos los miembros de la comunidad, utilizando diversos medios como sirenas, radios comunitarias, altoparlantes o mensajes de texto (INDECI, 2015b).

La efectividad de este proceso depende de la rapidez de difusión, la confiabilidad de la información y la capacidad de la población para interpretar correctamente las señales de alerta.

3.2.4.7.4. Capacidad de Respuesta.

La capacidad de respuesta implica la preparación y organización de la comunidad para actuar de manera adecuada frente a una alerta. Este componente incluye la elaboración de planes de emergencia, la identificación de rutas de evacuación, la delimitación de zonas seguras y la realización de simulacros periódicos (INDECI, 2018).

Una adecuada capacidad de respuesta permite reducir significativamente los impactos de las inundaciones, facilitando una evacuación ordenada y una reacción oportuna ante eventos extremos.

3.2.4.8. Integración del Modelamiento Hidrológico e Hidráulico en los SAT.

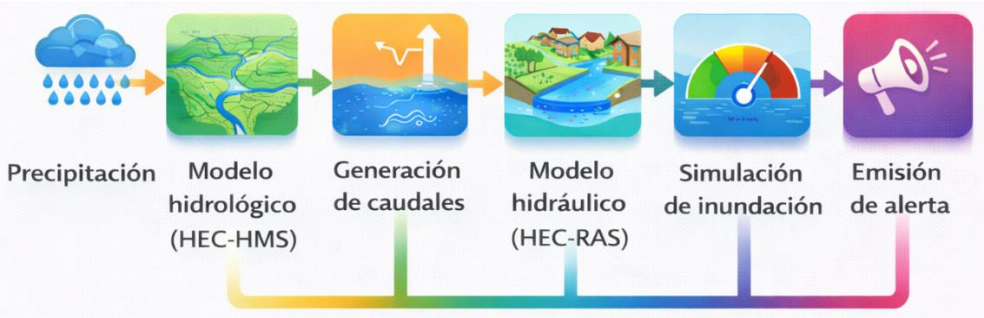
La integración del modelamiento hidrológico e hidráulico dentro de los SAT representa un avance significativo en la gestión del riesgo de inundaciones, ya que permite la generación de alertas basadas en pronósticos y simulaciones, superando el enfoque tradicional basado únicamente en observaciones en tiempo real (Dhote et al., 2018; Emerton et al., 2016).

El modelamiento hidrológico, mediante herramientas como HEC-HMS, permite simular la transformación de la precipitación en escorrentía, estimando los caudales generados en una cuenca hidrográfica. Por otro lado, el modelamiento hidráulico, utilizando software como HEC-RAS, permite analizar el comportamiento del flujo en los cauces y determinar las áreas potencialmente inundables, considerando la geometría del terreno y las condiciones hidráulicas (Brunner, 2016; USACE, 2025).

La integración de ambos enfoques posibilita el desarrollo de sistemas predictivos que permiten anticipar la ocurrencia de inundaciones con mayor precisión, facilitando la toma de decisiones en tiempo oportuno. En este contexto, la información meteorológica (precipitación) constituye la entrada principal del sistema, la cual es procesada mediante modelos hidrológicos para generar caudales, que posteriormente son utilizados como entrada en modelos hidráulicos para simular la inundación (Dhote et al., 2018; Grimaldi et al., 2019).

Figura 10

Integración del modelamiento hidrológico e hidráulico en un SAT



Nota. Integración de los modelos hidrológico e hidráulico como base para el funcionamiento de un sistema de alerta temprana.

Desde el punto de vista operativo, esta integración permite:

- Anticipar eventos de inundación con mayor precisión
- Evaluar múltiples escenarios de precipitación (tormentas de diseño)
- Identificar zonas críticas de inundación
- Definir umbrales de alerta basados en variables hidrológicas e hidráulicas

Asimismo, investigaciones recientes destacan que la integración de modelos con sistemas de pronóstico meteorológico mejora significativamente la capacidad predictiva de los SAT, reduciendo la incertidumbre en la estimación de eventos extremos (Cloke & Pappenberger, 2009).

Tabla 18

Rol del modelamiento en los SAT

Componente	Función
HEC-HMS	Simulación del proceso lluvia-escorrentía
HEC-RAS	Simulación hidráulica del flujo en cauces
Integración de modelos	Predicción de inundaciones
SAT	Emisión de alertas anticipadas

Nota. Función del modelamiento hidrológico e hidráulico dentro de los sistemas de alerta temprana para la predicción de inundaciones.

La incorporación del modelamiento en los SAT permite evolucionar desde sistemas reactivos hacia sistemas predictivos, incrementando la eficiencia en la gestión del riesgo y la capacidad de respuesta ante eventos hidrometeorológicos extremos.

3.2.4.9. Umbrales de Alerta Hidrológica.

Los umbrales de alerta hidrológica corresponden a valores críticos de variables como el caudal, el nivel de agua o la precipitación, cuya superación activa diferentes niveles de alerta dentro de un SAT (INDECI, 2018; WMO, 2018).

Estos umbrales se establecen mediante el análisis de datos históricos, la modelación de eventos extremos y la identificación de condiciones que generan inundaciones. Su adecuada definición es fundamental para garantizar la efectividad del

SAT, evitando tanto falsas alarmas como respuestas tardías (Cloke & Pappenberger, 2009; WMO, 2011).

Tabla 19

Clasificación de niveles de alerta hidrológica

Nivel	Condición	Acción
Verde	Condición normal	Monitoreo continuo
Amarillo	Riesgo moderado	Preparación
Naranja	Alto riesgo	Alerta preventiva
Rojo	Emergencia	Evacuación inmediata

Nota. Clasificación de niveles de alerta hidrológica para la comunicación y respuesta ante eventos peligrosos. Adaptado de WMO (2011)

Los umbrales pueden definirse en función de diferentes variables hidrológicas:

- Nivel del agua (m)
- Caudal (m^3/s)
- Precipitación acumulada (mm)

En sistemas modernos, estos valores se determinan mediante simulaciones hidrológicas e hidráulicas, utilizando herramientas como HEC-HMS y HEC-RAS, lo que permite asociar umbrales específicos a escenarios de inundación previamente modelados (Hydrologic Engineering Center, s. f.).

Figura 11

Relación entre caudal y niveles de alerta



Nota. Relación conceptual entre la variación del caudal y la definición de niveles de alerta hidrológica. Adaptado de INDECI (2018).

La correcta calibración de los umbrales es esencial para la confiabilidad del sistema, ya que permite emitir alertas oportunas basadas en evidencia técnica. Estudios recientes señalan que la integración de umbrales dinámicos, ajustados mediante modelos predictivos y datos en tiempo real, mejora significativamente la precisión de los SAT (Astagneau et al., 2024).

3.3. Definición de Términos

Caudal

El caudal se define como el volumen de agua que atraviesa una sección transversal de un cauce por unidad de tiempo, generalmente expresado en metros cúbicos por segundo (m^3/s). Es una variable fundamental para el análisis hidráulico y la gestión de recursos hídricos (Chow et al., 1988).

Cuenca Hidrográfica

Se define como el área geográfica delimitada por divisorias topográficas dentro de la cual toda la precipitación converge hacia un punto común de salida, generalmente un cauce principal. Constituye la unidad fundamental de análisis en hidrología, ya que integra los procesos de precipitación, infiltración, escorrentía y almacenamiento (Chow et al., 1988).

Curva Número (CN)

La Curva Número (Curve Number, CN) es un parámetro empírico desarrollado por el Soil Conservation Service que permite estimar la escorrentía directa a partir de la precipitación, considerando el tipo de suelo, uso del suelo y condiciones de humedad antecedente (USDA-SCS, 1986; NSCS, 2025).

Curvas IDF

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) representan la relación entre la intensidad de la lluvia, su duración y su frecuencia de ocurrencia. Son utilizadas en el diseño de infraestructura hidráulica y en la estimación de tormentas de diseño (Kumar et al., 2024; Lanciotti et al., 2022)

HEC-HMS

Software del Centro de Ingeniería Hidrológica - Sistema de Modelado Hidrológico (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*, HEC-HMS), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (*United States Army Corps of Engineers*, USACE), utilizado para simular procesos hidrológicos de precipitación-escorrentía en cuencas hidrográficas. Permite representar procesos de pérdidas, transformación lluvia-escorrentía y enrutamiento del flujo (USACE, 2025).

HEC-RAS

Software del Centro de Ingeniería Hidrológica - Sistema de Análisis Fluvial (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*, HEC-RAS), desarrollado por el USACE, utilizado para el modelamiento hidráulico de ríos y canales bajo condiciones de flujo permanente y no permanente. Asimismo, permite simular la propagación del flujo y delimitar zonas inundables mediante análisis hidrodinámicos (Brunner, 2024).

Hietograma

El hietograma es la representación gráfica de la distribución temporal de la precipitación durante un evento de lluvia, mostrando la variación de la intensidad en función del tiempo. Es una herramienta clave en el análisis de tormentas y modelamiento hidrológico (Chow et al., 1988).

Inundación

Una inundación es la ocupación temporal de áreas normalmente secas por agua, como consecuencia del desbordamiento de ríos, lluvias intensas o fallas en sistemas de drenaje. Este fenómeno representa una de las amenazas naturales más frecuentes y con mayor impacto a nivel global (UNDRR, 2015; IPCC, 2022).

Modelo Digital de Elevación (DEM)

El Modelo Digital de Elevación (DEM) es una representación numérica de la superficie del terreno que describe la variación altimétrica mediante datos raster o vectoriales. Es una herramienta esencial en el análisis hidrológico, ya que permite la

delimitación de cuencas, cálculo de pendientes y modelación de flujos (USGS, 2025; Guth et al, 2021).

Periodo de Retorno

El periodo de retorno es el intervalo promedio de tiempo en el cual un evento hidrológico de determinada magnitud puede ser igualado o superado. Es un concepto probabilístico ampliamente utilizado en el diseño hidráulico y la evaluación del riesgo (Chow et al., 1988).

Precipitación

La precipitación es el proceso mediante el cual el agua en estado líquido o sólido cae desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. Constituye la principal fuente de ingreso de agua en el ciclo hidrológico y condiciona la generación de escorrentía y recarga de acuíferos (WMO, 2018; IPCC, 2021).

Riesgo

El riesgo se define como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso y sus consecuencias potenciales sobre la sociedad, la infraestructura y el medio ambiente. Este concepto integra el peligro, la vulnerabilidad y la exposición (UNDRR, 2015).

Rugosidad de Manning

La rugosidad de Manning es un coeficiente empírico que representa la resistencia al flujo en canales abiertos y ríos, influenciado por factores como la vegetación, irregularidad del cauce y material del lecho. Es un parámetro fundamental en la ecuación de Manning para el cálculo del caudal (Chow et al., 1988).

Sistema de Alerta Temprana (SAT)

Un SAT es el conjunto de capacidades técnicas, institucionales y sociales orientadas a monitorear, predecir y comunicar amenazas, con el objetivo de reducir sus impactos sobre la población y el entorno (PCM, 2015; UNDRR, 2017a).

Subcuenca

Una subcuenca corresponde a una subdivisión de la cuenca hidrográfica principal, delimitada con fines de análisis hidrológico detallado. Estas unidades permiten representar espacialmente la variabilidad de los procesos hidrológicos y facilitan la modelación distribuida del sistema (Eslamian, 2014).

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad corresponde al grado de susceptibilidad de un sistema o población frente a un evento peligroso, considerando factores físicos, sociales, económicos y ambientales que condicionan su capacidad de respuesta (UNDRR, 2017b).

IV. Metodología

4.1. Tipo y Nivel de Investigación

Enfoque de investigación

La presente investigación adoptó un enfoque cuantitativo, debido a que se trabajó con información numérica proveniente de registros hidrometeorológicos, parámetros físicos de la cuenca, datos topográficos y resultados obtenidos mediante simulaciones hidrológicas e hidráulicas. A través de la aplicación de modelos hidrológicos e hidráulicos fue posible obtener indicadores cuantificables, tales como precipitaciones de diseño, caudales máximos, niveles de agua, velocidades de flujo y áreas de inundación, los cuales permitieron analizar objetivamente el comportamiento de la quebrada Totora frente a diferentes escenarios hidrológicos.

Según Hernández-Sampieri et al. (2014), el enfoque cuantitativo se basa en la recolección y análisis de datos numéricos mediante procedimientos sistemáticos y estructurados, con el propósito de responder preguntas de investigación y sustentar los hallazgos en evidencia medible.

Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, ya que estuvo orientada a la generación de una solución técnica frente a una problemática real asociada al riesgo de inundaciones por desbordamiento de la quebrada Totora, ubicada en el distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, región Apurímac.

En este contexto, se emplearon conocimientos científicos y herramientas especializadas de modelamiento hidrológico e hidráulico con el propósito de generar información técnica que permita sustentar la propuesta de un SAT-COM, orientado a la reducción del riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos.

De acuerdo con Hernández y Mendoza (2018), la investigación aplicada utiliza el conocimiento científico para dar solución a problemas concretos del entorno. En esa misma línea, Haro et al. (2024) señalan que este tipo de estudios se orienta a la generación de alternativas prácticas que contribuyan a la resolución de situaciones reales.

Asimismo, el estudio no se limitó a describir el comportamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada Totora, sino que utilizó los resultados del modelamiento para la formulación de la propuesta del SAT. En concordancia con Vásquez et al. (2023), la investigación aplicada permite emplear métodos científicos y herramientas especializadas para analizar problemas específicos del entorno y generar alternativas de solución sustentadas en evidencia técnica y científica.

Nivel de investigación

El nivel de investigación fue descriptivo-explicativo. Fue descriptivo porque permitió caracterizar las condiciones físicas, morfométricas e hidrológicas de la cuenca de la quebrada Totora, mediante el análisis de parámetros como área, perímetro, pendiente, longitud del cauce principal, red de drenaje, precipitación máxima y demás variables representativas del sistema hidrográfico. Asimismo, se describieron las condiciones hidráulicas del cauce bajo diferentes escenarios de caudal y períodos de retorno.

Por otro lado, presentó un nivel explicativo porque permitió analizar la influencia de las precipitaciones extremas sobre la generación de caudales y el comportamiento hidráulico de la quebrada Totora, evaluando cómo estas condiciones determinan la extensión y profundidad de las áreas inundables bajo diferentes escenarios hidrológicos.

Según Ramos-Galarza (2020), los estudios descriptivos permiten identificar y caracterizar las propiedades de un fenómeno dentro de un contexto determinado, mientras que los estudios explicativos buscan comprender las relaciones existentes entre variables y los factores que influyen en su comportamiento. En ese sentido, el nivel explicativo permitió comprender cómo las precipitaciones extremas influyen en la generación de caudales y en la dinámica hidráulica de la quebrada Totora, cuyos resultados constituyeron el sustento técnico para la formulación de la propuesta del SAT-COM ante inundaciones.

Diseño de Investigación

La investigación adoptó un diseño no experimental, transversal y propositivo. Fue no experimental debido a que no se manipularon deliberadamente las variables, sino que se analizaron las condiciones existentes de la cuenca de la quebrada Totora a partir de

información hidrometeorológica, geoespacial y topográfica, complementada con simulaciones computacionales. Al respecto, Hernández-Sampieri et al. (2014), señalan que los diseños no experimentales se caracterizan por observar y analizar los fenómenos tal como ocurren en su contexto natural, sin intervenir directamente sobre las variables.

Asimismo, la investigación presentó un corte transversal, debido a que la recopilación, procesamiento y análisis de la información se realizaron en un periodo específico de estudio, considerando las condiciones existentes y la información disponible correspondiente al año 2025. Este diseño permitió analizar el comportamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada Totora en un contexto temporal determinado, sin efectuar seguimiento a través del tiempo.

Finalmente, el estudio tuvo un carácter propositivo, debido a que los resultados del modelamiento hidrológico e hidráulico sirvieron como base para formular una propuesta de un SAT-COM, orientado a la prevención y reducción del riesgo de inundaciones. De acuerdo con Vásquez et al. (2023), las investigaciones de carácter propositivo se orientan a plantear alternativas de solución sustentadas en los resultados obtenidos durante el proceso investigativo, contribuyendo a la atención de una problemática específica mediante propuestas técnicamente fundamentadas.

4.2. Ámbito Temporal y Espacial

Temporal

La presente investigación se desarrolló durante el año 2025, periodo en el cual se efectuó el procesamiento, análisis e interpretación de la información hidrológica e hidráulica correspondiente al área de estudio.

Para el desarrollo del modelamiento hidrológico se emplearon registros históricos de precipitación obtenidos de fuentes oficiales como el SENAMHI, los cuales permitieron caracterizar el comportamiento de las lluvias en la zona de estudio. A partir de esta información, se determinaron las precipitaciones máximas en 24 horas, la estimación de

lluvias de diseño, los períodos de retorno y los caudales máximos asociados, mediante la aplicación del software HEC-HMS v.4.13.

En este sentido, el análisis temporal permitió representar distintos escenarios hidrológicos extremos, los cuales sirvieron como insumo fundamental para el posterior modelamiento hidráulico mediante HEC-RAS. De acuerdo con Hernández y Mendoza (2018), la delimitación temporal permite establecer el periodo de referencia en el cual se desarrolla el estudio y se analizan los datos necesarios para responder a los objetivos de investigación.

Espacial

El ámbito espacial de la investigación comprende la cuenca de la quebrada Totora, ubicada en el distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, departamento de Apurímac.

El área de estudio incluye la cuenca hidrográfica en su totalidad, el cauce principal de la quebrada y los sectores Totora y Oropesa, considerados como zonas de influencia directa y potencialmente expuestas a eventos de inundación por desbordamiento.

Asimismo, se consideró un tramo de modelamiento hidráulico de aproximadamente 1680 metros, correspondiente al sector seleccionado como muestra de estudio, debido a su mayor susceptibilidad a inundaciones, la presencia de áreas potencialmente expuestas y su representatividad hidráulica dentro de la quebrada Totora.

El análisis espacial permitió caracterizar la cuenca desde el punto de vista morfométrico e hidrológico, así como simular el comportamiento del flujo y delimitar las áreas inundables mediante el uso de modelos hidráulicos especializados.

4.3. Población y Muestra

Población

La población de estudio estuvo constituida por la cuenca hidrográfica de la quebrada Totora y el tramo del cauce ubicado en los sectores Totora y Oropesa, en el distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, departamento de Apurímac.

Esta población incluye los elementos físicos e hidrológicos que conforman el sistema de drenaje, tales como la red hidrográfica, la morfometría de la cuenca, el cauce principal, las áreas potencialmente inundables y la información hidrometeorológica necesaria para el análisis del comportamiento del sistema.

La delimitación de esta población se justifica debido a que el estudio se orienta a evaluar el comportamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada ante eventos extremos de precipitación, así como a identificar zonas susceptibles de inundación que permitan sustentar la propuesta de un SAT-COM.

De acuerdo con Hernández y Mendoza (2018), la población corresponde al conjunto total de elementos que comparten características comunes vinculadas al fenómeno de estudio. Asimismo, Vásquez et al. (2023), señalan que, en investigaciones aplicadas, la población está constituida por el conjunto de elementos o unidades de análisis sobre las cuales se estudia un fenómeno determinado y de las cuales se obtiene la información necesaria para alcanzar los objetivos planteados.

Muestra

La muestra estuvo conformada por un tramo de aproximadamente 1680 metros de la quebrada Totora, ubicado en los sectores Totora y Oropesa. Este tramo fue seleccionado por presentar la mayor susceptibilidad a eventos de inundación por desbordamiento, considerando criterios técnicos como la concentración del flujo, la presencia de elementos expuestos y vulnerables, la disponibilidad de información topográfica y la representatividad hidráulica del sector.

La selección de este tramo respondió a criterios técnicos vinculados con los objetivos de la investigación, priorizando el sector con mayor potencial de afectación por inundaciones, la presencia de elementos expuestos y las condiciones necesarias para evaluar el comportamiento hidráulico del cauce y delimitar las áreas inundables. Según Hernández y Mendoza (2018), la muestra en estudios no probabilísticos puede seleccionarse de manera intencional cuando las unidades de análisis poseen características específicas que resultan relevantes para el fenómeno investigado.

En este tramo se desarrolló el modelamiento hidráulico mediante el software HEC-RAS v.6.6, lo que permitió simular distintos escenarios de caudal, identificar áreas inundables y evaluar el comportamiento del flujo en condiciones críticas.

Muestreo

El muestreo fue de tipo no probabilístico e intencional, debido a que la selección del tramo de estudio no se realizó de manera aleatoria, sino en función de criterios técnicos vinculados a los objetivos de la investigación. Entre los principales criterios considerados se incluyeron la exposición al peligro de inundación, la presencia de elementos expuestos y vulnerables, la disponibilidad de información geoespacial e hidrometeorológica y la viabilidad para la aplicación de modelos hidrológicos e hidráulicos.

En este sentido, se seleccionó deliberadamente el tramo de mayor relevancia hidráulica de la quebrada Totora con el propósito de analizar escenarios de inundación representativos y generar información técnica que sustente la propuesta del SAT-COM. Según Hernández y Mendoza (2018), el muestreo no probabilístico permite seleccionar unidades de análisis a partir de criterios específicos definidos por el investigador, especialmente cuando se busca profundidad técnica más que generalización estadística. Asimismo, este tipo de muestreo es ampliamente utilizado en investigaciones aplicadas donde se requiere estudiar áreas críticas o de interés particular para el análisis de fenómenos físicos y territoriales (Vásquez et al., 2023; Haro et al., 2024).

4.4. Instrumentos

Técnica de Recolección de Datos

La recolección de datos se realizó mediante técnicas orientadas a obtener información hidrológica, geoespacial, topográfica e hidráulica necesaria para el desarrollo del modelamiento de la quebrada Totora. Dada la naturaleza del estudio, se emplearon fuentes documentales, herramientas SIG, observación de campo y modelos computacionales, los cuales permitieron caracterizar la cuenca, simular escenarios de avenida e identificar áreas susceptibles de inundación.

De acuerdo con Hernández y Mendoza (2018), las técnicas de recolección de datos constituyen procedimientos sistemáticos orientados a obtener información relevante del fenómeno de estudio, mientras que los instrumentos son los medios utilizados para registrar, procesar y analizar dicha información.

a. Revisión documental

Esta técnica permitió recopilar información secundaria relacionada con las características hidrológicas, geográficas y territoriales de la cuenca de la quebrada Totora.

Se obtuvieron registros históricos de precipitación, cartografía temática, modelos digitales de elevación (DEM) y documentos técnicos vinculados a la gestión del riesgo de desastres.

Las principales fuentes consultadas fueron el SENAMHI, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y documentos técnicos del INDECI.

b. Observación técnica de campo

Permitió verificar las condiciones físicas del cauce y generar información primaria para complementar y contrastar la información obtenida mediante fuentes secundarias. Mediante visitas de campo se identificaron características geomorfológicas, condiciones del terreno, zonas potencialmente inundables y elementos expuestos dentro del área de influencia hidráulica.

c. Análisis geoespacial

Se aplicó el uso de SIG para procesar información territorial. Esta técnica permitió delimitar la cuenca hidrográfica, generar la red de drenaje, calcular parámetros morfométricos, analizar pendientes y uso del suelo, así como elaborar mapas temáticos necesarios para la modelación hidrológica e hidráulica.

d. Modelamiento hidrológico

Se empleó como técnica de simulación computacional para representar la transformación de la precipitación en escorrentía superficial. Mediante el software HEC-HMS v.4.13 se estimaron hidrogramas de avenida, caudales máximos y tiempos al pico para diferentes períodos de retorno.

e. Modelamiento hidráulico

Permitió analizar el comportamiento del flujo dentro del cauce ante distintos escenarios de caudal. Con el software HEC-RAS v.6.6 se determinaron niveles de agua, tirantes hidráulicos, velocidades de flujo y áreas inundables, lo que permitió identificar zonas críticas dentro del área de estudio.

Instrumentos de Recolección de Datos

De acuerdo con Medina et al. (2023), los instrumentos de recolección de datos constituyen los medios utilizados para obtener, registrar, organizar y procesar información relevante para el desarrollo de una investigación. En función de las características del presente estudio, se emplearon instrumentos documentales, hidrometeorológicos, geoespaciales, topográficos y computacionales que permitieron recopilar y analizar información necesaria para el modelamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada Totora y la formulación de la propuesta del SAT-COM. Los instrumentos utilizados en la investigación se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20

Instrumentos de recolección de datos

Técnica	Instrumentos empleados
Revisión documental	Registros de precipitación SENAMHI, información ANA, cartografía oficial e informes INDECI
Observación técnica de campo	GPS, fichas de campo, registro fotográfico y levantamiento topográfico
Análisis geoespacial	Modelo Digital de Elevación (DEM), imágenes satelitales, ArcGIS Pro, QGIS y Google Earth Pro
Modelamiento hidrológico	Software HEC-HMS v.4.13, parámetros físicos de la cuenca y datos de precipitación
Modelamiento hidráulico	Software HEC-RAS v.6.6, modelo digital del terreno y secciones transversales del cauce

Nota. Instrumentos empleados para la recolección de los datos del estudio.

Validez y Confiabilidad de los Instrumentos de Investigación

La presente investigación empleó información hidrometeorológica, geoespacial y topográfica, así como herramientas y modelos computacionales para el desarrollo del modelamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada Totora. Debido a la naturaleza técnica del estudio, no se utilizaron cuestionarios, encuestas ni escalas de medición; por ello, la validez y confiabilidad se sustentaron en la calidad de las fuentes de información utilizadas, la consistencia de los datos procesados y la reproducibilidad de los procedimientos aplicados.

Validación

La validez estuvo relacionada con la capacidad de los datos, instrumentos y procedimientos empleados para representar adecuadamente el fenómeno objeto de estudio. Según Cabello et al. (2021), la validez permite determinar si los instrumentos utilizados son pertinentes para medir o describir aquello que se pretende investigar.

En la presente investigación, la validez se garantizó mediante el uso de información proveniente de fuentes primarias y secundarias. Las fuentes primarias correspondieron a la observación técnica de campo, el registro fotográfico y el levantamiento topográfico fotogramétrico realizado mediante un vehículo aéreo no tripulado (dron) en el área de estudio. Por su parte, las fuentes secundarias incluyeron registros hidrometeorológicos, modelos digitales de elevación (DEM), cartografía temática, información geoespacial existente y documentación técnica obtenida de entidades oficiales como el SENAMHI, la ANA y el INDECI.

Asimismo, se emplearon herramientas especializadas ampliamente reconocidas en estudios hidrológicos e hidráulicos, como los softwares HEC-HMS v.4.13 y HEC-RAS v.6.6. De igual manera, se verificó la consistencia, integridad y pertinencia de los datos utilizados, asegurando su correspondencia con los objetivos, variables, dimensiones e indicadores definidos en la matriz de consistencia de la investigación.

Confiabilidad

La confiabilidad estuvo asociada a la estabilidad, consistencia y reproducibilidad de los procedimientos desarrollados durante la investigación. De acuerdo con Tavakol y Dennick (2011), la confiabilidad se refiere a la capacidad de un método para producir resultados consistentes cuando se aplica bajo condiciones similares. Asimismo, en investigaciones de carácter técnico y aplicado, la confiabilidad también se relaciona con la posibilidad de reproducir los procedimientos y obtener resultados comparables cuando se emplean los mismos datos, métodos y condiciones de análisis (Vásquez et al., 2023).

En ese sentido, la confiabilidad se aseguró mediante el uso de registros oficiales previamente depurados, el control de calidad de la información hidrometeorológica, la revisión de los parámetros físicos y geométricos de la cuenca y la adecuada configuración de los modelos hidrológicos e hidráulicos. Asimismo, se verificó la coherencia entre los caudales simulados, los niveles de inundación obtenidos y las condiciones observadas durante el trabajo de campo. La conservación de los archivos digitales, parámetros de entrada y configuraciones de modelación permitió garantizar la trazabilidad y reproducibilidad de las simulaciones realizadas.

En consecuencia, la validez y confiabilidad de la investigación estuvieron respaldadas por la calidad de las fuentes de información empleadas, la aplicación de procedimientos técnicos estandarizados y el uso de herramientas computacionales reconocidas internacionalmente para el análisis hidrológico e hidráulico, proporcionando resultados técnicamente consistentes y metodológicamente verificables para sustentar la propuesta del SAT-COM ante inundaciones.

4.5. Procedimientos

El desarrollo de la investigación se realizó mediante una secuencia metodológica estructurada y sistemática, orientada a la recopilación, procesamiento, análisis e interpretación de información hidrológica, hidráulica y geoespacial necesaria para alcanzar los objetivos planteados. Según Hernández y Mendoza (2018), el procedimiento

metodológico comprende el conjunto ordenado de actividades que permiten obtener evidencias válidas y confiables para responder al problema de investigación. Asimismo, Vásquez et al. (2023) señalan que toda investigación científica requiere una organización secuencial de etapas que faciliten la obtención de resultados técnicamente sustentados y coherentes con los objetivos propuestos. En ese sentido, la presente investigación se desarrolló a través de las siguientes etapas:

a. Recopilación de información

En esta etapa se recopiló información hidrometeorológica, geoespacial y topográfica proveniente de fuentes oficiales y especializadas. Se obtuvieron registros históricos de precipitación del SENAMHI, modelos digitales de elevación (DEM), cartografía temática e información territorial necesaria para el desarrollo de la investigación. Estos insumos constituyeron la base para la caracterización de la cuenca y la construcción de los modelos hidrológicos e hidráulicos.

b. Caracterización morfométrica e hidrológica de la cuenca

Mediante herramientas de SIG, principalmente ArcGIS Pro y QGIS, se realizó la delimitación de la cuenca hidrográfica de la quebrada Totora. Asimismo, se determinaron parámetros morfométricos e hidrológicos como el área de drenaje, perímetro, pendiente media, longitud del cauce principal, red de drenaje, uso del suelo, tipo de suelo y tiempo de concentración, información necesaria para la configuración del modelo hidrológico.

c. Procesamiento de precipitaciones y determinación de lluvias de diseño

Los registros históricos de precipitación fueron sometidos a procesos de depuración y análisis estadístico con la finalidad de determinar precipitaciones máximas en 24 horas, estimar intensidades de lluvia, elaborar curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y calcular las lluvias de diseño correspondientes a diferentes períodos de retorno. Los resultados obtenidos permitieron establecer los escenarios hidrológicos considerados en la investigación.

d. Desarrollo del modelamiento hidrológico

El modelamiento hidrológico se realizó mediante el software HEC-HMS versión 4.13. Para ello se incorporaron los parámetros físicos de la cuenca y las precipitaciones de diseño previamente calculadas. Como resultado se obtuvieron hidrogramas de avenida, caudales máximos y tiempos al pico para distintos períodos de retorno, constituyendo la información de entrada para el análisis hidráulico.

e. Desarrollo del modelamiento hidráulico

Los caudales generados por el modelo hidrológico fueron incorporados al software HEC-RAS v.6.6 con el propósito de simular el comportamiento hidráulico de la quebrada Totora. Esta etapa permitió evaluar variables como niveles de agua, tirantes hidráulicos, velocidades de flujo, profundidades de inundación, áreas inundadas y extensión de las zonas susceptibles de inundación bajo diferentes escenarios de avenida.

f. Identificación de áreas inundables y zonas críticas

A partir de los resultados obtenidos mediante HEC-RAS se elaboraron mapas de inundación para los diferentes períodos de retorno analizados. Estos productos permitieron identificar áreas inundables, sectores críticos y zonas con mayor exposición al riesgo por desbordamiento de la quebrada Totora en los sectores Totora y Oropesa.

g. Formulación de la propuesta del SAT-COM

Finalmente, los resultados derivados del modelamiento hidrológico e hidráulico fueron integrados con los lineamientos técnicos establecidos para los SAT-COM. Con base en ello se formuló una propuesta de SAT-COM para los sectores Totora y Oropesa, el cual incorporó componentes de monitoreo y seguimiento, definición de umbrales hidrometeorológicos, niveles de alerta, mecanismos de difusión y comunicación, así como acciones de preparación y respuesta comunitaria frente a posibles eventos de inundación.

4.6. Análisis de Datos

El procesamiento y análisis de los datos se realizó mediante procedimientos técnicos orientados a transformar la información hidrometeorológica, geoespacial e

hidráulica en resultados cuantificables, permitiendo evaluar el comportamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada Totora y sustentar la propuesta del SAT-COM. De acuerdo con Hernández y Mendoza (2018), el análisis de datos en investigaciones cuantitativas implica la organización, procesamiento e interpretación sistemática de la información con el fin de responder a los objetivos de investigación y generar resultados verificables y reproducibles.

a. Procesamiento de información geoespacial

La información geoespacial fue procesada mediante SIG, utilizando principalmente ArcGIS Pro y QGIS. A partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) se realizó la delimitación de la cuenca hidrográfica, la identificación de la red de drenaje, la determinación del cauce principal y el cálculo de parámetros morfométricos como área, perímetro, pendiente media y longitud del cauce principal. Los resultados fueron representados mediante mapas temáticos y tablas descriptivas para facilitar su análisis e interpretación.

b. Análisis estadístico de precipitaciones

Los registros históricos de precipitación fueron sometidos a procesos de depuración, organización y análisis estadístico. Se aplicó el análisis de frecuencia hidrológica para determinar las precipitaciones máximas en 24 horas asociadas a diferentes períodos de retorno. Asimismo, se estimaron las intensidades de lluvia y se elaboraron las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), obteniéndose las lluvias de diseño que posteriormente fueron utilizadas como información de entrada para el modelamiento hidrológico.

c. Análisis hidrológico

El análisis hidrológico se desarrolló mediante el software HEC-HMS v.4.13, permitiendo representar el proceso lluvia-escorrentía dentro de la cuenca de estudio. A través de este procedimiento se obtuvieron hidrogramas de avenida, caudales máximos y tiempos al pico para los diferentes períodos de retorno considerados, resultados que constituyeron la base para el análisis hidráulico posterior.

d. Análisis hidráulico

Los caudales generados mediante el modelamiento hidrológico fueron incorporados al software HEC-RAS v.6.6 para analizar el comportamiento hidráulico de la quebrada Totora. En esta etapa se evaluaron variables como nivel de agua, tirante hidráulico, velocidad del flujo, profundidad de inundación, área inundada y extensión del desbordamiento, permitiendo simular distintos escenarios de avenida y generar mapas de inundación asociados a cada período de retorno analizado.

e. Identificación de áreas inundables y evaluación del riesgo

Los resultados obtenidos mediante la modelación hidráulica fueron integrados con herramientas de análisis espacial para identificar áreas inundables, sectores críticos y zonas con mayor exposición al riesgo de inundación. Esta información permitió caracterizar los escenarios de peligro y determinar las áreas prioritarias para la implementación de medidas de prevención y preparación. Asimismo, se determinaron las áreas inundables y los sectores críticos para cada período de retorno evaluado, permitiendo establecer los diferentes escenarios de inundación considerados en la investigación y evaluar su nivel de afectación potencial.

f. Análisis para la formulación del SAT-COM

Finalmente, la información generada durante el modelamiento hidrológico e hidráulico fue utilizada como sustento técnico para la formulación de la propuesta del SAT-COM. Para ello se analizaron los umbrales hidrometeorológicos obtenidos, las áreas expuestas y los escenarios de inundación identificados, permitiendo definir umbrales de precipitación, caudal y nivel de agua, así como niveles de alerta, mecanismos de comunicación y acciones de respuesta orientadas a fortalecer la gestión del riesgo de inundaciones en los sectores Totora y Oropesa.

4.7. Consideraciones Éticas

La presente investigación se desarrolló bajo los principios de responsabilidad científica, transparencia metodológica, objetividad, integridad en el tratamiento de los datos

y uso adecuado de la información, garantizando el cumplimiento de criterios éticos durante todas las etapas del estudio.

Debido a que la investigación se basó en el análisis de información hidrometeorológica, geoespacial y topográfica, así como en la aplicación de modelos computacionales, las consideraciones éticas se orientaron principalmente al manejo responsable de la información técnica y a la rigurosidad de los procedimientos aplicados.

En este sentido, los datos utilizados fueron obtenidos de fuentes oficiales y especializadas, tales como el SENAMHI, la ANA y documentos técnicos vinculados a la gestión del riesgo de desastres. Toda la información fue empleada exclusivamente con fines académicos y científicos, respetando su procedencia y realizando la debida citación de las fuentes consultadas.

Asimismo, se respetaron los principios de honestidad académica y propiedad intelectual, evitando cualquier forma de plagio, falsificación o uso indebido de información. Todas las fuentes bibliográficas, bases de datos, documentos técnicos y materiales empleados fueron citados y referenciados conforme a las normas establecidas para la investigación científica.

Del mismo modo, se garantizó la transparencia metodológica mediante la descripción detallada de las fuentes de información, los procedimientos aplicados, los parámetros considerados y las herramientas utilizadas en el análisis hidrológico, el modelamiento hidráulico y la formulación de la propuesta del SAT-COM. Esto permite que el estudio pueda ser comprendido, evaluado y replicado bajo condiciones similares. Además, se conservaron los archivos digitales, parámetros de entrada, configuraciones de modelación y resultados generados durante el procesamiento de datos, con el propósito de garantizar la trazabilidad y reproducibilidad técnica de la investigación.

Respecto a la integridad de los resultados, se evitó cualquier alteración, manipulación o modificación de los datos hidrometeorológicos y de los resultados obtenidos mediante los softwares HEC-HMS v.4.13 y HEC-RAS v.6.6. La interpretación de

los escenarios de inundación se realizó de manera objetiva, considerando las condiciones reales de la quebrada Totora y las limitaciones propias del modelamiento numérico.

Adicionalmente, se aseguró la organización y conservación de la información procesada, garantizando su trazabilidad y respaldo durante todo el desarrollo de la investigación. De esta manera, los resultados mantienen coherencia entre los datos utilizados, los procedimientos aplicados y las conclusiones obtenidas.

Finalmente, la investigación incorpora un enfoque de responsabilidad social y gestión preventiva del riesgo, debido a que la propuesta del SAT-COM busca contribuir a la reducción del riesgo de inundaciones y fortalecer la capacidad de preparación y respuesta de la población en los sectores Totora y Oropesa. En concordancia con Hernández y Mendoza (2018), toda investigación científica debe desarrollarse bajo criterios de transparencia, objetividad y rigor metodológico, asegurando que los resultados obtenidos sean válidos, verificables y contribuyan a la solución de problemas reales que afectan a la sociedad.

V. Resultados y Discusión

5.1. Resultados Descriptivos

5.1.1. Caracterización Geoespacial e Hidrológica de la Cuenca de Estudio

En esta etapa se presentan los resultados correspondientes a la caracterización geoespacial y fisiográfica de la cuenca de la quebrada Totora, integrando información recopilada en campo con datos derivados de Modelos Digitales de Elevación (DEM) obtenidos a partir de plataformas satelitales. A partir de estos insumos se determinaron parámetros morfométricos relevantes, tales como el área de drenaje, pendiente media, longitud del cauce principal y configuración de la red hidrográfica.

Estos resultados constituyeron la base técnica para la estructuración del modelo hidrológico, permitiendo representar de manera adecuada el comportamiento del escurrimiento superficial dentro de la cuenca en estudio.

5.1.1.1. Área de Estudio.

El área de estudio se desarrolló en el distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, departamento de Apurímac. La selección de esta zona se fundamenta en la recurrencia de eventos de inundación y desbordes asociados a la quebrada Totora, los cuales generan impactos significativos en la población y en las actividades económicas locales.

Desde el punto de vista hidrológico, la quebrada Totora forma parte de la Intercuenca Alto Apurímac, unidad hidrográfica que concentra los aportes de escorrentía provenientes de las zonas altoandinas y constituye el sistema hidrográfico de referencia para el área de estudio. Esta condición configura un sistema de drenaje susceptible a eventos hidrometeorológicos extremos. Asimismo, el ámbito de estudio comprende las principales unidades territoriales e hidrográficas relacionadas con la ocurrencia de inundaciones, las cuales se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21

Componentes del área de estudio

Categoría	Denominación
División política	Distrito de Oropesa
Centro poblado	Centro Poblado de Oropesa
Sectores de análisis	Sectores Totora y Oropesa
Curso de agua principal	Río Totora - Oropesa
Quebrada principal	Quebrada Totora
Unidad hidrográfica local	Cuenca de la quebrada Totora

Nota. Componentes considerados para la caracterización del área de estudio.

En la Tabla 22 se presenta la unidad hidrográfica a la que pertenece el área de estudio.

Tabla 22

Unidad hidrográfica principal

Región Hidrográfica	Unidad Hidrográfica	Código	Superficie (km^2)	%
Amazonas	Intercuenca Alto Apurímac	4999	34 533.0	100

Nota. Información adaptada del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH) de la ANA.

La delimitación de la cuenca de la quebrada Totora dentro de la Intercuenca Alto Apurímac permitió establecer el marco hidrográfico de referencia para el análisis morfométrico y el posterior desarrollo del modelamiento hidrológico e hidráulico. Asimismo, esta ubicación permitió contextualizar el área de estudio dentro del sistema hidrográfico regional perteneciente a la región hidrográfica Amazonas, proporcionando la base territorial para la evaluación hidrológica desarrollada en la investigación.

5.1.1.2. Modelo Digital de Elevación (DEM) para Delimitar la Cuenca.

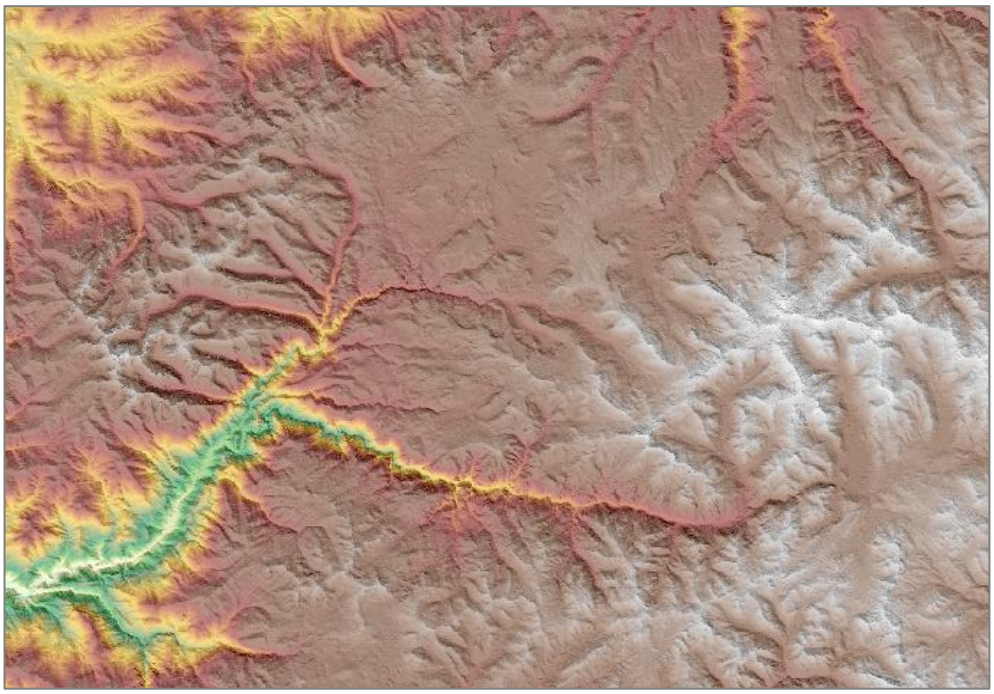
La delimitación de la cuenca de la quebrada Totora se realizó utilizando un Modelo Digital de Elevación (DEM) proveniente del satélite ALOS PALSAR, disponible de manera gratuita a través de la plataforma de la Alaska Satellite Facility.

El modelo empleado presenta una resolución espacial de 12.5 × 12.5 m, lo cual permitió representar con mayor detalle las características topográficas del terreno, incluyendo la variación de pendientes y la configuración del relieve. Esta precisión facilitó la identificación de divisorias de aguas, la red de drenaje y la extensión de la cuenca, elementos fundamentales para la modelación hidrológica.

Los resultados obtenidos permitieron establecer una delimitación consistente de la cuenca, constituyendo un insumo clave para el análisis del comportamiento hidrológico del área de estudio.

Figura 12

Modelo Digital de Elevación (DEM) del área de estudio



Nota. Elaborado a partir de datos de la Alaska Satellite Facility (ASF), procesados en el software HEC-HMS.

5.1.1.3. Configuración Geoespacial del Modelo Hidrológico en HEC-HMS.

Para la representación hidrológica de la cuenca, se empleó la versión 4.13 del software HEC-HMS, utilizando su entorno de integración con SIG. A partir de esta herramienta, se logró estructurar el modelo espacial de la cuenca y sus subcuencas,

permitiendo la obtención de parámetros fisiográficos necesarios para la simulación lluvia-escorrentía.

Los resultados derivados de este proceso permitieron definir la configuración hidrológica de la cuenca, incluyendo su delimitación, red de drenaje y puntos de control, los cuales constituyen insumos fundamentales para el modelamiento hidrológico.

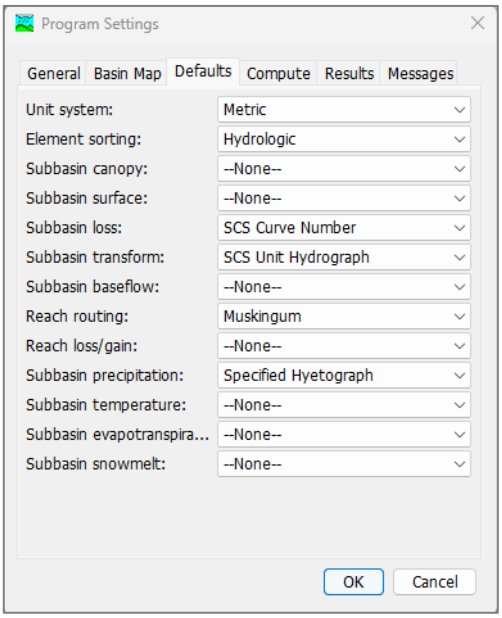
5.1.1.3.1. Configuración Inicial del Entorno de Modelación.

Se estableció un entorno de trabajo organizado para el desarrollo del análisis hidrológico, definiendo la ubicación de almacenamiento de los archivos generados durante el proceso. Asimismo, se configuraron los parámetros generales del software a través de la ruta Tools > Program Settings > Defaults, seleccionando los métodos de transformación lluvia-escorrentía y de tránsito de caudales más adecuados para la representación del comportamiento hidrológico de la cuenca.

Esta configuración permitió estandarizar el procesamiento de la información y garantizar la coherencia en la simulación de los procesos hidrológicos.

Figura 13

Configuración del software HEC-HMS v.4.13



Nota. Captura de pantalla del software HEC-HMS v.4.13, empleada para la configuración del modelo hidrológico.

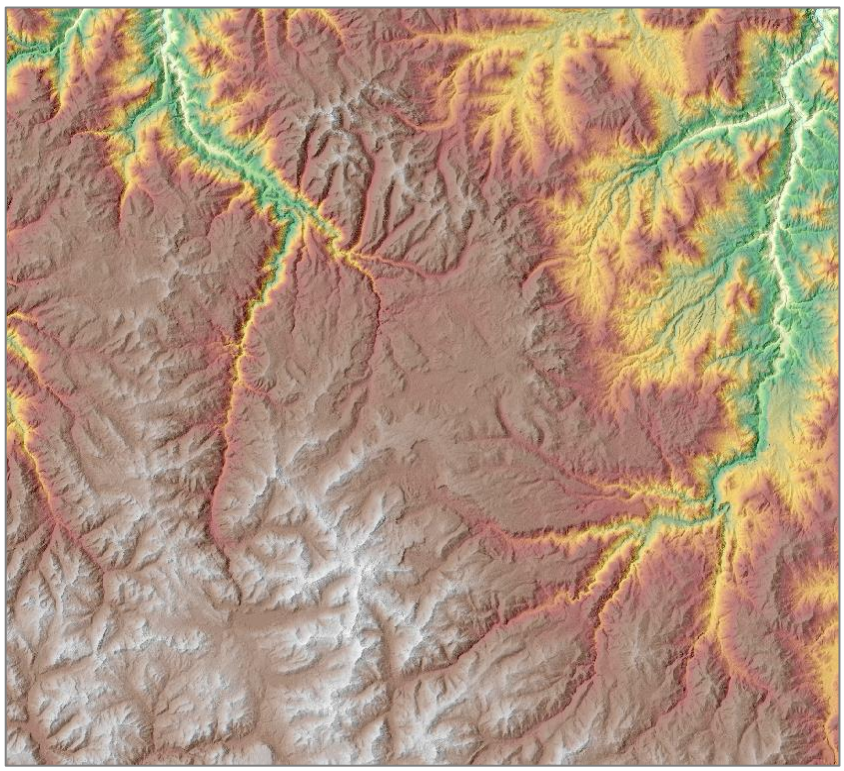
5.1.1.3.2. Representación del Modelo de Cuenca (Basin Model).

La representación espacial de la cuenca se desarrolló mediante el componente *Basin Model*, el cual permitió integrar la información topográfica proveniente del Modelo Digital de Elevación. A través de esta herramienta, se obtuvo una representación detallada del relieve, facilitando la identificación de la estructura hidrológica de la cuenca.

Como resultado, se logró ubicar con precisión la cuenca de la quebrada Totora, estableciendo una base confiable para el análisis hidrológico posterior.

Figura 14

Modelo digital de elevación de la cuenca de la Quebrada Totora



Nota. Información obtenida del portal web Earthdata Search de la NASA y procesada mediante el software HEC-HMS v.4.13.

5.1.1.3.3. Delimitación Hidrológica de la Cuenca de la Quebrada Totora.

La delimitación de la cuenca se realizó a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) y su correspondiente sistema de referencia espacial, lo cual permitió asegurar la consistencia geoespacial del análisis. A partir de estos insumos, se obtuvo la delimitación

automática de la cuenca, así como la identificación de la red de drenaje y la subdivisión en subcuencas.

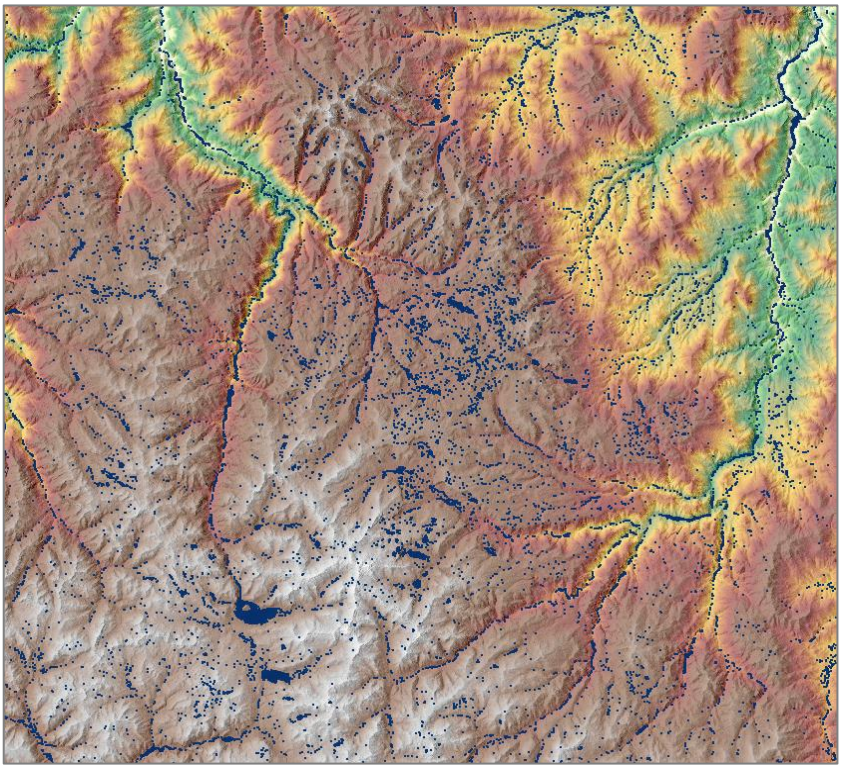
Adicionalmente, se estimaron parámetros fisiográficos relevantes como área, pendiente, longitud de cauce y tiempos de concentración, los cuales constituyen variables fundamentales para la modelación hidrológica.

a. *Preprocess Sinks* (Preproceso de sumideros)

En esta etapa se realizó el acondicionamiento hidrológico del Modelo Digital de Elevación (DEM), mediante la eliminación de depresiones artificiales o sumideros que podrían afectar la continuidad del escurrimiento superficial en la cuenca de estudio. Este procedimiento permitió obtener un DEM hidrológicamente consistente, adecuado para el análisis del flujo superficial. Asimismo, se generó un ráster complementario que registra la ubicación de los sumideros identificados y la profundidad del relleno aplicado, los cuales se representan en color azul en la Figura 15.

Figura 15

Ráster de sumideros identificados en el DEM procesado



Nota. Elaborado a partir del procesamiento del DEM en el software HEC-HMS v.4.13.

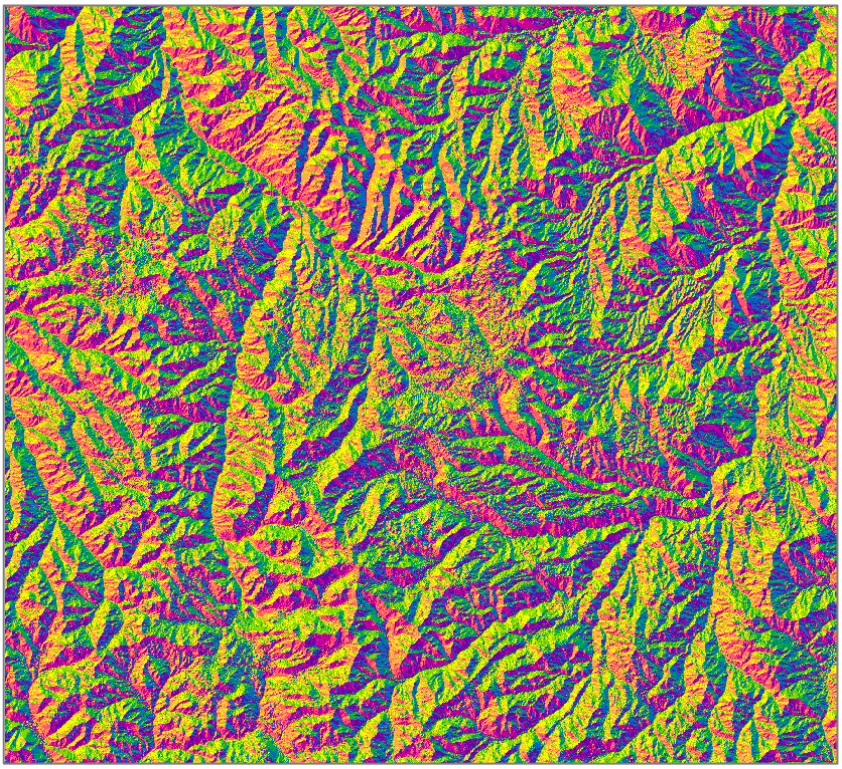
b. *Preprocess Drainage* (Preproceso de drenaje)

En esta etapa se aplicaron algoritmos hidrológicos para determinar la dirección y la acumulación del flujo superficial en cada celda del Modelo Digital de Elevación (DEM), en función de la pendiente y la configuración topográfica del terreno. Este procedimiento permitió identificar las trayectorias preferenciales de escorrentía dentro de la cuenca de estudio.

Como resultado, se generaron dos capas temáticas: dirección de flujo y acumulación de flujo, las cuales fueron incorporadas al entorno de análisis geoespacial como insumos fundamentales para la delimitación hidrológica y el desarrollo del modelo.

Figura 16

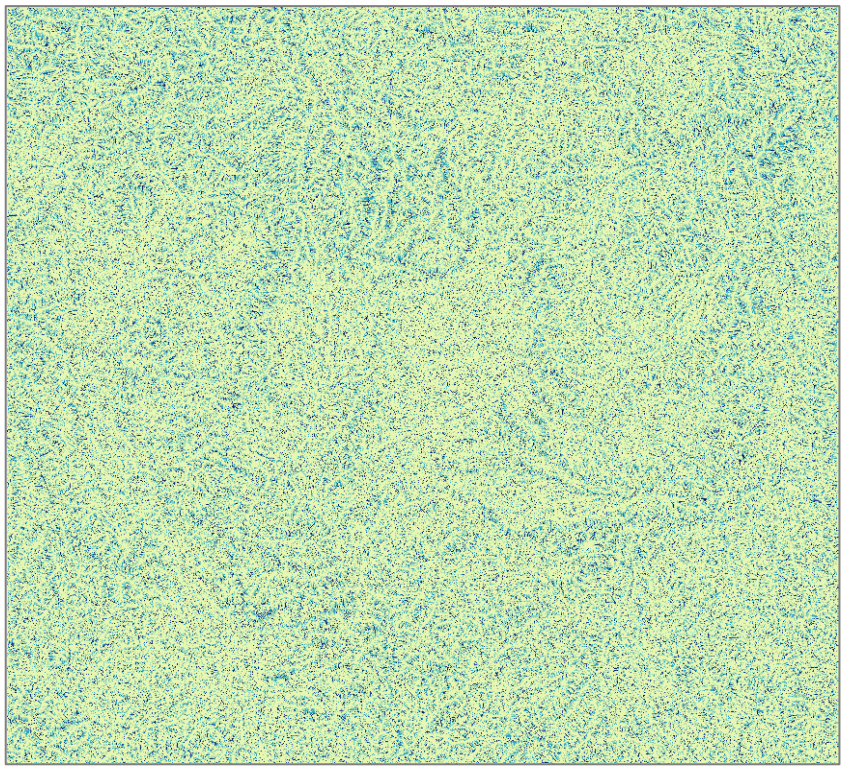
Dirección de flujo en la cuenca de la Quebrada Totora



Nota. Elaborado a partir del procesamiento del DEM en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 17

Acumulación de flujo en la cuenca de la Quebrada Totora



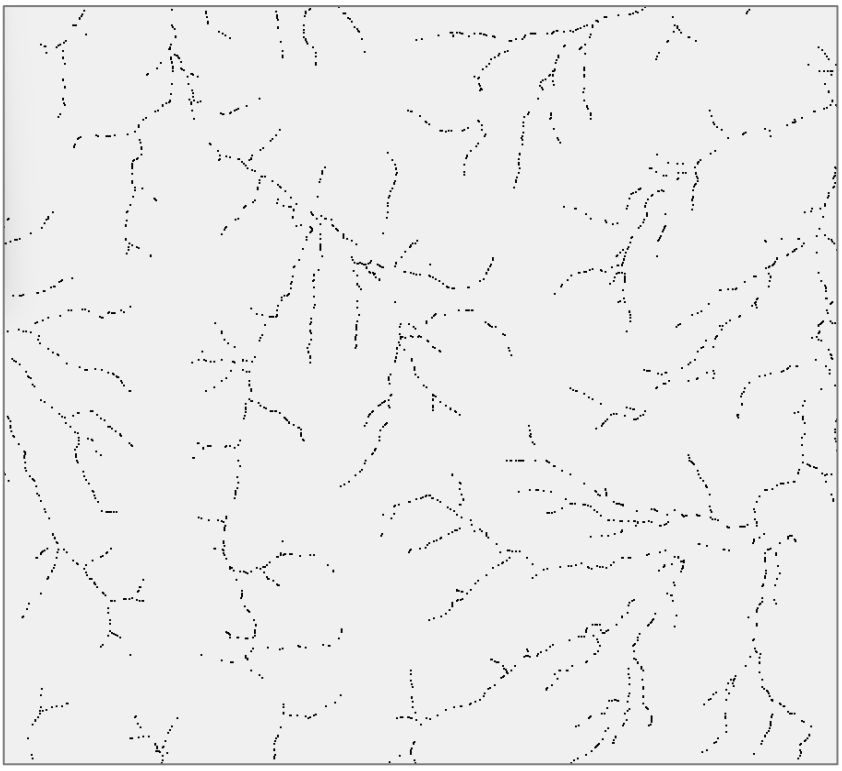
Nota. Elaborado a partir del procesamiento del DEM en el software HEC-HMS v.4.13.

c. *Identify Streams* (Identificación de la red de drenaje)

En esta etapa se realizó la delimitación e identificación de la red de drenaje de la cuenca, considerando tanto los cauces principales como secundarios. Para ello, se estableció un umbral de área de aporte de 5 km², lo que permitió discriminar los cursos de agua con mayor relevancia hidrológica. Este criterio facilitó la generación de una representación más precisa y coherente del sistema de escorrentía superficial.

Figura 18

Red de drenaje de la cuenca de la Quebrada Totora



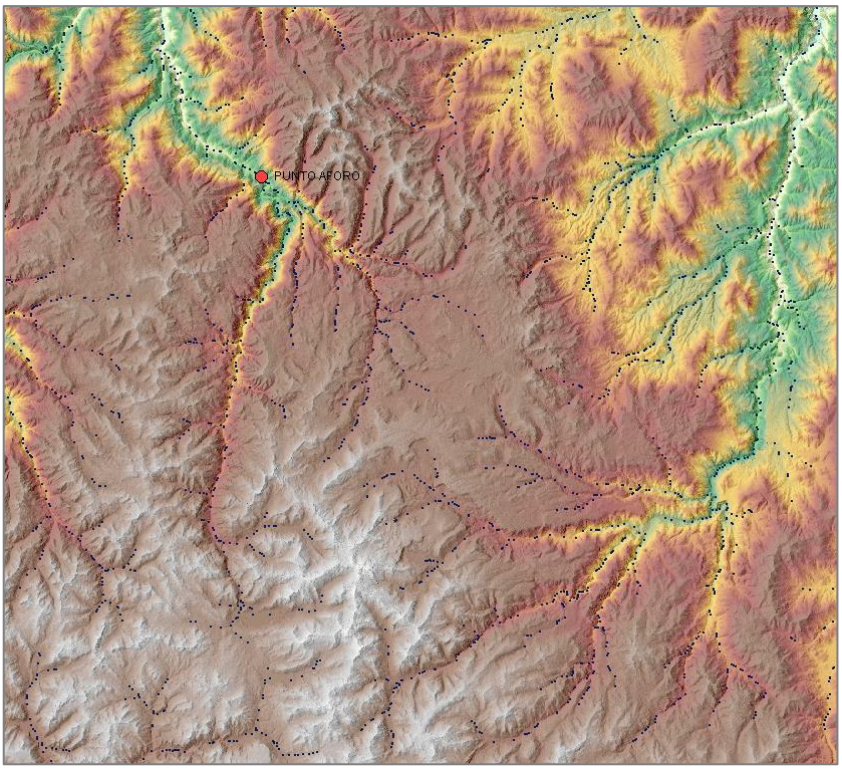
Nota. Elaborado a partir del procesamiento del DEM en el software HEC-HMS v.4.13.

d. *Break Point Creation Tools* (Herramientas de creación de puntos de control)

En esta etapa se definió el punto de salida o aforo de la cuenca, ubicado en el sector de menor elevación dentro del área de estudio, correspondiente al punto natural de concentración y descarga del flujo superficial acumulado. Este punto constituye la sección de control fundamental para la estimación de caudales y la posterior simulación hidrológica del sistema.

Figura 19

Ubicación del punto de salida (aforo) de la cuenca de la Quebrada Totora



Nota. Elaborado a partir del procesamiento del DEM en el software HEC-HMS v.4.13.

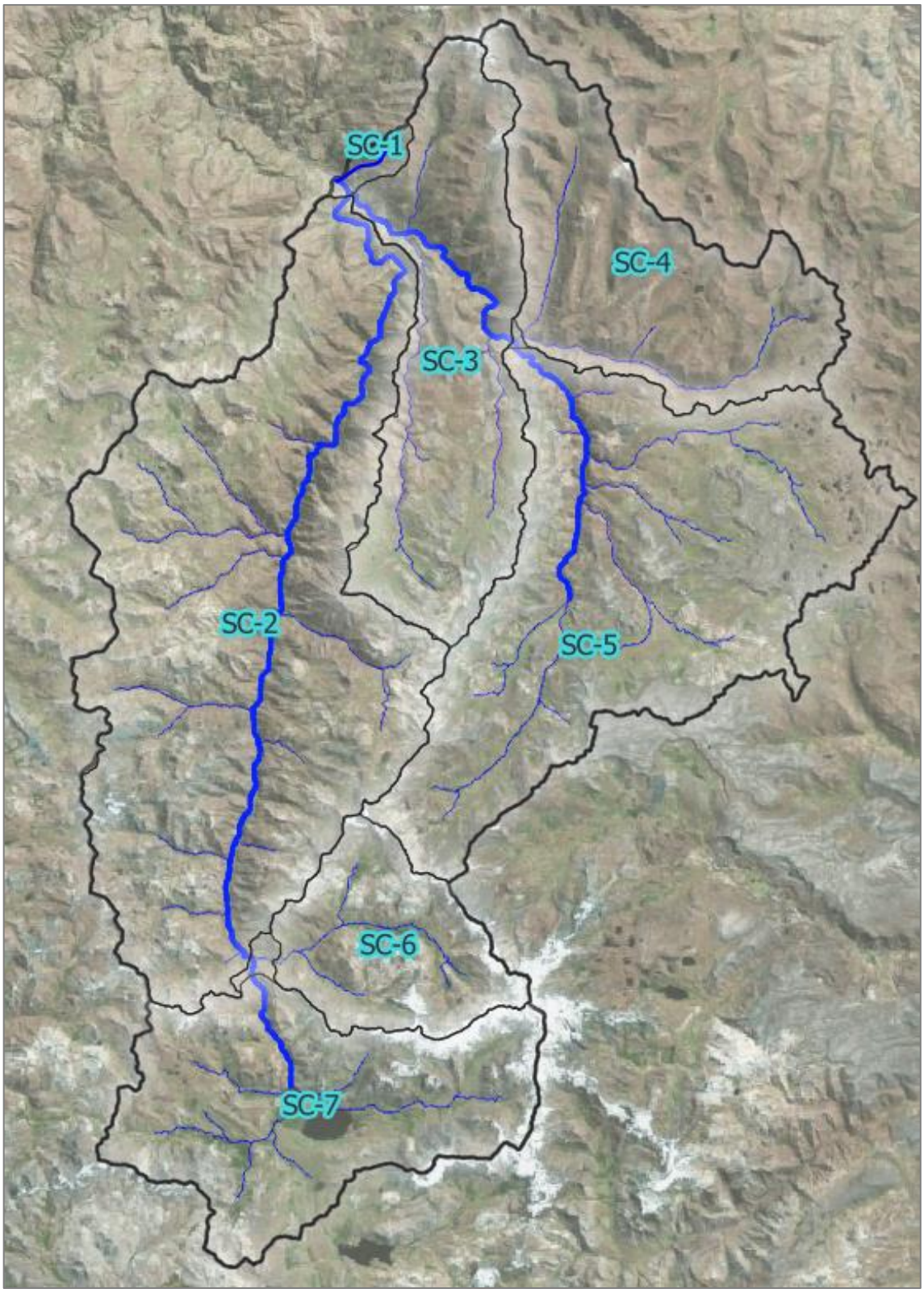
e. *Delineate Elements* (Delineación de elementos)

Mediante el uso de la herramienta Delineate Elements y tomando como referencia el punto de salida previamente definido, se realizó la delimitación integral de la cuenca de estudio. Este procedimiento permitió establecer los límites hidrológicos en función de la topografía y de la red de drenaje previamente generada.

Posteriormente, utilizando la misma funcionalidad, se efectuó la subdivisión de la cuenca en subcuencas, con el objetivo de representar de manera más detallada la variabilidad espacial de los parámetros morfométricos e hidrológicos requeridos para el desarrollo del modelado lluvia-escorrentía.

Figura 20

Modelo hidrológico de la cuenca de la Quebrada Totora en HEC-HMS



Nota. Elaborado a partir del procesamiento del DEM en el software HEC-HMS v.4.13.

5.1.1.4. Parámetros Morfométricos y Fisiográficos de la Cuenca de la Quebrada Totora.

A partir de la configuración del modelo hidrológico, se obtuvieron los principales parámetros morfométricos y fisiográficos de la cuenca de estudio mediante el módulo de características (*Characteristics*) del software HEC-HMS v.4.13. Esta información permitió describir cuantitativamente la geometría, el relieve y la estructura de la red de drenaje, constituyendo una base fundamental para la interpretación del comportamiento hidrológico.

En este contexto, la literatura especializada señala que, en cuencas de menor extensión, la generación de escorrentía está influenciada principalmente por las condiciones del suelo y la cobertura vegetal, mientras que en cuencas de mayor tamaño adquiere mayor relevancia el almacenamiento y la dinámica del flujo en el cauce principal (Chow, 1962). En función de ello, se presentan a continuación los principales parámetros determinados para la cuenca Oropesa.

a. Área de la cuenca (A)

El área de drenaje de la cuenca de la Quebrada Totora alcanzó un valor de 1144.40 km², lo que permite clasificarla como una cuenca de extensión intermedia a grande. Este parámetro resulta fundamental, ya que condiciona el volumen potencial de escorrentía generado ante eventos de precipitación.

b. Perímetro de la cuenca

El perímetro de la cuenca fue determinado a partir de la exportación del polígono delimitado en HEC-HMS hacia un entorno SIG (ArcGIS), obteniéndose un valor de 272.67 km. Este indicador permite evaluar la forma de la cuenca y su grado de compacidad.

c. Longitud máxima de la cuenca (Lc)

La longitud máxima de la cuenca, medida desde el punto de salida hasta el límite de la divisoria de aguas más alejada en dirección del cauce principal, fue de 36.16 km. Este parámetro se relaciona directamente con el tiempo de concentración y la respuesta hidrológica de la cuenca.

d. Longitud del cauce principal (L)

La longitud del cauce principal de la cuenca de la quebrada Totora fue de 67.72 km, representando el recorrido del flujo desde la cabecera hasta el punto de salida. Este parámetro influye en el tiempo de tránsito del flujo y en la atenuación de caudales.

5.1.1.4.1. Parámetros de Forma.

Los parámetros de forma fueron determinados a partir de las características geométricas de la cuenca de la Quebrada Totora, permitiendo evaluar su configuración espacial y su influencia en la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación.

a. Ancho promedio de la cuenca (Ap)

El ancho promedio de la cuenca fue estimado a partir del análisis geométrico del polígono delimitado en entorno SIG, obteniéndose un valor de 16.90 km. Este parámetro permite aproximar la distribución lateral del área de drenaje.

$$Ap=\frac{A}{L}$$

$$Ap=16.90 \text{ km}$$

b. Factor de forma (F)

El factor de forma se calculó como la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud del cauce principal, obteniéndose un valor de F = 0.25.

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

$$F=\frac{1144.37}{67.72^2}=0.25$$

Este resultado indica que la cuenca presenta una forma alargada, lo cual sugiere una respuesta hidrológica más atenuada frente a eventos de precipitación intensa.

c. Índice de compacidad o coeficiente de Gravelius (Kc)

El coeficiente de compacidad fue de Kc = 2.27, lo que indica que la cuenca presenta una geometría alejada de la forma circular, con tendencia a una configuración alargada.

$$Kc=0.282*\left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$$

$$Kc=0.282*\left(\frac{272.67}{\sqrt{1144.40}}\right)=2.27$$

Este tipo de cuencas tiende a generar hidrogramas menos abruptos, debido a la mayor dispersión del escurrimiento.

d. Radio de Circularidad de Miller (Rc)

El índice de circularidad alcanzó un valor de Rc = 0.19, lo cual confirma que la cuenca posee una baja circularidad, alejándose de formas compactas y aproximándose a configuraciones alargadas.

$$Rc=\frac{4\pi A}{P^2}$$

$$Rc=\frac{4\pi(1144.37)}{272.67^2}=0.19$$

e. Rectángulo equivalente

El rectángulo equivalente presentó una longitud mayor de L=128.39 km y una longitud menor de =8.91 km, lo que refuerza la condición de cuenca alargada, con predominio de la dimensión longitudinal sobre la transversal.

$$L=\frac{Kc*\sqrt{A}}{1.12}\left[1+\sqrt{1-\left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2}\right] \qquad l=\frac{Kc*\sqrt{A}}{1.12}\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2}\right]$$

f. Relación de elongación (Re)

La relación de elongación fue de Re = 0.56, valor que indica una cuenca moderadamente alargada. Este parámetro se asocia con tiempos de concentración mayores y menor simultaneidad en los aportes de escorrentía.

$$Re=1.1284*\frac{\sqrt{A}}{Lc}$$

$$Re=1.1284*\frac{\sqrt{1144.40}}{67.72}=0.56$$

g. Índice de alargamiento (Ia)

El índice de alargamiento alcanzó un valor de Ia = 4.007, lo que clasifica a la cuenca como muy alargada, reforzando la tendencia observada en los parámetros anteriores.

h. Coeficiente de masividad (Im)

El coeficiente de masividad fue de Im = 0.004, indicando que la cuenca presenta características de un territorio montañoso, lo cual influye en la generación de escorrentía rápida y en la pendiente del terreno.

$$I_m = \frac{\text{Alturamediadelacuenca(m)}}{\text{Areadelacuenca(Km2)}}$$

En la Tabla 23 se presentan los principales parámetros morfométricos y fisiográficos de la cuenca de la Quebrada Totora, obtenidos a partir del análisis del DEM mediante HEC-HMS y herramientas SIG. Estos indicadores permiten caracterizar la forma, dimensiones y configuración del sistema de drenaje, constituyendo una base fundamental para la interpretación del comportamiento hidrológico de la cuenca.

Tabla 23

Parámetros morfométricos de la cuenca de la Quebrada Totora

Propiedades	Valor	Interpretación
Área (Km²)	1144.40	-
Perímetro (Km)	272.67	-
Longitud máxima de la cuenca (km)	36.16	Axial
Longitud del cauce principal (Km)	67.72	-
Ancho promedio de la cuenca (Km)	16.90	-
Factor de forma (F)	0.25	Cuenca alargada
Índice de compacidad o coeficiente de Gravelius (Kc)	2.27	Baja compacidad
Índice de Circularidad de Miller (Rc)	0.19	Baja circularidad
Rectángulo equivalente (km)	128.39 / 8.91	Predominio longitudinal
Relación de elongación (Re)	0.56	Moderadamente alargada
Índice de alargamiento (Ia)	4.007	Muy alargada
Coeficiente de masividad (Im)	0.004	Zona montañosa

Nota. Elaborado a partir del análisis morfométrico de la cuenca en HEC-HMS y SIG

5.1.1.4.2. Parámetros de Relieve.

Los parámetros de relieve fueron determinados mediante el procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM) en un entorno de Sistema de Información Geográfica (ArcGIS). Para ello, la cuenca fue sectorizada en diez zonas altitudinales homogéneas, definidas a partir de intervalos de elevación equidistantes, con el propósito de analizar la distribución espacial del terreno y su influencia en la respuesta hidrológica

a. Pendiente media de la cuenca

La pendiente media de la cuenca alcanzó un valor de 33.27 %, evidenciando una topografía predominantemente accidentada. En contraste, la pendiente media de la red hídrica fue de 1.85 %, lo cual refleja un gradiente más suave en el cauce principal.

Estos resultados indican que la cuenca presenta condiciones favorables para la generación de escorrentía superficial rápida en laderas, mientras que el flujo en los cauces tiende a presentar menor velocidad relativa.

Tabla 24

Distribución altitudinal de la cuenca de la Quebrada Totora

Nº	Rango altitudinal (m s.n.m.)		Área (km^2)	Área (%)
1	3362	3399	0.46	0.04
2	3400	3449	1.12	0.10
3	3450	3499	1.47	0.13
4	3500	3549	2.03	0.18
5	3550	3599	2.31	0.20
6	3600	3649	2.79	0.25
7	3650	3699	3.44	0.30
8	3700	3749	3.40	0.30
9	3750	3799	3.66	0.32
10	3800	3849	3.77	0.33
11	3850	3899	4.18	0.37
12	3900	3949	4.71	0.41
13	3950	3999	5.55	0.49
14	4000	4049	5.80	0.51
15	4050	4099	7.58	0.67
16	4100	4149	9.32	0.82
17	4150	4199	11.62	1.02
18	4200	4249	14.77	1.30
19	4250	4299	17.80	1.56

Nº	Rango altitudinal (m s.n.m.)		Área (km²)	Área (%)
20	4300	4349	21.44	1.88
21	4350	4399	28.13	2.47
22	4400	4449	41.16	3.61
23	4450	4499	59.25	5.20
24	4500	4549	85.04	7.47
25	4550	4599	96.84	8.50
26	4600	4649	108.82	9.55
27	4650	4699	110.57	9.71
28	4700	4749	89.34	7.84
29	4750	4799	86.41	7.59
30	4800	4849	76.26	6.69
31	4850	4899	68.68	6.03
32	4900	4949	51.31	4.50
33	4950	4999	37.65	3.31
34	5000	5049	26.26	2.31
35	5050	5099	16.87	1.48
36	5100	5149	10.92	0.96
37	5150	5199	8.18	0.72
38	5200	5249	5.28	0.46
39	5250	5299	2.96	0.26
40	5300	5349	1.54	0.13
41	5350	5399	0.38	0.03
42	5400	5449	0.08	0.01
TOTAL			**1144.40**	**100**

Nota. Elaborado a partir del análisis del Modelo Digital de Elevación (DEM) en el entorno de Sistema de Información Geográfica (ArcGIS).

b. Altitud media de la cuenca

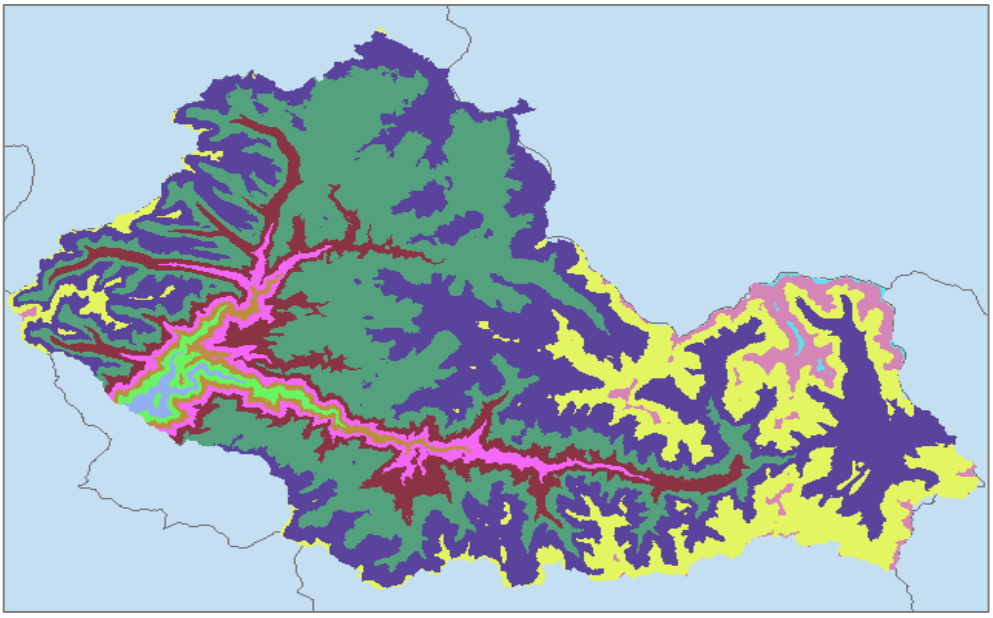
La altitud media de la cuenca fue de 4642.98 m s.n.m., lo cual evidencia que el área de estudio se ubica en un entorno altoandino, caracterizado por condiciones climáticas y geomorfológicas particulares que influyen en los procesos hidrológicos.

c. Altitud más frecuente

A partir del análisis del polígono de frecuencias, se determinó que la altitud más representativa de la cuenca es de 4674.50 m s.n.m., valor que coincide con las zonas de mayor concentración superficial dentro del área de estudio.

Figura 21

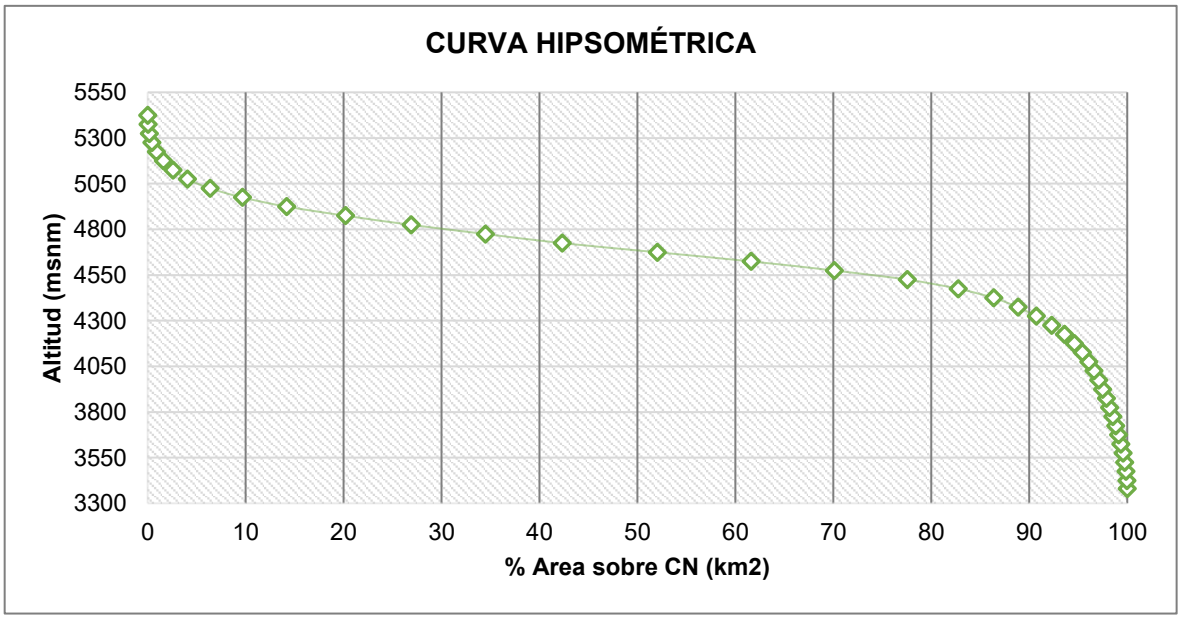
Áreas parciales para la obtención de los parámetros de relieve



Nota. Elaborado a partir del procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM) en el software ArcMap (ArcGIS Desktop) versión 10.8.2.

Figura 22

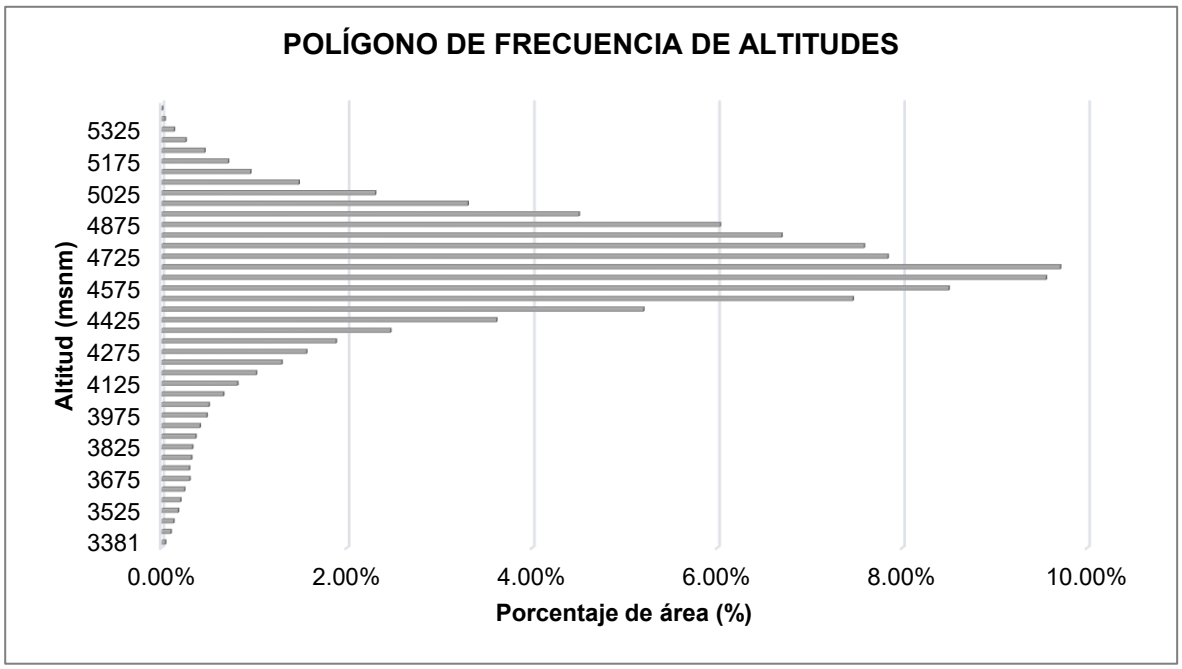
Curva hipsométrica de la cuenca de la Quebrada Totora



Nota. Elaborado a partir del análisis del Modelo Digital de Elevación (DEM).

Figura 23

Polígono de frecuencias altitudinales de la cuenca de la Quebrada Totora



Nota. Elaborado a partir del análisis del Modelo Digital de Elevación (DEM).

5.1.1.4.3. Parámetros de la Red de Drenaje.

Los parámetros de la red de drenaje permiten evaluar la organización del sistema fluvial y su influencia en la dinámica del escurrimiento dentro de la cuenca.

a. Orden de la red de drenaje

Aplicando el método de clasificación de Horton-Strahler, la cuenca de la Quebrada Totora alcanzó un orden 6, lo que indica un sistema de drenaje bien desarrollado, con múltiples niveles de jerarquización de cauces.

b. Densidad de drenaje (Dd)

La densidad de drenaje se define como la relación entre la longitud total de los cauces (Lrios) y el área de la cuenca.

$$D_d = \frac{L_{rios}}{A}$$

La cuenca presentó un valor de Dd = 2.34 km/km², lo cual indica una densidad de drenaje moderada.

Este resultado sugiere que la cuenca posee una capacidad intermedia de evacuación del agua, influenciada tanto por la topografía como por las características del suelo y cobertura vegetal.

c. Pendiente del cauce principal

La pendiente del cauce principal fue de 1.85 %, lo cual refleja un gradiente relativamente suave en comparación con la pendiente media de la cuenca.

Este comportamiento favorece procesos de transporte de sedimentos y regulación del flujo, reduciendo la velocidad de propagación de avenidas en el tramo principal.

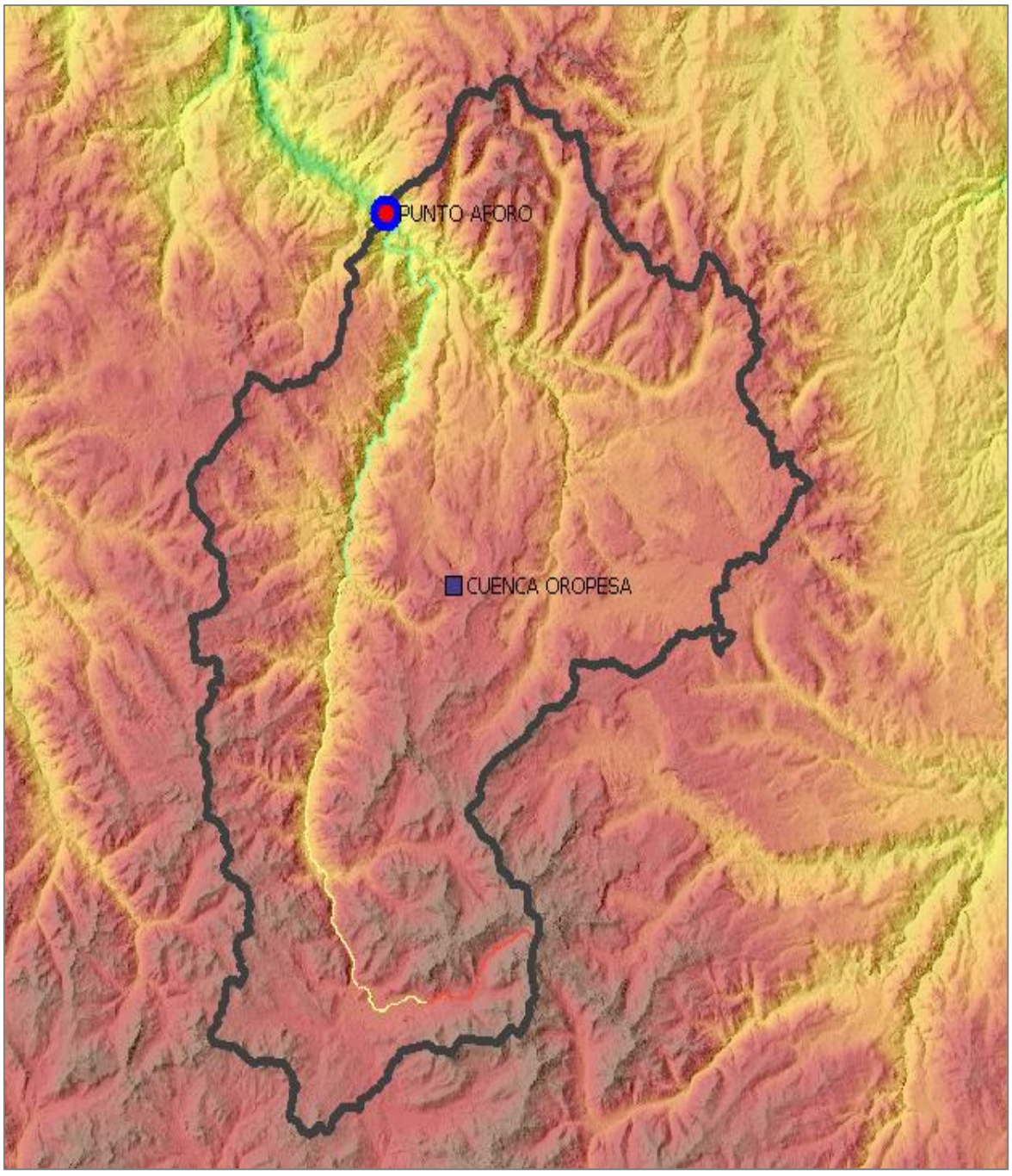
5.1.1.5. Delimitación y Caracterización de Subcuencas.

La cuenca de la Quebrada Totora, con una superficie aproximada de 1144.40 km², fue subdividida con el propósito de mejorar la representación espacial de los procesos hidrológicos en el modelo HEC-HMS v.4.13. Esta discretización permite analizar de manera más detallada la variabilidad de los parámetros fisiográficos y su influencia en la generación de escorrentía.

Como resultado del procesamiento geoespacial, la cuenca fue delimitada en siete subcuencas (SC_01 a SC_07), las cuales constituyen unidades hidrológicas homogéneas que facilitan la simulación del comportamiento lluvia-escorrentía.

Figura 24

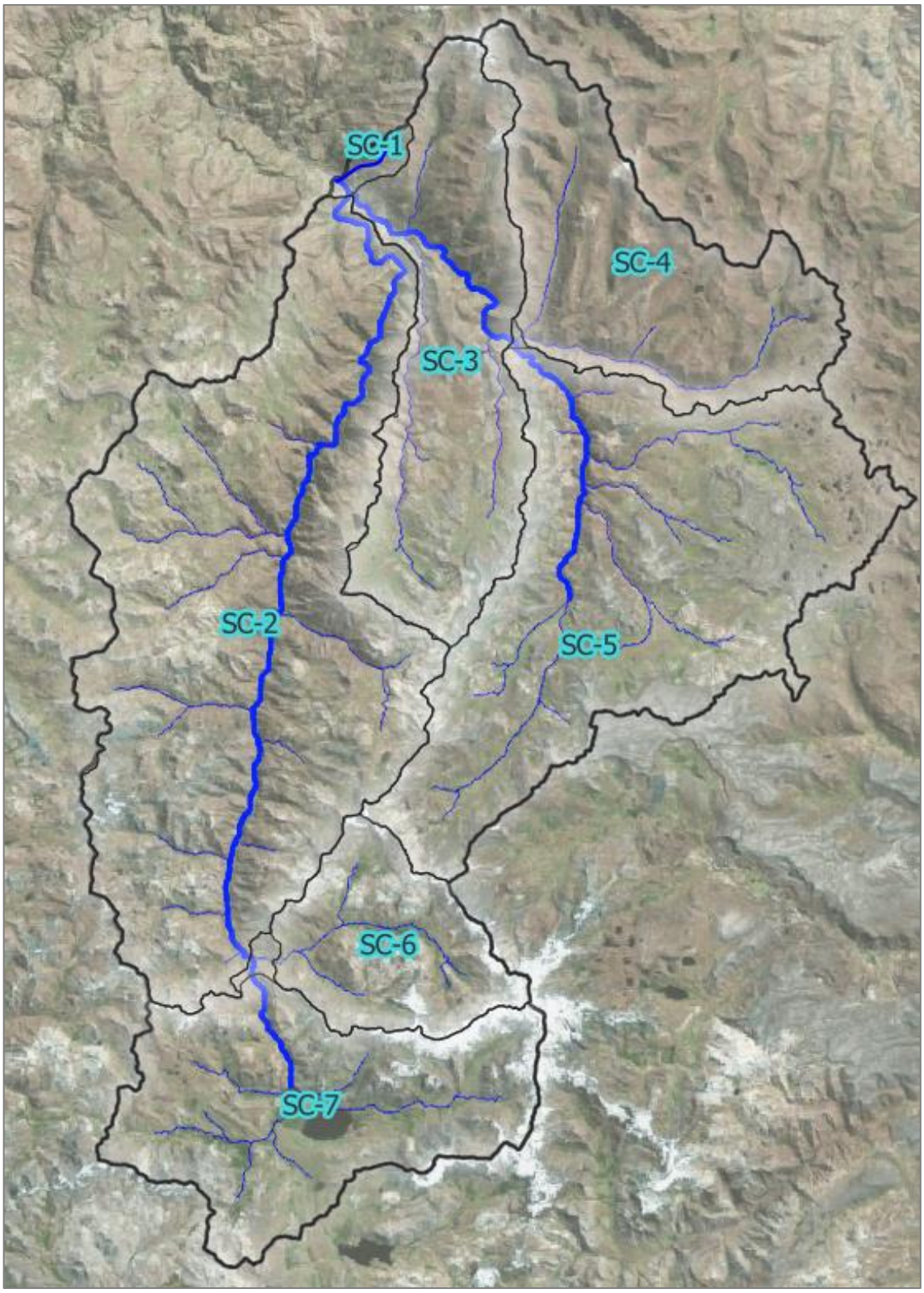
Modelo hidrológico de la cuenca de la Quebrada Totora en HEC-HMS



Nota. Elaborado a partir del procesamiento del modelo digital de elevación en HEC-HMS v.4.13.

Figura 25

Delimitación de subcuencas en la cuenca de la Quebrada Totora



Nota. Elaborado a partir del procesamiento geoespacial en HEC-HMS v.4.13.

A partir de esta subdivisión, se obtuvo un conjunto de parámetros fisiográficos para cada subcuenca, los cuales constituyen insumos fundamentales para la parametrización del modelo hidrológico.

Tabla 25

Parámetros fisiográficos de las subcuencas de la cuenca de la Quebrada Totora

Subcuencas	Área (km^2)	Perímetro (km)	Pendiente de la Cuenca (m/m)	Altitud media (m.s.n.m)	Longitud más larga del flujo (km)	Pendiente del Flujo más largo (m/m)	Densidad de Drenaje (km/km^2)
SC_01	4.64	12.04	0.54	4331.03	4.22	0.27	1.62
SC_02	372.63	147.54	0.39	4565.09	49.28	0.02	2.19
SC_03	145.54	95.60	0.39	4478.31	27.07	0.03	2.15
SC_04	133.07	89.15	0.43	4614.08	20.28	0.03	1.91
SC_05	266.95	136.75	0.21	4635.99	31.97	0.02	2.74
SC_06	71.12	51.60	0.32	4910.36	15.39	0.03	2.40
SC_07	150.42	90.93	0.27	4915.89	21.50	0.01	2.49
TOTAL	**1144.44**						

Nota. Elaborado a partir del análisis hidrológico en HEC-HMS v.4.13.

Los resultados evidencian una variabilidad significativa en los parámetros morfométricos entre subcuencas. Por ejemplo, la subcuenca SC_02 presenta la mayor extensión (372.63 km^2), mientras que SC_01 corresponde a una unidad de menor tamaño (4.64 km^2), lo que implica diferentes respuestas hidrológicas ante eventos de precipitación.

Asimismo, las pendientes de las subcuencas oscilan entre 0.21 y 0.54 m/m, indicando condiciones topográficas variables que influyen directamente en la velocidad de escorrentía. En cuanto a la densidad de drenaje, los valores fluctúan entre 1.62 y 2.74 km/km^2, lo que refleja diferencias en la capacidad de evacuación del flujo superficial.

Tabla 26

Características geométricas de los cauces principales

Descripción	Longitud (km)	Pendiente (m/m)
Río 01	0.92	0.0119
Río 02	46.41	0.0215
Río 03	13.46	0.0393
TOTAL	**60.79**	**-**

Nota. Elaborado a partir del análisis de la red de drenaje en HEC-HMS v.4.13.

Los cauces principales presentan diferencias notables en longitud y pendiente. El río 02 destaca por su mayor extensión (46.41 km) y pendiente relativamente elevada (0.2148 m/m), lo cual sugiere una mayor capacidad de transporte de caudales y sedimentos. En contraste, el río 01 presenta una menor longitud y pendiente reducida, lo que indica un comportamiento hidráulico menos dinámico. Estas características influyen en la propagación de avenidas y en la respuesta hidráulica del sistema fluvial.

5.1.1.6. Parámetros Hidrológicos Aplicados en el Modelo HEC-HMS.

Para la ejecución del modelamiento hidrológico en HEC-HMS v.4.13, se consideró la caracterización fisiográfica previamente obtenida de la cuenca y se establecieron los parámetros y métodos hidrológicos necesarios para representar el proceso lluvia-escorrentía. En este sentido, se aplicaron configuraciones para la estimación de pérdidas, la transformación de la precipitación efectiva en escorrentía directa, la simulación de la recesión de las avenidas y el tránsito del flujo en los cauces.

Asimismo, durante la configuración del modelo se determinó la no incorporación del flujo base, debido a las condiciones hidrológicas particulares de la cuenca de estudio, caracterizada por una respuesta rápida ante eventos de precipitación.

5.1.1.6.1. Método de Pérdida (Loss Method).

La estimación de las pérdidas por infiltración se realizó mediante el método del SCS-CN, configurado en el módulo de pérdidas (*Parameters* > *Loss*) del HEC-HMS. Esta metodología, desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, permitió representar la reducción de la precipitación efectiva en función de las características del suelo, uso de la tierra y condiciones de humedad antecedente.

Como parte de su aplicación, se definieron los parámetros hidrológicos principales del modelo, entre ellos las pérdidas iniciales, el valor del CN y el porcentaje de área impermeable de la cuenca.

a. Curva Número (CN)

Para la determinación del CN de la cuenca de la quebrada Totora, se utilizó el mapa nacional elaborado por la ANA, correspondiente al método SCS-CN. En el presente estudio se adoptó la condición de normal antecedente tipo II (CN II), debido a que el análisis estuvo orientado a la estimación de caudales máximos asociados a eventos de precipitación extrema.

El mapa de CN empleado integra información proveniente del Modelo Digital de Elevación (DEM), la clasificación hidrológica de suelos y el uso y cobertura del territorio, los cuales constituyen los principales insumos para su generación a nivel nacional, según la metodología establecida por la ANA. Este insumo se encuentra disponible en los anexos del presente estudio.

Posteriormente, a partir de la delimitación de la cuenca obtenida en HEC-HMS, la información fue exportada en formato shapefile (.shp) y procesada en el software ArcMap 10.8.2, lo que permitió superponer el mapa de CN y analizar su distribución espacial dentro del área de estudio. Con esta información, el valor representativo del CN de la cuenca fue determinado mediante un promedio ponderado, considerando las áreas asociadas a cada rango de CN, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$CN=\frac{\sum CN_1 * A_1}{\sum A_1}$$

Asimismo, se realizó el cálculo a nivel de toda la cuenca de la Quebrada Totora, considerando su delimitación completa, debido a la presencia de variaciones espaciales en su parte baja.

Tabla 27

Número de Curva (CN) de diseño de la cuenca de la Quebrada Totora

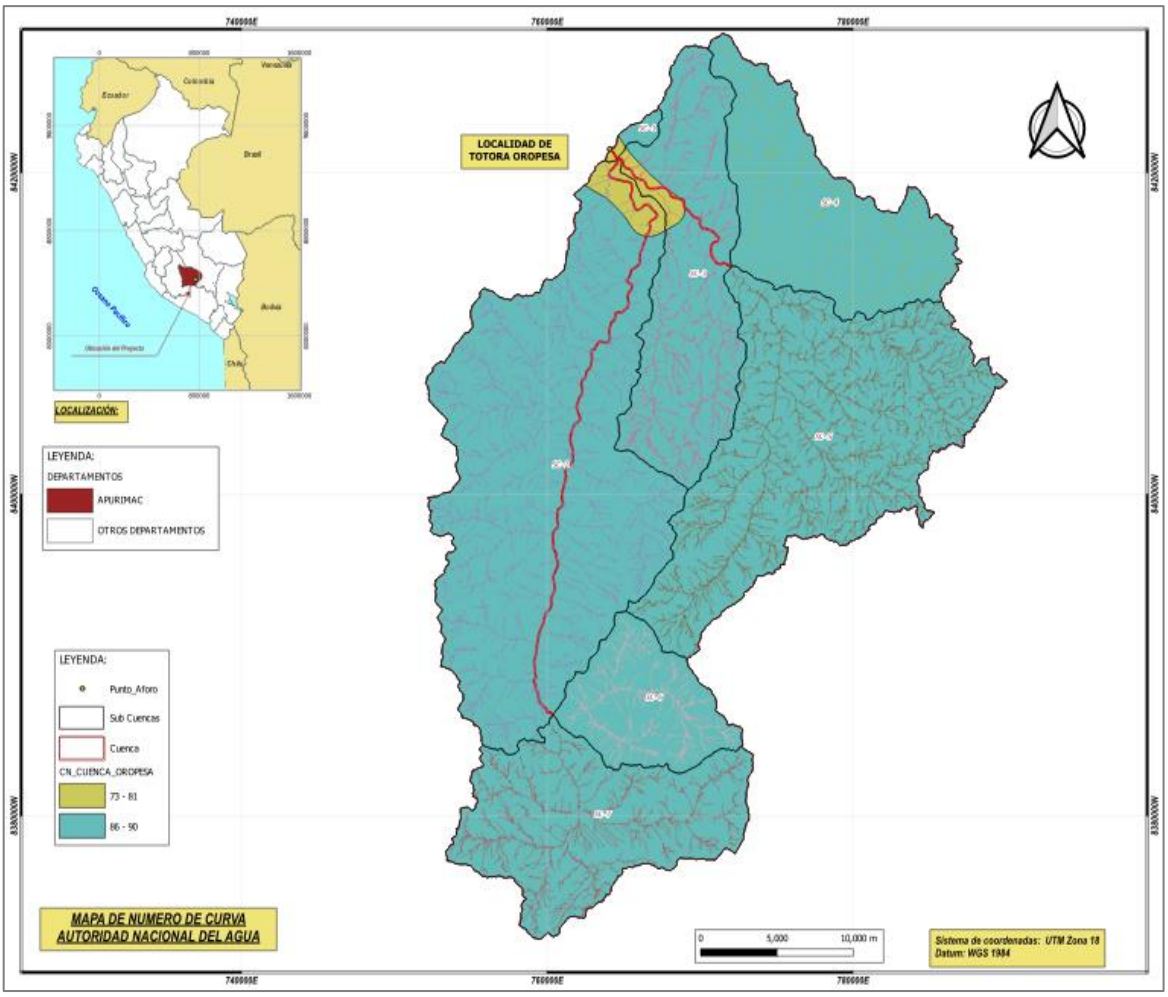
Descripción	Área parcial 1 (km^2)	Área parcial 2 (km^2)	Área Total (km^2)	CN promedio 1	CN promedio 2	CN de diseño
Cuenca de la Quebrada Totora	19.096	1125.304	1144.40	77.00	88.00	87.816

Nota. Elaborado a partir del mapa de Curva Número de la ANA, procesado en ArcGIS.

El valor de CN = 87.816 indica una baja capacidad de infiltración, lo cual implica una alta generación de escorrentía superficial ante eventos de precipitación intensa. Este comportamiento es consistente con condiciones de humedad elevada y características del suelo propias de la zona altoandina.

Figura 26

Distribución espacial del Número de Curva (CN) en la cuenca de la Quebrada Totora



Nota. Elaborado a partir del procesamiento del mapa de Curva Número en ArcGIS 10.8.2.

b. Abstracciones Iniciales (Ia)

La estimación de las abstracciones iniciales se realizó a partir del cálculo previo de la retención potencial máxima (S) para la cuenca de estudio, empleando la expresión del método del CN:

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

A partir de este resultado, las pérdidas iniciales se determinaron como el 20% de la retención potencial máxima, de acuerdo con la relación establecida por el método SCS:

$$Ia = 0.20S$$

Con base en estos cálculos, se obtuvo el valor representativo de abstracción inicial para la cuenca de la Quebrada Totora, el cual se presenta en la Tabla 28.

Tabla 28

Retención potencial y abstracción inicial de la cuenca de la Quebrada Totora

Descripción	CN de diseño	Retención potencial máxima (S)	Abstracción inicial (Ia)
Cuenca de la Quebrada Totora	87.816	35.24	7.05

Nota. Valores obtenidos mediante la aplicación de la metodología SCS-CN.

El valor de Ia = 7.05 mm indica la cantidad de precipitación que debe ser satisfecha antes de que se inicie la escorrentía superficial. Este valor relativamente bajo es coherente con el alto CN obtenido, lo que confirma la limitada capacidad de infiltración de la cuenca.

c. Porcentaje de Área Impermeable de la Cuenca

El porcentaje de superficie impermeable se consideró igual a 0 %, debido a que este efecto ya está incorporado de manera implícita en la metodología del CN. Este parámetro integra las condiciones de uso y cobertura del suelo, por lo que la impermeabilidad no se parametrizó de forma adicional en el modelo.

5.1.1.6.2. Transformación Lluvia-Escorrentía mediante el Hidrograma Unitario SCS.

En el presente estudio, y en concordancia con la metodología del SCS, se aplicó el método del Hidrograma Unitario para la transformación de la precipitación efectiva en escorrentía directa. Este procedimiento fue configurado en el software HEC-HMS dentro del módulo Parameters, opción Transform, permitiendo la conversión de la lluvia neta obtenida del método de pérdidas en hidrogramas de salida.

La aplicación de este método requirió la determinación previa del tiempo de concentración para cada subcuenca del área de estudio, parámetro fundamental para la generación del hidrograma unitario. En este sentido, se seleccionó el enfoque del SCS debido a que incorpora el CN, el cual representa de manera integrada las condiciones de uso del suelo, cobertura vegetal y características hidrológicas del terreno, a diferencia de otros métodos que se basan únicamente en variables geométricas.

Los tiempos de concentración y los tiempos de retraso utilizados como insumo del modelo fueron calculados individualmente para cada subcuenca, empleando diferentes metodologías empíricas e hidrológicas, cuyos resultados se presentan en las Tablas 29 y 30.

Tabla 29

Tiempo de concentración (Tc) de las subcuencas (minutos)

Descripción	Kirpich	Temez	Giandoti	Izzard	SCS	Onda cinemática	Promedio
SC_01	19.90	69.00	16.10	76.50	41.00	18.20	40.12
SC_02	345.50	718.20	167.40	128.90	314.10	947.90	437.00
SC_03	184.30	419.40	99.20	281.10	214.70	103.30	217.00
SC_04	161.70	352.30	84.40	90.10	148.40	524.50	226.90
SC_05	244.70	513.90	124.80	110.60	307.60	724.40	337.67
SC_06	124.30	278.70	60.50	78.70	136.70	427.30	184.37
SC_07	233.00	431.50	86.80	121.20	194.70	697.40	294.10

Nota. Los valores corresponden a la estimación del tiempo de concentración mediante diferentes métodos aplicados a las subcuencas.

Los resultados muestran una alta variabilidad en los tiempos de concentración, desde 40.12 minutos en la subcuenca SC_01 hasta 437.00 minutos en SC_02, lo cual evidencia diferencias significativas en la respuesta hidrológica.

Las subcuencas de menor tamaño presentan tiempos de concentración reducidos, lo que implica una respuesta rápida ante eventos de precipitación. En contraste, las

subcuencas de mayor extensión presentan tiempos más elevados, generando una respuesta más atenuada y distribuida en el tiempo.

El tiempo de retraso (Lag Time), calculado como función del tiempo de concentración, permitió definir la forma del hidrograma unitario del SCS, siendo un parámetro fundamental en la simulación del escurrimiento directo.

Tabla 30

Tiempo de retraso (Lag Time) de las subcuencas (minutos)

Descripción	Kirpich	Temez	Giandoti	Izzard	SCS	Onda cinemática	Promedio
SC_01	11.94	41.40	9.66	45.90	24.60	10.92	24.07
SC_02	207.30	430.92	100.44	77.34	188.46	568.74	262.20
SC_03	110.58	251.64	59.52	168.66	128.82	61.98	130.20
SC_04	97.02	211.38	50.64	54.06	89.04	314.70	136.14
SC_05	146.82	308.34	74.88	66.36	184.56	434.64	202.60
SC_06	74.58	167.22	36.30	47.22	82.02	256.38	110.62
SC_07	139.80	258.90	52.08	72.72	116.82	418.44	176.46

Nota. Los valores corresponden a la estimación del tiempo de retraso mediante diferentes métodos aplicados a las subcuencas.

5.1.1.6.3. Modelación del Flujo Base.

En el presente estudio no se consideró el flujo base dentro del modelamiento hidrológico, debido a que su contribución al caudal total resulta poco significativa en eventos de máximas avenidas.

Esta decisión se sustenta en que el caudal base representa menos del 5 % del caudal pico estimado, por lo que su inclusión no influye de manera relevante en la simulación de crecidas asociadas a eventos extremos.

Asimismo, las condiciones de campo evidenciaron una limitada presencia de flujo permanente, lo cual refuerza la predominancia de escorrentía superficial en la cuenca.

5.1.1.6.4. Tránsito de Caudales en Cauces.

El tránsito de caudales en los cauces de la cuenca se realizó mediante el método de Muskingum, considerando la división del cauce principal en dos tramos según sus características hidráulicas y criterios de modelación. Este método emplea dos parámetros principales: el coeficiente de almacenamiento en cuña (X) y el tiempo de tránsito (K).

Para el parámetro X se adoptó un valor de 0.20, en concordancia con recomendaciones técnicas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2011, p. 62), asociado a la forma de almacenamiento del flujo en el canal. Asimismo, el parámetro K fue definido con un valor de 3 horas, dentro del rango sugerido por el método SCS (entre 2 y 4 horas), representando el tiempo característico de desplazamiento del flujo en el cauce.

Los parámetros utilizados en cada tramo se presentan en la Tabla 31 y fueron incorporados en el software HEC-HMS en la sección Parameters > Routing, donde se configuraron los métodos de enrutamiento del modelo hidrológico.

Tabla 31

Parámetros del método de Muskingum para los cauces principales

Tramo	K (horas)	X
Rio 3	3	0.20
Rio 2	3	0.20

Nota. Los parámetros fueron definidos según criterios técnicos del MTC (2011) y referencias del método SCS para la modelación del tránsito de caudales.

El valor de X = 0.20 indica un comportamiento intermedio entre flujo tipo embalse y flujo en canal, lo cual es característico de cauces naturales con cierto almacenamiento lateral.

Por otro lado, el parámetro K = 3 horas representa el tiempo de tránsito del flujo en los tramos analizados, indicando una propagación moderada de las avenidas dentro del sistema fluvial.

5.1.2. Resultados del Procesamiento de Datos Hidrometeorológicos

5.1.2.1. Selección y Caracterización de Estaciones Pluviométricas.

Para el análisis hidrológico de la cuenca de la Quebrada Totora, se emplearon registros históricos de precipitación máxima en 24 horas, obtenidos de estaciones pluviométricas ubicadas en el entorno regional. Debido a la ausencia de estaciones hidrométricas dentro del área de estudio, se emplearon registros de estaciones cercanas, elegidas según criterios de ubicación, disponibilidad y continuidad de información. Asimismo, se consideró la similitud altitudinal y las condiciones fisiográficas del ámbito andino, con el fin de representar la variabilidad espacial de la precipitación en el área de influencia de la cuenca.

La información empleada fue obtenida de la ANA (2026) y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), lo que garantizó la confiabilidad de los datos utilizados para el desarrollo del análisis hidrológico.

Las estaciones seleccionadas para el estudio se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32

Ubicación y características de las estaciones pluviométricas utilizadas

Estación	Coordenadas geográficas		Altitud m.s.n.m.	Ubicación política			Periodo existente
	Longitud oeste	Latitud Sur		Departamento	Provincia	Distrito	
Chilcayoc	73°43'36.48"	13°52'58.72"	3395	Ayacucho	Sucre	Chilcayoc	2001 - 2025
Cotahuasi	72°53'35.71"	15°53'35.71"	2683	Arequipa	La unión	Cotahuasi	1992 - 2025
Curahuasi	72°44'05.64"	13°33'36.00”	2741	Apurímac	Abancay	Huanipaca	1996 - 2025
Paruro	71°50'40.90"	13°46'01.10"	3070	Cusco	Paruro	Paruro	2000 - 2025
Puquio	74°07'53.75"	14°41'57.00"	3176	Ayacucho	Lucanas	Puquio	1990 - 2025

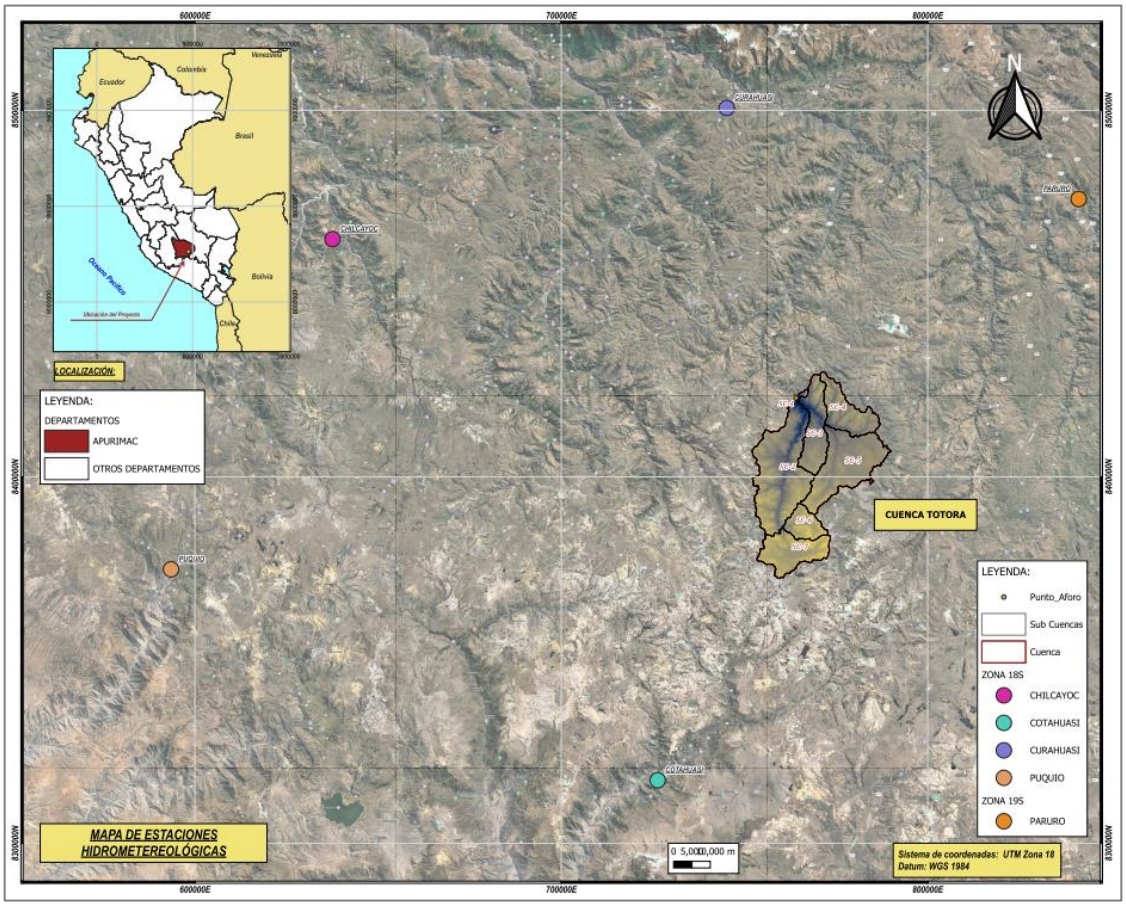
Nota. Elaborado a partir de registros de estaciones pluviométricas del SENAMHI y la ANA.

Las estaciones seleccionadas presentan un rango altitudinal entre 2683 y 3395 m s.n.m., lo cual permite captar la variabilidad orográfica de la precipitación en la zona de estudio.

Asimismo, los periodos de registro disponibles, que en algunos casos superan los 30 años, garantizan la representatividad estadística necesaria para el análisis de eventos extremos.

Figura 27

Ubicación espacial de las estaciones pluviométricas utilizadas en el análisis



Nota. Elaborado a partir del procesamiento cartográfico en ArcGIS 10.8.2.

5.1.2.2. Análisis de Precipitaciones Máximas Diarias (24 Horas).

Una vez seleccionadas las estaciones pluviométricas, se consolidaron los registros históricos de precipitaciones máximas en 24 horas, los cuales constituyen la base para el análisis de eventos extremos en la cuenca de la Quebrada Totora.

La información recopilada presenta periodos variables de registro entre estaciones; sin embargo, en la mayoría de los casos se dispone de series superiores a 25 años, cumpliendo con los criterios mínimos recomendados por el Manual de Hidrología,

Hidráulica y Drenaje del MTC, para estudios hidrológicos orientados a la estimación de caudales de diseño.

En aquellos casos donde no se dispone de información, se empleó la notación S/D (sin datos), evidenciando vacíos en las series históricas que deben ser considerados en el análisis estadístico posterior.

Los años con ausencia de información no fueron considerados dentro del cálculo estadístico de frecuencia, utilizándose únicamente los registros disponibles y consistentes de cada estación.

Tabla 33

Serie histórica de precipitaciones máximas diarias (24 horas) por estación (mm)

Año	Chilcayoc	Cotahuasi	Curahuasi	Paruro	Puquio
1990	S/D	S/D	S/D	S/D	25.2
1991	S/D	S/D	S/D	S/D	20.4
1992	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
1993	S/D	S/D	S/D	S/D	32.9
1994	S/D	S/D	S/D	S/D	22.6
1995	S/D	S/D	S/D	S/D	32.6
1996	S/D	29.8	S/D	S/D	20.2
1997	S/D	26.7	33.2	S/D	19.6
1998	S/D	26.2	22.9	S/D	27.6
1999	S/D	33	28.1	S/D	20.2
2000	S/D	26.6	29.2	13.1	21.2
2001	13.7	22.8	26.2	32.2	20.2
2002	31.7	27.5	34.9	36.7	17.6
2003	34.7	18.0	59.6	32.1	17.4
2004	28.4	25.7	23.6	32.8	35.6
2005	28.9	11.0	29.6	33.7	28.7
2006	35.4	13.5	29.8	43.7	28.2
2007	35.5	25.4	27.6	40.2	23.2
2008	23.3	17.4	27.1	38.9	23.6
2009	27.7	11.8	30.7	28.0	22.5
2010	36.5	17.7	29.6	46.9	26.2
2011	33.7	21.7	29.2	33.6	22.5
2012	37.3	24.6	29.7	38.3	32.7
2013	30.2	23.7	26.7	33.3	27.4
2014	36.0	9.9	26.7	39.6	21.0
2015	32.1	15.1	28.6	28.9	27.6
2016	19.6	19.6	35.3	30.1	35.1
2017	33.9	16.2	29.1	36.3	44.8
2018	26.6	20.7	S/D	41.1	28.8

2019	26.4	14.8	40.9	32.0	35.4
2020	29.4	S/D	23.3	33.7	S/D
2021	35.1	S/D	34.4	36.4	20.2
2022	29.9	S/D	40.3	66.4	31.6
2023	26.6	37.4	34.6	32.0	39.6
2024	29.1	16.8	32.8	34.8	21.2
2025	36.9	18.3	35.8	30.4	28.6

Nota. Elaborado a partir de registros del SENAMHI.

Los registros analizados evidencian una alta variabilidad interanual en las precipitaciones máximas diarias, con valores que oscilan aproximadamente entre 13 mm y más de 60 mm, dependiendo de la estación y el año considerado.

Se observa además que algunas estaciones presentan vacíos de información en los primeros años de registro, lo cual es consistente con la progresiva implementación de estaciones pluviométricas en la región.

Por otro lado, los valores máximos registrados en estaciones como Paruro y Curahuasi reflejan la ocurrencia de eventos extremos significativos, los cuales son determinantes en la generación de caudales máximos y en la evaluación del riesgo de inundaciones.

5.1.2.3. Análisis Estadístico y Ajuste de Distribuciones de Precipitación Máxima.

Previo al análisis estadístico, se realizó la depuración de las series históricas mediante la identificación de valores atípicos y datos dudosos, con el fin de garantizar la consistencia de la información.

Posteriormente, se llevó a cabo el análisis de frecuencia de las precipitaciones máximas en 24 horas utilizando el software Hydrognomon 4, a través del módulo Pithya, el cual permitió evaluar diferentes modelos probabilísticos.

Se consideraron las siguientes distribuciones de probabilidad:

- Normal

- Gamma
- Gamma de tres parámetros (Pearson tipo III)
- Log-Normal de dos parámetros
- Log-Pearson tipo III
- Gumbel

La selección de la distribución más representativa para cada estación se realizó mediante la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, identificando aquella que mejor reproduce el comportamiento estadístico de la serie de datos.

Tabla 34

Distribución de probabilidad de mejor ajuste para precipitaciones máximas en 24 horas

Estación	N.° de años	Distribución de mejor ajuste	Observación
Chilcayoc	25	Normal	Se Ajusta
Cotahuasi	27	Gamma 3P /Pearson III	Se Ajusta
Curahuasi	28	Log- Pearson tipo III	Se Ajusta
Paruro	25	Log- Pearson tipo III	Se Ajusta
Puquio	35	Gamma 3P /Pearson III	Se Ajusta

Nota. Elaborado a partir del análisis estadístico de precipitaciones máximas en Hydrognomon 4.

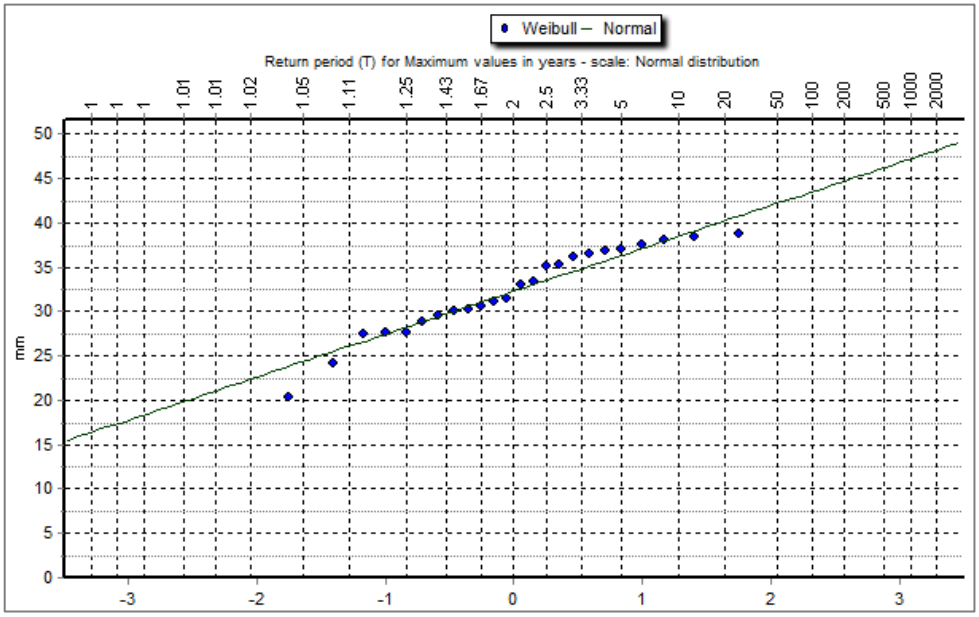
Los resultados evidencian que no existe una única distribución que represente adecuadamente el comportamiento de las precipitaciones en todas las estaciones, lo cual refleja la variabilidad espacial del régimen pluviométrico en la zona de estudio.

Se observa que las distribuciones del tipo Gamma 3P (Pearson III) y Log-Pearson III predominan en la mayoría de estaciones, lo cual es consistente con estudios hidrológicos aplicados a eventos extremos, donde las series presentan asimetría positiva.

Por otro lado, la estación Chilcayoc presenta un ajuste a la distribución normal, lo cual sugiere una menor variabilidad relativa en comparación con las demás estaciones.

Figura 28

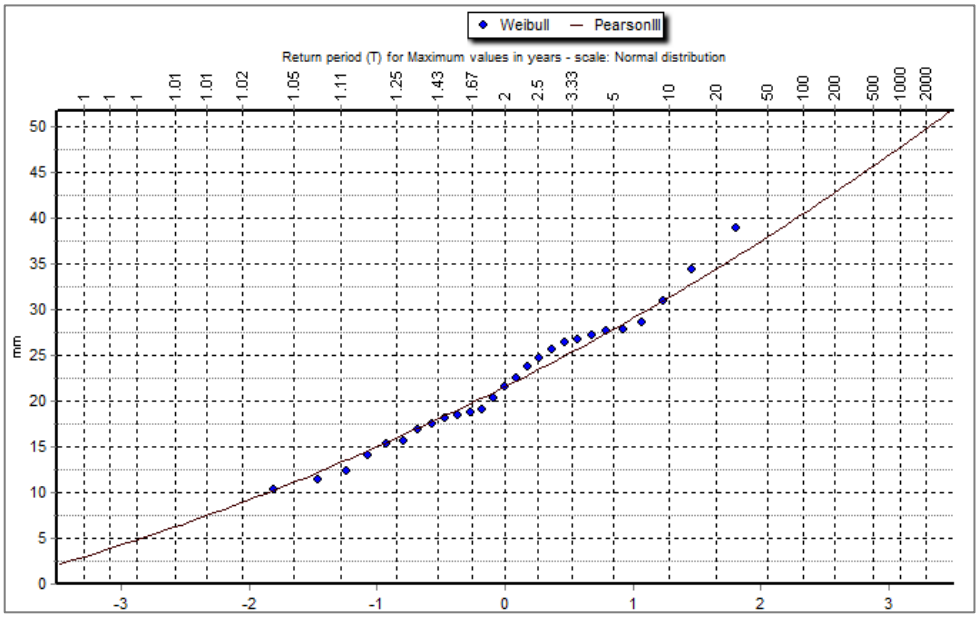
Ajuste de distribución de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 h - Estación Chilcayoc



Nota. Elaborado a partir del análisis en Hydrognomon 4.

Figura 29

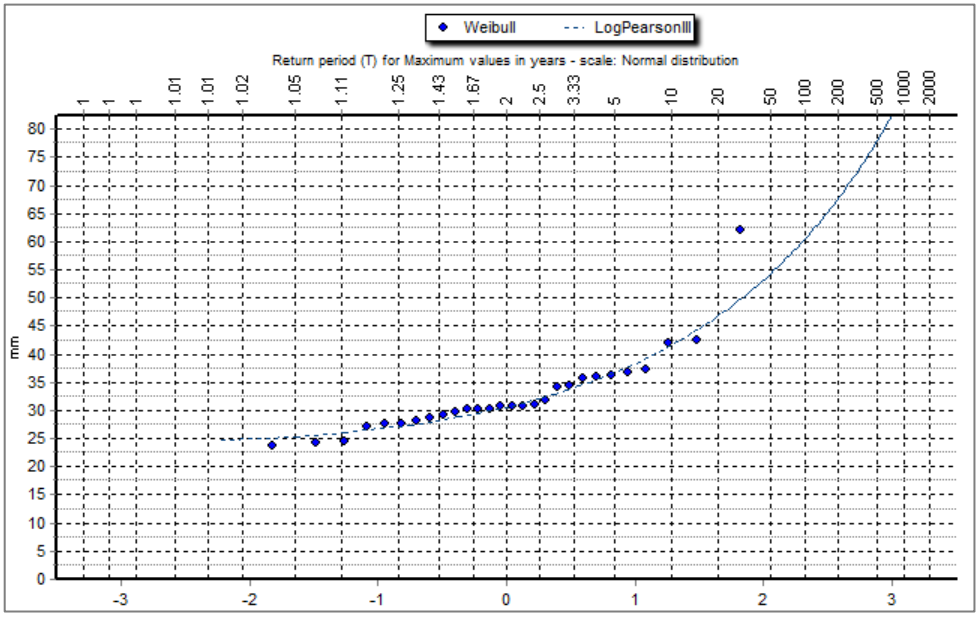
Ajuste de distribución de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 h - Estación Cotahuasi



Nota. Elaborado a partir del análisis en Hydrognomon 4.

Figura 30

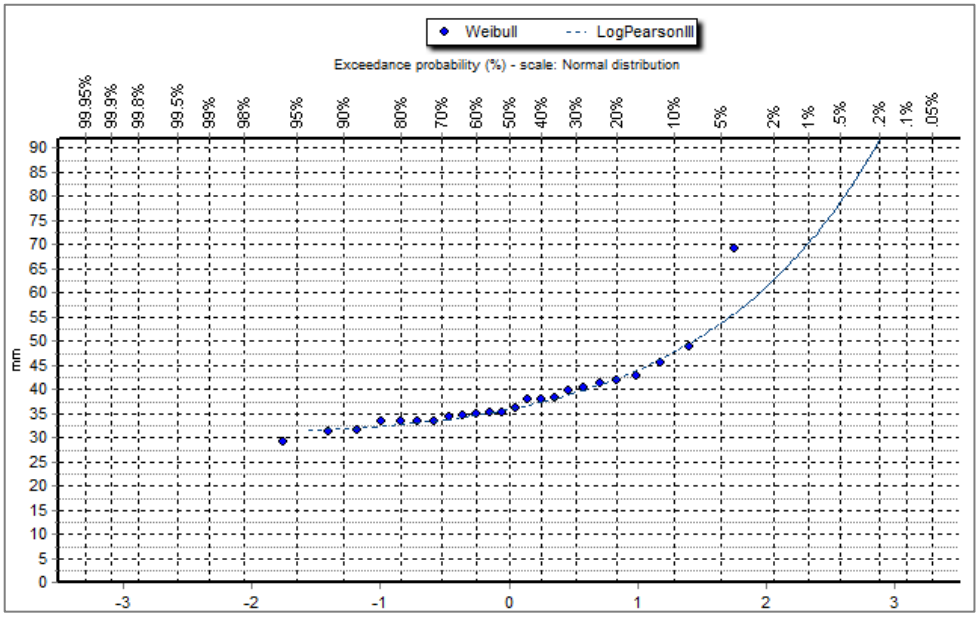
Ajuste de distribución de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 h - Estación Curahuasi



Nota. Elaborado a partir del análisis en Hydrognomon 4.

Figura 31

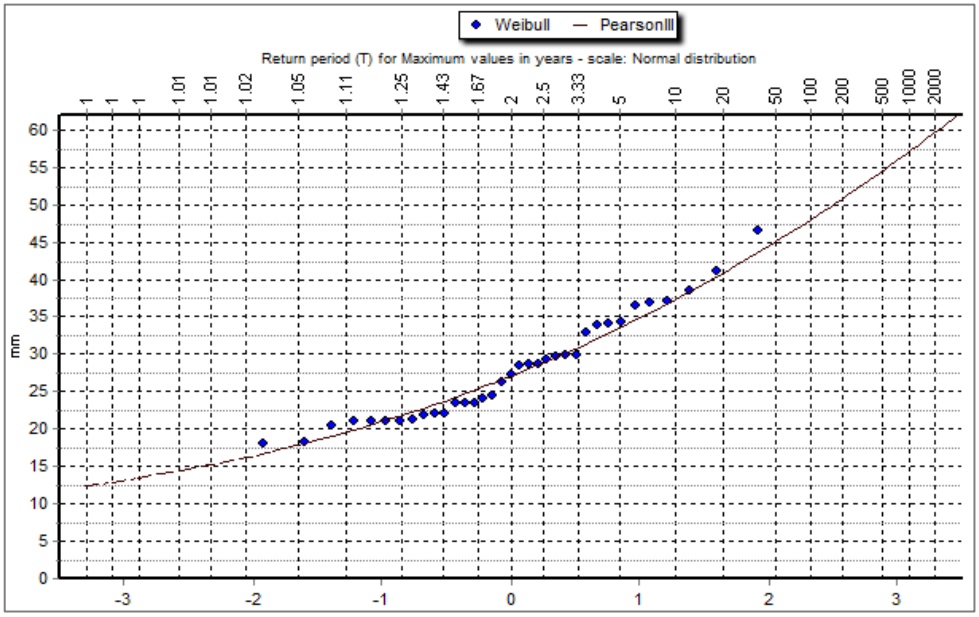
Ajuste de distribución de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 h - Estación Paruro



Nota. Elaborado a partir del análisis en Hydrognomon 4.

Figura 32

Ajuste de distribución de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 h - Estación Puquio



Nota. Elaborado a partir del análisis en Hydrognomon 4.

5.1.2.4. Evaluación de la Bondad de Ajuste de las Distribuciones Probabilísticas.

Con el fin de validar la representatividad de las distribuciones de probabilidad ajustadas a las series de precipitaciones máximas en 24 horas, se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S).

Esta prueba permitió comparar la distribución empírica de los datos con las distribuciones teóricas evaluadas, determinando el grado de ajuste mediante el estadístico Δ (delta), el cual representa la máxima diferencia entre ambas funciones de distribución.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 35, donde se identifican las distribuciones que cumplen con el criterio de aceptación, es decir, aquellas en las que el valor calculado es menor que el valor crítico (Δ tabular).

Tabla 35

Resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para las distribuciones de probabilidad

Estación	Δ tabular	Normal	Pearson III	Log-Pearson III	Distribución seleccionada
Chilcayoc	0.269	0.1165	-	-	Normal
Cotahuasi	0.254	-	0.0733	-	Pearson III
Curahuasi	0.250	-	-	0.0988	Log-Pearson III
Paruro	0.269	-	-	0.0923	Log-Pearson III
Puquio	0.224	-	0.0991	-	Pearson III

Nota. Elaborado a partir de la aplicación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov a las series de precipitaciones máximas.

Los resultados evidencian que, en todas las estaciones analizadas, los valores del estadístico Δ calculado son menores que el Δ tabular, lo cual indica que las distribuciones seleccionadas presentan un ajuste adecuado a los datos observados.

Se observa que las distribuciones Pearson tipo III y Log-Pearson tipo III predominan en la mayoría de estaciones, lo cual es consistente con el comportamiento asimétrico de las precipitaciones extremas.

Asimismo, la estación Chilcayoc presenta un ajuste adecuado a la distribución normal, lo que sugiere una menor dispersión relativa de los datos en comparación con las demás estaciones.

5.1.2.5. Determinación de Periodos de Retorno y Estimación de Precipitaciones Máximas de Diseño

Para la definición del periodo de retorno de diseño, se consideró la relación entre la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos, la vida útil de la infraestructura y el nivel de riesgo admisible.

De acuerdo con el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del MTC, el riesgo admisible máximo recomendado es del 25 %, mientras que la vida útil de diseño para obras hidráulicas se establece en 40 años.

La relación entre estas variables se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$R = 1 - (1 - \frac{1}{T})^n$$

Donde:

R: riesgo admisible (%)

T: periodo de retorno (años)

n: vida útil de la estructura (años)

A partir de esta expresión, se determinó un periodo de retorno de aproximadamente 140 años, el cual corresponde a condiciones de diseño para obras de protección hidráulica, tales como defensas ribereñas o encauzamientos.

No obstante, con fines de análisis hidrológico y evaluación de escenarios, se consideraron los siguientes periodos de retorno: 5, 10, 50, 100, 140 y 500 años, permitiendo representar desde eventos frecuentes hasta eventos extremos.

5.1.2.6. Estimación de Precipitaciones Máximas en 24 horas para distintos Periodos de Retorno.

A partir de las distribuciones de probabilidad previamente seleccionadas y validadas, se estimaron las precipitaciones máximas en 24 horas para cada estación pluviométrica, correspondientes a los diferentes periodos de retorno definidos.

Estos valores constituyen la base para la generación de tormentas de diseño y el posterior modelamiento hidrológico en la cuenca de estudio.

Tabla 36

Precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retorno

Estación	5 años	10 años	50 años	100 años	140 años	500 años
Chilcayoc	36.35	38.47	42.20	43.52	44.12	46.18
Cotahuasi	27.83	31.36	37.98	40.46	41.60	45.69
Curahuasi	36.82	41.68	54.43	60.76	64.07	77.94
Paruro	42.30	47.74	62.85	70.80	75.02	95.18
Puquio	33.48	37.34	44.98	47.96	49.35	54.43

Nota. Elaborado a partir del análisis de frecuencia de precipitaciones máximas.

Los resultados muestran un incremento progresivo de las precipitaciones máximas conforme aumenta el periodo de retorno, lo cual es consistente con el comportamiento esperado de eventos hidrológicos extremos.

Se observa que la estación Paruro presenta los valores más elevados para todos los periodos de retorno, lo que sugiere una mayor intensidad de eventos extremos en dicha zona. En contraste, la estación Cotahuasi registra los valores más bajos, evidenciando variabilidad espacial en el régimen de precipitaciones.

Asimismo, las diferencias entre estaciones reflejan la influencia de factores topográficos y climáticos propios de la región andina, los cuales condicionan la distribución de las lluvias.

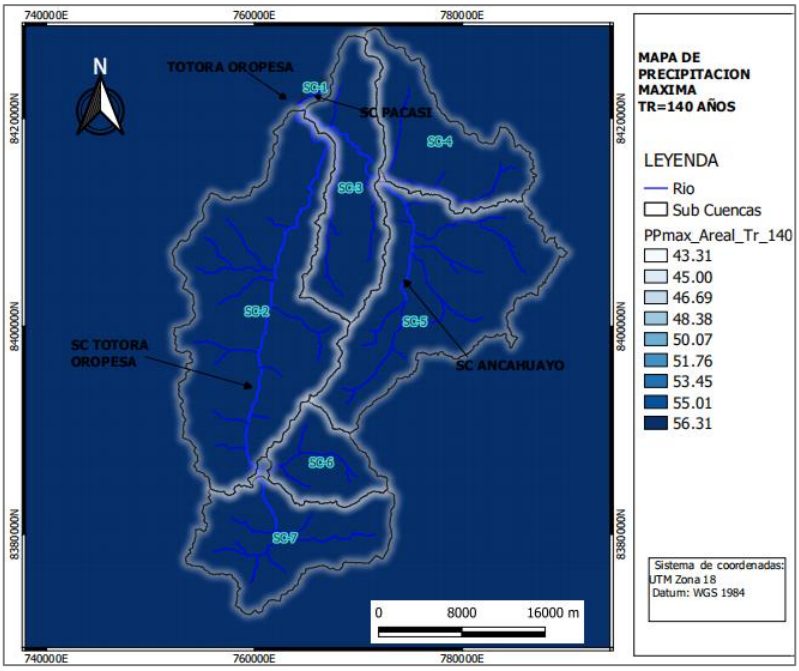
5.1.2.7. Determinación de la Precipitación Media en la Cuenca y Subcuencas.

Para la estimación de la precipitación media espacial en la cuenca de estudio, se realizó la interpolación de los valores de precipitación máxima en 24 horas correspondientes a cada periodo de retorno, utilizando el método Spline multivariado (Multi-level B-spline) en el software QGIS.

Este procedimiento permitió generar superficies continuas de precipitación, a partir de las cuales se elaboraron los mapas de isoyetas para cada periodo de retorno. Dichos mapas reflejan la distribución espacial de la precipitación en la cuenca y se presentan en los anexos del presente estudio.

Figura 33

Mapa de isoyetas de precipitación máxima para un periodo de retorno de 140 años



Nota. El mapa representa la distribución espacial de la precipitación máxima mediante interpolación en QGIS.

Posteriormente, se determinó la precipitación media mediante la herramienta Zonal Statistics del software QGIS, la cual permitió calcular valores promedio de precipitación dentro de cada unidad espacial (cuenca y subcuencas).

Este procedimiento permitió obtener valores representativos de precipitación máxima en 24 horas, necesarios para la definición de las condiciones de entrada en el modelo hidrológico.

Tabla 37

Precipitación media en 24 horas para la cuenca de la Quebrada Totora según periodos de retorno (mm)

Unidad	TR 5	TR 10	TR 50	TR 100	TR 140	TR 500
Cuenca Oropesa	37.02	41.57	52.87	58.34	61.17	73.62

Nota. Elaborado a partir de la interpolación espacial de precipitaciones (2025).

Tabla 38

Precipitación media en 24 horas para las subcuencas de la cuenca de la Quebrada Totora (mm)

Subcuenca	TR 5	TR 10	TR 50	TR 100	TR 140	TR 500
SC-1	37.72	41.86	53.69	59.49	62.52	75.77
SC-2	36.89	40.77	51.73	57.00	59.72	71.57
SC-3	37.62	41.69	53.36	59.07	62.03	75.10
SC-4	38.13	42.32	54.45	60.43	63.56	77.45
SC-5	37.46	41.45	52.92	58.49	61.39	74.21
SC-6	36.59	40.36	51.09	56.20	58.84	70.36
SC-7	36.15	39.83	50.22	55.12	57.64	68.58

Nota. Los valores corresponden a precipitaciones máximas de 24 horas estimadas para diferentes periodos de retorno en las subcuencas.

Los resultados muestran una distribución relativamente homogénea de la precipitación en la cuenca, aunque se identifican ligeras variaciones entre subcuencas, atribuibles a diferencias en altitud, exposición orográfica y condiciones locales del relieve.

Se observa que la subcuenca SC-4 presenta los valores más altos de precipitación para todos los periodos de retorno, lo que sugiere una mayor susceptibilidad a la generación de escorrentía superficial en esta zona. En contraste, la subcuenca SC-7 registra los valores más bajos, indicando menor aporte relativo de precipitación.

5.1.2.8. Construcción de Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

A partir de las precipitaciones máximas en 24 horas estimadas para cada periodo de retorno, se procedió a su desagregación temporal con el fin de obtener valores de precipitación para diferentes duraciones dentro del intervalo de 24 horas.

Este procedimiento permitió calcular las intensidades de lluvia correspondientes a distintas duraciones, lo que constituye la base para la construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

Las curvas IDF permiten relacionar la intensidad de precipitación con su duración y frecuencia de ocurrencia, siendo una herramienta fundamental para el diseño hidrológico y la estimación de caudales máximos.

El análisis fue desarrollado tanto para la cuenca en general como para cada una de las subcuencas, cuyos resultados detallados se presentan en los anexos.

5.1.2.8.1. Definición del Hietograma de Diseño (Perfil Temporal de Lluvia).

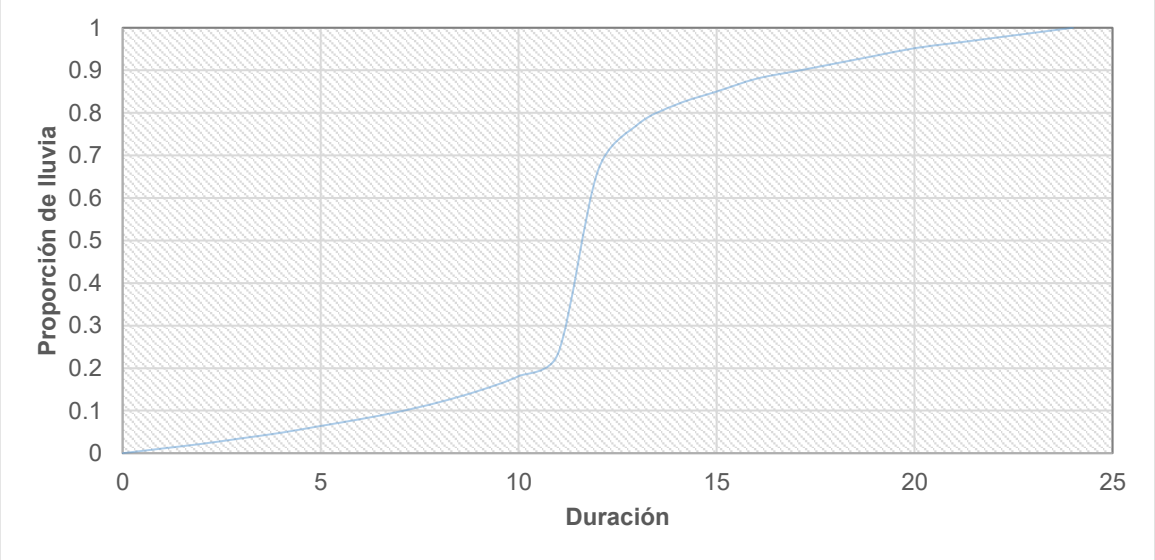
Para la distribución temporal de la precipitación, se adoptó el hietograma tipo II del SCS, el cual es ampliamente utilizado en estudios hidrológicos debido a su representatividad de eventos de lluvia intensa.

Este tipo de distribución se caracteriza por concentrar mayores intensidades en la parte central del evento, lo cual resulta coherente con el comportamiento de lluvias convectivas predominantes en zonas andinas.

Asimismo, se consideró una duración de tormenta entre 8 y 14 horas, en concordancia con las características climatológicas de la región.

Figura 34

Hietograma tipo II del SCS utilizado para la distribución temporal de la lluvia



Nota. Elaborado a partir del método del SCS Tipo II, aplicado para la distribución temporal de la precipitación en la cuenca de la Quebrada Totora.

Una vez definidos los coeficientes de duración de precipitación para los distintos intervalos de tiempo, se estimaron las precipitaciones máximas asociadas a cada duración. A partir de estos valores, se calcularon las intensidades de diseño correspondientes, las cuales permitieron la construcción de las curvas IDF para el área de estudio.

Tabla 39

Coeficientes acumulados del hietograma tipo II del SCS para el periodo de retorno de 140 años

Tiempo (min)	SC_1	SC_2	SC_3	SC_4	SC_5	SC_6	SC_7
60	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
120	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022
180	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
240	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048
300	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064
360	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
420	0.098	0.098	0.098	0.098	0.098	0.098	0.098
480	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120
540	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147
600	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181
660	0.235	0.235	0.235	0.235	0.235	0.235	0.235
720	0.663	0.663	0.663	0.663	0.663	0.663	0.663
780	0.772	0.772	0.772	0.772	0.772	0.772	0.772
840	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820
900	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
960	0.880	0.880	0.880	0.880	0.880	0.880	0.880
1020	0.898	0.898	0.898	0.898	0.898	0.898	0.898
1080	0.916	0.916	0.916	0.916	0.916	0.916	0.916
1140	0.934	0.934	0.934	0.934	0.934	0.934	0.934
1200	0.952	0.952	0.952	0.952	0.952	0.952	0.952
1260	0.964	0.964	0.964	0.964	0.964	0.964	0.964
1320	0.976	0.976	0.976	0.976	0.976	0.976	0.976
1380	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988
1440	1	1	1	1	1	1	1

Nota. Elaborado a partir de la distribución temporal de lluvia del hietograma tipo II del SCS, empleado en el modelamiento hidrológico de la cuenca de la Quebrada Totora.

Tabla 40

Precipitación máxima areal para diferentes duraciones y periodos de retorno (mm)

Duración		Período de retorno (años)					
Hr	**min**	**5**	**10**	**50**	**100**	**140**	**500**
1.00	60.00	15.84	17.79	22.63	24.97	26.18	31.51
2.00	120.00	19.88	22.32	28.39	31.33	32.85	39.53
3.00	180.00	21.88	24.57	31.25	34.48	36.15	43.51
4.00	240.00	23.66	26.56	33.78	37.28	39.09	47.04
5.00	300.00	24.91	27.98	35.58	39.26	41.17	49.55
6.00	360.00	26.03	29.22	37.17	41.01	43.00	51.75
7.00	420.00	27.14	30.47	38.75	42.76	44.84	53.96
8.00	480.00	28.14	31.59	40.18	44.34	46.49	55.95
9.00	540.00	28.95	32.51	41.34	45.62	47.84	57.57
10.00	600.00	29.62	33.26	42.30	46.67	48.94	58.90
11.00	660.00	30.28	34.00	43.25	47.72	50.04	60.22
12.00	720.00	30.95	34.75	44.20	48.77	51.14	61.55
24.00	1440.00	37.02	41.57	52.87	58.34	61.17	73.62

Nota. Elaborado a partir del análisis de precipitación máxima en 24 horas y la aplicación de curvas IDF para la cuenca de la Quebrada Totora.

Tabla 41

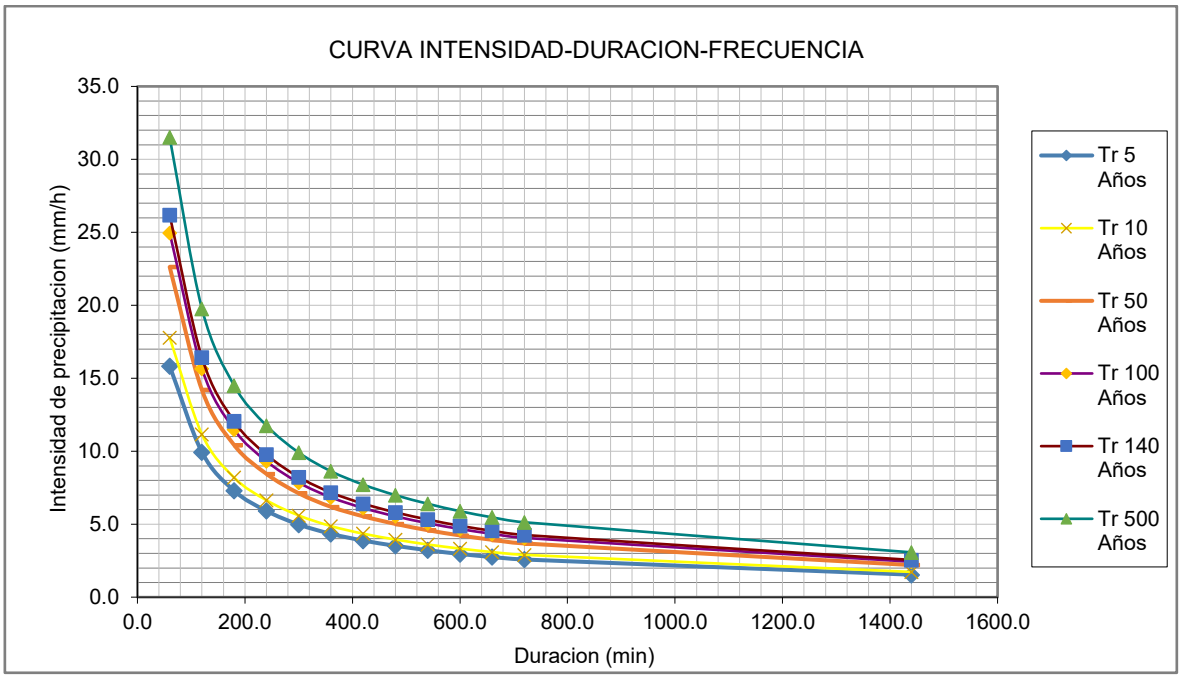
Intensidades de diseño para la cuenca de la Quebrada Totora según duración y periodo de retorno (mm/h)

Duración		Período de retorno (años)					
Hr	**min**	**5**	**10**	**50**	**100**	**140**	**500**
1.00	60.00	15.84	17.79	22.63	24.97	26.18	31.51
2.00	120.00	9.94	11.16	14.20	15.66	16.42	19.77
3.00	180.00	7.29	8.19	10.42	11.49	12.05	14.50
4.00	240.00	5.91	6.64	8.45	9.32	9.77	11.76
5.00	300.00	4.98	5.60	7.12	7.85	8.23	9.91
6.00	360.00	4.34	4.87	6.19	6.84	7.17	8.63
7.00	420.00	3.88	4.35	5.54	6.11	6.41	7.71
8.00	480.00	3.52	3.95	5.02	5.54	5.81	6.99
9.00	540.00	3.22	3.61	4.59	5.07	5.32	6.40
10.00	600.00	2.96	3.33	4.23	4.67	4.89	5.89
11.00	660.00	2.75	3.09	3.93	4.34	4.55	5.47
12.00	720.00	2.58	2.90	3.68	4.06	4.26	5.13
24.00	1440.00	1.54	1.73	2.20	2.43	2.55	3.07

Nota. Elaborado a partir de las precipitaciones máximas calculadas y su transformación en intensidades de diseño mediante relaciones IDF para la cuenca de la Quebrada Totora.

Figura 35

Curvas IDF para intensidades máximas de 24 horas de la cuenca de la Quebrada Totora



Nota. Elaborado a partir del análisis de precipitaciones.

Los resultados muestran que las intensidades de precipitación disminuyen conforme aumenta la duración del evento, lo cual responde al comportamiento típico de las lluvias, donde eventos de corta duración presentan mayores intensidades.

Asimismo, se evidencia que, para un mismo tiempo de duración, las intensidades se incrementan conforme aumenta el periodo de retorno, lo que refleja la mayor severidad de los eventos extremos.

Este comportamiento confirma la coherencia del modelo hidrológico empleado y valida la consistencia de las curvas IDF obtenidas para la cuenca de estudio.

5.1.2.9. Tormenta de Diseño para Distintos Períodos de Retorno.

A partir de la precipitación media estimada para cada subcuenca y de las curvas IDF, se procedió a la generación de las tormentas de diseño empleando el método del SCS. Este enfoque permitió transformar las intensidades de precipitación en láminas de

lluvia efectivas distribuidas en el tiempo, las cuales constituyen el insumo fundamental para la simulación hidrológica en el modelo HEC-HMS.

La construcción de los hietogramas se realizó mediante la aplicación del perfil de tormenta tipo II del SCS, el cual es representativo de eventos de precipitación intensa característicos de regiones montañosas, como el ámbito andino. Este perfil permite distribuir la precipitación total en intervalos de tiempo, asignando mayores intensidades en el periodo central del evento.

Generación de hietogramas mediante el método SCS

Para cada periodo de retorno (5, 10, 50, 100, 140 y 500 años), se calcularon las precipitaciones acumuladas y posteriormente se desagregaron en intervalos de tiempo, obteniendo así las precipitaciones parciales u ordenadas para cada subcuenca.

Tabla 42

Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 5 años (mm)

Tiempo acumulado (min)	Precipitación incremental (mm)						
	SC-1	SC-2	SC-3	SC-4	SC-5	SC-6	SC-7
60	11.629	15.789	16.101	16.320	16.033	15.661	15.472
120	2.962	4.021	4.101	4.156	4.083	3.988	3.940
180	1.467	1.992	2.032	2.059	2.023	1.976	1.952
240	1.304	1.771	1.806	1.830	1.798	1.756	1.735
300	0.924	1.254	1.279	1.296	1.274	1.244	1.229
360	0.815	1.107	1.129	1.144	1.124	1.098	1.085
420	0.815	1.107	1.129	1.144	1.124	1.098	1.085
480	0.734	0.996	1.016	1.030	1.011	0.988	0.976
540	0.598	0.812	0.828	0.839	0.824	0.805	0.795
600	0.489	0.664	0.677	0.686	0.674	0.659	0.651
660	0.489	0.664	0.677	0.686	0.674	0.659	0.651
720	0.489	0.664	0.677	0.686	0.674	0.659	0.651
780	0.489	0.664	0.677	0.686	0.674	0.659	0.651
840	0.489	0.664	0.677	0.686	0.674	0.659	0.651
900	0.435	0.590	0.602	0.610	0.599	0.585	0.578
960	0.435	0.590	0.602	0.610	0.599	0.585	0.578
1020	0.353	0.480	0.489	0.496	0.487	0.476	0.470
1080	0.353	0.480	0.489	0.496	0.487	0.476	0.470

1140	0.326	0.443	0.451	0.458	0.450	0.439	0.434
1200	0.326	0.443	0.451	0.458	0.450	0.439	0.434
1260	0.326	0.443	0.451	0.458	0.450	0.439	0.434
1320	0.326	0.443	0.451	0.458	0.450	0.439	0.434
1380	0.299	0.406	0.414	0.419	0.412	0.403	0.398
1440	0.299	0.406	0.414	0.419	0.412	0.403	0.398

Nota. La tormenta de diseño fue estimada mediante el método SCS a partir de curvas IDF para un periodo de retorno de 5 años.

Tabla 43

Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 10 años (mm)

Tiempo acumulado (min)	Precipitación incremental (mm)						
	SC-1	SC-2	SC-3	SC-4	SC-5	SC-6	SC-7
60	13.268	17.450	17.843	18.113	17.741	17.274	17.047
120	3.379	4.444	4.544	4.613	4.518	4.399	4.342
180	1.674	2.202	2.251	2.285	2.238	2.179	2.151
240	1.488	1.957	2.001	2.031	1.990	1.937	1.912
300	1.054	1.386	1.418	1.439	1.409	1.372	1.354
360	0.930	1.223	1.251	1.270	1.244	1.211	1.195
420	0.930	1.223	1.251	1.270	1.244	1.211	1.195
480	0.837	1.101	1.126	1.143	1.119	1.090	1.075
540	0.682	0.897	0.917	0.931	0.912	0.888	0.876
600	0.558	0.734	0.750	0.762	0.746	0.727	0.717
660	0.558	0.734	0.750	0.762	0.746	0.727	0.717
720	0.558	0.734	0.750	0.762	0.746	0.727	0.717
780	0.558	0.734	0.750	0.762	0.746	0.727	0.717
840	0.558	0.734	0.750	0.762	0.746	0.727	0.717
900	0.496	0.652	0.667	0.677	0.663	0.646	0.637
960	0.496	0.652	0.667	0.677	0.663	0.646	0.637
1020	0.403	0.530	0.542	0.550	0.539	0.525	0.518
1080	0.403	0.530	0.542	0.550	0.539	0.525	0.518
1140	0.372	0.489	0.500	0.508	0.497	0.484	0.478
1200	0.372	0.489	0.500	0.508	0.497	0.484	0.478
1260	0.372	0.489	0.500	0.508	0.497	0.484	0.478
1320	0.372	0.489	0.500	0.508	0.497	0.484	0.478
1380	0.341	0.449	0.459	0.466	0.456	0.444	0.438
1440	0.341	0.449	0.459	0.466	0.456	0.444	0.438

Nota. La tormenta de diseño fue estimada mediante el método SCS a partir de curvas IDF para un periodo de retorno de 10 años.

Tabla 44

Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 50 años (mm)

Tiempo acumulado (min)	Precipitación incremental (mm)						
	SC-1	SC-2	SC-3	SC-4	SC-5	SC-6	SC-7
60	16.624	22.140	22.838	23.305	22.650	21.867	21.494
120	4.234	5.639	5.816	5.935	5.768	5.569	5.474
180	2.097	2.793	2.881	2.940	2.858	2.759	2.712
240	1.864	2.483	2.561	2.614	2.540	2.452	2.411
300	1.321	1.759	1.814	1.851	1.799	1.737	1.708
360	1.165	1.552	1.601	1.634	1.588	1.533	1.507
420	1.165	1.552	1.601	1.634	1.588	1.533	1.507
480	1.049	1.397	1.441	1.470	1.429	1.379	1.356
540	0.855	1.138	1.174	1.198	1.164	1.124	1.105
600	0.699	0.931	0.961	0.980	0.953	0.920	0.904
660	0.699	0.931	0.961	0.980	0.953	0.920	0.904
720	0.699	0.931	0.961	0.980	0.953	0.920	0.904
780	0.699	0.931	0.961	0.980	0.953	0.920	0.904
840	0.699	0.931	0.961	0.980	0.953	0.920	0.904
900	0.621	0.828	0.854	0.871	0.847	0.817	0.804
960	0.621	0.828	0.854	0.871	0.847	0.817	0.804
1020	0.505	0.673	0.694	0.708	0.688	0.664	0.653
1080	0.505	0.673	0.694	0.708	0.688	0.664	0.653
1140	0.466	0.621	0.640	0.653	0.635	0.613	0.603
1200	0.466	0.621	0.640	0.653	0.635	0.613	0.603
1260	0.466	0.621	0.640	0.653	0.635	0.613	0.603
1320	0.466	0.621	0.640	0.653	0.635	0.613	0.603
1380	0.427	0.569	0.587	0.599	0.582	0.562	0.552
1440	0.427	0.569	0.587	0.599	0.582	0.562	0.552

Nota. La tormenta de diseño fue estimada mediante el método SCS a partir de curvas IDF para un periodo de retorno de 50 años.

Tabla 45

Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 100 años (mm)

Tiempo acumulado (min)	Precipitación incremental (mm)						
	SC-1	SC-2	SC-3	SC-4	SC-5	SC-6	SC-7
60	17.976	24.396	25.282	25.864	25.034	24.054	23.591
120	4.578	6.213	6.439	6.587	6.375	6.126	6.008
180	2.268	3.078	3.190	3.263	3.159	3.035	2.977
240	2.016	2.736	2.835	2.901	2.808	2.698	2.646

300	1.428	1.938	2.008	2.055	1.989	1.911	1.874
360	1.260	1.710	1.772	1.813	1.755	1.686	1.654
420	1.260	1.710	1.772	1.813	1.755	1.686	1.654
480	1.134	1.539	1.595	1.632	1.579	1.517	1.488
540	0.924	1.254	1.300	1.330	1.287	1.236	1.213
600	0.756	1.026	1.063	1.088	1.053	1.012	0.992
660	0.756	1.026	1.063	1.088	1.053	1.012	0.992
720	0.756	1.026	1.063	1.088	1.053	1.012	0.992
780	0.756	1.026	1.063	1.088	1.053	1.012	0.992
840	0.756	1.026	1.063	1.088	1.053	1.012	0.992
900	0.672	0.912	0.945	0.967	0.936	0.899	0.882
960	0.672	0.912	0.945	0.967	0.936	0.899	0.882
1020	0.546	0.741	0.768	0.786	0.760	0.731	0.717
1080	0.546	0.741	0.768	0.786	0.760	0.731	0.717
1140	0.504	0.684	0.709	0.725	0.702	0.674	0.661
1200	0.504	0.684	0.709	0.725	0.702	0.674	0.661
1260	0.504	0.684	0.709	0.725	0.702	0.674	0.661
1320	0.504	0.684	0.709	0.725	0.702	0.674	0.661
1380	0.462	0.627	0.650	0.665	0.643	0.618	0.606
1440	0.462	0.627	0.650	0.665	0.643	0.618	0.606

Nota. La tormenta de diseño fue estimada mediante el método SCS a partir de curvas IDF para un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 46

Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 140 años (mm)

Tiempo acumulado (min)	**Precipitación incremental (mm)**						
	SC-1	**SC-2**	**SC-3**	**SC-4**	**SC-5**	**SC-6**	**SC-7**
60	18.622	25.560	26.549	27.204	26.275	25.184	24.670
120	4.743	6.510	6.761	6.928	6.692	6.414	6.283
180	2.350	3.225	3.350	3.432	3.315	3.177	3.113
240	2.089	2.867	2.977	3.051	2.947	2.824	2.767
300	1.479	2.031	2.109	2.161	2.087	2.001	1.960
360	1.305	1.792	1.861	1.907	1.842	1.765	1.729
420	1.305	1.792	1.861	1.907	1.842	1.765	1.729
480	1.175	1.612	1.675	1.716	1.658	1.589	1.556
540	0.957	1.314	1.365	1.398	1.351	1.295	1.268
600	0.783	1.075	1.117	1.144	1.105	1.059	1.038
660	0.783	1.075	1.117	1.144	1.105	1.059	1.038
720	0.783	1.075	1.117	1.144	1.105	1.059	1.038
780	0.783	1.075	1.117	1.144	1.105	1.059	1.038
840	0.783	1.075	1.117	1.144	1.105	1.059	1.038
900	0.696	0.956	0.993	1.017	0.982	0.941	0.922

960	0.696	0.956	0.993	1.017	0.982	0.941	0.922
1020	0.566	0.776	0.806	0.826	0.798	0.765	0.749
1080	0.566	0.776	0.806	0.826	0.798	0.765	0.749
1140	0.522	0.717	0.744	0.763	0.737	0.706	0.692
1200	0.522	0.717	0.744	0.763	0.737	0.706	0.692
1260	0.522	0.717	0.744	0.763	0.737	0.706	0.692
1320	0.522	0.717	0.744	0.763	0.737	0.706	0.692
1380	0.479	0.657	0.682	0.699	0.675	0.647	0.634
1440	0.479	0.657	0.682	0.699	0.675	0.647	0.634

Nota. La tormenta de diseño fue estimada mediante el método SCS a partir de curvas IDF para un periodo de retorno de 140 años.

Tabla 47

Tormenta de diseño para un periodo de retorno de 500 años (mm)

Tiempo acumulado (min)	**Precipitación incremental (mm)**						
	SC-1	**SC-2**	**SC-3**	**SC-4**	**SC-5**	**SC-6**	**SC-7**
60	21.019	30.632	32.143	33.149	31.762	30.114	29.352
120	5.353	7.801	8.186	8.442	8.089	7.669	7.475
180	2.652	3.865	4.055	4.182	4.007	3.799	3.703
240	2.357	3.435	3.605	3.718	3.562	3.377	3.292
300	1.670	2.433	2.553	2.633	2.523	2.392	2.332
360	1.473	2.147	2.253	2.324	2.226	2.111	2.057
420	1.473	2.147	2.253	2.324	2.226	2.111	2.057
480	1.326	1.932	2.028	2.091	2.004	1.900	1.852
540	1.080	1.575	1.652	1.704	1.633	1.548	1.509
600	0.884	1.288	1.352	1.394	1.336	1.267	1.234
660	0.884	1.288	1.352	1.394	1.336	1.267	1.234
720	0.884	1.288	1.352	1.394	1.336	1.267	1.234
780	0.884	1.288	1.352	1.394	1.336	1.267	1.234
840	0.884	1.288	1.352	1.394	1.336	1.267	1.234
900	0.786	1.145	1.202	1.239	1.187	1.126	1.097
960	0.786	1.145	1.202	1.239	1.187	1.126	1.097
1020	0.638	0.930	0.976	1.007	0.965	0.915	0.892
1080	0.638	0.930	0.976	1.007	0.965	0.915	0.892
1140	0.589	0.859	0.901	0.929	0.891	0.844	0.823
1200	0.589	0.859	0.901	0.929	0.891	0.844	0.823
1260	0.589	0.859	0.901	0.929	0.891	0.844	0.823
1320	0.589	0.859	0.901	0.929	0.891	0.844	0.823
1380	0.540	0.787	0.826	0.852	0.816	0.774	0.754
1440	0.540	0.787	0.826	0.852	0.816	0.774	0.754

Nota. La tormenta de diseño fue estimada mediante el método SCS a partir de curvas IDF para un periodo de retorno de 500 años.

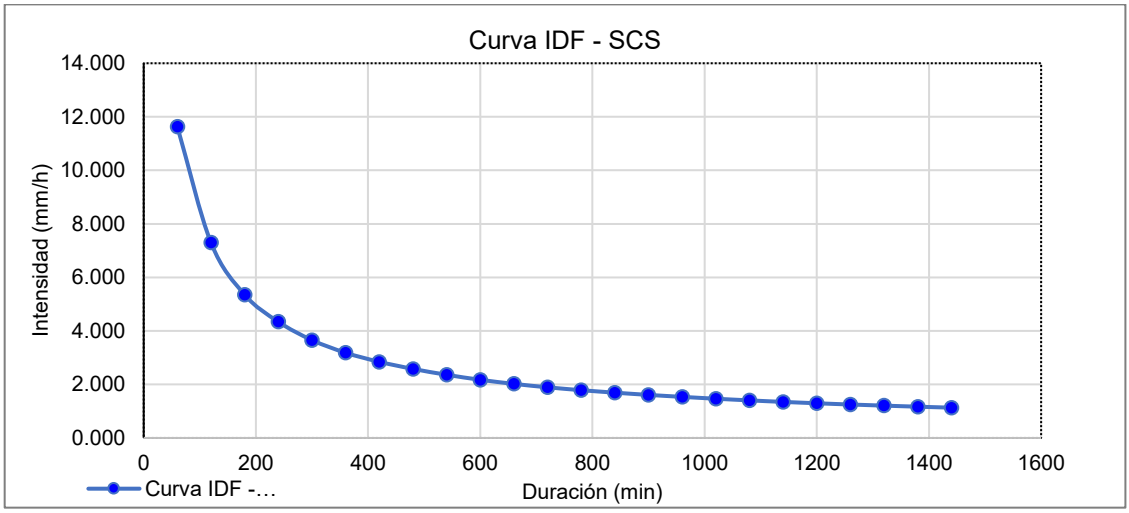
Representación gráfica

Con la finalidad de verificar la consistencia de la distribución temporal de la precipitación, se elaboraron las curvas IDF y los hietogramas de diseño correspondientes para cada subcuenca y periodo de retorno analizado.

A modo de representación, se presentan los resultados obtenidos para la subcuenca 01, considerando periodos de retorno de 5 y 10 años.

Figura 36

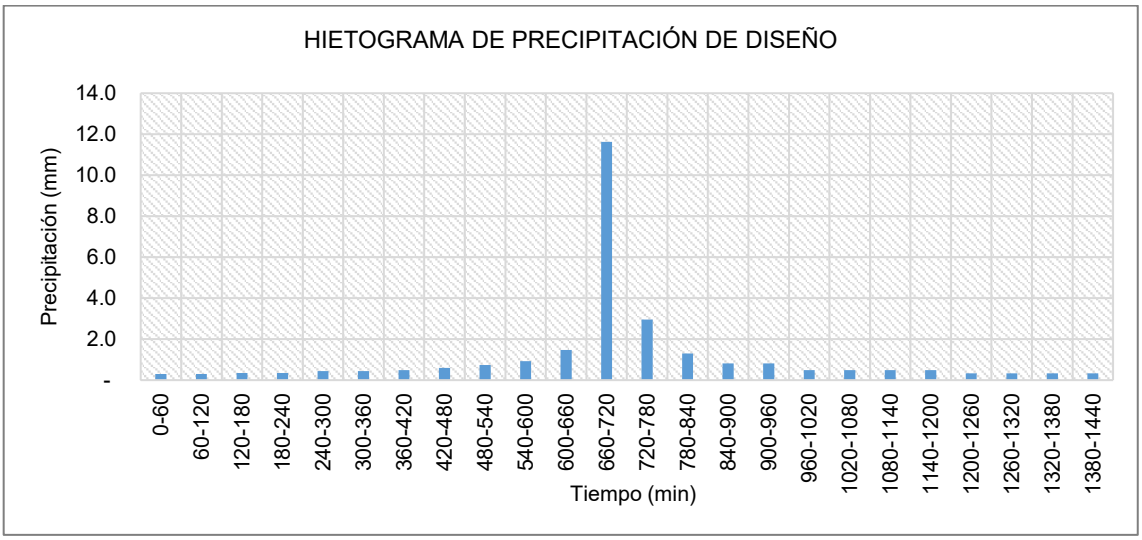
Curva IDF para un período de retorno de 5 años en la subcuenca SC-01



Nota. Elaborado a partir del análisis de precipitaciones máximas y construcción de curvas IDF para la subcuenca SC-01.

Figura 37

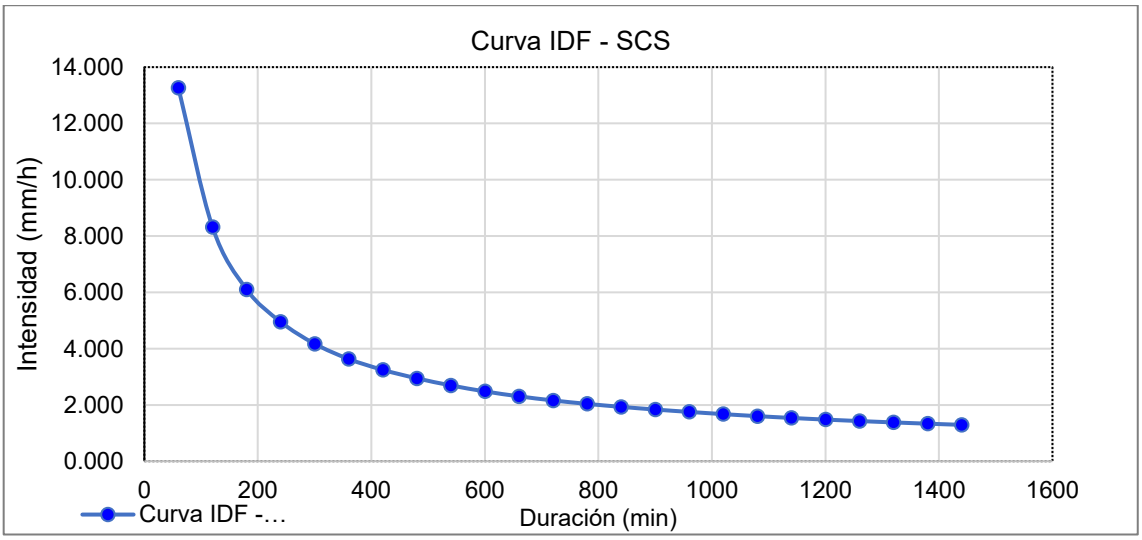
Hietograma de precipitación de diseño para un período de retorno de 5 años en la subcuenca SC-01



Nota. Elaborado mediante la aplicación del hietograma tipo II del SCS para la subcuenca SC-01.

Figura 38

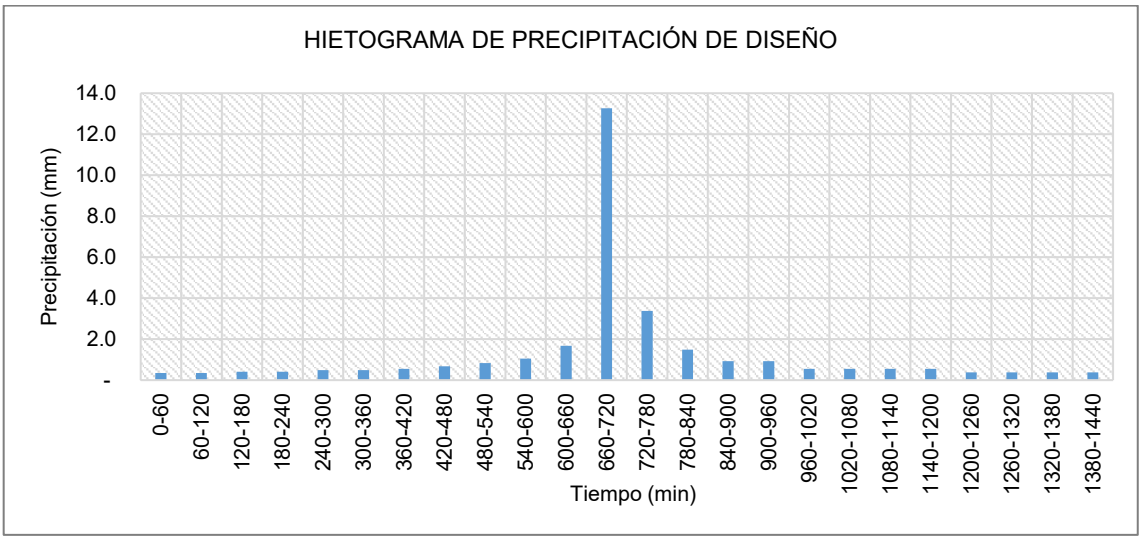
Curva IDF para un período de retorno de 10 años en la subcuenca SC-01



Nota. Elaborado a partir del análisis de precipitaciones máximas y construcción de curvas IDF para la subcuenca SC-01.

Figura 39

Hietograma de precipitación de diseño para un período de retorno de 10 años en la subcuenca SC-01



Nota. Elaborado mediante la aplicación del hietograma tipo II del SCS para la subcuenca SC-01.

La información correspondiente a la generación de hietogramas para cada una de las siete (07) subcuencas, considerando los distintos periodos de retorno analizados, se presenta de manera detallada en la sección de anexos del presente estudio.

Este proceso permitió establecer adecuadamente las condiciones de entrada para el modelamiento hidrológico, mediante la definición de las distribuciones temporales de la precipitación para cada escenario evaluado.

5.1.3. Resultados del Modelamiento Hidrológico mediante el Software HEC-HMS

5.1.3.1. Configuración del Modelo de Cuenca.

Los parámetros obtenidos en las etapas previas de caracterización fisiográfica e hidrometeorológica fueron incorporados en el software HEC-HMS, v.4.13, con el propósito de simular el comportamiento hidrológico de la cuenca frente a eventos de precipitación extrema. La estructuración del modelo consideró la discretización del área de estudio en

subcuencas, así como la definición de los procesos de pérdidas, transformación lluvia-escorrentía y tránsito de caudales.

Para cada una de las subcuencas delimitadas se definieron los parámetros fundamentales requeridos por el modelo.

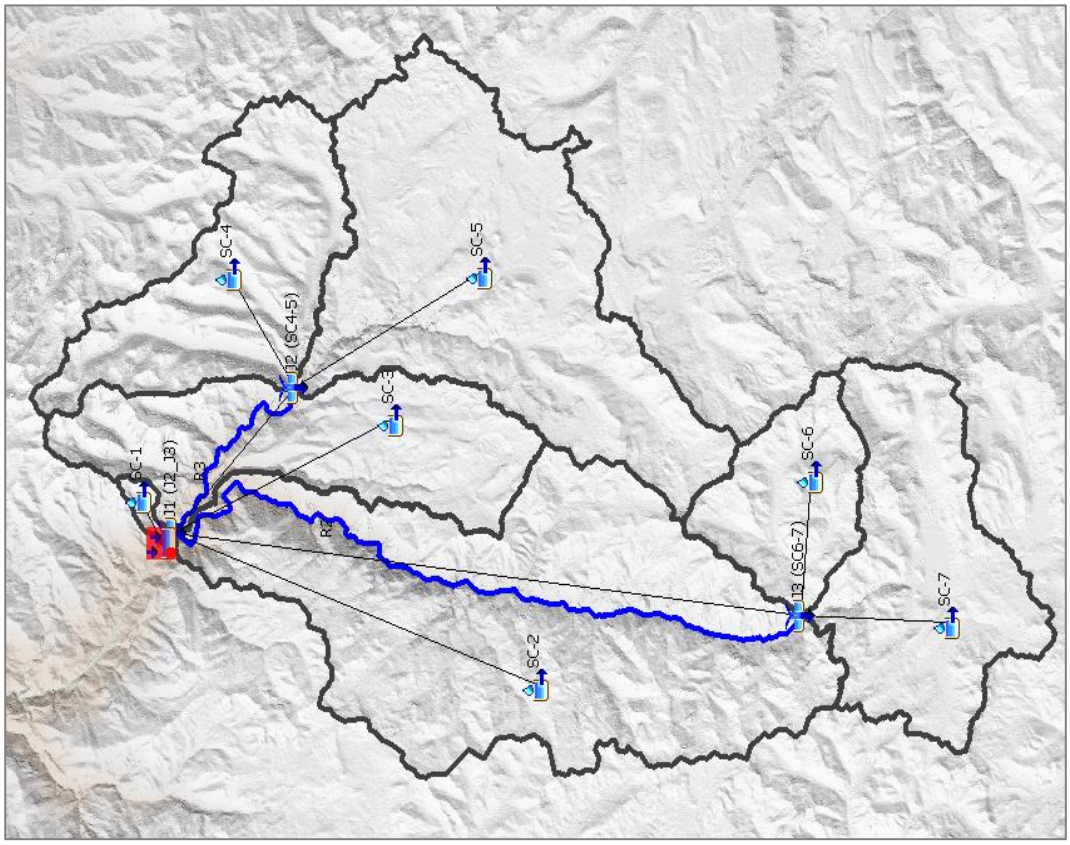
En ese sentido, se consideraron los siguientes componentes hidrológicos:

- Método de pérdidas: método SCS-CN, determinado a partir de información oficial de la ANA y considerando las características de uso del suelo, tipo de suelo y condiciones de humedad antecedente.
- Método de transformación: Hidrograma Unitario del SCS, utilizado para convertir la precipitación efectiva en escorrentía directa.
- Tiempo de rezago (Lag Time): determinado a partir del tiempo de concentración de cada subcuenca.
- Abstracciones iniciales (Ia): estimadas como una fracción de la retención potencial máxima.
- Flujo base: no considerado en la simulación, debido a su baja representatividad en eventos de máximas avenidas.

Para la simulación del tránsito de caudales en los tramos de cauce se empleó el método de Muskingum, el cual requiere la definición de los parámetros hidráulicos K (tiempo de almacenamiento) y X (factor de ponderación), permitiendo representar el almacenamiento y la atenuación del flujo a lo largo del sistema fluvial.

Figura 40

Modelo hidrológico de la cuenca de la Quebrada Totora implementado en HEC-HMS



Nota. Elaborado a partir del modelo digital de elevación (DEM) procesado en el software HEC-HMS v.4.13.

Descripción del esquema hidrológico

La representación esquemática del modelo muestra la delimitación de siete (07) subcuencas, interconectadas mediante una red de drenaje jerarquizada que permite simular la convergencia progresiva de los flujos superficiales hacia el punto de salida de la cuenca.

El sistema hidrológico modelado evidencia un patrón de acumulación secuencial de caudales, donde los aportes generados en las subcuencas ubicadas en la parte alta (principalmente SC-2 y SC-3) confluyen en un primer nodo de unión (J1). A partir de este punto, el flujo continúa su trayectoria a lo largo del cauce principal, incorporando sucesivamente los aportes de las subcuencas intermedias (SC-4 y SC-5) en el nodo J2, y posteriormente los provenientes de las subcuencas inferiores (SC-6 y SC-7) en el nodo J3.

Esta configuración permite representar adecuadamente el comportamiento hidrológico distribuido de la cuenca, así como los efectos de sincronización y acumulación de caudales durante eventos de lluvia intensa.

Fundamentación de los métodos hidrológicos empleados

La transformación de la precipitación en escorrentía directa se realizó mediante el Hidrograma Unitario Sintético del SCS, desarrollado por esta institución, actualmente denominada NRCS. Este método es ampliamente utilizado en cuencas sin información hidrométrica, debido a su capacidad para incorporar parámetros físicos representativos del sistema.

La estimación de las pérdidas por infiltración se efectuó mediante el método del CN, adoptando valores derivados de la cartografía oficial proporcionada por la ANA, lo cual garantiza consistencia con las condiciones reales de la cuenca.

En el presente estudio no se consideró el flujo base, debido a que su contribución resulta poco significativa en comparación con los caudales generados durante eventos extremos, los cuales constituyen el foco del análisis.

El tránsito de avenidas a lo largo de los cauces principales fue modelado mediante el método de Muskingum, adoptando un valor de X = 0,20 y un coeficiente K comprendido entre 3 y 4 horas, en concordancia con recomendaciones técnicas y las características geomorfológicas de la cuenca, tales como pendiente, longitud del cauce y capacidad de almacenamiento.

Finalmente, el modelo meteorológico se definió a partir de un hietograma de diseño basado en la distribución temporal tipo II del SCS, el cual es representativo de tormentas de alta intensidad y corta duración, características de regiones andinas. Esta distribución permite concentrar los mayores aportes de precipitación en el periodo central del evento, reproduciendo de manera adecuada las condiciones críticas de generación de escorrentía.

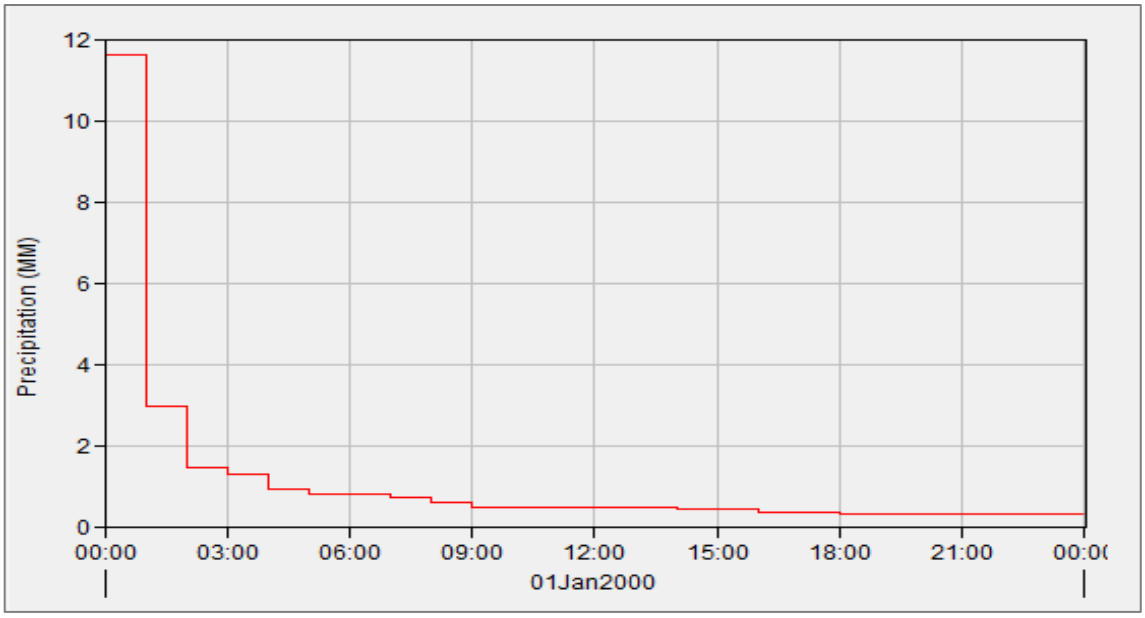
5.1.3.2. Configuración del Modelo Meteorológico.

El modelo meteorológico se configuró mediante la incorporación de hietogramas de precipitación de diseño para cada subcuenca, considerando una duración total de tormenta de 24 horas. Estos hietogramas representan la distribución temporal de la lluvia y constituyen el insumo principal para la simulación hidrológica.

Se evaluaron distintos escenarios hidrológicos asociados a los siguientes períodos de retorno: Tr = 5, 10, 50, 100, 140 y 500 años, lo que permitió analizar el comportamiento de la cuenca frente a eventos de diversa magnitud y probabilidad de ocurrencia.

Figura 41

Hietograma de precipitación de diseño utilizado en el modelo HEC-HMS



Nota. El hietograma representa la distribución temporal de la precipitación ingresada al modelo HEC-HMS v.4.13.

5.1.3.3. Especificaciones de Control.

Una vez definido el modelo meteorológico, se procedió a configurar las especificaciones de control del modelo en el software HEC-HMS v.4.13, las cuales permiten establecer el horizonte temporal de la simulación hidrológica y los parámetros de cálculo necesarios para la generación de hidrogramas de crecida.

El período de simulación fue definido desde las 00:00 horas del 01 de enero de 2000 hasta las 00:00 horas del 02 de enero de 2000, cubriendo un intervalo total de 24 horas. Este rango temporal no solo incluye la duración de la tormenta de diseño, sino que también incorpora un tiempo adicional posterior, con el objetivo de representar adecuadamente la fase de recesión del hidrograma hasta el vaciado hidrológico de la cuenca.

Asimismo, se estableció un intervalo de tiempo computacional (time step) acorde con la escala espacial de la cuenca y la duración del evento de precipitación, con la finalidad de asegurar la estabilidad numérica del modelo y mejorar la precisión en la estimación de los caudales simulados. La adecuada selección de este parámetro es fundamental, ya que intervalos demasiado grandes pueden generar pérdida de información en los picos de caudal, mientras que intervalos muy pequeños incrementan innecesariamente el tiempo de procesamiento.

Figura 42

Especificaciones de control del modelo hidrológico en HEC-HMS



Nota. Elaborado a partir de la configuración del módulo *Control Specifications* en el software HEC-HMS v.13.

5.1.3.4. Resultados de la Simulación Hidrológica.

Una vez incorporados y validados todos los parámetros del modelo hidrológico en el software HEC-HMS v.4.13, se procedió a ejecutar las simulaciones correspondientes a los diferentes períodos de retorno definidos en el estudio (Tr = 5, 10, 50, 100, 140 y 500 años).

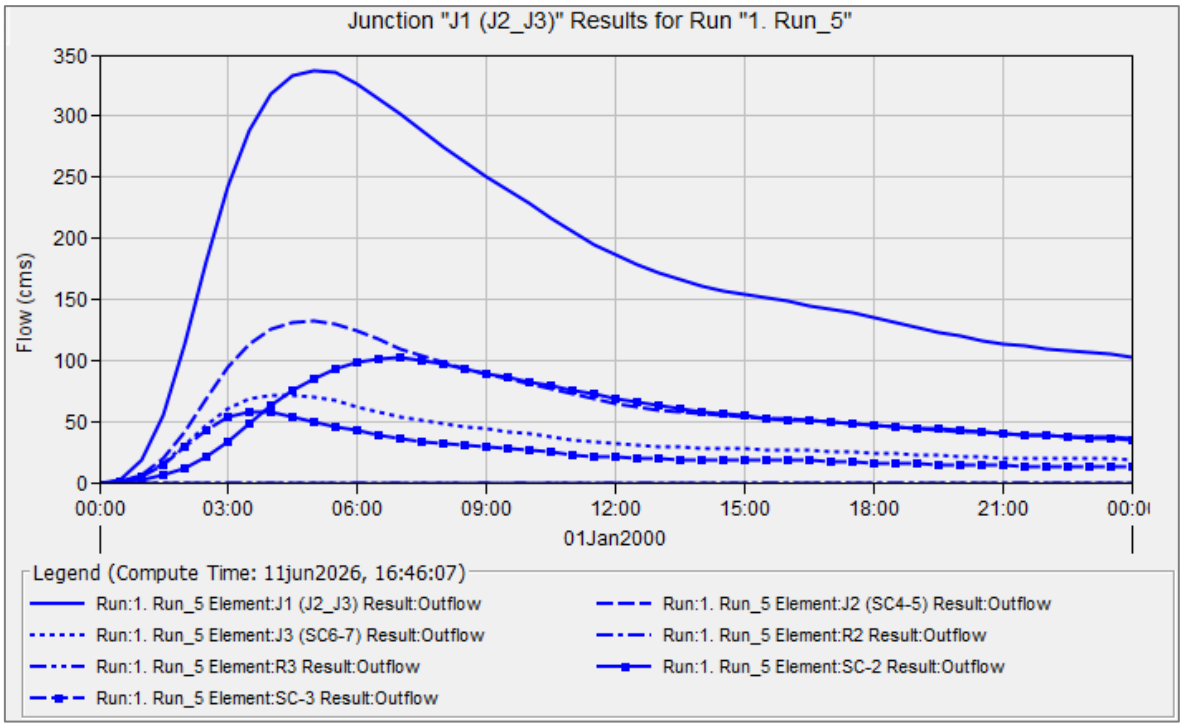
Como resultado de la simulación, se obtuvieron los hidrogramas de avenida, los cuales representan la variación temporal del caudal en el punto de salida de la cuenca frente a eventos de precipitación extrema. Estos hidrogramas constituyen la principal salida del modelo y permiten evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca, especialmente en términos de magnitud del caudal pico y tiempo de respuesta.

El análisis de los resultados evidencia que, a medida que se incrementa el período de retorno, se produce un aumento significativo en los caudales máximos, acompañado de una ligera reducción en el tiempo al pico. Este comportamiento es característico de eventos de mayor intensidad, donde la escorrentía superficial se genera de forma más rápida debido a la saturación del suelo y a la disminución de la capacidad de infiltración.

Asimismo, los hidrogramas obtenidos presentan una forma típica asimétrica, con un ascenso relativamente rápido y una fase de recesión más prolongada, lo cual es consistente con las características fisiográficas de la cuenca y el uso del hidrograma unitario del SCS.

Figura 43

Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 5 años.



Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 44

Caudal pico para un período de retorno de 5 años.

Project: MA-CH Simulation Run: 1. Run_5

Start of Run: 01ene2000, 00:00 Basin Model: Cuenca_Oropesa
End of Run: 02ene2000, 00:00 Meteorologic Model: 1. Oropesa_TR5 años
Compute Time: 11jun2026, 16:46:07 Control Specifications: Esp. Control 01

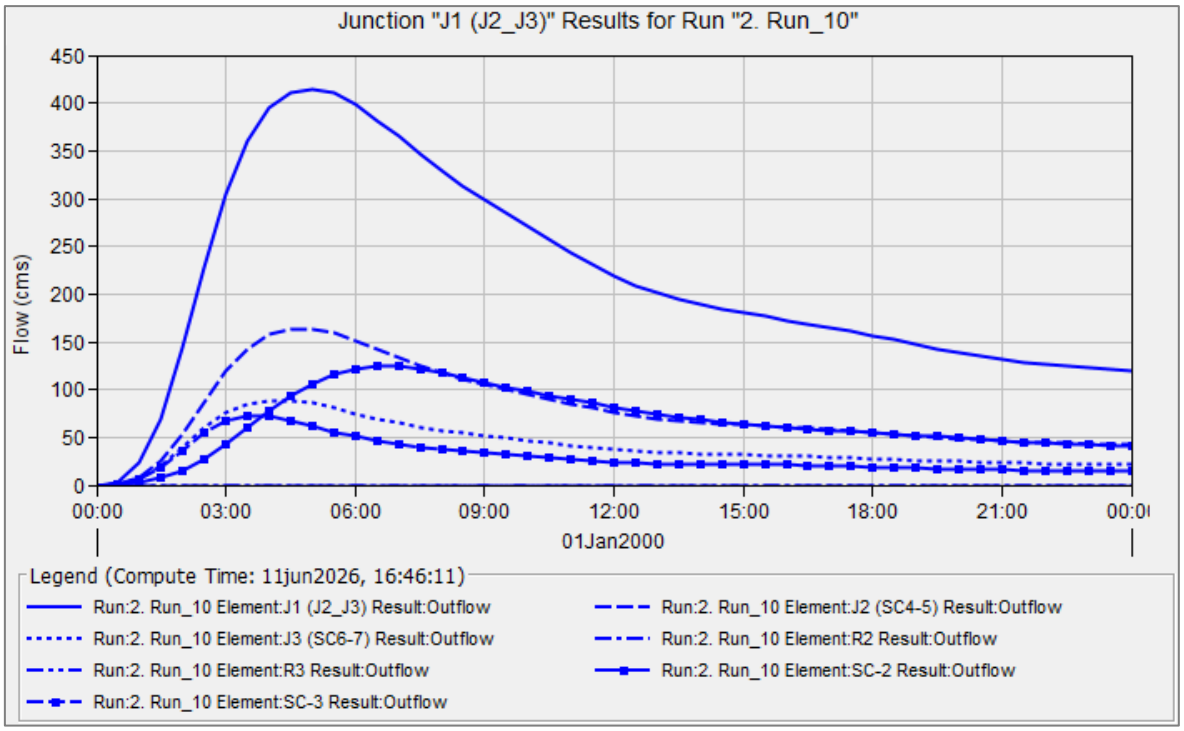
Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Watershed Explorer

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SC-5	266.9	85.9	1 January 2000, 05:30	13.88
SC-4	133.1	53.9	1 January 2000, 04:00	14.82
J2 (SC4-5)	400.0	131.9	1 January 2000, 05:00	14.19
SC-7	150.4	48.0	1 January 2000, 05:00	13.19
SC-6	71.1	28.9	1 January 2000, 03:30	13.93
J3 (SC6-7)	221.5	71.8	1 January 2000, 04:30	13.42
R2	0.0	0.0	31 December 1999, 24:00	
R3	0.0	0.0	31 December 1999, 24:00	
SC-2	372.6	101.8	1 January 2000, 07:00	13.05
SC-3	145.5	58.1	1 January 2000, 03:30	14.51
J1 (J2_J3)	1139.7	337.6	1 January 2000, 05:00	13.71
R1	0.0	0.0	31 December 1999, 24:00	
SC-1	4.6	1.1	1 January 2000, 02:00	7.26
Punto Aforo	1144.4	338.1	1 January 2000, 05:00	13.68

Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 45

Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 10 años.



Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 46

Caudal pico para un período de retorno de 10 años.

Project: MA-CH Simulation Run: 2. Run_10

Start of Run: 01ene2000, 00:00 Basin Model: Cuenca_Oropesa
End of Run: 02ene2000, 00:00 Meteorologic Model: 2. Oropesa_TR10 años
Compute Time: 11jun2026, 16:46:11 Control Specifications: Esp. Control 01

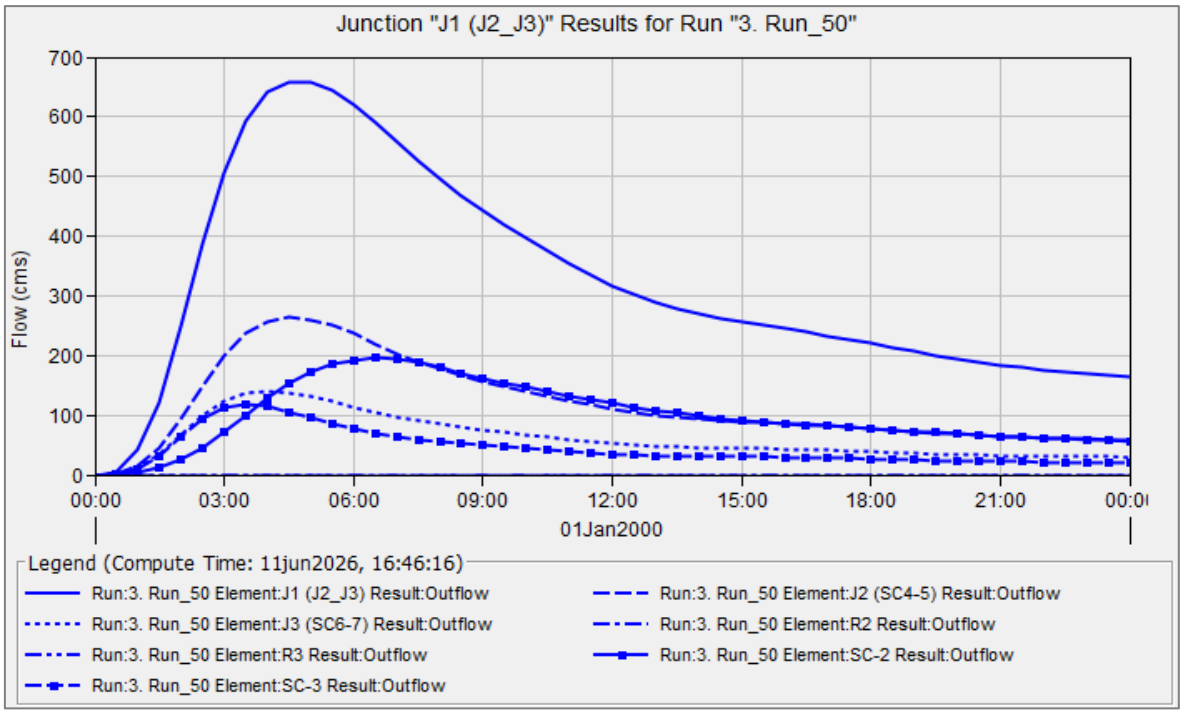
Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Watershed Explorer

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SC-5	266.9	105.6	1 January 2000, 05:30	16.62
SC-4	133.1	66.9	1 January 2000, 04:00	17.80
J2 (SC4-5)	400.0	162.9	1 January 2000, 04:30	17.01
SC-7	150.4	58.7	1 January 2000, 05:00	15.70
SC-6	71.1	35.7	1 January 2000, 03:00	16.59
J3 (SC6-7)	221.5	88.1	1 January 2000, 04:00	15.98
R2	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
R3	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
SC-2	372.6	124.4	1 January 2000, 07:00	15.63
SC-3	145.5	72.5	1 January 2000, 03:30	17.39
J1 (J2_J3)	1139.7	415.0	1 January 2000, 05:00	16.41
R1	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
SC-1	4.6	1.8	1 January 2000, 01:00	9.62
Punto Aforo	1144.4	415.6	1 January 2000, 05:00	16.38

Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 47

Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 50 años.



Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 48

Caudal pico para un período de retorno de 50 años.

Project: MA-CH Simulation Run: 3. Run_50

Start of Run: 01ene2000, 00:00 Basin Model: Cuenca_Oropesa
End of Run: 02ene2000, 00:00 Meteorologic Model: 3. Oropesa_TR50 años
Compute Time: 11jun2026, 16:46:16 Control Specifications: Esp. Control 01

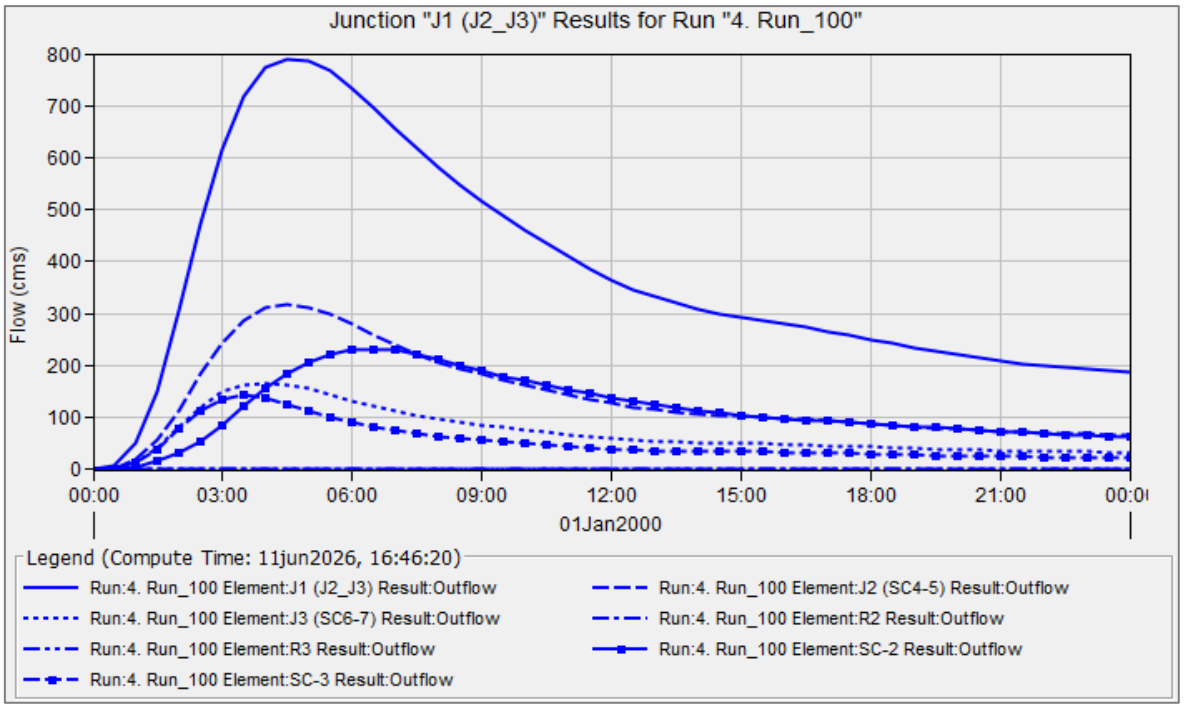
Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Watershed Explorer

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SC-5	266.9	168.1	1 January 2000, 05:30	25.07
SC-4	133.1	109.5	1 January 2000, 03:30	27.03
J2 (SC4-5)	400.0	263.2	1 January 2000, 04:30	25.72
SC-7	150.4	92.7	1 January 2000, 04:30	23.30
SC-6	71.1	58.1	1 January 2000, 03:00	24.67
J3 (SC6-7)	221.5	140.3	1 January 2000, 04:00	23.74
R2	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
R3	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
SC-2	372.6	195.4	1 January 2000, 06:30	23.44
SC-3	145.5	118.7	1 January 2000, 03:30	26.24
J1 (J2_J3)	1139.7	659.2	1 January 2000, 04:30	24.66
R1	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
SC-1	4.6	3.9	1 January 2000, 01:00	14.97
Punto Aforo	1144.4	660.2	1 January 2000, 04:30	24.62

Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 49

Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 100 años.



Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 50

Caudal pico para un período de retorno de 100 años.

Project: MA-CH Simulation Run: 4. Run_100

Start of Run: 01ene2000, 00:00 Basin Model: Cuenca_Oropesa
End of Run: 02ene2000, 00:00 Meteorologic Model: 4. Oropesa_TR100 años
Compute Time: 11jun2026, 16:46:20 Control Specifications: Esp. Control 01

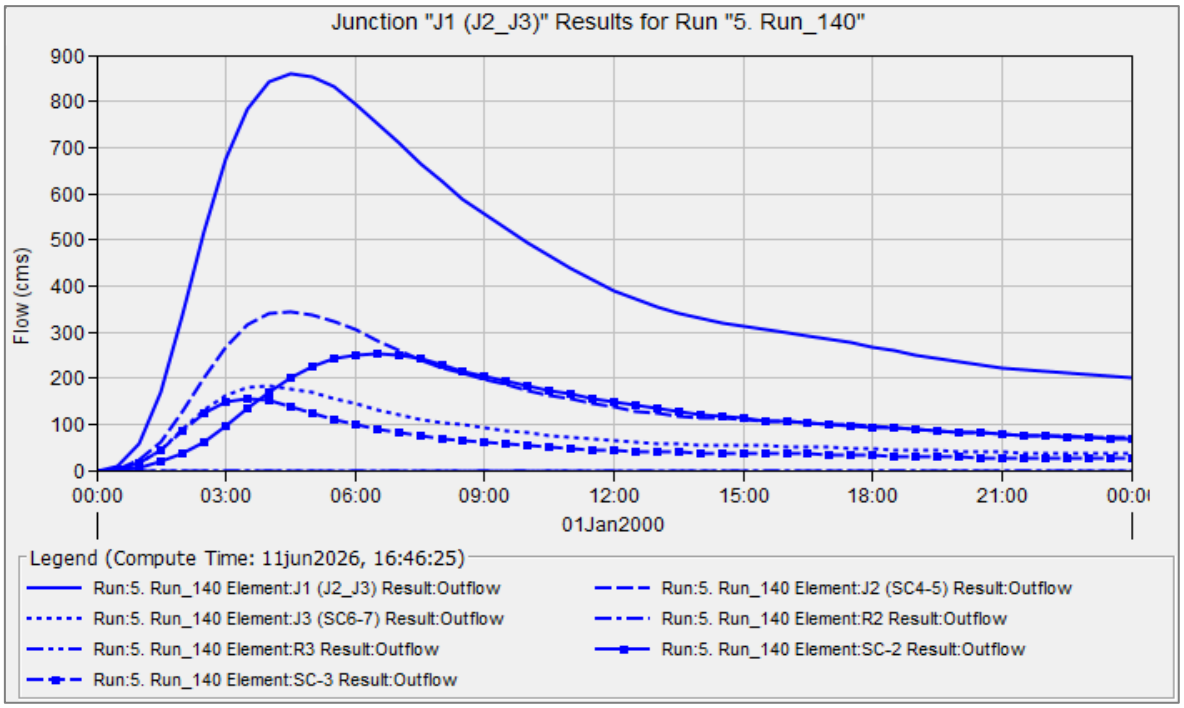
Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Watershed Explorer

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SC-5	266.9	201.5	1 January 2000, 05:00	29.39
SC-4	133.1	132.9	1 January 2000, 03:30	31.84
J2 (SC4-5)	400.0	316.4	1 January 2000, 04:30	30.21
SC-7	150.4	110.4	1 January 2000, 04:30	27.08
SC-6	71.1	69.8	1 January 2000, 03:00	28.73
J3 (SC6-7)	221.5	167.2	1 January 2000, 04:00	27.61
R2	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
R3	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
SC-2	372.6	232.5	1 January 2000, 06:30	27.40
SC-3	145.5	143.4	1 January 2000, 03:30	30.81
J1 (J2_J3)	1139.7	789.7	1 January 2000, 04:30	28.86
R1	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
SC-1	4.6	4.8	1 January 2000, 01:00	17.29
Punto Aforo	1144.4	790.9	1 January 2000, 04:30	28.82

Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 51

Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 140 años.



Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 52

Caudal pico para un período de retorno de 140 años.

Project: MA-CH Simulation Run: 5. Run_140

Start of Run: 01ene2000, 00:00 Basin Model: Cuenca_Oropesa
End of Run: 02ene2000, 00:00 Meteorologic Model: 5. Oropesa_TR140 años
Compute Time: 11jun2026, 16:46:25 Control Specifications: Esp. Control 01

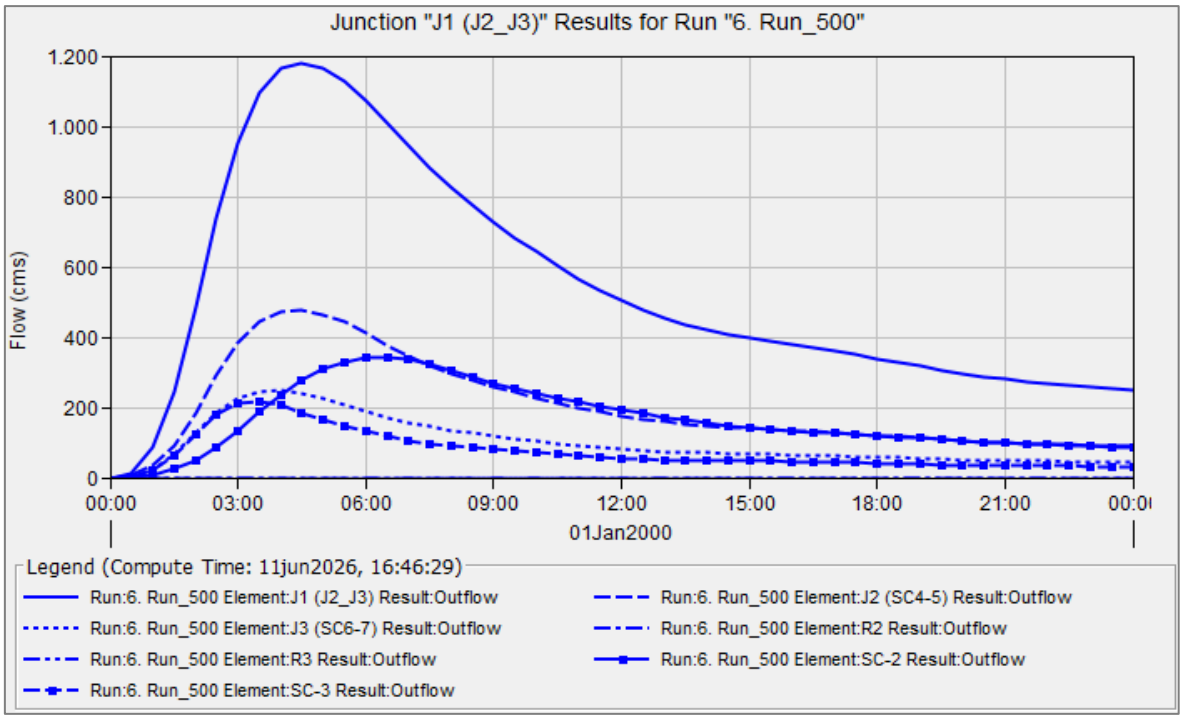
Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Watershed Explorer

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SC-5	266.9	219.5	1 January 2000, 05:00	31.69
SC-4	133.1	145.6	1 January 2000, 03:30	34.40
J2 (SC4-5)	400.0	345.0	1 January 2000, 04:30	32.59
SC-7	150.4	119.7	1 January 2000, 04:30	29.07
SC-6	71.1	76.0	1 January 2000, 03:00	30.87
J3 (SC6-7)	221.5	181.5	1 January 2000, 04:00	29.65
R2	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
R3	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
SC-2	372.6	252.2	1 January 2000, 06:30	29.50
SC-3	145.5	156.6	1 January 2000, 03:30	33.22
J1 (J2_J3)	1139.7	859.5	1 January 2000, 04:30	31.09
R1	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
SC-1	4.6	5.3	1 January 2000, 01:00	18.42
Punto Aforo	1144.4	860.8	1 January 2000, 04:30	31.04

Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 53

Hidrograma sintético de avenidas para un período de retorno de 500 años.



Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 54

Caudal pico para un período de retorno de 500 años.

Project: MA-CH Simulation Run: 6. Run_500

Start of Run: 01ene2000, 00:00 Basin Model: Cuenca_Oropesa
End of Run: 02ene2000, 00:00 Meteorologic Model: 6. Oropesa_TR500 años
Compute Time: 11jun2026, 16:46:29 Control Specifications: Esp. Control 01

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Watershed Explorer

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SC-5	266.9	303.0	1 January 2000, 05:00	42.15
SC-4	133.1	204.7	1 January 2000, 03:30	46.09
J2 (SC4-5)	400.0	477.7	1 January 2000, 04:30	43.46
SC-7	150.4	162.4	1 January 2000, 04:30	37.93
SC-6	71.1	104.8	1 January 2000, 03:00	40.47
J3 (SC6-7)	221.5	246.5	1 January 2000, 04:00	38.74
R2	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
R3	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
SC-2	372.6	341.7	1 January 2000, 06:30	38.87
SC-3	145.5	218.1	1 January 2000, 03:30	44.18
J1 (J2_J3)	1139.7	1180.5	1 January 2000, 04:30	41.14
R1	0.0	0.0	31 December 1999, 2...	
SC-1	4.6	7.2	1 January 2000, 01:00	22.73
Punto Aforo	1144.4	1182.0	1 January 2000, 04:30	41.06

Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

Tabla 48

Caudales máximos y tiempo al pico para diferentes períodos de retorno en la cuenca de la quebrada Totora.

Periodo de retorno	CN - Caudal máximo (m3/s)	Tiempo al pico (h)	CH - Caudal máximo (m3/s)	Tiempo al pico (h)
5 años	110.80	6:00	338.10	5:00
10 años	147.50	6:00	415.60	5:00
50 años	278.10	5:30	660.20	4:30
100 años	353.50	5:30	790.90	4:30
140 años	395.30	5:30	860.80	4:30
500 años	600.00	5:00	1182.00	4:30

Nota. Elaborado a partir de resultados del modelo HEC-HMS.

5.1.3.5. Caudales Máximos obtenidos en la Subcuenca 01.

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a la estimación de caudales máximos para la subcuenca 01, considerando distintos períodos de retorno. Para ello, se empleó el método de transformación lluvia-escorrentía basado en el hidrograma unitario triangular del SCS, el cual permite representar de manera simplificada la respuesta hidrológica de la subcuenca ante eventos de precipitación de diseño.

Este enfoque asume una forma triangular del hidrograma, caracterizada por un ascenso lineal hasta el caudal pico y una posterior fase de recesión, lo que facilita la estimación del caudal máximo (Qp) en función de la precipitación efectiva y las características geomorfológicas de la subcuenca.

Los resultados obtenidos muestran una relación directa entre la intensidad de precipitación y el incremento del caudal pico, evidenciando que eventos asociados a mayores períodos de retorno generan respuestas hidrológicas más intensas.

Tabla 49

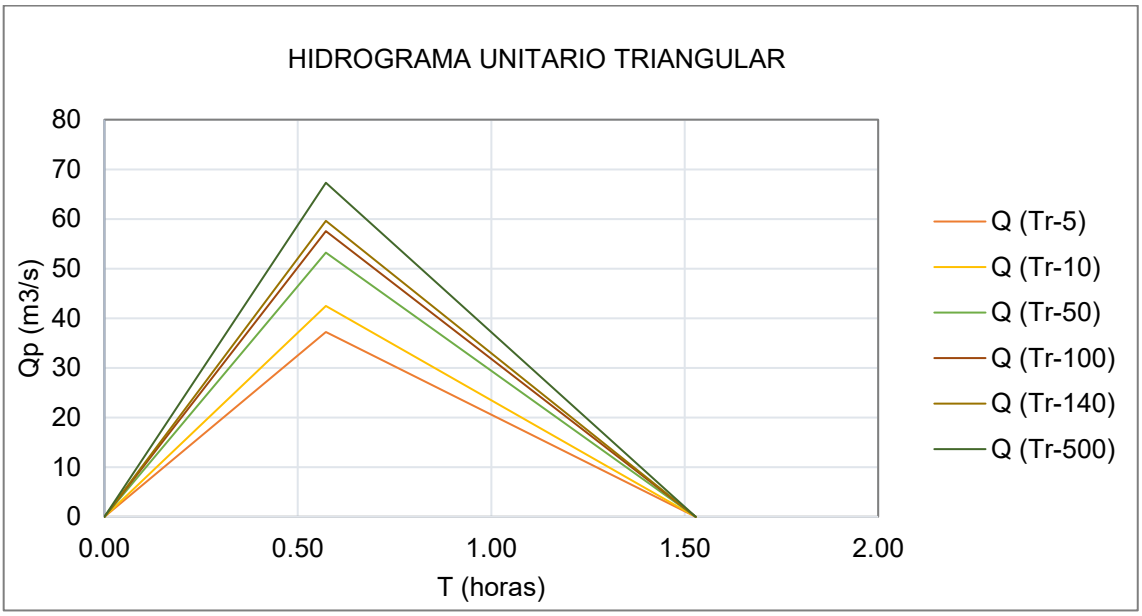
Caudales máximos para diferentes períodos de retorno en la subcuenca SC-01.

Período de retorno (años)	Intensidad (mm/h)	Precipitación total (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Caudal pico Qp (m^3/s)
5	1.73	34.79	27.17	37.23
10	1.93	38.74	31.00	42.48
50	2.33	46.77	38.84	53.22
100	2.49	49.99	42.00	57.55
140	2.57	51.53	43.51	59.62
500	2.85	57.22	49.12	67.30

Nota. Elaborado a partir de la simulación hidrológica en el software HEC-HMS v.4.13.

Figura 55

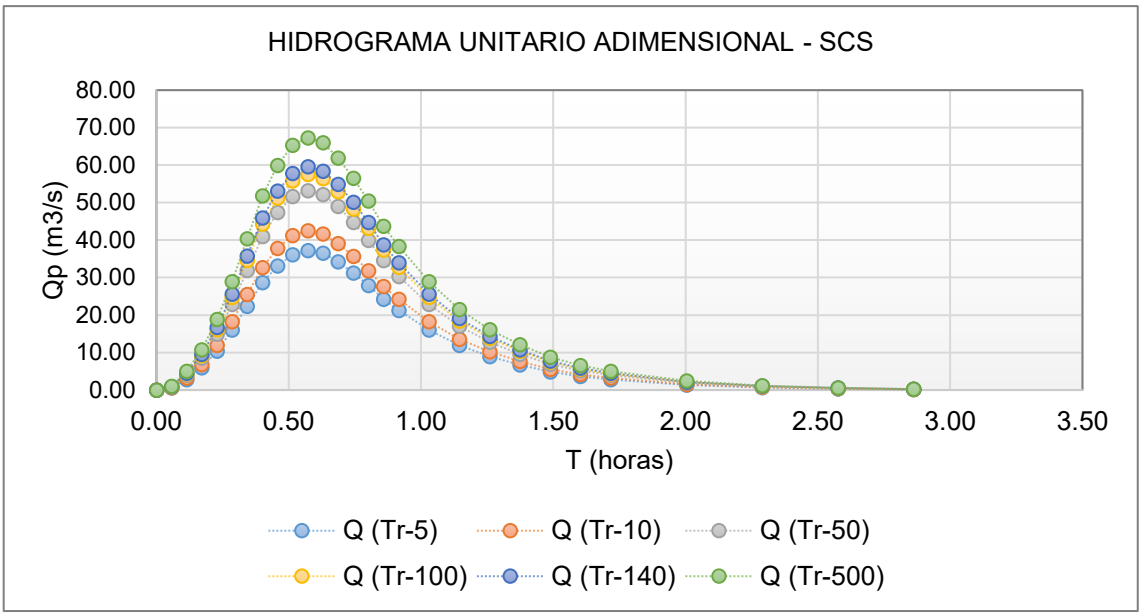
Hidrograma unitario triangular del SCS para la subcuenca SC-01.



Nota. Elaborado a partir de la modelación hidrológica en HEC-HMS v.4.13.

Figura 56

Hidrograma unitario adimensional del SCS para la subcuenca SC-01.



Nota. Elaborado a partir de la simulación en el software HEC-HMS v.4.13.

5.1.4. Resultados del Modelamiento Hidráulico mediante el Software HEC-RAS

5.1.4.1. Delimitación del Tramo de Estudio.

El área de estudio del modelamiento hidráulico se localiza en el ámbito de influencia de los sectores de Totora y Oropesa, donde se emplaza el cauce del río Totora - Oropesa y un embalse asociado que forma parte del sistema hidrológico local. Este sistema fluvial constituye un elemento clave en la dinámica hidráulica de la zona, influyendo en los procesos de escorrentía superficial, transporte de sedimentos y configuración morfológica del cauce.

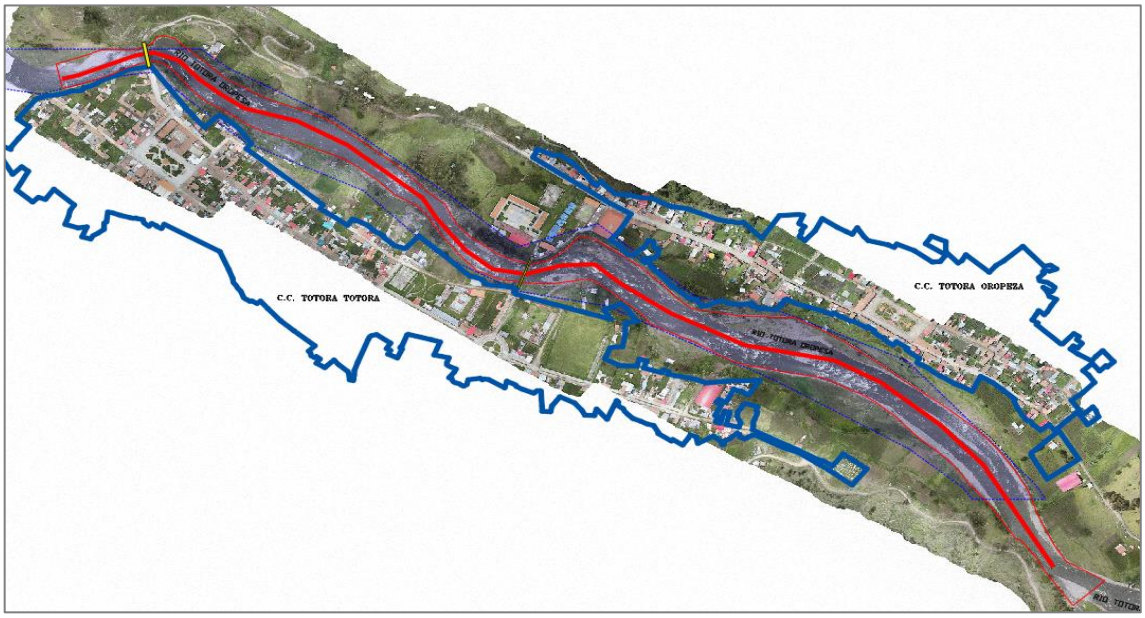
Actualmente, el tramo analizado presenta evidentes problemas de erosión lateral en ambas márgenes del río, originados principalmente por la acción de flujos de alta energía durante eventos de crecida. Estos procesos generan fenómenos de socavación y degradación progresiva de las riberas, comprometiendo la estabilidad del cauce y representando un riesgo para las viviendas e infraestructura ubicadas en zonas aledañas.

Adicionalmente, la zona presenta una alta vulnerabilidad frente a eventos hidrometeorológicos extremos, caracterizados por precipitaciones intensas que provocan el incremento del caudal del río Oropesa. Estas condiciones favorecen la ocurrencia de procesos de inestabilidad de laderas, tales como derrumbes y deslizamientos, así como el desbordamiento del cauce, generando afectaciones directas sobre la infraestructura vial y las actividades socioeconómicas de la población.

El tramo de modelamiento hidráulico comprende una longitud aproximada de 1680 m, abarcando los sectores de Totora y Oropesa. Este tramo incluye un puente existente que forma parte de la red vial local, el cual constituye un punto crítico debido a su interacción directa con el flujo y su potencial influencia en las condiciones de inundación aguas arriba. En este contexto, los sectores ubicados en las inmediaciones del cauce del río Totora - Oropesa representan las áreas de mayor exposición al riesgo, ya que durante eventos extremos el incremento del nivel del agua puede generar desbordamientos que afectan viviendas, infraestructura vial y el normal desarrollo de las actividades de la población.

Figura 57

Ubicación del tramo de estudio en los sectores Totora y Oropesa



Nota. Elaborado a partir del levantamiento fotogramétrico del área de estudio.

5.1.4.2. Información Base Utilizada.

Para el desarrollo del modelamiento hidráulico en el software HEC-RAS, versión 6.6, se emplearon como insumos principales los resultados obtenidos en las etapas previas del estudio, así como la información topográfica de alta resolución del área de intervención.

Los datos utilizados se detallan a continuación:

- Hidrogramas y caudales de diseño, obtenidos del modelamiento hidrológico desarrollado en HEC-HMS para la cuenca de la quebrada Totora, correspondientes a los distintos períodos de retorno analizados.
- Base topográfica de alta resolución, generada a partir de un levantamiento fotogramétrico, con curvas de nivel cada 1 metro, lo que permite una representación detallada de la morfología del terreno y del cauce.

Estos insumos constituyen la base fundamental para la definición de la geometría hidráulica y la simulación del flujo en el tramo de estudio.

5.1.4.3. Caracterización Topográfica.

El presente estudio dispone de información topográfica detallada del área de intervención, la cual fue obtenida mediante técnicas de levantamiento fotogramétrico de alta precisión. La superficie generada presenta un nivel adecuado de resolución para el análisis hidráulico, con curvas de nivel cada 1 metro, lo que permite caracterizar de manera precisa la morfología del terreno y del cauce del río Totora - Oropesa.

Para la obtención del Modelo Digital del Terreno (MDT), se emplearon equipos de posicionamiento satelital diferencial (GNSS) en configuración base-rover, utilizando un receptor SOUTH, que permitió establecer puntos de control georreferenciados con alta precisión. Asimismo, se utilizó un dron Autel EVO II RTK V3 para la captura de imágenes aéreas, garantizando una adecuada cobertura espacial del área de estudio.

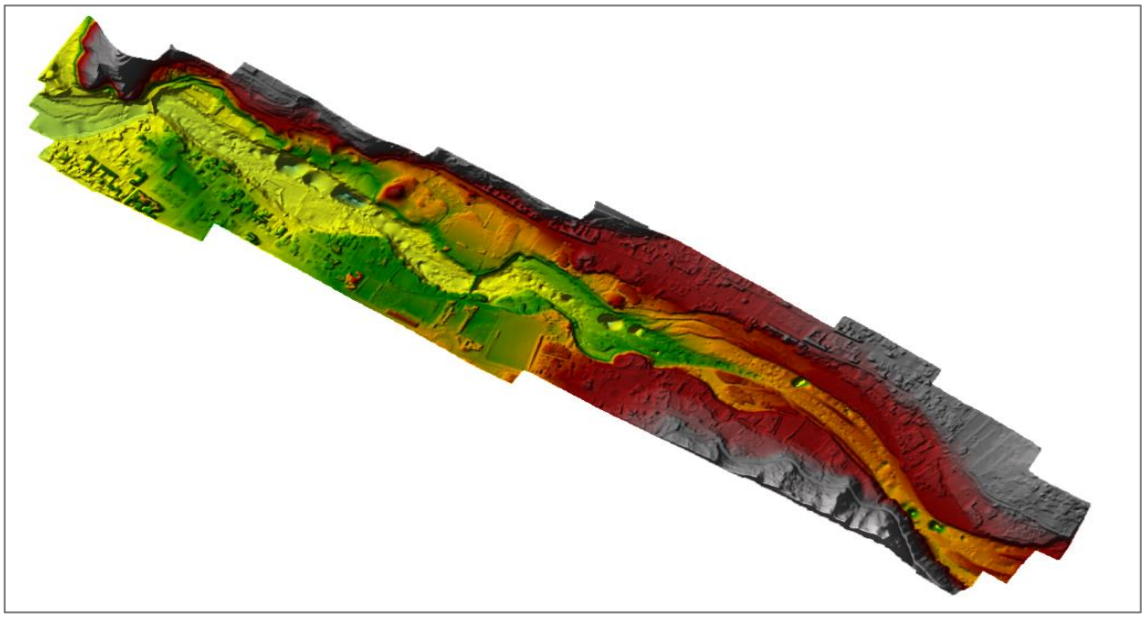
Durante el levantamiento, los puntos de control fueron distribuidos estratégicamente a lo largo del tramo crítico, con el fin de optimizar la precisión del modelo digital generado. La información recopilada fue procesada para obtener una representación

tridimensional detallada de la superficie del terreno, la cual constituye un insumo esencial para la construcción de la geometría hidráulica en el software HEC-RAS.

En cuanto al sistema de referencia espacial, la información topográfica fue georreferenciada en el sistema de coordenadas proyectadas UTM, datum WGS 84, zona 18 Sur, garantizando su compatibilidad con los demás insumos geoespaciales utilizados en el estudio. El procesamiento y la edición de la superficie se realizaron en el software Civil 3D, permitiendo la generación de un modelo digital del terreno continuo.

Figura 58

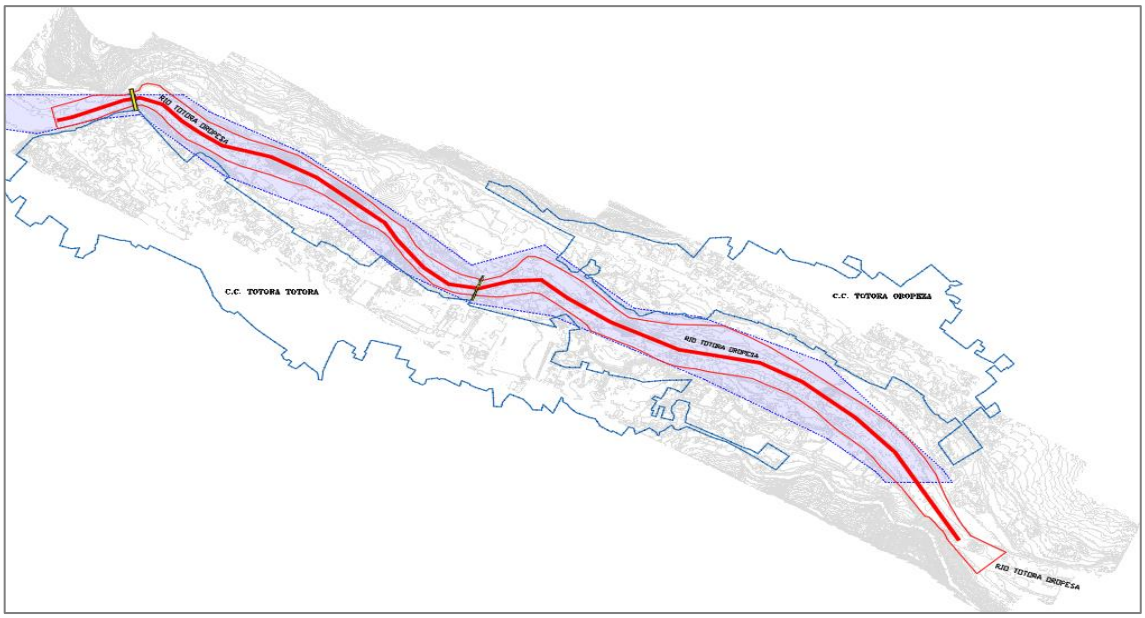
Modelo digital de elevación (DEM) del área de estudio obtenido a partir del levantamiento fotogramétrico.



Nota. Elaborado a partir de los datos DEM utilizados en el software HEC-RAS v.6.6.

Figura 59

Superficie topográfica del tramo de estudio utilizada en el modelamiento hidráulico



Nota. Elaborado a partir de la importación y procesamiento del modelo digital del terreno en el software Civil 3D.

5.1.4.4. Definición de Secciones Hidráulicas.

El procesamiento geométrico del cauce se realizó mediante la herramienta RAS Mapper del software HEC-RAS. En esta etapa se importó el eje del río en formato shapefile, previamente generado en Autodesk Civil 3D, así como la superficie topográfica derivada del Modelo Digital de Elevación (DEM).

La integración de estos insumos permitió definir con precisión:

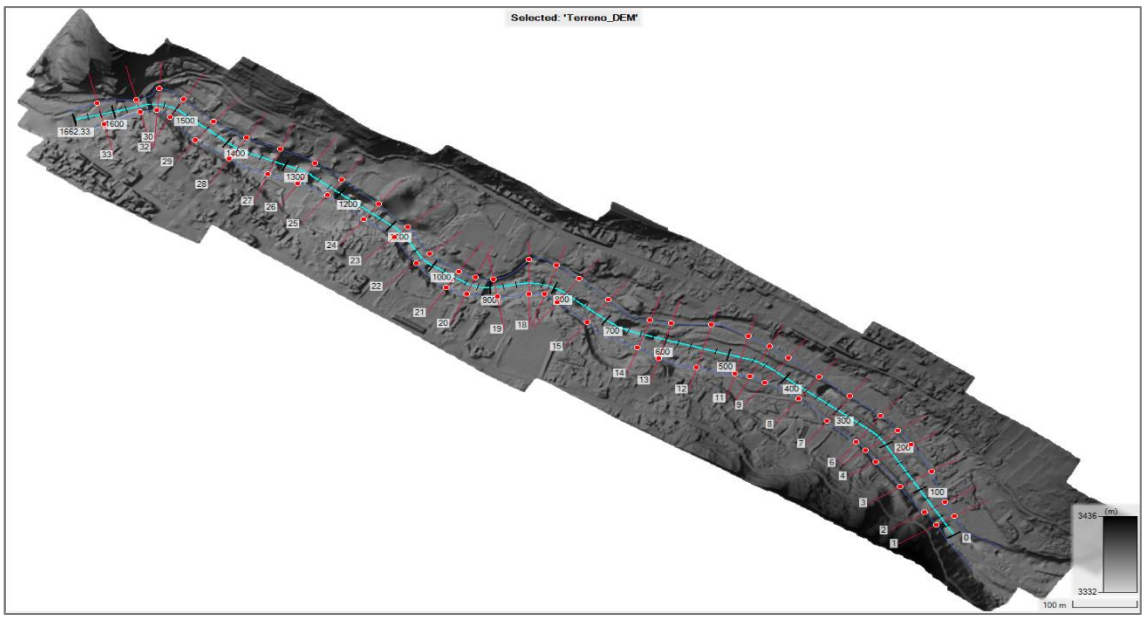
- El eje del cauce principal
- Las márgenes del río
- Las zonas de inundación potencial

Como resultado, se generaron un total de 33 secciones transversales, distribuidas a lo largo del eje del cauce. El espaciamiento adoptado fue de 50 m, reduciéndose a 30 m en zonas de curvatura, con el fin de representar de manera más detallada la variabilidad geométrica del cauce.

Esta discretización permitió mejorar la precisión del modelamiento hidráulico y la representación del flujo en condiciones de avenida.

Figura 60

Secciones transversales del tramo de estudio en HEC-RAS



Nota. Elaborado a partir del procesamiento en HEC-RAS v.6.6.

5.1.4.5. Coeficientes de Rugosidad de Manning.

Para la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning (n), se emplearon valores de referencia establecidos en el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del MTC, el cual constituye una fuente técnica ampliamente validada en estudios de ingeniería hidráulica.

La selección de los valores de rugosidad se realizó considerando las características físicas del área de estudio, tales como la morfología del cauce, el tipo de cobertura superficial, la presencia de vegetación y las condiciones de ocupación del suelo. En particular, se adoptaron valores correspondientes a cauces naturales, dado que el río Totora - Oropesa presenta un comportamiento hidráulico no revestido y con variabilidad en sus condiciones de flujo.

Adicionalmente, se asignaron valores diferenciados de rugosidad para las zonas adyacentes al cauce, incluyendo áreas urbanizadas, superficies con vegetación y terrenos sin cobertura, con la finalidad de representar de manera más realista la resistencia al flujo en el modelo hidráulico desarrollado en HEC-RAS.

La Tabla 50 muestra los valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n) utilizados en el modelamiento hidráulico del área de estudio.

Tabla 50

Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n) adoptados para el modelamiento hidráulico

Tipo de superficie	n mínimo	n típico	n máximo
Cauce principal (corriente natural)	0.035	0.050	0.100
Carretera	0.011	0.013	0.015
Zona urbana (viviendas)	0.050	0.070	0.100
Terreno natural (cerro)	0.030	0.050	0.080
Hierba corta	0.030	0.035	0.050
Arbustos dispersos / maleza densa	0.040	0.060	0.080
Áreas sin cultivo	0.030	0.040	0.050

Nota. Los valores fueron asignados considerando las recomendaciones del Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del MTC.

5.1.4.6. Condiciones de Flujo Simuladas.

Para la simulación hidráulica del cauce mediante el software HEC-RAS, se definieron condiciones de flujo orientadas a representar el comportamiento del escurrimiento en escenarios de avenida. En ese sentido, el modelamiento se desarrolló bajo el supuesto de flujo en régimen permanente, considerando los caudales máximos asociados a los distintos períodos de retorno analizados.

Este enfoque permite evaluar las condiciones más críticas del sistema hidráulico, al asumir que el caudal se mantiene constante en el tiempo para cada escenario, lo cual es adecuado para la estimación de niveles máximos de agua, delimitación de zonas inundables y análisis de capacidad hidráulica del cauce.

En relación con las características geomorfológicas, la pendiente longitudinal del cauce presenta valores moderados (menores al 10 %), lo que permite asumir un flujo gradualmente variado. Bajo estas condiciones, la distribución de energía puede representarse mediante la altura hidráulica, considerando la variación del tirante de agua a lo largo del perfil longitudinal del río.

Asimismo, el régimen de flujo fue evaluado a partir del número de Froude, lo que permitió verificar que, en la mayor parte del tramo analizado, el comportamiento corresponde a un flujo subcrítico, caracterizado por una mayor influencia de las condiciones aguas abajo sobre el perfil de la lámina de agua.

5.1.4.7. Resultados de la Simulación Hidráulica.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento del flujo en el cauce del río Totora - Oropesa bajo diferentes condiciones hidrológicas, se desarrollaron simulaciones hidráulicas para distintos períodos de retorno: Tr = 5, 10, 50, 100, 140 y 500 años.

Los caudales máximos correspondientes a cada escenario fueron obtenidos a partir del modelamiento hidrológico previamente desarrollado en HEC-HMS. Estos valores fueron incorporados como condiciones de entrada en el módulo de flujo permanente (*Steady Flow Data*) del software HEC-RAS, permitiendo simular el comportamiento hidráulico del cauce ante eventos extremos.

Adicionalmente, se consideraron dos escenarios de condición de humedad del suelo:

- Condición normal: Representa un estado promedio de humedad antecedente.
- Condición húmeda: Representa escenarios conservadores, donde la capacidad de infiltración es reducida y se incrementa la escorrentía superficial.

Esta diferenciación permite evaluar la sensibilidad del sistema hidráulico frente a variaciones en las condiciones iniciales del suelo, lo cual resulta fundamental para el análisis de riesgo por inundación.

Tabla 51

Caudales máximos para diferentes períodos de retorno bajo condiciones normales y de humedad

Periodo de Retorno	Condición normal (m³/s)	Condición húmeda (m³/s)
Tr = 5 años	110.80	338.10
Tr = 10 años	147.50	415.60
Tr = 50 años	278.10	660.20
Tr = 100 años	353.50	790.90
Tr = 140 años	395.30	860.80
Tr = 500 años	600.00	1182.00

Nota. Elaborado a partir de los resultados del modelamiento hidrológico en HEC-HMS.

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones en HEC-RAS permitieron analizar la distribución espacial de variables hidráulicas clave, tales como:

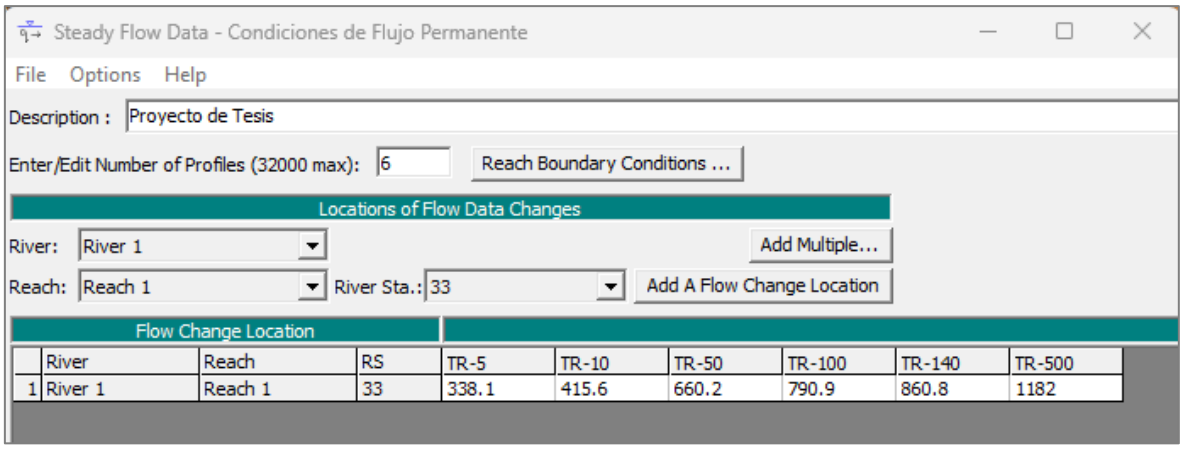
- Velocidad del flujo
- Profundidad (tirante hidráulico)
- Extensión de las zonas inundables

En general, se observa que el incremento del período de retorno genera un aumento significativo tanto en la velocidad del flujo como en la profundidad del agua, lo cual incrementa el potencial erosivo del cauce y el riesgo de desbordamiento hacia zonas adyacentes.

Asimismo, bajo las condiciones húmedas, los caudales presentan valores considerablemente mayores, lo que se traduce en mayores niveles de inundación y expansión lateral del flujo, especialmente en zonas de menor pendiente y sectores cercanos a infraestructura.

Figura 61

Condiciones hidráulicas de entrada en HEC-RAS (Steady Flow Data)

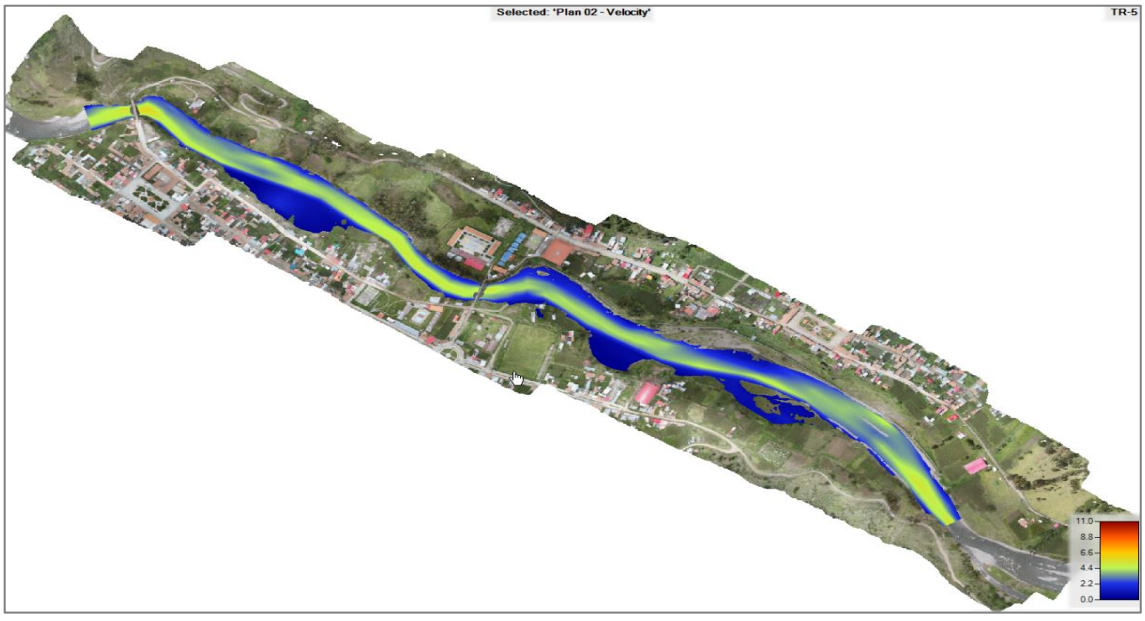


	River	Reach	RS	TR-5	TR-10	TR-50	TR-100	TR-140	TR-500
1	River 1	Reach 1	33	338.1	415.6	660.2	790.9	860.8	1182

Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 62

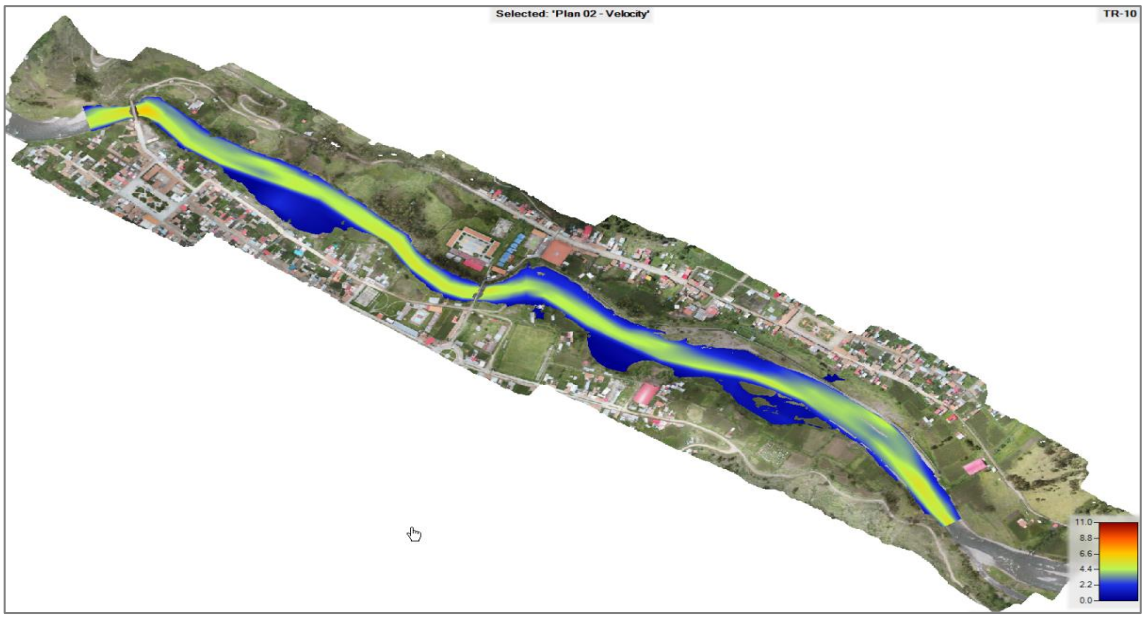
Distribución de velocidad del flujo para Tr = 5 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 63

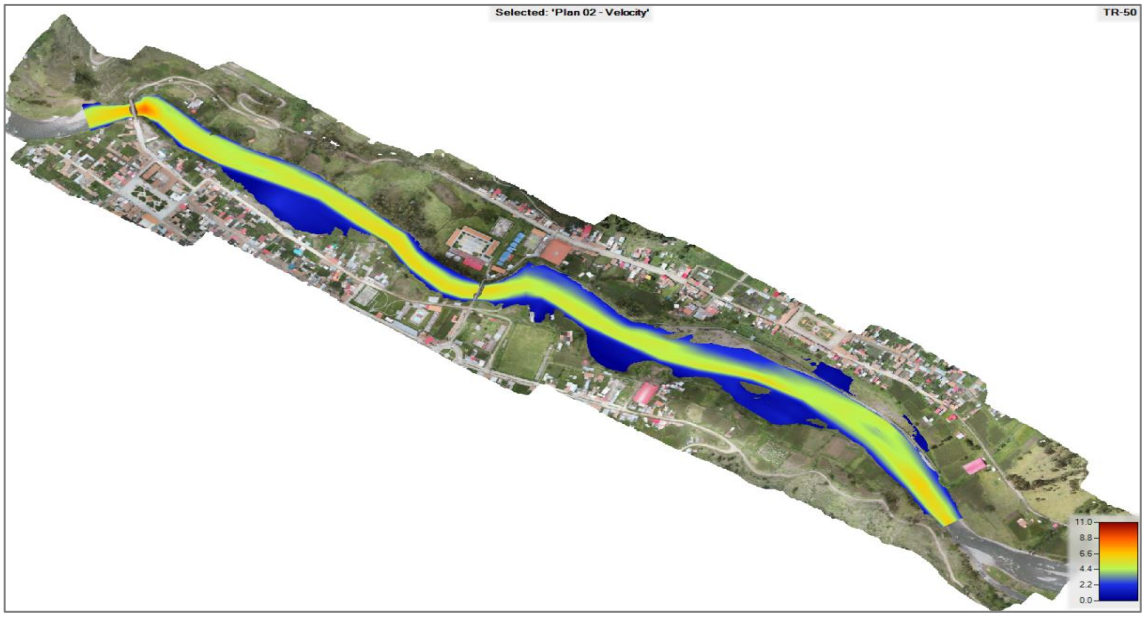
Distribución de velocidad del flujo para Tr = 10 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 64

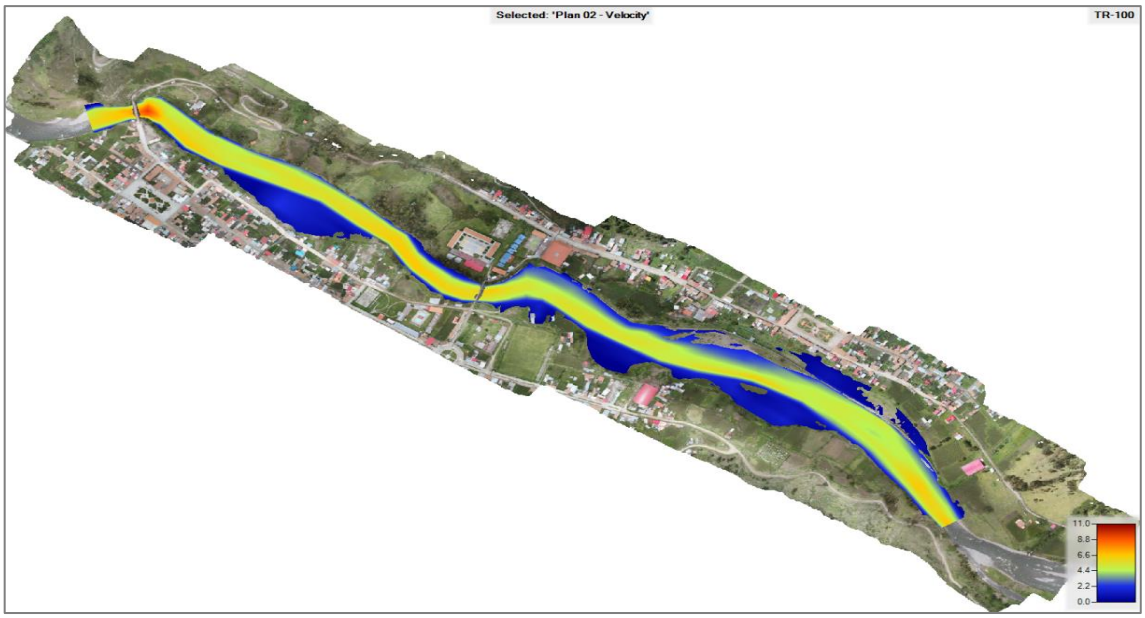
Distribución de velocidad del flujo para Tr = 50 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 65

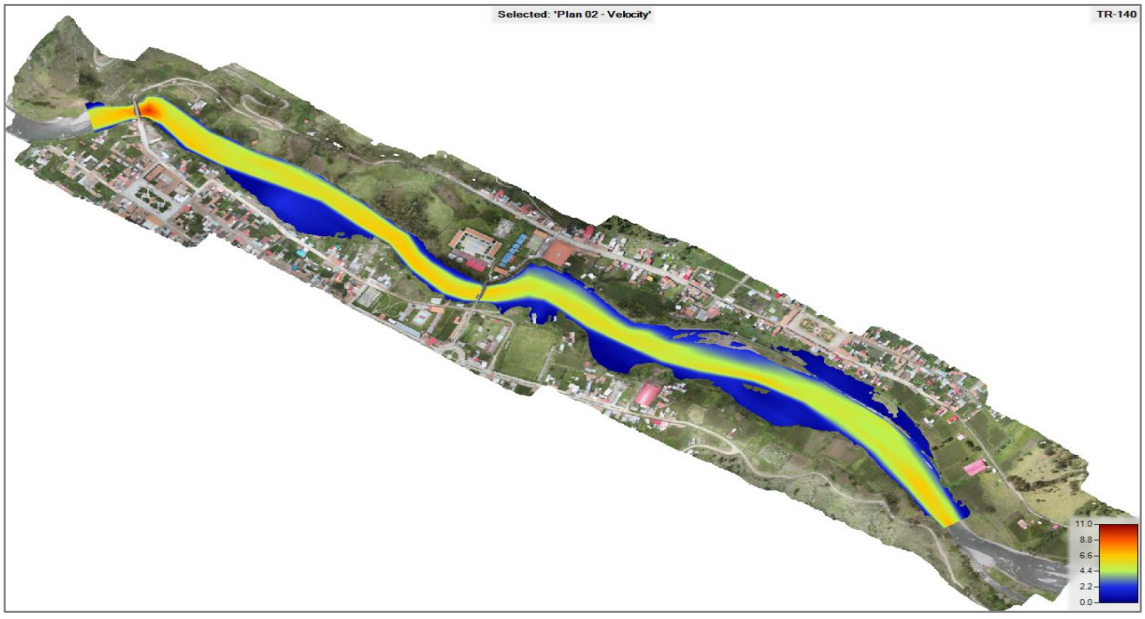
Distribución de velocidad del flujo para Tr = 100 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 66

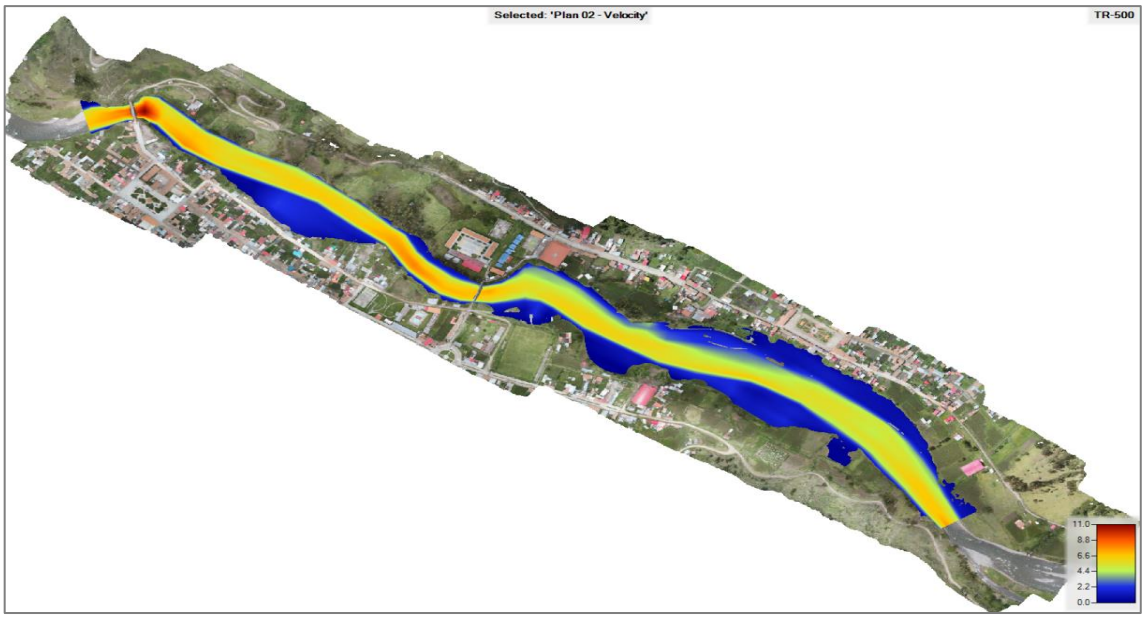
Distribución de velocidad del flujo para Tr = 140 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 67

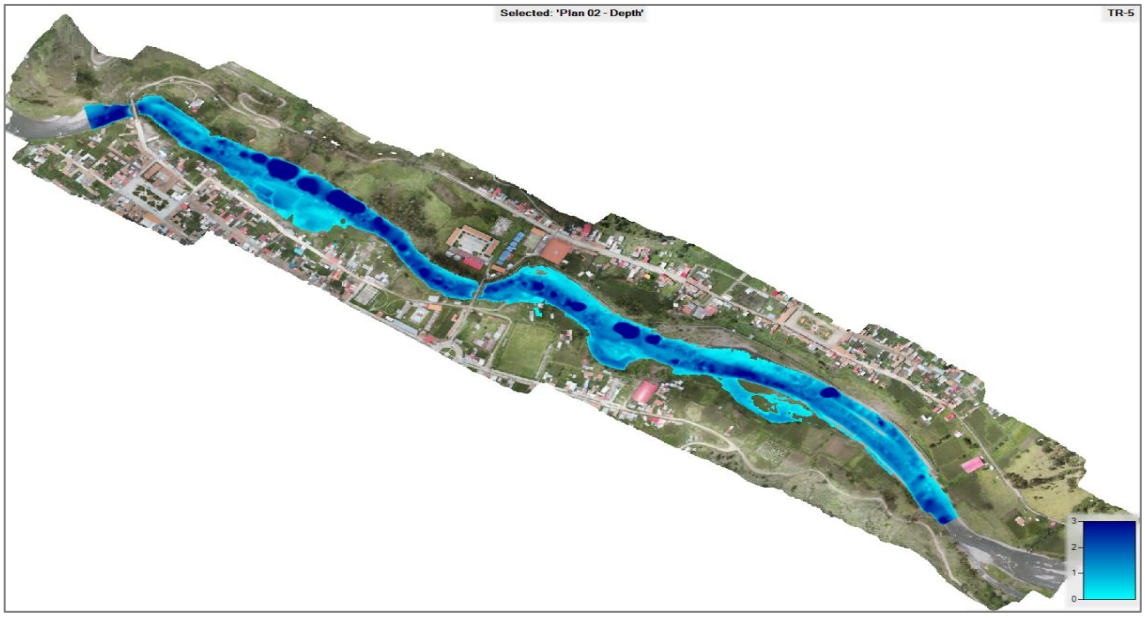
Distribución de velocidad del flujo para Tr = 500 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 68

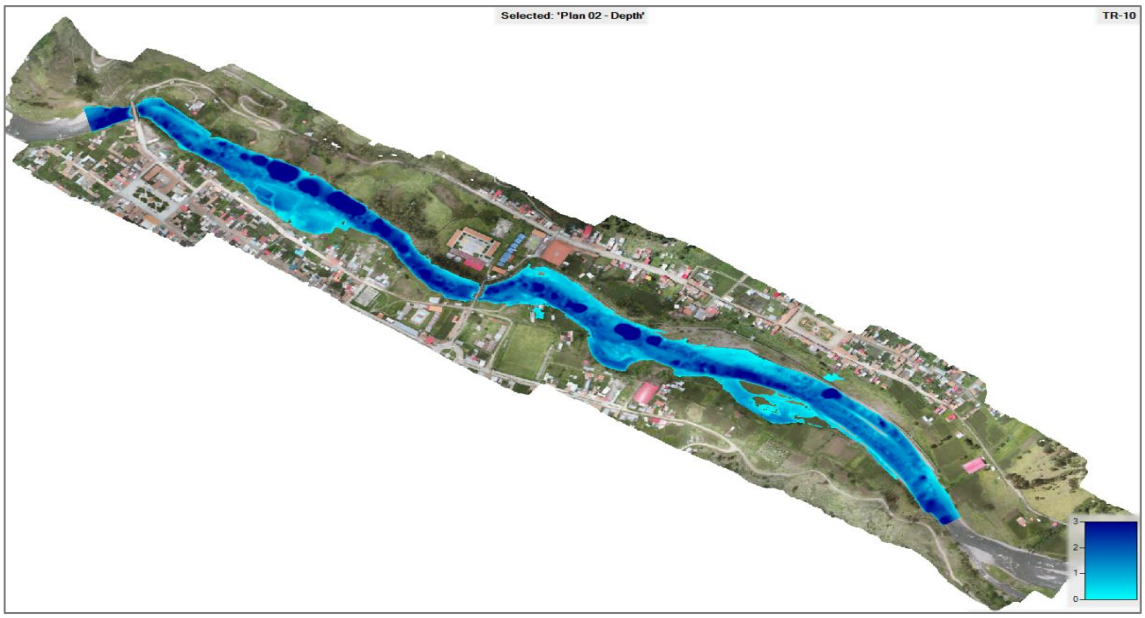
Distribución de profundidad del flujo para Tr = 5 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 69

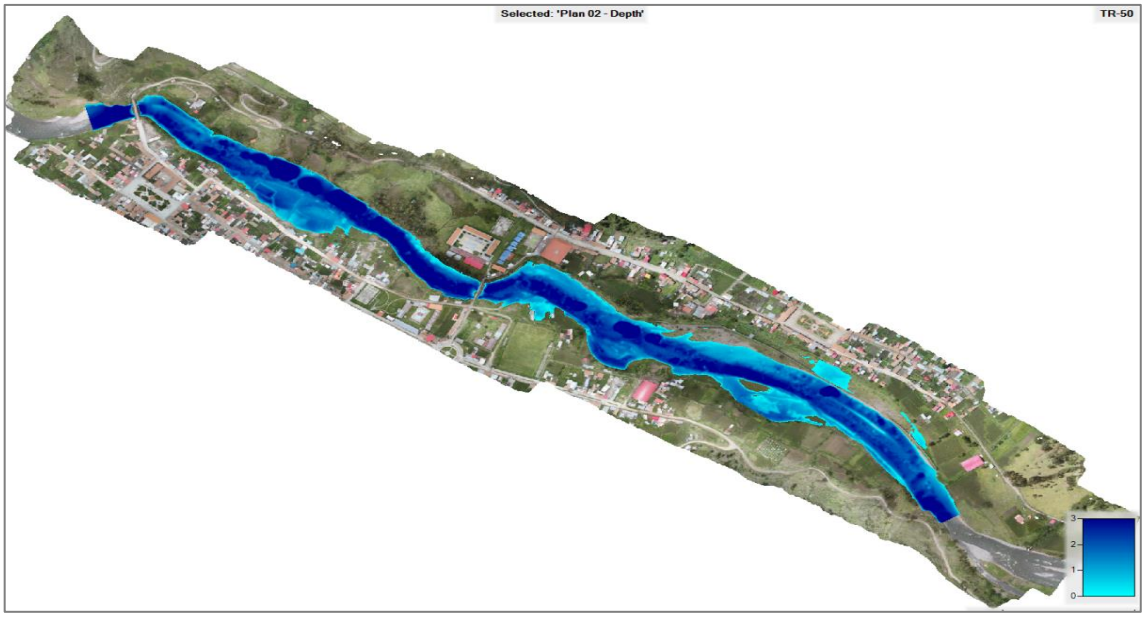
Distribución de profundidad del flujo para Tr = 10 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 70

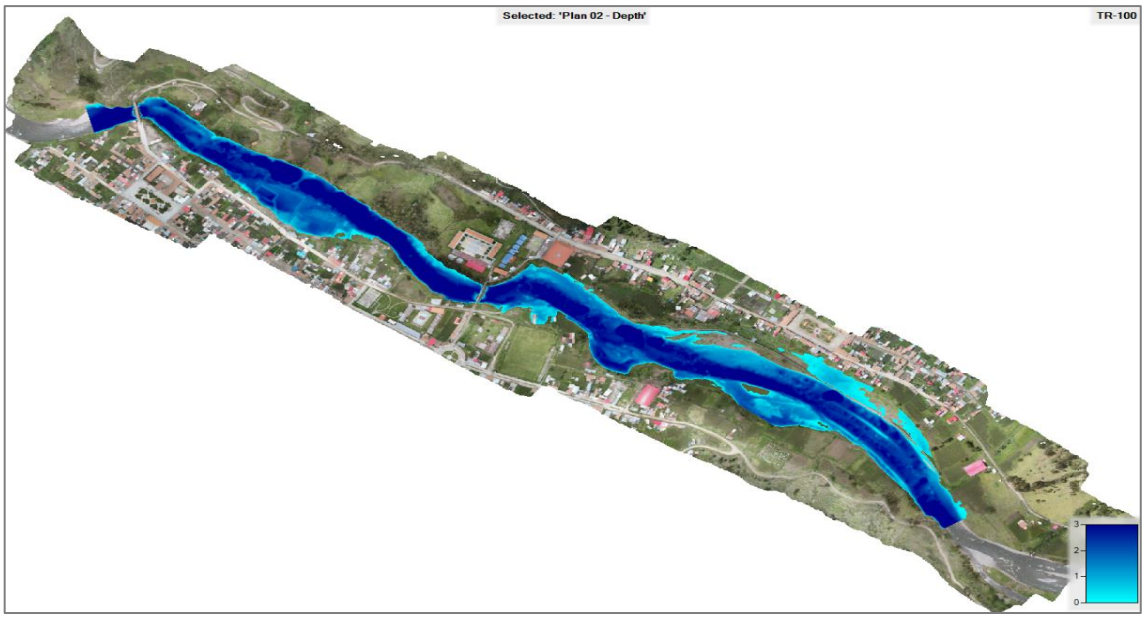
Distribución de profundidad del flujo para Tr = 50 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 71

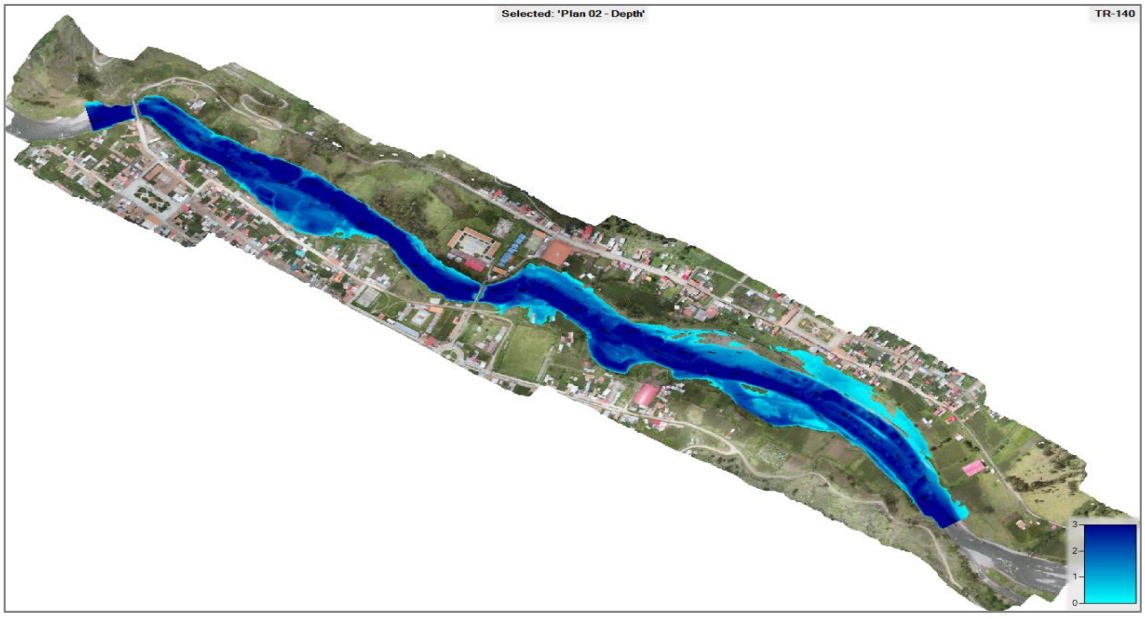
Distribución de profundidad del flujo para Tr = 100 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 72

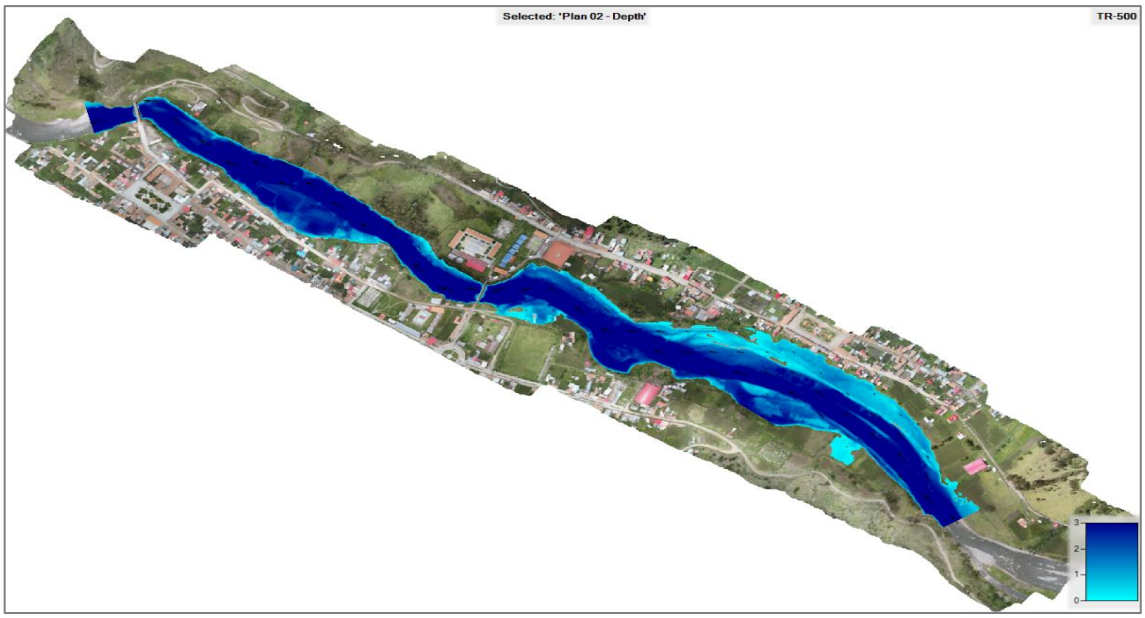
Distribución de profundidad del flujo para Tr = 140 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Figura 73

Distribución de profundidad del flujo para Tr = 500 años



Nota. Elaborado a partir de simulación en HEC-RAS v.6.6.

Para el desarrollo del análisis hidráulico en la quebrada Totora, se establecieron seis secciones transversales correspondientes a los puntos 01, 07, 12, 22, 28 y 33. La elección de estos puntos se fundamentó en su posición a lo largo del tramo simulado, así como en las particularidades geométricas y espaciales que permiten examinar las condiciones del flujo en distintos sectores del cauce. Sobre esta base, se evaluaron los resultados de la modelación para cada período de retorno, prestando especial atención a los valores de velocidad y tirante hidráulico. La comparación de estos parámetros permitió examinar las diferencias en la respuesta hidráulica entre las secciones seleccionadas e identificar los sectores donde se presentan las condiciones de mayor severidad durante los eventos analizados.

Tabla 52

Resultados de velocidad y tirante hidráulico en las secciones transversales 01, 07 y 12 para los diferentes períodos de retorno.

Periodo de retorno	Sección 01		Sección 07		Sección 12		Tiempo al pico (h)
	V (m/s)	T (m)	V (m/s)	T (m)	V (m/s)	T (m)	
5 años	5.999	2.682	4.250	2.479	4.688	2.836	05:00
10 años	6.353	2.992	4.518	2.729	5.069	3.057	05:00
50 años	7.080	3.882	5.048	3.446	5.668	3.731	04:30
100 años	7.180	4.309	5.245	3.780	5.941	4.036	04:30
140 años	7.270	4.481	5.375	3.931	5.936	4.251	04:30
500 años	7.045	5.119	5.868	4.535	6.553	4.817	04:30

Nota. Los valores representan los parámetros hidráulicos obtenidos para cada sección transversal y período de retorno.

Tabla 53

Resultados de velocidad y tirante hidráulico en las secciones transversales 22, 28 y 33 para los diferentes períodos de retorno.

Periodo de retorno	Sección 22		Sección 28		Sección 33		Tiempo al pico (h)
	V (m/s)	T (m)	V (m/s)	T (m)	V (m/s)	T (m)	
5 años	5.416	3.714	4.869	2.457	5.001	2.646	05:00
10 años	5.682	4.098	5.111	2.717	5.276	2.925	05:00
50 años	6.854	4.882	5.524	3.441	5.989	3.705	04:30
100 años	7.048	5.409	6.012	3.788	6.265	4.099	04:30
140 años	7.462	5.508	6.166	3.961	6.457	4.275	04:30
500 años	8.763	6.137	6.724	4.718	7.064	5.336	04:30

Nota. Los valores representan los parámetros hidráulicos obtenidos para cada sección transversal y período de retorno.

5.1.5. Propuesta del Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SAT-COM)

A partir de los resultados obtenidos del modelamiento hidrológico e hidráulico, se plantea la implementación de un SAT orientado a la reducción del riesgo por inundaciones en la quebrada Totora, ubicada en el distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, departamento de Apurímac.

La propuesta se fundamenta en la metodología establecida en la Guía Técnica para la Implementación del SAT-COM del INDECI (2018), la cual se caracteriza por su enfoque participativo, su aplicabilidad en contextos locales y su facilidad de implementación operativa. Este enfoque permite que el sistema pueda ser gestionado por actores locales con capacitación básica, favoreciendo su sostenibilidad en el tiempo.

Este enfoque permite adaptar el sistema a las condiciones sociales, institucionales y geográficas del área de estudio, promoviendo la participación activa de la población y el fortalecimiento de capacidades locales para la gestión del riesgo de desastres.

5.1.5.1. Descripción General de la Propuesta.

La propuesta de implementación del SAT-COM para inundaciones fluviales en la quebrada Totora se plantea como una medida estructurada de gestión del riesgo de desastres, orientada a fortalecer la capacidad de preparación y respuesta de la población ante eventos hidrometeorológicos extremos.

Desde el punto de vista financiero, la implementación del sistema puede ser viabilizada a través de diversos mecanismos institucionales y presupuestales, entre los cuales destacan:

- El Programa Presupuestal 068 (PP068): Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres.
- El Fondo para Intervenciones ante la Ocurrencia de Desastres Naturales (FONDES).
- La cooperación técnica y financiera de organizaciones no gubernamentales (ONG) y entidades internacionales que desarrollen proyectos vinculadas a la gestión del riesgo de desastres.

Estos mecanismos permitirían desarrollar de manera progresiva los componentes del sistema, incluyendo la adquisición de equipos de monitoreo hidrometeorológico, la implementación de sistemas de comunicación y la ejecución de programas de capacitación comunitaria.

En el marco institucional, el INDECI constituye el ente técnico-normativo responsable de la gestión reactiva del riesgo dentro del SINAGERD. Esta entidad cumple un rol fundamental en la promoción, asistencia técnica y articulación de los SAT a nivel nacional, en coordinación con los gobiernos regionales y locales.

En este contexto, la propuesta se desarrolla en concordancia con la R.M. N.° 173-2015-PCM, que aprueba los lineamientos para la conformación y funcionamiento de la Red Nacional de Alerta Temprana (RNAT), así como para el fortalecimiento de los SAT en el territorio nacional.

De acuerdo con dicha normativa, todo SAT debe estructurarse sobre la base de cuatro componentes fundamentales, los cuales garantizan su funcionamiento integral y sostenibilidad en el tiempo.

5.1.5.2. Componentes del SAT-COM.

De acuerdo con los lineamientos establecidos en la Guía Técnica para la implementación de SAT-COM del INDECI, el sistema propuesto se estructura sobre la base de cuatro componentes fundamentales, los cuales interactúan de manera articulada para garantizar su funcionamiento eficiente frente a eventos de inundación:

- Conocimiento del riesgo
- Monitoreo y seguimiento
- Difusión y comunicación de la alerta
- Capacidad de respuesta ante emergencias

Estos componentes constituyen un enfoque integral que permite no solo anticipar la ocurrencia de eventos peligrosos, sino también fortalecer la preparación y respuesta de la población expuesta.

5.1.5.3. Conocimiento del Riesgo.

El componente de conocimiento del riesgo constituye la base técnica del SAT, ya que permite identificar, caracterizar y evaluar las condiciones de peligro, exposición y vulnerabilidad presentes en el ámbito de estudio.

En el presente caso, se realizó la recopilación, sistematización y análisis de información relacionada con el peligro de inundación en la quebrada Totora, considerando diversas fuentes de carácter técnico y oficial, entre las cuales destacan: INGEMMET, SENAMHI, Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), INDECI.

La información recopilada incluyó datos cartográficos, registros hidrometeorológicos, información demográfica y estudios técnicos previos, así como bases de datos geoespaciales y antecedentes históricos de eventos extremos. Estos insumos permitieron caracterizar de manera integral las condiciones físicas y socioeconómicas del área de estudio.

Asimismo, en este componente se integraron los resultados obtenidos del modelamiento hidrológico e hidráulico desarrollado en la presente investigación, lo cual permitió:

- Estimar los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno.
- Identificar zonas potencialmente inundables mediante el análisis hidráulico del cauce.
- Determinar niveles de peligrosidad en función de la magnitud y frecuencia de los eventos.

De manera complementaria, el análisis de vulnerabilidad permitió reconocer los elementos expuestos, tales como viviendas, infraestructura vial y áreas productivas, así como las condiciones que incrementan su susceptibilidad frente a eventos de inundación.

Como resultado de este proceso, se logró identificar las áreas críticas dentro del centro poblado de Oropesa, en el distrito de Oropesa, las cuales presentan mayor probabilidad de afectación ante crecidas extraordinarias. Esta información constituye un insumo fundamental para la definición de umbrales de alerta, la ubicación de puntos de monitoreo y la planificación de rutas de evacuación dentro del SAT.

5.1.5.3.1. Identificación del Peligro.

La identificación del peligro constituye una etapa fundamental en el diseño de un SAT, ya que permite reconocer y caracterizar los eventos naturales con potencial de

generar daños sobre la población, la infraestructura y las actividades económicas del área de estudio. Este proceso implica el análisis integrado de información hidrológica, hidráulica, topográfica y geoespacial, con la finalidad de delimitar las zonas susceptibles a inundaciones y establecer niveles de peligrosidad en función de la magnitud y frecuencia de los eventos.

En la presente investigación, la identificación del peligro se realizó a partir del análisis hidrológico e hidráulico de la quebrada Totora, localizada en el distrito de Oropesa. Para ello, se consideró la ocurrencia de precipitaciones intensas y la estimación de caudales máximos para diferentes periodos de retorno, obtenidos mediante el modelamiento hidrológico desarrollado.

Con base en estos resultados, se identificaron las áreas potencialmente afectadas por desbordes del cauce, particularmente en los sectores próximos al río Totora - Oropesa. Asimismo, se evaluaron las condiciones geomorfológicas del terreno, la pendiente, la topografía local y la localización de viviendas e infraestructura dentro del área de influencia hidráulica.

Para la delimitación de las zonas expuestas al peligro de inundación, se consideraron los siguientes criterios técnicos:

- Identificación de sectores con antecedentes históricos de inundación o desbordes.
- Localización de áreas topográficamente bajas o cercanas al cauce natural.
- Determinación de viviendas ubicadas dentro de las zonas potencialmente inundables.
- Identificación de infraestructura crítica expuesta, como vías de acceso, instituciones educativas, centros de salud y equipamiento comunitario.

La aplicación de estos criterios permitió delimitar las zonas con mayor probabilidad de afectación, constituyendo una base técnica para la implementación del SAT en el distrito de Oropesa.

Elementos expuestos y vulnerabilidad

Dentro del área de influencia del peligro, se identificaron y caracterizaron los principales elementos expuestos, tales como la población, el tipo de vivienda y la infraestructura existente. Este análisis permitió evaluar las condiciones de vulnerabilidad frente a eventos de inundación, lo cual es esencial para la estimación del riesgo.

a. Estimación de la población expuesta

La población potencialmente expuesta se estimó a partir del número de viviendas habitadas y la densidad promedio de ocupación del ámbito de estudio.

Para ello, se calculó una densidad poblacional de 2.88 habitantes por vivienda, obtenida de la relación entre la población total (1667 habitantes) y el número de viviendas registradas (579 viviendas). Con fines de estimación y aplicación práctica en el análisis de riesgo, el valor fue aproximado a 3 habitantes por vivienda.

Tabla 54

Población expuesta y elementos vulnerables localizados en los sectores de Totora y Oropesa.

Sectores	Viviendas habitadas (und)	Población expuesta (hab)	Centro de salud (und)	Instituciones educativas (und)	Instituciones sociales (und)	Infraestructura recreativa (und)
Oropesa	46	138	0	3	3	2
Totora	44	132	1	1	2	2
Total	**90**	**270**	**1**	**4**	**5**	**4**

Nota. Elaborado a partir de información del Censo Nacional INEI 2017 y verificación de campo realizada en el área de estudio.

b. Tipo de vivienda expuesta

El tipo de material predominante en las viviendas influye directamente en el nivel de vulnerabilidad frente a inundaciones.

Tabla 55

Viviendas expuestas según material de construcción predominante.

Material de construcción	Oropesa	%	Totora	%
Ladrillo o bloque de cemento	10	21.74	12	27.27
Piedra o sillar con cemento	2	4.35	2	4.55
Adobe	32	69.57	28	63.64
Piedra con barro	2	4.35	2	4.55
Total	**46**	**100.00**	**44**	**100.00**

Nota. Se presenta la distribución de viviendas según el material de construcción predominante.

Se evidencia una alta proporción de viviendas construidas con adobe, lo cual incrementa significativamente la vulnerabilidad estructural ante eventos de inundación debido a su baja resistencia al contacto prolongado con el agua.

c. Infraestructura educativa expuesta

La infraestructura educativa ubicada dentro de las zonas de influencia del peligro corresponde a instituciones de nivel inicial, primaria y secundaria, las cuales concentran una población estudiantil significativa en los sectores de Oropesa y Totora.

Tabla 56

Infraestructura educativa ubicada en zonas de influencia del peligro.

Nivel educativo	Oropesa		Totora	
	I.E.	Alumnos	I.E.	Alumnos
Inicial	I.E. N.° 1158 Fusiray	25	Sagrado Corazón de Jesús	48
Primaria	I.E. N.° 54903	68	I.E. N.° 54271	147
Secundaria	José Antonio Encinas	209	-	-
Total		**302**		**195**

Nota. Información obtenida del portal del Ministerio de Educación (MINEDU). https://escale.minedu.gob.pe/.

Se identificó que la localidad de Oropesa presenta la mayor concentración de población estudiantil expuesta, principalmente en el nivel secundario. La presencia de

instituciones educativas dentro de áreas potencialmente inundables incrementa el nivel de vulnerabilidad social, debido a la concentración temporal de población durante horarios escolares.

d. Infraestructura de servicios expuesta

La infraestructura de servicios expuesta comprende equipamientos de uso comunitario, recreativo, religioso y de atención básica, localizados dentro de las áreas potencialmente afectadas por inundaciones.

Tabla 57

Infraestructura de servicios ubicada en zonas expuestas.

Infraestructura	Localidad	
	Oropesa	**Totora**
Centro de salud	0	1
Estadio	0	1
Losa deportiva	1	1
Club de madres	1	0
Iglesia / taller parroquial	1	0
Antena de radio	1	0
Plaza de toros	1	0
Parque	0	1
Total	**5**	**4**

Nota. La información corresponde a la identificación de infraestructura ubicada en zonas expuestas.

Los resultados evidencian la presencia de infraestructura de servicios ubicada en áreas de influencia del peligro, destacando espacios de uso público y equipamientos comunitarios. La afectación potencial de estas infraestructuras podría limitar la continuidad de servicios básicos y actividades sociales durante eventos de inundación.

e. Mapa comunitario de riesgo por inundación

El mapa comunitario de riesgo por inundación permitió identificar espacialmente las zonas con diferentes niveles de riesgo dentro del sector urbano del Centro Poblado de Oropesa, considerando la interacción entre el peligro de inundación y los elementos expuestos presentes en el área de estudio.

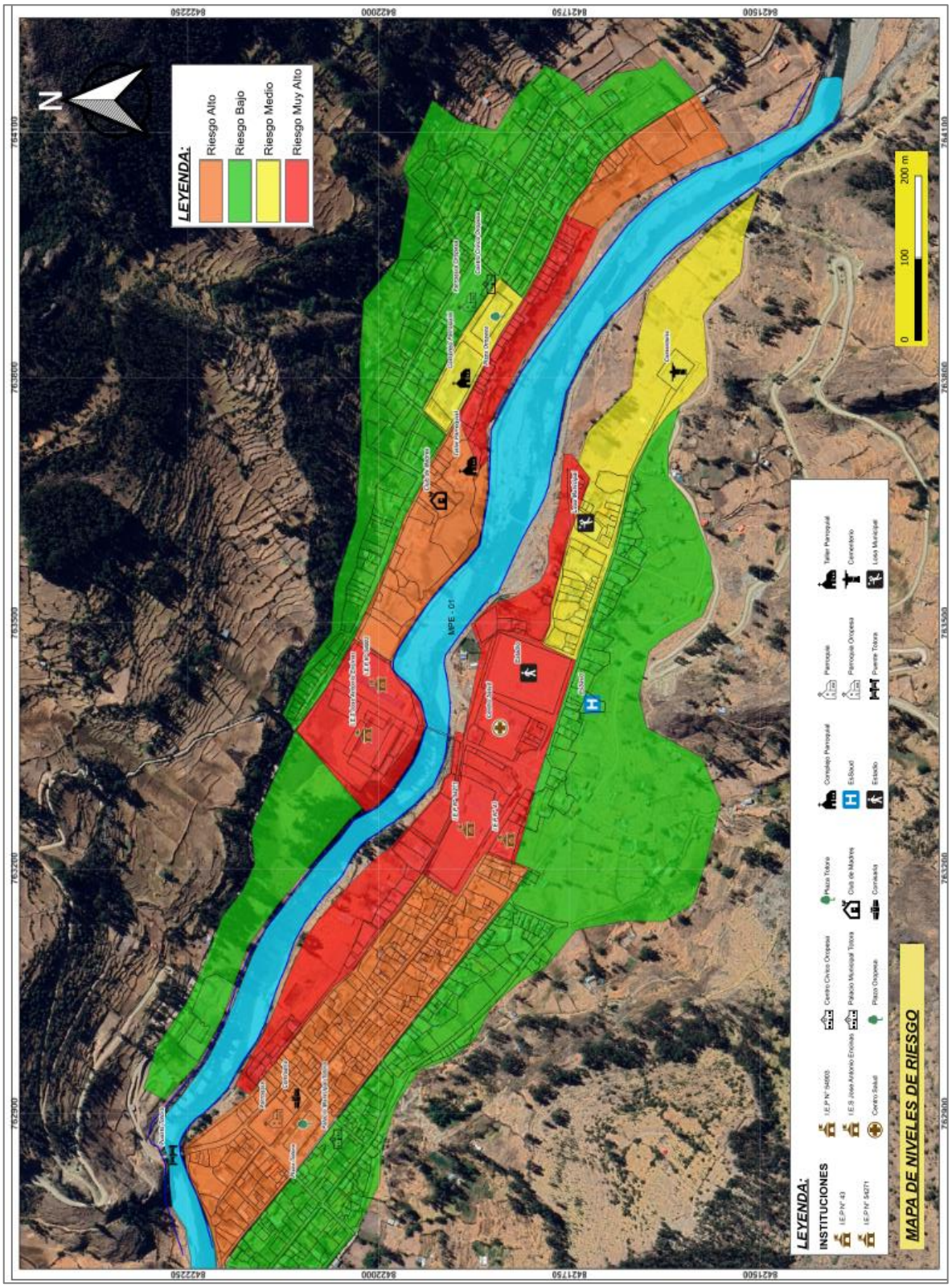
Los resultados muestran que las zonas clasificadas con riesgo muy alto y alto se localizan principalmente en las áreas adyacentes al cauce principal, donde se concentran viviendas, instituciones educativas e infraestructura de servicios expuestas a posibles desbordes. Asimismo, se identificó que gran parte de las viviendas ubicadas en estas zonas presentan condiciones de vulnerabilidad elevada, debido al predominio de construcciones de adobe y piedra con barro.

De igual manera, el análisis espacial evidenció la exposición de infraestructura social y equipamientos urbanos, tales como instituciones educativas, centros comunales, áreas recreativas y servicios básicos, cuya afectación podría generar interrupciones en las actividades sociales y en la atención de la población durante eventos extremos.

La representación cartográfica obtenida constituye una herramienta fundamental para la planificación territorial y la implementación de medidas de prevención, preparación y respuesta frente a inundaciones, permitiendo priorizar las áreas con mayor nivel de riesgo dentro del ámbito urbano evaluado.

Figura 74

Mapa comunitario de riesgo por inundación en los sectores Totora y Oropesa.



Nota. La información fue obtenida mediante análisis espacial y procesamiento cartográfico en el software QGIS.

5.1.5.3.2. Análisis de Vulnerabilidad.

A partir de la información recopilada en el área de influencia de la quebrada Totora, se identificaron los principales elementos expuestos, tales como la población, las viviendas y la infraestructura existente. Este proceso permitió evaluar de manera integral las condiciones de vulnerabilidad frente a eventos de inundación.

El análisis se estructuró en tres dimensiones: vulnerabilidad social, física y de infraestructura crítica, considerando indicadores cuantitativos y cualitativos asociados al nivel de exposición y fragilidad del área de estudio frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

Tabla 58

Evaluación de la vulnerabilidad por dimensiones en el área de estudio

Dimensión de Vulnerabilidad	Indicadores evaluados	Descripción técnica	Nivel de vulnerabilidad
Vulnerabilidad social	- Población expuesta: 270 hab. Oropesa: 138 hab. Totora: 132 hab. Densidad: 3 hab/vivienda	La población presenta una ocupación moderada; sin embargo, existen factores que incrementan su vulnerabilidad, tales como la proximidad de las viviendas al cauce, limitada capacidad de respuesta ante emergencias y un nivel reducido de conocimiento del riesgo, características frecuentes en entornos rurales.	Alta
Vulnerabilidad física	- Viviendas de adobe: Oropesa: 69.57% Totora: 63.64% - Viviendas de material noble: Oropesa: 21.74% Totora: 27.27%	Predomina el uso de adobe como material de construcción, el cual presenta baja resistencia frente a eventos de inundación, siendo altamente susceptible a procesos de erosión, saturación y colapso estructural. Esta condición incrementa significativamente la fragilidad del entorno construido.	Muy Alta
Vulnerabilidad de infraestructura crítica	- 4 instituciones educativas Alta concentración estudiantil (hasta 209 alumnos) - 1 centro de salud (capacidad limitada) Infraestructura comunitaria expuesta	La infraestructura esencial se encuentra localizada en zonas potencialmente inundables. Su afectación comprometería la continuidad de servicios básicos como salud, educación y organización comunitaria, incrementando el impacto social ante eventos extremos.	Alta

Nota. Elaborado a partir del trabajo de campo e información del INEI y análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad desarrollado en el área de estudio evidencia condiciones predominantemente altas a muy altas, asociadas principalmente a la calidad constructiva de las viviendas, la localización de la población en zonas próximas al cauce y la exposición de infraestructura crítica.

La elevada proporción de viviendas construidas con adobe constituye un factor determinante en la vulnerabilidad física, debido a su baja resistencia frente a procesos de saturación e inestabilidad estructural. Asimismo, la cercanía de los asentamientos humanos al cauce incrementa la probabilidad de afectación directa ante eventos de desborde.

Por otro lado, la presencia de infraestructura esencial dentro de las zonas potencialmente inundables representa un elemento crítico, ya que su afectación podría generar impactos significativos en la prestación de servicios básicos y en la capacidad de respuesta de la población.

En conjunto, estos factores configuran un escenario de alta susceptibilidad frente a inundaciones, lo cual justifica técnicamente la implementación de un SAT en la quebrada Totora, como medida orientada a reducir el riesgo y fortalecer la capacidad de respuesta comunitaria.

5.1.5.3.3. Estimación del Riesgo.

La estimación del riesgo se desarrolló a partir de la integración de los resultados del análisis de peligro y vulnerabilidad, con el propósito de identificar, cuantificar y clasificar los niveles de riesgo presentes en el área de estudio, en concordancia con el enfoque de la gestión del riesgo de desastres.

En este proceso, el peligro de inundación fue caracterizado mediante la zonificación hidráulica obtenida del modelamiento, estableciendo cuatro niveles diferenciados:

- Peligro muy alto: zonas colindantes al cauce principal con alta probabilidad de inundación directa.
- Peligro alto: áreas adyacentes con alta recurrencia de inundación.
- Peligro medio: zonas de transición con afectación moderada por desbordes.

- Peligro bajo: sectores alejados del cauce con mínima probabilidad de inundación.

Estos niveles de peligro fueron superpuestos con los elementos expuestos identificados previamente (población, viviendas e infraestructura), los cuales presentan condiciones de vulnerabilidad predominantemente altas a muy altas, configurando así la matriz de riesgo del área de estudio.

Tabla 59

Clasificación del nivel de riesgo según condiciones de peligro y vulnerabilidad

Nivel de riesgo	Condiciones identificadas	Características del área	Consecuencias esperadas
Muy Alto	Zonas adyacentes al cauce, viviendas de adobe, alta concentración poblacional.	Áreas donde coinciden niveles elevados de peligro y vulnerabilidad estructural y social.	Alta probabilidad de pérdidas humanas, colapso estructural de viviendas y daños severos en infraestructura.
Alto	Zonas con peligro alto, vulnerabilidad alta e infraestructura expuesta.	Sectores con exposición significativa, aunque no inmediata al cauce principal.	Daños estructurales importantes, interrupción de servicios básicos y afectación considerable de la población.
Medio	Zonas de peligro medio y viviendas parcialmente vulnerables.	Áreas de transición con exposición moderada al evento de inundación.	Daños moderados en infraestructura y afectaciones temporales en servicios básicos.
Bajo	Zonas alejadas del cauce y baja exposición.	Sectores con baja probabilidad de afectación directa.	Impactos mínimos o nulos sobre la población e infraestructura.

Nota. La clasificación se estableció considerando la zonificación hidráulica y los elementos expuestos del área de estudio.

La estimación del riesgo, obtenida mediante la matriz de interacción entre peligro y vulnerabilidad, evidencia que los sectores ubicados en las inmediaciones del cauce de río Totora - Oropesa presentan predominantemente niveles de riesgo muy alto.

Esta condición se explica por la superposición de zonas de alta peligrosidad hidráulica con áreas que presentan alta vulnerabilidad física y social, lo que incrementa significativamente la probabilidad de afectación ante eventos de inundación.

Figura 75

Matriz de peligro y vulnerabilidad de los sectores Totora y Oropesa



Nota. Adaptado de la Guía Técnica para la Implementación del SAT-COM, INDECI (2018).

El análisis integral evidencia que una proporción significativa del área de estudio se encuentra en condición de riesgo muy alto, debido a la coexistencia de:

- Alta peligrosidad de inundación asociada a la dinámica del cauce.
- Elevados niveles de vulnerabilidad física y social.

Esta condición configura un escenario de alta criticidad, en el cual la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos podría generar impactos significativos sobre la población, la infraestructura y los servicios básicos, justificando la necesidad de implementar medidas estructurales y no estructurales de reducción del riesgo, como un SAT.

5.1.5.4. Monitoreo y Seguimiento.

El componente de monitoreo y seguimiento tiene como finalidad identificar, evaluar e integrar la instrumentación hidrometeorológica disponible en la cuenca de la quebrada Totora, unidad hidrográfica que aporta escorrentía al río Totora - Oropesa, con énfasis en el tramo urbano correspondiente a los sectores Totora y Oropesa. Este componente permite la vigilancia continua de variables hidrometeorológicas relevantes, principalmente la precipitación, el nivel del agua y el caudal, con el propósito de generar información oportuna para la activación del SAT-COM.

Para ello, se consultó la plataforma institucional del SENAMHI, incluyendo la red de estaciones hidrometeorológicas y el Sistema de Observación de Inundaciones Potenciales (SONICS). La información obtenida permitió identificar las herramientas disponibles para el monitoreo de eventos hidrometeorológicos y evaluar su potencial contribución al sistema de vigilancia y alerta propuesto para la quebrada Totora.

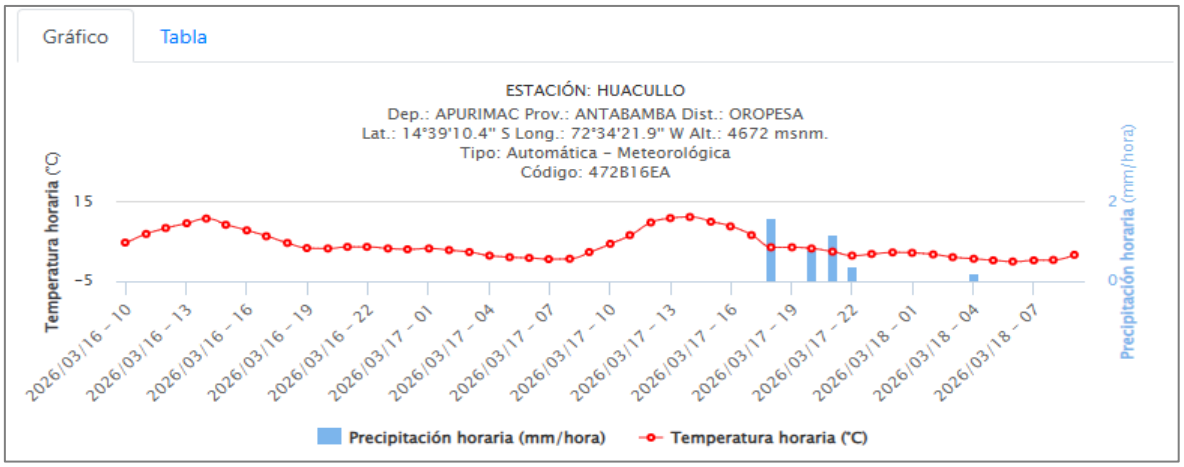
a. Estaciones meteorológicas

De la revisión realizada en el SENAMHI, se identificó la existencia de una estación meteorológica ubicada en la cabecera de la cuenca, en la localidad de Huacullo, la cual se encuentra dentro del ámbito hidrológico del río Totora - Oropesa.

La estación meteorológica identificada con código 472B16EA se encuentra operativa desde abril de 2021, por lo que presenta un periodo de registro relativamente reciente. Esta condición limita su uso para análisis históricos de largo plazo; sin embargo, constituye una fuente relevante para el monitoreo en tiempo real dentro de un SAT-COM.

Figura 76

Estación meteorológica Huacullo operada por el SENAMHI



Nota. Información consultada en el portal institucional del SENAMHI (2026). https://www.senamhi.gob.pe/servicios/?p=estaciones

b. SONICS

El SONICS, desarrollado por el SENAMHI, es una herramienta de monitoreo y pronóstico hidrológico orientada a la identificación temprana de posibles inundaciones fluviales a nivel nacional.

Este sistema se basa en simulaciones de caudal medio diario generadas por el modelo hidrológico nacional ARNOVIC+RAPID, aplicado a múltiples tramos de ríos a nivel nacional, permitiendo la emisión de pronósticos con un horizonte de hasta siete (07) días.

Asimismo, el sistema evalúa las condiciones hidrológicas actuales mediante umbrales de alerta asociados a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Adicionalmente, identifica posibles incrementos anómalos de caudal con potencial de generar desbordes, utilizando análisis estadísticos basados en valores superiores al percentil 70 del caudal medio diario.

Modelo hidrológico nacional

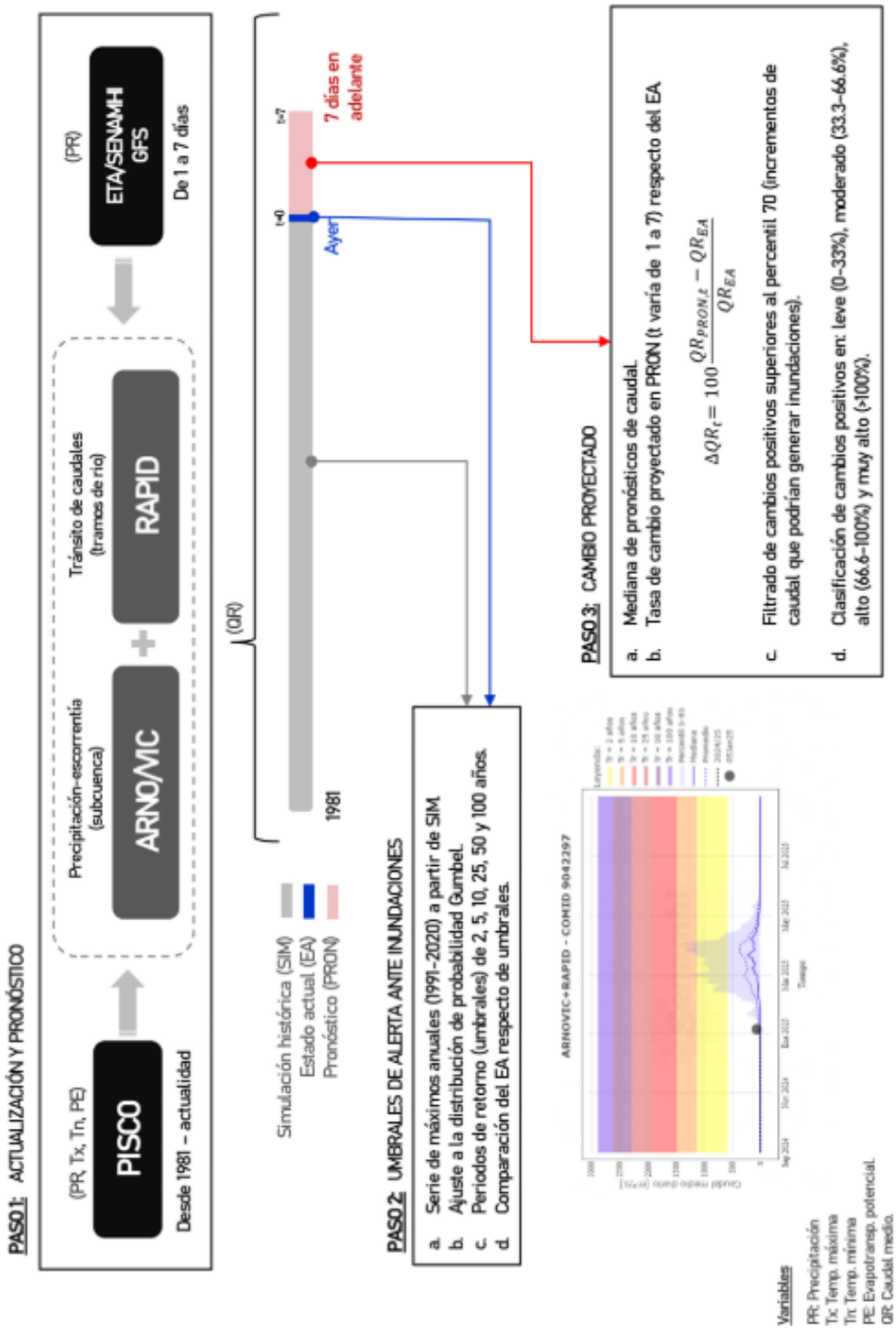
El modelo ARNOVIC+RAPID permite la simulación de caudales medios diarios a escala nacional, incluyendo cuencas con y sin información hidrométrica.

Este modelo utiliza como insumos variables hidrometeorológicas, tales como precipitación, temperatura del aire y evapotranspiración, provenientes del producto PISCO y procesadas a escala de subcuencas, las cuales alimentan el modelo precipitación-escorrentía ARNOVIC. Posteriormente, los resultados obtenidos son procesados mediante el modelo de enrutamiento RAPID, con el fin de estimar caudales en los tramos fluviales.

El modelo fue calibrado y validado para el periodo 1981-2020 utilizando registros de 43 estaciones hidrométricas. En cuencas sin información fluviométrica, se aplicó un enfoque de regionalización hidrológica basado en similitud fisiográfica entre cuencas.

Figura 77

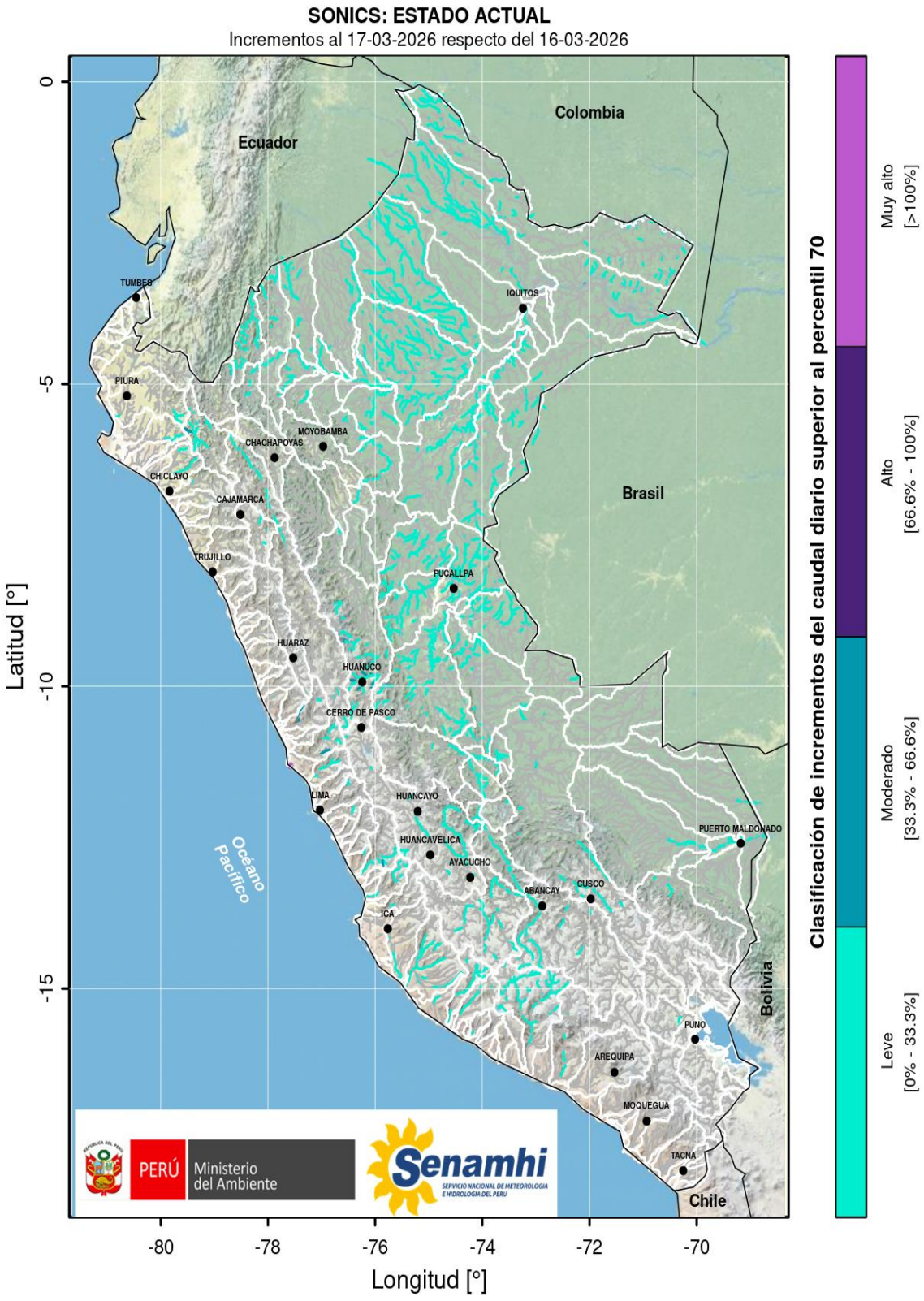
Estructura del Sistema de Observación de Inundaciones Potenciales (SONICS)



Nota. Tomado del portal institucional del SENAMHI (2026).

Figura 78

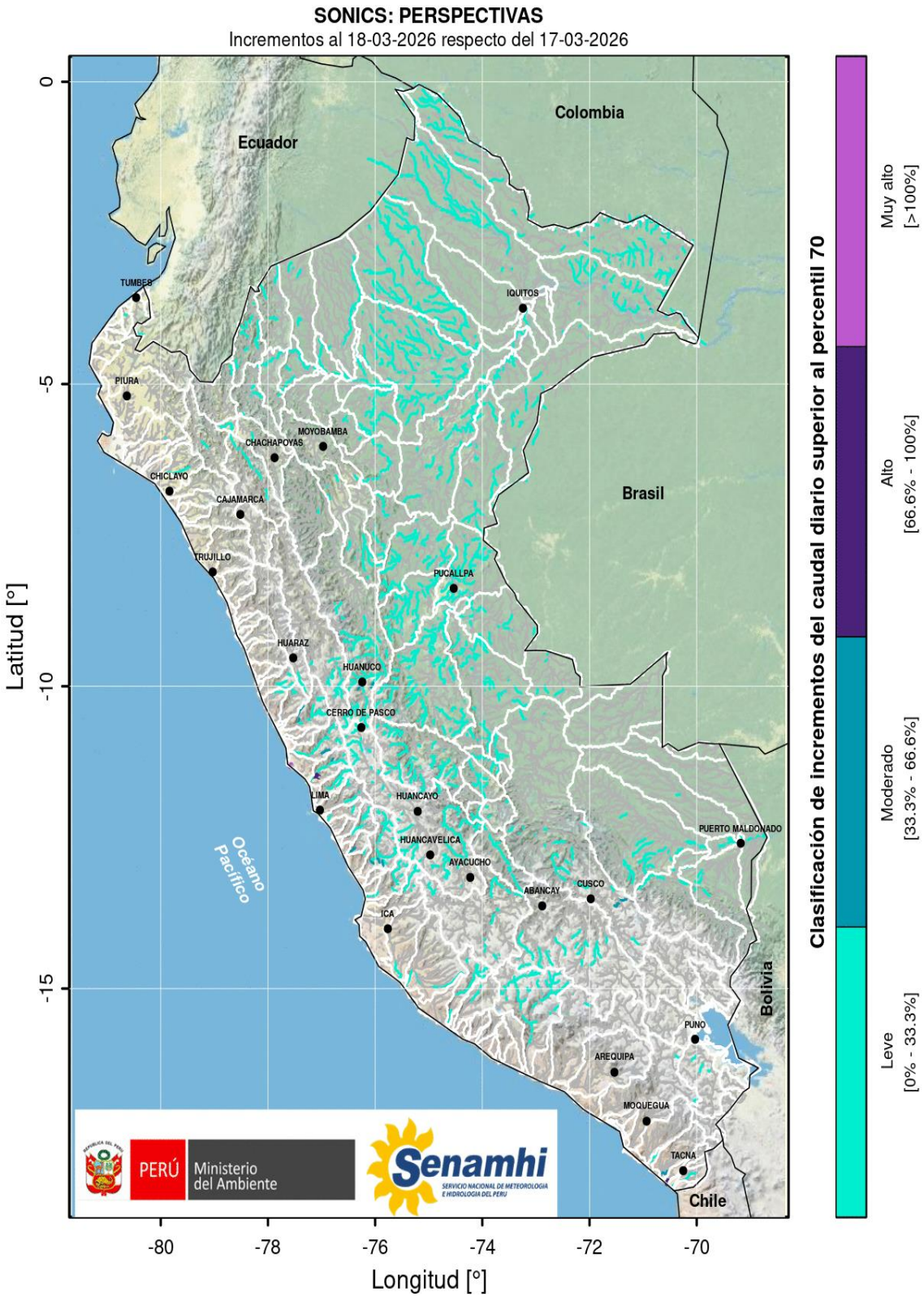
Estado hidrológico actual del sistema SONICS para el área de estudio



Nota. Tomado del portal institucional del SENAMHI (2026).

Figura 79

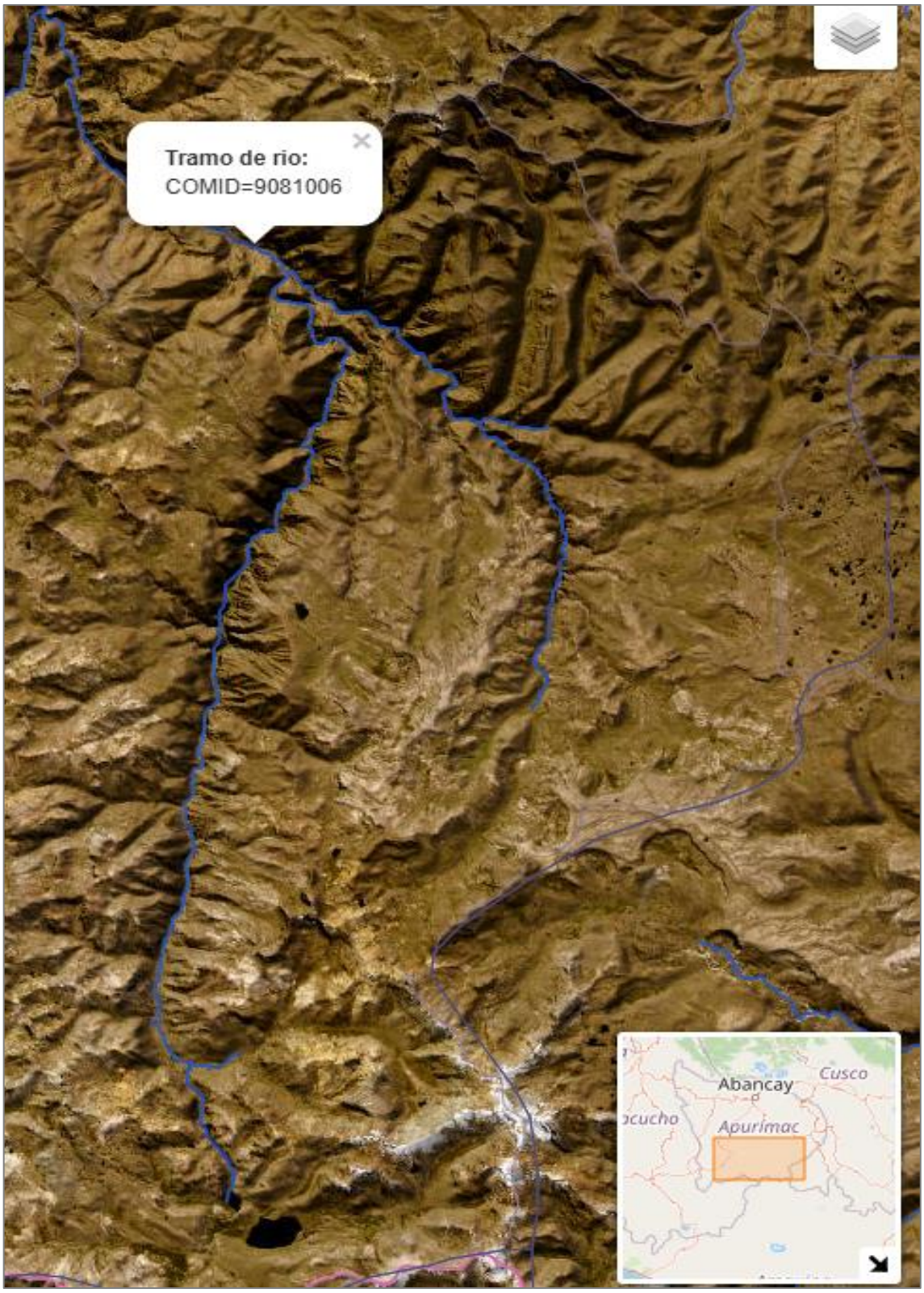
Pronóstico hidrológico del sistema SONICS para el área de estudio



Nota. Tomado del portal institucional del SENAMHI (2026).

Figura 80

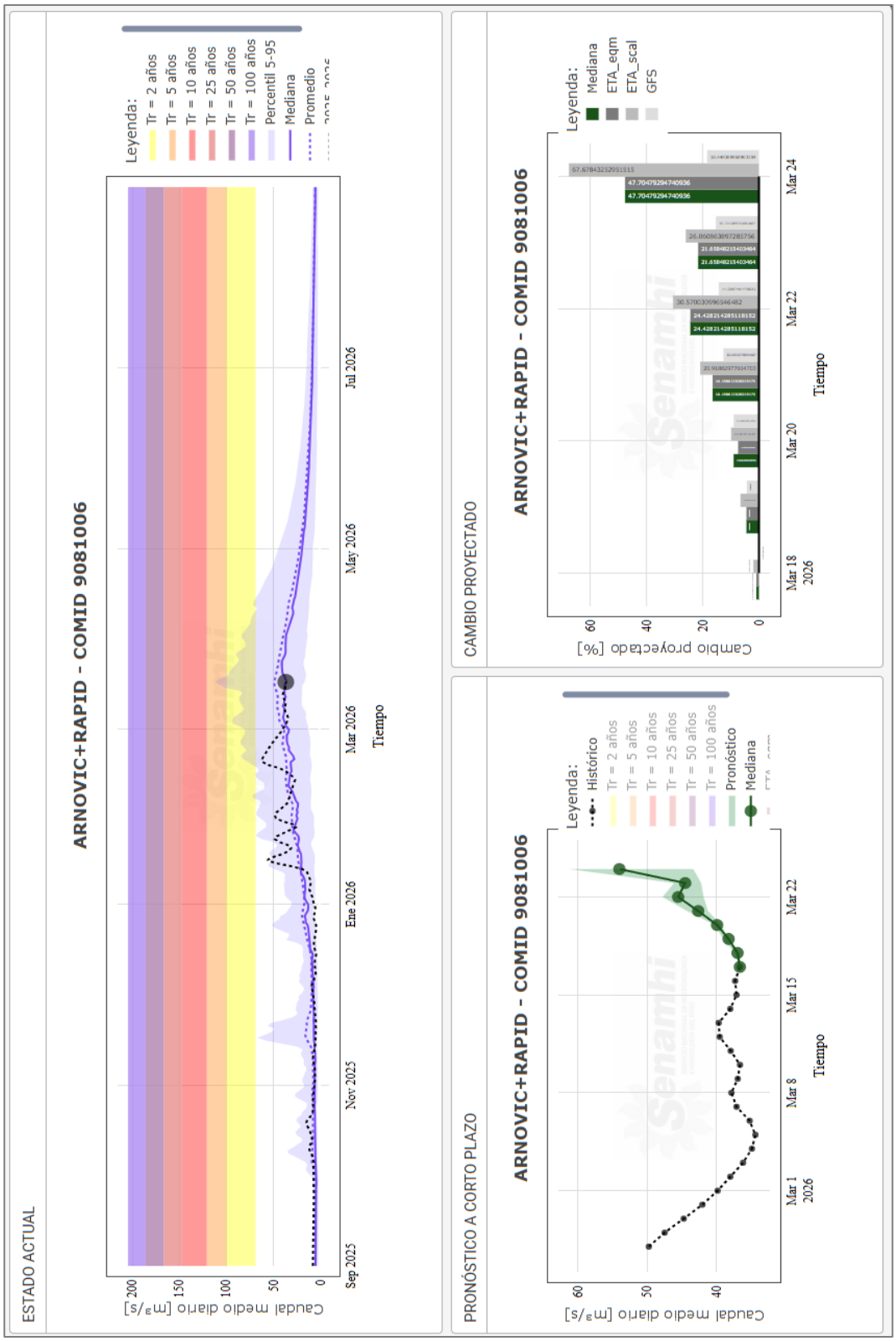
Tramo fluvial en evaluación identificado con COMID 9081006 en el sistema SONICS



Nota. Tomado del portal institucional del SENAMHI (2026).

Figura 81

Comparación entre el estado hidrológico actual y el pronóstico a 7 días para el COMID 9081006



Nota. Tomado del portal institucional del SENAMHI (2026).

El monitoreo y seguimiento de las condiciones hidrometeorológicas en el área de estudio se realizará mediante la integración de información proveniente de plataformas especializadas, tales como PISCO, el modelo hidrológico ARNOVIC+RAPID y el sistema de enrutamiento RAPID, complementados con pronósticos meteorológicos del modelo ETA/ENSAMBLE (GFS). Estas herramientas permiten generar simulaciones de caudales en tiempo real y proyecciones hidrológicas de corto plazo (hasta 7 días), facilitando el monitoreo continuo del comportamiento hidrológico de la quebrada Totora.

Este sistema integrado permitirá evaluar la evolución temporal del caudal, comparar escenarios históricos, actuales y proyectados, e identificar posibles incrementos que superen los umbrales críticos asociados a eventos de inundación. De esta manera, se facilita la emisión oportuna de alertas y el seguimiento continuo de las condiciones hidrológicas en el área de estudio.

c. Implementación del Centro de Operaciones de Emergencia Local (COEL)

Con la finalidad de fortalecer la capacidad de respuesta institucional ante eventos de inundación en la quebrada Totora, se propone la implementación y equipamiento del COEL del distrito de Oropesa. Esta propuesta tiene como objetivo mejorar los procesos de monitoreo, recepción, análisis y difusión de información hidrometeorológica, permitiendo una toma de decisiones oportuna y eficiente frente a situaciones de emergencia.

La implementación del COEL contribuirá al fortalecimiento del SAT-COM, facilitando la coordinación interinstitucional, el seguimiento continuo de las condiciones hidrometeorológicas y la activación de mecanismos de respuesta ante posibles eventos de inundación. De esta manera, se contribuirá a consolidar un sistema eficiente de monitoreo, alerta y respuesta, orientado a reducir los niveles de riesgo y proteger la integridad de la población y sus medios de vida.

Para el funcionamiento adecuado del COEL y el fortalecimiento del SAT-COM, se propone la implementación de componentes básicos orientados al monitoreo hidrometeorológico, la vigilancia comunitaria y la generación de alertas tempranas, los

cuales permitirán mejorar la capacidad de seguimiento y respuesta ante posibles eventos de inundación en el área de estudio.

Implementación del centro de monitoreo

Se propone la implementación de un centro de monitoreo en las instalaciones del COEL, destinado a la recepción, procesamiento y análisis de información hidrometeorológica en tiempo real. Este espacio permitirá realizar el seguimiento continuo de eventos hidrometeorológicos extremos y facilitará la emisión oportuna de alertas ante posibles inundaciones.

Para garantizar su adecuada operatividad, el centro de monitoreo deberá contar con los siguientes equipos tecnológicos y de comunicación básicos:

- 01 computadora de escritorio (CPU y monitor).
- 01 televisor para visualización y seguimiento de información.
- 01 antena de radio VHF.
- 02 radios de comunicación VHF.
- 02 linternas de largo alcance.

Implementación de instrumentos de monitoreo hidrometeorológico

Se propone la instalación de instrumentos especializados para el monitoreo hidrometeorológico del área de estudio. La selección, ubicación e implementación de dichos equipos deberá realizarse en coordinación con la Dirección Zonal del SENAMHI, con el propósito de garantizar el cumplimiento de criterios técnicos y asegurar la confiabilidad de la información registrada.

Los instrumentos propuestos son los siguientes: 01 estación hidrológica, 01 estación meteorológica automática y 01 cámara de monitoreo para vigilancia visual del cauce.

Asimismo, se recomienda considerar la articulación con la estación meteorológica de Huacullo como punto complementario de control y validación de información hidrometeorológica.

Implementación de instrumentos básicos de vigilancia comunitaria

De manera complementaria, se propone la coordinación con la Subgerencia de Gestión del Riesgo de Desastres para la implementación de instrumentos básicos de monitoreo comunitario, los cuales permitirán fortalecer el seguimiento local de las condiciones hidrológicas durante la temporada de lluvias.

Los instrumentos propuestos son: 02 limnímetros artesanales y 02 pluviómetros artesanales.

Estos dispositivos permitirán realizar observaciones directas del comportamiento del nivel del agua y de la precipitación en sectores estratégicos del área de estudio.

Incorporación de vigías para el monitoreo y alerta

Se propone la contratación de dos (02) vigías locales, quienes estarán encargados de efectuar el monitoreo permanente de las estaciones hidrológicas convencionales y de los limnímetros instalados, especialmente durante periodos de precipitaciones intensas.

Las funciones principales de los vigías serán el registro de niveles de agua, reporte de incidencias y apoyo en la activación de alertas tempranas ante posibles eventos de inundación.

Para el adecuado cumplimiento de sus funciones, se considera necesario dotarlos del siguiente equipamiento básico:

- 02 binoculares con visión diurna y nocturna.
- 02 chalecos con cintas reflectivas.
- 02 pares de botas de campo.
- 02 megáfonos con sirena incorporada.
- 02 linternas de largo alcance.

La participación de vigías locales permitirá fortalecer el componente comunitario del SAT, favoreciendo una respuesta rápida y una comunicación más eficiente con la población.

Figura 82

Propuesta de implementación del Centro de Operaciones de Emergencia Local (COEL)



Nota. La propuesta considera los lineamientos del SAT-COM para la implementación del COEL.

5.1.5.5. Difusión y Comunicación de la Alerta.

La difusión y comunicación de la alerta constituye un componente crítico del SAT, debido a que garantiza la transferencia oportuna de información desde el sistema de monitoreo hacia la población expuesta al peligro. Su efectividad depende de la integración de medios tecnológicos y mecanismos comunitarios, los cuales permiten asegurar la cobertura incluso en zonas rurales con limitada conectividad.

En el presente estudio, la comunicación de alertas se sustenta en un sistema mixto que combina tecnologías de radiofrecuencia VHF y mecanismos tradicionales de alerta comunitaria, asegurando redundancia, continuidad operativa y alcance territorial.

Sistema de comunicación VHF

Se emplea la tecnología Frecuencia Muy Alta (*Very High Frequency*, VHF), correspondiente a la banda del espectro electromagnético comprendida entre 30 MHz y 300 MHz. Este sistema es ampliamente utilizado en la gestión del riesgo de desastres debido a su alta confiabilidad, bajo costo operativo y capacidad de transmisión en tiempo real. Su uso se encuentra regulado por el MTC, lo que garantiza su implementación bajo condiciones técnicas adecuadas.

En el SAT, la red VHF permitirá la transmisión de señales de alerta desde el COEL hacia dispositivos de activación comunitaria como sirenas, altoparlantes y megáfonos.

Mecanismos comunitarios de alerta

De manera complementaria, se propone la implementación de mecanismos comunitarios de alerta de bajo costo y alta efectividad, orientados a reforzar la difusión de alarmas ante posibles eventos de inundación, especialmente en sectores donde la cobertura tecnológica y los medios de comunicación convencionales son limitados.

Los mecanismos propuestos son los siguientes:

- campanas comunitarias.
- silbatos.
- megáfonos.

- sirenas vehiculares de la Policía Nacional del Perú (PNP) y del Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (CGBVP).
- comunicación directa mediante telefonía celular.

La articulación de estos mecanismos permitirá que la información de alerta sea difundida de manera clara, oportuna y efectiva, facilitando la adopción de medidas de respuesta, como la evacuación hacia zonas seguras por parte de la población expuesta.

Previo a la instalación del sistema de comunicación masiva, la Municipalidad Distrital de Oropesa deberá gestionar un estudio de interoperabilidad y compatibilidad del sistema, a fin de asegurar su integración con el Centro de Operaciones de Emergencia Provincial y Regional, garantizando así la coherencia del flujo de información en todos los niveles del sistema de gestión del riesgo.

5.1.5.5.1. Niveles de Alerta y Umbrales.

Los umbrales corresponden a valores de referencia establecidos a partir del comportamiento hidrológico de la quebrada Totora, considerando principalmente los niveles de agua registrados mediante limnímetros y estaciones hidrométricas, así como la intensidad de las precipitaciones. Estos valores permiten reconocer de manera progresiva las condiciones de peligro y facilitan la activación oportuna de alertas dentro del SAT-COM.

Para el presente estudio, la definición de los umbrales se realizó mediante el análisis hidrológico de la cuenca y el procesamiento de información hidrometeorológica proveniente de las estaciones del SENAMHI, complementada con los resultados obtenidos del modelamiento hidrológico e hidráulico desarrollado en la investigación. A partir de esta información, fue posible establecer valores representativos de precipitación y respuesta hidrológica para la definición de los niveles de alerta.

En función de los umbrales establecidos, se definieron cuatro niveles de alerta, los cuales permiten clasificar el estado del sistema según el grado de peligro asociado a posibles eventos de inundación:

• Condición normal.

- Alerta preventiva (aviso preventivo)
- Alerta alta (condición crítica)
- Alerta máxima (condición de emergencia)

Con base en los resultados del modelamiento hidrológico e hidráulico desarrollado para la quebrada Totora, se establecieron umbrales hidrometeorológicos y niveles operativos de alerta orientados a fortalecer el funcionamiento del SAT-COM. Estos niveles permiten definir criterios técnicos para la activación progresiva de avisos, alertas y acciones de respuesta ante posibles eventos de inundación, considerando el comportamiento del caudal, la precipitación y las condiciones de riesgo identificadas en el área de estudio.

Tabla 60

Umbrales hidrometeorológicos y niveles operativos de alerta del SAT-COM para la quebrada Totora

Rio / Cuenca / Quebrada	Distritos o centros poblados	Peligro identificado	Umbrales			Color de la alerta / alarma				Forma de difusión			Responsable de la alerta	Responsable de la alarma
			Aviso	Alerta	Alarma	Verde	Amarilla	Naranja	Roja	Aviso	Alerta	Alarma		
Totora - Oropesa	Totora - Oropesa	Inundación pluvial	16.38 mm	24.62 mm	28.82 mm	16.00 mm	20.00 mm	25.00 mm	30.00 mm	Radio VHF, aviso interno COEL	Radio VHF, megáfono, coordinación comunal	Sirena, megáfono, campana	COEL - Municipalidad	COEL + Vigías

Nota. Los umbrales fueron definidos con base en los resultados del modelamiento hidrológico e hidráulico mediante HEC-HMS y HEC-RAS.

Tabla 61

Niveles operativos de alerta y acciones de respuesta ante inundaciones en la quebrada Totora

Nivel de manifestación del peligro	Condición de alerta	Acción
Situación normal 	Las condiciones hidrológicas de la quebrada Totora se mantienen dentro de parámetros normales y el nivel del agua no representa riesgo de desborde.	No se requiere la activación de medidas de emergencia. El COEL y los responsables del SAT-COM mantienen el monitoreo rutinario y la verificación del funcionamiento de los equipos de vigilancia y comunicación.
Condición de aviso	Se presenta un incremento progresivo del nivel del agua debido a precipitaciones intensas, aproximándose al umbral de alerta establecido.	Se emite el aviso preventivo a la población ubicada en zonas vulnerables y se intensifica el monitoreo hidrometeorológico. Asimismo, las brigadas comunitarias y equipos de primera respuesta se mantienen en estado de preparación ante una posible evacuación.
Condición crítica 	El nivel del agua alcanza el umbral crítico establecido para la quebrada Totora, existiendo alta probabilidad de desborde e inundación en sectores expuestos.	Las autoridades locales implementan acciones preventivas y de respuesta para la evacuación de la población ubicada en zonas de alto y muy alto Riesgo. Además, se activa el Plan de Contingencia y se coordinan acciones con las entidades competentes.
Condición de emergencia (Impacto o desastre) 	El nivel del agua supera ampliamente el umbral máximo establecido, produciéndose el desborde de la quebrada e inundaciones en áreas vulnerables.	Se ejecuta la evacuación inmediata de la población afectada y se activa el Plan de Operaciones de Emergencia (POE). Asimismo, se desarrollan acciones de atención, respuesta y rehabilitación por parte de las instituciones responsables.

Nota. Los niveles y acciones de respuesta fueron establecidos según los criterios operativos del SAT-COM.

5.1.5.5.2. Difusión de la Alerta o Alarma

La difusión de la alerta o alarma representa una de las etapas más importantes dentro del SAT-COM, debido a que permite comunicar oportunamente a la población la posible ocurrencia de eventos de inundación y facilitar la adopción inmediata de medidas de protección y evacuación hacia zonas seguras.

La alerta se difundirá mediante medios de comunicación y sistemas de aviso de rápida activación y fácil acceso, adecuados a las condiciones territoriales del distrito y a la cobertura de los sectores expuestos. En ese contexto, se propone la utilización de mecanismos que permitan transmitir la información de manera oportuna, clara y efectiva hacia la población en riesgo. La Figura 83 presenta los principales medios de difusión y alerta considerados.

Figura 83

Medios de difusión de la alerta o alarma en el SAT-COM



Nota. Se muestran los medios de difusión establecidos para el funcionamiento del SAT-COM.

La activación de estos medios estará a cargo del COEL, en coordinación con los vigías y autoridades locales, quienes tendrán la responsabilidad de transmitir la información de manera clara y oportuna a la población ubicada en zonas de riesgo.

Asimismo, se plantea el uso complementario de distintos canales de comunicación, con la finalidad de mantener la continuidad operativa del sistema ante posibles fallas o limitaciones de alguno de los medios principales. La combinación de varios mecanismos

de difusión permitirá ampliar la cobertura de la alerta y fortalecer la capacidad de respuesta de la población.

De igual manera, se propone la conformación de un equipo encargado de apoyar las acciones de difusión y evacuación, integrado por personal previamente capacitado en procedimientos de alerta y respuesta ante emergencias. Este grupo tendrá la función de orientar y asistir a la población durante situaciones de riesgo, contribuyendo a una evacuación ordenada y segura.

5.1.5.6. Capacidad de Respuesta.

La capacidad de respuesta constituye un componente fundamental del SAT-COM, debido a que permite que la población y las autoridades actúen de manera organizada y oportuna ante posibles eventos de inundación en la quebrada Totora. Este componente comprende el conjunto de acciones, procedimientos y mecanismos orientados a reducir los impactos sobre la población, la infraestructura y los servicios básicos durante una situación de emergencia.

En el área de estudio, la capacidad de respuesta se sustenta en la preparación comunitaria, la coordinación institucional y el conocimiento de las medidas de actuación frente a situaciones de riesgo. En ese sentido, resulta indispensable que la población identifique previamente las rutas de evacuación, las zonas seguras y los puntos de concentración establecidos para casos de emergencia.

Asimismo, la preparación para la respuesta involucra tanto a las autoridades locales como a la población expuesta, la cual debe contar con conocimientos básicos sobre procedimientos de evacuación, mecanismos de alerta y organización familiar ante emergencias. De igual manera, se recomienda la implementación de planes familiares de emergencia que permitan una evacuación más segura y ordenada.

Para fortalecer la capacidad de respuesta del SAT-COM en el área de estudio, se proponen las siguientes acciones:

- Socialización de los mecanismos y niveles de alerta del sistema, asegurando su correcta comprensión por parte de la población.
- Identificación, señalización y mantenimiento permanente de las rutas de evacuación hacia zonas seguras.
- Determinación y acondicionamiento de zonas seguras y puntos de concentración para la población expuesta.
- Desarrollo de simulaciones y simulacros periódicos ante eventos de inundación, con enfoque comunitario.
- Implementación de albergues temporales para la atención de la población afectada ante emergencias.
- Capacitación en gestión del riesgo de desastres dirigida a autoridades locales, líderes comunales y población en general.
- Elaboración e implementación de un Plan de Contingencia específico para inundaciones en la quebrada Totora.
- Implementación del POE para una adecuada coordinación interinstitucional durante la atención de emergencias.

La implementación de estas acciones permitirá fortalecer la capacidad operativa y organizativa del sistema, favoreciendo una respuesta más eficiente ante eventos hidrometeorológicos extremos y contribuyendo a la reducción del riesgo en el área de estudio.

La Tabla 62 presenta los principales recursos requeridos para la atención de emergencias dentro del SAT-COM, los cuales permitirán garantizar la operatividad del sistema, la difusión de alertas y la evacuación oportuna de la población expuesta.

Tabla 62

Recursos para respuesta ante emergencias

Componente	Recurso	Función	Cantidad	Responsable
Comunicación	Radio VHF	Comunicación entre COEL, vigías y autoridades	2	COEL / Municipalidad
Comunicación	Megáfonos	Difusión de alerta	2	COEL / Vigías
Comunicación	Sirenas / campanas	Alarma comunitaria	1	Municipalidad
Comunicación	Silbatos	Alerta inmediata en campo	2	Vigías
Monitoreo	Estación hidrológica	Medición de caudal	1 o 2	COEL / Técnico
Monitoreo	Estación meteorológica automática	Registro de precipitación	1	SENAMHI / COEL
Monitoreo	Limnímetros	Control de nivel de agua	2	Vigías
Monitoreo	Pluviómetros	Medición de lluvia local	2 o 4	Comunidad / Vigías
Logística	Linternas	Operación nocturna	2	Vigías
Logística	Chalecos reflectivos	Seguridad e identificación	2	Municipalidad
Logística	Botas de campo	Seguridad en terreno	2 pares	Vigías
Logística	Binoculares	Vigilancia del cauce	2	Vigías
Evacuación	Señalización	Rutas de evacuación	Variable	Municipalidad
Evacuación	Transporte local	Movilización	Según disponibilidad	Municipalidad
Albergue	Carpas	Refugio temporal	Según población	Municipalidad / INDECI
Albergue	Kits de emergencia	Alimentos, abrigo y primeros auxilios	Según población	Municipalidad
Gestión	Personal técnico	Operación del SAT	1 o 2	COEL
Gestión	Vigías	Monitoreo de campo	2	COEL

Nota. Los recursos corresponden a los elementos operativos considerados para la respuesta ante emergencias del SAT-COM.

5.1.5.7. Esquema Funcional del SAT-COM.

El SAT propuesto para la quebrada Totora se estructura como un proceso secuencial e interconectado que integra el monitoreo hidrometeorológico, el análisis de información en tiempo real, la generación de umbrales de alerta y la activación de mecanismos de respuesta comunitaria.

Esta organización operativa permite asegurar que la información generada en campo y en los sistemas de monitoreo sea transformada en decisiones oportunas orientadas a la protección de la población expuesta a eventos de inundación.

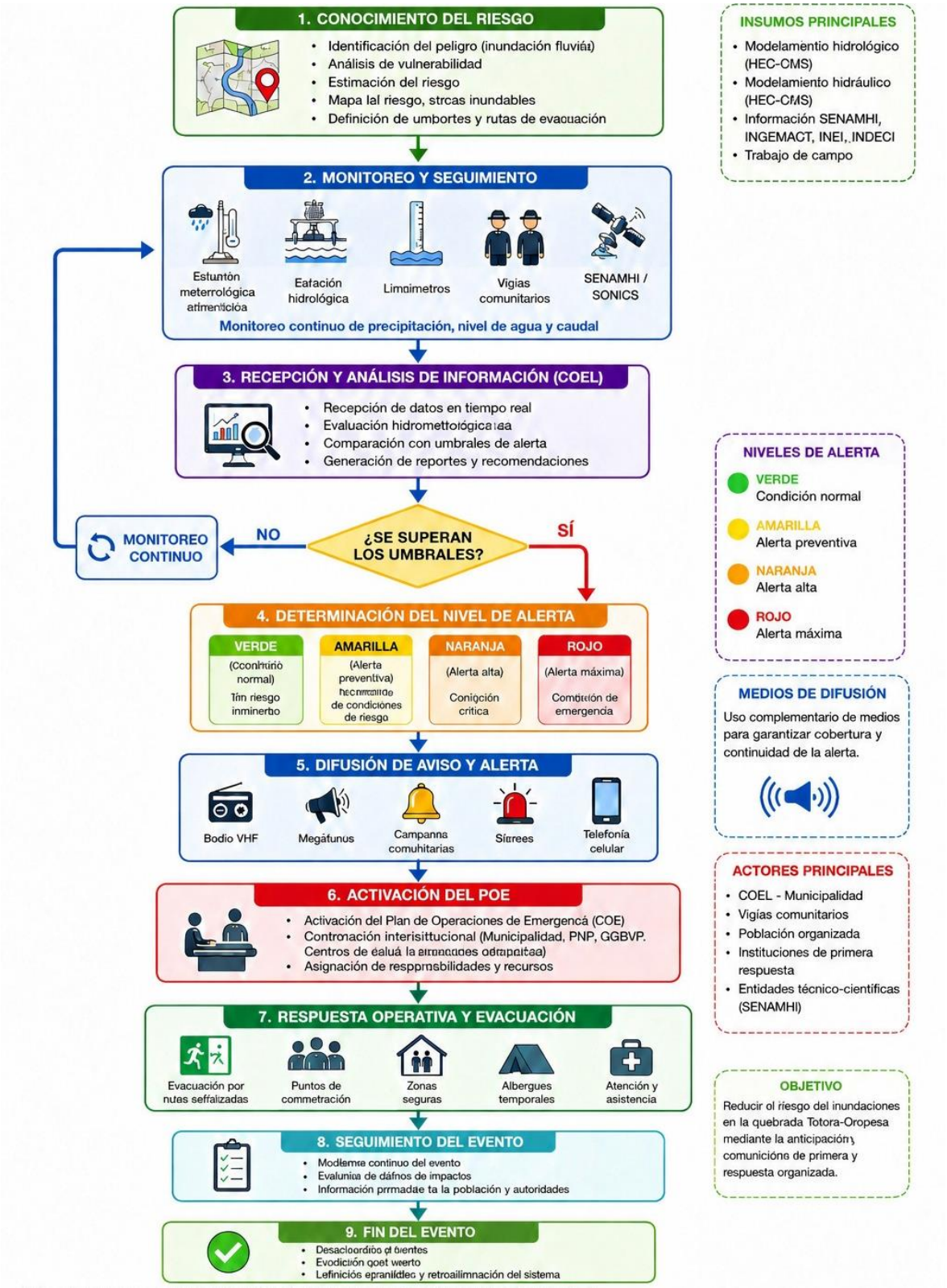
Con el objetivo de facilitar la comprensión del funcionamiento integral del sistema, se presenta un diagrama de flujo que sintetiza las etapas del SAT, desde la captación de datos hidrometeorológicos hasta la ejecución de acciones de evacuación y respuesta.

El diagrama permite identificar de manera ordenada la interacción entre los componentes del sistema, así como los puntos de decisión asociados a los umbrales de alerta establecidos. En este sentido, constituye una herramienta operativa que facilita la comprensión de los flujos de información, la asignación de responsabilidades y la articulación institucional durante una emergencia.

Finalmente, este esquema representa una base metodológica para la implementación del SAT en la quebrada Totora, permitiendo su adecuada operativización en el ámbito de estudio.

Figura 84

Diagrama funcional del SAT-COM para la quebrada Totora



Nota. El diagrama considera los componentes funcionales del SAT-COM según la guía técnica del INDECI y la propuesta desarrollada.

5.1.5.8. Mecanismos de Financiamiento del SAT-COM.

El financiamiento del SAT-COM propuesto para la quebrada Totora se estructura en concordancia con los lineamientos establecidos por el SINAGERD, con la finalidad de garantizar su implementación, funcionamiento, mantenimiento y sostenibilidad operativa en el tiempo.

La principal fuente de financiamiento corresponde al presupuesto público asignado a la Municipalidad Distrital de Oropesa y al Gobierno Regional de Apurímac, mediante el Programa Presupuestal 0068: “Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres”, orientado al desarrollo de acciones de prevención, monitoreo, equipamiento y fortalecimiento de capacidades frente a eventos de origen hidrometeorológico.

De manera complementaria, se considera el acceso a recursos del FONDES, destinados al financiamiento de intervenciones prioritarias relacionadas con la reducción del riesgo de desastres, la implementación del SAT-COM y la adquisición de infraestructura y equipamiento especializado para el monitoreo y la alerta temprana.

Asimismo, el sistema podrá ser financiado mediante proyectos de inversión pública formulados en el marco del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones (Invierte.pe), permitiendo asegurar la viabilidad técnica, económica y presupuestal de componentes estratégicos como el COEL, estaciones de monitoreo y sistemas de comunicación y alerta.

Adicionalmente, se contempla la participación de mecanismos de cooperación internacional a través de organismos especializados, programas de cooperación climática y ONG, los cuales pueden contribuir mediante asistencia técnica, fortalecimiento de capacidades, transferencia tecnológica y financiamiento parcial de equipamiento e infraestructura.

Por otro lado, se considera el cofinanciamiento interinstitucional entre entidades vinculadas al SINAGERD, tales como la Municipalidad Distrital de Oropesa, SENAMHI, INDECI y CENEPRED, orientado principalmente al intercambio de información

hidrometeorológica, asistencia técnica especializada y soporte operativo para el funcionamiento del sistema.

Finalmente, se incorpora la participación comunitaria como un componente fundamental para la sostenibilidad del SAT-COM, mediante la organización de vigías comunales, apoyo en actividades de monitoreo, aportes de mano de obra local y participación organizada de la población en acciones de preparación y respuesta ante emergencias.

La Figura 85 presenta el esquema general de los mecanismos de financiamiento considerados para la implementación del SAT-COM en la quebrada Totora, evidenciando un enfoque integral y articulado que combina recursos públicos, fondos especializados, inversión pública, cooperación técnica e involucramiento comunitario, fortaleciendo la sostenibilidad funcional y operativa del sistema en el ámbito de estudio.

Figura 85

Esquema de los mecanismos de financiamiento del SAT-COM



Nota. El esquema representa las alternativas de financiamiento consideradas para la implementación del SAT-COM.

5.2. Análisis e Interpretación de los Resultados

5.2.1. Análisis del Comportamiento Hidrológico de la Cuenca

5.2.1.1. Caracterización morfométrica y fisiográfica de la cuenca

Tabla 63

Parámetros morfológicos y fisiográficos de la cuenca de la Quebrada Totora

Parámetro	Unidad	Valor
Parámetros morfométricos de forma		
Área	km²	1,144.40
Perímetro	km	272.67
Longitud del cauce principal	km	67.72
Longitud axial	km	36.16
Ancho de la cuenca	km	16.82
Desnivel	m	1,253.00
Índice de compacidad	Coef.	2.27
Factor de forma	Coef.	0.25
Índice de circularidad	Coef.	0.19
Longitud mayor del rectángulo equivalente	km	128.39
Longitud menor del rectángulo equivalente	km	8.91
Relación de elongación	Coef.	0.564
Parámetros de relieve		
Cota máxima	m.s.n.m.	4,615.00
Cota mínima	m.s.n.m.	3,362.00
Pendiente promedio de la cuenca	%	33.27
Pendiente promedio de la red hídrica	%	1.85
Altitud media	m.s.n.m.	4,642.98
Altitud más frecuente	m.s.n.m.	4,674.50
Parámetros de la red hídrica		
Orden de la red hídrica	-	6
Longitud de la red hídrica	km	2,674.54
Densidad de drenaje	km/km²	2.34
Pendiente del cauce principal	%	2.56
Centroide (WGS 1984 UTM ZONE 18S)		
Centroide X	m	768184.98
Centroide Y	m	8401525.63
Centroide Z	m.s.n.m.	4732.00

Nota. Elaborado a partir del análisis morfométrico e hidrológico de la cuenca mediante ArcGIS y HEC-HMS.

A partir del análisis morfométrico y fisiográfico desarrollado para la cuenca de la Quebrada Totora, se determinó que el área total de drenaje alcanza aproximadamente 1144.40 km², con un perímetro de 272.67 km. Asimismo, el centroide de la cuenca se localiza en las coordenadas UTM 768184.98 m E y 8401525.63 m N, dentro del sistema

WGS 1984 UTM Zona 18S. Estas características espaciales permitieron establecer la configuración general de la cuenca y comprender su influencia sobre la dinámica hidrológica del área de estudio.

En relación con la altitud, la cuenca presenta una marcada variación topográfica, con cotas que oscilan entre 3362.00 y 4615.00 m s. n. m. Esta diferencia altitudinal evidencia la presencia de sectores con pendientes pronunciadas, condición que favorece el incremento de la velocidad de escorrentía superficial y la concentración rápida de caudales durante eventos de precipitación intensa.

El cauce principal posee una longitud de 67.72 km y una pendiente media de 2.56 %, características que permiten el transporte eficiente de los flujos generados en las diferentes subcuencas hacia el punto de control hidrológico establecido en el río Totora - Oropesa. Del mismo modo, la red hídrica alcanza una longitud total de 2,674.54 km y corresponde a un sistema de drenaje de orden 6 según la clasificación de Strahler (1957), lo cual evidencia un grado considerable de ramificación y conectividad hidráulica dentro de la cuenca.

La densidad de drenaje obtenida fue de 2.34 km/km², valor que indica una capacidad moderada de evacuación de escorrentía superficial. Este comportamiento permite inferir que la cuenca presenta condiciones intermedias entre infiltración y escurrimiento superficial, asociadas a una permeabilidad moderada del suelo y a una resistencia media frente a procesos erosivos.

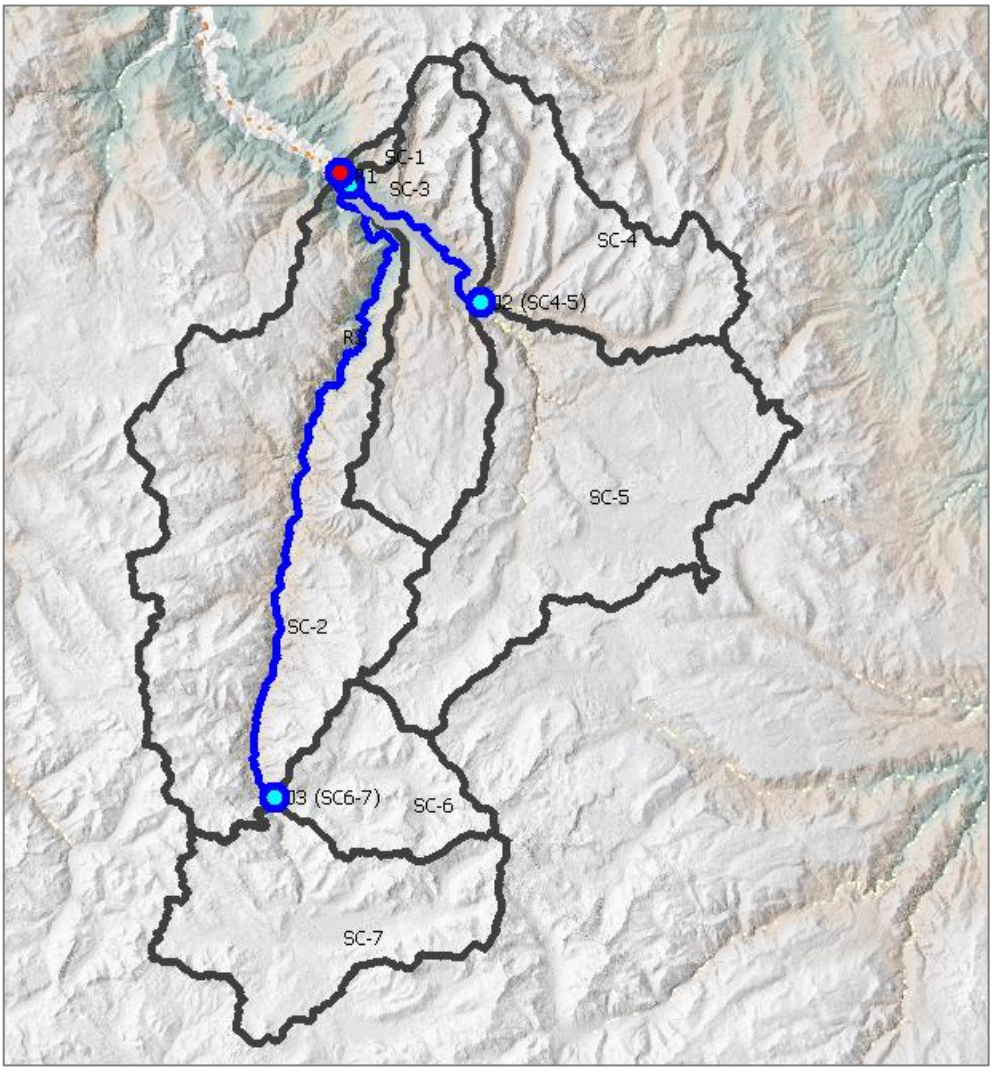
En cuanto a los parámetros de forma, el factor de forma calculado fue de 0.25 y el índice de circularidad de 0.19, valores que reflejan una cuenca de geometría alargada. Desde el punto de vista hidrológico, esta configuración tiende a disminuir la concentración simultánea de escorrentías provenientes de diferentes sectores de la cuenca, aunque las elevadas pendientes presentes en determinadas zonas pueden generar respuestas rápidas ante precipitaciones intensas.

De manera general, los parámetros morfométricos obtenidos permitieron comprender el comportamiento hidrológico de la cuenca y constituyeron la base técnica para el desarrollo del modelamiento hidrológico mediante el software HEC-HMS. En este contexto, debido a la heterogeneidad espacial observada en las características físicas del territorio, se consideró técnicamente necesario subdividir la cuenca en unidades menores de análisis.

5.2.1.2. Delimitación de subcuencas y red de drenaje

Figura 86

Delimitación de subcuencas y red de drenaje de la cuenca de la Quebrada Totora



Nota. Elaborado a partir del procesamiento hidrológico y análisis geomorfológico realizado en HEC-HMS v.4.13.

El procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM) permitió identificar la red de drenaje principal y delimitar siete subcuencas hidrológicas, las cuales fueron definidas considerando la dirección de flujo, acumulación hídrica y conectividad hidráulica del sistema. Esta subdivisión permitió representar de manera más detallada la variabilidad espacial de las características fisiográficas de la cuenca y mejorar la precisión del modelo lluvia-escorrentía implementado.

La delimitación de subcuencas constituye un procedimiento fundamental dentro del modelamiento hidrológico, debido a que parámetros como pendiente, cobertura superficial, longitud de flujo y capacidad de infiltración presentan variaciones importantes dentro del territorio analizado. En consecuencia, la subdivisión adoptada permitió representar con mayor confiabilidad el comportamiento hidrológico de cada unidad y su contribución al caudal total en el punto de salida de la cuenca.

5.2.1.3. Características morfométricas de las subcuencas

Tabla 64

Características morfométricas de las subcuencas de la cuenca de la Quebrada Totora

Subcuenca	Área (km²)	Perímetro (km)	Pendiente de la cuenca (m/m)	Altitud media (m.s.n.m.)	Longitud más larga del flujo (km)	Pendiente del flujo más largo (m/m)	Densidad de drenaje (km/km²)
SC_01	4.64	12.04	0.5420	4331.03	4.22	0.2693	1.617
SC_02	372.63	147.54	0.3947	4565.09	49.28	0.0221	2.188
SC_03	145.54	95.60	0.3862	4478.31	27.07	0.0341	2.152
SC_04	133.07	89.15	0.4270	4614.08	20.28	0.0269	1.912
SC_05	266.95	136.75	0.2060	4635.99	31.97	0.0228	2.740
SC_06	71.12	51.60	0.3239	4910.36	15.39	0.0307	2.400
SC_07	150.42	90.93	0.2725	4915.89	21.50	0.0117	2.490

Nota. Elaborado a partir del procesamiento hidrológico y análisis morfométrico realizado en HEC-HMS v.4.13 y ArcGIS.

A partir de la información obtenida para las subcuencas, se identificó una marcada variabilidad en sus características físicas, lo cual influye directamente en la generación y concentración de escorrentía superficial.

La subcuenca SC_02 presentó la mayor extensión territorial, con un **área** de 372.63 km², seguida por la SC_05 con 266.95 km². Por el contrario, la SC_01 registró la menor superficie, con apenas 4.64 km². Estas diferencias evidencian comportamientos hidrológicos distintos, ya que las subcuencas de mayor tamaño tienden a generar mayores volúmenes de escorrentía, aunque con tiempos de concentración más prolongados.

Respecto a la **pendiente media**, los valores oscilaron entre 0.2060 y 0.542 m/m. La SC_01 presentó la mayor pendiente, condición que favorece velocidades elevadas de escurrimiento superficial y menor capacidad de infiltración. Esta característica incrementa la probabilidad de generación de caudales pico durante eventos de precipitación intensa.

En relación con la **altitud media**, las subcuencas se ubican dentro de un entorno altoandino, con valores comprendidos entre 4331.03 y 4915.89 m s. n. m. Estas condiciones topográficas influyen directamente en los procesos de precipitación, escorrentía y respuesta hidrológica de la cuenca frente a eventos extremos.

Asimismo, la longitud del flujo principal presentó diferencias importantes entre subcuencas. La SC_02 registró la mayor longitud de flujo con 46.41 km, lo cual implica un mayor tiempo de concentración; mientras que la SC_01 presentó una trayectoria más corta y pendientes más pronunciadas, favoreciendo respuestas hidrológicas más rápidas.

La densidad de drenaje varió entre 1.617 y 2.74 km/km², destacando la SC_05 con el valor más elevado. Estos resultados evidencian una red hídrica relativamente desarrollada y una capacidad moderada a alta para evacuar escorrentía superficial durante eventos de lluvia.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian una importante heterogeneidad espacial en las características morfométricas de la cuenca, justificando técnicamente su subdivisión para el modelamiento hidrológico mediante HEC-HMS y permitiendo mejorar la representación del comportamiento hidrológico del sistema.

5.2.1.4. Características hidráulicas de los cauces principales

Tabla 65

Características hidráulicas de los cauces principales de la cuenca de la Quebrada Totora

Cauce	Longitud (km)	Pendiente (m/m)
RIO_01	0.92	0.012
RIO_02	46.41	0.021
RIO_03	13.46	0.039
Total	**60.79**	**-**

Nota. Elaborado a partir del procesamiento hidrológico realizado en HEC-HMS v.4.13.

Con base en los resultados obtenidos, se identificó que la red principal de drenaje de la cuenca está conformada por tres cauces principales, cuya longitud total alcanza 60.79 km. Esta estructura longitudinal evidencia una adecuada conectividad hidráulica para el transporte de escorrentía superficial hacia el punto de salida de la cuenca.

El tramo RIO_02 constituye el eje principal del sistema hídrico, con una longitud de 46.41 km y una pendiente de 0.021 m/m. Estas características indican una elevada capacidad de conducción del flujo y una mayor velocidad de escurrimiento, favoreciendo la rápida concentración de caudales durante eventos de precipitación intensa. Sin embargo, esta condición también incrementa el potencial erosivo y el transporte de sedimentos.

Por su parte, el tramo RIO_03 presentó una longitud de 13.46 km y una pendiente de 0.04 m/m, reflejando un comportamiento hidráulico intermedio, con velocidades moderadas y cierta capacidad de almacenamiento temporal del flujo.

En contraste, el tramo RIO_01 registró la menor longitud y pendiente del sistema, con valores de 0.92 km y 0.0119 m/m, respectivamente. Estas condiciones indican una menor energía hidráulica y una mayor tendencia a la sedimentación y acumulación temporal de agua.

De manera integral, la variabilidad de pendientes y longitudes observada en los cauces evidencia diferencias significativas en la dinámica hidráulica del sistema fluvial. Los tramos con mayores pendientes favorecen procesos rápidos de concentración de

escorrentía, mientras que aquellos con pendientes reducidas pueden funcionar como zonas de regulación temporal del flujo superficial. Estas condiciones influyen directamente en la respuesta hidrológica de la cuenca y en la generación de escenarios potenciales de inundación analizados en el modelamiento hidráulico posterior.

5.2.2. Evaluación de Parámetros del Modelo HEC-HMS

5.2.2.1. Análisis del Número de Curva (CN) de la cuenca de la Quebrada Totora.

El modelamiento hidrológico desarrollado mediante el software HEC-HMS requirió la definición de parámetros hidrológicos representativos de las condiciones físicas y fisiográficas de la cuenca de la Quebrada Totora. Entre los parámetros más relevantes considerados en la simulación destacan el CN, las abstracciones iniciales (Ia), los tiempos de concentración (Tc) y los parámetros de tránsito de caudales correspondientes al método de Muskingum. Estos elementos permitieron representar adecuadamente el comportamiento lluvia-escorrentía y el desplazamiento del flujo dentro de la red de drenaje de la cuenca.

El parámetro de mayor incidencia en la generación de escorrentía superficial fue el CN, desarrollado por el SCS, debido a que integra variables relacionadas con el uso del suelo, cobertura vegetal, condiciones hidrológicas y capacidad de infiltración del terreno. Para su determinación se utilizó como información base el Mapa Nacional de Cobertura Vegetal elaborado por el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), permitiendo asignar valores acordes con las características reales del área de estudio y mejorar la representatividad hidrológica del modelo.

Tabla 66

Áreas parciales y Número de Curva (CN) de la cuenca de la Quebrada Totora

Descripción	Área 1 (km²)	Área 2 (km²)	Área total (km²)	CN promedio 1	CN promedio 2	CN de diseño
Cuenca de la Quebrada Totora	19.096	1125.304	1144.40	77.00	88.00	87.816

Nota. Elaborado a partir del análisis hidrológico realizado en HEC-HMS v.4.13.

A partir de los resultados obtenidos, se identificó que la cuenca de la Quebrada Totora presenta una superficie total de 1144.40 km², distribuida en dos unidades de análisis diferenciadas. La segunda unidad representa la mayor proporción del área total de la cuenca, situación que influye significativamente en el comportamiento hidrológico global del sistema.

Los valores promedio del CN, muestran diferencias importantes entre ambas unidades. La primera área presenta un CN promedio de 77, mientras que la segunda registra un valor de 88, lo cual evidencia una menor capacidad de infiltración y una mayor predisposición a generar escorrentía superficial. Esta diferencia está asociada principalmente a las características de cobertura vegetal, condiciones del suelo y nivel de impermeabilización presentes en cada sector.

El CN de diseño obtenido para la cuenca fue de 87.816, valor que representa una condición hidrológica con tendencia moderada a alta en la generación de escorrentía. Desde el punto de vista hidrológico, este resultado indica que la cuenca posee limitada capacidad de infiltración, favoreciendo una respuesta rápida frente a eventos de precipitación intensa. En consecuencia, existe una mayor probabilidad de formación de caudales elevados en periodos cortos de tiempo, aspecto fundamental en el análisis de inundaciones y en la formulación del SAT.

5.2.2.2. Evaluación de las abstracciones iniciales y retención potencial máxima

Con base en el valor del CN, se determinaron las pérdidas iniciales de la cuenca, representadas mediante la retención potencial máxima (S) y la abstracción inicial (Ia), cuyos resultados se presentan en la Tabla 67.

Tabla 67

Abstracciones iniciales (Ia) y retención potencial máxima (S) de la cuenca de la Quebrada Totora

Descripción	CN de diseño	Retención potencial máxima (S) (mm)	Abstracción inicial (Ia) (mm)
Cuenca de la Quebrada Totora	87.816	35.25	7.05

Nota. Los valores fueron determinados mediante la metodología del SCS-CN a partir del número de curva de diseño.

Los resultados muestran que la cuenca presenta una retención potencial máxima de 35.25 mm, parámetro que representa la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo antes del inicio del escurrimiento superficial. Asimismo, la abstracción inicial fue estimada en 7.05 mm, valor asociado a las pérdidas iniciales por infiltración, intercepción vegetal y almacenamiento en depresiones superficiales.

Desde el punto de vista hidrológico, una abstracción inicial relativamente baja evidencia que la cuenca requiere una reducida cantidad de precipitación para iniciar la generación de escorrentía superficial. Esta condición permite inferir que el sistema hidrológico presenta una respuesta rápida frente a eventos intensos de lluvia, incrementando la susceptibilidad a la generación de caudales máximos y posibles desbordamientos.

5.2.2.3. Análisis de los tiempos de concentración de las subcuencas

Otro parámetro fundamental dentro del modelamiento hidrológico corresponde al tiempo de concentración (Tc), definido como el tiempo requerido para que el agua

precipitada en el punto más alejado de la cuenca alcance la sección de salida. Para su estimación se aplicaron diversos métodos empíricos con el propósito de obtener valores representativos de las características fisiográficas de cada subcuenca.

Tabla 68

Tiempos de concentración (Tc) de las subcuencas de la cuenca de la Quebrada Totora

Subcuenca	Kirpich (min)	Témez (min)	Giandotti (min)	Izzard (min)	SCS (min)	Onda cinemática (min)	Promedio (min)
SC_01	19.90	69.00	16.10	76.50	41.00	18.20	40.12
SC_02	345.50	718.20	167.40	128.90	314.10	947.90	437.00
SC_03	184.30	419.40	99.20	281.10	214.70	103.30	217.00
SC_04	161.70	352.30	84.40	90.10	148.40	524.50	226.90
SC_05	244.70	513.90	124.80	110.60	307.60	724.40	337.67
SC_06	124.30	278.70	60.50	78.70	136.70	427.30	184.37
SC_07	233.00	431.50	86.80	121.20	194.70	697.40	294.10

Nota. Los valores corresponden a la estimación del tiempo de concentración mediante métodos empíricos aplicados a las subcuencas.

Los resultados evidencian una variabilidad importante entre los tiempos de concentración de las subcuencas, situación directamente relacionada con sus diferencias morfométricas, topográficas y de longitud de flujo. Debido a que cada método empírico presenta criterios y supuestos particulares, se adoptó el valor promedio como parámetro representativo para el modelamiento hidrológico.

La Subcuenca 1 presentó el menor tiempo de concentración, con un valor promedio de 40.12 minutos, lo cual indica una respuesta hidrológica rápida ante eventos de precipitación. Esta condición se encuentra asociada a su reducida extensión y elevadas pendientes, favoreciendo la concentración acelerada del flujo superficial y la generación de caudales pico en tiempos cortos.

En contraste, la Subcuenca 2 registró el mayor tiempo de concentración, alcanzando 437.00 minutos, comportamiento relacionado con su mayor superficie y longitud de flujo. Esta característica permite una respuesta hidrológica más lenta y una mayor distribución temporal de la escorrentía.

Las demás subcuencas presentan tiempos de concentración intermedios, destacando la SC-5 y la SC-7, cuyos valores reflejan respuestas hidrológicas moderadas. En términos generales, las subcuencas con menores tiempos de concentración representan sectores potencialmente críticos frente a precipitaciones intensas, debido a la rápida generación de caudales máximos.

5.2.2.4. Evaluación de los parámetros hidráulicos del método de Muskingum

Finalmente, para la simulación del tránsito de caudales en los cauces principales se empleó el método de Muskingum, el cual requiere la definición de los parámetros K y X.

Tabla 69

Parámetros de tránsito hidrológico mediante el método Muskingum

Tramo	K (horas)	X
Río 1	3	0.2
Río 2	3	0.2

Nota. Adaptado del Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del MTC.

Los parámetros definidos para el método de Muskingum muestran valores homogéneos para los tramos evaluados, adoptándose un tiempo de almacenamiento K igual a 3 horas y un coeficiente de ponderación X de 0.20.

El parámetro K representa el tiempo de retardo del flujo dentro del cauce y está relacionado con la capacidad de almacenamiento temporal del sistema fluvial. Por su parte, el parámetro X expresa la influencia relativa entre el almacenamiento y el efecto de traslación del flujo a lo largo del cauce.

De acuerdo con el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del MTC, valores del parámetro X comprendidos entre 0 y 0.5 son representativos de cauces naturales, siendo valores cercanos a 0.20 indicativos de condiciones donde predomina el efecto de almacenamiento hidráulico sobre la traslación del flujo durante el tránsito de avenidas. En consecuencia, los parámetros adoptados permiten representar adecuadamente el

comportamiento del tránsito de avenidas en la cuenca de estudio, contribuyendo a mejorar la confiabilidad de las simulaciones realizadas mediante el modelo hidrológico HEC-HMS.

5.2.3. Interpretación de la Información Hidrometeorológica

5.2.3.1. Análisis de las precipitaciones máximas registradas en estaciones pluviométricas

El análisis hidrometeorológico desarrollado para la presente investigación permitió evaluar el comportamiento de las precipitaciones máximas registradas en las estaciones pluviométricas cercanas al área de estudio, constituyendo un insumo fundamental para el modelamiento hidrológico de la cuenca de la Quebrada Totora. La información recopilada fue procesada mediante técnicas de análisis estadístico y de frecuencia, con el propósito de estimar precipitaciones de diseño asociadas a distintos periodos de retorno.

Tabla 70

Precipitación máxima de 24 horas (mm) para el periodo 1990-2025

Año	Chilcayoc	Cotahuasi	Curahuasi	Paruro	Puquio
1990	S/D	S/D	S/D	S/D	25.2
1991	S/D	S/D	S/D	S/D	20.4
1992	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
1993	S/D	S/D	S/D	S/D	32.9
1994	S/D	S/D	S/D	S/D	22.6
1995	S/D	S/D	S/D	S/D	32.6
1996	S/D	29.8	S/D	S/D	20.2
1997	S/D	26.7	33.2	S/D	19.6
1998	S/D	26.2	22.9	S/D	27.6
1999	S/D	33	28.1	S/D	20.2
2000	S/D	26.6	29.2	13.1	21.2
2001	13.7	22.8	26.2	32.2	20.2
2002	31.7	27.5	34.9	36.7	17.6
2003	34.7	18	59.6	32.1	17.4
2004	28.4	25.7	23.6	32.8	35.6
2005	28.9	11	29.6	33.7	28.7
2006	35.4	13.5	29.8	43.7	28.2
2007	35.5	25.4	27.6	40.2	23.2
2008	23.3	17.4	27.1	38.9	23.6
2009	27.7	11.8	30.7	28	22.5
2010	36.5	17.7	29.6	46.9	26.2
2011	33.7	21.7	29.2	33.6	22.5
2012	37.3	24.6	29.7	38.3	32.7
2013	30.2	23.7	26.7	33.3	27.4
2014	36	9.9	26.7	39.6	21

Año	Chilcayoc	Cotahuasi	Curahuasi	Paruro	Puquio
2015	32.1	15.1	28.6	28.9	27.6
2016	19.6	19.6	35.3	30.1	35.1
2017	33.9	16.2	29.1	36.3	44.8
2018	26.6	20.7	S/D	41.1	28.8
2019	26.4	14.8	40.9	32	35.4
2020	29.4	S/D	23.3	33.7	S/D
2021	35.1	S/D	34.4	36.4	20.2
2022	29.9	S/D	40.3	66.4	31.6
2023	26.6	37.4	34.6	32	39.6
2024	29.1	16.8	32.8	34.8	21.2
2025	36.9	18.3	35.8	30.4	28.6

Nota. Los datos corresponden a registros de precipitación máxima de 24 horas del SENAMHI. “S/D” indica ausencia de información disponible para el año correspondiente.

A partir de la información presentada en la Tabla 70, se analizó el comportamiento de las precipitaciones máximas en 24 horas registradas en las estaciones de Chilcayoc, Cotahuasi, Curahuasi, Paruro y Puquio durante el periodo 1990-2025. Los resultados evidencian una marcada variabilidad interanual, característica propia de los eventos hidrometeorológicos extremos en zonas altoandinas.

En términos generales, se identificó que las precipitaciones máximas no presentan un comportamiento uniforme a lo largo del tiempo, sino fluctuaciones significativas entre años y estaciones. Esta variabilidad responde a la influencia de factores climáticos regionales y locales que condicionan la intensidad y frecuencia de las lluvias extremas en el ámbito de estudio.

La estación de Paruro registró los valores más elevados de precipitación máxima durante el periodo analizado, alcanzando un máximo de 66.4 mm en el año 2022, constituyéndose como el evento más extremo de toda la serie histórica evaluada. Este comportamiento evidencia una elevada susceptibilidad de dicha estación frente a precipitaciones intensas, situación que adquiere especial importancia en el análisis de generación de escorrentía y riesgo de inundación.

De manera similar, la estación Curahuasi presentó eventos de magnitud considerable, destacando el registro de 59.6 mm correspondiente al año 2003, además de

otros eventos relevantes en años posteriores. Estos resultados reflejan una importante influencia de esta estación en el comportamiento hidrológico de la cuenca y en la estimación de precipitaciones de diseño.

Por otro lado, la estación Puquio presentó valores relativamente menores en comparación con las demás estaciones; sin embargo, se identificaron eventos extremos puntuales, como el registrado en 2017 con 44.8 mm. Esta situación evidencia que incluso estaciones con promedios moderados pueden experimentar precipitaciones intensas capaces de generar respuestas hidrológicas significativas.

Asimismo, se observó la presencia de registros faltantes (S/D) en determinados años y estaciones, principalmente durante los primeros periodos de la serie histórica. No obstante, la información disponible permitió contar con una base de datos suficiente para el desarrollo del análisis estadístico y la estimación de precipitaciones máximas asociadas a diferentes periodos de retorno.

5.2.3.2. Interpretación del análisis de frecuencia de precipitaciones máximas

Como parte del análisis de frecuencia hidrológica, se estimaron las precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno, cuyos resultados se presentan en la Tabla 71.

Tabla 71

Precipitaciones máximas estimadas para diferentes periodos de retorno

Estación	5 años	10 años	50 años	100 años	140 años	500 años
Chilcayoc	36.35	38.47	42.20	43.52	44.12	46.18
Cotahuasi	27.83	31.36	37.98	40.46	41.60	45.69
Curahuasi	36.82	41.68	54.43	60.76	64.07	77.94
Paruro	42.30	47.74	62.85	70.80	75.02	95.18
Puquio	33.48	37.34	44.98	47.96	49.35	54.43

Nota. Elaborado a partir del análisis de frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas para distintos períodos de retorno. Valores expresados en milímetros (mm).

A partir de los resultados obtenidos, se evidenció que las precipitaciones máximas incrementan progresivamente conforme aumenta el periodo de retorno, comportamiento coherente con los principios del análisis de frecuencia hidrológica, donde eventos menos frecuentes se encuentran asociados a precipitaciones de mayor magnitud.

La estación Paruro presentó los valores más elevados para periodos de retorno altos, alcanzando una precipitación estimada de 95.18 mm para un periodo de retorno de 500 años. Este resultado indica una alta probabilidad de ocurrencia de eventos extremos severos en dicha zona, lo cual representa un factor crítico para el análisis de inundaciones y el diseño de medidas de prevención.

Por su parte, la estación Curahuasi también mostró precipitaciones elevadas para escenarios extremos, alcanzando 77.94 mm para un periodo de retorno de 500 años. Este comportamiento evidencia que ambas estaciones presentan condiciones hidrometeorológicas altamente relevantes dentro del análisis regional de precipitaciones máximas.

La estación Chilcayoc registró valores intermedios, con precipitaciones máximas estimadas de 46.18 mm para un periodo de retorno de 500 años, manteniendo igualmente una tendencia creciente conforme se incrementa la recurrencia del evento.

En contraste, la estación Puquio presentó los valores más bajos en todos los periodos de retorno evaluados, alcanzando un máximo de 54.43 mm para 500 años. Este resultado sugiere una menor intensidad relativa de precipitaciones extremas respecto a las demás estaciones analizadas.

En conjunto, los resultados evidencian una importante variabilidad espacial de las precipitaciones extremas dentro del ámbito de estudio, aspecto que justifica la necesidad de realizar una distribución espacial de la precipitación en las diferentes subcuencas consideradas en el modelamiento hidrológico.

5.2.3.3. Evaluación de la distribución espacial de precipitación en las subcuencas

Con base en el análisis espacial de precipitación, se estimaron las precipitaciones máximas medias de 24 horas para cada subcuenca de la cuenca de la Quebrada Totora, cuyos resultados se presentan en la Tabla 72.

Tabla 72

Precipitación máxima media en 24 horas para las subcuencas de la cuenca de la Quebrada Totora según períodos de retorno

Subcuenca	TR 5 años	TR 10 años	TR 50 años	TR 100 años	TR 140 años	TR 500 años
SC-1	37.72	41.86	53.69	59.49	62.52	75.77
SC-2	36.89	40.77	51.73	57.00	59.72	71.57
SC-3	37.62	41.69	53.36	59.07	62.03	75.10
SC-4	38.13	42.32	54.45	60.43	63.56	77.45
SC-5	37.46	41.45	52.92	58.49	61.39	74.21
SC-6	36.59	40.36	51.09	56.20	58.84	70.36
SC-7	36.15	39.83	50.22	55.12	57.64	68.58

Nota. Elaborado a partir del análisis de frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno. Valores expresados en milímetros (mm).

Los resultados muestran una tendencia creciente de las precipitaciones máximas conforme aumenta el periodo de retorno en todas las subcuencas evaluadas. Los valores mínimos corresponden al periodo de retorno de 5 años, con registros comprendidos aproximadamente entre 36 y 38 mm, mientras que los valores máximos se presentan para el periodo de retorno de 500 años, superando los 68 mm en todas las unidades hidrológicas analizadas.

La Subcuenca 4 presentó los mayores valores de precipitación para los diferentes escenarios de retorno, alcanzando 77.45 mm para un periodo de 500 años. Este comportamiento evidencia una mayor exposición a eventos extremos de precipitación, lo que podría traducirse en una respuesta hidrológica más intensa frente a lluvias severas.

De manera similar, las subcuencas SC-1 y SC-3 registraron valores elevados de precipitación máxima para periodos de retorno altos, superando los 75 mm para eventos de 500 años. Estos resultados sugieren una importante capacidad de generación de escorrentía en escenarios extremos.

Por otro lado, las subcuencas SC-6 y SC-7 presentaron valores relativamente menores respecto a las demás unidades; sin embargo, las diferencias observadas no son considerablemente amplias, lo que permite inferir que la distribución espacial de la precipitación en la cuenca presenta un comportamiento relativamente homogéneo.

En términos hidrológicos, el incremento progresivo de las precipitaciones máximas asociado al aumento del periodo de retorno implica una mayor probabilidad de generación de caudales extremos, condición que influye directamente en la ocurrencia de inundaciones y desbordamientos en la quebrada Totora.

En consecuencia, la información hidrometeorológica obtenida constituyó un insumo fundamental para la construcción de tormentas de diseño y para el desarrollo del modelamiento hidrológico mediante el software HEC-HMS, permitiendo simular escenarios representativos de respuesta hidrológica ante eventos extremos de precipitación.

5.2.4. Interpretación del Modelamiento Hidrológico con HEC-HMS

Para evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca de la Quebrada Totora frente a eventos de precipitación extrema, se desarrollaron simulaciones hidrológicas mediante el software HEC-HMS para diferentes períodos de retorno. Los resultados obtenidos permitieron generar hidrogramas de salida en el punto de control de la cuenca, representando la variación temporal del caudal y la magnitud de los caudales máximos asociados a cada escenario analizado.

5.2.4.1. Comportamiento general de los hidrogramas simulados

En términos generales, los hidrogramas obtenidos muestran un incremento progresivo del caudal máximo conforme aumenta el período de retorno, evidenciando una relación directa entre la intensidad de las precipitaciones y la respuesta hidrológica de la

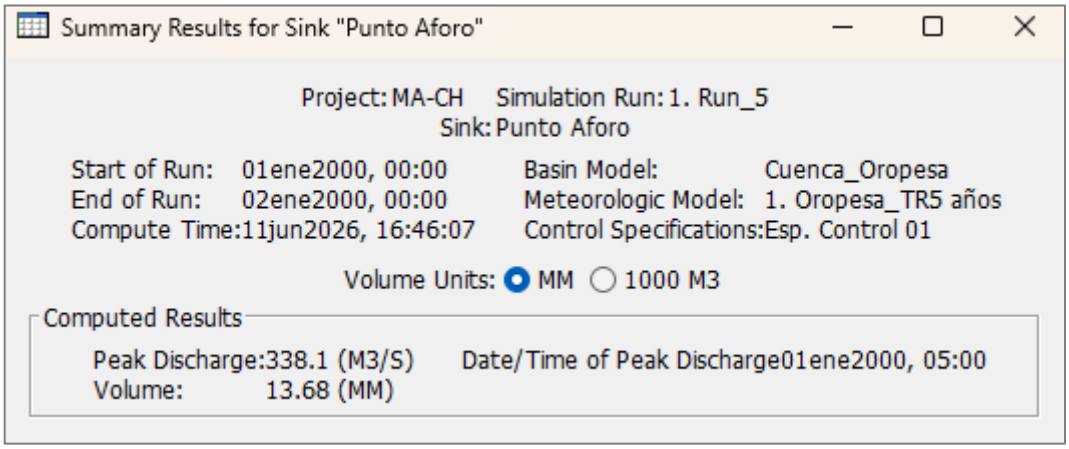
cuenca. Este comportamiento confirma que los eventos de baja frecuencia presentan una mayor capacidad de generar escorrentía superficial y, por consiguiente, mayores riesgos de desbordamiento e inundación.

Asimismo, los hidrogramas presentan una forma relativamente pronunciada, caracterizada por un rápido ascenso del caudal hasta alcanzar el pico máximo y una posterior disminución gradual. Esta configuración evidencia que la cuenca posee una respuesta hidrológica rápida frente a eventos intensos de precipitación, condición asociada principalmente a la presencia de pendientes moderadas a elevadas, una red de drenaje bien desarrollada y una capacidad de infiltración limitada en determinados sectores de la cuenca.

5.2.4.2. Análisis del escenario para período de retorno de 5 años

Figura 87

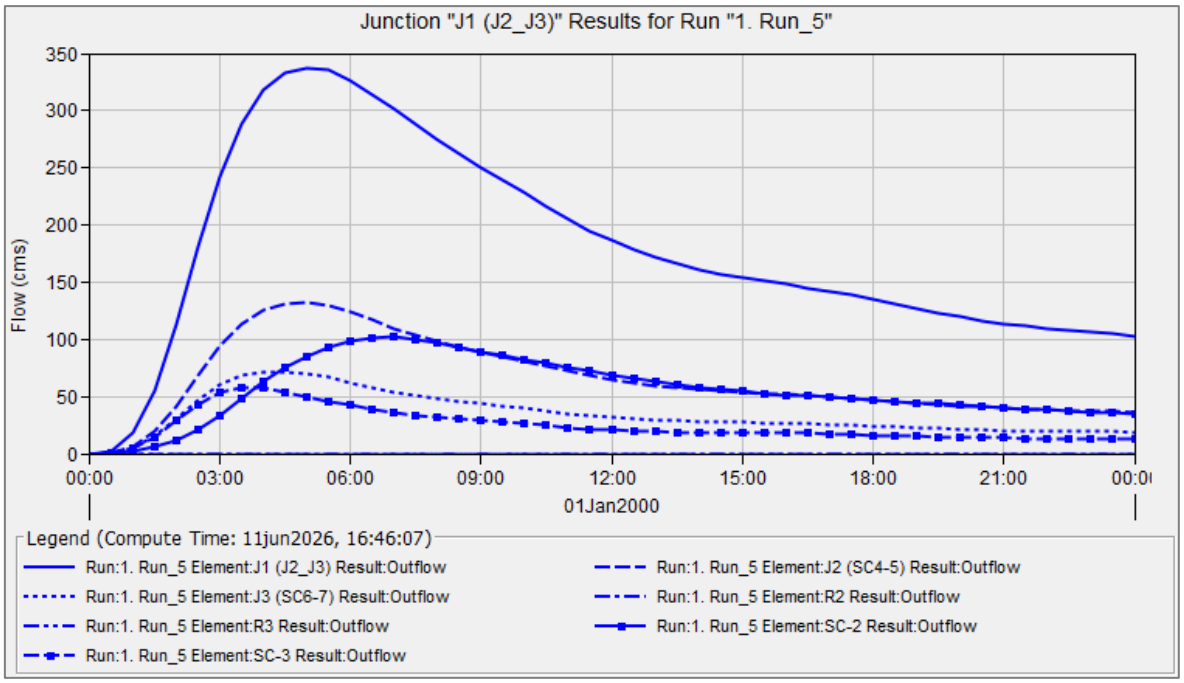
Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 5 años



Nota. El gráfico muestra el caudal máximo generado por el evento de diseño para un periodo de retorno de 5 años.

Figura 88

Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 5 años



Nota. El hidrograma representa la variación temporal del caudal durante el evento simulado para un periodo de retorno de 5 años.

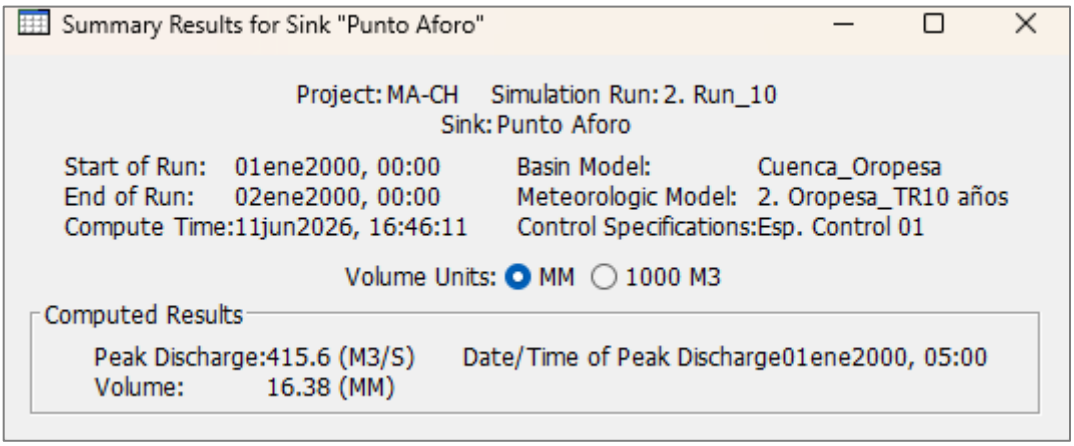
En el escenario correspondiente al período de retorno de 5 años, se obtuvo un caudal máximo de 138.10 m³/s, alcanzando el pico aproximadamente a las 05:00 horas. Este resultado representa un evento relativamente frecuente; sin embargo, el caudal generado evidencia una capacidad importante de concentración de escorrentía dentro de la cuenca.

Desde el punto de vista hidrológico, este comportamiento indica que incluso eventos de recurrencia moderada pueden generar incrementos significativos del flujo superficial, especialmente en sectores con pendientes pronunciadas y limitada infiltración.

5.2.4.3. Análisis del escenario para período de retorno de 10 años

Figura 89

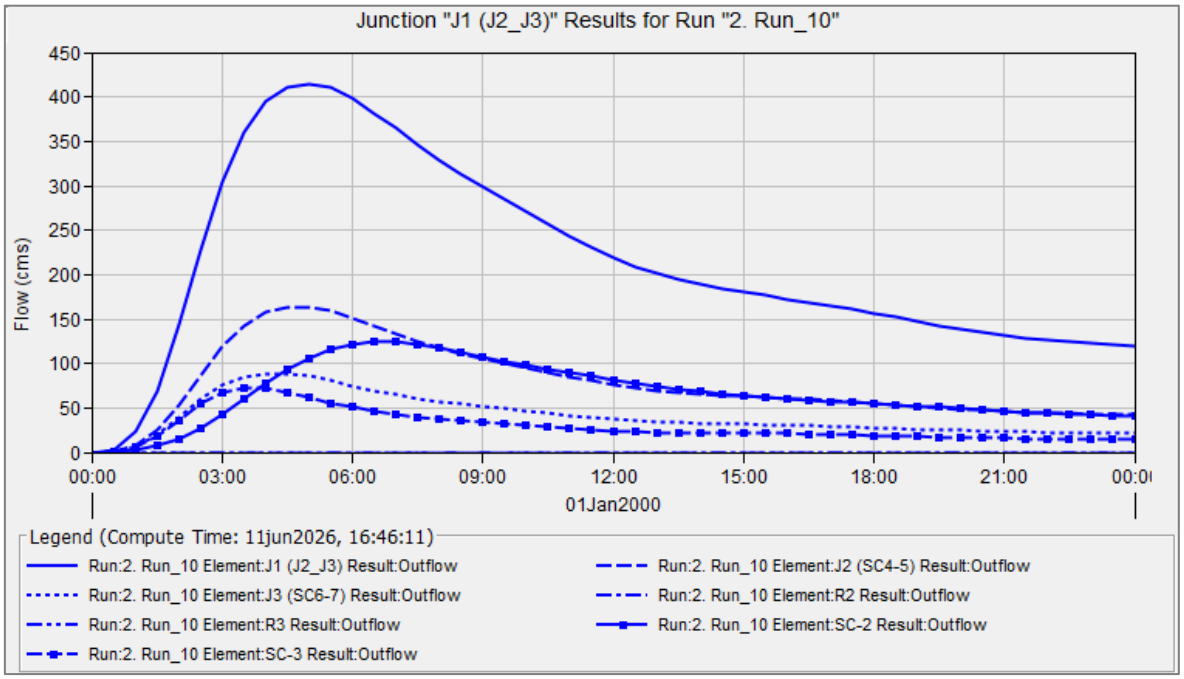
Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 10 años



Nota. El gráfico muestra el caudal máximo generado por el evento de diseño para un periodo de retorno de 10 años.

Figura 90

Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 10 años



Nota. El hidrograma representa la variación temporal del caudal durante el evento simulado para un periodo de retorno de 10 años.

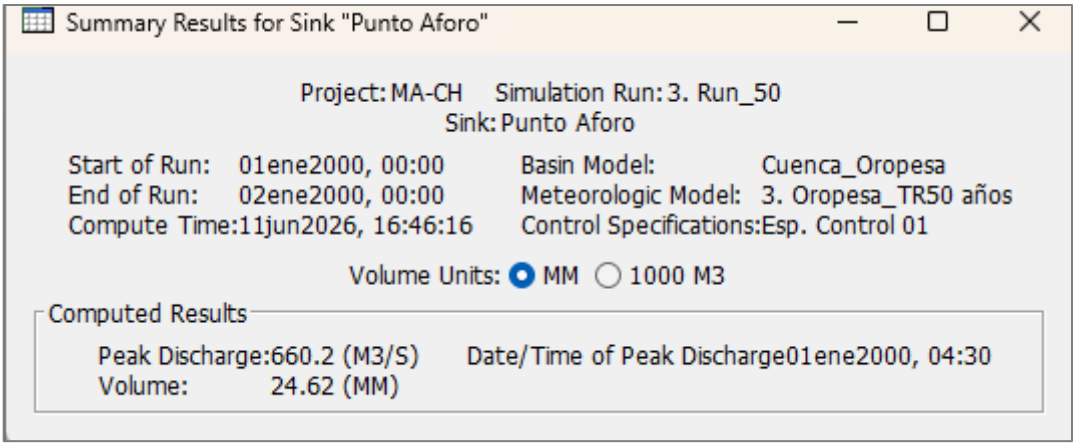
Para el período de retorno de 10 años, el caudal máximo se incrementó hasta 415.60 m³/s, manteniéndose un tiempo al pico cercano a las 05:00 horas. Este comportamiento muestra una mayor generación de escorrentía superficial producto del incremento de la precipitación de diseño, aunque la dinámica temporal del hidrograma conserva características similares al escenario anterior.

El incremento del caudal máximo evidencia una relación proporcional entre la magnitud de la precipitación y la respuesta hidrológica de la cuenca, aspecto fundamental para la evaluación del riesgo de inundación.

5.2.4.4. Análisis de los escenarios para períodos de retorno de 50 y 100 años

Figura 91

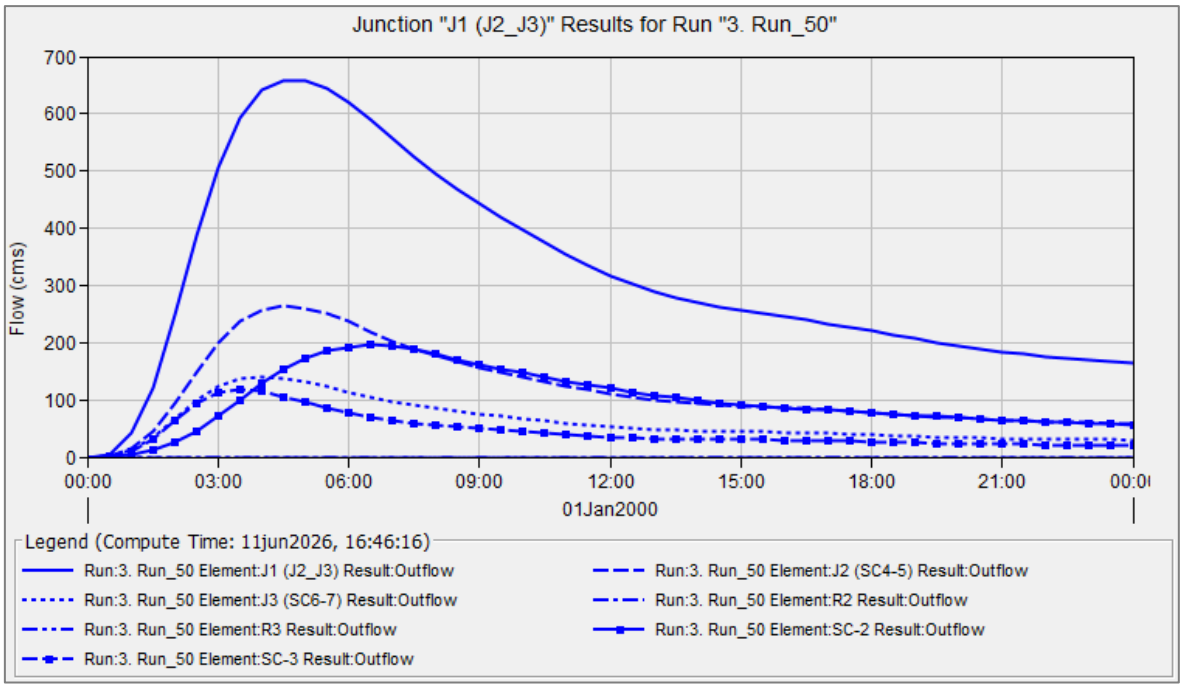
Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 50 años



Nota. El gráfico muestra el caudal máximo generado por el evento de diseño para un periodo de retorno de 50 años.

Figura 92

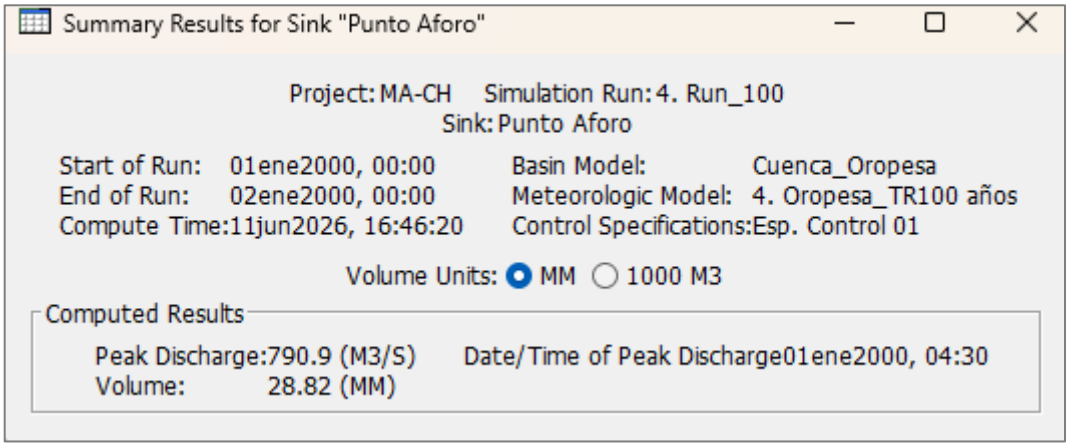
Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 50 años



Nota. El hidrograma representa la variación temporal del caudal durante el evento simulado para un periodo de retorno de 50 años.

Figura 93

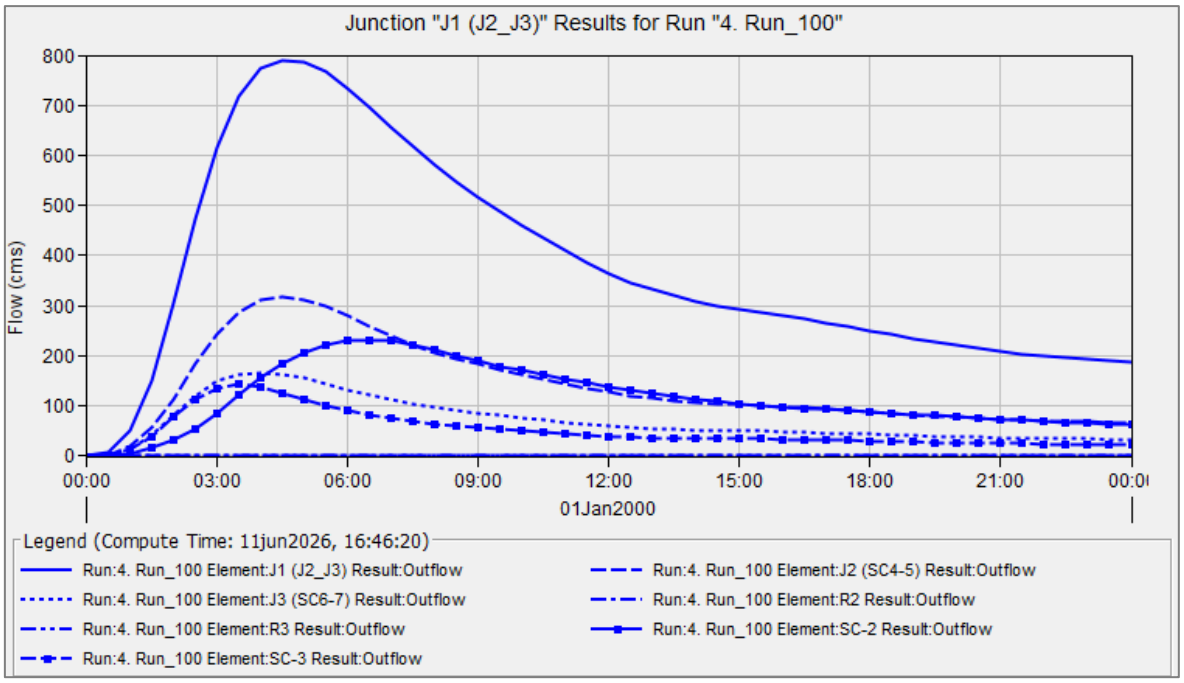
Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 100 años



Nota. El gráfico muestra el caudal máximo generado por el evento de diseño para un periodo de retorno de 100 años.

Figura 94

Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 100 años



Nota. El hidrograma representa la variación temporal del caudal durante el evento simulado para un periodo de retorno de 100 años.

En los escenarios correspondientes a períodos de retorno de 50 y 100 años, los caudales máximos alcanzaron valores de 660.20 m³/s y 790.90 m³/s, respectivamente. En estos casos, el tiempo al pico se redujo aproximadamente a las 04:30 horas, evidenciando una respuesta hidrológica más rápida de la cuenca frente a precipitaciones extremas.

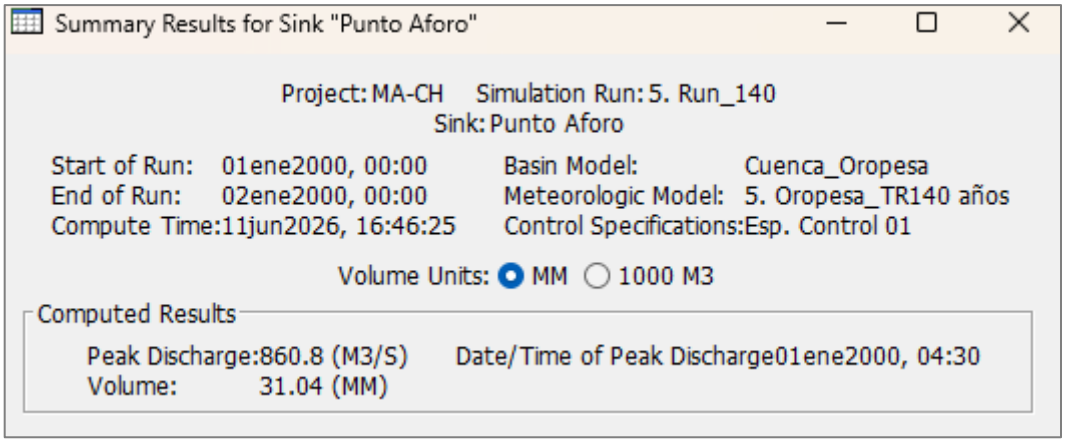
Esta disminución del tiempo de concentración implica que el flujo superficial se concentra en un menor intervalo temporal, incrementando significativamente el potencial de inundación y la probabilidad de desbordamiento del cauce principal.

Asimismo, los hidrogramas muestran pendientes ascendentes más pronunciadas y picos de mayor magnitud, reflejando condiciones de mayor peligrosidad hidrológica para las zonas ubicadas aguas abajo.

5.2.4.5. Análisis de los escenarios extremos para períodos de retorno de 140 y 500 años

Figura 95

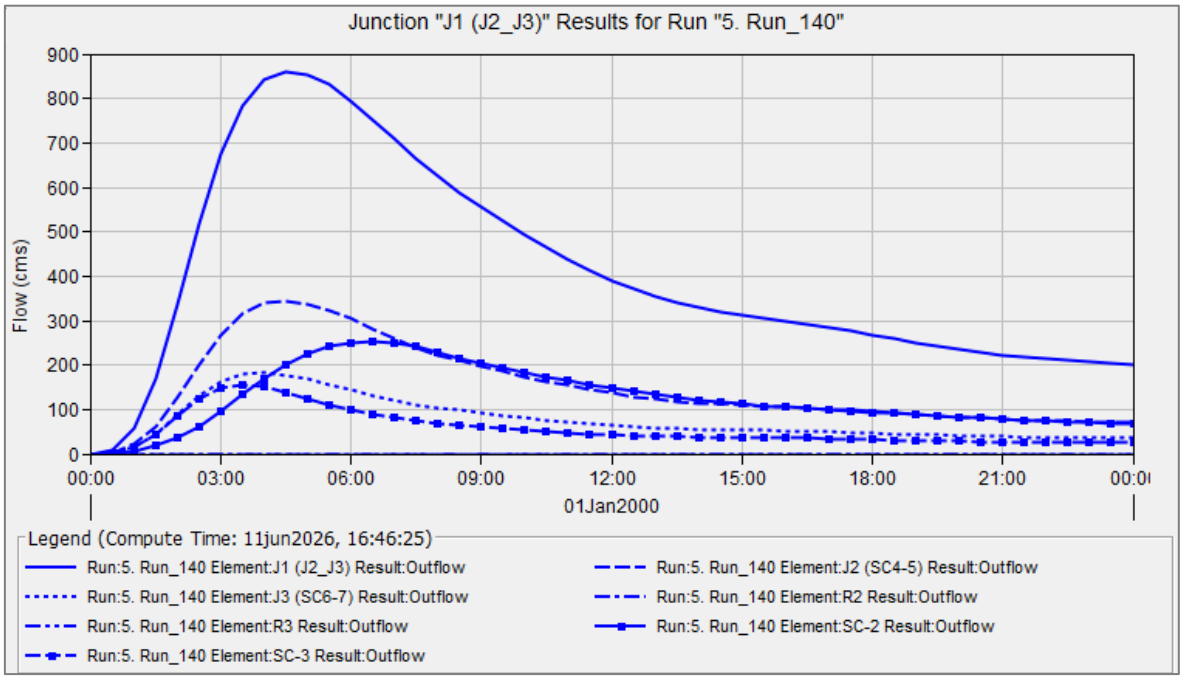
Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 140 años



Nota. El gráfico muestra el caudal máximo generado por el evento de diseño para un periodo de retorno de 140 años.

Figura 96

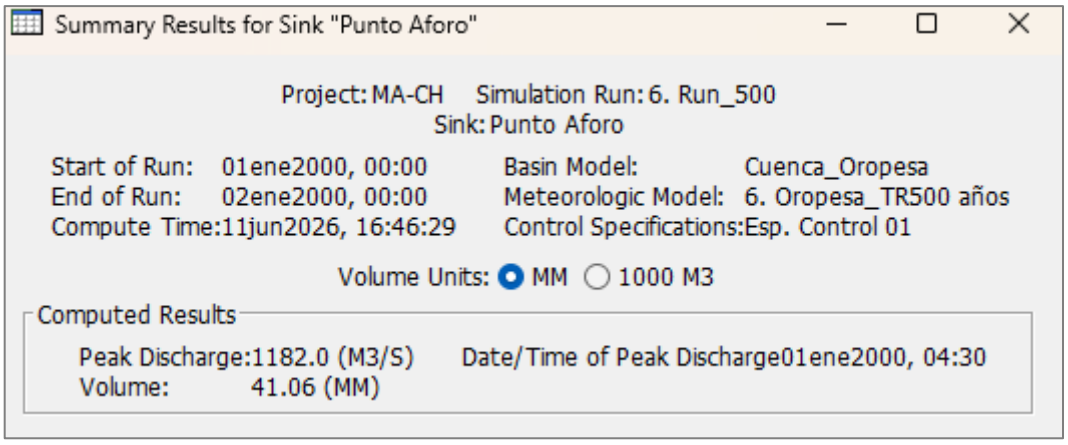
Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 140 años



Nota. El hidrograma representa la variación temporal del caudal durante el evento simulado para un periodo de retorno de 140 años.

Figura 97

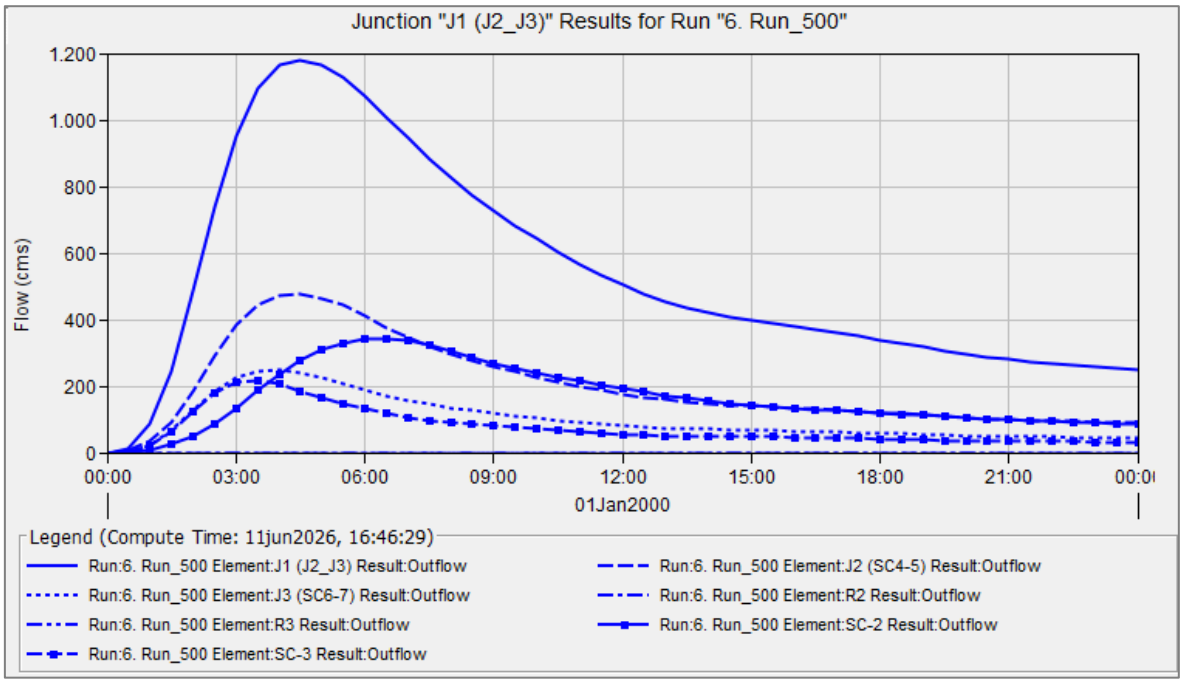
Caudal máximo en la cuenca para un período de retorno de 500 años



Nota. El gráfico muestra el caudal máximo generado por el evento de diseño para un periodo de retorno de 500 años.

Figura 98

Hidrograma de la cuenca para un período de retorno de 500 años



Nota. El hidrograma representa la variación temporal del caudal durante el evento simulado para un periodo de retorno de 500 años.

Para los escenarios de 140 y 500 años de período de retorno, los caudales máximos alcanzaron 860.80 m³/s y 1182.00 m³/s, respectivamente, constituyendo los eventos más críticos simulados en la investigación.

Los hidrogramas asociados a estos escenarios presentan picos elevados y tiempos de respuesta reducidos, indicando condiciones de alta peligrosidad hidrológica y una elevada probabilidad de desbordamiento de cauce en sectores vulnerables de la quebrada Totora.

Desde el punto de vista hidrológico, este comportamiento evidencia que la cuenca presenta una limitada capacidad de regulación natural frente a eventos extremos, predominando los procesos de escorrentía superficial sobre la infiltración. Esta condición puede estar asociada a factores como la pendiente del terreno, la cobertura vegetal existente y las características físicas del suelo, las cuales favorecen la rápida concentración del flujo.

5.2.4.6. Interpretación integral de los resultados hidrológicos

En conjunto, los resultados del modelamiento hidrológico muestran que la cuenca de la Quebrada Totora presenta una alta sensibilidad frente a precipitaciones extremas, generando incrementos significativos de caudal y reduciendo el tiempo de respuesta conforme aumenta el período de retorno.

Estas condiciones representan un escenario de riesgo importante para las áreas ubicadas aguas abajo, especialmente en zonas próximas al cauce principal del Río Totora - Oropesa, donde la ocurrencia de desbordamientos podría generar afectaciones sobre la población, infraestructura y actividades económicas.

Por tanto, los resultados obtenidos constituyen un insumo técnico fundamental para el modelamiento hidráulico posterior y para la formulación del SAT-COM, ya que permiten identificar escenarios críticos de inundación y establecer parámetros de monitoreo y alerta orientados a la gestión del riesgo.

5.2.5. Interpretación del Modelamiento Hidráulico con HEC-RAS

El modelamiento hidráulico desarrollado mediante el software HEC-RAS, versión 6.6, permitió evaluar el comportamiento del flujo en el cauce principal de la quebrada Totora frente a distintos escenarios de caudal asociados a diferentes períodos de retorno. Los resultados obtenidos evidencian que el sistema hidráulico de la cuenca presenta una elevada susceptibilidad a procesos de inundación, debido a que la capacidad de conducción del cauce resulta insuficiente para transportar los caudales generados durante eventos de precipitación intensa.

5.2.5.1. Evaluación general del comportamiento hidráulico

A partir de las simulaciones realizadas, se identificó que el cauce principal presenta desbordamientos en todos los escenarios analizados, incluso en eventos de baja recurrencia. Esta condición demuestra que la quebrada Totora posee una limitada capacidad hidráulica y una alta vulnerabilidad frente a eventos hidrológicos extremos.

Los resultados muestran que todos los escenarios simulados generan condiciones de desbordamiento, lo que evidencia que la capacidad hidráulica del cauce es insuficiente incluso para eventos relativamente frecuentes. Este comportamiento confirma la elevada susceptibilidad de la quebrada Totora frente a inundaciones y procesos de desborde.

Tabla 73

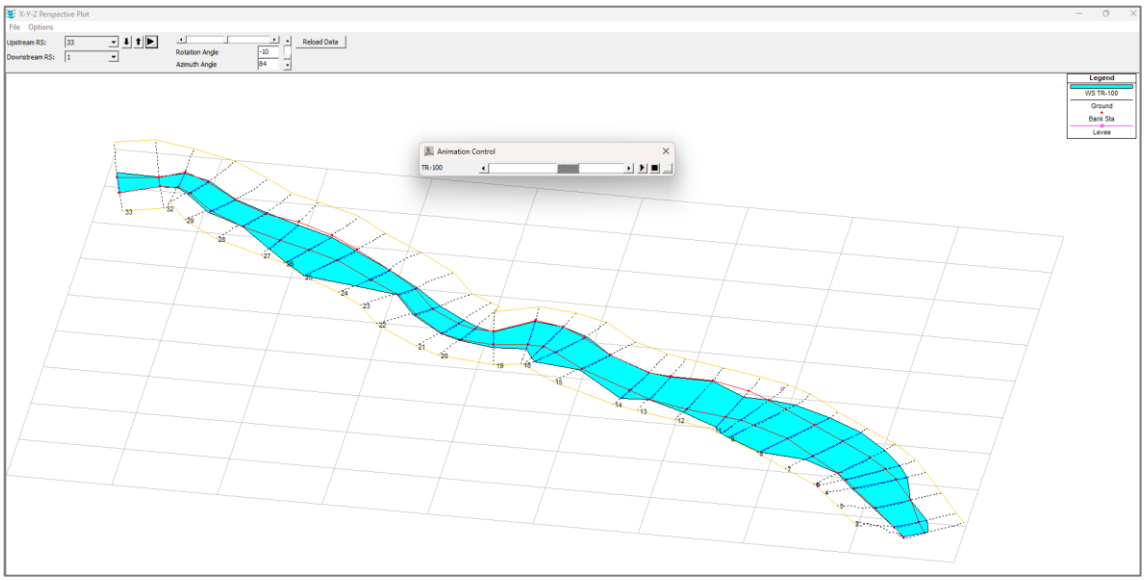
Resultados del modelamiento hidráulico para diferentes períodos de retorno

Período de retorno	Caudal máximo (m^3/s)	Resultado hidráulico
TR = 5 años	338.10	Se presenta inundación
TR = 10 años	415.60	Se presenta inundación
TR = 50 años	660.20	Se presenta inundación
TR = 100 años	790.90	Se presenta inundación
TR = 140 años	860.80	Se presenta inundación
TR = 500 años	1182.00	Se presenta inundación

Nota. Elaborado a partir de los resultados de simulación hidráulica obtenidos mediante el software HEC-RAS v.6.6.

Figura 99

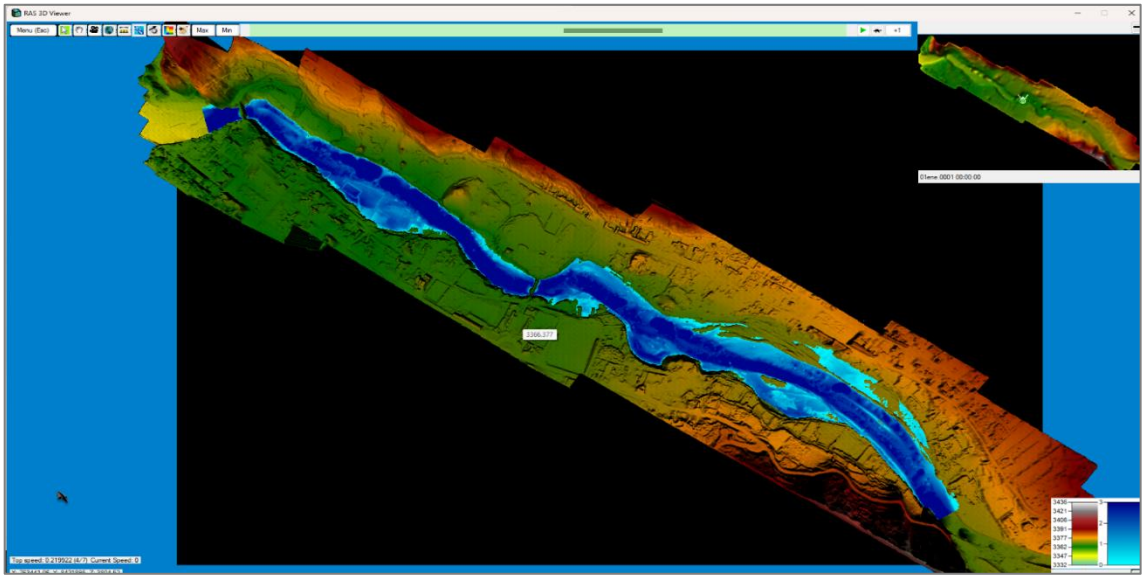
Modelamiento hidráulico de la cuenca de la Quebrada Totora para distintos períodos de retorno



Nota. Elaborado a partir de los resultados de simulación hidráulica obtenidos mediante el software HEC-RAS v.6.6.

Figura 100

Modelamiento hidráulico de la cuenca de la Quebrada Totora mediante el visor RAS 3D Viewer de HEC-RAS



Nota. Elaborado a partir de la visualización tridimensional de los resultados hidráulicos obtenidos en el software HEC-RAS v.6.6.

5.2.5.2. Interpretación de escenarios para períodos de retorno bajos (5 y 10 años)

En los escenarios correspondientes a períodos de retorno de 5 y 10 años, con caudales máximos de 338.10 m³/s y 415.60 m³/s respectivamente, ya se presentan condiciones de inundación en distintos sectores del tramo modelado.

Este comportamiento evidencia que, aun frente a eventos considerados relativamente frecuentes, el cauce no logra contener adecuadamente el flujo generado, produciéndose desbordamientos hacia áreas adyacentes.

Desde el punto de vista hidráulico, esta situación puede estar asociada a diversos factores geomorfológicos y físicos, entre los que destacan la reducción de la sección hidráulica, pendientes irregulares, acumulación de sedimentos, presencia de material de arrastre y limitaciones naturales en la capacidad de conducción del cauce.

Asimismo, la configuración topográfica de la quebrada favorece la rápida concentración de escorrentía, incrementando la energía del flujo y el potencial de desborde.

5.2.5.3. Interpretación de escenarios intermedios (50 y 100 años)

Para los escenarios de mayor magnitud, correspondientes a períodos de retorno de 50 y 100 años, los caudales máximos alcanzaron 660.20 m³/s y 790.90 m³/s, respectivamente. En estos casos, las áreas inundables se incrementan considerablemente, generando una mayor afectación sobre las zonas próximas al cauce principal. El comportamiento hidráulico observado indica un aumento progresivo tanto de la profundidad como de la extensión lateral del flujo, configurando escenarios de riesgo significativamente más críticos.

Desde el análisis hidráulico, el incremento del caudal genera una sobrecarga progresiva de la capacidad del cauce, favoreciendo procesos de expansión lateral de las inundaciones y aumentando la peligrosidad en sectores vulnerables ubicados aguas abajo.

5.2.5.4. Interpretación de escenarios extremos (140 y 500 años)

De manera similar, en los escenarios extremos de 140 y 500 años de período de retorno, los caudales simulados alcanzaron valores de 680.80 m³/s y 1182.00 m³/s, superando ampliamente la capacidad hidráulica del sistema fluvial.

Bajo estas condiciones, el modelamiento evidencia desbordamientos generalizados y una expansión importante de las zonas inundables, lo que representa un alto nivel de peligrosidad para la población, la infraestructura y las actividades económicas ubicadas en el área de influencia de la quebrada Totora.

Los resultados obtenidos permiten interpretar que la cuenca presenta una respuesta hidráulica crítica frente a eventos de avenida, debido a que el incremento de caudales produce rápidamente condiciones de desborde. Esta situación guarda relación directa con el comportamiento hidrológico previamente identificado en el modelamiento con HEC-HMS, donde se evidenció una rápida concentración de escorrentía y elevados caudales pico ante precipitaciones extremas.

5.2.5.5. Implicancias para la gestión del riesgo de inundación

En consecuencia, el análisis hidráulico confirma que la zona de estudio presenta una elevada exposición al riesgo de inundación, especialmente en sectores cercanos al cauce principal y áreas de menor capacidad de drenaje natural. Esta condición hace necesaria la implementación de medidas orientadas a la reducción del riesgo, tanto desde el enfoque estructural como no estructural.

Entre las medidas estructurales, podrían considerarse intervenciones como el encauzamiento del flujo, construcción de defensas ribereñas, limpieza y descolmatación periódica del cauce, así como la ampliación de secciones hidráulicas en puntos críticos.

Por otro lado, las medidas no estructurales comprenden el fortalecimiento del ordenamiento territorial, la capacitación comunitaria, la elaboración de planes de evacuación y, principalmente, la implementación de un SAT-COM.

5.2.5.6. Interpretación integral del modelamiento hidráulico

En conjunto, los resultados del modelamiento hidráulico no solo permiten comprender el comportamiento del flujo en condiciones extremas, sino que también constituyen un soporte técnico fundamental para la gestión del riesgo de desastres en la quebrada Totora.

Asimismo, evidencian la necesidad urgente de implementar mecanismos de monitoreo, alerta y respuesta temprana que permitan reducir los impactos potenciales de futuras inundaciones sobre la población y sus medios de vida.

5.2.6. Evaluación de la Propuesta del SAT-COM

La evaluación de la propuesta del SAT-COM para la los sectores de totora y oropesa se desarrolló considerando los resultados obtenidos del modelamiento hidrológico e hidráulico, el análisis de riesgo realizado en la investigación y los lineamientos técnicos establecidos por el INDECI. Esta evaluación permitió analizar la coherencia técnica, operativa, institucional y comunitaria de la propuesta frente a escenarios de inundación en los sectores de totora y oropesa.

Los resultados obtenidos evidencian que la propuesta del SAT-COM constituye una medida técnicamente viable para fortalecer la gestión del riesgo de inundaciones, debido a que integra mecanismos de monitoreo, alerta y respuesta orientados a reducir la vulnerabilidad de la población expuesta y mejorar la capacidad de actuación frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

5.2.6.1. Evaluación técnica de la propuesta

Desde el punto de vista técnico, la propuesta presenta coherencia con las características hidrológicas y territoriales identificadas en el área de estudio. El modelamiento hidrológico e hidráulico desarrollado mediante HEC-HMS y HEC-RAS permitió determinar caudales máximos, identificar zonas potencialmente inundables y reconocer sectores críticos con niveles de peligro alto y muy alto.

Asimismo, los resultados evidenciaron que la quebrada Totora presenta una respuesta relativamente rápida frente a precipitaciones intensas, debido principalmente a las características hidrológicas de la cuenca, tales como elevados valores del CN, bajos niveles de abstracción inicial y tiempos de concentración reducidos en determinadas subcuencas. Estas condiciones favorecen la generación acelerada de escorrentía superficial y el incremento rápido de caudales durante eventos de precipitación intensa.

La información obtenida permitió establecer umbrales hidrometeorológicos y definir niveles operativos de alerta acordes con el comportamiento hidráulico de la quebrada Totora. Asimismo, la integración de herramientas técnicas como HEC-HMS, HEC-RAS y los SIG fortaleció la confiabilidad técnica de la propuesta planteada.

5.2.6.2. Evaluación del riesgo y relación funcional del SAT-COM

El análisis de vulnerabilidad realizado en el área de estudio permitió identificar condiciones que incrementan significativamente el nivel de riesgo frente a inundaciones. Entre los principales factores destacan la presencia predominante de viviendas construidas con adobe, la proximidad de la población al cauce principal y la exposición de infraestructura educativa, equipamientos comunitarios y servicios básicos ubicados dentro de zonas potencialmente inundables.

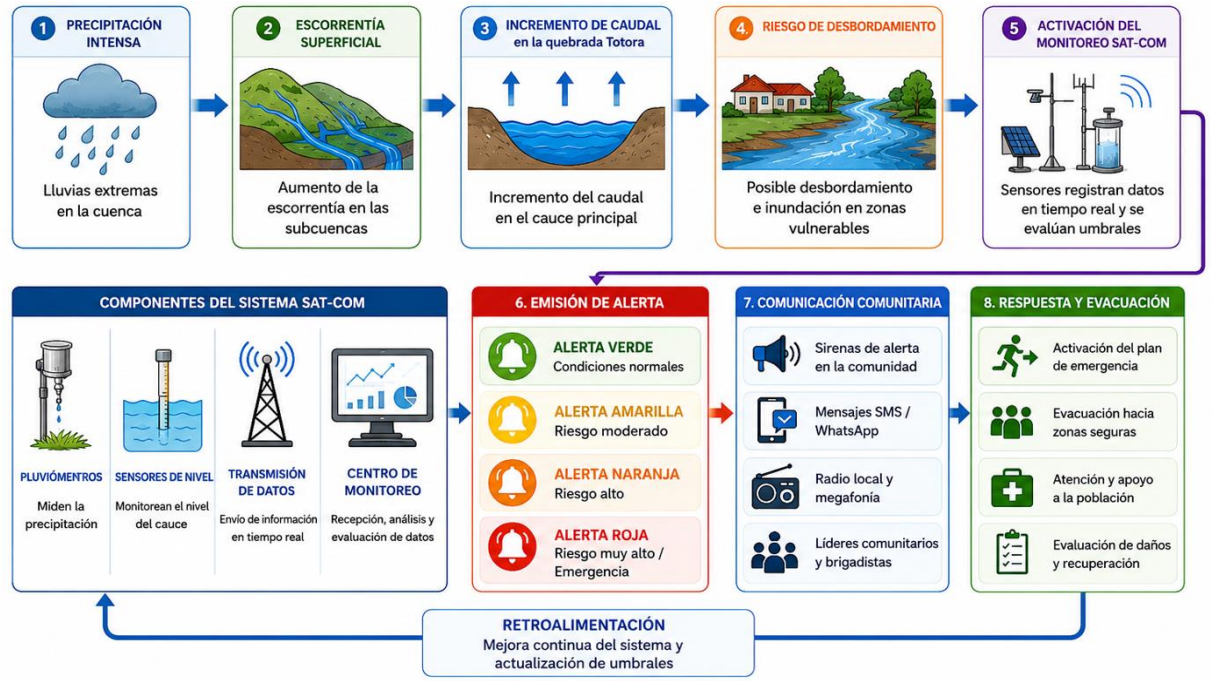
La integración de las condiciones de peligro y vulnerabilidad permitió identificar escenarios de riesgo alto y muy alto, justificando técnicamente la implementación del SAT-COM como una medida no estructural orientada a fortalecer la preparación y la respuesta frente a posibles eventos de inundación.

En este contexto, el funcionamiento del SAT-COM propuesto mantiene relación directa con la dinámica hidrológica de la quebrada Totora, debido a que el incremento de la precipitación genera mayor escorrentía superficial y aumentos progresivos del caudal, condiciones que pueden derivar en procesos de desbordamiento e inundación.

La Figura 101 presenta la relación funcional entre el comportamiento hidrológico de la cuenca y el proceso de activación del SAT-COM propuesto.

Figura 101

Relación entre el comportamiento hidrológico de la cuenca y la activación del SAT-COM propuesto.



Nota. La figura integra los resultados del modelamiento hidrológico e hidráulico mediante HEC-HMS y HEC-RAS para la activación del SAT-COM.

La relación funcional presentada evidencia que la activación del SAT-COM depende directamente de las condiciones hidrológicas de la cuenca y de la variación de los caudales generados durante eventos de precipitación intensa. Asimismo, demuestra que el sistema propuesto integra procesos de monitoreo, comunicación y respuesta comunitaria orientados a reducir el impacto de posibles inundaciones.

5.2.6.3. Evaluación del monitoreo hidrometeorológico y niveles de alerta

El componente de monitoreo y seguimiento presenta una estructura funcional adecuada para las condiciones territoriales de la quebrada Totora, debido a que combina herramientas de monitoreo institucional con mecanismos de vigilancia comunitaria.

La utilización de información proveniente del SENAMHI, del sistema SONICS y del modelo hidrológico ARNOVIC+RAPID contribuye a fortalecer el seguimiento de las

condiciones hidrometeorológicas y mejorar la capacidad de anticipación frente a posibles eventos extremos.

Asimismo, la propuesta de implementación del COEL, junto con la instalación de estaciones hidrometeorológicas, limnímetros y pluviómetros, favorecerá el monitoreo continuo de las condiciones hidrológicas del área de estudio. De igual manera, la participación de vigías comunales fortalece la vigilancia local y facilita la transmisión rápida de información hacia las autoridades y la población.

Con base en los resultados obtenidos del modelamiento hidrológico e hidráulico, se establecieron criterios técnicos para la definición de niveles operativos de alerta dentro del SAT-COM.

Estos criterios se construyeron a partir de la integración de dos enfoques complementarios:

- Umbrales hidrometeorológicos: basados en valores de precipitación acumulada (mm) asociados al incremento progresivo de la respuesta hidrológica de la cuenca, presentados en la Tabla 60.
- Escenarios hidráulicos simulados (HEC-HMS y HEC-RAS): basados en caudales máximos (m^3/s) obtenidos para diferentes períodos de retorno, los cuales representan la magnitud del evento de inundación en el cauce.

Esta articulación permite vincular la ocurrencia de precipitaciones intensas con la generación de escorrentía y su posterior transformación en caudales críticos, facilitando la asignación de niveles operativos de alerta en función del impacto hidráulico esperado en el área de estudio.

La relación entre escenarios hidrológicos y niveles de alerta se estableció considerando los caudales máximos obtenidos para diferentes períodos de retorno, las condiciones de inundación identificadas en el análisis hidráulico y los niveles operativos definidos en la Guía Técnica para la Implementación del SAT-COM del INDECI, conforme a lo establecido en la Tabla 61.

La clasificación de los niveles operativos de alerta se realizó a partir de los resultados del modelamiento hidrológico e hidráulico desarrollado mediante HEC-HMS y HEC-RAS, articulándolos con los criterios operativos establecidos por el SAT-COM del INDECI. Esta clasificación responde a la progresiva superación de la capacidad hidráulica del cauce y a la magnitud del impacto potencial estimado para cada escenario de inundación en el área de estudio.

Tabla 74

Relación entre escenarios hidráulicos y niveles operativos de alerta del SAT-COM

Período de retorno	Caudal máximo (m^3/s)	Condición hidráulica	Nivel operativo de alerta
TR = 5 años	338.10	Inicio de inundación	Aviso (Amarillo)
TR = 10 años	415.60	Inundación moderada	Aviso (Amarillo)
TR = 50 años	660.20	Inundación severa	Alerta (Naranja)
TR = 100 años	790.90	Desborde generalizado	Alarma (Rojo)
TR = 140 años	860.80	Alto riesgo de inundación	Alarma (Rojo)
TR = 500 años	1182.00	Evento extremo	Emergencia

Nota. Los niveles operativos fueron definidos a partir de los resultados del modelamiento hidrológico e hidráulico mediante HEC-HMS y HEC-RAS, considerando los criterios del SAT-COM establecidos por INDECI.

Los resultados muestran una relación directa entre la magnitud de los caudales simulados y los niveles de alerta establecidos para el funcionamiento del sistema. Conforme aumenta el período de retorno y la intensidad del evento hidrológico, las condiciones hidráulicas se vuelven más críticas y requieren mecanismos de respuesta más estrictos y oportunos.

En los escenarios asociados a períodos de retorno menores, los niveles de alerta permiten activar acciones preventivas orientadas al monitoreo y preparación comunitaria. Por otro lado, los escenarios de mayor magnitud requieren procedimientos inmediatos de evacuación y protección de la población vulnerable.

5.2.6.4. Evaluación del sistema de difusión y capacidad de respuesta comunitaria

La propuesta de difusión y comunicación de la alerta presenta pertinencia para las características sociales y geográficas del distrito de Oropesa, debido a que integra medios tecnológicos y mecanismos comunitarios de comunicación.

El empleo de radio VHF permitirá establecer comunicación rápida entre el COEL, los vigías y las autoridades locales, favoreciendo la emisión oportuna de alertas. De manera complementaria, la utilización de megáfonos, campanas comunitarias, sirenas y telefonía celular fortalecerá la cobertura de difusión de la alerta, especialmente en sectores rurales con limitada conectividad. La combinación de distintos mecanismos de comunicación mejora la continuidad operativa del sistema y mejora la capacidad de respuesta inmediata de la población frente a posibles eventos de inundación.

En relación con la capacidad de respuesta comunitaria, la propuesta incorpora acciones orientadas al fortalecimiento de la preparación y organización local, tales como la identificación de rutas de evacuación, señalización de zonas seguras, desarrollo de simulacros y capacitación comunitaria en gestión del riesgo de desastres.

Estas acciones permitirán mejorar el nivel de preparación de la población y favorecer una respuesta más organizada ante eventos hidrometeorológicos extremos. Asimismo, la participación de brigadas comunitarias y vigías fortalece la articulación entre la población y las autoridades locales durante situaciones de emergencia.

5.2.6.5. Evaluación institucional y funcional de la propuesta

Desde el punto de vista institucional y financiero, la propuesta presenta viabilidad debido a que se encuentra alineada con los lineamientos establecidos por el SINAGERD y la metodología SAT-COM promovida por INDECI.

Asimismo, la identificación de mecanismos de financiamiento como el Programa Presupuestal 0068, el FONDES y los proyectos de inversión pública mediante Invierte.pe permite establecer alternativas factibles para la implementación progresiva del sistema.

De igual manera, la articulación entre la Municipalidad Distrital de Oropesa, SENAMHI, INDECI y las organizaciones comunitarias constituye un aspecto favorable para fortalecer la coordinación institucional, la operatividad del sistema y la continuidad de las acciones de monitoreo, alerta y respuesta frente a eventos de inundación.

Con la finalidad de sintetizar la evaluación integral realizada para la propuesta del SAT-COM en la quebrada Totora, en la Tabla 75 se presentan los principales componentes evaluados, considerando aspectos técnicos, operativos, comunitarios e institucionales relacionados con el funcionamiento y viabilidad del sistema.

Tabla 75

Evaluación integral de la propuesta del SAT-COM para la quebrada Totora

Componente evaluado	Aspectos analizados	Resultado de la evaluación	Interpretación técnica
Conocimiento del riesgo	Modelamiento hidrológico e hidráulico, identificación de zonas críticas y análisis de vulnerabilidad	Técnicamente adecuado	Permitió identificar sectores con riesgo alto y muy alto, facilitando la definición de umbrales y medidas preventivas.
Monitoreo y seguimiento	Integración de estaciones SENAMHI, SONICS y vigilancia comunitaria	Funcional y técnicamente viable	Favorece el monitoreo continuo de las condiciones hidrometeorológicas y la generación de alertas tempranas.
Difusión y comunicación	Sistema VHF y mecanismos comunitarios de alerta	Operativamente adecuado para el ámbito rural	Garantiza la transmisión rápida de alertas mediante canales tecnológicos y comunitarios complementarios.
Capacidad de respuesta	Rutas de evacuación, simulacros y organización comunitaria	Requiere fortalecimiento continuo	La población necesita capacitación permanente para mejorar la preparación y respuesta ante emergencias.
Viabilidad institucional y financiera	Articulación institucional y mecanismos de financiamiento	Institucional y financieramente viable	Existen mecanismos presupuestales e instituciones competentes que favorecen la sostenibilidad técnica y operativa del sistema.

Nota. Elaborado a partir de los resultados del modelamiento hidrológico e hidráulico, así como del análisis técnico, operativo e institucional de la propuesta del SAT-COM.

5.2.6.6. Interpretación integral de la propuesta SAT-COM

En términos generales, la evaluación realizada evidencia que la propuesta del SAT-COM para la quebrada Totora presenta consistencia técnica y funcional frente a las condiciones de peligro identificadas en el área de estudio. La articulación entre el modelamiento hidrológico e hidráulico, el monitoreo hidrometeorológico y los mecanismos de comunicación y respuesta comunitaria permite configurar un sistema orientado a fortalecer la capacidad de preparación y actuación frente a posibles escenarios de inundación en el distrito de Oropesa.

Los resultados obtenidos demuestran que la propuesta responde de manera coherente al comportamiento hidrológico de la cuenca y a las condiciones de vulnerabilidad presentes en la población expuesta. En ese sentido, la definición de niveles de alerta, el establecimiento de mecanismos de monitoreo y la incorporación de estrategias de organización comunitaria contribuyen a optimizar los procesos de vigilancia, difusión de alertas y evacuación preventiva.

Asimismo, la evaluación integral evidencia que la implementación progresiva del SAT-COM permitiría fortalecer la gestión local del riesgo de desastres, promoviendo una mayor articulación entre las instituciones competentes y la población organizada. De igual manera, el fortalecimiento de las capacidades comunitarias y de los mecanismos de respuesta contribuiría a reducir las posibles afectaciones sobre la población, la infraestructura y los medios de vida ubicados en zonas susceptibles a inundación.

En consecuencia, la propuesta del SAT-COM constituye una medida no estructural técnicamente viable y socialmente pertinente para la reducción del riesgo de inundaciones en la quebrada Totora, debido a que integra componentes técnicos, operativos, institucionales y comunitarios dentro de un enfoque preventivo y participativo de gestión del riesgo de desastres.

5.3. Contrastación de Hipótesis

Considerando que la presente investigación presenta un enfoque aplicado, descriptivo-explicativo y propositivo, la contrastación de la hipótesis no se realizó mediante pruebas estadísticas inferenciales, sino a través de la verificación técnica de los resultados obtenidos durante el desarrollo del modelamiento hidrológico, hidráulico y la formulación de la propuesta del SAT-COM para la quebrada Totora.

En este sentido, la hipótesis general planteada “El desarrollo del modelado hidrológico e hidráulico permitirá proponer un sistema de alerta temprana para la gestión del riesgo de inundaciones por desbordamiento de la quebrada Totora, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac - 2025”, fue evaluada mediante el análisis de la información generada durante la caracterización de la cuenca, la simulación hidrológica y la evaluación hidráulica de diferentes escenarios de avenida.

Los resultados del análisis morfométrico permitieron determinar que la cuenca de la quebrada Totora presenta condiciones físicas que influyen en su respuesta frente a eventos de precipitación intensa. Entre los principales parámetros obtenidos se encuentran una pendiente media de 33.27 %, una densidad de drenaje de 2.34 km/km², un orden de red hidrográfica de seis y un CN de diseño de 87.816. Estas características evidencian una limitada capacidad de infiltración y una mayor generación de escorrentía superficial, factores que favorecen la formación de caudales elevados durante eventos extremos.

Mediante el modelamiento hidrológico desarrollado con HEC-HMS se estimaron los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, obteniéndose valores de 415.60 m³/s, 660.20 m³/s y 790.90 m³/s para periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, respectivamente, bajo condición húmeda. Estos resultados evidencian que la quebrada presenta una respuesta significativa ante precipitaciones extremas, incrementándose la magnitud de los caudales conforme aumenta la recurrencia del evento.

La simulación hidráulica mediante HEC-RAS permitió representar el comportamiento del cauce frente a dichos caudales, identificándose zonas susceptibles a inundación en los sectores Totora y Oropesa. Los resultados evidenciaron que, bajo

escenarios de mayor magnitud, la capacidad de conducción del cauce resulta insuficiente, generándose procesos de desbordamiento hacia áreas cercanas donde existe presencia de viviendas e infraestructura.

A partir de la integración de los resultados hidrológicos e hidráulicos fue posible delimitar zonas críticas, identificar niveles de peligro y establecer criterios técnicos para la activación de alertas, tales como umbrales de precipitación, mecanismos de monitoreo y acciones de respuesta comunitaria. Estos elementos permitieron estructurar la propuesta del SAT-COM conforme a las condiciones particulares de la quebrada Totora.

En consecuencia, los resultados obtenidos sustentan técnicamente la hipótesis planteada, debido a que el modelamiento hidrológico e hidráulico permitió caracterizar el comportamiento de la quebrada frente a eventos extremos y generar información necesaria para formular un SAT-COM orientado a reducir el riesgo de inundaciones en los sectores Totora y Oropesa.

5.4. Discusiones

La presente investigación tuvo como finalidad desarrollar el modelamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada Totora, con el propósito de formular una propuesta de SAT-COM frente al riesgo de inundaciones generadas por el desbordamiento de la quebrada Totora en los sectores Totora y Oropesa, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac. Debido al enfoque aplicado y propositivo del estudio, la discusión de resultados se desarrolló a partir del análisis e interpretación del comportamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada bajo distintos escenarios de precipitación extrema y periodos de retorno, considerando la influencia de las características físicas de la cuenca, la capacidad de conducción del cauce y la exposición de los elementos vulnerables.

Los resultados obtenidos permitieron determinar que la integración del análisis morfométrico, la simulación hidrológica mediante el modelo HEC-HMS y la evaluación hidráulica mediante HEC-RAS constituye una metodología adecuada para representar la respuesta de una cuenca frente a eventos extremos. Esta combinación permitió estimar

caudales de avenida, identificar zonas susceptibles a inundación y establecer criterios técnicos para la implementación de medidas preventivas orientadas a mejorar la capacidad de preparación y respuesta de la población.

En relación con el objetivo general, referido a desarrollar el modelado hidrológico e hidráulico para proponer un SAT ante inundaciones por desbordamiento de la quebrada Totora, se determinó que la cuenca presenta condiciones que favorecen la generación de avenidas durante eventos de precipitación intensa. El análisis hidrológico permitió estimar caudales máximos de 415.60 m³/s, 660.20 m³/s y 790.90 m³/s para periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, respectivamente, bajo una condición húmeda. Asimismo, la simulación hidráulica evidenció que el incremento del periodo de retorno produce mayores niveles de tirante, velocidad del flujo y extensión de las zonas inundables, identificándose escenarios de peligro elevado principalmente en áreas próximas al cauce.

Estos resultados evidencian que la ocurrencia de inundaciones en la quebrada Totora no depende únicamente de la intensidad de la precipitación, sino también de la interacción entre las características geomorfológicas de la cuenca, la capacidad de generación de escorrentía superficial y la capacidad hidráulica disponible del cauce. En este sentido, la presencia de zonas pobladas cercanas al cauce incrementa la exposición frente al peligro, debido a que el desborde generado por caudales extremos puede ocasionar afectaciones sobre viviendas, infraestructura vial y actividades desarrolladas en el área de influencia.

Los hallazgos obtenidos presentan relación con lo reportado por Méndez y Vásquez (2021), quienes mediante la aplicación conjunta de HEC-HMS y HEC-RAS determinaron que los eventos hidrometeorológicos extremos generan incrementos importantes en los caudales y niveles de inundación cuando la capacidad del cauce resulta insuficiente para conducir las avenidas generadas. De manera complementaria, Quito y Picón (2022) señalaron que el uso integrado de modelos hidrológicos e hidráulicos permite representar con mayor precisión el comportamiento de los sistemas fluviales, facilitando la identificación de sectores críticos y la planificación de medidas de reducción del riesgo.

Asimismo, los resultados guardan correspondencia con Valderrama y Yataco (2024), quienes determinaron que las características físicas de una cuenca, como la pendiente, las condiciones del suelo y los parámetros hidrológicos, influyen directamente en la velocidad de concentración del flujo y en la magnitud de los caudales generados. Esta relación se observa en la quebrada Totora, donde las condiciones morfométricas y la limitada capacidad de infiltración favorecen una respuesta rápida ante precipitaciones intensas.

En consecuencia, los resultados permiten sustentar técnicamente la hipótesis general planteada, debido a que se verificó que el modelamiento hidrológico e hidráulico constituye una herramienta técnica eficaz para determinar escenarios de inundación y establecer parámetros necesarios para la propuesta de un SAT-COM. La información generada proporciona una base objetiva para definir acciones de monitoreo, comunicación y respuesta orientadas a disminuir la vulnerabilidad de los sectores Totora y Oropesa.

En lo que corresponde al primer objetivo específico, orientado a determinar los parámetros hidrológicos y morfométricos de la cuenca de la quebrada Totora, los resultados obtenidos permitieron establecer que la configuración física de la cuenca constituye un factor determinante en la respuesta hidrológica frente a precipitaciones intensas. La delimitación realizada permitió identificar una extensión de 1144.40 km², una pendiente media de 33.27 %, una longitud del cauce principal de 67.72 km y una red hidrográfica de orden seis y densidad de drenaje de 2.34 km/km², características que evidencian una cuenca con capacidad significativa para concentrar escorrentía superficial.

Asimismo, los parámetros geométricos obtenidos, como el coeficiente de compacidad (Kc = 2.27), factor de forma (Ff = 0.25) e índice de elongación (Re = 0.56), muestran una configuración predominantemente alargada. Esta condición implica que la concentración del flujo ocurre de manera progresiva hacia el cauce principal, reduciendo la posibilidad de una respuesta extremadamente inmediata; sin embargo, al combinarse con

una pendiente elevada y una limitada capacidad de infiltración del terreno, puede favorecer la generación de caudales considerables durante eventos de precipitación extrema.

Estos resultados guardan relación con Esquives y Velazco (2023), quienes determinaron que las características geomorfológicas de una cuenca influyen directamente en el comportamiento hidrológico, debido a que parámetros como la pendiente, la forma y la red de drenaje condicionan la velocidad del escurrimiento superficial y la acumulación del flujo. De igual manera, Álvarez (2025) identificó que las cuencas con pendientes elevadas presentan mayor susceptibilidad a generar avenidas rápidas debido a la disminución del tiempo disponible para los procesos de infiltración.

Desde una perspectiva hidrológica, el valor del CN obtenido (87.816) refleja una condición favorable para la generación de escorrentía, debido a que representa una baja capacidad de infiltración del suelo frente a eventos de lluvia intensa. Esto explica que, bajo escenarios húmedos, la cuenca pueda producir mayores volúmenes de escurrimiento y, consecuentemente, incrementar los caudales de avenida. Por lo tanto, se confirma que las características morfométricas e hidrológicas de la quebrada Totora representan factores condicionantes para la ocurrencia de inundaciones, evidenciando la relación existente entre las características físicas de la cuenca y su respuesta hidrológica frente a precipitaciones intensas.

Respecto al segundo objetivo específico, referido a determinar los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno mediante el modelo hidrológico HEC-HMS, los resultados evidenciaron que existe una relación directa entre la intensidad del evento de precipitación y la magnitud de la respuesta hidrológica de la quebrada Totora. La simulación permitió obtener caudales máximos de 415.60 m^3/s, 660.20 m^3/s y 790.90 m^3/s para periodos de retorno de 10, 50 y 100 años respectivamente bajo una condición húmeda, evidenciando un incremento progresivo conforme aumenta la recurrencia del evento.

El comportamiento obtenido demuestra que la cuenca presenta una respuesta hidrológica significativa frente a precipitaciones extremas, debido principalmente a la interacción entre la pendiente, las características del suelo, la cobertura superficial y la concentración del drenaje. Asimismo, el tiempo al pico aproximado entre 4.5 y 5 horas evidencia que la quebrada puede reaccionar en un periodo relativamente corto ante eventos intensos, condición relevante para establecer mecanismos de alerta temprana.

Estos resultados coinciden con lo señalado por Valderrama y Yataco (2024), quienes mediante la aplicación de HEC-HMS determinaron que parámetros físicos como el CN, tiempo de concentración y características de la cuenca influyen directamente en la generación de caudales máximos. En su estudio, las condiciones de mayor humedad produjeron incrementos importantes de escorrentía, comportamiento similar al observado en la quebrada Totora.

De manera complementaria, Quito y Picón (2022) señalaron que los modelos hidrológicos constituyen herramientas eficientes para representar la relación lluvia-escorrentía, especialmente en zonas donde existe limitada información de caudales observados. En ese sentido, la aplicación del modelo HEC-HMS permitió estimar escenarios de avenida que sirven como base para evaluar el comportamiento hidráulico posterior y establecer niveles de prevención.

Por consiguiente, los resultados confirman que el modelamiento hidrológico aplicado constituye una herramienta adecuada para determinar caudales de diseño y generar información técnica necesaria para la implementación del SAT-COM. La estimación de estos escenarios permite anticipar posibles condiciones críticas y definir umbrales operativos de monitoreo ante eventos hidrometeorológicos extremos.

Con relación al tercer objetivo específico, orientado a simular y evaluar el comportamiento hidráulico de la quebrada Totora mediante el modelo HEC-RAS, los resultados obtenidos permitieron determinar la capacidad de conducción del cauce frente a los caudales máximos estimados para diferentes periodos de retorno. La simulación

hidráulica evidenció que el cauce presenta limitaciones para transportar adecuadamente los caudales generados durante eventos extremos, ocasionando procesos de desbordamiento hacia zonas cercanas al cauce principal.

El análisis permitió identificar que, conforme aumenta el periodo de retorno, se incrementan parámetros hidráulicos como el tirante, la velocidad del flujo y la extensión de las áreas inundadas. Esta condición demuestra que la peligrosidad no está determinada únicamente por la magnitud del caudal, sino también por la interacción entre las características geométricas del cauce, la pendiente longitudinal, la rugosidad del terreno y la presencia de elementos que pueden modificar el comportamiento del flujo.

Los sectores Totora y Oropesa fueron identificados como áreas críticas debido a la cercanía de viviendas, infraestructura vial y zonas de actividad humana respecto al cauce de la quebrada. En estos sectores, la expansión lateral del flujo genera condiciones de exposición elevada, incrementando la probabilidad de afectación durante eventos de avenida. Asimismo, se identificó la presencia de aproximadamente 90 viviendas dentro del área de influencia del modelo hidráulico, evidenciando que la ocupación de zonas próximas al cauce constituye un factor relevante en el incremento del riesgo.

Estos resultados presentan similitud con la investigación desarrollada por Batallanos (2023), quien determinó que la insuficiente capacidad hidráulica de estructuras existentes puede generar acumulación del flujo y posteriores desbordamientos durante eventos de alta intensidad. De manera similar, en la quebrada Totora se observó que determinadas condiciones del cauce favorecen la reducción de la capacidad de evacuación del agua, generando zonas donde el flujo pierde confinamiento y se desplaza hacia áreas expuestas.

Asimismo, los hallazgos presentan similitud con Godoy (2022), quien concluyó que la combinación entre ocupación urbana cercana a los cauces, ausencia de medidas de protección y aumento de caudales incrementa significativamente la vulnerabilidad frente a inundaciones. En este sentido, los resultados obtenidos evidencian que las condiciones

hidráulicas actuales de la quebrada requieren medidas orientadas no solo al control del peligro, sino también al fortalecimiento de la preparación y respuesta de la población.

Desde el punto de vista técnico, la simulación hidráulica permitió transformar los resultados hidrológicos en escenarios espaciales de inundación, facilitando la identificación de áreas susceptibles y proporcionando información esencial para la gestión preventiva del riesgo. En consecuencia, los resultados obtenidos evidencian que el comportamiento hidráulico de la quebrada varía según la magnitud del caudal y el periodo de retorno evaluado.

En lo concerniente al cuarto objetivo específico, referido a delimitar las áreas de inundación generadas por caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, los resultados permitieron identificar espacialmente las zonas con mayor nivel de peligro dentro de los sectores Totora y Oropesa. La representación hidráulica evidenció que las áreas cercanas al cauce presentan mayores profundidades de inundación y velocidades de flujo, condiciones que pueden ocasionar daños sobre viviendas, vías de comunicación, terrenos de uso productivo e infraestructura.

La identificación de zonas con peligro muy alto responde a la combinación de factores físicos y sociales. Por un lado, los resultados del modelamiento muestran que el incremento del caudal genera una expansión progresiva del área inundable; por otro lado, la presencia de viviendas construidas con materiales vulnerables incrementa el nivel de afectación esperado. En ese sentido, la evaluación de vulnerabilidad permitió determinar que una proporción significativa de las viviendas presenta características constructivas de adobe, alcanzando valores aproximados entre 63 % y 69 %, lo cual representa una condición desfavorable frente a eventos de inundación.

Estos resultados coinciden con lo señalado por Paredes (2024), quien mediante modelos de simulación determinó que las precipitaciones extremas generan modificaciones importantes en la dinámica del flujo, ampliando las áreas potencialmente afectadas y evidenciando la importancia de representar espacialmente el peligro. De igual

manera, Vásquez y Constante (2023) señalaron que la identificación conjunta de amenaza y vulnerabilidad permite establecer estrategias más efectivas para reducir el riesgo, debido a que no basta con conocer la magnitud del fenómeno natural, sino también las condiciones de exposición de la población.

A partir de los resultados obtenidos, la delimitación de áreas inundables permitió establecer una base técnica para la formulación del SAT-COM. La información generada mediante HEC-RAS permitió definir sectores prioritarios de vigilancia, establecer escenarios de afectación y orientar medidas preventivas enfocadas en reducir la exposición de la población.

Respecto al quinto objetivo específico, relacionado con proponer un SAT-COM basado en los resultados del modelamiento hidrológico e hidráulico para reducir el riesgo de inundaciones en los sectores Totora y Oropesa, los resultados evidenciaron que la información obtenida mediante la simulación hidrológica e hidráulica puede transformarse en criterios técnicos y operativos orientados a la prevención, monitoreo y respuesta ante eventos de inundación asociados al comportamiento de la quebrada Totora.

La propuesta del SAT-COM fue estructurada conforme a los lineamientos técnicos establecidos en la guía del INDECI para su implementación, incorporando los componentes de conocimiento del riesgo, monitoreo y seguimiento, difusión y comunicación de la alerta, y capacidad de respuesta comunitaria. En este sentido, la formulación del sistema se sustentó en los resultados del análisis morfométrico, modelamiento hidrológico y simulación hidráulica, permitiendo relacionar la ocurrencia de precipitaciones intensas con la generación de caudales de avenida, la identificación de zonas expuestas y la definición de acciones preventivas.

A partir de los resultados obtenidos, se establecieron umbrales de precipitación asociados a diferentes niveles de alerta, considerando la respuesta hidrológica de la quebrada Totora. De esta manera, se definió un nivel de aviso cuando la precipitación alcanza aproximadamente 16.38 mm, niveles de alerta ante registros de 20.01 mm y 29.99

mm, y un nivel de alarma para precipitaciones cercanas a 30 mm. Estos valores permiten establecer criterios de activación temprana, vinculando el comportamiento de la precipitación con procedimientos específicos de vigilancia, comunicación y preparación de la población ubicada en zonas vulnerables.

La importancia de establecer dichos umbrales radica en que las quebradas altoandinas presentan una respuesta hidrológica condicionada por factores como la pendiente, las características fisiográficas de la cuenca y la capacidad de infiltración del terreno, generando incrementos rápidos del escurrimiento superficial durante eventos intensos. Por ello, contar con valores de referencia permite reducir la incertidumbre durante una emergencia y fortalecer la capacidad de reacción de las autoridades y población expuesta frente a posibles incrementos del caudal y posteriores inundaciones en los sectores evaluados.

Estos resultados guardan relación con lo desarrollado por Canales y Córdova (2023), quienes concluyeron que los SAT fundamentados en información hidrológica permiten mejorar la toma de decisiones y disminuir los tiempos de respuesta ante eventos peligrosos. Asimismo, Esquives y Velazco (2023) señalaron que la integración entre modelamiento, monitoreo y participación comunitaria fortalece la gestión preventiva del riesgo, debido a que permite identificar escenarios críticos antes de la ocurrencia del evento.

En este sentido, la propuesta del SAT-COM para la quebrada Totora no se limita únicamente al establecimiento de mecanismos de aviso, sino que constituye un sistema preventivo basado en evidencia técnica, donde los resultados del modelamiento hidrológico e hidráulico permiten definir zonas críticas, niveles de alerta, mecanismos de comunicación y acciones de respuesta adaptadas a las condiciones locales. En consecuencia, los resultados del modelamiento proporcionan criterios técnicos suficientes para sustentar la propuesta del SAT-COM orientada a reducir el riesgo de inundaciones en los sectores Totora y Oropesa.

En cuanto a las fortalezas y limitaciones de la investigación**, e**ntre las principales fortalezas del estudio destaca la integración del análisis geoespacial, el modelamiento hidrológico mediante HEC-HMS y la simulación hidráulica con HEC-RAS, lo cual permitió evaluar el comportamiento de la quebrada Totora bajo diferentes escenarios de precipitación y periodos de retorno. Esta metodología permitió identificar zonas expuestas y generar información técnica para la gestión preventiva del riesgo de inundaciones. Asimismo, el enfoque aplicado y propositivo de la investigación permitió que los resultados del modelamiento no solo sirvan para delimitar áreas inundables, sino también como base para la propuesta de un SAT-COM. La incorporación de caudales máximos, niveles de inundación, velocidades de flujo y umbrales de precipitación permitió establecer criterios orientados al monitoreo, comunicación y respuesta de la población vulnerable.

Sin embargo, una de las principales limitaciones corresponde a la disponibilidad de registros hidrometeorológicos continuos en la zona de estudio, lo cual restringe la calibración directa de los modelos y genera cierto nivel de incertidumbre en la estimación de eventos extremos. Además, el modelo hidráulico depende de la precisión del modelo digital del terreno y de los parámetros empleados, sin considerar procesos complementarios como transporte de sedimentos o variaciones bidimensionales del flujo. A pesar de estas limitaciones, los resultados obtenidos constituyen una base técnica importante para fortalecer la gestión preventiva en los sectores Totora y Oropesa, permitiendo orientar futuras investigaciones hacia la validación con eventos reales, monitoreo continuo y mejora progresiva del sistema propuesto.

En síntesis, los resultados obtenidos evidencian que la quebrada Totora presenta condiciones físicas, hidrológicas e hidráulicas que favorecen la generación de inundaciones ante eventos de precipitación extrema. La caracterización de la cuenca permitió identificar factores condicionantes como la pendiente, la configuración de la red de drenaje y la capacidad de infiltración del terreno, los cuales influyen directamente en la generación y concentración de la escorrentía superficial.

El modelamiento hidrológico desarrollado mediante HEC-HMS permitió estimar caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, mientras que la simulación hidráulica mediante HEC-RAS permitió representar la respuesta del cauce frente a dichos escenarios, identificando sectores donde la capacidad de conducción resulta insuficiente y se generan zonas susceptibles a inundación. Asimismo, la delimitación de áreas inundables permitió reconocer los espacios con mayor exposición en los sectores Totora y Oropesa, evidenciando que el nivel de riesgo está determinado no solo por la magnitud del fenómeno natural, sino también por la proximidad de viviendas e infraestructura al cauce.

A partir de estos resultados, la propuesta del SAT-COM fue estructurada bajo los lineamientos establecidos en la Guía Técnica para la Implementación del SAT-COM del INDECI, incorporando componentes de conocimiento del riesgo, monitoreo y seguimiento, difusión y comunicación de alertas, y capacidad de respuesta comunitaria. La integración de umbrales de precipitación, criterios de vigilancia y protocolos de actuación permite transformar los resultados del modelamiento en una herramienta preventiva adaptada a las condiciones locales.

En consecuencia, la investigación evidencia que el modelamiento hidrológico e hidráulico constituye una herramienta técnica fundamental para la gestión preventiva del riesgo de inundaciones, debido a que permite anticipar escenarios críticos y establecer medidas orientadas a fortalecer la preparación y respuesta de la población expuesta.

VI. Conclusiones

Primera. El modelamiento hidrológico e hidráulico desarrollado en la quebrada Totora permitió generar una base técnica para la propuesta de un SAT-COM frente al riesgo de inundaciones por desbordamiento en los sectores Totora y Oropesa, distrito de Oropesa, provincia de Antabamba. La integración del análisis hidrológico e hidráulico permitió establecer que la quebrada presenta una elevada susceptibilidad ante eventos de precipitación extrema, asociada al incremento de los caudales máximos y a la limitada capacidad de conducción del cauce. Bajo una condición húmeda, se estimaron caudales de 415.60 m³/s, 660.20 m³/s y 790.90 m³/s para periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, respectivamente; mientras que la simulación hidráulica identificó escenarios de desbordamiento y zonas con niveles de peligro muy alto ubicadas próximas al cauce. Con base en estos resultados, se establecieron criterios técnicos para la implementación del SAT-COM, incorporando mecanismos de monitoreo hidrometeorológico, umbrales de alerta, comunicación comunitaria y acciones de respuesta orientadas a disminuir la exposición y fortalecer la preparación de la población ante futuros eventos de inundación.

Segunda. En relación con el primer objetivo específico, se determinaron los parámetros morfométricos e hidrológicos de la cuenca de la quebrada Totora, identificándose las principales características físicas que influyen en la generación del escurrimiento superficial. La cuenca presenta un área de 1144.40 km², un perímetro de 272.67 km, una longitud de cauce principal de 67.72 km y una pendiente media de 33.27 %. Del mismo modo, presentó una red hidrográfica de orden 6 y una densidad de drenaje de 2.34 km/km², evidenciando un sistema de drenaje desarrollado con capacidad significativa para concentrar los flujos superficiales hacia el cauce principal. Además, los valores obtenidos del coeficiente de compacidad (Kc = 2.27), factor de forma (Ff = 0.25) e índice de elongación (Re = 0.56) indicaron una configuración alargada de la cuenca, condición que influye en la dinámica de concentración y tránsito del agua. Por otra parte, el tiempo de concentración presentó variaciones entre las subcuencas, con valores

comprendidos entre 40.12 y 437 minutos, los cuales fueron considerados para representar la respuesta hidrológica frente a precipitaciones intensas y eventos extremos.

Tercera. Respecto al segundo objetivo específico, se determinaron los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno mediante el modelamiento hidrológico con HEC-HMS, aplicando el método de pérdidas SCS-CN. El número de curva de diseño obtenido (CN = 87.816) evidenció condiciones de baja capacidad de infiltración y una elevada generación de escorrentía superficial ante eventos de precipitación intensa. Para la condición húmeda, se estimaron caudales máximos de 415.60 m³/s, 660.20 m³/s y 790.90 m³/s correspondientes a periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, respectivamente, demostrando que la magnitud de las avenidas aumenta conforme se incrementa la recurrencia del evento. Estos escenarios hidrológicos constituyeron información base para la evaluación hidráulica posterior, permitiendo analizar el comportamiento del flujo, identificar zonas susceptibles a inundación y establecer medidas preventivas dentro del SAT-COM propuesto.

Cuarta. En cumplimiento del tercer objetivo específico, se evaluó el comportamiento hidráulico de la quebrada Totora mediante el modelo HEC-RAS, integrando los caudales máximos obtenidos del análisis hidrológico y las características geométricas del cauce. Los resultados evidenciaron que el tramo evaluado presenta una capacidad hidráulica insuficiente para transportar adecuadamente los caudales generados durante eventos extremos, ocasionando desbordamientos desde periodos de retorno bajos y aumentando su extensión en escenarios de mayor magnitud. La simulación permitió identificar como zonas críticas los sectores Totora y Oropesa, principalmente en áreas cercanas al cauce y al puente local, donde se registró mayor exposición debido al incremento de tirantes, velocidades del flujo y posibles procesos erosivos en las márgenes. Asimismo, se determinó la presencia de aproximadamente 90 viviendas ubicadas dentro del área de influencia hidráulica, evidenciando la vulnerabilidad de la población asentada frente a posibles eventos de inundación.

Quinta. En lo concerniente al cuarto objetivo específico, se delimitaron las áreas inundables generadas por los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, permitiendo determinar la distribución espacial del peligro en los sectores Totora y Oropesa. El análisis hidráulico mostró que los escenarios de mayor magnitud producen una expansión progresiva del flujo y desbordamientos de mayor alcance, incrementando la superficie afectada. De esta manera, se estableció que las zonas próximas al cauce principal presentan niveles de peligro muy alto debido a la interacción entre la magnitud del caudal, las condiciones geométricas del cauce y la limitada capacidad de evacuación del flujo. Esta información permitió realizar la zonificación del riesgo, identificar áreas prioritarias y orientar la aplicación de medidas preventivas y acciones de respuesta frente a futuros eventos de inundación.

Sexta. Finalmente, respecto al quinto objetivo específico, se formuló un SAT-COM sustentado en los resultados del modelamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada Totora, incorporando componentes de monitoreo, comunicación y respuesta organizada de la población. A partir del análisis realizado, se establecieron umbrales de precipitación acumulada de 16.38 mm para el nivel de aviso, 20.01 mm y 29.99 mm para niveles de alerta, y 30.00 mm para el nivel de alarma, los cuales permitirán activar acciones preventivas ante posibles escenarios de inundación. Asimismo, se plantearon mecanismos de vigilancia mediante estaciones hidrometeorológicas, comunicación por radio VHF, sirenas, megáfonos y organización de brigadas comunitarias, con la finalidad de reducir la exposición, fortalecer la preparación y mejorar la capacidad de respuesta de los sectores Totora y Oropesa frente al riesgo de inundaciones.

VII. Recomendaciones

Primera. Se recomienda implementar progresivamente el SAT-COM propuesto para la quebrada Totora como una medida prioritaria dentro de la gestión del riesgo ante inundaciones. Para ello, la Municipalidad Distrital de Oropesa, en coordinación con las entidades competentes, deberá establecer un sistema permanente de monitoreo hidrometeorológico que considere el registro de precipitaciones, niveles de agua y variaciones de caudal. Estos registros deberán emplearse junto con los umbrales definidos en la investigación para activar oportunamente acciones de prevención, comunicación y evacuación en los sectores Totora y Oropesa.

Segunda. Se recomienda mantener actualizada la caracterización morfométrica e hidrológica de la cuenca de la quebrada Totora mediante levantamientos topográficos periódicos, actualización del modelo digital del terreno y evaluación de las condiciones actuales del cauce. Además, se sugiere implementar un registro continuo de información hidrometeorológica que contribuya a mejorar la base de datos para futuras simulaciones, considerando posibles modificaciones generadas por procesos erosivos, acumulación de sedimentos, cambios en el uso del suelo o variaciones en la geometría del cauce.

Tercera. Se recomienda utilizar los caudales máximos obtenidos mediante el modelo HEC-HMS como escenarios de referencia para la planificación preventiva y la evaluación de futuras intervenciones hidráulicas en la quebrada Totora. Asimismo, se deberá complementar el modelamiento hidrológico con información pluviométrica actualizada y registros continuos de estaciones cercanas, con el propósito de disminuir incertidumbres y mejorar la estimación de escenarios ante eventos extremos. Del mismo modo, resulta conveniente considerar medidas orientadas al manejo de la escorrentía superficial y al control de puntos críticos donde se concentre rápidamente el flujo.

Cuarta. Se recomienda priorizar medidas de reducción del riesgo en los sectores donde el análisis hidráulico identificó limitaciones en la capacidad de conducción del cauce, principalmente en áreas cercanas a viviendas, vías de comunicación y estructuras existentes. Estas acciones deberán incluir mantenimiento periódico del cauce, protección

de márgenes, control de puntos críticos y evaluación de obras de encauzamiento que permitan mejorar el comportamiento hidráulico y disminuir la exposición de la población ante posibles inundaciones.

Quinta. Se recomienda incorporar los mapas de inundación obtenidos mediante HEC-RAS en los instrumentos de planificación territorial y gestión del riesgo del distrito de Oropesa, evitando nuevas ocupaciones en áreas identificadas con peligro elevado. De igual manera, se sugiere establecer rutas de evacuación, puntos seguros y señalización preventiva en los sectores Totora y Oropesa, orientadas a mejorar la preparación de la población frente a escenarios de inundación.

Sexta. Se recomienda fortalecer la organización comunitaria vinculada al SAT-COM mediante capacitaciones periódicas dirigidas a autoridades locales, brigadas y población expuesta, enfocadas en el reconocimiento de niveles de alerta, protocolos de comunicación y procedimientos de evacuación. Asimismo, se sugiere realizar simulacros ante escenarios de inundación que permitan evaluar los tiempos de respuesta y mejorar la operatividad del sistema planteado.

Séptima. Se recomienda que futuras investigaciones incorporen modelos hidráulicos bidimensionales, análisis de transporte de sedimentos y evaluación de escenarios asociados a variaciones climáticas, con el objetivo de representar con mayor precisión el comportamiento de la quebrada Totora ante eventos extremos. Además, se sugiere desarrollar estudios orientados a determinar la vulnerabilidad física, social y económica de la población expuesta, contribuyendo al fortalecimiento de estrategias de reducción del riesgo de inundaciones en el distrito de Oropesa.

VIII. Referencias

Acosta-Coll, M., Ballester-Merelo, F., Martinez-Peiró, M., & De la Hoz-Franco, E. (2018). Real-time early warning system design for pluvial flash floods—A review. *Sensors, 18*(7), Article 2255. https://doi.org/10.3390/s18072255

Adams, T. E., III, Gangodagamage, C., & Pagano, T. C. (Eds.). (2024). *Flood forecasting: A global perspective* (2nd ed.). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2022-0-02743-4

Alarcón Huillca, E., & Alarcón Huillca, R. (2022). *Análisis fluvial y geomorfológico en la erosión del río Apurímac, para la propuesta de defensa ribereña en el balneario turístico de Ccónoc-Curahuasi, 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. https://bit.ly/4iGsAnr

Alfieri, L., Salamon, P., Pappenberger, F., Wetterhall, F., & Thielen, J. (2012). Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environmental Science & Policy, 21*, 35–49. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.01.008

Alipour, A., Jafarzadegan, K., & Moradkhani, H. (2022). Global sensitivity analysis in hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling & Software, 152*, Article 105398. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105398

Álvarez Muñoz, I. A. (2025). *Estudio hidrológico e hidráulico de la quebrada Chinguilanchi para la prevención y mitigación de inundaciones* [Tesis de grado, Universidad Técnica Particular de Loja]. https://dspace.utpl.edu.ec/handle/29.500.19856/70727

Astagneau, P. C., Bourgin, F., Andréassian, V., & Perrin, C. (2024). Lead-time-dependent calibration of a flood forecasting model. *Journal of Hydrology, 644*, Article 132119. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132119

Autoridad Nacional del Agua. (s. f.). *Observatorio Nacional de Recursos Hídricos*. Recuperado el 4 de marzo de 2026, de https://snirh.ana.gob.pe/onrh/

Balocchi, F., White, D. A., Silberstein, R. P., & Ramírez de Arellano, P. (2021). Forestal Arauco experimental research catchments: Daily rainfall-runoff for 10 catchments

with different forest types in central-southern Chile. *Hydrological Processes, 35*(4), Article e14047. https://doi.org/10.1002/hyp.14047

Baran-Gurgul, K., & Rutkowska, A. (2024). Water resource management: Hydrological modelling, hydrological cycles, and hydrological prediction. *Water, 16*(24), 3689. https://doi.org/10.3390/w16243689

Basher, R. (2006). Global early warning systems for natural hazards: Systematic and people-centred. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *364*(1845), 2167–2182. https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1819

Batallanos Guzmán, S. C. (2023). *Análisis del comportamiento hidráulico del canal Sahuanay para la evacuación de flujo de detritos en el distrito de Tamburco, Abancay 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. https://bit.ly/3X6Fh3D

Beven, K. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The primer* (2nd ed.). Wiley-Blackwell. https://doi.org/10.1002/9781119951001

Bhardwaj, J., Asghari, A., Aitkenhead, I., Jackson, M., & Kuleshov, Y. (2021). Climate risk and early warning systems: Adaptation strategies for the most vulnerable communities. *Journal of Science Policy & Governance, 18*(2). https://doi.org/10.38126/JSPG180201

Bihon, Y. T., Lohani, T. K., Ayalew, A. T., Neka, B. G., Mohammed, A. K., Geremew, G. B., & Ayele, E. G. (2024). Performance evaluation of various hydrological models with respect to hydrological responses under climate change scenario: A review. *Cogent Engineering, 11*(1), Article 2360007. https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2360007

Bischiniotis, K., van den Hurk, B., Zsoter, E., Coughlan de Perez, E., Grillakis, M., & Aerts, J. C. J. H. (2019). Evaluation of a global ensemble flood prediction system in Peru. *Hydrological Sciences Journal, 64*(10), 1171–1189. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1617868

Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS river analysis system user's manual* (Version 5.0, CPD-68). U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. https://bit.ly/4sG9d2g

Brunner, G. W. (2021). *HEC-RAS river analysis system: 2D modeling user's manual* (Version 6.0, CPD-68A). U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. https://bit.ly/3X4UlyK

Brunner, G. W. (2024). *HEC-RAS river analysis system: User's manual* (Version 6.6, CPD-68). U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. https://bit.ly/4AfVqCr

Brunner, G. W., Savant, G., & Heath, R. E. (2020). *Modeler application guidance for steady versus unsteady, and 1D versus 2D versus 3D hydraulic modeling* (TD-41). U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. https://bit.ly/4ekPBuW

Cabello, E., Cabello, A., & Martínez, M. (2021). Validación de una encuesta para medir la satisfacción de los médicos residentes sobre el programa de especialización en Lima, Perú. *Revista Médica Herediana, 32*(1), 12–19. https://doi.org/10.20453/rmh.v32i1.3943

Canales Bonifacio, M. Á., & Córdova Bolaños, Y. A. (2023). *Modelamiento hidrológico e hidráulico para un sistema de alerta temprana en la quebrada Chasqui, distrito Sihuas, provincia Sihuas, Áncash – 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa]. https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/4288

Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2023a). *Escenario de riesgo por inundaciones y movimientos en masa ante lluvias asociadas al fenómeno El Niño*. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/16270

Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2023b). *Escenario de riesgo por inundaciones de la cuenca Alto Apurímac*. https://bit.ly/4iY5IB9

Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2024). *Escenarios de riesgo por inundaciones y movimientos en masa en el marco del Plan Multisectorial 2025-2027*. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/17791

Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2025). *Escenarios de riesgo por lluvias para el periodo diciembre 2025-febrero 2026 (con base en el Informe Técnico N.° 16-2025/SENAMHI-DMA-SPC).* https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/20620

Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. (2024, 1 de agosto). *Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres del Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN) 2024-2026*. https://bit.ly/4zxKm3E

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill Interamericana. https://bit.ly/4ioFHuI

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill. https://bit.ly/4sJ2THu

Cloke, H. L., & Pappenberger, F. (2009). Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology, 375*(3–4), 613–626. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.005

Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño. (2025a, 18 de diciembre). *Comunicado oficial ENFEN N.° 13-2025*. https://bit.ly/4k3f3J7

Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño. (2025b). *Informe técnico ENFEN: Año 11, N.° 14, al 16 de diciembre de 2025*. https://bit.ly/4iCaZgu

Congreso de la República del Perú. (2011, 19 de febrero). Ley N.° 29664, *Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD).* https://bit.ly/4feqfiz

Desalegn, H., & Mulu, A. (2021). Mapping flood inundation areas using GIS and HEC-RAS model at Fetam River, Upper Abbay Basin, Ethiopia. *Scientific African, 12*, Article e00834. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00834

Dhote, P. R., Thakur, P. K., Aggarwal, S. P., Sharma, V. C., Garg, V., Nikam, B. R., & Chouksey, A. (2018). Experimental flood early warning system in parts of Beas Basin using integration of weather forecasting, hydrological and hydrodynamic models. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-5*, 221–225. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-221-2018

Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology* (3rd ed.). Waveland Press. https://www.waveland.com/browse.php?t=382

Dobrovičová, S., Dobrovič, R., & Dobrovič, J. (2015). The economic impact of floods and their importance in different regions of the world with emphasis on Europe. *Procedia Economics and Finance, 34*, 649–655. https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01681-0

El-Bagoury, H., & Gad, A. (2024). Integrated hydrological modeling for watershed analysis, flood prediction, and mitigation using meteorological and morphometric data, SCS-CN, HEC-HMS/RAS, and QGIS. *Water, 16*(2), Article 356. https://doi.org/10.3390/w16020356

Emerton, R. E., Stephens, E. M., Pappenberger, F., Pagano, T. C., Weerts, A. H., Wood, A. W., Salamon, P., Brown, J. D., Hjerdt, N., Donnelly, C., Baugh, C. A., & Cloke, H. L. (2016). Continental and global scale flood forecasting systems. *WIREs Water, 3*(3), 391–418. https://doi.org/10.1002/wat2.1137

Eslamian, S. (Ed.). (2014). *Handbook of engineering hydrology: Modeling, climate change, and variability*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b16683

Esquives Beltrán, K. J., & Velazco Fernández, A. R. (2023). *Modelamiento hidrológico e hidráulico para sistema de alerta temprana aplicando el software HEC-HMS en la quebrada Pedregal, provincia de Huarmey – 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa]. https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/4473

Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., & Mastrandrea, M. D. (Eds.). (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects*. Cambridge University Press. https://bit.ly/4sJofVc

Gobierno Regional de Apurímac. (2015). Identificación de sectores críticos en la zona urbana del distrito de Totora-Oropesa, provincia de Antabamba, Apurímac. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/106

Gobierno Regional de Apurímac. (2023). *Plan Regional de prevención y reducción del riesgo de desastres de la región de Apurímac 2023 al 2027*. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/16589

Godoy Bernachea, K. J. (2022). *Modelización hidrológica e hidráulica para establecer las zonas inundables en la cuenca del río Vizcarra, del área urbana de los distritos de La Unión y Ripán, Huánuco 2021* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. https://repositorio.udh.edu.pe/handle/20.500.14257/3777

Grimaldi, S., Schumann, G. J.-P., Shokri, A., Walker, J. P., & Pauwels, V. R. N. (2019). Challenges, opportunities, and pitfalls for global coupled hydrologic-hydraulic modeling of floods. *Water Resources Research, 55*(7), 5277–5300. https://doi.org/10.1029/2018WR024289

Grupo de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible. (2021, 17 de agosto). *Cambio climático: América Latina será una de las regiones más afectadas*. https://bit.ly/3UuC6Cc

Grupo de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible. (2023, 31 de mayo). *Los próximos cinco años serán los más cálidos jamás registrados*. https://bit.ly/3WIIOLq

Gupta, J. P., Sahu, M. K., Dwarakish, G. S., & Shwetha, H. R. (2026). State-of-the-art hydraulic modelling: A comprehensive review of HEC-RAS for 1D and 2D applications. *Hydrological Sciences Journal, 71*(1), 166–190. https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2581862

Guth, P. L., Van Niekerk, A., Grohmann, C. H., Muller, J.-P., Hawker, L., Florinsky, I. V., Gesch, D. B., Reuter, H. I., Herrera-Cruz, V., Riazanoff, S., López-Vázquez, C.,

Carabajal, C. C., Albinet, C., & Strobl, P. (2021). Digital elevation models: Terminology and definitions. *Remote Sensing, 13*(18), Article 3581. https://doi.org/10.3390/rs13183581

Haro Sarango, A. F., Chisag Pallmay, E. R., Ruiz Sarzosa, J. P., & Caicedo Pozo, J. E. (2024). Tipos y clasificación de las investigaciones: Types and classification of investigations. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5(2), 956–966. https://doi.org/10.56712/latam.v5i2.1927

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education. https://bit.ly/4sDJ0BA

Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008

Hydrologic Engineering Center. (s. f.). *Hydrologic Engineering Center*. U.S. Army Corps of Engineers. https://www.hec.usace.army.mil/

Hydrologic Engineering Center. (s. f.). *HEC-RAS documentation*. U.S. Army Corps of Engineers. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation

Hydrologic Engineering Center. (s. f.). *HEC-HMS documentation*. U.S. Army Corps of Engineers. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (s. f.). *Zonas críticas por peligros geológicos*. Recuperado el 3 de abril de 2026, de https://app.ingemmet.gob.pe/zonascriticas/

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2015a, 11 de julio). *Lineamientos para la conformación y funcionamiento de la Red Nacional de Alerta Temprana (RNAT) y la conformación, funcionamiento y fortalecimiento de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT).* https://bit.ly/4BIgcvX

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2015b). *Guía técnica para la implementación del Sistema de Alerta Temprana Comunitario*. https://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2617/doc2617-contenido.pdf

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2018). *Guía técnica para la implementación del Sistema de Alerta Temprana Comunitario*. https://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2587/doc2587-contenido.pdf

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2019). *Sistema de alerta temprana (SAT).* https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/fil20170523113300.pdf

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2024a). *Reporte complementario N.° 075: Inundación por desborde de río en el distrito de Oropesa, Apurímac* (Reporte N.° 1). https://bit.ly/48yEMSr

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2024b). *Reporte complementario N.° 159: Lluvias intensas en el distrito de Oropesa, Apurímac* (Reporte N.° 2). https://bit.ly/3V3wyic

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2024c). *Reporte complementario N.° 1090: Lluvias intensas en el distrito de Oropesa, Apurímac* (Reporte N.° 3). https://bit.ly/3UASEII

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2025). *Compendio estadístico: Gestión reactiva 2025*. https://bit.ly/4inFkAu

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2026a). *Reporte complementario N.° 0929: Inundación por desborde de río en el distrito de Oropesa, Apurímac* (Reporte N.° 1). https://bit.ly/3UjuORH

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2026b). *Informe de emergencia N.° 417: Inundación por desborde de río en el distrito de Oropesa, Apurímac* (Informe N.° 1). https://bit.ly/3WnsA4k

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2026c). *Reporte complementario N.° 3715: Inundación por desborde de río en el distrito de Oropesa, Apurímac* (Reporte N.° 2). https://bit.ly/4ivQ12D

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2026d, 19 de abril). *Boletín informativo de aviso de corto plazo ante lluvias intensas N.° 109-2026-INDECI/COEN*. https://bit.ly/484oMrg

Jafarzadegan, K., Moradkhani, H., Pappenberger, F., Moftakhari, H., Bates, P., Abbaszadeh, P., Marsooli, R., Ferreira, C., Cloke, H. L., Ogden, F., & Duan, Q. (2023). Recent advances and new frontiers in riverine and coastal flood modeling.

Reviews of Geophysics, 61(2), Article e2022RG000788. https://doi.org/10.1029/2022RG000788

Keller, A. A., Garner, K., Rao, N., Knipping, E., & Thomas, J. (2023). Hydrological models for climate-based assessments at the watershed scale: A critical review of existing hydrologic and water quality models. *Science of the Total Environment, 867*, Article 161209. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161209

Kumar, R. V., Guganesh, S., Hussain Babu, D., & Kumaresan, P. (2024). Flood modeling: A comprehensive review on IDF curves, HEC-HMS, HEC-RAS, and GIS integration. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, 11*(2). https://doi.org/10.17148/IARJSET.2024.11207

Labade, P., Ayare, B. L., Bhange, H. N., Ingle, P. M., & Kolhe, P. R. (2025). A comprehensive review on rainfall-runoff modelling using HEC-HMS. *International Journal of Research in Agronomy, 8*(10), 1130–1138. https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i10o.4374

Lanciotti, S., Ridolfi, E., Russo, F., & Napolitano, F. (2022). Intensity–duration–frequency curves in a data-rich era: A review. *Water, 14*(22), Article 3705. https://doi.org/10.3390/w14223705

Luque Poma, G., Lara Calderón, J., Ochoa Zubiate, M. B., Núñez Juárez, S., & Sosa Senticala, N. (2023). *Zonas críticas por peligros geológicos en la zona sur del Perú* (Boletín de la Serie C). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). https://hdl.handle.net/20.500.12544/4671

Maranzoni, A., D'Oria, M., & Rizzo, C. (2022). Quantitative flood hazard assessment methods: A review. *Journal of Flood Risk Management, 16*(1), Article e12855. https://doi.org/10.1111/jfr3.12855

Marasini, U., & Pokhrel, M. (2024). Comparative analysis of rainfall-runoff simulation using a long short-term memory (LSTM) deep learning model and a conceptual hydrological model, HEC-HMS: A case study of the mountainous river basin of

Nepal. *Discover Civil Engineering*, 1, Article 78. https://doi.org/10.1007/s44290-024-00084-w

Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Loaiza, R., Martel, C., & Castillo, R. (2023). *Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. https://doi.org/10.35622/inudi.b.080

Méndez Palacios, C. D., & Vásquez Coronel, G. D. (2021). *Modelación hidrológica e hidráulica de la cuenca del río Machángara para evaluar zonas de inundación* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Cuenca]. https://bit.ly/4efyZ7L

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2011). *Manual de carreteras: Hidrología, hidráulica y drenaje*. https://bit.ly/4A8TJ9z

Mkhonta, G., Byaruhanga, N., & Kibirige, D. (2026). Towards improved flood prediction: A review of deterministic hydrologic-hydraulic model coupling [Hacia una mejor predicción de inundaciones: una revisión del acoplamiento de modelos hidrológicos-hidráulicos deterministas]. *Natural Hazards, 122*, Article 342. https://doi.org/10.1007/s11069-026-07992-3

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE, 58*(6), 1763–1785. https://doi.org/10.13031/trans.58.10715

Mukhopadhyay, B., & Singh, V. P. (2024). Channel routing. En *Applied hydrology* (pp. 454–515). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009376082.013

Municipalidad Provincial de Antabamba. (2022). Plan de prevención y reducción del riesgo de desastres de la provincia de Antabamba 2022-2026. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/14945

Natural Resources Conservation Service. (2025). *National engineering handbook: Part 630—Hydrology, Subpart H—Estimation of direct runoff from storm rainfall*. https://bit.ly/4ebBF6s

Odey, G., & Cho, Y. (2025). Event-based vs. continuous hydrological modeling with HEC-HMS: A review of use cases, methodologies, and performance metrics. *Hydrology, 12*(2), Article 39. https://doi.org/10.3390/hydrology12020039

ONU-Hábitat. (5 de Octubre de 2021). *Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres*. https://bit.ly/4ip7tal

Oo, T. Z., & Humphries, U. W. (2026). Hydrological modeling of flood impacts under land use and land cover change: A systematic review of tools, trends, and challenges. *MethodsX, 16*, Article 103724. https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103724

Organización de las Naciones Unidas. (2026, 20 de enero). *Las inundaciones dejan más de medio millón de damnificados en Mozambique*. https://news.un.org/es/story/2026/01/1541038

Organización Meteorológica Mundial. (2023). *Floods* [Inundaciones]. https://wmo.int/topics/floods

Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* [Cambio climático 2021: Bases científicas físicas], Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* [Cambio climático 2022: Impactos, adaptación y vulnerabilidad]. https://doi.org/10.1017/9781009325844

Paredes Catalan, Y. C. (2024). *Efecto de las precipitaciones máximas en el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. https://bit.ly/4iWOW5s

Presidencia del Consejo de Ministros. (2011, 26 de mayo). *Decreto Supremo N.º 048-2011-PCM, que aprueba el Reglamento de la Ley N.º 29664*. https://bit.ly/4sJKScf

Presidencia del Consejo de Ministros. (2015, 10 de julio). *Resolución Ministerial N.° 173-2015-PCM, que aprueba los Lineamientos para la Conformación y Funcionamiento de la Red Nacional de Alerta Temprana (RNAT) y la Conformación, Funcionamiento*

y Fortalecimiento de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT). https://bit.ly/3Wd85HA

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021, 1 de marzo). Decreto Supremo N.° 038-2021-PCM, que aprueba la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres al 2050. https://bit.ly/4zuyXl9

Presidencia del Consejo de Ministros. (2022, 12 de septiembre). *Decreto Supremo N.° 115-2022-PCM, que aprueba el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PLANAGERD) 2022-2030*. https://bit.ly/4jYtoX3

Presidencia del Consejo de Ministros. (2026a, 8 de enero). *Decreto Supremo N.° 003-2026-PCM que declara el Estado de Emergencia en algunos distritos de varias provincias de los departamentos, por peligro inminente ante intensas precipitaciones pluviales*. https://bit.ly/3UufuSh

Presidencia del Consejo de Ministros. (2026b, 6 de marzo). *Decreto Supremo N.° 032-2026-PCM que prorroga el Estado de Emergencia en algunos distritos de varias provincias de los departamentos, por peligro inminente ante intensas precipitaciones pluviales.* https://bit.ly/4A7IdLD

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2025). *Inundaciones en México 2025*. https://bit.ly/4iqOAUs

Quito Bonilla, A. E., & Picón Illescas, W. H. (2022). *Evaluación hidrológica e hidráulica del río San Francisco en el cantón Gualaceo* [Trabajo de titulación de pregrado, Universidad del Azuay]. https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/12368

Ramos-Galarza, C. A. (2020). Los alcances de una investigación. *CienciAmérica*, 9(3), 1–6. https://doi.org/10.33210/ca.v9i3.336

Reed, D. W. (1999). *Overview* (Vol. 1 de *Flood estimation handbook*). Centre for Ecology & Hydrology. https://bit.ly/3V0RXZk

Rodas Soto, A. A. (2024). *Modelamiento hidrológico e hidráulico, empleando el software HEC-RAS, para determinación de peligrosidad ante eventos de máximas avenidas*

en la quebrada Hatunhuayco-Cusco [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. https://hdl.handle.net/20.500.12672/23606

Saca Vega, C. A. (2025). *Estudio hidrológico e hidráulico de la quebrada Quilloyacu para la prevención y mitigación de inundaciones y flujo de sedimentos* [Tesis de grado, Universidad Técnica Particular de Loja]. https://dspace.utpl.edu.ec/handle/29.500.19856/70582

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (s. f.). *Estaciones: Datos hidrometeorológicos a nivel nacional*. Recuperado el 4 de marzo de 2026, de https://www.senamhi.gob.pe/servicios/?p=estaciones

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (s. f.). *SONICS-PBI*. Recuperado el 4 de marzo de 2026, de https://www.senamhi.gob.pe/?p=sonics-pbi

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021, diciembre). *Estudio de modelamiento hidrológico a paso diario a nivel nacional para el monitoreo de potenciales inundaciones*. https://bit.ly/4zuydwn

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2022, mayo). *Inventario de datos de eventos de inundaciones del Perú* [Estudio final]. https://bit.ly/4z0dvmS

Shi, H., Du, E., Liu, S., & Chau, K.-W. (2020). Advances in flood early warning: Ensemble forecast, information dissemination and decision-support systems. *Hydrology, 7*(3), Article 56. https://doi.org/10.3390/hydrology7030056

Singh, V. P. (Ed.). (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications. https://bit.ly/4iWPfgC

Singh, V. P., Singh, R., Paul, P. K., Bisht, D. S., & Gaur, S. (2024). *Hydrological processes modelling and data analysis: A primer*. Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1316-5

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union, 38*(6), 913–920. https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913

Smith, K., & Ward, R. (1998). *Floods: Physical processes and human impacts*. John Wiley & Sons.

Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach's alpha. *International Journal of Medical Education*, 2, 53–55. https://doi.org/10.5116/ijme.4dfb.8dfd

Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software, 90*, 201–216. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006

Tufano, R., Guerriero, L., Annibali Corona, M., Cianflone, G., Di Martire, D., Ietto, F., Novellino, A., Rispoli, C., Zito, C., & Calcaterra, D. (2023). Multiscenario flood hazard assessment using probabilistic runoff hydrograph estimation and 2D hydrodynamic modelling. *Natural Hazards, 116*(1), 1029–1051. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05710-3

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2023). *HEC-HMS user's manual* (Version 4.12). https://bit.ly/4sEBSFf

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2025). *Hydrologic modeling system HEC-HMS: User's manual* (Version 4.13). https://bit.ly/4iEAwWo

U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. (1986). *Urban hydrology for small watersheds* (Technical Release No. 55). https://bit.ly/3V6Tk8P

U.S. Geological Survey. (2025). *What is a digital elevation model (DEM)?* https://on.doi.gov/4jYjViE

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030*. https://bit.ly/48yoeKi

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2017a). *Terminology on disaster risk reduction: Early warning system*. https://bit.ly/4zrltGt

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2017b). *Terminology on disaster risk reduction: Vulnerability*. https://www.undrr.org/terminology/vulnerability

Valderrama Acosta, H. D., & Yataco Morillo, D. J. (2024). *Estudio hidrológico de la quebrada Cascajal con fines de prevención de inundación CP. Cascajal-Santa-Ancash-2020* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa]. https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/4630

Vashist, K., & Singh, K. K. (2023). HEC-RAS 2D modeling for flood inundation mapping: A case study of the Krishna River Basin. *Water Practice & Technology, 18*(4), 831–844. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.048

Vásquez Cambi, J. V., & Constante Vimos, E. F. (2023). *Propuesta de un plan de gestión de riesgos ante deslizamientos e inundaciones en la comunidad de Marianza perteneciente a la parroquia Sayausí* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24626

Vásquez Ramírez, A. A., Guanuchi Orellana, L. M., Cahuana Tapia, R., Vera Teves, R., & Holgado Tisoc, J. (2023). *Métodos de investigación científica*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. https://doi.org/10.35622/inudi.b.094

Wohl, E., Scamardo, J., & Morrison, R. R. (2025). James Buttle Review: Bed, banks and beyond: River flood dynamics. *Hydrological Processes, 39*(4), Article e70131. https://doi.org/10.1002/hyp.70131

World Meteorological Organization. (2011). *Manual on flood forecasting and warning (WMO-No. 1072).* https://library.wmo.int/idurl/4/35881

World Meteorological Organization. (2018). *Multi-hazard early warning systems: A checklist*. https://bit.ly/4C1r34r

World Meteorological Organization. (2025, November 12). *Early warning systems reach new heights, but critical gaps jeopardize global progress*. https://bit.ly/4A9YRKL

World Meteorological Organization. (2026). *Strengthening early warnings for all: Advancing observation-to-alerts for early warnings*. https://bit.ly/4A6SnfC

Zainal, N. N., & Abu Talib, S. H. (2024). Review paper on applications of the HEC-RAS model for flooding, agriculture, and water quality simulation. W*ater Practice & Technology, 19*(7), 2883–2900. https://doi.org/10.2166/wpt.2024.173

Los anexos, panel fotográficos y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica delos Andes.