

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Modelo hidrológico de crecidas para la prevención de desastres
naturales en la cuenca Chancay, Huaral - 2025**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:
Bach. Adan QUISPE OCHOA

ASESOR:
Msc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO

AYACUCHO - PERÚ

2025

DEDICATORIA

A Dios, a mis familiares de una u otra forma me apoyó incondicionalmente
y fueron la fuente de motivación.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarme en este trayecto de mi formación profesional. A la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, alma mater de nuestra región Ayacucho, por formar profesionales competentes eficientes para contribuir con la sociedad. A la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil por brindarme experiencia y aprendizaje para mi formación profesional. A la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por compartir conocimientos y experiencias que aportaron para mi formación profesional. A los profesores de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por brindarme nuevos conocimientos y experiencias. Al asesor de la tesis, Ing. Bendezú Prado, Jaime Leonardo por su tiempo, paciencia y compartir sus conocimientos para la culminación de esta investigación. A todas las personas que brindaron su apoyo durante este trayecto

RESUMEN

La cuenca del río Chancay – Huaral presenta una alta vulnerabilidad ante eventos de crecidas, los cuales generan impactos negativos en la infraestructura hidráulica y en la seguridad de la población. En este contexto, la presente investigación tuvo como propósito desarrollar un modelo hidrológico de crecidas que permita optimizar la predicción de estos eventos y proponer medidas de mitigación basadas en resultados técnicos. Para ello, se aplicó una metodología cuantitativa y de simulación, utilizando datos reales de oferta hídrica superficial, infraestructura crítica y escenarios de reducción hídrica derivados del cambio climático. El análisis incluyó la evaluación mensual del volumen de agua disponible, la estimación del caudal pico y el modelado de cinco escenarios de mitigación con distintos enfoques: defensas ribereñas, reforestación, combinación de medidas, zonificación y obras multicomponente. Entre los principales resultados, se identificaron marzo, febrero y abril como los meses de mayor riesgo, con volúmenes que superan los 90 hm³. Se determinó que el 100 % de las bocatomas se encuentran en riesgo y que existen 15 zonas urbanas vulnerables. El escenario más eficiente fue el multicomponente, que logró reducir el caudal pico de 950 m³/s a 190 m³/s y proteger hasta 64 bocatomas y 14 sectores poblados. En conclusión, el modelo desarrollado permite no solo predecir el comportamiento hidrológico en condiciones extremas, sino también sustentar la toma de decisiones en la planificación de medidas de prevención y reducción del riesgo en la cuenca Chancay – Huaral.

Palabras Clave: Bocatomas, Crecidas, Modelado hidrológico, Mitigación.

ABSTRACT

The Chancay-Huaral river basin is highly vulnerable to flood events, which have a negative impact on the hydraulic infrastructure and the safety of the population. In this context, the purpose of this research was to develop a hydrological model of floods to optimize the prediction of these events and propose mitigation measures based on technical results. To this end, a quantitative and simulation methodology was applied, using real data on surface water supply, critical infrastructure and water reduction scenarios derived from climate change. The analysis included the monthly evaluation of the volume of water available, the estimation of peak flow and the modeling of five mitigation scenarios with different approaches: riparian defenses, reforestation, combination of measures, zoning and multicomponent works. Among the main results, March, February and April were identified as the months of greatest risk, with volumes exceeding 90 hm³. It was determined that 100% of the water intakes are at risk and that there are 15 vulnerable urban areas. The most efficient scenario was the multicomponent one, which managed to reduce the peak flow from 950 m³/s to 190 m³/s and protect up to 64 water intakes and 14 populated sectors. In conclusion, the model developed allows not only to predict hydrological behavior under extreme conditions, but also to support decision-making in the planning of risk prevention and reduction measures in the Chancay - Huaral watershed.

Keywords: Intakes, Floods, Hydrologic modeling, Mitigation.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
INTRODUCCIÓN.....	xi
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2. Descripción del problema.....	12
1.3. Delimitación del problema	13
1.1.1. Espacial (geográfica)	13
1.1.2. Temática y unidad de análisis.....	13
1.4. Formulación del problema	13
1.1.3. Problema general	13
1.1.4. Problemas específicos.....	13
1.5. Justificación e importancia	14
1.1.5. Justificación.....	14
1.1.6. Importancia.....	14
1.6. Limitaciones de la investigación	14
1.7. Objetivos	14
1.1.7. Objetivo general	14
1.1.8. Objetivos específicos.....	15
II. MARCO TEÓRICO	16
2.1. Antecedentes	16
2.1.1. Investigaciones internacionales	16
2.1.2. Investigaciones nacionales	17
2.2. Bases teóricas.....	19

2.2.1.	Crecidas en la región Andina.....	19
2.2.2.	Cuenca hidrográfica.....	22
2.2.3.	Variables meteorológicas.....	23
2.2.4.	Variables hidrológicas.....	26
2.2.5.	Modelos Hidrológicos	31
2.2.6.	Tipología de modelos matemáticos en hidrología	34
III.	MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	37
3.1.	Tipo de investigación.....	37
3.2.	Nivel de investigación.....	37
3.3.	Diseño de investigación.....	38
3.4.	Población y muestra.....	39
3.4.1.	Población.....	39
3.4.2.	Muestra	39
3.5.	Hipótesis	39
3.5.1.	Hipótesis general.....	39
3.5.2.	Hipótesis específicas	39
3.6.	Operacionalización de variables.....	39
3.6.1.	Dimensiones.....	41
3.6.2.	Indicadores	42
3.7.	Técnicas e instrumentos.....	43
3.8.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	44
3.9.	Desarrollo de Trabajo de Tesis.....	45
3.9.1.	Ubicación Geográfica	45
3.9.2.	Accesibilidad y vías de comunicación	47
3.9.3.	Recopilación de datos	47
3.9.4.	Red hidrográfica	48
3.9.5.	Riesgos y cambio climático.....	50
3.9.6.	Gestión de recursos hídricos	58
3.9.7.	Demanda Hídrica.....	64

IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
4.1.	Modelo hidrológico de crecidas	73
4.2.	Impacto de las crecidas en la infraestructura hidráulica y población.....	86
4.3.	Medidas de mitigación basadas en el modelado hidrológico	92
	CONCLUSIONES	100
	RECOMENDACIONES.....	101
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
	ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cuadro de Operacionalización de variables.....	40
Tabla 2 Distribución de las zonas de la cuenca.....	49
Tabla 3 Puntos críticos ante inundaciones en la cuenca baja del río Chancay Huaral	54
Tabla 4 Oferta Hídrica Superficial del Río Chancay–Huaral (hm ³).....	58
Tabla 5 Oferta hídrica superficial al 75 % de persistencia (hm ³)	60
Tabla 6 Disponibilidad hídrica mensual (año 2023)	62
Tabla 7 Volúmenes lagunas altoandinas (hm ³).....	63
Tabla 8 Demanda de agua poblacional en la cuenca Chancay–Huaral por fuente de agua (hm ³)	64
Tabla 9 Demanda de agua de cultivos campaña 2021–2022 (hm ³)	65
Tabla 10 Demanda en uso industrial (hm ³).....	66
Tabla 11 Demanda en uso minero (hm ³)	67
Tabla 12 Demanda de uso energético (hm ³)	68
Tabla 13 Demanda de uso piscícola (hm ³)	69
Tabla 14 Caudal ecológico (hm ³).....	70
Tabla 15 Balance de la cuenca Chancay-Huaral (hm).....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de una cuenca hidrográfica	23
Figura 2 Cuenca Chancay - Huaral	45
Figura 3 Registro de coordenadas UTM mediante GPS en la cuenca Chancay – Huaral.....	46
Figura 4 Mapa de la cuenca Chancay-Huaral	50
Figura 5 Mapa de Clasificación de intensidad sísmica Huaral.....	51
Figura 6 Fallo estructural de puente tras evento sísmico en la cuenca Chancay – Huaral.....	52
Figura 7 Mapa de inundaciones en la cuenca Chancay-Huaral.....	55
Figura 8 Mapa de riesgos por huaycos en la cuenca Chancay-Huaral.....	56
Figura 9 Mapa de zonas vulnerables a la sequía en el valle Chancay - Huaral.....	57
Figura 10 Trabajo de campo para evaluación de disponibilidad hídrica	61
Figura 11 Oferta Hídrica Superficial Mensual - Río Chancay Huaral.....	75
Figura 12 Análisis de disponibilidad	76
Figura 13 Distribución mensual del agua disponible por fuente - Cuenca Chancay (2023).....	79
Figura 14 Meses con mayor volumen total de agua disponible	80
Figura 15 Escenarios de Cambio Climático - Cuenca Chancay Huaral	83
Figura 16 Comparación de Escenarios - Acumulado Mensual	84
Figura 17 Criticidad por escenario climático.....	85
Figura 18 Bocatomas en riesgo por crecidas - Cuenca Chancay Huaral.....	89
Figura 19 Zonas urbanas vulnerables ante crecidas	90
Figura 20 Infraestructura hidráulica en riesgo - Zona Baja de Huaral.....	91
Figura 21 Impacto de riesgo	92
Figura 22 Comparación de Caudales Pico por Escenario	96
Figura 23 Volumen de Escorrentía por Escenario	97
Figura 24 Escenarios de mitigación - cuenca Chancay (Huaral)	98

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Chancay – Huaral, ubicada en la región Lima, es un territorio con una importante actividad agrícola, urbana y económica, que depende en gran medida del recurso hídrico superficial y subterráneo. Sin embargo, esta cuenca también presenta una alta exposición a eventos hidrometeorológicos extremos, como las crecidas, principalmente durante los meses de verano, lo que representa una amenaza constante para la infraestructura hidráulica y la seguridad de las poblaciones asentadas en sus márgenes. En los últimos años, la variabilidad climática y los efectos del cambio climático han intensificado la recurrencia y severidad de estos eventos, afectando bocatomas, canales, puentes y zonas urbanas en expansión. A pesar de los esfuerzos institucionales, aún persiste una limitada capacidad de anticipación y respuesta ante este tipo de riesgos, debido a la falta de modelos predictivos adecuados y de estrategias integradas de mitigación.

En este contexto, la presente investigación tiene como finalidad desarrollar un modelo hidrológico de crecidas que permita optimizar la predicción de eventos extremos y, con base en ello, proponer medidas de mitigación estructurales y no estructurales adaptadas a la realidad de la cuenca. Para lograrlo, se utilizaron datos históricos y actualizados de oferta hídrica superficial, infraestructura en riesgo y zonificación urbana, considerando tanto condiciones actuales como escenarios climáticos de reducción del recurso hídrico. La metodología propuesta incluye el procesamiento de datos en MATLAB y el análisis comparativo de cinco escenarios de intervención: defensas ribereñas, reforestación, enfoque combinado, zonificación y obras multicomponente. Estos escenarios permiten evaluar el impacto de cada medida en variables clave como el caudal pico, el volumen de escorrentía y el número de infraestructuras y sectores urbanos protegidos.

El estudio no solo busca aportar información técnica para la gestión del riesgo en la cuenca del Chancay – Huaral, sino también contribuir con herramientas que fortalezcan la planificación preventiva ante desastres naturales. La integración del modelado hidrológico con acciones de mitigación fundamentadas en datos reales representa una oportunidad para mejorar la resiliencia del territorio frente a eventos de crecida, promoviendo un enfoque preventivo en la gestión del recurso hídrico y del ordenamiento territorial.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2. Descripción del problema

La cuenca Chancay-Huaral se encuentra en una zona de importancia estratégica, donde la dinámica hidrológica ha sido afectada por diversos factores que han incrementado la ocurrencia de crecidas. Estos eventos representan una amenaza para las actividades económicas y la seguridad de la población. La variabilidad climática y las precipitaciones extremas han generado un aumento en la escorrentía superficial, afectando la estabilidad de los cauces y la capacidad de regulación hídrica. Durante periodos de lluvias intensas, el volumen de agua que fluye a través de la cuenca supera la capacidad de infiltración del suelo, lo que genera incrementos súbitos en los caudales. La alteración de la cobertura vegetal en zonas estratégicas de la cuenca ha modificado el comportamiento hidrológico, limitando la retención de agua y favoreciendo la erosión del suelo. Estos factores han intensificado la frecuencia y magnitud de las crecidas, afectando tanto las áreas rurales como urbanas (SENAMHI, 2024).

Además, la información disponible sobre la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos extremos es limitada, lo que dificulta la implementación de medidas de prevención y control. La falta de estudios detallados sobre los patrones de escorrentía y las capacidades de regulación natural del agua restringe la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico. Sin herramientas de predicción adecuadas, los efectos de las crecidas continúan representando un problema para las poblaciones e infraestructuras ubicadas dentro de la cuenca.

En este contexto, el modelado hidrológico se considera una herramienta que puede ser utilizada para la evaluación y gestión de las crecidas en la cuenca Chancay-Huaral. La simulación de escenarios hidrológicos permitiría analizar el comportamiento de los caudales ante precipitaciones extremas, facilitando la identificación de posibles desastres relacionados con el incremento de las crecidas hidrológicas. La aplicación de modelos contribuiría a la optimización del manejo del recurso hídrico y a la planificación de acciones que reduzcan los riesgos asociados a estos eventos.

1.3. Delimitación del problema

1.1.1. Espacial (geográfica)

La presente investigación se delimita geográficamente a la cuenca del río Chancay, ubicada en la provincia de Huaral, región Lima, Perú.

1.1.2. Temática y unidad de análisis

La investigación se centra en el desarrollo y aplicación de un modelo hidrológico de crecidas como herramienta para la prevención de desastres naturales en la cuenca Chancay. La unidad de análisis está constituida por los datos hidrológicos y meteorológicos de la cuenca, así como por los eventos históricos de crecidas registrados por entidades oficiales como el SENAMHI y la Autoridad Nacional del Agua (ANA). El estudio considera variables como la precipitación, escorrentía, infiltración y evapotranspiración, y analiza su relación con la capacidad de respuesta ante eventos extremos. El propósito es evaluar el comportamiento del caudal ante precipitaciones intensas y proponer medidas de mitigación fundamentadas en simulaciones computacionales.

1.4. Formulación del problema

1.1.3. Problema general

¿Qué modelo hidrológico de crecidas contribuye a la prevención de desastres naturales en la cuenca Chancay, Huaral?

1.1.4. Problemas específicos

- a) ¿Cómo optimizar la predicción de crecidas en la cuenca Chancay mediante el uso de un modelo hidrológico?
- b) ¿Cuál es el impacto de las crecidas en la infraestructura hidráulica y en la seguridad de la población en Huaral?
- c) ¿Qué medidas de mitigación basadas en el modelado hidrológico pueden reducir los efectos de las inundaciones en la cuenca Chancay?

1.5. Justificación e importancia

1.1.5. Justificación

La investigación se justifica por la necesidad de contar con una herramienta que permita predecir crecidas en la cuenca Chancay, ya que estos eventos afectan a la población y a la infraestructura local. Actualmente, no se dispone de modelos específicos aplicados a esta cuenca que faciliten la gestión del riesgo ante desastres naturales. Por ello, se propone el desarrollo de un modelo hidrológico que permita analizar el comportamiento del caudal y apoyar en la toma de decisiones para prevenir impactos negativos.

1.1.6. Importancia

Este estudio es importante porque permitirá conocer mejor la dinámica de las crecidas en la cuenca Chancay y ayudará a plantear medidas para reducir los efectos de las inundaciones. También aportará información útil para instituciones que trabajan en gestión del agua y prevención de desastres, y puede servir de base para futuros estudios similares en otras cuencas del país.

1.6. Limitaciones de la investigación

La presente investigación puede presentar algunas limitaciones, principalmente relacionadas con la disponibilidad y calidad de los datos hidrometeorológicos. En algunos sectores de la cuenca Chancay, la información sobre precipitaciones y caudales puede ser escasa, incompleta o con periodos de registro discontinuos, lo cual podría afectar la precisión del modelo.

Asimismo, el estudio se desarrollará utilizando simulaciones computacionales, por lo que no se realizarán mediciones en campo. Esto implica que las validaciones del modelo dependerán exclusivamente de los datos proporcionados por entidades oficiales como SENAMHI y ANA.

1.7. Objetivos

1.1.7. Objetivo general

Desarrollar un modelo hidrológico de crecidas que contribuya a la prevención de desastres naturales en la cuenca Chancay, Huaral.

1.1.8. Objetivos específicos

- a) Optimizar la predicción de crecidas en la cuenca Chancay mediante el uso de un modelo hidrológico.
- b) Analizar el impacto de las crecidas en la infraestructura hidráulica y la seguridad de la población en Huaral.
- c) Proponer medidas de mitigación basadas en el modelado hidrológico para reducir los efectos de las inundaciones en la cuenca Chancay.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Investigaciones internacionales

Fernández et al. (2022) en su artículo tuvieron como objetivo calibrar una herramienta de simulación hidrológica para la cuenca alta del río Sauce Grande, en la Provincia de Buenos Aires, Argentina, con el fin de mejorar la estimación de escurrimiento y el manejo del recurso hídrico. Se utilizó el modelo HEC-HMS v.4.2.1, con el método del Número de Curva del Soil Conservation Service y el tránsito de avenidas mediante el método de Muskingum. La calibración se realizó con datos de precipitación y caudal medidos en estaciones hidrometeorológicas. Los resultados indicaron ajustes entre muy buenos y excelentes según el índice de Nash-Sutcliffe, demostrando la capacidad del modelo para simular eventos de tormentas reales. Se recomienda considerar distintos escenarios de humedad inicial para mejorar la precisión en futuras simulaciones, lo que facilitará la planificación de infraestructuras hidráulicas y la gestión del riesgo de crecidas.

Peña et al. (2023) en su artículo tuvieron como objetivo modelar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Cañar en Ecuador mediante el modelo SWAT, con el fin de evaluar su respuesta a distintos factores ambientales y antrópicos. La metodología incluyó la recopilación de datos climáticos e hidrológicos de 1981-2013, la delimitación de la cuenca y la subdivisión en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs). Se implementó y calibró el modelo con SWAT-CUP utilizando el algoritmo SUFI-2, evaluando la eficiencia mediante indicadores estadísticos como NSE y R^2 . Los resultados indicaron que el modelo logró representar con precisión los caudales medios diarios, alcanzando valores de $NSE = 0.79$ y $R^2 = 0.82$ tras la calibración. La simulación permitió identificar parámetros clave que afectan la escurrimiento superficial y la evapotranspiración, proporcionando una base sólida para futuras aplicaciones en gestión de recursos hídricos.

Zúñiga (2024) en su tesis de maestría tuvo como objetivo analizar la peligrosidad por inundaciones en la cuenca del río Achibueno (Región del Maule, Chile) tras el evento meteorológico de junio de 2023, mediante modelización hidrológica-hidráulica 2D con Iber. La metodología incluyó la recopilación de datos meteorológicos e hidrológicos, la generación de un modelo hidrológico-hidráulico con

Iber 3.3.1 y la simulación de cuatro escenarios con diferentes niveles de obstrucción del puente Achibueno. Los resultados mostraron que la obstrucción del puente hasta un 50% no afectó significativamente la extensión de la inundación, pero sí tuvo un leve impacto en la evolución del calado y la velocidad del flujo. Se identificaron zonas de alta peligrosidad para el arrastre de personas y daños significativos a vehículos en la Ruta 5 Sur, proporcionando información clave para la gestión del riesgo de inundaciones en la zona.

Pascal (2023) en su tesis tuvo como objetivo desarrollar un modelo de redes neuronales artificiales para los ríos Pangal y Cachapoal, con el fin de apoyar la toma de decisiones mediante el desarrollo inicial de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) frente a crecidas. La metodología consistió en el uso de redes neuronales recurrentes tipo LSTM, entrenadas con datos horarios de precipitación y caudal desde el año 2000. Se probaron seis modelos con tiempos de adelanto de 1, 3 y 5 horas. Los resultados mostraron que los modelos de 1 hora lograron alta precisión (R^2 de 0,98 para Cachapoal y 0,82 para Pangal), aunque el rendimiento disminuyó con mayores tiempos de adelanto.

Triana y Leal (2022) en su tesis tuvo como objetivo diseñar una propuesta sostenible para mitigar el riesgo de inundaciones en la cuenca alta del río Combeima, en el municipio de Ibagué, Tolima. La metodología aplicada fue de tipo cualitativa y cuantitativa, incluyendo trabajo de campo, recolección de datos pluviométricos e hidrológicos, análisis multitemporal de imágenes satelitales, entrevistas a actores locales y modelación hidrológica mediante HEC-RAS y ArcGIS. Los resultados permitieron identificar zonas críticas de inundación y establecer medidas estructurales y no estructurales para la gestión del riesgo, como la restauración de zonas de amortiguamiento, obras de encauzamiento y fortalecimiento comunitario. La propuesta se orienta hacia una gestión integral del riesgo desde un enfoque territorial y ambiental, contribuyendo a la planificación sostenible del territorio y a la resiliencia de las comunidades ante eventos hidrometeorológicos extremos.

2.1.2. Investigaciones nacionales

Asencios (2021) en su tesis tuvo como objetivo evaluar la respuesta hidrológica en tiempo real de la cuenca del río Rímac, utilizando precipitación estimada por satélite (TRMM-3B42RT y PERSIANN-CCS) con sesgo corregido,

como herramienta para sistemas de alerta temprana de inundaciones. La metodología incluyó la corrección de sesgo mediante el método Quantile-Mapping, la simulación hidrológica con los modelos HBV y HYMOD, y la validación de las simulaciones con datos de caudales observados en la estación de aforo Chosica. Se realizaron seis experimentos de optimización para evaluar la influencia de los datos corregidos en la modelización hidrológica. Los resultados indicaron que la corrección de sesgo mejoró la precisión de los productos satelitales para el monitoreo y pronóstico hidrológico. En particular, el método Quantile-Mapping aplicado a TRMM-3B42RT mostró mejor desempeño en la simulación de caudales en comparación con PERSIANN-CCS.

Cubas (2021) en su tesis tuvo como objetivo modelar hidrológicamente la cuenca Chotano mediante el método del Número de Curva para determinar caudales máximos, con el fin de mejorar la precisión en las predicciones hidrológicas. La metodología incluyó la recopilación de datos meteorológicos del SENAMHI, el uso de software ArcGIS para la delimitación de la cuenca y la aplicación del método del Número de Curva para transformar la precipitación total en precipitación efectiva. Se evaluaron caudales máximos y escurrimientos con base en datos históricos y modelamiento hidrológico. Los resultados mostraron que la cuenca Chotano drena 355 km² y genera un caudal de 6 m³/s, con una producción anual de 186.8 MMC. Se determinó la familia de curvas según el grado de escurrimiento, concluyendo que el método empleado es una herramienta útil para la planificación y gestión de recursos hídricos.

Gamarra (2022) en su tesis tuvo como objetivo analizar alternativas de estructuras de laminación mediante la simulación de máximas avenidas en la cuenca del río Mala, utilizando el modelo hidrológico HEC-HMS. La metodología incluyó la recopilación y tratamiento de datos pluviométricos máximos en 24 horas, la generación de tormentas de diseño para distintos períodos de retorno y la calibración del modelo con datos de la estación hidrométrica La Capilla. Se compararon diversos escenarios con y sin estructuras de laminación para evaluar su impacto en la reducción del caudal pico. Los resultados indicaron que la alternativa N°1, que considera la estructura de laminación EL-4 con una corona de 45 m, es la más viable económica e hidráulicamente, logrando reducir hasta un 60% del caudal máximo. Este estudio aporta información clave para la gestión del riesgo de inundaciones en la cuenca.

Peje y Pomalaya (2025) en su tesis tuvieron como objetivo analizar las causas y consecuencias de las inundaciones en la quebrada Aguas Claras, ubicada en el distrito de Ciudad Nueva, Tacna, con el fin de proponer un diseño hidráulico que mitigue dicho riesgo. La metodología empleada fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, y comprendió el uso de software HEC-RAS 6.1 para modelación hidráulica, así como la recopilación de datos topográficos, hidrológicos e históricos del área de estudio. Se realizaron simulaciones para diferentes periodos de retorno (25, 50 y 100 años) que permitieron identificar zonas vulnerables y evaluar el comportamiento hidráulico del cauce. Como resultado, se propuso el rediseño del canal de la quebrada con secciones rectangulares de concreto armado, lo cual mejora la capacidad de conducción del flujo y reduce significativamente el riesgo de desbordes e inundaciones en la zona urbana.

Isquierdo y Bautista (2024) en su tesis tuvieron como objetivo proponer una alternativa técnica y sostenible para el control de inundaciones en la quebrada El Gato, ubicada en el distrito de José Leonardo Ortiz, Chiclayo. La metodología utilizada fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, desarrollando análisis hidrológicos e hidráulicos mediante el uso de software HEC-HMS y HEC-RAS. Se recopilaron datos topográficos, hidrometeorológicos y se aplicaron modelos para simular distintos escenarios de caudal, con periodos de retorno de hasta 100 años. Los resultados evidenciaron una alta vulnerabilidad de la zona ante eventos extremos, proponiéndose un canal trapezoidal de concreto armado como solución estructural. Esta propuesta permitiría una conducción más eficiente del caudal, reduciendo significativamente el riesgo de inundaciones y sus impactos negativos en la población y la infraestructura del área de influencia.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Crecidas en la región Andina

La Cordillera de los Andes juega un papel fundamental en la dinámica del ciclo hidrológico de la región, siendo el factor clave en la generación de variabilidad climática y ecosistémica. Célleri (2009) menciona que la interacción entre la atmósfera, el océano, los Andes y la Amazonía, impulsada por la energía solar, define el comportamiento del agua en la región, determinando la formación de eventos extremos como las crecidas.

Morlón (1992) destaca que los Andes actúan como una gran estructura recolectora de agua, captando la precipitación en forma de lluvia y nieve, que posteriormente alimenta los ríos. Sin embargo, la abrupta topografía andina, caracterizada por fuertes pendientes, facilita la generación de caudales elevados en cortos periodos de tiempo, incrementando el riesgo de crecidas súbitas. La escasa capacidad de infiltración en ciertas zonas montañosas, junto con la variabilidad estacional de las lluvias, contribuyen a que el agua fluya rápidamente hacia los cauces, provocando incrementos abruptos en los niveles de los ríos.

2.2.1.1. Factores que Influyen en las Crecidas

Según Célleri (2009), el régimen hidrológico de los Andes está condicionado por la capacidad de los ecosistemas de regular el almacenamiento y la liberación de agua. En periodos de lluvias intensas, los suelos de alta montaña y los ecosistemas como los páramos pueden retener una cantidad significativa de agua, reduciendo temporalmente los efectos de las crecidas. No obstante, cuando la capacidad de almacenamiento se satura, el agua excedente se libera rápidamente hacia los ríos, generando un aumento del caudal.

Los factores que influyen en la formación de crecidas en las cuencas hidrográficas son múltiples e interactúan de manera compleja, siendo los más determinantes la precipitación, las características geomorfológicas de la cuenca y el uso del suelo. La intensidad y duración de la precipitación constituye el factor meteorológico primario, donde eventos de alta intensidad en períodos cortos pueden generar crecidas repentinas, especialmente en cuencas pequeñas que presentan tiempos de respuesta más rápidos. Las características físicas de la cuenca, incluyendo el área de drenaje, la pendiente del terreno, la morfología del cauce y las propiedades del suelo, determinan la velocidad de concentración del flujo superficial y la capacidad de infiltración. Adicionalmente, el uso y cobertura del suelo juega un papel crítico, ya que la vegetación natural incrementa la interceptación de lluvia y la infiltración, mientras que las áreas urbanizadas aumentan significativamente la escorrentía superficial debido a la impermeabilización del terreno, reduciendo los tiempos de concentración y amplificando los caudales máximos Li, J., Wang, Z., & Zhang, T. (2023)

En cuencas sin glaciares, la regulación hídrica depende principalmente de la capacidad del suelo para retener humedad. Cuando esta capacidad es limitada, los caudales de crecida se incrementan de forma más abrupta. Adicionalmente, el

cambio en el uso de suelo es un factor determinante en la magnitud de las crecidas. La conversión de bosques y vegetación nativa en áreas de cultivo o pastoreo disminuye la retención de agua en el suelo, aumentando la escorrentía superficial y elevando el riesgo de inundaciones.

2.2.1.2. Impacto del Cambio de Uso del Suelo en las Crecidas

Las actividades humanas han modificado significativamente el comportamiento hidrológico de las cuencas andinas. Célleri (2009) explica que la deforestación y la expansión agrícola reducen la capacidad del suelo para infiltrar y almacenar agua, generando mayores volúmenes de escorrentía en menor tiempo. Como consecuencia, los caudales base disminuyen en épocas secas y los caudales de crecida aumentan en periodos lluviosos, afectando la estabilidad del régimen hidrológico. Un ecosistema con una regulación hídrica intacta mantiene un equilibrio entre las crecidas y los caudales de estiaje. Sin embargo, cuando se altera la cobertura vegetal, este balance se rompe, favoreciendo la erosión, la sedimentación y el incremento de los caudales máximos durante los eventos de precipitación intensa. Esta situación agrava el impacto de las crecidas en zonas pobladas y agrícolas, aumentando la vulnerabilidad de las comunidades andinas.

El impacto del cambio de uso del suelo en las crecidas constituye un factor determinante en la alteración de los procesos hidrológicos de las cuencas, siendo la urbanización y la deforestación los principales drivers de estos cambios. La transformación de superficies naturales permeables hacia áreas urbanas impermeabilizadas incrementa significativamente la escorrentía superficial, reduce la capacidad de infiltración del suelo y disminuye los tiempos de concentración, lo que resulta en mayores caudales máximos y volúmenes de crecida. Los cambios en la cobertura vegetal, particularmente la conversión de bosques y áreas agrícolas a zonas residenciales e industriales, eliminan la capacidad natural de intercepción de la precipitación y evapotranspiración, alterando fundamentalmente el balance hidrológico de la cuenca. Estos procesos de transformación territorial no solo modifican los patrones espaciales y temporales de la escorrentía, sino que también intensifican la vulnerabilidad a inundaciones, especialmente durante eventos de precipitación extrema, donde las superficies impermeables generan respuestas hidrológicas más rápidas y pronunciadas, aumentando considerablemente el riesgo de desastres por crecidas en las áreas urbanizadas y sus zonas de influencia aguas abajo. Prakash, M., et al. (2024)

2.2.1.3. Mitigación y Regulación de Crecidas

Para reducir el impacto de las crecidas en la región andina, es esencial implementar estrategias de conservación y restauración de ecosistemas. La reforestación, la protección de zonas de recarga hídrica y la construcción de infraestructuras hidráulicas adecuadas pueden mejorar la regulación del flujo de agua en las cuencas. Célleri (2009) menciona que los proyectos de restauración pueden recuperar, en parte, los servicios hidrológicos degradados, permitiendo un mejor control de las crecidas. Además, el monitoreo hidrometeorológico es clave para anticipar eventos extremos y minimizar los riesgos asociados a las crecidas. La instalación de estaciones de medición en las cuencas altas y la modelización hidrológica permiten predecir el comportamiento de los caudales y tomar decisiones oportunas para la gestión del agua en la región andina.

La mitigación y regulación de crecidas comprende un conjunto integral de medidas estructurales y no estructurales diseñadas para reducir el riesgo de inundaciones y minimizar sus impactos adversos en las comunidades y el ambiente. Las medidas estructurales incluyen infraestructura física como diques, presas, sistemas de drenaje, muros de contención y obras de canalización que tienen como objetivo controlar físicamente el flujo de agua y mantener las aguas de crecida alejadas de las áreas vulnerables. Por su parte, las medidas no estructurales abarcan políticas de ordenamiento territorial, sistemas de alerta temprana, códigos de construcción, zonificación de áreas de riesgo, seguros contra inundaciones y programas de concientización pública que buscan mantener a las personas alejadas de las aguas destructivas. La gestión moderna del riesgo de inundaciones reconoce que ninguna medida individual es completamente efectiva, por lo que se requiere un enfoque diversificado que combine estrategias estructurales y no estructurales de manera coordinada, siendo las medidas no estructurales generalmente más costo-efectivas, sostenibles y con menores impactos ambientales, capaces de reducir el riesgo de inundaciones hasta en un 30% según estudios comparativos. Zhao, G., et al. (2022).

2.2.2. Cuenca hidrográfica

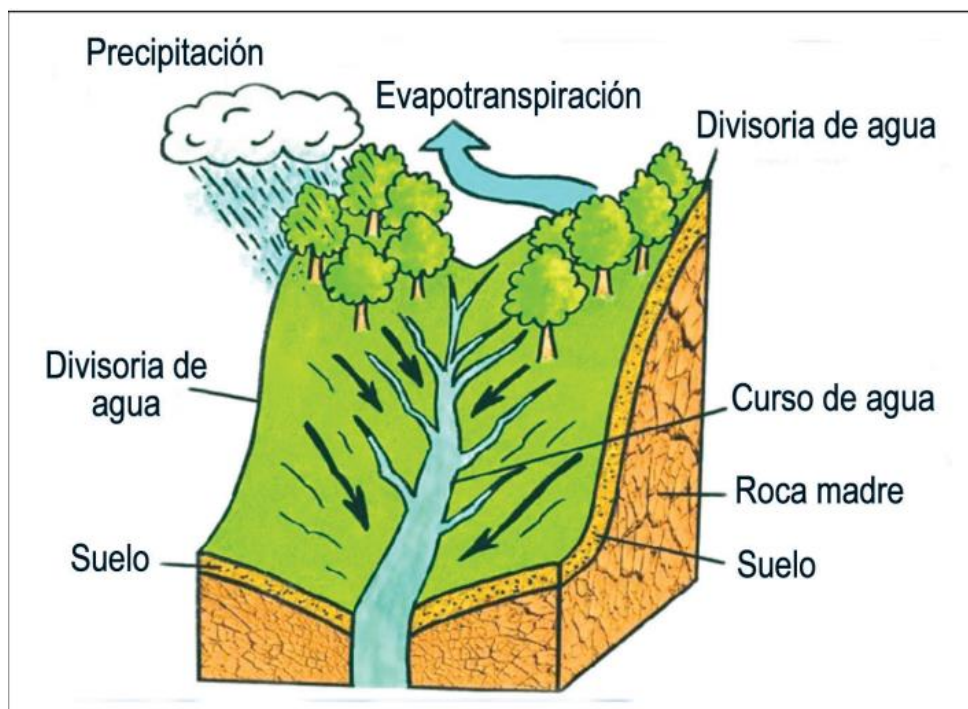
Según el Programa de Manejo Forestal Sostenible (PMFS, 2011), en la región andina se define la cuenca hidrográfica como la base para la planificación, concertación y establecimiento de compromisos, dado que el agua es el elemento que genera mayor inquietud en la sociedad. La limitada disponibilidad de este recurso se debe a la degradación ambiental y la deforestación, lo que ocasiona una

disminución en la capacidad de almacenamiento de las cuencas, aspecto esencial en su administración.

Asimismo, Faustino y García (s.f.) expresan que la cuenca hidrográfica constituye un territorio donde confluyen elementos naturales, asentamientos humanos, infraestructura y diversos servicios. En este espacio, las comunidades y organizaciones comparten el entorno, fortalecen su identidad cultural y colaboran en función de los recursos disponibles. No hay lugar en la Tierra que no pertenezca a alguna cuenca hidrográfica.

Figura 1

Esquema de una cuenca hidrográfica



Nota. Tomado de Frene et al., (2016)

2.2.3. Variables meteorológicas

- a) **Radiación Solar:** La radiación solar se define como el conjunto de ondas electromagnéticas emitidas por el Sol, cuya temperatura superficial es cercana a los 6000 °K. Este espectro abarca desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. Una parte de esta radiación es absorbida por la atmósfera, en especial por la capa de ozono, mientras que otra fracción alcanza la superficie

terrestre. La cantidad de energía solar que llega a la Tierra se denomina irradiancia y se expresa en W/m^2 (vatios por metro cuadrado). En la parte externa de la atmósfera, la radiación incidente, denominada radiación extraterrestre, es de aproximadamente 2 cal/cm^2 , lo que equivale a 1.39 KW/m^2 . Este flujo de energía es fundamental para los procesos climáticos, la fotosíntesis en los ecosistemas y el balance térmico del planeta, influyendo directamente en la evaporación y, por ende, en el ciclo hidrológico (Torres, 2003).

b) Temperatura: La temperatura del aire juega un papel determinante en el ciclo hidrológico, afectando la evaporación, la condensación y la precipitación. Su variabilidad en las capas bajas de la atmósfera responde a los mecanismos de conducción, convección y radiación térmica desde la superficie terrestre. En la troposfera, la temperatura disminuye con la altitud a razón de aproximadamente 7°C por cada 1000 metros de elevación sobre el nivel del mar. No obstante, en condiciones específicas, como las mañanas despejadas, pueden ocurrir inversiones térmicas, en las que el aire cercano a la superficie se encuentra más frío que las capas superiores, afectando la estabilidad atmosférica. Adicionalmente, cuando una masa de aire frío es reemplazada por otra más cálida, se generan modificaciones en la estratificación térmica, afectando la dinámica de los frentes meteorológicos y los patrones de precipitación (Torres, 2003).

c) Duración del día, horas de sol o insolación: La duración del día se define como el intervalo en el que la radiación solar incide sobre la superficie terrestre, condicionado por la latitud, la época del año y la inclinación del eje terrestre. También se conoce como horas de brillo solar y se mide mediante un heliógrafo, un dispositivo que registra de manera continua la intensidad del sol sobre un papel fotosensible. La trayectoria solar varía a lo largo del año, generando cambios en la duración de la insolación, lo que impacta la evapotranspiración y la disponibilidad hídrica. Este dato es de gran relevancia en hidrología, ya que se emplea en modelos empíricos para estimar la evaporación y la transpiración de la vegetación, factores esenciales en el balance hídrico de las cuencas (Torres, 2003).

d) Presión Atmosférica: La presión atmosférica es una variable hidrometeorológica clave, ya que regula la capacidad del aire para retener humedad y, por ende, influye en los procesos de formación de nubes y precipitaciones. Se expresa en bares ($1 \text{ bar} = 1.033 \text{ kg/cm}^2 = 760 \text{ mmHg}$) y su valor estándar al nivel del mar es de aproximadamente 1013.25 hPa (hectopascuales). Esta magnitud disminuye con la altitud, siguiendo una relación exponencial descrita por la ecuación barométrica:

$$P = P_0 e^{\frac{z}{H}}$$

donde P es la presión a una altura z , P_0 es la presión a nivel del mar, y H es la escala de altura atmosférica (~8.5 km en promedio). La variación de la presión genera circulación atmosférica, afectando los sistemas meteorológicos, la formación de ciclones y anticiclones, y la distribución de las precipitaciones (Custodio y Llamas, 1983).

e) Humedad Atmosférica: La humedad atmosférica hace referencia a la cantidad de vapor de agua contenida en el aire, excluyendo las formas líquidas o sólidas como la lluvia o el granizo. Este vapor proviene de la evaporación desde cuerpos de agua y la transpiración de la vegetación, concentrándose mayormente en las capas bajas de la atmósfera. Aproximadamente el 50% del vapor de agua total se encuentra por debajo de los 2000 metros de altitud, reduciéndose progresivamente con la altura. La temperatura es el principal factor que determina la capacidad del aire para retener vapor de agua: a mayor temperatura, mayor capacidad de retención; en contraste, cuando el aire se enfría, la saturación provoca la condensación y la formación de precipitaciones. Este proceso es fundamental para el desarrollo de nubes y el mantenimiento del ciclo hidrológico (Custodio y Llamas, 1983).

f) Velocidad del Viento: El viento es el desplazamiento del aire debido a diferencias de presión entre distintas regiones de la atmósfera, denominadas gradientes de presión o gradientes bóricos. Su movimiento está determinado por la fuerza del gradiente de presión, la fuerza de Coriolis (debida a la rotación terrestre) y la fricción con la superficie. Se mide en metros por

segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h) y es crucial en procesos de transporte de humedad, dispersión de contaminantes y erosión eólica. Su componente horizontal es la más relevante en la circulación atmosférica, mientras que la vertical suele ser despreciable salvo en eventos convectivos extremos. La velocidad del viento influye en la tasa de evaporación, el desarrollo de tormentas y la propagación de incendios forestales, aspectos fundamentales en la gestión hidrológica de una cuenca (Custodio y Llamas, 1983).

2.2.4. Variables hidrológicas

Aragón et al. (2019) señalan que las variables hidrológicas presentan una significativa variabilidad tanto en el espacio como en el tiempo, lo que depende de la dinámica atmosférica global y de factores locales como la orografía, la influencia del viento sobre la superficie, la inclinación y orientación del terreno. Estas condiciones impactan de manera directa en los ciclos agrícolas y forestales, así como en el desarrollo de la biodiversidad en una región determinada. Para su análisis, estas variables son registradas en estaciones meteorológicas mediante instrumentos específicos, proporcionando datos puntuales que se emplean en diseños de ingeniería. En estos estudios, es fundamental calcular el valor promedio de la variable dentro de la zona de interés para obtener estimaciones más representativas.

2.2.4.1. Precipitación

Guevara (2015) define la precipitación como el conjunto de todas las formas en las que el agua, proveniente de la atmósfera, llega a la superficie terrestre en una cuenca o área específica. Esta puede presentarse en estado líquido, como lluvia, niebla o rocío, o en estado sólido, como nieve, granizo o escarcha. La precipitación constituye el insumo esencial del sistema hidrológico, ya que es la principal fuente de abastecimiento para las corrientes superficiales y los acuíferos subterráneos.

El proceso de evaporación sobre los océanos es el mecanismo primordial de aporte de humedad a la atmósfera, representando aproximadamente el 90% del total. En contraste, solo el 10% de la evaporación continental contribuye a la precipitación. Además, se estima que alrededor del 25% del agua precipitada en las zonas continentales retorna a los océanos en forma de escorrentía superficial o flujo subterráneo. No obstante, la cercanía de una región a los océanos no garantiza necesariamente un alto índice de precipitación, como ocurre en algunas islas

desérticas donde predominan condiciones áridas. La precipitación se mide en términos de lámina de agua acumulada sobre una superficie específica, expresada en milímetros (volumen dividido entre área)

Por otro lado, Sánchez (2022) explica que la intensidad de la precipitación se define como la cantidad de agua precipitada por unidad de tiempo, siendo una variable derivada de la precipitación total. Sin embargo, también puede medirse directamente en milímetros por hora (mm/h), lo que permite evaluar la magnitud y velocidad del evento pluviométrico en un área determinada.

a) Formación de la Precipitación

Mejía (2012) sostiene que la precipitación se origina cuando las masas de aire se elevan hasta alcanzar niveles donde la temperatura desciende lo suficiente para provocar la condensación del vapor de agua. Este fenómeno requiere tres condiciones esenciales:

- 1. Saturación del aire:** El vapor de agua debe alcanzar el punto de saturación, lo que ocurre cuando la humedad relativa se aproxima al 100%.
- 2. Cambio de fase:** El vapor de agua debe transformarse en estado líquido (gotas de agua) o sólido (cristales de hielo).
- 3. Crecimiento de las gotas o cristales:** Se requiere la existencia de núcleos de condensación, como partículas de polvo atmosférico o sales en suspensión, para que las gotas de agua se agrupen y adquieran el tamaño y peso suficiente para precipitar.

Durante la nucleación, en las nubes se forman diminutas gotas de agua de aproximadamente 0.02 mm de diámetro. No obstante, las gotas de lluvia que alcanzan la superficie terrestre suelen medir entre 0.5 y 2 mm de diámetro. Esto implica que, en promedio, el volumen de las gotas se incrementa hasta un millón de veces antes de precipitar, lo cual es resultado de procesos como la fusión y coalescencia de gotas, la atracción electrostática entre partículas de agua y la turbulencia dentro de las nubes.

En términos generales, las precipitaciones se pueden clasificar en tres tipos, dependiendo del mecanismo que provoca la elevación del aire y la consiguiente condensación del vapor de agua (Chereque, 1989):

1. Precipitación convectiva
2. Precipitación ciclónica o frontal

3. Precipitación orográfica

- **Precipitación Convectiva:** Según Puelles (2015), este tipo de precipitación ocurre cuando el aire cálido asciende debido a su menor densidad en comparación con el aire circundante más frío. La diferencia de temperatura entre la superficie terrestre y la atmósfera superior provoca corrientes ascendentes de aire caliente. Este fenómeno es característico de regiones tropicales, donde las altas temperaturas matutinas generan convección intensa, propiciando la formación de tormentas acompañadas de relámpagos y truenos. Este tipo de lluvia es localizada y de corta duración, pero puede ser muy intensa.
- **Precipitación Ciclónica o Frontal:** Este tipo de precipitación se asocia a la interacción de masas de aire de distinta temperatura y humedad en zonas de baja presión. Se produce cuando una masa de aire cálido se encuentra con una masa de aire frío, provocando que el aire más cálido ascienda por sobre el frío. Al elevarse, la masa de aire cálido se enfría progresivamente, lo que induce la condensación y la formación de nubes que pueden generar lluvias continuas e intensas. Este fenómeno es común en latitudes medias y está relacionado con la formación de frentes meteorológicos y ciclones extratropicales (Puelles, 2015).
- **Precipitación Orográfica:** Este tipo de precipitación ocurre cuando el vapor de agua transportado por el viento es obligado a ascender por el relieve montañoso. A medida que el aire húmedo asciende por las laderas de las montañas, se enfría adiabáticamente, favoreciendo la condensación y la formación de nubes que desencadenan precipitaciones en la vertiente de barlovento. En cambio, en la cara opuesta de la montaña (sotavento), el aire desciende y se calienta, generando condiciones secas y favoreciendo la presencia de zonas áridas o semiáridas. Este fenómeno es característico en cordilleras como los Andes o el Himalaya, donde se generan importantes contrastes climáticos entre las regiones montañosas y las planicies adyacentes (Puelles, 2015).

2.2.4.2. Infiltración

Castañeda y Barros (1994) definen la infiltración como el proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo, desplazándose tanto hacia la zona no saturada como hacia el área completamente saturada. La tasa de infiltración está determinada por la cantidad de agua que se filtra a través de una unidad de superficie en un intervalo de tiempo específico. Entre los principales factores que influyen en la capacidad de infiltración se encuentran:

- a) **Cobertura vegetal**, que favorece la absorción y reduce la erosión del suelo.
- b) **Propiedades hidráulicas del suelo**, incluyendo la porosidad y la textura del sustrato.
- c) **Estado de humedad del suelo**, dado que un suelo seco puede absorber más agua que uno previamente saturado.
- d) **Intensidad de la precipitación o riego**, que afecta la velocidad con la que el agua se infiltra.
- e) **Prácticas agrícolas**, ya que el laboreo del suelo puede modificar su estructura y afectar la infiltración.

2.2.4.3. Percolación

La percolación se refiere al desplazamiento del agua a través de las capas más profundas del suelo, alcanzando la zona freática o el manto acuífero subterráneo. La velocidad con la que el agua se mueve en sentido descendente dentro del perfil del suelo se denomina capacidad de percolación.

Este proceso es independiente de la infiltración inicial y del almacenamiento de agua en la superficie, ya que está influenciado por la porosidad no capilar de los horizontes inferiores del suelo. La percolación está limitada por la presencia de capas impermeables que dificultan o detienen el movimiento del agua. Sin embargo, factores como la acumulación de materia orgánica, la actividad radicular de las plantas y la bioturbación causada por lombrices y otros organismos pueden incrementar la capacidad de percolación del suelo (Siertem UEM, s.f.).

2.2.4.4. Evapotranspiración

Hansen et al. (1980) definen la evapotranspiración como la cantidad de agua que retorna a la atmósfera tanto por evaporación directa desde la superficie del suelo,

cuerpos de agua (ríos, lagos, embalses) y vegetación mojada, como por transpiración de las plantas. Por su parte, Allen et al. (1998) destacan que la evapotranspiración está regulada por diversos factores climáticos, tales como la temperatura del aire, la radiación solar, la radiación atmosférica, la humedad relativa y la velocidad del viento.

a) Evaporación

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1996) explica que la evaporación es el proceso por el cual el agua en estado líquido se convierte en vapor y es transportada desde la superficie evaporante hacia la atmósfera. Este fenómeno se produce en diversas superficies, como cuerpos de agua, suelos húmedos y vegetación mojada.

Para que ocurra la evaporación, es necesario un aporte energético que permita romper los enlaces intermoleculares del agua. La principal fuente de esta energía es la radiación solar, aunque la temperatura ambiente también juega un papel clave. Además, el proceso de evaporación se ve afectado por el gradiente de presión de vapor entre la superficie evaporante y la atmósfera circundante.

A medida que la evaporación progresa, el aire próximo a la superficie se satura de humedad, lo que ralentiza el proceso hasta detenerlo completamente si no hay un mecanismo de dispersión del aire húmedo. La velocidad del viento es determinante en este sentido, ya que permite renovar el aire circundante y mantener un flujo continuo de evaporación. Por lo tanto, los factores climáticos que deben considerarse al evaluar este proceso incluyen la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento.

b) Transpiración

La FAO (1996) define la transpiración como el proceso mediante el cual el agua contenida en los tejidos vegetales se convierte en vapor y es liberada a la atmósfera. La mayor parte de la pérdida de agua en las plantas ocurre a través de las estomas, pequeñas aberturas en la superficie de las hojas que regulan el intercambio gaseoso.

La vaporización del agua se da en los espacios intercelulares dentro de la hoja, y su salida al exterior está controlada por la apertura y cierre estomático, lo que permite optimizar la pérdida de agua en función de las condiciones ambientales. Se estima que la mayor parte del agua absorbida por las raíces no se almacena en la planta, sino que es transpirada al ambiente.

La tasa de transpiración depende de múltiples factores, tales como:

1. **Disponibilidad de energía solar**, necesaria para la vaporización del agua.
2. **Gradiente de presión de vapor**, que influye en la capacidad del aire para recibir el agua transpirada.
3. **Velocidad del viento**, que favorece la remoción del aire saturado de humedad y permite la continuidad del proceso.
4. **Contenido hídrico del suelo**, ya que la escasez de agua puede restringir la absorción y, por ende, la transpiración.
5. **Salinidad del suelo y del agua de riego**, que afecta la capacidad de absorción de las plantas.
6. **Tipo de cultivo y su desarrollo fenológico**, ya que especies vegetales diferentes presentan tasas de transpiración variables.

Además de la especie vegetal, el estado de crecimiento, las condiciones del suelo y las prácticas agrícolas influyen significativamente en la transpiración. No solo el tipo de planta, sino también el manejo del cultivo y su entorno, deben considerarse al evaluar este proceso.

2.2.5. Modelos Hidrológicos

La modelación hidrológica es una herramienta clave en la planificación y gestión de los recursos hídricos, permitiendo la comprensión del balance hídrico, el análisis de los procesos que regulan el movimiento del agua y la predicción de eventos hidrológicos extremos como las crecidas (Spruill et al., 2000). Estos modelos proporcionan información fundamental para evaluar la respuesta hidrológica de una cuenca ante cambios en el uso del suelo, eventos meteorológicos intensos y variaciones climáticas.

2.2.5.1. Importancia de la Modelación en la Predicción de Crecidas

Los modelos hidrológicos permiten estimar la disponibilidad de agua, simular los caudales a corto y mediano plazo y analizar la dinámica de las crecidas fluviales. Pereira et al. (2016) destacan que estos modelos ayudan a anticipar cómo los cambios en la cobertura vegetal y el desarrollo urbano afectan la generación de escorrentía, lo cual es fundamental para prevenir inundaciones.

Históricamente, la modelación hidrológica se utilizó para el diseño de infraestructuras como presas, diques y sistemas de drenaje (Weber et al., 2010). Inicialmente, los modelos eran simples ecuaciones matemáticas que describían procesos individuales del ciclo hidrológico, como la escorrentía superficial y la infiltración. Sin embargo, con el avance de la computación, se han desarrollado modelos más sofisticados capaces de representar de manera integral la respuesta hidrológica de una cuenca ante eventos de precipitación extrema.

Sorooshian et al. (2008) explican que un modelo hidrológico bien estructurado debe simplificar la realidad sin perder precisión en los resultados. En el caso de las crecidas, los modelos de escorrentía permiten estimar los volúmenes de agua generados durante tormentas intensas, analizando factores como la pendiente del terreno, la capacidad de infiltración del suelo y la vegetación presente en la cuenca.

2.2.5.2. Factores Hidrológicos en la Modelación de Crecidas

Mendoza et al. (2002) resaltan que el principal objetivo de los modelos hidrológicos es comprender los fenómenos que afectan la generación de caudales extremos y evaluar cómo los cambios en una cuenca pueden alterar la magnitud de las crecidas. Para ello, se requiere información sobre:

- **Precipitación:** Principal insumo de los modelos, ya que determina la cantidad de agua que entra en la cuenca.
- **Área de drenaje:** Influye en la acumulación de escorrentía y la velocidad de respuesta del sistema.
- **Propiedades del suelo y la cobertura vegetal:** Afectan la infiltración y la retención de agua.
- **Contenido de humedad en el suelo:** Determina la capacidad de absorción del terreno antes de saturarse.
- **Características del acuífero:** Regulan el almacenamiento subterráneo y el flujo base de los ríos.

La modelación de crecidas en cuencas montañosas, como las de la región andina, es especialmente compleja debido a la heterogeneidad del terreno y la variabilidad climática. Por ello, es crucial desarrollar modelos que consideren la escala temporal de los eventos de crecida y la interacción entre los distintos procesos hidrológicos (Mishra y Singh, 2004).

2.2.5.3. Aplicaciones de los Modelos Hidrológicos en la Gestión de Crecidas

Del Águila (2021) menciona que la modelación hidrológica permite realizar estimaciones cuantitativas sobre caudales extremos, facilitando la toma de decisiones en la planificación de infraestructuras hidráulicas y la gestión del riesgo de inundaciones. Algunas aplicaciones clave incluyen:

1. **Predicción de eventos de crecida:** Modelos como HEC-HMS y SWAT permiten simular el comportamiento de una cuenca bajo diferentes escenarios de precipitación extrema.
2. **Evaluación del impacto del cambio de uso del suelo:** Permite analizar cómo la urbanización, la deforestación o la expansión agrícola modifican la generación de escorrentía.
3. **Diseño de infraestructuras de control de inundaciones:** Los modelos ayudan a dimensionar diques, embalses y canales de derivación para mitigar los efectos de las crecidas.
4. **Simulación de escenarios climáticos futuros:** Se pueden evaluar los impactos del cambio climático sobre la frecuencia e intensidad de las crecidas, permitiendo la adaptación de estrategias de gestión del agua.
5. **Optimización de sistemas de alerta temprana:** La modelación hidrológica mejora la capacidad de predicción de caudales máximos, permitiendo la emisión de alertas y la implementación de planes de emergencia.

2.2.5.4. Escalas de Modelación y su Relevancia en la Predicción de Crecidas

El modelamiento hidrológico se realiza a diferentes escalas espaciales y temporales, dependiendo del objetivo del estudio. Pearce et al. (1986) explican que la respuesta hidrológica de una cuenca varía en función del tiempo de concentración del agua y los mecanismos de producción de escorrentía.

- **Escalas de modelación para eventos extremos:** Cuando se estudian crecidas repentinas, se requieren modelos con intervalos de simulación en minutos o segundos, y resoluciones espaciales detalladas (de 10 a 100 metros).
- **Modelación de tendencias anuales:** Para evaluar el comportamiento hidrológico a lo largo del año, se utilizan escalas temporales diarias o mensuales, con celdas de 100 a 500 metros.

- **Simulación de largo plazo para planificación de recursos hídricos:** En estudios de gestión hídrica, las simulaciones abarcan periodos de meses a años, con resoluciones espaciales de hasta 1 km de ancho.

El correcto escalamiento de los modelos hidrológicos permite representar con mayor precisión la dinámica de las crecidas y mejorar la eficacia de las estrategias de mitigación de inundaciones (Pearce et al., 1986).

2.2.6. Tipología de modelos matemáticos en hidrología

Los modelos empíricos, también llamados modelos de caja negra o modelos basados en datos, se construyen a partir de observaciones sin considerar explícitamente los procesos físicos que regulan el movimiento del agua en la cuenca. Del Águila (2021) señala que estos modelos emplean ecuaciones matemáticas derivadas de series de tiempo de entrada y salida, sin representar directamente los procesos hidrológicos internos. Un ejemplo típico es el hidrograma unitario, utilizado para estimar la respuesta de una cuenca ante una lluvia de duración y distribución específicas. Estos modelos se fundamentan en métodos estadísticos como la regresión y la correlación, los cuales permiten establecer relaciones funcionales entre la precipitación y la escorrentía sin necesidad de entender los mecanismos subyacentes (Devia et al., 2015). Un claro ejemplo son los modelos estocásticos, que transforman las entradas en salidas sin detallar el proceso hidrológico intermedio (Mejía, 2017). Para el análisis de crecidas, se han desarrollado ecuaciones empíricas que permiten estimar caudales máximos en función de variables simples. Entre ellas, destacan:

Modelo de agotamiento del caudal de un río

$$Q_t = Q_{t0} e^{-\alpha t}$$

Donde Q_{t0} es el caudal inicial, α es un parámetro de decrecimiento y Q_t es el caudal en el tiempo t . Este modelo es útil para estimar la disminución del caudal después de una crecida.

Fórmula racional para caudales máximos

$$Q_{max} = C \cdot I \cdot A$$

Donde C es el coeficiente de escorrentía, I la intensidad de precipitación (mm/h) y A el área de la cuenca (ha). Esta ecuación permite estimar el caudal pico de una tormenta sobre una cuenca pequeña con respuesta rápida.

2.2.6.1. Modelos Paramétricos y Conceptuales en la Modelación de Crecidas

Los modelos paramétricos o de caja gris combinan información empírica con principios físicos simplificados, proporcionando una visión parcial de los procesos hidrológicos que controlan el flujo del agua. Mejía (2017) explica que estos modelos representan la cuenca como un sistema compuesto por reservorios interconectados que simulan el almacenamiento y movimiento del agua a través de la infiltración, percolación, escorrentía y evaporación.

Devia et al. (2015) mencionan que estos modelos requieren calibración con datos de campo y registros meteorológicos e hidrológicos extensos, lo que puede hacer su implementación más compleja. Sin embargo, ofrecen ventajas en la evaluación de cambios en el uso del suelo y su impacto en las crecidas, permitiendo realizar análisis más detallados sobre la evolución de los caudales en el tiempo (p. 1003).

Entre los modelos paramétricos más utilizados en la predicción de crecidas se encuentran:

- 1. Stanford Watershed Model IV (SWM):** Este modelo conceptual, desarrollado por Crawford y Linsley en 1966, simula el ciclo hidrológico de una cuenca mediante ecuaciones matemáticas simplificadas. Permite generar hidrogramas horarios o diarios con requerimientos de datos menores en comparación con los modelos distribuidos (Estrela, 1992).
- 2. TOPMODEL:** Un modelo conceptual en el que la topografía de la cuenca y la transmisividad del suelo determinan la generación de escorrentía. Se basa en la relación exponencial negativa entre la capacidad de almacenamiento del suelo y la saturación de la zona subterránea, lo que permite evaluar la influencia del relieve en la generación de caudales extremos (Gil y Tobón, 2016).

2.2.6.2. Aplicaciones de los Modelos Hidrológicos en la Gestión de Crecidas

Los modelos empíricos y paramétricos juegan un papel clave en la planificación y mitigación de eventos extremos (Gil y Tobón, 2016). Entre sus principales aplicaciones se destacan:

- **Pronóstico de crecidas en tiempo real:** Se pueden usar modelos como la ecuación racional para estimar caudales máximos en respuesta a lluvias intensas.
- **Diseño de infraestructuras de control de inundaciones:** Modelos como SWM permiten evaluar el impacto de diques, embalses y canales de derivación en la reducción del riesgo de inundación.
- **Análisis del impacto del cambio climático:** Modelos conceptuales como TOPMODEL ayudan a estimar cómo la variabilidad climática afectará la magnitud y frecuencia de las crecidas en el futuro.
- **Desarrollo de sistemas de alerta temprana:** La combinación de modelos hidrológicos con datos meteorológicos en tiempo real permite generar pronósticos precisos de caudales extremos y emitir alertas a las comunidades vulnerables.

III. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

Según Hernández et al. (2014), la presente investigación es de tipo **cuantitativa** porque se fundamenta en la recopilación y análisis sistemático de datos numéricos hidrológicos (precipitaciones, caudales, niveles de agua, velocidades de flujo, coeficientes de escorrentía) para evaluar objetivamente la relación entre el modelado de crecidas y la prevención de desastres naturales en la cuenca Chancay. Este enfoque metodológico te permite realizar mediciones precisas y reproducibles mediante la aplicación de modelos matemáticos avanzados, simulaciones hidrológicas computacionales y análisis estadísticos multivariados que identifican patrones estadísticamente significativos, correlaciones entre variables hidrometeorológicas y tendencias cuantificables en el comportamiento temporal y espacial de las crecidas. La naturaleza **cuantitativa** se evidencia en el uso de herramientas de modelación numérica, sistemas de información geográfica (SIG), análisis de series temporales y métodos probabilísticos que generan resultados objetivos, medibles y verificables que pueden ser replicados por otros investigadores bajo las mismas condiciones metodológicas. Este paradigma investigativo es fundamental para desarrollar un modelo predictivo confiable y científicamente validado, orientado a la prevención de desastres basado en evidencia empírica sólida, análisis cuantitativos rigurosos y cálculos probabilísticos que permitan la toma de decisiones informadas en la gestión del riesgo hidrológico.

3.2. Nivel de investigación

Siguiendo la clasificación de Hernández et al. (2014), el estudio se ubica en un **nivel explicativo**, ya que busca determinar la relación causa-efecto entre el modelado hidrológico y la prevención de desastres naturales, estableciendo no solo qué variables están relacionadas, sino también cómo y por qué se produce esta relación. A través del análisis riguroso de datos hidrológicos históricos, variables meteorológicas y patrones de comportamiento de crecidas, este estudio pretende demostrar cómo el desarrollo de un modelo de predicción de crecidas puede mejorar significativamente la capacidad de respuesta y planificación en la gestión del riesgo en la cuenca Chancay. El **nivel explicativo** se justifica porque la investigación va más allá de la simple descripción de fenómenos hidrológicos o la correlación entre variables, sino que busca explicar los mecanismos causales que vinculan la implementación de modelos hidrológicos predictivos con la reducción efectiva del riesgo de desastres, identificando las variables intervinientes, los factores

determinantes y las condiciones bajo las cuales esta relación causal se manifiesta de manera más efectiva. Además, este enfoque explicativo permite establecer principios teóricos y metodológicos que pueden ser generalizados a otras cuencas hidrográficas con características similares, contribuyendo al desarrollo del conocimiento científico en el campo de la hidrología aplicada y la gestión integral del riesgo de desastres naturales.

3.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es **no experimental y transversal**. De acuerdo con Hernández et al. (2014), en un diseño no experimental no se manipulan las variables de manera directa, sino que se observan en su entorno natural, lo cual es característico de los estudios hidrológicos donde los fenómenos naturales como precipitaciones, caudales y eventos de crecidas no pueden ser controlados o modificados artificialmente por el investigador. En este caso, se analizarán registros hidrológicos históricos, datos meteorológicos, simulaciones de crecidas y su impacto en la cuenca sin intervenir directamente en los eventos naturales, manteniendo la integridad y autenticidad de los procesos hidrológicos tal como ocurren en la realidad. Además, la investigación tiene un **enfoque transversal**, ya que la recolección de datos se realizará en un único punto en el tiempo, permitiendo analizar la relación entre el modelado hidrológico y la prevención de desastres naturales dentro de un período determinado y específico. Esta característica transversal se justifica porque el estudio busca establecer una "fotografía" temporal del comportamiento hidrológico de la cuenca Chancay, analizando simultáneamente múltiples variables (precipitación, escorrentía, topografía, uso de suelo, vulnerabilidad) en un momento específico para comprender sus interrelaciones y desarrollar el modelo predictivo. El diseño no experimental-transversal es apropiado para este tipo de investigación hidrológica porque permite el análisis integral de sistemas complejos sin alterar las condiciones naturales del entorno, garantizando que los resultados reflejen fielmente el comportamiento real de la cuenca y puedan ser aplicados de manera efectiva en la gestión del riesgo de desastres.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

La población está conformada por los datos hidrológicos de la cuenca Chancay, así como por los registros históricos de crecidas e inundaciones en la zona de estudio.

3.4.2. Muestra

La muestra representa un subconjunto de la población que será analizado en detalle. Para esta investigación, la muestra estará compuesta por registros históricos de crecidas e inundaciones proporcionados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

3.5. Hipótesis

3.5.1. Hipótesis general

La implementación de un modelo hidrológico de crecidas en la cuenca Chancay permitirá mejorar la prevención de desastres naturales en Huaral, optimizando la gestión del riesgo hídrico.

3.5.2. Hipótesis específicas

- a) El uso de un modelo hidrológico mejora la precisión en la predicción de crecidas en la cuenca Chancay, permitiendo una mejor gestión de riesgos.
- b) Las crecidas en la cuenca Chancay tienen un impacto significativo en la infraestructura hidráulica y en la seguridad de la población en Huaral, aumentando el riesgo de daños.
- c) La aplicación de medidas de mitigación basadas en el modelado hidrológico contribuye a reducir los efectos adversos de las inundaciones en la cuenca Chancay.

3.6. Operacionalización de variables

- a) **Variable Independiente (X):** Modelado hidrológico de crecidas
- b) **Variable Dependiente (Y):** Prevención de desastres naturales

Tabla 1

Cuadro de Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	TIPO	NATURALEZA	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Modelado hidrológico de crecidas (X)	Un modelo hidrológico de crecidas es una herramienta matemática que simula y predice el comportamiento de los caudales máximos en una cuenca durante lluvias intensas. Su objetivo principal es estimar el caudal pico y la forma del hidrograma de crecida, integrando datos de precipitación, características físicas de la cuenca y procesos como infiltración y escorrentía. Estas herramientas son esenciales para la gestión de riesgos de inundación, diseño de obras de protección y sistemas de alerta temprana.. Yepes, V. (2024)	Independiente (X)	Cuantitativa	1. Precisión en la predicción de crecidas	-Exactitud de los datos hidrológicos	(%)
					-Capacidad del modelo para predecir eventos extremos	(%)
					-Comparación entre predicciones y eventos reales	(R ²)
				2.Impacto en la infraestructura hidráulica	-Identificación de zonas vulnerables a crecidas	Nº
					-Evaluación de la resistencia de la infraestructura ante crecidas	(%)
				3.Eficiencia de las medidas de mitigación	-Aplicabilidad del modelado	(%)
Prevención de desastres naturales (Y)	La prevención de desastres naturales comprende estrategias y acciones orientadas a reducir el impacto de fenómenos naturales mediante planificación, monitoreo y medidas de mitigación. Busca minimizar daños en, infraestructura y ecosistemas, fortaleciendo la resiliencia y la gestión del riesgo. ONU (2023)	Dependiente (Y)	Cuantitativa	1.Reducción del impacto de las crecidas	-Disminución de áreas afectadas por inundaciones	(km ²)
				2.Gestión del riesgo y toma de decisiones	-Tiempo de respuesta ante crecidas	(hrs)
					-Modelo en planes de prevención	Nº

Nota. Elaboración propia

3.6.1. Dimensiones

Según Valencia Gutiérrez et al. (2023), el concepto de dimensiones se refiere a los componentes o aspectos específicos que conforman una variable compleja. Las dimensiones representan subdivisiones de un concepto o variable que permiten analizarla de manera más precisa y detallada.

Variable independiente (X): Modelado hidrológico de crecidas

- **Dimensión 1: Precisión del modelo,** Se refiere a la capacidad del sistema de modelado hidrológico para generar predicciones exactas y confiables del comportamiento de las crecidas en la cuenca Chancay, considerando la calibración de parámetros, validación estadística y ajuste de los algoritmos de simulación hidrológica.
- **Dimensión 2: Capacidad predictiva,** Es la habilidad del modelo hidrológico para anticipar eventos de crecidas con suficiente tiempo de antelación, incluyendo la estimación de caudales máximos, identificación de períodos críticos y evaluación de escenarios probabilísticos, con el objetivo de optimizar los tiempos de respuesta para la gestión del riesgo.
- **Dimensión 3: Confiabilidad del sistema,** Es el grado de consistencia y estabilidad del modelo hidrológico en diferentes condiciones climáticas e hidrológicas, mediante la evaluación de la robustez estadística, análisis de sensibilidad y validación cruzada, con el objetivo de garantizar resultados consistentes en la predicción de crecidas bajo diversos escenarios meteorológicos.
- **Dimensión 4: Aplicabilidad operativa,** Los resultados son la capacidad de integración del modelo hidrológico en sistemas de gestión del riesgo en tiempo real, considerando la compatibilidad tecnológica, facilidad de implementación y transferencia de conocimiento para su uso efectivo en la toma de decisiones operativas en la cuenca Chancay.

Variable dependiente (Y): Prevención de desastres naturales

- **Dimensión 1: Reducción del impacto de las crecidas,** Evalúa la disminución cuantificable de daños y afectaciones causadas por eventos de inundación en la cuenca. Compara los niveles de pérdidas económicas, sociales y ambientales antes y después de la implementación del sistema de modelado, determinando la efectividad de las medidas preventivas.

- **Dimensión 2: Efectividad de la gestión del riesgo**, Mide y analiza la capacidad de respuesta institucional y comunitaria ante eventos de crecidas a través de la optimización de protocolos de emergencia, sistemas de alerta temprana y coordinación interinstitucional para la reducción de vulnerabilidades.
- **Dimensión 3: Fortalecimiento de la resiliencia**, Implica la mejora sostenible de la capacidad de adaptación y recuperación de la cuenca ante eventos hidrológicos extremos, mediante el desarrollo de infraestructura resiliente, capacitación comunitaria y fortalecimiento de sistemas de preparación y respuesta ante desastres.
- **Dimensión 4: Integración en políticas de gestión territorial**, Evaluación de la incorporación del modelo hidrológico en instrumentos de planificación urbana, ordenamiento territorial y políticas públicas de gestión del riesgo a nivel local, regional y nacional.

3.6.2. Indicadores

Caballero Romero (2014) define los indicadores como elementos especificadores y referenciales que ayudan a precisar, identificar, separar y usar los datos. Pueden medirse directamente de la realidad, por lo general como tasas, por ejemplo: tasas de precipitación, caudales máximos, niveles de vulnerabilidad.

Indicadores independientes:

1. Precisión del modelo:

- Coeficiente de determinación (R^2), [Valor decimal (coeficiente de correlación)].
- Error cuadrático medio (RMSE), [Valor numérico (m^3/s)].
- Índice de Nash-Sutcliffe, [Valor decimal (eficiencia del modelo)].
- Error absoluto medio porcentual (MAPE), [Porcentaje (%)].

2. Capacidad predictiva:

- Tiempo de anticipación de pronósticos, [Valor numérico (horas)].
- Precisión en estimación de caudales máximos, [Porcentaje (%)].
- Identificación de eventos extremos, [Número entero (eventos detectados)].
- Horizonte temporal de predicción confiable, [Valor numérico (días)].

3. Confiabilidad del sistema:

- Consistencia estadística del modelo, [Porcentaje (%)].
- Análisis de sensibilidad de parámetros, [Coeficiente de variación (%)].

- Robustez ante diferentes escenarios climáticos, [Categoría (alta, media, baja)].
- Estabilidad temporal del modelo, [Porcentaje (%)].

4. Aplicabilidad operativa:

- Tiempo de procesamiento computacional, [Valor numérico (minutos)].
- Compatibilidad con sistemas existentes, [Categoría (compatible/no compatible)].
- Facilidad de implementación, [Escala Likert (1-5)].
- Transferibilidad a otras cuencas, [Porcentaje (%)].

Indicadores dependientes:

1. Reducción del impacto de las crecidas:

- Disminución de áreas afectadas por inundaciones, [Área (km²)].
- Reducción de pérdidas económicas, [Porcentaje (%)].
- Disminución de población en riesgo, [Número de habitantes].

2. Efectividad de la gestión del riesgo:

- Tiempo de respuesta ante emergencias, [Valor numérico (horas)].
- Eficiencia de sistemas de alerta temprana, [Porcentaje (%)].
- Cobertura de planes de evacuación, [Porcentaje (%)].

3. Fortalecimiento de la resiliencia:

- Mejoras en infraestructura de protección, [Número de obras].
- Capacitación de población en gestión del riesgo, [Número de personas].
- Desarrollo de capacidades institucionales, [Número de instituciones].

4. Integración en políticas de gestión territorial:

- Incorporación en planes de ordenamiento territorial, [Número de planes].
- Adopción en normativas locales, [Número de ordenanzas].
- Implementación en proyectos de infraestructura, [Número de proyectos].

3.7. Técnicas e instrumentos

Para este estudio, se utilizarán las siguientes técnicas e instrumentos:

a) Técnicas de Recolección de Datos

- **Revisión documental:** Se recopilarán registros históricos de crecidas, informes técnicos, estudios hidrológicos previos y normativas relacionadas con la gestión del agua en la cuenca Chancay.
- **Simulación hidrológica:** Se aplicará un modelo hidrológico computacional para predecir crecidas y evaluar su impacto en la infraestructura y la población.

b) Instrumentos de Recolección de Datos

- Bases de datos hidrometeorológicas de organismos como SENAMHI y la Autoridad Nacional del Agua (ANA).
- Software de modelado hidrológico como Matlab el cual permitirá realizar simulaciones y predicciones de crecidas.
- Fichas de registro de datos históricos de eventos extremos (crecidas e inundaciones).

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para procesar y analizar los datos obtenidos, se emplearán técnicas cuantitativas que permitan interpretar la información hidrológica y evaluar la relación entre el modelado de crecidas y la prevención de desastres.

a) Técnicas de Procesamiento de Datos

- **Limpieza y estructuración de datos:** Se organizarán y depurarán los datos recopilados, eliminando inconsistencias y valores atípicos que puedan afectar el análisis.
- **Georreferenciación de datos:** Se procesarán los datos espaciales en un entorno SIG para identificar áreas de riesgo y patrones de inundación.
- **Simulación hidrológica:** Se ingresarán los datos en el software de modelado para generar escenarios de crecidas y evaluar su impacto en la cuenca.
- **Análisis estadístico:** Se aplicarán técnicas de correlación y regresión para evaluar la precisión del modelo y su capacidad predictiva.

b) Técnicas de Análisis de Datos

- **Estadística descriptiva:** Se calcularán indicadores como medias, desviaciones estándar y tendencias hidrológicas para caracterizar el comportamiento de las crecidas.
- **Análisis de correlación:** Se evaluará la relación entre los factores climáticos y los eventos de crecida en la cuenca.

3.9. Desarrollo de Trabajo de Tesis

3.9.1. Ubicación Geográfica

La cuenca del río Chancay se ubica en la provincia de Huaral, región Lima, en la zona central del Perú. Geográficamente, forma parte de la vertiente del Pacífico y se extiende desde la sierra hasta la costa, atravesando diversos pisos altitudinales. La cuenca abarca zonas altoandinas y áreas costeras, comprendiendo distritos como Atavillos Alto, Atavillos Bajo, Ihuari y Huaral.

Figura 2

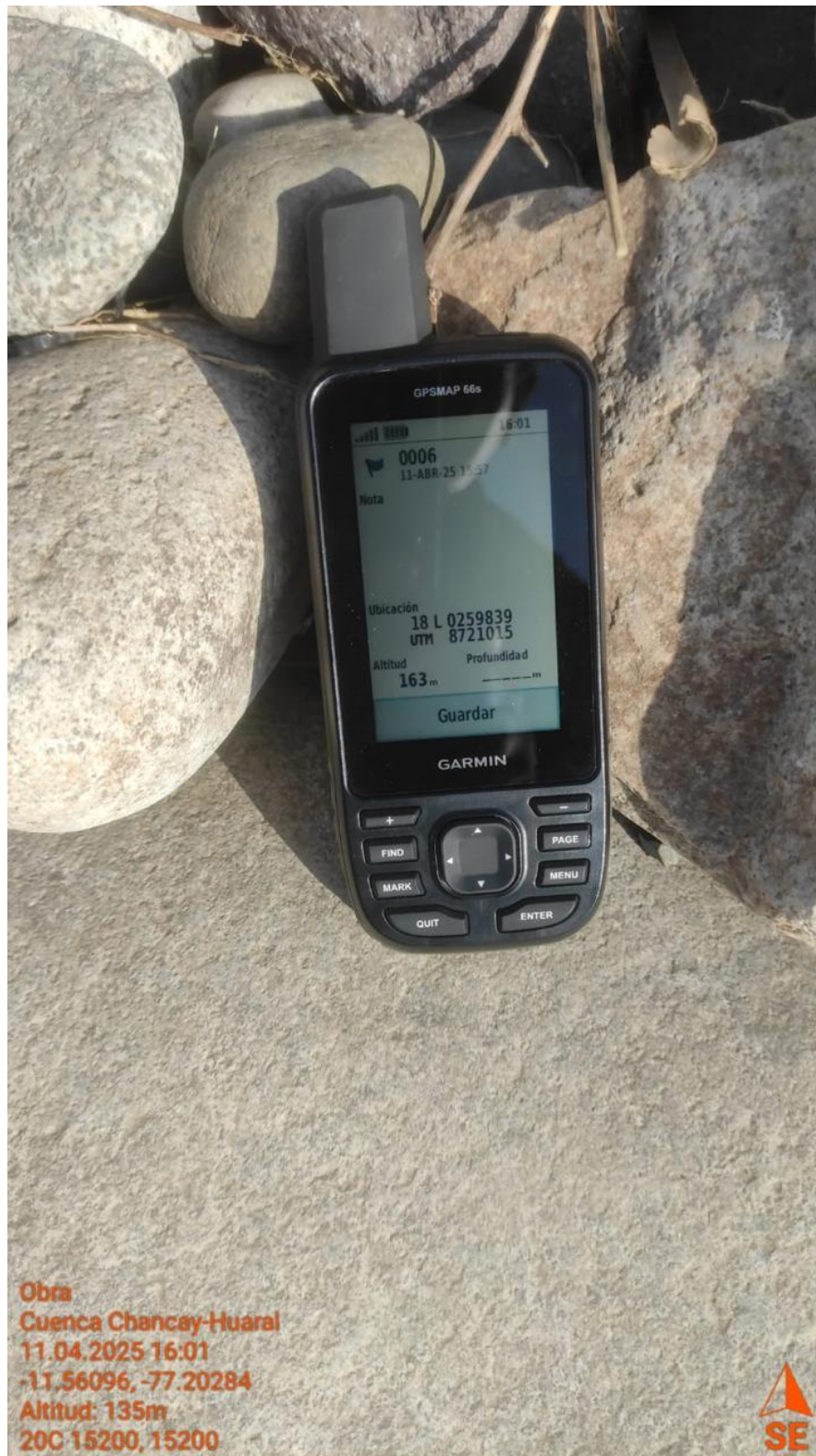
Cuenca Chancay - Huaral



Nota. Elaboración Propia

Figura 3

Registro de coordenadas UTM mediante GPS en la cuenca Chancay – Huaral



Nota. Elaboración Propia

3.9.2. Accesibilidad y vías de comunicación

El acceso principal a la provincia de Huaral se realiza a través de la carretera Panamericana Norte, que cruza entre los kilómetros 54 y 79, formando parte de la red troncal. Además, existen otras rutas como la carretera Chancay – Huaral – Puente Muruhuasi, la cual enlaza con los distritos de la zona altoandina; también está la vía que conecta Huaral con Aucallama, empalmando con la Panamericana Norte a la altura del kilómetro 59.3, y la carretera longitudinal que une Huaral – Acos – Vichaycocha – Huayllay – Cerro de Pasco.

3.9.3. Recopilación de datos

Para la obtención de datos necesarios para el modelado hidrológico en MATLAB, se utilizó como fuente principal el **"Plan de Gestión de Recursos Hídricos de Cuenca Chancay - Huaral"** actualizado al 2023, elaborado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en colaboración con el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.

Este documento técnico oficial proporcionó información detallada y actualizada sobre las características hidrológicas de la cuenca, incluyendo datos de oferta hídrica superficial mensual (promedio histórico y 75% de persistencia), así como información sobre disponibilidad hídrica por componentes (agua superficial, lagunas, agua subterránea, recuperación, aguas servidas y manantiales).

Adicionalmente, el plan brindó datos específicos sobre infraestructura vulnerable, registrando 75 bocatomas totales distribuidas en 39 con riesgo alto y 36 con riesgo muy alto, 16 puentes afectados en zona baja, y 29.3 km de longitud crítica de margen fluvial afectada. El documento también identificó zonas urbanas vulnerables en sectores como La Huaquilla, Pampa Lara, San Cristóbal, Retes, San Isidro, Huando y El Milagro, así como áreas de expansión urbana en Macatón, Contigo Perú, Nuevo Huaral, La Huaca, Santa Elena y La Florida, proporcionando así una base de datos integral para la implementación del modelo hidrológico de predicción de crecidas.

Figura 4

Plan de gestión de recursos hídricos de la Cuenca Chancay-Huaral



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



3.9.4. Red hidrográfica

La cuenca hidrográfica del río Chancay-Huaral se encuentra en la vertiente del Pacífico de la Cordillera de los Andes. Tiene una superficie de drenaje de 3 046,37 km² y una altitud media de 2 727 m s.n.m. El río Chancay-Huaral recorre aproximadamente 89,77 km, presentando una pendiente media de 3,15 %, que aumenta considerablemente en la parte alta y en las quebradas que lo alimentan.

El río nace en la Cordillera de Antajirca, en el flanco occidental de los Andes, a 4 500 m s.n.m. En su trayecto inicial, las aguas se concentran en la planicie de Pishgohuanga (3 920 m s.n.m.) y, tras pasar por Purapa, se precipitan formando el cauce. Más adelante, se une con el río Chuqumpampa cerca de Vichaycocha. Luego recibe las aguas de los ríos Rahuite, Chancan y Challhuacocha. También incorpora las aguas del río Chicrín (proveniente de las lagunas de Chúngar y Cacray, a 3 020 m s.n.m.). En Collpa se mezcla con aguas termales de Santa Catalina, y en Tingo recibe al río Baños (de las lagunas de Aguashuman y Quisha). En Caractama (1 620 m s.n.m.) finaliza su curso superior.

Desde allí, el río desciende por zonas aluviales fértiles, acompañado de la carretera y recibiendo afluentes en ambas márgenes. Los principales tributarios en su tramo medio son los ríos Huátaya y Añasmayo. A 820 m s.n.m. inicia su curso inferior.

Tabla 2

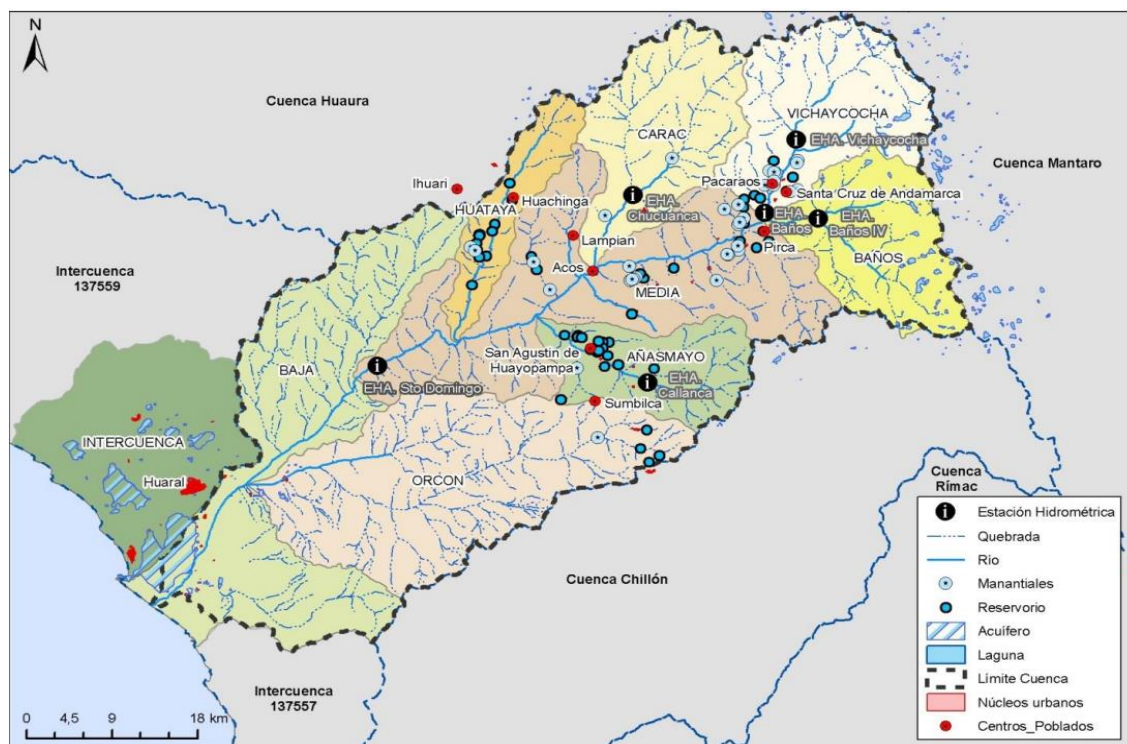
Distribución de las zonas de la cuenca

Zona	Descripción
Alto Huaral	Abarca los ríos Vichaycocha, Chicrín y la quebrada Tambo.
Medio Alto Huaral	Incluye al río Cárcac y los ríos del Alto Huaral.
Medio Huaral	Contiene los ríos Añasmayo y Huátaya, además de los ríos del Medio Alto y el río Chancay.
Medio Bajo Huaral	Incluye el río Chancay, además de los ríos Lumbrá y otros del Medio Huaral.
Bajo Huaral	Comprende la parte final del Chancay y su confluencia con el río Seco.

Nota. Elaboración Propia

Figura 5

Mapa de la cuenca Chancay-Huaral



Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

3.9.5. Riesgos y cambio climático

En la cuenca Chancay Huaral, los eventos naturales más comunes incluyen inundaciones, lluvias intensas, sismos y sequías. Por otro lado, actividades humanas como la construcción de viviendas en zonas peligrosas también incrementan el riesgo. La pobreza es un factor que agrava la vulnerabilidad de esta cuenca frente a desastres asociados a fenómenos extremos. El cambio climático influye directamente en el ciclo del agua y en la disponibilidad del recurso hídrico, lo cual repercute en los ecosistemas y en la producción agrícola. Se han identificado los principales peligros presentes en esta cuenca.

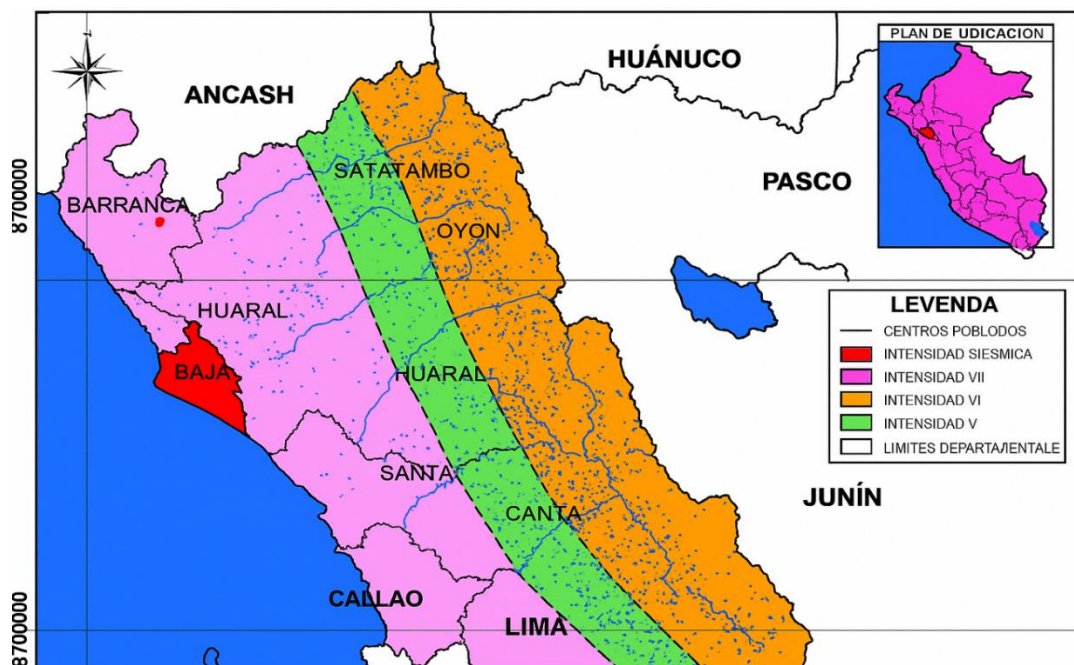
- En la cuenca baja, los peligros naturales identificados son sismos, tsunamis, huaycos, desbordes de ríos, inundaciones y sequías.
- En la cuenca media, los riesgos más relevantes incluyen sismos, lluvias intensas, huaycos, heladas y sequías.
- En la cuenca alta, se registran principalmente heladas, aluviones y desbordes.

Según la Oficina Regional de Defensa Civil (ORCD) y el Plan de Gestión de Recursos Hídricos de la cuenca, los sectores con alta densidad poblacional son más vulnerables ante estos eventos. En la ciudad de Huaral, se han identificado ocho zonas críticas donde se recomienda priorizar acciones de prevención y reducción del riesgo. Estas zonas son: Zona Central, La Huaquilla, Pampa Lara, San Cristóbal, Retes, San Isidro, Huando y El Milagro.

- a) **Sismos:** Huaral y sus alrededores están situados en una llanura aluvial, donde existen pequeñas elevaciones rocosas que actualmente están ocupadas por viviendas. Estas zonas, denominadas AAHHI, son áreas de expansión urbana que incluyen sectores como Macatón, Contigo Perú, Nuevo Huaral, La Huaca, San Isidro, Santa Elena y La Florida. Además, dentro del área urbana, también se encuentran zonas elevadas como los cerros San Cristóbal y La Merced.

Figura 6

Mapa de Clasificación de intensidad sísmica Huaral



Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

En la figura 6 se observa el colapso parcial de un puente vehicular ubicado en la cuenca del río Chancay – Huaral. El daño estructural evidenciado está asociado al impacto de un evento sísmico, que afectó la estabilidad de los elementos de soporte y generó el desplome de una de sus losas principales.

Este tipo de afectaciones resalta la vulnerabilidad de la infraestructura civil ante fenómenos naturales como los sismos, especialmente cuando se combinan con condiciones hidráulicas adversas. La falla estructural no solo interrumpe el tránsito y la conectividad vial, sino que también representa un riesgo potencial para la seguridad de las personas que transitan por la zona o habitan en las inmediaciones del cauce. La figura permite ilustrar visualmente uno de los principales escenarios de riesgo identificados en el análisis de amenazas múltiples en la cuenca, y refuerza la necesidad de integrar evaluaciones sísmicas en el diseño, mantenimiento y priorización de intervenciones sobre infraestructuras estratégicas como puentes, bocatomas y defensas ribereñas.

Figura 7

Fallo estructural de puente tras evento sísmico en la cuenca Chancay – Huaral



Nota. Elaboración Propia

- b) Tsunami (ola de puerto):** Un tsunami es una onda marina generada por un movimiento vertical del fondo del mar, comúnmente debido a un terremoto superficial, una erupción volcánica o el deslizamiento de grandes masas de

material en las pendientes de una fosa oceánica. Es la fase final de un maremoto al impactar la costa. Estudios de simulación para la costa de Lima indican que un sismo de magnitud entre 8,5 y 9,0 Mw podría generar un tsunami cuya primera ola alcanzaría la costa en aproximadamente 18 minutos, con una altura de hasta 8 metros. En algunos casos, la inundación podría llegar a los 14 metros y alcanzar hasta 2 100 metros tierra adentro. Las zonas más vulnerables son las ciudades y caletas en áreas costeras, afectando a la población, su economía e infraestructura.

c) Heladas: Las heladas ocurren cuando la temperatura cerca del suelo desciende por debajo de los 0 °C. Estas se originan por masas de aire frío provenientes del sur o por un enfriamiento excesivo del suelo bajo cielos despejados y secos. Usualmente, las heladas se presentan en horas de la madrugada o al amanecer.

d) Inundaciones: Durante los años en que ocurre el Fenómeno El Niño, las crecidas del río Chancay generan daños importantes, como el colapso de puentes. Estas inundaciones afectan viviendas construidas con adobe, sistemas de alcantarillado, y redes de agua y riego. Además, el estancamiento del agua propicia la aparición de insectos transmisores de enfermedades como el dengue, lo cual perjudica considerablemente a la población. La zona más vulnerable a este tipo de eventos dentro de la cuenca Chancay-Huaral es el sector bajo.

Entre los puentes Palpa y Huaral, en el tramo del río Chancay, se han registrado desbordes estacionales que inundan lateralmente el cauce y afectan áreas agrícolas. Aunque no hay evidencia de daños directos en las zonas urbanas de Huaral, sí existe el riesgo de que el puente Huaral y la vía hacia Lima resulten perjudicados si se presentan caudales inusuales, como los generados por El Niño.

La ciudad de Huaral no cuenta con infraestructura adecuada para enfrentar lluvias fuertes. Muchas viviendas tienen techos planos y materiales frágiles, además de carecer de sistemas de drenaje eficientes, incluso en sus vías principales. La expansión urbana en zonas propensas a inundaciones agrava los niveles de riesgo, especialmente si se consideran los efectos futuros del cambio climático. Finalmente, los sectores más vulnerables a inundaciones

en la cuenca han sido identificados por la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Mayor Chancay Huaral y se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 3

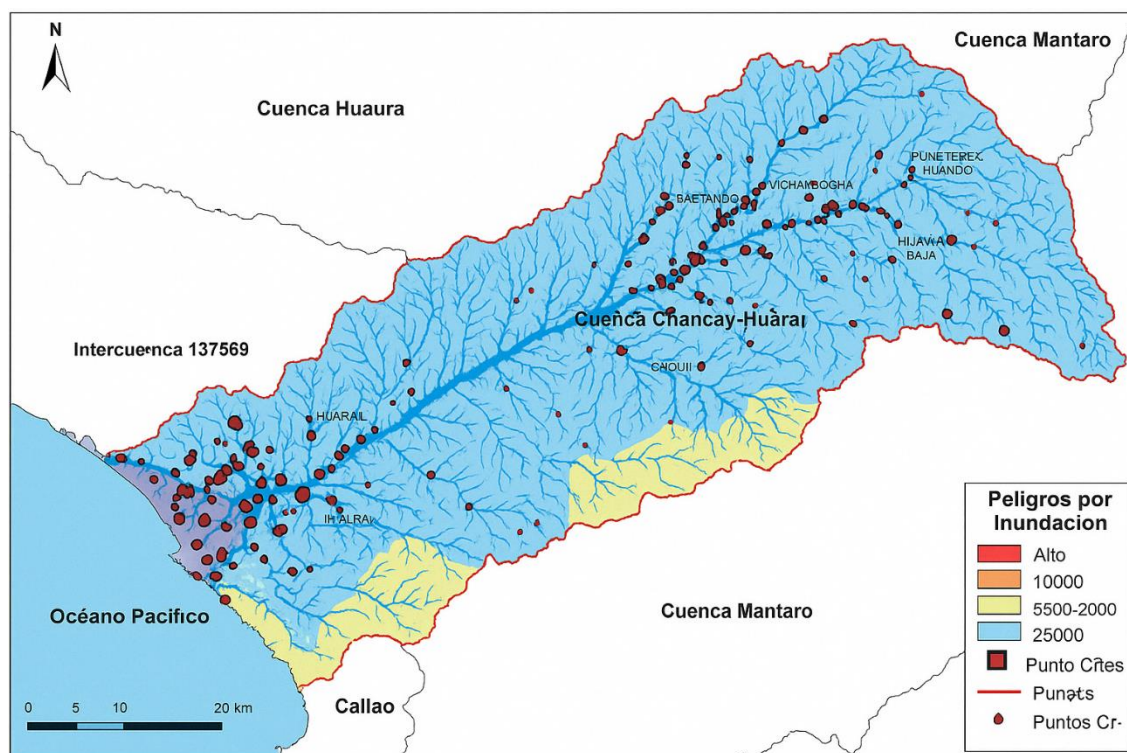
Puntos críticos ante inundaciones en la cuenca baja del río Chancay Huaral

PUNTO	SECTOR	LONGITUD (km)	MARGEN DERECHA	MARGEN IZQUIERDA
1	Pasamayo - Escobar	1 500	-	1 500
2	Las Salinas - Lunavilca	1 000	1 000	-
3	Pasamayo - Nicho	1 000	-	1 000
4	Chancayalto - Pte Huaral	800	800	-
5	Chancayalto - Sta. Rosa	2 000	2 000	-
6	Chancayalto - Canoa	2 000	2 000	-
7	Caqui - Cruce Caqui	3 000	-	3 000
8	Palpa – Rey	2 500	-	2 500
9	Huayan - Mejoreros	2 000	2 000	-
10	Palpa - Sta Rosa Bajo	2 500	-	2 500
11	Huayan - Huayan Bajo 1	1 500	1 500	-
12	Huayan - Huayan Bajo 2	1 000	1 000	-
13	Cuyo - Cuyo Bajo 2	2 000	2 000	-
14	Cuyo - Cuyo Bajo 1	1 500	1 500	-
15	Saume – Quipullin	2 500	-	2 500
16	Saume - Cañamero	2 500	-	2 500
TOTAL		29 300	13 800	15 500

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua.
Fuente (ANA, 2023).

Figura 8

Mapa de inundaciones en la cuenca Chancay-Huaral



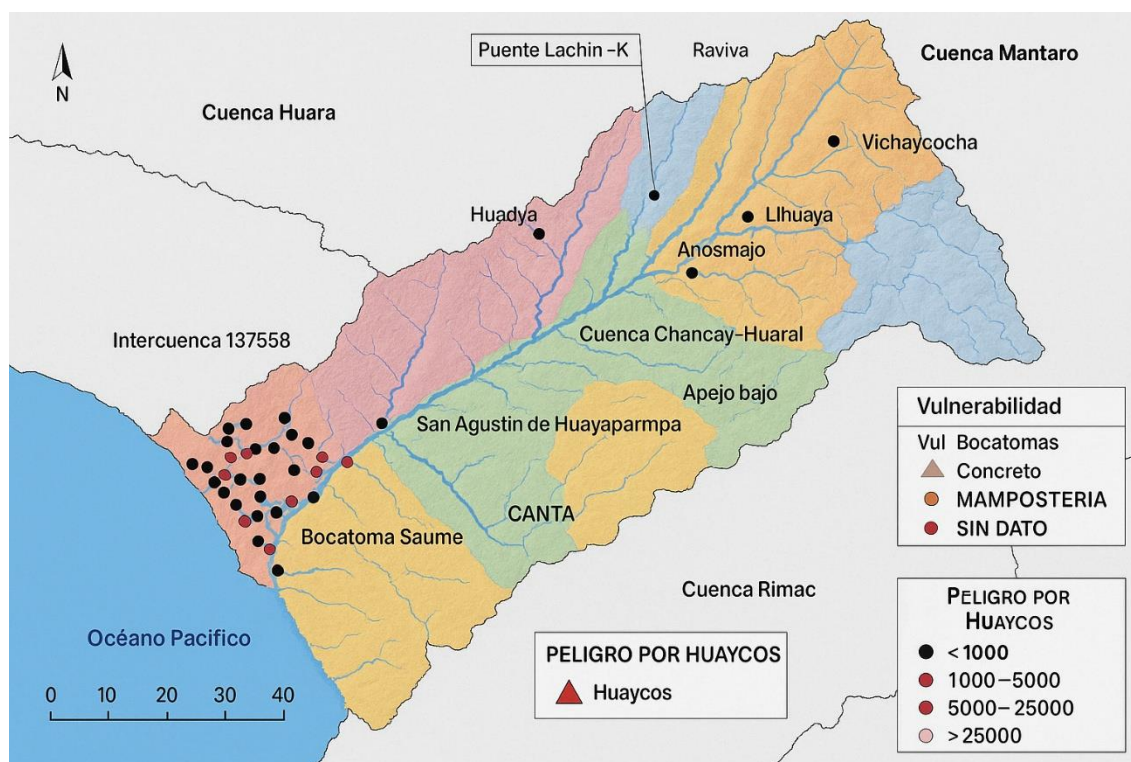
Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua.
Fuente (ANA, 2023).

c) Movimientos de masa (huaycos y deslizamientos): Los huaycos son aluviones de menor escala que ocurren comúnmente en cuencas hidrográficas durante la temporada de lluvias. Los deslizamientos, por su parte, consisten en la ruptura y movimiento de materiales como suelos, rocas o rellenos en pendientes naturales o artificiales. Estos se producen a lo largo de planos o zonas de debilidad estructural. Durante los meses de lluvia intensa (entre noviembre y abril), las quebradas y torrentes en la provincia de Chancay-Huaral se activan. Esto provoca el descenso de lodo, piedras y huaycos con alta fuerza destructiva, que pueden dañar viviendas, carreteras, puentes, y servicios como redes eléctricas, de agua potable y desagüe. Desde el punto de vista geológico y climático, fenómenos como la erosión fluvial, los deslizamientos y derrumbes representan un riesgo para la infraestructura relacionada con el riego y el abastecimiento de agua, especialmente en bocatomas y canales ubicados dentro de los cauces. En la cuenca Chancay-Huaral se han identificado 75 bocatomas en situación de riesgo, de las cuales

39 presentan un nivel de peligro alto y otras 36 un riesgo muy alto, debido a la posibilidad de eventos extremos.

Figura 9

Mapa de riesgos por huaycos en la cuenca Chancay-Huaral



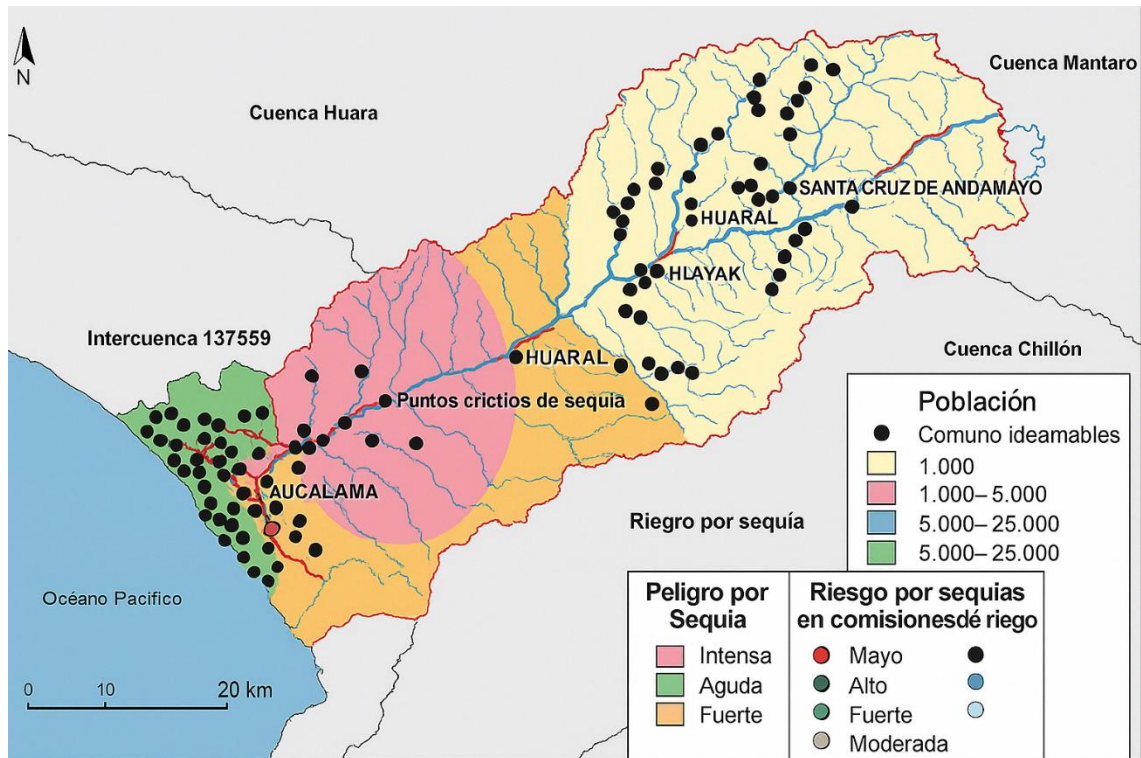
Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

- d) Sequías:** La zona más vulnerable a las sequías se localiza en el valle de la cuenca, debido a la elevada demanda de agua y la baja precipitación en la costa, lo que obliga a depender de los recursos almacenados en la parte alta de la cuenca. En los distritos medios, como Cárac, Huaytaya y Añasmayo, los déficits hídricos durante la sequía pueden superar el 50% de lo requerido. Las comunidades de la cuenca media y alta dependen principalmente de la agricultura y la ganadería, pero carecen de medidas de respuesta y prevención ante sequías. Durante estos periodos, los manantiales disminuyen su caudal, lo que provoca la marchitez de los cultivos y mortalidad en el ganado, generando pérdidas económicas para las familias. En la cuenca baja, donde existe una gran demanda tanto poblacional como agrícola, el racionamiento afecta a ambos grupos de usuarios. El agua destinada al riego

también se restringe, aumentando los intervalos de riego y causando marchitez permanente en los cultivos cuando la sequía es prolongada.

Figura 10

Mapa de zonas vulnerables a la sequía en el valle Chancay - Huaral



Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

- e) Fenómeno El Niño (FEN):** El Fenómeno El Niño es un evento climático de comportamiento cíclico e irregular, que se origina por alteraciones en el movimiento de las corrientes marinas en la zona intertropical. Esto provoca que aguas cálidas se desplacen sobre las aguas frías que normalmente surgen en la corriente de Humboldt. Este fenómeno genera impactos significativos debido a las lluvias intensas, afectando principalmente al continente sudamericano. La temperatura del mar durante este evento puede incrementarse entre 2 °C y 12 °C por encima de lo habitual. En la región Lima, El Niño produce lluvias intensas, huaycos, deslizamientos e inundaciones que perjudican a la población, sus viviendas, servicios e infraestructura. Los registros históricos muestran que este fenómeno ha causado graves afectaciones: en 1982-1983, 61 120 personas resultaron afectadas; en 1997-

1998, el número fue de 21 783 personas; y en el año 2016 se contabilizaron 10 018 personas afectadas.

3.9.6. Gestión de recursos hídricos

La cuenca del río Chancay-Huaral se ubica en la vertiente del Pacífico de la Cordillera de los Andes. Tiene una superficie de drenaje de 3 046,37 km² y una altitud media de 2 727 m s.n.m. Este río cuenta con una longitud aproximada de 89,77 km y una pendiente promedio del cauce de 3,15 %, siendo más pronunciada en la parte alta y en las quebradas que lo alimentan. El río Chancay tiene su origen en la Cordillera de Antajirca, en el lado occidental de los Andes, a una altitud de 4500 m s.n.m.

3.9.6.1. Disponibilidad de los recursos hídricos

La disponibilidad mensual de agua superficial en la cuenca del río Chancay - Huaral es utilizada como base para elaborar el Plan de Aprovechamiento de las Disponibilidades Hídricas (PADH). Este documento es elaborado por la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Chancay – Huaral y enviado a la Administración Local de Agua de la misma cuenca, para luego ser aprobado en el Consejo de Recursos Hídricos.

El cálculo de la disponibilidad de agua al 75 % de persistencia es realizado por la Dirección de Calidad y Evaluación de los Recursos Hídricos (DCERH) de la ANA, utilizando registros de caudales mensuales de la Estación Hidrométrica Santo Domingo durante un periodo de 99 años (1922–2020). La siguiente tabla muestra dicha oferta hídrica para el año agrícola 2021–2022.

Tabla 4

Oferta Hídrica Superficial del Río Chancay–Huaral (hm³)

DESCRIPCIÓN	PROMEDIO HISTÓRICO	75% PERSISTENCIA
AGO	12,46	9,92
SET	12,54	9,78
OCT	14,68	12,03
NOV	18,85	13,71

DIC	31,61	17,71
ENE	60,97	30,91
FEB	90,08	58,06
MAR	123,61	71,30
ABR	65,04	38,41
MAY	28,08	20,62
JUN	16,97	13,47
JUL	13,71	11,10
TOTAL ANUAL	90,14	308,04

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

Este valor de 75 % de persistencia representa una estimación confiable de la cantidad de agua disponible a lo largo del tiempo. Según el análisis hidrológico, la oferta hídrica superficial ha mostrado una tendencia estable. Sin embargo, comparando los periodos agrícolas 2014–2015 y 2021–2022, se evidencia una reducción acumulada de 20,25 hm³ en la oferta hídrica, indicando una tendencia decreciente. Este resultado es producto del análisis histórico de caudales medios mensuales medidos en la estación Santo Domingo.

La tabla 5 muestra la variación anual de la oferta hídrica superficial del río Chancay–Huaral al 75 % de persistencia, expresada en hectómetros cúbicos (hm³), desde la campaña agrícola 2014–2015 hasta la campaña 2021–2022. Se puede observar que, a lo largo de estos años, los valores mensuales han ido reduciéndose gradualmente, lo que evidencia una tendencia decreciente en la disponibilidad de agua superficial.

Durante la campaña 2014–2015, el volumen anual total alcanzó los 328,28 hm³. A partir de entonces, los totales anuales han ido disminuyendo, llegando a 308,04 hm³ en 2021–2022. Este comportamiento sugiere una reducción sostenida en la oferta hídrica, posiblemente relacionada con cambios climáticos o alteraciones en la disponibilidad del recurso en la cuenca.

Tabla 5*Oferta hídrica superficial al 75 % de persistencia (hm³)*

AÑO	2014 – 2015	2015 – 2016	2016 – 2017	2017 – 2018	2018 – 2019	2019 – 2020	2020 – 2021	2021 – 2022
ENE	33,29	32,17	32,17	32,17	31,74	31,74	31,61	31,74
FEB	59,28	58,05	58,05	58,05	58,06	58,06	58,06	58,06
MAR	79,75	75,39	75,39	75,39	73,10	73,10	72,65	71,30
ABR	46,52	41,23	41,23	41,23	44,05	44,05	38,36	38,41
MAY	20,76	20,90	20,90	20,90	20,92	20,92	20,66	20,62
JUN	13,52	13,53	13,53	13,53	13,53	13,53	13,46	13,47
JUL	11,10	11,11	11,11	11,11	11,10	11,10	11,10	11,10
AGO	10,43	10,17	10,17	10,17	9,78	9,78	9,97	9,92
SET	10,13	9,77	9,77	9,77	10,23	10,23	9,97	9,78
OCT	12,00	12,01	12,01	12,01	12,03	12,03	12,03	12,03
NOV	13,44	13,79	13,79	13,79	13,61	13,61	13,61	13,61
DIC	18,06	17,94	17,94	17,94	17,90	17,90	17,94	17,94
TOTAL	328,28	316,06	316,06	316,06	315,94	315,35	309,11	308,04
ANUAL								

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua.
Fuente (ANA, 2023).

De acuerdo con los datos actualizados del Plan Anual de Disponibilidades Hídricas (PADH) 2023, la oferta promedio de agua a un 75 % de persistencia en la cuenca del río Chancay–Huaral es de aproximadamente 320 hm³ (ANA, 2023). El cuadro muestra el desglose mensual de la disponibilidad hídrica para los años 2022 y 2023, incluyendo diversas fuentes: agua superficial, volumen almacenado en lagunas, aguas subterráneas, aguas de recuperación, aguas tratadas y otras fuentes menores como manantiales. La suma total de agua disponible en 2023 fue de 903,51 hm³, considerando todas las fuentes, mientras que el promedio mensual disponible fue de 28,73 m³/s.

A continuación, se muestra el trabajo en campo para validar los datos obtenidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) sobre la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Chancay – Huaral. En la imagen se observa al equipo técnico realizando mediciones directas del caudal mediante técnicas de aforo, lo cual permite contrastar y complementar la información registrada en gabinete.

Figura 11

Trabajo de campo para evaluación de disponibilidad hídrica



Nota. Elaboración Propia

Tabla 6

Disponibilidad hídrica mensual (año 2023)

DISPONIBILIDAD	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	TOTAL ANUAL
Agua superficial al 75% de persistencia	10,49	10,17	12,43	13,94	18,12	32,17	58,69	75,39	42,65	21,26	13,58	11,51	320,4
Volumen almacenado de lagunas	41,00	36,16	30,33	24,19	18,75	14,74	18,99	23,49	28,49	33,49	37,49	35,97	342,57
Agua subterránea	9,42	9,42	9,42	9,12	9,42	8,51	9,42	9,12	9,42	9,42	9,42	9,42	110,93
Agua de recuperación (filtraciones parte baja)	9,14	9,24	9,46	7,34	8,72	8,30	7,88	7,95	9,81	9,09	12,59	13,22	112,74
Aguas servidas tratadas	1,39	1,35	1,39	1,35	1,39	1,26	1,39	1,35	1,39	1,39	1,39	1,39	16,39
Aporte de otras fuentes de agua (manantiales)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,48
Total de agua disponible (hm³)	71,48	66,08	63,07	55,98	56,44	65,81	95,37	117,68	91,46	74,69	74,17	71,28	903,51
Total de agua disponible (m³/s)	26,69	25,49	25,35	21,60	21,07	24,57	39,42	43,94	35,28	27,89	28,61	26,61	28,73

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

3.9.6.2. Volumen de agua disponible en lagunas de gran altitud

Las lagunas ubicadas en la parte alta de la cuenca, junto con el sistema de Lagunas Puajanca, pueden aportar en promedio hasta 64,18 hm³ de agua durante la época de estiaje gracias a su función reguladora. Según el estudio realizado por la Intendencia de Recursos Hídricos del INRENA en 2004, el sistema Puajanca proporciona un caudal medio de 0,29 m³/s, equivalente a un volumen total de 8,94 hm³. La estimación de disponibilidad hídrica, bajo el criterio del 75 % de persistencia, asigna un volumen de 7,00 hm³ proveniente del trasvase de Puajanca, usado en la planificación del Plan de Aprovechamiento de Recursos Hídricos 2021–2022.

Asimismo, la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Mayor Chancay–Huaral indicó que al 30 de junio de 2021 se contaba con 46,45 hm³ de agua acumulada en lagunas. Desde el 1 de julio de ese mismo año, se comenzaron descargas a razón de 1,10 m³/s, previendo una salida de 4,12 hm³. Por lo tanto, para el inicio de agosto, el volumen disponible era de 42,23 hm³, como se detalla en el siguiente cuadro.

Tabla 7

Volúmenes lagunas altoandinas (hm³)

MES		VOLUMEN ALMACENADO (hm ³)	DESCARGA (hm ³)	VOLUMEN DISPONIBLE (hm ³)
ENE	1ERA	24,02	–	24,02
	2DA	30,42	–	30,42
FEB	1ERA	36,95	–	36,95
	2DA	39,65	–	39,65
MAR	1ERA	42,57	–	42,57
	2DA	44,65	–	44,65
ABR	1ERA	45,60	–	45,60
	2DA	46,45	–	46,45
MAY	1ERA	46,45	–	46,45
	2DA	46,45	–	46,45
JUN	1ERA	46,45	–	46,45
	2DA	46,35	–	46,35
JUL	1ERA	46,35	1,43	44,92
	2DA	44,92	2,70	42,23

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

3.9.7. Demanda Hídrica

3.9.7.1. Uso de agua potable urbano

Según datos proporcionados por la Administración Local de Agua Chancay–Huaral, la tabla 8 presenta la demanda poblacional de agua en la provincia de Huaral, distribuida según el tipo de fuente: aguas superficiales, subterráneas, filtraciones y manantiales de la parte alta de la cuenca. Esta información refleja los derechos otorgados para uso poblacional y permite estimar un volumen total anual de 19,14 hm³ destinado al consumo urbano.

Tabla 8

Demanda de agua poblacional en la cuenca Chancay–Huaral por fuente de agua (hm³)

Demanda	Superficial	Subterránea	Filtraciones	Manantiales	Total
AGO	0,977	0,1872	0,4079	0,0531	16,252
SET	0,9455	0,1811	0,3948	0,0514	15,728
OCT	0,977	0,1872	0,4079	0,0531	16,252
NOV	0,9455	0,1811	0,3948	0,0514	15,728
DIC	0,977	0,1872	0,4079	0,0531	16,252
ENE	0,977	0,1872	0,4079	0,0531	16,252
FEB	0,8825	0,169	0,3684	0,048	14,679
MAR	0,977	0,1872	0,4079	0,0531	16,252
ABR	0,9455	0,1811	0,3948	0,0514	15,728
MAY	0,977	0,1872	0,4079	0,0531	16,252
JUN	0,9455	0,1811	0,3948	0,0514	15,728
JUL	0,977	0,1872	0,4079	0,0531	16,252
TOTAL ANUAL	115,035	22,038	48,029	0,6253	19,136

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

3.9.7.2. Uso agrícola

Para la campaña agrícola 2021–2022 en la cuenca del río Chancay–Huaral, el Plan de Aprovechamiento de los Recursos Hídricos ha estimado una demanda de

agua para uso agrícola de 269,45 hm³. Este valor se ha determinado en base a los derechos de uso consignados en el Plan de Cultivo y Riego vigente, información que fue proporcionada por la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Mayor Chancay–Huaral.

La tabla 9 presenta la distribución mensual de la demanda de agua destinada al riego agrícola en la campaña 2021–2022 dentro de la cuenca del río Chancay–Huaral. Esta demanda se divide en cuatro componentes: volumen proveniente de la licencia de uso del sistema Santo Domingo, volumen de constancia, aguas subterráneas y filtraciones. La mayor proporción del recurso utilizado corresponde al volumen autorizado en Santo Domingo, con un total de 207,55 hm³, seguido por las filtraciones (46,48 hm³), aguas subterráneas (13,35 hm³) y volúmenes por constancia (2,07 hm³). En conjunto, la demanda hídrica agrícola alcanzó un total de 269,45 hm³ en el periodo evaluado.

Tabla 9

Demanda de agua de cultivos campaña 2021–2022 (hm³)

DEMANDA	Volumen Licencia Santo Domingo	Volumen Constancia	Agua Subterránea	Filtraciones	TOTAL
AGO	8,99	0,28	1,13	2,06	9,27
SET	8,80	0,32	1,10	2,02	9,11
OCT	10,89	0,34	1,13	2,49	11,23
NOV	11,69	0,24	1,10	2,65	11,94
DIC	15,90	0,15	1,13	3,56	16,05
ENE	29,07	0,09	1,13	4,69	29,16
FEB	32,30	0,07	1,02	7,18	32,37
MAR	34,35	0,07	1,13	7,36	34,44
ABR	24,79	0,09	1,10	5,52	24,88
MAY	14,70	0,09	1,13	3,28	14,81
JUN	9,03	0,11	1,10	2,03	9,15
JUL	7,05	0,12	1,13	1,60	7,21
TOTAL (hm³)	207,55	2,07	13,35	46,48	269,45

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua.

Fuente (ANA, 2023).

3.9.7.3. Uso industrial

Las actividades industriales dentro de la cuenca del río Chancay–Huaral se concentran principalmente en las zonas bajas y en la intercuenca. En cuanto a los derechos de uso de agua asignados a este sector, la Administración Local de Agua Chancay–Huaral ha otorgado un volumen anual de 3,5859 hm³, que corresponde a 44 derechos de uso. De este total, 3,5346 hm³ se destinan a fuentes de agua subterránea y 0,0515 hm³ a filtraciones. La distribución mensual de estos volúmenes puede verse en la tabla 10.

Tabla 10

Demanda en uso industrial (hm³)

FUENTE	Agua Subterránea	Filtraciones	TOTAL
AGO	0,3002	0,0044	0,3046
SET	0,2712	0,0039	0,2751
OCT	0,3002	0,0044	0,3046
NOV	0,2905	0,0042	0,2947
DIC	0,3002	0,0044	0,3046
ENE	0,2905	0,0042	0,2947
FEB	0,3002	0,0044	0,3046
MAR	0,3002	0,0044	0,3046
ABR	0,2905	0,0042	0,2947
MAY	0,3002	0,0044	0,3046
JUN	0,2905	0,0042	0,2947
JUL	0,3002	0,0044	0,3046
TOTAL (hm³)	35,346	0,0515	35,861

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

3.9.7.4. Uso minero

En la intercuenca ubicada entre Huaral y Huacho, las actividades mineras están asociadas a la empresa Minera Colquisiri, especializada en la extracción de metales. Aunque no se cuenta con datos precisos sobre su cercanía a fuentes

hídricas, se conoce que implementa un sistema de recirculación de agua en sus procesos.

La tabla 11 muestra los volúmenes mensuales de agua autorizados para uso minero en la cuenca, desagregados según el origen del recurso: agua superficial y filtraciones. De acuerdo con la información disponible, la mayor parte del volumen autorizado corresponde al uso de agua superficial, con un total anual de 2,1005 hm³, mientras que las filtraciones representan 1,0785 hm³. En conjunto, la demanda hídrica total para actividades mineras asciende a 3,1790 hm³ anuales, distribuidos regularmente durante los doce meses.

Tabla 11

Demanda en uso minero (hm³)

FUENTE	Agua Superficial	Filtraciones	TOTAL
AGO	0,1784	0,10664	0,2850
SET	0,1726	0,08860	0,2612
OCT	0,1784	0,10664	0,2850
NOV	0,1726	0,08860	0,2612
DIC	0,1784	0,10664	0,2850
ENE	0,1784	0,10664	0,2850
FEB	0,1611	0,08270	0,2438
MAR	0,1784	0,00160	0,1800
ABR	0,1726	0,08860	0,2612
MAY	0,1784	0,10664	0,2850
JUN	0,1726	0,08860	0,2612
JUL	0,1786	0,10664	0,2850
TOTAL (hm³)	21,005	10,785	31,790

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

3.9.7.5. Uso energético

El uso del agua con fines hidroenergéticos se clasifica como no consuntivo, lo que significa que el recurso no se consume, ya que es restituido en su totalidad aguas abajo de las centrales hidroeléctricas. No obstante, este proceso puede alterar el régimen de escorrentía natural del río en el tramo intervenido. Por ello, se exige

conservar un caudal ecológico, que asegure la continuidad del flujo y la protección de los ecosistemas en dicho tramo.

En la cuenca del río Chancay – Huaral, se han otorgado derechos de uso de agua para generación energética a 17 centrales hidroeléctricas pequeñas y medianas. Según la información reportada por la Administración Local de Agua Chancay – Huaral, el volumen total autorizado alcanza los 562,200 hm³ anuales.

Tabla 12

Demanda de uso energético (hm³)

FUENTE	Agua superficial	TOTAL
AGO	28,25	28,25
SET	31,21	31,21
OCT	41,05	41,05
NOV	48,03	48,03
DIC	50,36	50,36
ENE	58,19	58,19
FEB	68,03	68,03
MAR	91,62	91,62
ABR	54,48	54,48
MAY	34,17	34,17
JUN	29,83	29,83
JUL	26,98	26,98
TOTAL (hm³)	562,200	562,200

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

3.9.7.6. Uso piscícola

En la cuenca del río Chancay – Huaral se ha registrado la existencia de una empresa dedicada a la piscicultura en la zona de Los Molinos, ubicada en el distrito de Atavillos Alto, bajo la jurisdicción de la Comunidad Campesina de Huarochín. Esta empresa posee una licencia para utilizar agua superficial, con un caudal autorizado de 150 litros por segundo, lo que equivale a un volumen anual de 4,73 hm³.

Adicionalmente, la Piscícola Rosell cuenta con una autorización para el uso de agua de manantial, proveniente del distrito de Pacaraos. El caudal asignado es de 5 litros por segundo, lo que representa un volumen anual de 0,1577 hm³. Sumando ambas fuentes, el volumen total asignado para uso piscícola asciende a 4,888 hm³.

Tabla 13

Demanda de uso piscícola (hm³)

FUENTE	Agua superficial	Manantiales	TOTAL
AGO	0,4018	0,0134	0,4152
SET	0,3888	0,013	0,4018
OCT	0,4018	0,0134	0,4152
NOV	0,3888	0,013	0,4018
DIC	0,4018	0,0134	0,4152
ENE	0,4018	0,0134	0,4152
FEB	0,3629	0,0121	0,3750
MAR	0,4018	0,0134	0,4152
ABR	0,3888	0,013	0,4018
MAY	0,4018	0,0134	0,4152
JUN	0,3888	0,013	0,4018
JUL	0,4018	0,0134	0,4152
TOTAL (hm³)	4,73	0,1577	4,888

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

3.9.7.7. Caudal ecológico (hm³)

Según lo establecido en el informe técnico elaborado por la ANA (ANA, 2023), se determina un caudal ecológico de 300 litros por segundo para la cuenca del río Chancay - Huaral, lo cual equivale a un volumen anual de 9,466 hm³. Esta estimación se basa en el 10% del caudal promedio registrado durante la temporada de estiaje, que es de 3,0 m³/s. Los valores mensuales detallados se presentan en la tabla 14.

Tabla 14*Caudal ecológico (hm³)*

FUENTE	Agua superficial
AGO	0,804
SET	0,778
OCT	0,804
NOV	0,778
DIC	0,804
ENE	0,804
FEB	0,726
MAR	0,804
ABR	0,778
MAY	0,804
JUN	0,778
JUL	0,804
TOTAL (hm³)	9,466

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua.
Fuente (ANA, 2023).

3.9.7.8. Balance hídrico

Dado que se cuenta con información más reciente, el balance hídrico se ha calculado utilizando los datos del Plan Anual de Disponibilidades Hídricas (PADH) 2023 los cuales se encuentra en el informe técnico de disponibilidad hídrica de la ANA (2023), sin incluir el aporte proveniente de las lagunas altoandinas. La base de este cálculo se encuentra detallada en la tabla 15, donde se han estimado los valores mensuales de déficit o superávit para cada fuente de agua (superficial, subterránea, entre otras). Bajo este contexto, se identificó un déficit hídrico en tres meses consecutivos de agosto a octubre del 2023 por un total de 0,752 hm³. Este resultado resalta la necesidad de almacenar agua durante las temporadas lluviosas para afrontar los periodos de escasez.

Tabla 15

Balance de la cuenca Chancay-Huaral (hm)

Descripción	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	TOTAL
Río Chancay Huaral (oferta superficial)	10,490	10,170	12,430	13,940	18,120	32,170	58,690	75,390	42,650	21,260	13,580	11,510	320,400
Uso poblacional (superficial)	0,513	0,496	0,513	0,496	0,513	0,513	0,463	0,513	0,496	0,496	0,496	0,513	6,038
Uso agrícola (licencias + constancias)	9,281	9,123	11,237	11,948	16,067	29,185	32,400	34,468	24,906	14,821	9,154	7,216	209,806
Uso industrial (superficial)	0,097	0,094	0,097	0,094	0,097	0,094	0,097	0,097	0,094	0,097	0,094	0,097	1,143
Uso energético (superficial)	19,997	22,094	29,059	34,002	35,649	41,192	48,157	64,858	38,570	24,191	21,120	19,098	397,987
Uso piscícola (superficial)	0,403	0,390	0,403	0,390	0,403	0,403	0,364	0,403	0,390	0,403	0,390	0,403	4,745
Uso pecuario (superficial)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,024
Caudal ecológico	0,084	0,788	0,084	0,788	0,084	0,804	0,726	0,804	0,778	0,804	0,778	0,804	8,756
Déficit/superávit (superficial)	-0,206	-0,323	-0,223	0,622	0,637	1,569	25,011	39,506	16,374	5,024	3,056	2,878	93,925
Disponibilidad hídrica subterránea	9,424	9,120	9,424	9,120	9,424	8,512	9,424	9,120	9,424	9,120	9,424	9,120	110,960
Demanda agua subterránea (total)	1,891	1,881	1,891	1,881	1,891	1,894	1,793	1,891	1,881	1,894	1,793	1,894	22,575
Déficit/superávit (subterránea)	7,533	7,239	7,533	7,239	7,533	6,618	7,631	7,229	7,543	7,226	7,631	7,226	88,385
Disponibilidad hídrica recuperación filtraciones	9,140	9,240	9,460	7,340	8,720	8,300	7,880	7,950	9,810	9,090	12,590	13,220	112,740

Demanda filtraciones (total)	2,531	2,482	2,964	3,416	6,452	8,519	7,623	6,509	5,901	4,605	3,637	3,015	57,654
Déficit/superávit (filtraciones)	6,609	6,758	6,496	3,924	2,268	-0,219	0,257	1,441	3,909	4,485	8,953	10,205	55,086
Disponibilidad otras fuentes (manantiales)	0,042	0,040	0,042	0,040	0,042	0,040	0,042	0,040	0,042	0,040	0,042	0,040	0,492
Demanda agua de manantiales (total)	0,071	0,069	0,071	0,069	0,071	0,069	0,071	0,069	0,071	0,069	0,071	0,069	0,840
Déficit/superávit (manantiales)	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,348
TOTAL oferta agua (todas las fuentes)	28,100	28,570	31,356	30,440	36,306	49,022	76,112	92,500	61,824	34,510	35,136	33,890	567,770
TOTAL demanda de agua (todas las fuentes)	13,997	13,551	16,582	17,044	25,096	39,331	49,611	52,428	38,889	25,085	20,220	18,936	330,770
Déficit/superávit global mensual	14,103	15,019	14,774	13,396	11,210	9,691	26,501	40,072	22,935	9,425	14,916	14,954	237,000

Nota. Tomado del informe técnica realizado por la Autoridad Nacional del Agua. Fuente (ANA, 2023).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Modelo hidrológico de crecidas

La cuenca del río Chancay – Huaral presenta antecedentes de crecidas que afectan a la población y a la infraestructura hidráulica. Por ello, se plantea el desarrollo de un modelo hidrológico que permita representar el comportamiento del caudal durante eventos extremos, con base en datos reales de precipitación y caudales históricos. Este modelo se elabora utilizando la información hidrológica disponible del SENAMHI y la ANA, y considera parámetros como la oferta hídrica mensual, la pendiente del cauce, la longitud del río y la delimitación de subcuencas. La modelación permite simular escenarios de crecida y estimar el caudal pico, lo cual facilita la identificación de zonas vulnerables. Los resultados obtenidos servirán como base para el análisis de riesgo y la evaluación de posibles medidas de mitigación que contribuyan a reducir el impacto de las inundaciones en el ámbito de estudio.

A continuación, se realiza un análisis mensual de la oferta hídrica superficial del río Chancay – Huaral utilizando datos reales del documento base (Tabla 4). Su objetivo es comparar el promedio histórico mensual con la oferta hídrica bajo un escenario de persistencia del 75 %, para identificar la reducción en la disponibilidad de agua.

```
%% ANÁLISIS HIDROLÓGICO MENSUAL - CUENCA CHANCAY HUARAL
% Basado en datos reales del documento (Tabla 4 - Oferta Hídrica Superficial)

clear; clc; close all;

%% DATOS DE OFERTA HÍDRICA (hm³)
meses = {'Ago', 'Set', 'Oct', 'Nov', 'Dic', 'Ene', 'Feb', 'Mar', 'Abr', 'May', 'Jun', 'Jul'};
oferta_promedio = [12.46, 12.54, 14.68, 18.85, 31.61, 60.97, 90.08, 123.61, 65.04, 28.08, 16.97, 13.71];
oferta_75 = [9.92, 9.78, 12.03, 13.71, 17.71, 30.91, 58.06, 71.30, 38.41, 20.62, 13.47, 11.10];

%% GRÁFICO COMPARATIVO DE OFERTA HÍDRICA
figure;
bar(categorical(meses), [oferta_promedio; oferta_75]', 'grouped');
ylabel('Oferta hídrica (hm³)');
title('Oferta Hídrica Superficial Mensual - Río Chancay Huaral');
legend('Promedio histórico', '75% de persistencia', 'Location', 'northwest');
grid on;
```

```

%% CÁLCULO DE VARIACIÓN PORCENTAJE ENTRE PROMEDIO Y 75% DE
PERSISTENCIA
variacion = ((oferta_promedio - oferta_75) ./ oferta_promedio) *
100;

%% MOSTRAR RESULTADOS EN CONSOLA
fprintf('Mes\tPromedio\t75%% Persistencia\tReducción (%%)\n');
for i = 1:length(meses)
    fprintf('%s\t%.2f\t\t%.2f\t\t%.2f%%\n',          meses{i},
oferta_promedio(i), oferta_75(i), variacion(i));
end

%% ANÁLISIS SIMPLE DE DISPONIBILIDAD
total_promedio = sum(oferta_promedio);
total_75 = sum(oferta_75);
fprintf('\nTOTAL ANUAL PROMEDIO: %.2f hm³\n', total_promedio);
fprintf('TOTAL ANUAL 75%% PERSISTENCIA: %.2f hm³\n', total_75);
fprintf('DISMINUCIÓN ANUAL: %.2f hm³ (%.2f%%)\n', ...
        total_promedio - total_75, ((total_promedio -
total_75)/total_promedio)*100);

```

El código presentado sigue la siguiente secuencia:

1. Limpieza del entorno

La primera línea (clear; clc; close all;) limpia la memoria de trabajo, borra lo que había en la consola y cierra cualquier gráfico anterior, para trabajar con un entorno limpio.

2. Ingreso de los datos

Se define la lista de los meses y se colocan los valores reales de oferta de agua en hectómetros cúbicos (hm³) que se encuentran en el documento:

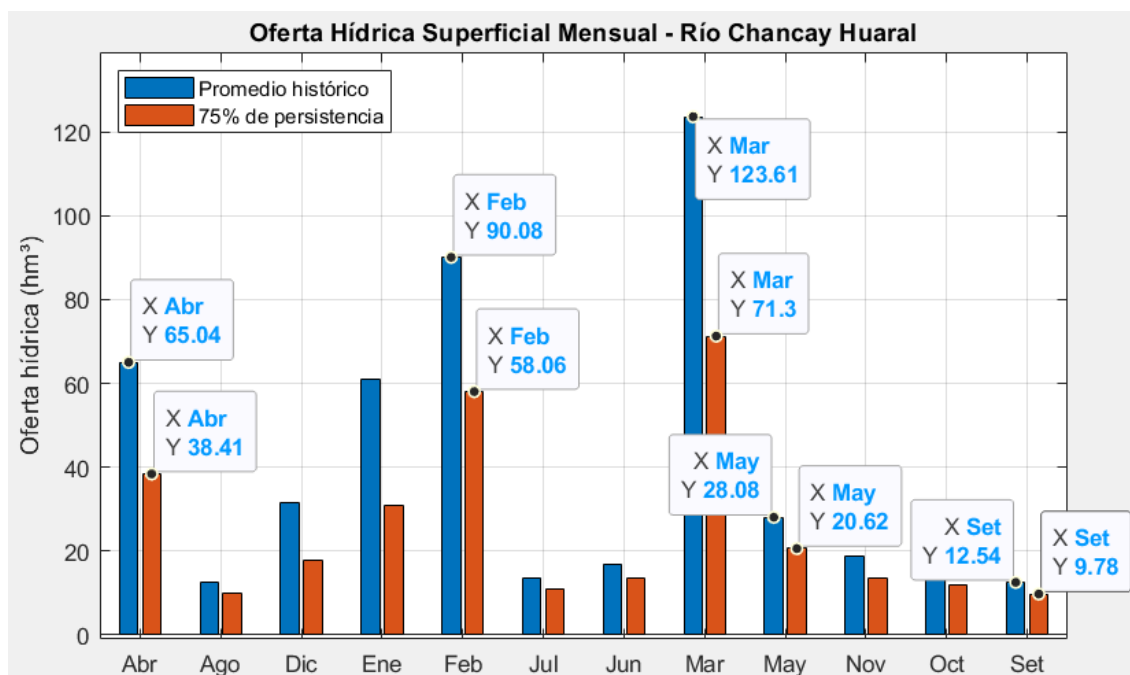
- oferta_promedio: muestra cuánta agua hay disponible cada mes según los datos históricos.
- oferta_75: muestra cuánta agua estaría disponible si solo se considera el 75% de los datos (para un análisis más seguro).

3. Comparación visual

El código genera un gráfico de barras que compara ambos conjuntos de datos (promedio vs. 75% de persistencia), para observar visualmente qué tanto varía la oferta hídrica mes a mes.

Figura 4

Oferta Hídrica Superficial Mensual - Río Chancay Huaral



Nota. Elaboración Propia

La figura 11 muestra la comparación mensual entre la oferta hídrica superficial promedio histórica y la correspondiente al 75% de persistencia en la cuenca del río Chancay – Huaral. Se observa que los mayores volúmenes de agua se concentran entre los meses de enero y abril, destacando marzo con una oferta promedio de 123,61 hm³ y febrero con 90,08 hm³.

En todos los meses del año, la oferta bajo el escenario de persistencia del 75% es menor que el promedio, lo que indica una reducción significativa en la disponibilidad de agua bajo condiciones más conservadoras. Por ejemplo, en marzo, la diferencia entre ambos escenarios alcanza más de 50 hm³. Esta tendencia resalta la importancia de planificar la gestión del recurso considerando escenarios de menor disponibilidad, especialmente durante la temporada de lluvias.

4. Cálculo de la diferencia en porcentaje

Se calcula cuánto se reduce el agua disponible cuando pasamos del promedio al escenario del 75%. Esto se hace mes por mes y se expresa en porcentaje.

5. Impresión de resultados

Se imprime una tabla en la consola con tres datos por mes:

- Cuánta agua hay en promedio.
- Cuánta habría en el escenario del 75%.
- Cuánto representa la reducción en porcentaje.

6. Análisis anual

Finalmente, se suman todos los valores del año para saber cuánta agua habría en total bajo cada escenario, y se calcula cuánta agua menos se tendría en el año si se toma el valor del 75% en vez del promedio.

Figura 5

Análisis de disponibilidad

Mes	Promedio	75% Persistencia	Reducción (%)
Ago	12.46	9.92	20.39%
Set	12.54	9.78	22.01%
Oct	14.68	12.03	18.05%
Nov	18.85	13.71	27.27%
Dic	31.61	17.71	43.97%
Ene	60.97	30.91	49.30%
Feb	90.08	58.06	35.55%
Mar	123.61	71.30	42.32%
Abr	65.04	38.41	40.94%
May	28.08	20.62	26.57%
Jun	16.97	13.47	20.62%
Jul	13.71	11.10	19.04%

TOTAL ANUAL PROMEDIO: 488.60 hm³

TOTAL ANUAL 75% PERSISTENCIA: 307.02 hm³

DISMINUCIÓN ANUAL: 181.58 hm³ (37.16%)

Nota. Elaboración Propia

La figura 8 presenta un resumen numérico del análisis de la oferta hídrica superficial mensual en la cuenca del río Chancay – Huaral. Se comparan los valores del promedio histórico con los correspondientes al 75% de persistencia, calculando además la reducción porcentual en cada mes. Se observa que los meses con mayor diferencia entre ambos escenarios corresponden al periodo de lluvias, como diciembre, enero, febrero y marzo, donde la reducción supera el 40%. En marzo, por ejemplo, la disminución alcanza los 52.31 hm³, lo que representa una reducción del

42.32%. Esta situación refleja la alta variabilidad del recurso en los meses más críticos.

A nivel anual, el total promedio de oferta hídrica asciende a 488.60 hm³, mientras que bajo el escenario del 75% de persistencia se reduce a 307.02 hm³. Esto representa una disminución de 181.58 hm³, equivalente al 37.16% del volumen total, lo cual evidencia una significativa pérdida de disponibilidad en un escenario más conservador.

Con el fin de mejorar la predicción de crecidas en la cuenca del río Chancay durante el año 2023, se desarrolló un código en MATLAB que integra los distintos componentes de la disponibilidad hídrica mensual. A partir de estos datos, se identifica cuáles son los meses con mayor volumen total de agua disponible y se estima el posible caudal pico, con el objetivo de anticipar escenarios de riesgo y tomar decisiones preventivas.

```
%% OPTIMIZACIÓN DE LA PREDICCIÓN DE CRECIDAS - CUENCA CHANCAY
(2023)
% Basado en disponibilidad hídrica mensual total por componente
(Tabla 6 - ANA 2023)

clear; clc; close all;

%% DATOS DE ENTRADA (hm³)
meses =
{'Ago', 'Set', 'Oct', 'Nov', 'Dic', 'Ene', 'Feb', 'Mar', 'Abr', 'May', 'Jun',
'Jul'};
agua_superficial_75 =
[10.49, 10.17, 12.43, 13.94, 18.12, 32.17, 58.69, 75.39, 42.65, 21.26, 13.58,
11.51];
volumen_lagunas =
[41.00, 36.16, 30.33, 24.19, 18.75, 14.74, 18.99, 23.49, 28.49, 33.49, 37.49,
35.97];
agua_subterranea =
[9.42, 9.42, 9.42, 9.12, 9.42, 8.51, 9.42, 9.12, 9.42, 9.42, 9.42, 9.42];
agua_recuperacion =
[9.14, 9.24, 9.46, 7.34, 8.72, 8.30, 7.88, 7.95, 9.81, 9.09, 12.59, 13.22];
aguas_servidas =
[1.39, 1.35, 1.39, 1.35, 1.39, 1.26, 1.39, 1.35, 1.39, 1.39, 1.39, 1.39];
manantiales = repmat(0.04, 1, 12);

%% CÁLCULO DEL TOTAL MENSUAL DE AGUA DISPONIBLE
agua_total = agua_superficial_75 + volumen_lagunas +
agua_subterranea + ...
agua_recuperacion + aguas_servidas + manantiales;

%% VISUALIZACIÓN DE LOS COMPONENTES
figure('Name', 'Distribución mensual por fuente');
```

```

area(categorical(meses), ...
    [agua_superficial_75' volumen_lagunas' agua_subterranea'
    agua_recuperacion' aguas_servidas' manantiales'], ...
    'LineStyle', 'none');
ylabel('Volumen mensual (hm³)');
title('Distribución mensual del agua disponible por fuente -
Cuenca Chancay (2023)');
legend({'Agua superficial', 'Lagunas', 'Agua
subterránea', 'Recuperación', 'Aguas tratadas', 'Manantiales'}, ...
    'Location', 'northeastoutside');
grid on;

%% DETECCIÓN DE MESES CON MAYOR RIESGO DE CRECIDA
% Se considera que los meses con mayor volumen total tienen mayor
riesgo potencial de crecidas
[vol_ordenado, idx_ordenado] = sort(agua_total, 'descend');
meses_riesgo = meses(idx_ordenado(1:3));

%% RESULTADOS
fprintf('\nOPTIMIZACIÓN DE PREDICCIÓN DE CRECIDAS - CUENCA CHANCAY
(2023)\n');
fprintf('-----\n');
fprintf('Meses con mayor volumen total de agua disponible:\n');
for i = 1:3
    fprintf('%s: %.2f hm³\n', meses_riesgo{i}, vol_ordenado(i));
end

%% PREDICCIÓN SIMPLIFICADA DEL CAUDAL PICO POTENCIAL (proporcional
al volumen total)
% Factor de conversión estimado para fines comparativos (no
hidráulico real)
factor_caudal = 0.4; % m³/s por hm³
caudal_estimado = agua_total * factor_caudal;

figure('Name', 'Caudal estimado a partir de volumen mensual');
plot(categorical(meses), caudal_estimado, '-o', 'LineWidth', 2);
ylabel('Caudal estimado (m³/s)');
title('Estimación del caudal pico mensual a partir del volumen
disponible');
grid on;

```

El código presentado sigue la siguiente secuencia:

1. Carga los datos

El código empieza cargando los datos de agua disponibles cada mes, según diferentes fuentes:

- Agua superficial (ríos) al 75% de persistencia.
- Volumen de agua almacenada en lagunas.
- Agua subterránea.

- Agua recuperada (por filtraciones).
- Aguas residuales tratadas.
- Agua de manantiales.

Todos estos valores están en hectómetros cúbicos (hm³) y corresponden al año 2023.

2. Suma el agua total de cada mes

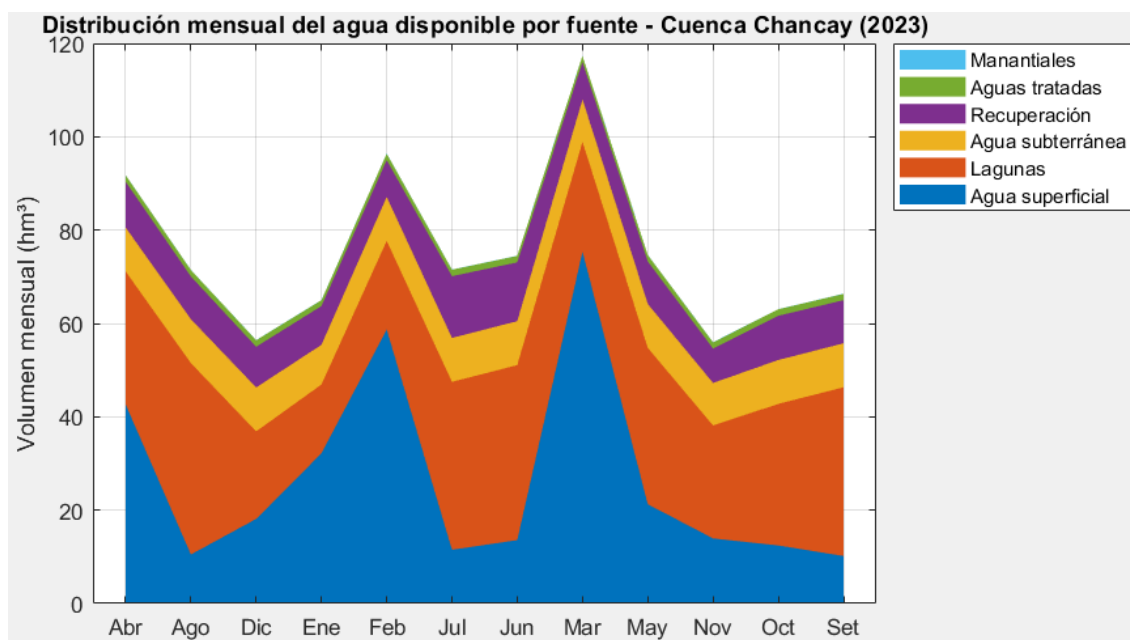
Después, se suman todas esas fuentes para saber cuánto agua hay disponible en total en cada mes del año.

3. Muestra un gráfico

El código dibuja un gráfico de área donde se ve claramente qué cantidad aporta cada fuente de agua mes a mes. Esto ayuda a visualizar de dónde proviene el agua en cada temporada.

Figura 6

Distribución mensual del agua disponible por fuente - Cuenca Chancay (2023)



Nota. Elaboración Propia

4. Detecta los meses más críticos

Luego, el código busca cuáles son los tres meses con más agua disponible. Esto es importante porque más volumen de agua puede significar más riesgo de crecida si no se gestiona adecuadamente.

5. Imprime los resultados

Se muestra en pantalla cuáles son esos tres meses con mayor volumen de agua, junto con sus valores.

6. Estima un caudal aproximado

Por último, el código hace una estimación del caudal (en metros cúbicos por segundo) para cada mes, tomando como base el volumen total disponible.

Figura 7

Meses con mayor volumen total de agua disponible

OPTIMIZACIÓN DE PREDICCIÓN DE CRECIDAS - CUENCA CHANCAY (2023)

Meses con mayor volumen total de agua disponible:

Mar: 117.34 hm³

Feb: 96.41 hm³

Abr: 91.80 hm³

Nota. Elaboración Propia

La figura 14 muestra los tres meses del año 2023 que concentraron el mayor volumen total de agua disponible en la cuenca del río Chancay, considerando el aporte combinado de fuentes superficiales, almacenamientos en lagunas, aguas subterráneas, aguas de recuperación, aguas tratadas y manantiales. Los resultados indican que marzo registró el volumen más alto con 117.34 hm³, seguido de febrero con 96.41 hm³ y abril con 91.80 hm³. Estos meses coinciden con la temporada de lluvias en la región, lo que incrementa significativamente la disponibilidad hídrica y, por tanto, el riesgo de crecidas.

El siguiente código permite analizar cómo la oferta hídrica mensual en la cuenca del río Chancay – Huaral podría verse afectada por distintos escenarios de

cambio climático. A partir de los datos reales del año 2023 (Tabla 4 del informe ANA), se calcula el impacto de posibles reducciones del recurso hídrico del 10 %, 20 % y 30 % respecto al valor del 75 % de persistencia. Además, se generan gráficos que ayudan a visualizar las variaciones y se identifica el mes más crítico en un escenario de alta afectación.

```
%% ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO - CUENCA
CHANCA Y HUARAL
% Basado en la Tabla 4 del informe técnico (ANA, 2023)

%% DATOS DE OFERTA HÍDRICA (hm³)
meses =
{'Ago', 'Set', 'Oct', 'Nov', 'Dic', 'Ene', 'Feb', 'Mar', 'Abr', 'May', 'Jun',
'Jul'};
oferta_promedio = [12.46, 12.54, 14.68, 18.85, 31.61, 60.97,
90.08, 123.61, 65.04, 28.08, 16.97, 13.71];
oferta_75 = [9.92, 9.78, 12.03, 13.71, 17.71, 30.91, 58.06, 71.30,
38.41, 20.62, 13.47, 11.10];

%% ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO
reduccion_10 = oferta_75 * 0.90;
reduccion_20 = oferta_75 * 0.80;
reduccion_30 = oferta_75 * 0.70;

%% GRÁFICO DE BARRAS COMPARATIVO
figure;
bar(categorical(meses), [oferta_promedio; oferta_75]', 'grouped');
ylabel('Oferta hídrica (hm³)');
title('Comparación Promedio Histórico vs 75% Persistencia');
legend('Promedio histórico', '75% de persistencia', 'Location',
'northwest');
grid on;

%% GRÁFICO DE LÍNEAS - ESCENARIOS DE REDUCCIÓN
figure;
plot(1:12, oferta_75, '-ok', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(1:12, reduccion_10, '--*b', 'LineWidth', 1.5);
plot(1:12, reduccion_20, '--sg', 'LineWidth', 1.5);
plot(1:12, reduccion_30, '--^r', 'LineWidth', 1.5);
xticks(1:12); xticklabels(meses);
xlabel('Mes');
ylabel('Oferta hídrica (hm³)');
title('Escenarios de Cambio Climático - Cuenca Chancay Huaral');
legend('75% Persistencia', '-10%', '-20%', '-30%', 'Location',
'northeast');
grid on;

%% GRÁFICO DE ÁREA ACUMULATIVA
figure;
area(1:12, [oferta_75; reduccion_10; reduccion_20;
reduccion_30]');
xlabel('Mes');
ylabel('hm³ acumulados');
```

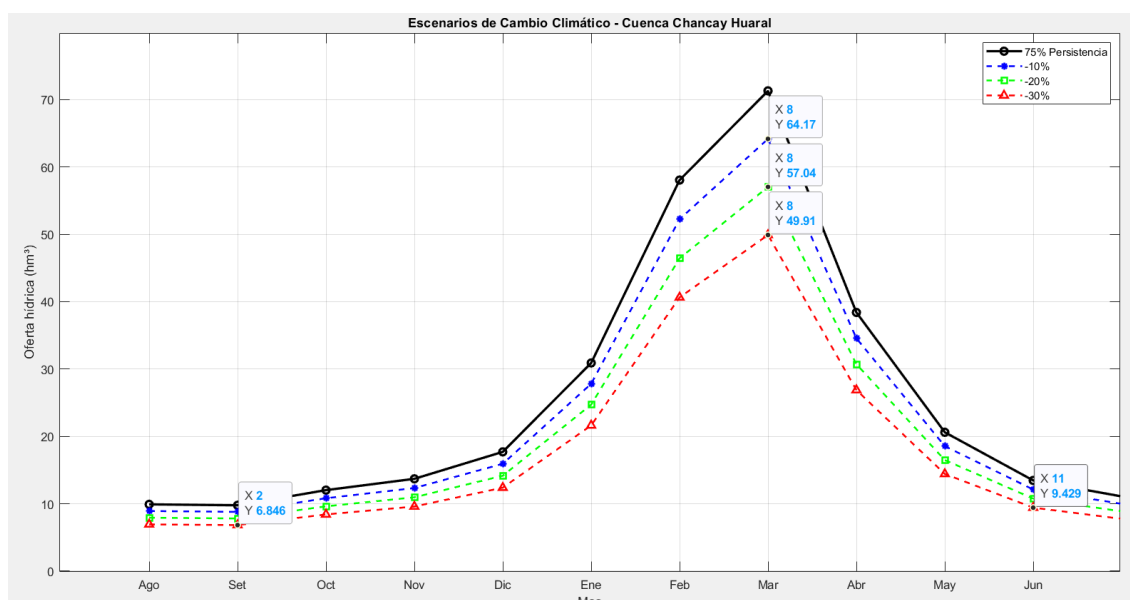

4. Muestra gráficos comparativos

Se generan varios gráficos:

- Un gráfico de barras que compara el promedio histórico con el valor del 75 %.
- Un gráfico de líneas que muestra cómo caería el agua en los distintos escenarios de reducción.
- Un gráfico de área que permite ver de forma acumulada la pérdida progresiva de agua mes a mes.

Figura 8

Escenarios de Cambio Climático - Cuenca Chancay Huaral



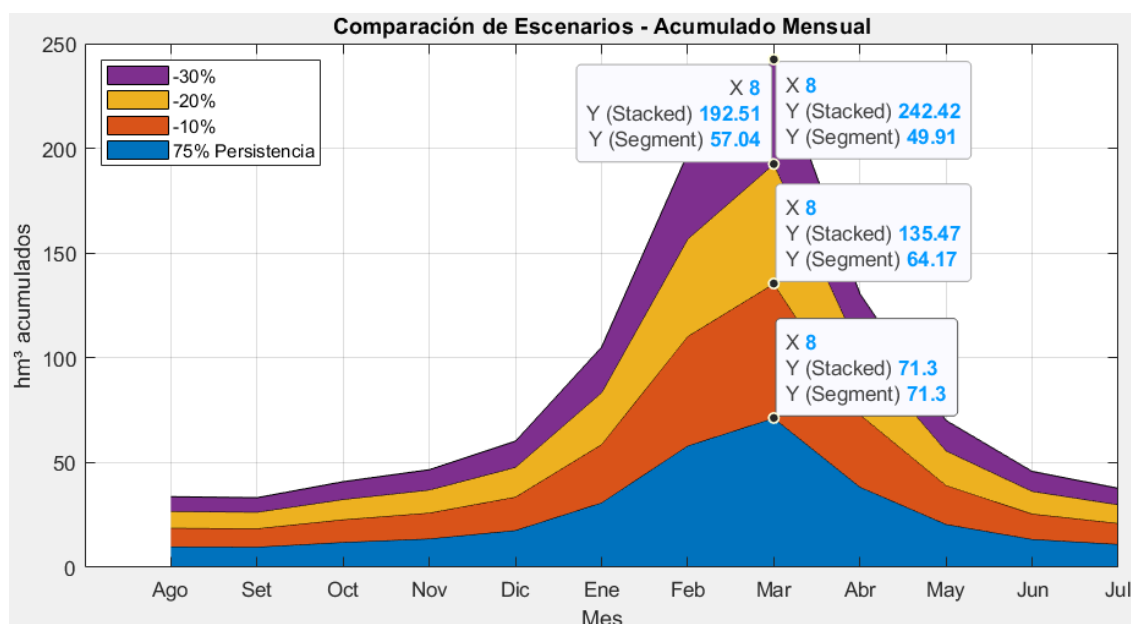
Nota. Elaboración Propia

La figura 15 presenta una comparación de la oferta hídrica mensual en la cuenca del río Chancay – Huaral bajo cuatro escenarios: la oferta al 75 % de persistencia y tres escenarios hipotéticos de reducción del recurso hídrico en un 10 %, 20 % y 30 %, respectivamente, como posibles efectos del cambio climático. Se observa que durante los meses de febrero a abril se concentra la mayor disponibilidad de agua. Sin embargo, en todos los escenarios de reducción se evidencia una caída progresiva del volumen disponible, siendo marzo el mes más sensible con valores que varían desde 71.30 hm³ (75 % de persistencia) hasta 49.91 hm³ en el escenario de mayor reducción (–30 %).

La figura 16 muestra una representación gráfica acumulada de la oferta hídrica mensual en la cuenca del río Chancay – Huaral bajo distintos escenarios de reducción por cambio climático: –10 %, –20 % y –30 % respecto al valor base del 75 % de persistencia.

Figura 9

Comparación de Escenarios - Acumulado Mensual



Nota. Elaboración Propia

Cada capa del gráfico representa una disminución progresiva del recurso hídrico, lo cual permite visualizar de forma clara cómo se reduce el volumen total disponible conforme se agrava el escenario. El mes de marzo vuelve a destacar como el punto máximo de acumulación, alcanzando 242.42 hm³ en el escenario base (75 %) y descendiendo hasta 192.51 hm³ en el escenario más crítico (–30 %).

5. Suma el total anual

El código también calcula cuánta agua habría en total durante todo el año en cada escenario. Esto permite ver de forma clara cuánto se perdería en volumen si se dieran condiciones más secas.

6. Encuentra el mes más crítico

Además, identifica el mes con menos agua en el peor escenario (reducción del 30 %), que sería el mes más vulnerable ante una posible escasez o una demanda elevada.

7. Guarda los resultados

Por último, todos los resultados se guardan automáticamente en un archivo Excel (.csv) para poder revisarlos o usarlos en un informe o presentación.

Figura 10

Criticidad por escenario climático

COMPARACIÓN ANUAL POR ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO:

Escenario	Total Anual (hm ³)	Reducción (hm ³)	Reducción (%)
75% Persistencia	307.02	--	--
-10% Clima	276.32	30.70	10.00%
-20% Clima	245.62	61.40	20.00%
-30% Clima	214.91	92.11	30.00%

Mes más crítico bajo -30% de reducción: Set con 6.85 hm³

Nota. Elaboración Propia

La figura 17 presenta un resumen comparativo del total anual de oferta hídrica en la cuenca del río Chancay – Huaral bajo cuatro escenarios: el valor base del 75 % de persistencia y tres escenarios de reducción del 10 %, 20 % y 30 %, simulando posibles efectos del cambio climático.

Se observa que, en el escenario más crítico (-30 %), la oferta hídrica anual se reduciría de 307.02 hm³ a 214.91 hm³, lo que representa una pérdida de 92.11 hm³, equivalente al 30 %. A su vez, se identifica que el mes más afectado en este escenario sería septiembre (Set), con una disponibilidad reducida a solo 6.85 hm³, lo cual representa un punto de alta vulnerabilidad para la gestión del recurso.

4.2. Impacto de las crecidas en la infraestructura hidráulica y población

Las crecidas registradas en la cuenca del río Chancay – Huaral generan efectos negativos tanto en la infraestructura hidráulica como en la seguridad de la población. Estos eventos, que ocurren con mayor frecuencia en la temporada de lluvias, pueden provocar daños directos en bocatomas, puentes, canales y otras estructuras ubicadas en zonas vulnerables.

Este apartado describe las principales afectaciones reportadas, así como las zonas urbanas expuestas al riesgo de inundación, con base en información técnica y registros de campo. El análisis permite identificar los puntos críticos y estimar el nivel de impacto que tendrían futuras crecidas si no se aplican medidas de prevención o protección adecuadas.

El siguiente código fue elaborado para analizar el impacto que pueden generar las crecidas en la infraestructura hidráulica y en la población de la cuenca del río Chancay – Huaral. A partir de datos reales reportados por la ANA en 2023, se identifican las estructuras en riesgo, así como las zonas urbanas vulnerables. Además, se generan gráficos que permiten visualizar el nivel de afectación y se calcula el porcentaje de infraestructura comprometida ante posibles eventos de inundación.

```
%% ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS CRECIDAS EN INFRAESTRUCTURA Y
POBLACIÓN - HUARAL
% Basado en datos reales del informe ANA (2023)

clear; clc; close all;

%% DATOS DE INFRAESTRUCTURA EN RIESGO
bocatomas_totales = 75;
bocatomas_riesgo_alto = 39;
bocatomas_riesgo_muy_alto = 36;

puentes_zona_baja = 16; % Puntos críticos según ANA
longitud_total_afectada_km = 29.3;

%% DATOS DE POBLACIÓN Y SECTORES CRÍTICOS
zonas_urbanas_criticas = {'Zona Central', 'La Huaquilla', 'Pampa
Lara', 'San Cristóbal', ...
                           'Retes', 'San Isidro', 'Huando', 'El
Milagro'};
sectores_expansion_urbana = {'Macatón', 'Contigo Perú', 'Nuevo
Huaral', ...
                             'La Huaca', 'San Isidro', 'Santa
Elena', 'La Florida'};
```

```

total_zonas_afectadas = length(zonas_urbanas_criticas) +
length(sectores_expansion_urbana);

%% VISUALIZACIÓN DE RIESGO EN BOCATOMAS
figure;
data_bocatomas = [bocatomas_riesgo_alto,
bocatomas_riesgo_muy_alto];
bar(data_bocatomas, 'FaceColor', [0.2 0.6 0.8]);
set(gca, 'xticklabel', {'Riesgo Alto', 'Riesgo Muy Alto'},
'FontSize', 10);
ylabel('Cantidad de bocatomas');
title('Bocatomas en riesgo por crecidas - Cuenca Chancay Huaral');
grid on;
text(1:length(data_bocatomas), data_bocatomas,
string(data_bocatomas), ...
'VerticalAlignment', 'bottom', 'HorizontalAlignment', 'center',
'FontWeight', 'bold');
legend('Bocatomas afectadas');

%% GRÁFICO PIE DETALLADO DE ZONAS URBANAS EN RIESGO
figure;
labels = [zonas_urbanas_criticas, sectores_expansion_urbana];
categorias = [repmat({'Zonas Críticas'}, 1,
length(zonas_urbanas_criticas)), ...
repmat({'Zonas de Expansión'}, 1,
length(sectores_expansion_urbana))];
grupo1 = strcmp(categorias, 'Zonas Críticas');
colores = [repmat([0.85 0.33 0.10], sum(grupo1), 1); repmat([0.30
0.75 0.93], sum(~grupo1), 1)];

pie(ones(size(labels)), labels);
title('Zonas urbanas vulnerables ante crecidas');
legend(categorias, 'Location', 'bestoutside');

%% GRÁFICO ADICIONAL - INFRAESTRUCTURA TOTAL
figure;
infra = [bocatomas_riesgo_alto, bocatomas_riesgo_muy_alto,
puentes_zona_baja];
categorias_infra = {'Bocatomas Riesgo Alto', 'Bocatomas Muy Alto',
'Puentes Afectados'};
barh(infra, 0.5);
set(gca, 'yticklabel', categorias_infra, 'FontSize', 10);
xlabel('Cantidad de estructuras afectadas');
title('Infraestructura hidráulica en riesgo - Zona Baja de Huaral');
grid on;
xlim([0 max(infra)+5]);
text(infra + 0.5, 1:length(infra), string(infra), 'FontWeight',
'bold');

%% ANÁLISIS NUMÉRICO EN CONSOLA
fprintf('Total de bocatomas en riesgo: %d (Alto: %d, Muy Alto:
%d)\n', ...
bocatomas_totales, bocatomas_riesgo_alto,
bocatomas_riesgo_muy_alto);

fprintf('Total de puentes en zona baja con riesgo por crecidas:
%d\n', puentes_zona_baja);

```

```
fprintf('Longitud total de margen fluvial afectada: %.1f km\n',
longitud_total_afectada_km);
fprintf('Total de zonas urbanas y de expansión con alta
vulnerabilidad: %d\n', total_zonas_afectadas);

%% IMPACTO RELATIVO
impacto_infraestructura = (bocatomas_riesgo_alto +
bocatomas_riesgo_muy_alto) / bocatomas_totales * 100;
fprintf('Porcentaje de infraestructura hidráulica (bocatomas) en
riesgo: %.2f%%\n', impacto_infraestructura);
```

El código presentado sigue la siguiente secuencia:

1. Limpia el entorno

El código comienza eliminando datos anteriores y cerrando cualquier gráfico abierto, para trabajar desde cero.

2. Registra los datos sobre infraestructura

Se indican cuántas bocatomas existen en total, y de esas, cuántas están en riesgo alto o muy alto. También se señala cuántos puentes podrían verse afectados y cuántos kilómetros de margen del río están expuestos a crecidas.

3. Registra las zonas urbanas vulnerables

El código guarda una lista de zonas urbanas y de expansión que se encuentran cerca del río y que podrían verse afectadas si ocurre una crecida. Esto incluye tanto áreas ya consolidadas como nuevas zonas en crecimiento.

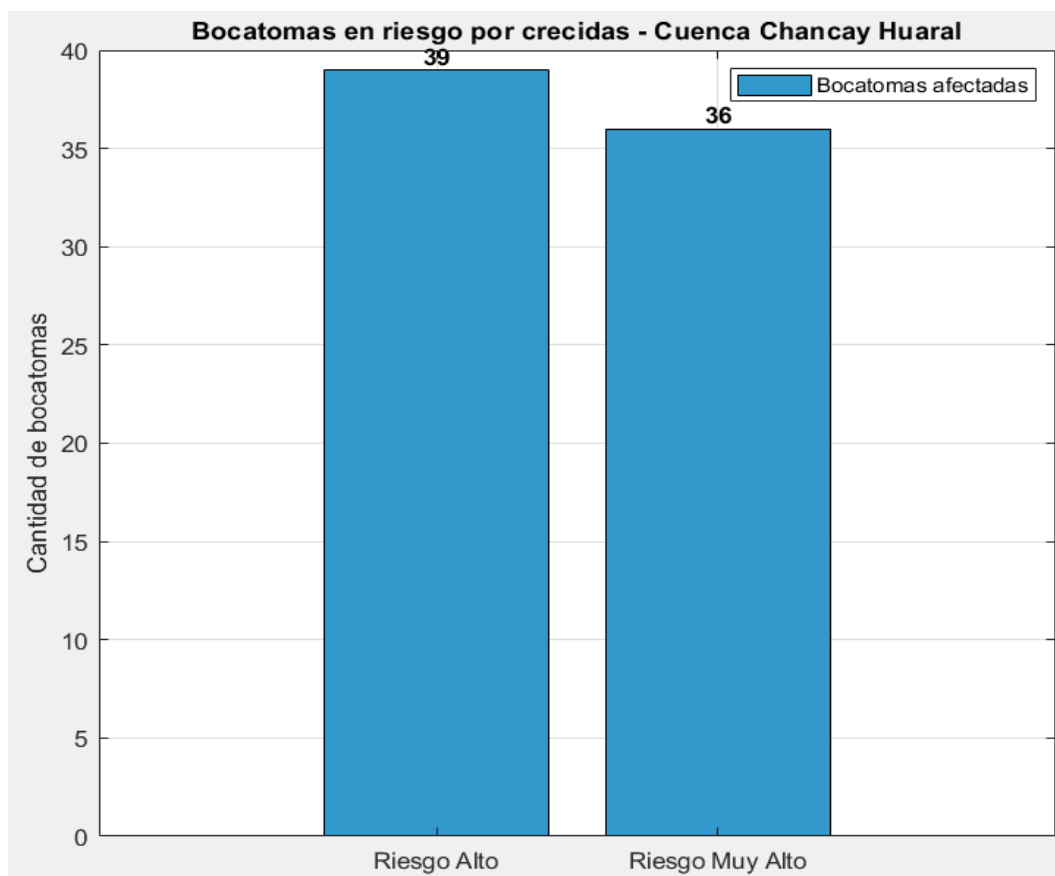
4. Muestra un gráfico de barras de bocatomas en riesgo

Aquí se visualiza la cantidad de bocatomas expuestas, diferenciando entre riesgo alto y muy alto. Es útil para ver rápidamente dónde están los mayores puntos de vulnerabilidad.

La figura 18 muestra la cantidad de bocatomas identificadas en situación de riesgo frente a crecidas en la cuenca del río Chancay – Huaral, según los registros técnicos del año 2023. Se distinguen dos niveles de riesgo: alto y muy alto. Del total de 75 bocatomas evaluadas, 39 se encuentran clasificadas en riesgo alto y 36 en riesgo muy alto. Esto significa que prácticamente todas las bocatomas de la zona están expuestas a algún nivel de afectación ante eventos hidrológicos extremos

Figura 11

Bocatomas en riesgo por crecidas - Cuenca Chancay Huaral



Nota. Elaboración Propia

5. Muestra un gráfico circular de zonas urbanas vulnerables

Se crea un gráfico tipo pastel que muestra las zonas críticas y de expansión urbana en peligro. Esto ayuda a tener una visión general del número de sectores poblados que estarían en riesgo.

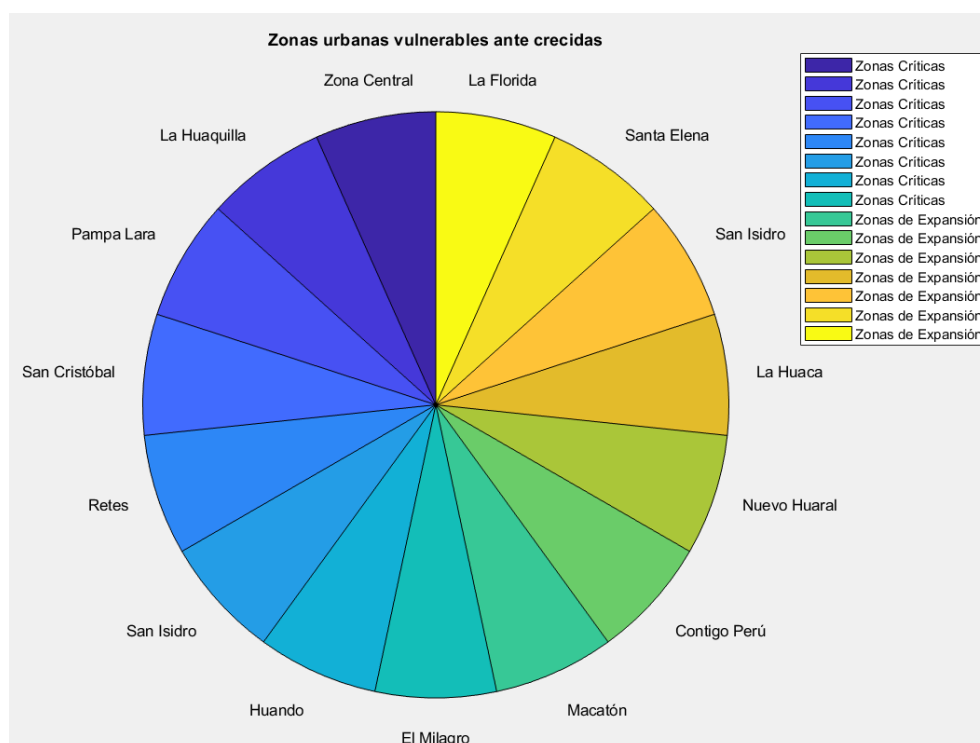
La figura 19 representa las zonas urbanas de la cuenca del río Chancay – Huaral que presentan vulnerabilidad frente a crecidas. Se diferencian dos categorías: zonas críticas, que corresponden a áreas urbanas consolidadas con antecedentes de afectación, y zonas de expansión, que se encuentran en proceso de crecimiento urbano y que, por su ubicación, también están expuestas a riesgos.

En total se identifican 15 sectores vulnerables: 8 zonas críticas, entre las que destacan Zona Central, La Huaquilla, Pampa Lara, San Cristóbal y Huando; y 7 zonas

de expansión, como Macatón, Contigo Perú, Nuevo Huaral y Santa Elena. La distribución circular permite visualizar de forma clara la proporción de áreas consolidadas y en expansión que podrían ser impactadas ante eventos de inundación.

Figura 12

Zonas urbanas vulnerables ante crecidas



Nota. Elaboración Propia

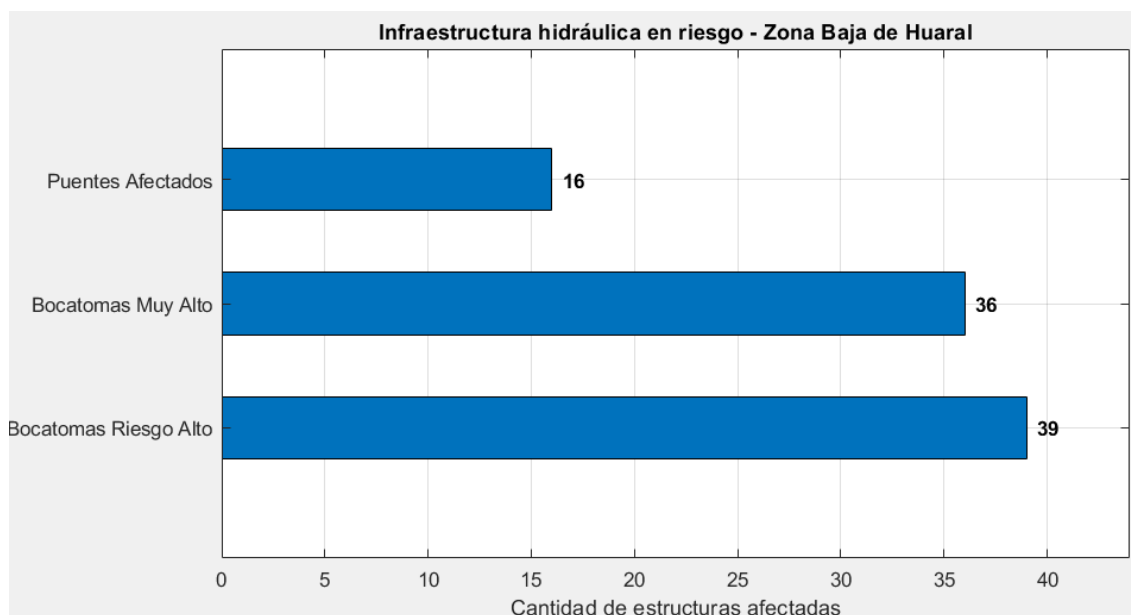
6. Muestra un gráfico horizontal de toda la infraestructura afectada

Este gráfico presenta de manera conjunta las bocatomas y puentes expuestos. Es una forma resumida y clara de mostrar qué tan amplio es el impacto en términos de estructuras hidráulicas.

La figura 20 presenta una síntesis de las principales estructuras hidráulicas que se encuentran en situación de riesgo frente a crecidas en la zona baja de la cuenca del río Chancay – Huaral. Se han considerado dos tipos de infraestructura: bocatomas, clasificadas según el nivel de riesgo, y puentes expuestos por su ubicación cercana al cauce.

Figura 13

Infraestructura hidráulica en riesgo - Zona Baja de Huaral



Nota. Elaboración Propia

Del total evaluado, se identifican 39 bocatomas con riesgo alto, 36 con riesgo muy alto y 16 puentes potencialmente afectados. Esto evidencia una concentración significativa de infraestructura vulnerable en una zona clave para el abastecimiento y el transporte.

7. Imprime los resultados generales

El código muestra en la consola un resumen con las cifras principales: cuántas bocatomas están en riesgo, cuántos puentes pueden verse afectados, cuántos kilómetros de margen fluvial están expuestos y cuántas zonas urbanas son vulnerables.

8. Calcula el porcentaje de bocatomas comprometidas

Por último, se calcula qué porcentaje del total de bocatomas está en riesgo. Esto ayuda a dimensionar la gravedad del problema desde una perspectiva general.

Figura 14

Impacto de riesgo

Total de bocatomas en riesgo: 75 (Alto: 39, Muy Alto: 36)

Total de puentes en zona baja con riesgo por crecidas: 16

Longitud total de margen fluvial afectada: 29.3 km

Total de zonas urbanas y de expansión con alta vulnerabilidad: 15

Porcentaje de infraestructura hidráulica (bocatomas) en riesgo: 100.00%

Nota. Elaboración Propia

La figura 21 presenta un resumen cuantitativo del impacto potencial de las crecidas en la zona baja de la cuenca del río Chancay – Huaral. Se muestran los principales elementos expuestos, tanto de infraestructura hidráulica como de zonas urbanas vulnerables.

Se identifica un total de 75 bocatomas en riesgo, de las cuales 39 presentan un riesgo alto y 36 un riesgo muy alto, lo que representa el 100 % de las bocatomas evaluadas. Además, se registran 16 puentes comprometidos y una longitud total de 29.3 km de margen fluvial susceptible a desbordes. En cuanto a la población, se reportan 15 zonas urbanas y de expansión con alta vulnerabilidad.

4.3. Medidas de mitigación basadas en el modelado hidrológico

A partir de los resultados obtenidos en el modelado hidrológico y el análisis del riesgo en la cuenca del río Chancay – Huaral, se proponen medidas de mitigación orientadas a reducir los efectos negativos de las inundaciones. Estas medidas consideran tanto intervenciones estructurales como acciones de gestión del recurso hídrico, y han sido planteadas con base en los escenarios de caudal y volumen estimado durante eventos de crecida. El objetivo es brindar alternativas que contribuyan a disminuir la vulnerabilidad de la población, proteger la infraestructura hidráulica y mejorar la capacidad de respuesta ante posibles eventos extremos.

Con base en los resultados del modelado hidrológico y la identificación de zonas e infraestructuras vulnerables, este código permite simular diferentes escenarios de mitigación ante crecidas en la cuenca del río Chancay – Huaral. Cada escenario representa una estrategia distinta, estructural o no estructural, orientada a

reducir el caudal pico, minimizar el volumen de escorrentía y proteger tanto a la infraestructura como a la población.

```
%% MEDIDAS DE MITIGACIÓN BASADAS EN MODELADO HIDROLÓGICO - CUENCA
CHANCA Y (HUARAL)
% Con 5 escenarios comparativos y visualización estructurada

clear; clc; close all;

%% DATOS BASE (ANA, 2023)
bocatomas_total = 75;
bocatomas_riesgo_alto = 39;
bocatomas_riesgo_muy_alto = 36;
longitud_critica_km = 29.3;
sectores_urbanos_vulnerables = 16;

caudal_pico_base = 950; % m³/s
volumen_evento_base = 3.5e6; % m³

%% ESCENARIOS DE MITIGACIÓN
% Escenario 1: Defensas ribereñas (reducción caudal 60%)
caudal_defensas = caudal_pico_base * 0.40;
bocatomas_defensas = round((bocatomas_riesgo_alto +
bocatomas_riesgo_muy_alto) * 0.60);
sectores_defensas = round(sectores_urbanos_vulnerables * 0.60);

% Escenario 2: Reforestación (reducción volumen 15%, caudal estimado
95%)
caudal_reforestacion = caudal_pico_base * 0.95;
volumen_reforestacion = volumen_evento_base * 0.85;

% Escenario 3: Combinado (defensas + reforestación)
caudal_combinado = caudal_pico_base * 0.30;
volumen_combinado = volumen_evento_base * 0.85;
bocatomas_combinado = round((bocatomas_riesgo_alto +
bocatomas_riesgo_muy_alto) * 0.70);
sectores_combinado = round(sectores_urbanos_vulnerables * 0.70);

% Escenario 4: Zonificación y alerta temprana (impacto directo en
protección de población)
caudal_zonificacion = caudal_pico_base; % no reduce caudal, solo
exposición
volumen_zonificacion = volumen_evento_base;
sectores_zonificacion = round(sectores_urbanos_vulnerables * 0.50);
bocatomas_zonificacion = 0;

% Escenario 5: Obras multicomponente (drenaje, canales de alivio,
reservorios)
caudal_multicomponente = caudal_pico_base * 0.20;
volumen_multicomponente = volumen_evento_base * 0.75;
bocatomas_multicomponente = round((bocatomas_riesgo_alto +
bocatomas_riesgo_muy_alto) * 0.85);
sectores_multicomponente = round(sectores_urbanos_vulnerables *
0.85);
```

```

%% GRÁFICO: Caudal Pico
figure('Name','Caudal Pico por Escenario');
caudales = [caudal_pico_base, caudal_defensas,
caudal_reforestacion, caudal_combinado, caudal_zonificacion,
caudal_multicomponente];
bar(categorical({'Base','Defensas','Reforestación','Combinado','Zo
nificación','Multicomponente'}), caudales, 0.6);
ylabel('Caudal Pico (m³/s)');
title('Comparación de Caudales Pico por Escenario');
grid on;

%% GRÁFICO: Volumen Total
figure('Name','Volumen de Escorrentía por Escenario');
volumenes = [volumen_evento_base, volumen_evento_base,
volumen_reforestacion, volumen_combinado, volumen_zonificacion,
volumen_multicomponente] / 1e6;
bar(categorical({'Base','Defensas','Reforestación','Combinado','Zo
nificación','Multicomponente'}), volumenes, 0.6, 'FaceColor', [0.6
0.8 0.5]);
ylabel('Volumen Total Evento (Mm³)');
title('Volumen de Escorrentía por Escenario');
grid on;

%% GRÁFICO: Bocatomas Protegidas
figure('Name','Bocatomas Protegidas por Escenario');
bocatomas = [0, bocatomas_defensas, 0, bocatomas_combinado,
bocatomas_zonificacion, bocatomas_multicomponente];
bar(categorical({'Base','Defensas','Reforestación','Combinado','Zo
nificación','Multicomponente'}), bocatomas, 0.6, 'FaceColor', [0.4
0.7 0.9]);
ylabel('Bocatomas Protegidas');
title('Bocatomas Protegidas por Escenario');
grid on;

%% RESULTADOS EN BLOQUE
disp("-----")
disp("ESCENARIOS DE MITIGACIÓN - CUENCA CHANCAY (HUARAL)")
disp("-----")
escenarios = {'Base', 'Defensas', 'Reforestación', 'Combinado',
'Zonificación', 'Multicomponente'};
T = table(escenarios', ...
round(caudales',1), ...
round(volumenes',2), ...
bocatomas', ...
[0, sectores_defensas, 0, sectores_combinado,
sectores_zonificacion, sectores_multicomponente]', ...
'VariableNames',
{'Escenario','CaudalPico_m3s','VolumenEvento_Mm3','BocatomasProteg
idas','SectoresProtegidos'});
disp(T);

```

El código presentado sigue la siguiente secuencia:

1. Preparación de variables y datos

Se inicia limpiando el entorno de trabajo y cargando datos base extraídos del informe ANA (2023), como:

- Total de bocatomas en riesgo (75).
- Longitud crítica de margen fluvial afectada (29.3 km).
- Total de sectores urbanos vulnerables (16).
- Caudal pico estimado durante eventos extremos (950 m³/s).
- Volumen aproximado del evento de crecida (3.5 millones de m³).

Estos valores representan el punto de partida o escenario base sin intervención.

2. Definición de escenarios de mitigación

Se plantean cinco escenarios de intervención, cada uno con una lógica específica:

- **Escenario 1: Defensas ribereñas**

Reduce el caudal pico en un 60 %, protegiendo el 60 % de bocatomas y sectores urbanos. Esta opción se basa en obras físicas como muros o diques, útiles para controlar el desborde del río.

- **Escenario 2: Reforestación**

Reduce el volumen de escorrentía en un 15 % y el caudal estimado en un 5 %. Está fundamentado en soluciones basadas en la naturaleza, que ayudan a infiltrar y retener el agua en cabeceras.

- **Escenario 3: Combinado**

Suma los efectos de defensas y reforestación. Reduce el caudal en un 70 % y protege el 70 % de la infraestructura y población vulnerable. Es un enfoque integral, estructural y ecológico.

- **Escenario 4: Zonificación y alerta temprana**

No modifica el caudal ni el volumen, pero reduce la exposición, protegiendo aproximadamente el 50 % de los sectores poblados mediante planificación territorial y sistemas de advertencia.

- **Escenario 5: Obras multicomponente**

Integra drenaje, reservorios y canales de alivio. Reduce el caudal hasta en un 80 % y el volumen en un 25 %. Protege un 85 % de la infraestructura crítica.

3. Visualización gráfica

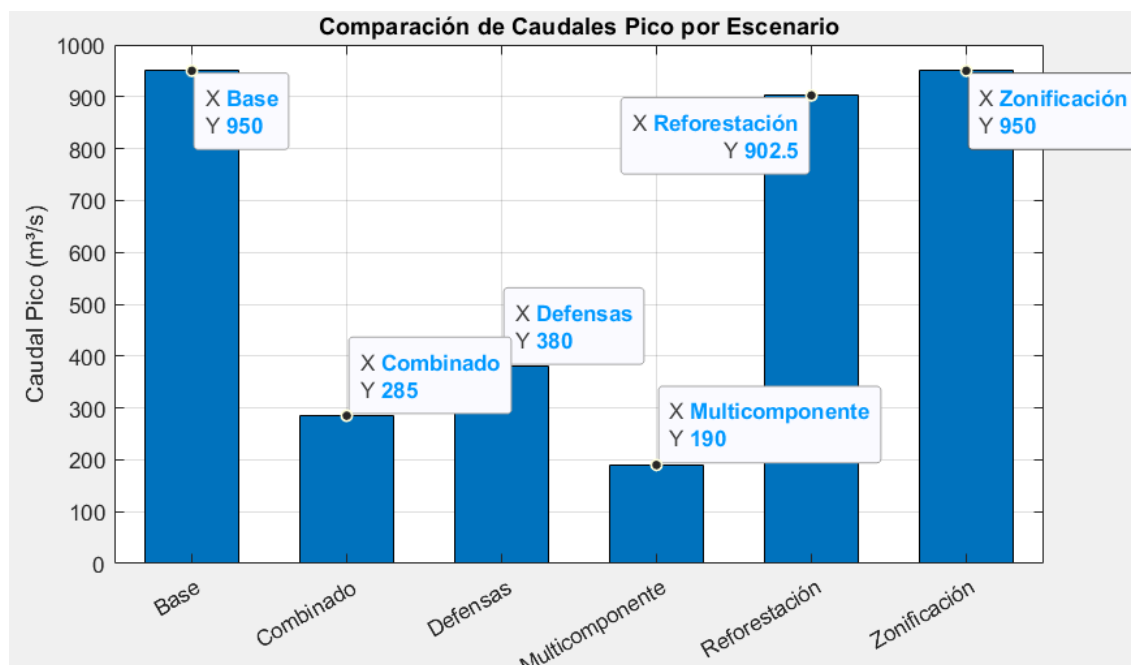
El código genera tres gráficos comparativos:

- a) **Caudal pico por escenario**, para visualizar la magnitud del impacto directo sobre el río.

La figura 22 muestra la comparación del caudal pico estimado (en m³/s) para diferentes escenarios de mitigación ante crecidas en la cuenca del río Chancay – Huaral. El caudal pico representa el valor máximo de flujo que podría registrarse durante un evento extremo, y su reducción es clave para disminuir el riesgo de desbordes e inundaciones.

Figura 15

Comparación de Caudales Pico por Escenario



Nota. Elaboración Propia

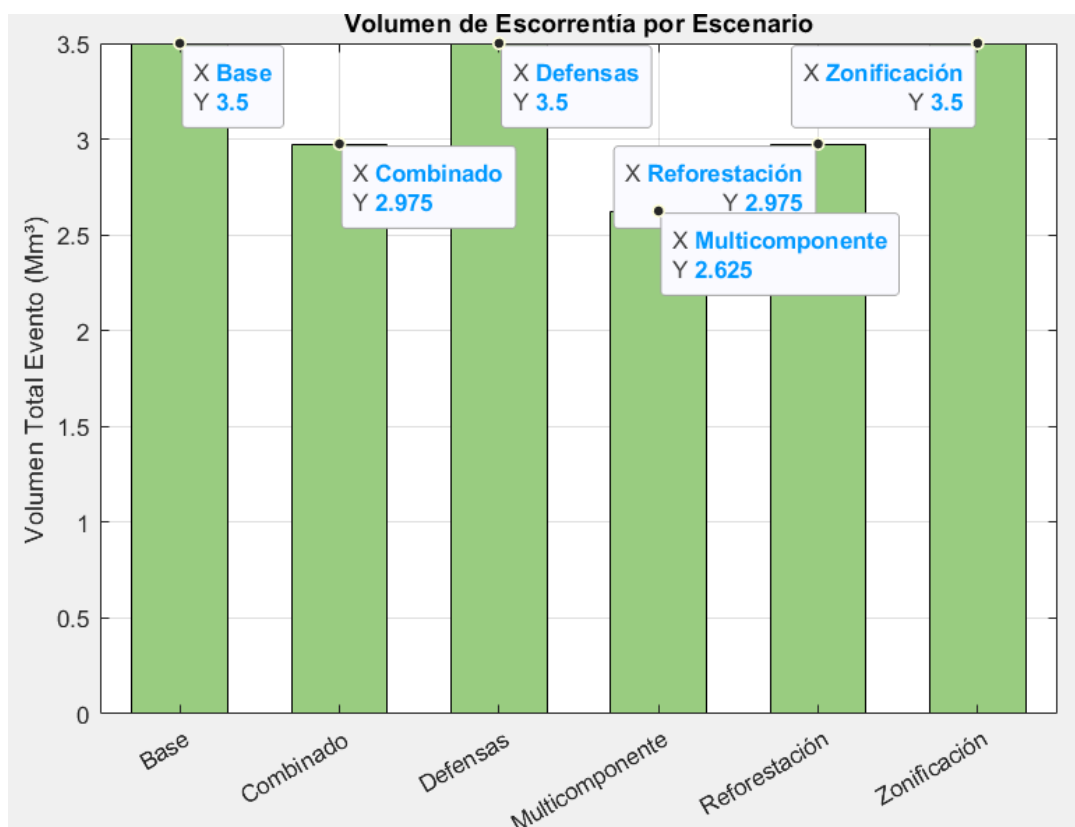
El escenario base, sin intervención, presenta un caudal pico de 950 m³/s. A partir de ello, se evalúan cinco estrategias de mitigación:

- **Reforestación** apenas reduce el caudal (902.5 m³/s), ya que actúa sobre el volumen más que sobre el pico.
- **Defensas ribereñas** logran una disminución más significativa (380 m³/s), al contener el flujo.
- **Escenario combinado** (defensas + reforestación) reduce el caudal a 285 m³/s, siendo una opción más eficiente.
- **Obras multicomponente** (canales, drenaje, reservorios) presentan la mayor reducción, con un caudal estimado de solo 190 m³/s.
- **Zonificación y alerta temprana**, si bien no modifica el caudal (950 m³/s), se enfoca en reducir la exposición de la población al riesgo.

b) **Volumen total del evento**, expresado en millones de m³.

Figura 16

Volumen de Escorrentía por Escenario



Nota. Elaboración Propia

La figura 23 muestra la variación del volumen total de escorrentía generado por un evento de crecida en la cuenca del río Chancay – Huaral, bajo distintos escenarios de mitigación. El escenario base y aquellos que no modifican la dinámica del caudal (como defensas y zonificación) mantienen un volumen constante de 3.5 Mm³. En cambio, los escenarios que incluyen acciones como reforestación, obras multicomponente y el escenario combinado muestran reducciones importantes del volumen generado:

- Reforestación y combinado reducen el volumen a 2.975 Mm³ (una disminución del 15 %).
- Multicomponente alcanza la mayor reducción, con 2.625 Mm³ (una disminución del 25 %).

Estas diferencias evidencian que las medidas que actúan sobre la capacidad de infiltración, retención o almacenamiento del agua (como la vegetación o infraestructura de regulación) son más efectivas para disminuir el volumen de escorrentía, y por tanto, el potencial destructivo de las crecidas.

4. Resultados globales

Se imprime una tabla resumen que compara los escenarios según:

- Caudal pico estimado (m³/s).
- Volumen de escorrentía (Mm³).
- Bocatomas y sectores urbanos protegidos.

Esta información permite evaluar qué escenarios ofrecen mayores beneficios y cuáles podrían implementarse de forma prioritaria, combinada o escalonada.

Figura 17

Escenarios de mitigación - cuenca Chancay (Huaral)

ESCENARIOS DE MITIGACIÓN - CUENCA CHANCAY (HUARAL)

Escenario	CaudalPico_m3s	VolumenEvento_Mm3	BocatomasProtegidas	SectoresProtegidos
{'Base' }	950	3.5	0	0
{'Defensas' }	380	3.5	45	10
{'Reforestación' }	902.5	2.98	0	0
{'Combinado' }	285	2.98	53	11
{'Zonificación' }	950	3.5	0	8
{'Multicomponente' }	190	2.63	64	14

Nota. Elaboración Propia

La figura 24 resume los resultados obtenidos a partir del modelado hidrológico aplicado a la cuenca del río Chancay – Huaral, considerando seis escenarios: uno base (sin intervención) y cinco con medidas de mitigación. El análisis se enfoca en tres indicadores clave: caudal pico (m^3/s), volumen de escorrentía (Mm^3) y nivel de protección sobre bocatomas y sectores urbanos.

El escenario base, sin medidas, muestra los valores más altos de caudal y volumen ($950 \text{ m}^3/\text{s}$ y 3.5 Mm^3) y no contempla ninguna protección, evidenciando el alto nivel de vulnerabilidad ante crecidas.

Los escenarios de mitigación permiten observar distintos niveles de efectividad:

- **Defensas ribereñas** reducen el caudal a $380 \text{ m}^3/\text{s}$ y permiten proteger 45 bocatomas y 10 sectores urbanos, aunque el volumen de escorrentía permanece sin cambio. Esto se debe a que actúan sobre el cauce, sin afectar el origen del flujo.
- **Reforestación** disminuye el caudal y volumen ligeramente ($902.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y 2.98 Mm^3), pero no brinda protección directa a infraestructura o sectores. Su efecto es más ambiental, actuando sobre la infiltración en cabeceras.
- **Escenario combinado** (defensas + reforestación) logra una reducción considerable del caudal ($285 \text{ m}^3/\text{s}$), baja el volumen a 2.98 Mm^3 y protege 53 bocatomas y 11 sectores. Esta combinación mejora la eficacia frente a aplicar una sola medida.
- **Zonificación y alerta temprana** no modifica el caudal ni el volumen, pero sí reduce la exposición poblacional, protegiendo 8 sectores. Este enfoque no hidráulico prioriza la planificación territorial y el sistema de respuesta.
- **Obras multicomponente** (reservorios, canales, drenaje) son las más efectivas: reducen el caudal a $190 \text{ m}^3/\text{s}$, el volumen a 2.63 Mm^3 y protegen 64 bocatomas y 14 sectores. Este escenario demuestra el mayor impacto en términos de mitigación integral.

CONCLUSIONES

El desarrollo del modelo hidrológico permitió simular los caudales ante eventos de lluvias intensas, aportando una herramienta preventiva frente a desastres naturales. Su aplicación facilita la identificación de zonas vulnerables y apoya la planificación de medidas estructurales y no estructurales, contribuyendo a la gestión del riesgo hídrico en la cuenca.

La aplicación del modelo hidrológico permitió identificar los meses críticos con mayor volumen de agua disponible, siendo marzo (117.34 hm³), febrero (96.41 hm³) y abril (91.80 hm³) los de mayor riesgo. Además, el análisis de persistencia del 75% reveló una disminución anual del 37.16% en la disponibilidad hídrica respecto al promedio histórico, lo cual refuerza la necesidad de herramientas de simulación para anticipar posibles crecidas y tomar decisiones informadas.

El análisis identificó que el 100% de las bocatomas (75 en total) se encuentran en riesgo, de las cuales 39 presentan riesgo alto y 36 riesgo muy alto. Además, se registraron 16 puentes críticos en la zona baja y una longitud de margen fluvial afectada de 29.3 km. En cuanto a la población, se identificaron 15 zonas urbanas y de expansión altamente vulnerables, lo que evidencia el alto grado de exposición de la infraestructura y la población ante eventos de crecida.

A través del modelado, se evaluaron cinco escenarios de mitigación. El escenario multicomponente (que incluye defensas ribereñas, canales de alivio y reservorios) fue el más efectivo, logrando reducir el caudal pico de 950 m³/s a 190 m³/s y proteger 64 bocatomas y 14 sectores urbanos. Esto demuestra que las estrategias integradas basadas en simulación hidrológica permiten reducir significativamente los impactos de las inundaciones en la cuenca.

RECOMENDACIONES

Se recomienda priorizar la ejecución de medidas estructurales integradas, como defensas ribereñas, reservorios de retención y canales de alivio, especialmente en los tramos identificados con mayor riesgo. El escenario multicomponente permitió reducir el caudal pico de 950 m³/s a 190 m³/s y proteger hasta 64 bocatomas y 14 sectores urbanos, demostrando su alta eficacia.

Es necesario consolidar un sistema de alerta temprana basado en el modelo hidrológico desarrollado, complementado con datos en tiempo real. Esto permitirá anticipar eventos de crecida, mejorar la gestión del recurso hídrico y reducir el riesgo de afectación a la población e infraestructura.

Dado que existen 15 zonas urbanas y de expansión con alta vulnerabilidad, se sugiere incluir restricciones de uso de suelo, zonas de amortiguamiento y planes de evacuación en los instrumentos de planificación, con énfasis en sectores como Huando, Pampa Lara, Retes y Contigo Perú.

Aunque la reforestación no reduce significativamente el caudal pico, sí contribuye a disminuir el volumen de escorrentía y mejorar la infiltración, aportando beneficios ambientales adicionales. Se recomienda implementar programas de restauración en las partes altas de la cuenca para reforzar la regulación natural del agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N°56. FAO, Rome
- ANA. (2023). Plan de gestión de recursos hídricos de la cuenca Chancay - Huaral, actualizado al 2023 (edición electrónica). Ana.gob.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/5653>
- Aragón-Hernández, J., Aguilar-Martínez, G., Velázquez-Ríos, U., Jiménez-Magaña, M., y Maya-Franco, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. Ingeniería Investigación y Tecnología, 20(2), 1–15. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.023>
- Asencios, H. (2021). Modelamiento hidrológico para el pronóstico de crecidas en tiempo real aplicado a la cuenca del Río Rímac. Lamolina.edu.pe; Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4883>
- Castañeda, M. y Barros, V. (1994). Las tendencias de la precipitación en el cono sur de América al este de los Andes. Meteorológica, 19(1), 23-32.
- Céleri, R. (2009). Servicios ambientales para la conservación de los recursos hídricos: lecciones desde los Andes. Síntesis Regional CONDESAN 2008. <https://core.ac.uk/download/pdf/48027367.pdf>
- Chereque, W. (1989). Capítulo 7. Relaciones precipitación-escurrentía. Pontificia Universidad Católica del Perú. https://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28689/hidrologia_cap07.pdf?sequence=13&isAllowed=y
- Cubas Cieza, S. (2021). Modelamiento hidrológico de la cuenca chotano empleando el método del número de curva para determinar caudales máximos - 2021. Uss.edu.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/12627>
- Custodio, E. y Llamas M. R. (1983). Hidrología subterránea. Ediciones Omega S.A.

- Del Águila, S. (2021). Modelamiento de procesos hidrológicos en cuencas de la sierra central del Perú. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4659>
- Devia, G.; Ganasri, B. y Dwarakish, G. (2015). A Review on Hydrological Models. Aquatic Procedia (Serie International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering - ICWRCOE'154:1001-1007). <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Estrela (1992). Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/libros/uni_02/Modelos_matematicos.pdf
- FAO (1996). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. Manual N°56. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.pdf>
- Faustino, J. y García, S (s.f). Manual de manejo de cuencas. World Vision. https://www.uv.mx/oabcc/files/2018/11/MANUAL-DE-MANEJO-DE-CUENCAS_COMPLETO.pdf
- Fernández, S. N., Pérez, D. E., Weis, C. F., y Flores, M. Ángel. (2022). Calibración de simulaciones de crecidas de la cuenca alta del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. Cuadernos Del CURIHAM, 28. <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.179>
- Frene, C., Molina, C., Santibáñez, J., Núñez-Ávila, M. (2016). Agua en Chile: diagnósticos territoriales y propuestas para enfrentar la crisis. <https://www.researchgate.net/publication/293653146>
- Gamarra, J. (2022). Modelamiento hidrológico de máximas avenidas para el análisis de alternativas de laminación en la cuenca del río Mala. Lamolina.edu.pe; Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5728>

- Gil, E. y Tobón, C. (2016). Modelación hidrológica con TOPMODEL en el páramo de Chingaza, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(2):7919-7933. <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59137>
- Guevara, E. (2015). Métodos para el Análisis de Variables Hidrológicas y Ambientales. Ministerio de Agricultura y Riego -MINAGRI Autoridad Nacional del Agua –ANA- Lima, Perú.
- Hansen, V. E., Israelsen, O. W. y Stringham, G. E. (1980). *Irrigation Principles and Practices* 4th Edition. New York, NY: John Wiley and Sons, Inc
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación* (6° ed.). México: McGraw Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Isquierdo, A., y Bautista, S. (2024). Modelación Hidrológica e Hidráulica De La Cuenca Fortaleza Para El Dimensionamiento De Estructuras Resilientes [Upc.edu.pe].
- Li, J., Wang, Z., & Zhang, T. (2023). Flood simulation using the hydrological model and the hydrological–hydrodynamic coupling model in a small watershed in semi-arid and sub-humid region, North China. *Journal of Water and Climate Change*, 14(10), 3496-3516. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.161>
- Mejía, A. (2012). *Hidrología Aplicada*. Lima, Perú: Fondo Editorial UNALM.
- Mejía, A. (2017). *Probabilidad y Estadística en Hidrología*. Lima, Perú: Fondo Editorial UNALM.
- Mendoza, M., Bocco, G., Siebe, C. y Ortiz, M. (2002). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. *Investigaciones Geográficas*, 47: 36-58. <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n47/n47a4.pdf>
- Mishra, S.K. y Singh, P.V. (2004). Long-term hydrological simulation based on the soil conservation service curve number. *Hydrological Processes*, 18(7):1291–1313

- Morlón, P. (1996). Comprender la agricultura campesina en los Andes centrales (Perú - Bolivia). INRA Éditions. enlace: https://www.researchgate.net/publication/311268573_Comprender_la_agricultura_campesina_en_los_Andes_centrales_Peru_-_Bolivia
- Pascal, D. (2023). Aplicación de un modelo hidrológico de pronóstico para el desarrollo inicial de un sistema de alerta temprana (SAT) en el valle del Alto Cachapoal VI Región [Uchile.cl].
- Pearce, A. J., Stewart, M. K. & Sklash, M. G. (1986). Storm runoff generation in humid headwater catchments. 1. Where does the water come from? *Water Resources Research*, 22, 1263–1272.
- Peje, E., y Pomalaya, S. (2025). Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones de la subcuenca hidrográfica Yarinacocha utilizando HEC-HMS, HEC-GEORAS y Hec-Ras en el distrito de Yarinacocha, provincia de Coronel Portillo del departamento de Ucayali [Universidad Nacional de Ucayali].
- Peña Murillo, R., León Ruiz, J., Lavado Casimiro, W., y Medina Burga, M. (2023). Modelación hidrológica a través del Modelo SWAT en la Cuenca del Río Cañar – Ecuador. *Dominio De Las Ciencias*, 9(2), 1896–1912. Recuperado a partir de <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3383>
- Pereira, D., Martínez, M., da Silva, D., y Pruski, F. (2016). Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 5:149-163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.008>
- PMFS. (2011). Programa de Manejo Forestal Sostenible. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
- Prakash, M., Ramage, S., Kavil, Y. N., & Dewals, B. (2024). Impact of land use and land cover change on hydrological processes in urban watersheds: analysis and forecasting for

flood risk management. *Geosciences*, 14(2), 40.
<https://doi.org/10.3390/geosciences14020040>

Puelles, J. C. (2015). Estudio hidráulico e hidrológico de la cuenca Alto Perú y El Porvenir en el asentamiento humano Las Mercedes Alto Perú, distrito de La Oroya, provincia de Yauli – Junín para la construcción futura de obras de arte ante amenazas de derrumbes provocado por la crecida del río, mediante el uso de los modelos matemáticos HECHMS Y HEC-GEORAS. [Tesis de Licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/620953>

Sánchez, F. J. (2022). Hidrología e Hidrogeología. Universidad de Salamanca.
<https://hidrologia.usal.es/>

SENAMHI (2024). Senamhi.gob.pe. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=prensa&n=703>

Sierterm UEM. (s.f.). Sistemas inteligentes y energías renovables.
<https://sierterm.es/content/percolaci%C3%B3n/>

Sorooshian, S., Hsu, K., Coppola, E., Tomassetti, B., Verdecchia, M. y Visconti, G. (2008). Hydrological modelling and the water cycle: coupling the atmospheric and hydrological models. Springer Science & Business Media.

Spruill, C.A., Workman, S.R. y Taraba J.L. (2000). Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model.
<https://www.sciencebase.gov/catalog/item/50577471e4b01ad7e027c6d2>

Torres, S. (2003). Una visión más amplia del Universo.
https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/54_4/vision_mas_amplia.pdf

Triana, M., y Leal, J. (2022). Propuesta sostenible para la mitigación del riesgo de inundación en la cuenca alta del río Combeima municipio Ibagué, Tolima [Unbosque.edu.co].

Weber, J., Dasso, C. y Jorquera, E. (2010). Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta. *Mecánica Computacional*. 29: 4013-4037

- Zhao, G., et al. (2022). A review of the flood management: from flood control to flood resilience. *Heliyon*, 8(11), e11763. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11763>
- Zúñiga, F. (2024). Análisis de la peligrosidad por inundaciones asociada al evento meteorológico de precipitaciones en junio 2023 en la cuenca del río Achibueno (Región del Maule, Chile), mediante modelización hidrológico – hidráulica 2D con Iber. Docta.ucm.es. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/109312>

ANEXOS

ANEXO N°1: Matriz de consistencia

MODELO HIDROLÓGICO DE CRECIDAS PARA LA PREVENCIÓN DE DESASTRES NATURALES EN LA CUENCA CHANCAY, HUARAL – 2025				
Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodologías
General	General	General	Variable Independiente	
¿Qué modelo hidrológico de crecidas contribuye a la prevención de desastres naturales en la cuenca Chancay, Huaral?	Desarrollar un modelo hidrológico de crecidas que contribuya a la prevención de desastres naturales en la cuenca Chancay, Huaral.	La implementación de un modelo hidrológico de crecidas en la cuenca Chancay permitirá mejorar la prevención de desastres naturales en Huaral, optimizando la gestión del riesgo hídrico.	Modelado hidrológico de crecidas Dimensiones: - Precisión en la predicción de crecidas - Impacto en la infraestructura hidráulica - Eficiencia de las medidas de mitigación	La presente investigación es de tipo cuantitativa. El estudio se ubica en un nivel explicativo. El diseño de la investigación es no experimental y transversal. La población está conformada por los datos hidrológicos de la cuenca Chancay.
Específicos	Específicos	Específicos	Variable Dependiente	
¿Cómo optimizar la predicción de crecidas en la cuenca Chancay mediante el uso de un modelo hidrológico?	Optimizar la predicción de crecidas en la cuenca Chancay mediante el uso de un modelo hidrológico.	El uso de un modelo hidrológico mejora la precisión en la predicción de crecidas en la cuenca Chancay, permitiendo una mejor gestión de riesgos.	Prevención de desastres naturales	La muestra representa un subconjunto de la población que será analizado en detalle. Para esta investigación, la muestra estará compuesta por registros históricos de crecidas e inundaciones proporcionados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).
¿Cuál es el impacto de las crecidas en la infraestructura hidráulica y en la seguridad de la población en Huaral?	Analizar el impacto de las crecidas en la infraestructura hidráulica y la seguridad de la población en Huaral.	Las crecidas en la cuenca Chancay tienen un impacto significativo en la infraestructura hidráulica y en la seguridad de la población en Huaral, aumentando el riesgo de daños.	Dimensiones: - Reducción del impacto de las crecidas - Gestión del riesgo y toma de decisiones	
¿Qué medidas de mitigación basadas en el modelado hidrológico pueden reducir los efectos de las inundaciones en la cuenca Chancay?	Proponer medidas de mitigación basadas en el modelado hidrológico para reducir los efectos de las inundaciones en la cuenca Chancay.	La aplicación de medidas de mitigación basadas en el modelado hidrológico contribuye a reducir los efectos adversos de las inundaciones en la cuenca Chancay.		

Nota. Elaboración propia

ANEXO N°2: PANEL FOTOGRÁFICO



Fotografía 1. Validación en campo de caudales en el río Chancay – Huaral

Leyenda: En la visita a campo se realiza la verificación de datos hidrológicos mediante aforo en sitio, como parte del proceso de validación del modelo hidrológico y control de disponibilidad de recursos hídricos.



Fotografía 2. Evidencia de desborde e impacto ambiental en el río Chancay – Huaral

Leyenda: Se observa acumulación de residuos sólidos y arrastre de materiales en la margen izquierda del río, resultado de desbordes recientes. Esta situación refleja la afectación ambiental provocada por eventos de crecida, así como la falta de control de residuos en zonas vulnerables, lo que incrementa el riesgo de obstrucciones y contaminación del cauce.



Fotografía 3. Medición de velocidad del flujo en el río Chancay – Huaral con equipo OTT MF Pro

Leyenda: El equipo OTT MF Pro permite registrar la velocidad media del agua en diferentes secciones del cauce. En esta imagen se observa una lectura de velocidad promedio de 0.47 m/s, tomada durante el trabajo de campo. Este tipo de instrumentos es utilizado para el aforo del caudal y la validación de datos hidrológicos utilizados en el modelado de crecidas, asegurando mayor precisión en la estimación de la disponibilidad hídrica y en la evaluación del comportamiento del río durante eventos extremos.



Fotografía 4. Urbanización cercana a zonas de desborde del río Chancay – Huaral

Leyenda: Se observa una zona urbana construida en proximidad directa a los márgenes del río Chancay, donde el cauce presenta signos de bifurcación y acumulación de sedimentos. Esta condición geomorfológica incrementa el riesgo de desbordes e inundaciones durante eventos de crecida, afectando directamente a las viviendas y a la seguridad de los habitantes. La imagen evidencia la necesidad de incorporar criterios de zonificación de riesgo en la planificación territorial y en la regulación del crecimiento urbano.



Fotografía 5. Evaluación visual de erosión en margen del río Chancay – Huaral

Leyenda: La imagen muestra una sección del margen del río Chancay donde se evidencia un proceso de erosión activa, generando pérdida de suelo y afectación a la vía adyacente. En la visita a campo se verifica el grado de inestabilidad del terreno, situación que representa un riesgo para las infraestructuras cercanas y acentúa la vulnerabilidad durante eventos de crecida.



Fotografía 6. Inspección de daños estructurales en puente colapsado por crecida del río Chancay – Huaral

Leyenda: Se realiza la verificación de campo en el puente colapsado sobre la cuenca del río Chancay, afectado por una crecida reciente.



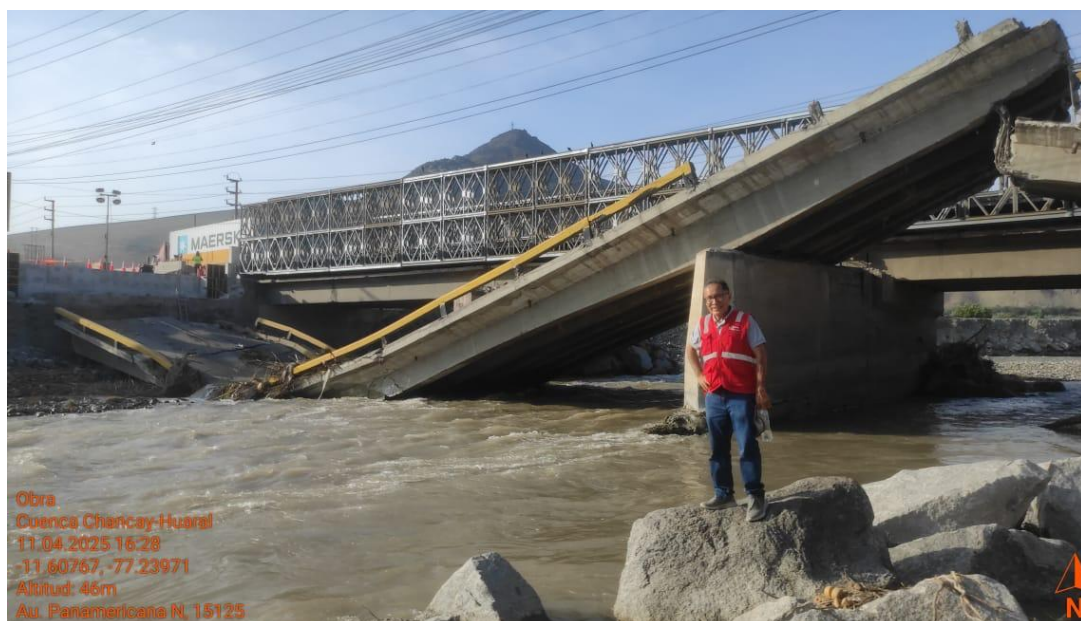
Fotografía 7. Evidencia de colapso de puente en la cuenca del río Chancay – Huaral

Leyenda: El colapso parcial del puente evidenciado en la imagen refleja los daños ocasionados por la acción erosiva del caudal y la falta de medidas de protección en las márgenes. En la visita a campo se señala la zona de mayor afectación, donde la estructura cedió ante la socavación de la base. Este tipo de daños pone en riesgo la conectividad regional y refuerza la necesidad de integrar evaluaciones hidrológicas y estructurales en el diseño y mantenimiento de puentes sobre ríos con comportamiento dinámico como el Chancay.



Fotografía 8. Tramo del río Chancay con alta energía de flujo y márgenes inestables – Huaral

Leyenda: En esta imagen se observa un tramo del río Chancay con evidente energía hidráulica y márgenes erosionables, lo que incrementa el riesgo de desbordes y socavación durante eventos de crecida. La ausencia de defensas ribereñas y la cercanía de caminos y viviendas refuerzan la necesidad de intervenciones preventivas como obras de contención, reforestación y monitoreo constante del comportamiento del cauce.



Fotografía 9. Daño estructural en puente vehicular colapsado sobre el río Chancay – Huaral

Leyenda: Se observa el colapso parcial de un puente vehicular tras una crecida del río Chancay, en el tramo correspondiente a la carretera Panamericana Norte.



Fotografía 10. Identificación de zona erosionada en margen del río Chancay – Huaral

Leyenda: En la visita a campo se señala una zona crítica del margen derecho del río Chancay donde se evidencia un proceso activo de erosión. La pérdida de suelo y la proximidad de áreas agrícolas o de infraestructura vial hacen que este sector requiera atención prioritaria para la implementación de defensas ribereñas u obras de estabilización.



Fotografía 11. Formación de islotes y distribución irregular del cauce en el río Chancay – Huaral

Leyenda: Se observa la formación de barras e islotes de sedimento en medio del cauce del río Chancay, lo cual indica procesos de sedimentación activa y redistribución del flujo. Estas condiciones pueden alterar la capacidad hidráulica del río, incrementar el riesgo de desbordes laterales y afectar la infraestructura cercana.



Fotografía 12. Reconocimiento de áreas vulnerables y margen activa del río Chancay – Huaral

Leyenda: En la visita a campo se inspecciona un sector expuesto de la ribera del río Chancay, caracterizado por acumulación de residuos, vegetación baja y evidencias de desplazamiento del cauce. Esta área, ubicada en una zona plana sin defensas ribereñas visibles, presenta alta susceptibilidad ante desbordes.

ANEXO N°3: INTERFAZ GUI UTILIZADA PARA LOS CÓDIGOS DE MATLAB

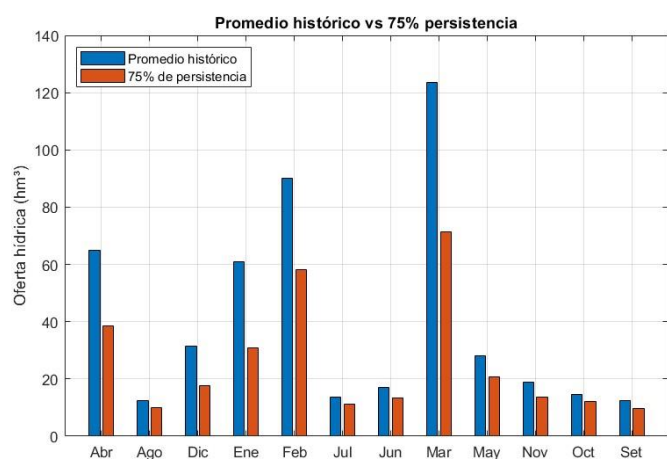


Gráfico de Barras

Escenarios Climáticos

Gráfico Acumulativo

Exportar CSV

Mostrar Análisis

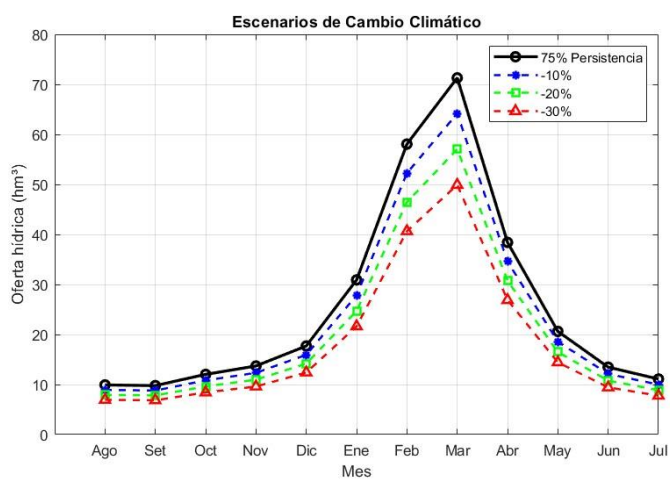


Gráfico de Barras

Escenarios Climáticos

Gráfico Acumulativo

Exportar CSV

Mostrar Análisis

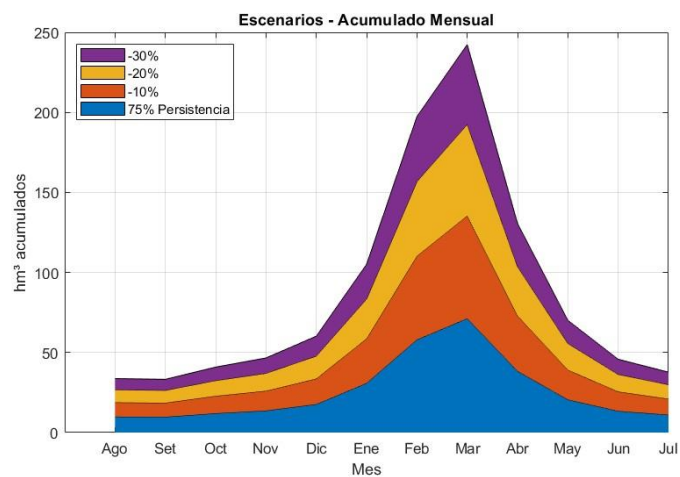


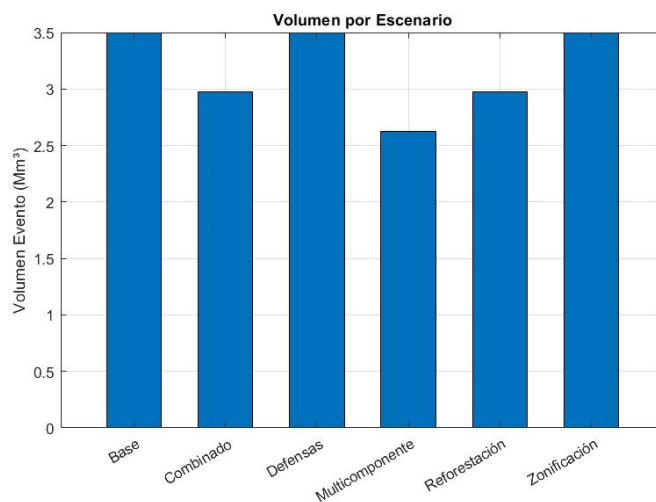
Gráfico de Barras

Escenarios Climáticos

Gráfico Acumulativo

Exportar CSV

Mostrar Análisis



Caudal Pico

Volumen de Escurrentía

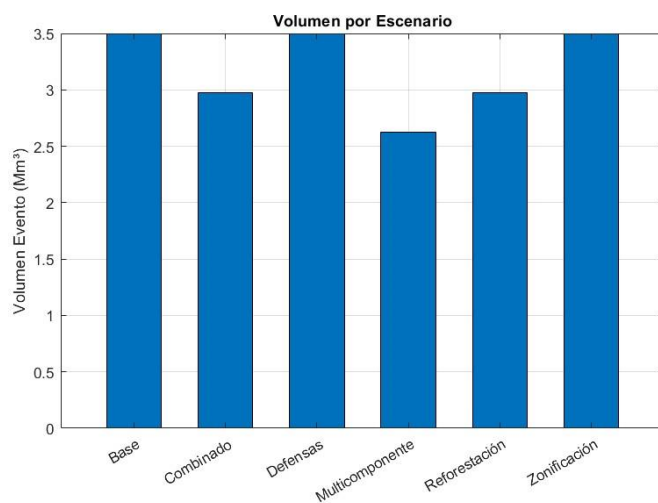
Bocatomas Protegidas

Mostrar Resultados

Exportar a Excel

Resumen de Análisis

Volumen del evento: 2.62 Mm³
Bocatomas protegidas: 64
Sectores urbanos protegidos: 14



Caudal Pico

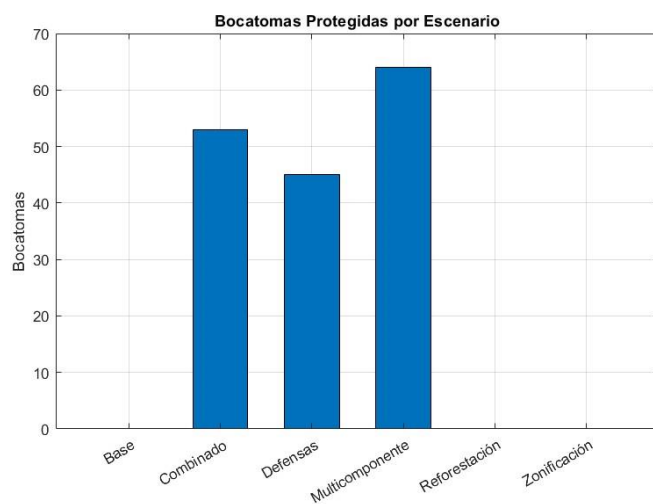
Volumen de Escorrentía

Bocatomas Protegidas

Mostrar Resultados

Exportar a Excel

Resumen de Análisis



Caudal Pico

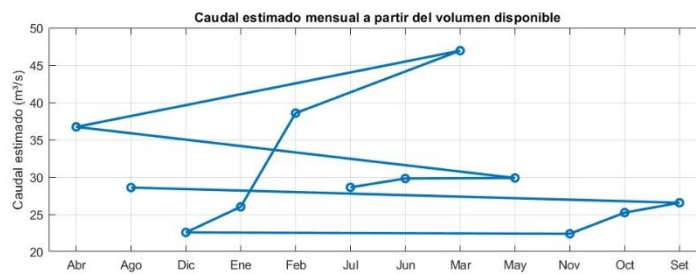
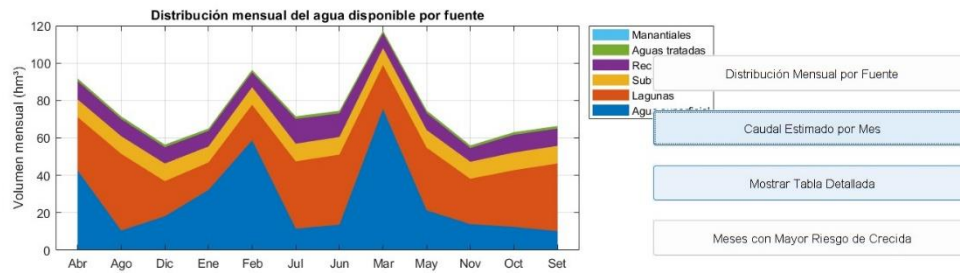
Volumen de Escorrentía

Bocatomas Protegidas

Mostrar Resultados

Exportar a Excel

Resumen de Análisis



Current Folder

- escenarios_climaticos_graficas_chancay.m
- GUI_Hidrologia.m
- GUI_Mitigacion_Chancay.m
- impacto_crecidas_figuras_detalladas.m
- Mitigacion_Chancay.xlsx
- oferta.m
- optimizacion_prediccion_crecidas_2023.m
- resultados_oferta_escenarios.csv

Editor - C:\Trabajo\Tesis\Grupo Laurent\Quispe\Matlab\GUI_Mitigacion_Chancay.m

```

+15  escenarios_climaticos_graficas_chancay.m  GUI_Hidrologia.m  medidas_mitigacion_Scenarios_chancay.m  GUI_Mitigacion_Chancay.m
97      disp(T);
98  end
99
100  function exportar_excel(escenarios, caudales, volumenes, bocatomas, sectores)
101
102      T = table(escenarios(:), caudales(:), volumenes(:), bocatomas(:), sectores(:), ...
103      'VariableNames', {'Escenario','CaudalPico_m3s','VolumenEvento_Mm3','BocatomasProtegidas','SectoresProtegidos'});
104      writetable(T, 'Mitigacion_Chancay.xlsx');
105      msgbox('Datos exportados a Mitigacion_Chancay.xlsx', 'Exportación Exitosa');
106  end
107
108  function mostrar_resumen(txt, caudales, volumenes, bocatomas, sectores)
109
110      mejor_caudal = caudales(6);
111      mejor_volumen = volumenes(6);
112      mejor_bocatomas = bocatomas(6);
113      mejor_sectores = sectores(6);
114      txt.String = sprintf(['Mejor escenario: Multicomponente\n\n' ...
115      'Caudal pico reducido a %.1f m³/s\n' ...
116      'Volumen del evento: %.2f Mm³\n' ...
117      'Bocatomas protegidas: %d\n' ...
118      'Sectores urbanos protegidos: %d'], ...
119      mejor_caudal, mejor_volumen, mejor_bocatomas, mejor_sectores);
120  end

```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

('Defensas')	380	3.5	45	10	
('Reforestación')	902.5	2.98	0	0	
('Combinado')	285	2.98	53	11	
('Zonificación')	950	3.5	0	8	
('Multicomponente')	190	2.63	64	14	

medidas_mitigacion_Scenarios_chanca...

MEDIDAS DE MITIGACIÓN BASADAS EN
MODELADO HIDROLÓGICO - CUENCA
CHANCAY (HUARAL)

MEDIDAS DE MITIGACIÓN BASADAS EN
DATOS BASE (ANA, 2023)

ESCENARIOS DE MITIGACIÓN

GRÁFICO: Caudal Pico

f >>



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



PLAN
DE GESTIÓN
DE RECURSOS
HÍDRICOS

DE CUENCA
CHANCAY - HUARAL

ACTUALIZADO AL 2023



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego





AFORO EN RÍO CHANCAY HUARAL

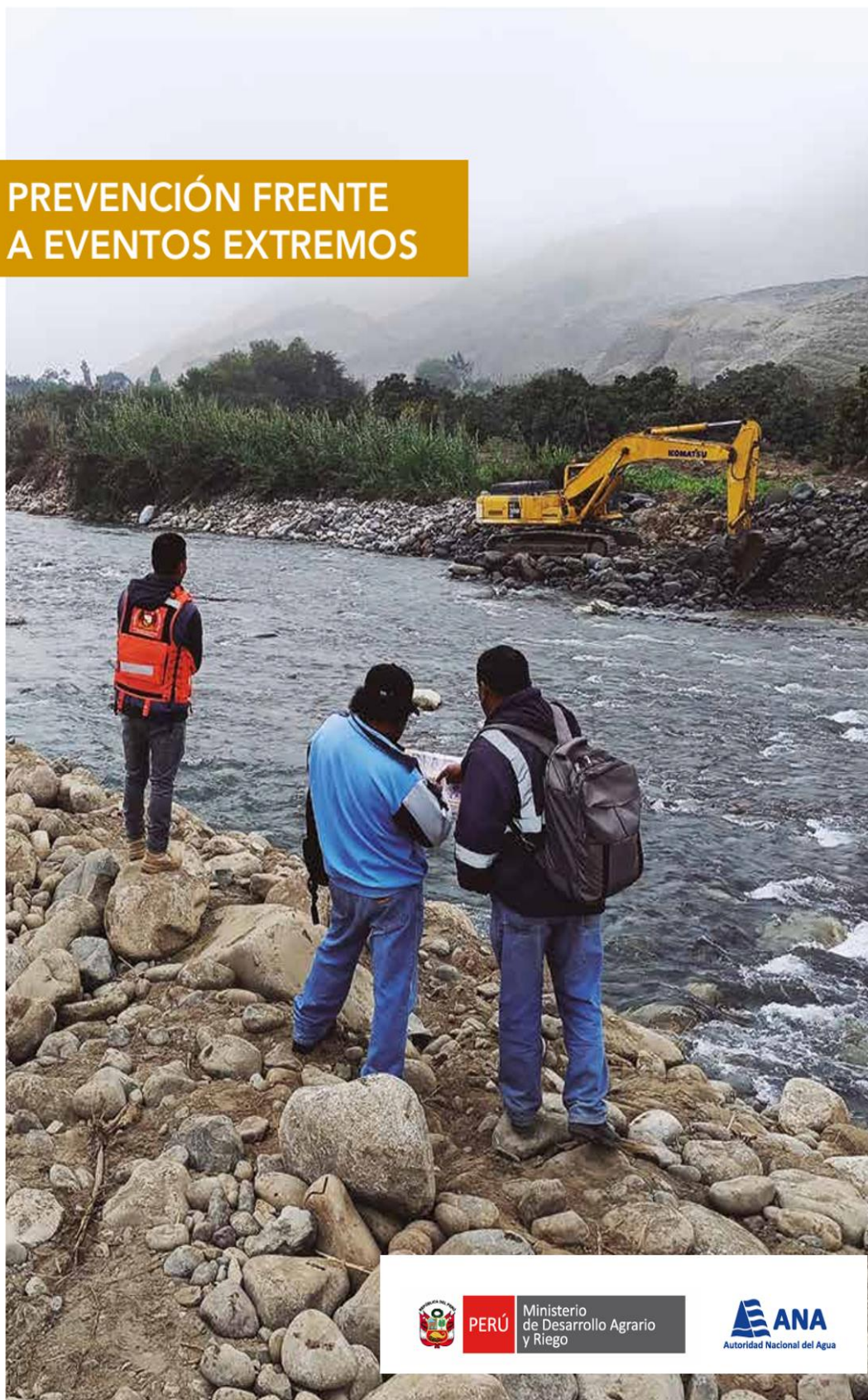


PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



PREVENCIÓN FRENTE A EVENTOS EXTREMOS



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

ANA
Autoridad Nacional del Agua



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 029-2025-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL No 211-2025-FIMGC-D**, a los **quince días del mes de agosto de 2025**, siendo las **4:00 p.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **Ing. Angel Hugo Vilchez Peña**, y los miembros: **Ing. Edward LEON PALACIOS**, **Ing. Abner CURI VEGA** y **Ing. Jaime Leonardo BENDEZU PRADO**, actuando como secretario docente el **MSc. Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**, del bachiller:

ADAN QUISPE OCHOA

Quien presentó la tesis denominada:

Modelo hidrológico de crecidas para la prevención de desastres naturales en la cuenca Chancay, Huaral-2025

Los señores miembros del jurado, luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con quince (15)

Siendo las **5:30 p.m.** del día **15 de agosto de 2025**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad con lo actuado, los miembros del jurado firman al pie del presente.


Ing. Angel Hugo Vilchez Peña
Presidente


Ing. Edward LEON PALACIOS
Miembro


Ing. Abner CURI VEGA
Miembro


Ing. Jaime Leonardo BENDEZU PRADO
Miembro - Asesor


MSc. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Secretario docente de la FIMGC

FACULTAD DE INGENIERÍA
DE MINAS Y CIVIL
Av. Independencia S/N
Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana "

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 015-2025-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuelas Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSCH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : Adan QUISPE OCHOA

Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL

Título de la Tesis : Modelo hidrológico de crecidas para la prevención de
desastres naturales en la cuenca Chancay, Huaral –
2025

Evaluación de la Originalidad : 13 % Índice de Similitud

Identificador de la entrega : 2754760069

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 18 de setiembre del 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Mg. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

Modelo hidrológico de crecidas para la prevención de desastres naturales en la cuenca Chancay, Huaral – 2025

por Adan QUISPE OCHOA

Fecha de entrega: 18-sept-2025 10:51a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2754760069
Nombre del archivo: Te_Adan_Quispe_Ochoa.pdf (7.8M)
Total de palabras: 26626
Total de caracteres: 148274

Modelo hidrológico de crecidas para la prevención de desastres naturales en la cuenca Chancay, Huaral – 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%	13%	5%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.ana.gob.pe	6%
	Fuente de Internet	
2	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
3	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	1%
	Trabajo del estudiante	
4	repositorio.unap.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.lamolina.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
6	riunet.upv.es	1%
	Fuente de Internet	
7	www.researchgate.net	<1%
	Fuente de Internet	
8	repositorio.upla.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	

9	tierra.rediris.es Fuente de Internet	<1 %
10	repositorio.unach.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
11	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.unbosque.edu.co Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.uchile.cl Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to University of Newcastle upon Tyne Trabajo del estudiante	<1 %
15	Ormeno, Victoria Margarita Abarca. "Propuesta De implementacion De Mecanismos De retribucion Por Servicios ecosistemicos (MRSE) hidricos Como Un Mecanismo Financiero y De Gobernanza En La Cuenca Chancay-Huaral", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2022 Publicación	<1 %
16	Lapa Arellano, Allen Dennis. "Diseño de un Sistema de Control Difuso de la Temperatura y la Humedad Relativa de una Cámara de	<1 %

Envejecimiento", Pontificia Universidad Catolica del Peru (Peru)

Publicación

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 30 words
Excluir bibliografía	Activo		