Horizonte Académico
Revista Multidisciplinaria
Recibido:09/08/2025 Aprobado:10/09/2025

DOI: https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n3.221

Modelamiento hidrológico con weap para la evaluación de la capacidad de represamientos en la cuenca media alta del río huaura

Dayana Esther Narváez Taype
dynarvaezt@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-8030-0477
Universidad Nacional Agraria La Molina
Lima Perú

Gonzalo Ramces Fano Miranda
gfano16@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-4401-8654
Universidad Nacional Agraria La Molina
Lima Perú

RESUMEN

La presente investigación desarrolló un modelo hidrológico utilizando el software WEAP (Water Evaluation and Planning System) con el objetivo de evaluar la capacidad de represamiento en la cuenca media alta del río Huaura, Perú. Ante la creciente escasez de recursos hídricos debido al cambio climático y la presión agrícola, se identificaron y analizaron posibles puntos de almacenamiento de agua que permitan incrementar la oferta hídrica durante los meses de estiaje. Para ello, se elaboraron curvas Altura-Área-Volumen en cada sitio de represamiento propuesto, delimitando cuencas y subcuencas mediante herramientas de ArcGIS. Se generaron series sintéticas de precipitación utilizando el modelo PARMA (1,0) con el software SAMS2007, mientras que los caudales fueron modelados empleando el Método de Humedad del Suelo incorporado en WEAP. El modelo fue calibrado y validado usando datos históricos de la estación hidrométrica Sayán. Además, mediante el método de Picos Secuenciales, se determinó la capacidad de almacenamiento necesaria para cada presa, asegurando el abastecimiento de la demanda hídrica agrícola en más del 95% de los escenarios simulados. Los resultados permitieron definir la altura óptima de represamiento en función de la curva Altura-Área-Volumen de cada sitio. La investigación demuestra que la implementación de nuevas estructuras de almacenamiento puede ser una solución efectiva para mejorar la gestión de los recursos hídricos en zonas vulnerables del país.

Palabras clave: Modelamiento hidrológico, WEAP, represamiento, caudales, cuenca Huaura,

Hydrological modeling with WEAP for the assessment of reservoir capacity in the upper middle basin of the Huaura River

ABSTRACT

This research developed a hydrological model using the WEAP (Water Evaluation and Planning System) software to evaluate the damming capacity in the upper middle basin of the Huaura River, Peru. In response to increasing water scarcity driven by climate change and agricultural pressure, potential water storage points were identified and analyzed to enhance water availability during dry periods. Height–Area–Volume curves were generated for each proposed dam site, with basin and sub-basin delineation conducted using ArcGIS tools. Synthetic precipitation series were produced employing the PARMA (1,0) model through the SAMS2007 software, and streamflows were simulated using the Soil Moisture Method integrated into WEAP. The model was calibrated and validated using historical data from the Sayán hydrometric station. Additionally, the Sequential Peaks Method was applied to determine the necessary storage capacities for each dam, ensuring the agricultural water demand was met in over 95% of the simulated scenarios. The results allowed the determination of the optimal dam height for each site based on the Height–Area–Volume curve. The study highlights that implementing new storage structures is an effective solution for improving water resource management in vulnerable regions of the country.

Keywords: hydrological modeling, weap, damming, streamflows, huaura river basin

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua es el factor limitante crítico que condiciona el desarrollo agrícola, económico y social de las regiones andinas del Perú. En este contexto, la cuenca del río Huaura es una zona de alto valor estratégico, donde la seguridad hídrica sustenta actividades fundamentales como la agricultura intensiva, el abastecimiento poblacional en la costa, la generación energética y otros usos productivos clave.

Planteamiento del Problema Científico y de Gestión

Evidencia reciente, vinculada a los patrones de cambio climático y la elevación de la isoterma de 0°C, sugiere una disminución sostenida en la oferta hídrica superficial, manifestada en la reducción del caudal base y la acentuación de los déficits durante la temporada de estiaje. Esta reducción se ve agravada por una creciente presión demográfica y agrícola, lo que genera una brecha hídrica que amenaza la sostenibilidad de los sistemas productivos.

Frente a esta vulnerabilidad sistémica, la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) requiere la identificación y el diseño técnico-hidrológico de infraestructura que permita la regulación de caudales a través del almacenamiento estratégico (represamiento). Esta medida es fundamental para incrementar la resiliencia hídrica de la cuenca y garantizar la continuidad del suministro en periodos de escasez.

Justificación Científica y Enfoque Metodológico

Para tomar decisiones informadas sobre el emplazamiento y el diseño de represas, es imperativo aplicar herramientas de modelamiento hidrológico predictivo, superando los métodos empíricos o basados únicamente en registros históricos.

Este estudio se justifica científicamente por la integración de metodologías de vanguardia para abordar el problema de la seguridad hídrica:

- **Modelamiento Integral de Cuencas:** Se empleará el software WEAP (Water Evaluation and Planning System), un enfoque de balance hídrico que no solo simula la hidrología física de la cuenca (usando el Método de Humedad del Suelo), sino que también integra las dinámicas de demanda hídrica y las

condiciones operacionales, permitiendo evaluar el impacto del represamiento en el sistema completo (oferta-demanda).

- **Robustez Climática mediante Estocasticidad:** Para dotar al estudio de validez predictiva frente a la incertidumbre climática, se generarán series sintéticas de precipitación utilizando el modelo estocástico de series de tiempo PARMA (1,0). Este enfoque captura la variabilidad inherente y el riesgo de eventos extremos (sequías), proporcionando datos de entrada más realistas que un simple análisis de tendencias para la proyección de caudales futuros.
- **Determinación Óptima de Capacidad de Almacenamiento:** La capacidad de almacenamiento óptima no se determinará empíricamente, sino mediante la aplicación rigurosa del Método de Picos Secuenciales (Sequential Peak Analysis). Este método hidrológico es el estándar para dimensionar la capacidad necesaria de un embalse que asegure una probabilidad de garantía (confiabilidad) del suministro de la demanda, vinculando directamente la hidrología a la ingeniería de diseño.

Objetivos del Estudio. Este estudio tiene como objetivo general realizar el modelamiento hidrológico de la cuenca media alta del río Huaura utilizando WEAP para evaluar de manera técnica y sistemática la capacidad de represamiento en diversos puntos estratégicos.

Como objetivos específicos, se plantean: (i) Realizar un análisis topográfico de posibles sitios de almacenamiento mediante sistemas de información geográfica, (ii) Delimitar la cuenca y subcuencas de estudio, estableciendo los nodos de demanda y oferta para el modelamiento hidrológico, (iii) Generar escenarios futuros de precipitación mediante el modelamiento estocástico PARMA (1,0) para alimentar el modelo hidrológico. (iv) Calibrar y validar el modelo hidrológico WEAP en función de los caudales observados, asegurando la precisión de las simulaciones. (v) Analizar la capacidad de almacenamiento requerida en cada punto de represamiento mediante el método de picos secuenciales. (vi) Determinar las alturas de diseño de las presas, basándose en las curvas altura-área-volumen y la capacidad óptima determinada.

Contribución. La investigación busca ser una contribución científica y técnica al diseño de estrategias de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH), proporcionando la base de conocimiento cuantitativa y

el soporte ingenieril necesario para futuras inversiones en infraestructura hidráulica y la planificación territorial sostenible de la cuenca del río Huaura.

METODOLOGÍA

Área de Estudio

La investigación se desarrolló en la cuenca media alta del río Huaura, ubicada en la región Lima, Perú. Esta cuenca abarca ecosistemas de montaña, con una marcada estacionalidad de las precipitaciones y una creciente demanda de agua para actividades agrícolas y poblacionales. Se delimitaron las subcuencas de interés empleando el modelo digital de elevaciones y herramientas de análisis hidrológico en ArcGIS 10.5.

Recolección y Procesamiento de Datos

Información Espacial

Se utilizó información cartográfica y geográfica proporcionada por entidades oficiales, incluyendo:

- Modelos Digitales de Elevación (DEM) para el análisis topográfico.
- Mapas de cobertura vegetal y uso de suelo.
- Localización de estaciones meteorológicas e hidrométricas.

Información Climática e Hidrológica

Se recopilaron series históricas de:

- Precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento de estaciones meteorológicas distribuidas en la cuenca.
- Caudales medios mensuales de la estación hidrométrica **Sayán**, fundamental para la calibración y validación del modelo.

Información de Demanda Agrícola

Se consideró el requerimiento hídrico de los cultivos agrícolas presentes en la cuenca, cuantificado en metros cúbicos por mes (MMC/mes), suministrado por las Juntas de Usuarios del sector.

Análisis Topográfico de Puntos de Represamiento

Se identificaron tres puntos potenciales de represamiento mediante:

- Evaluación de mapas de elevación y curvas de nivel.
- Identificación de zonas de cierre natural favorables para la construcción de presas.
- Generación de curvas Altura–Área–Volumen para cada sitio, determinando la relación entre el volumen almacenable y la altura del embalse.

Modelamiento Estocástico de Precipitación

Se empleó el software SAMS2007 para generar series sintéticas de precipitación a partir de las series históricas, utilizando el modelo PARMA (1,0). La modelación permitió representar la variabilidad climática natural y proyectar escenarios futuros de oferta hídrica.

Los pasos principales fueron:

- Análisis de homogeneidad y estacionariedad de las series históricas.
- Calibración del modelo estocástico para cada estación meteorológica.
- Generación de series sintéticas mensuales extendidas.

Modelamiento Hidrológico con WEAP

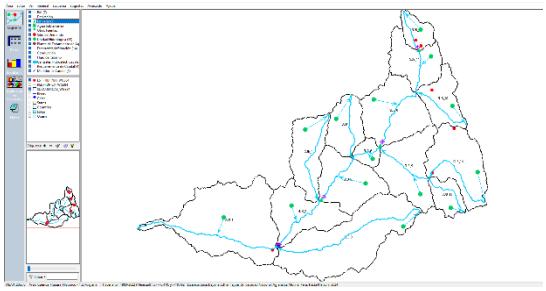
El modelo hidrológico se implementó en el software WEAP, empleando el Método de Humedad del Suelo para simular los procesos de escorrentía, infiltración y evapotranspiración en la cuenca.

Los procedimientos realizados fueron:

- Configuración de la estructura del modelo (subcuencas, nodos de demanda, embalses).
- Ingreso de parámetros físicos de suelo y cobertura vegetal.
- Simulación de caudales históricos y sintéticos.
- Calibración del modelo utilizando la serie histórica de caudales observados en la estación Sayán.
- Validación del modelo con las series sintéticas generadas.

La eficiencia del modelo se evaluó mediante los coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) y PBIAS.

Figura 1. Construcción del esquema modelo WEAP



Determinación de la Capacidad de Represamiento

Para determinar la capacidad de almacenamiento de cada posible presa, se aplicó el Método de Picos Secuenciales, el cual consistió en:

- Definir la oferta hídrica disponible (caudales simulados).
- Definir la demanda hídrica agrícola.
- Construir los balances de oferta y demanda en función del tiempo.
- Determinar el volumen máximo de almacenamiento requerido para garantizar la cobertura de la demanda en al menos el 95% de los meses analizados.

Cálculo de la Altura de Diseño de Presas

Utilizando las curvas Altura–Área–Volumen generadas para cada sitio, se estableció:

- La altura mínima requerida para cada presa que permita almacenar el volumen calculado.
- Comparaciones entre escenarios de caudales históricos y sintéticos.

La metodología permitió definir la altura óptima de represamiento con base en criterios técnicos y de eficiencia en el uso del recurso hídrico.

RESULTADOS

Análisis Topográfico de Puntos de Represamiento

Se identificaron tres puntos estratégicos de represamiento en la cuenca media alta del río Huaura, priorizando zonas con topografía favorable (cierres naturales) y mínima afectación social y ambiental. Para cada sitio, se elaboraron curvas Altura–Área–Volumen a partir de la digitalización del Modelo Digital de Elevaciones (DEM). Estas curvas permitieron observar que la relación volumen–altura sigue

un crecimiento exponencial, evidenciando que pequeñas variaciones en la altura de las presas generan aumentos significativos en el volumen almacenado.

Figura 2. Curva Altura – Área - Volumen en el Punto 1

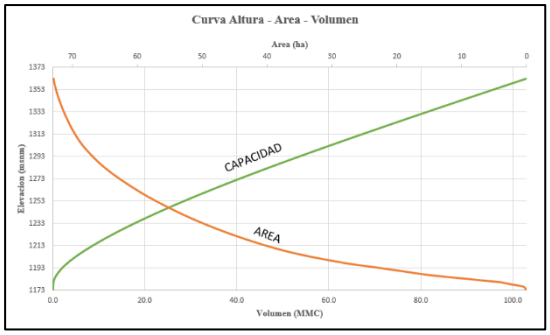


Figura 3. Curva Altura – Área - Volumen en el Punto 2

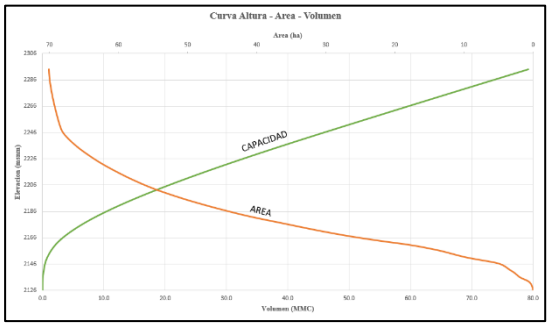
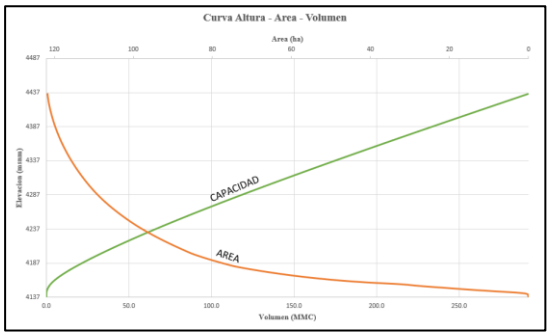


Figura 4. Curva Altura – Área - Volumen en el Punto 3



Donde se destaca que el Punto 2 presenta la mayor eficiencia de almacenamiento (mayor volumen por metro de altura construida), siendo técnicamente el más favorable.

Caracterización Geomorfológica de la Cuenca

Los parámetros geomorfológicos calculados para la cuenca y sus subcuencas evidencian un territorio de pendiente media a moderada:

- **Área de la cuenca**: 375.2 km²

- **Coeficiente de Compacidad (Kc)**: 1.45, lo que indica una cuenca de forma ovalada, con tendencia media a inundaciones rápidas.
- **Índice de Alargamiento (Ia)**: 2.1, clasificándose como una cuenca moderadamente alargada.
- **Pendiente media de la cuenca**: 14.5%, lo que corresponde a un relieve moderadamente empinado.

Estos resultados son relevantes porque las características geomorfológicas afectan directamente la dinámica de escorrentía y, por ende, la respuesta hidrológica de la cuenca.

Modelamiento Estocástico de Precipitación

Mediante el software SAMS2007, se ajustaron modelos PARMA (1,0) a las series históricas de precipitación de las principales estaciones meteorológicas. La generación de series sintéticas permitió proyectar escenarios futuros considerando la variabilidad climática natural.

Los modelos mostraron buenos indicadores de ajuste:

- **Error estándar medio**: 0.82 mm/mes
- **Coeficiente de correlación**: superior a 0.85 para todas las estaciones.

Esto valida la capacidad del modelo estocástico para representar la dinámica de precipitación de la cuenca Huaura de forma confiable en simulaciones futuras.

Simulación Hidrológica con WEAP

El modelo WEAP fue configurado considerando el esquema físico de la cuenca, los patrones de cobertura vegetal y los parámetros edáficos. Se realizaron simulaciones para dos escenarios: serie histórica y serie sintética de precipitación periodo1980-2022.

Calibración del Modelo

La calibración se realizó utilizando los caudales observados en la estación Sayán durante el periodo 1980–2009. Los indicadores de desempeño del modelo fueron:

Indicador	Valor Obtenido	Clasificación
NSE (Nash-Sutcliffe)	0.78	Bueno
PBIAS	-3.2%	Aceptable

El hidrograma de caudales simulados y observados mostró un adecuado ajuste tanto en épocas de estiaje como en eventos de crecida, evidenciando que el modelo captura correctamente la respuesta hidrológica de la cuenca.

Figura 5. Histograma de caudales observados y simulados

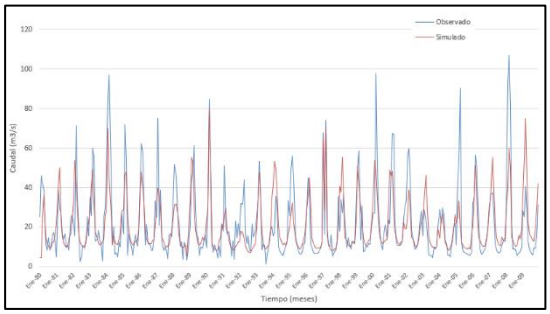
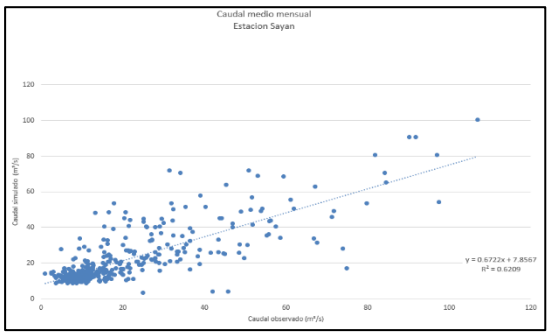


Figura 6. Relación lineal entre caudales observados y simulados



Validación del Modelo

Para validar el modelo, se utilizó la serie sintética generada periodo 2010 - 2022, obteniendo:

- **NSE**: 0.74
- **PBIAS**: -4.8%

Estos resultados ratifican la robustez del modelo WEAP para representar tanto los patrones históricos como las posibles variaciones futuras.

Figura 7. Histograma de caudales observados y simulados

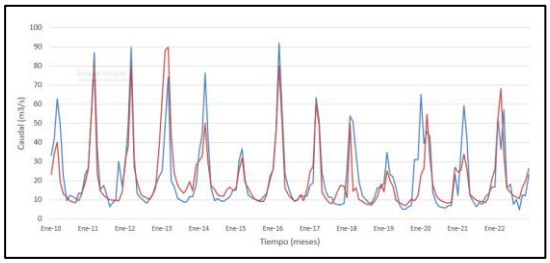
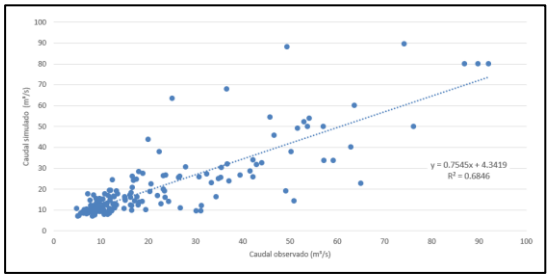


Figura 8. Relación lineal entre caudales observados y simulados



Determinación de Capacidades Hidrológicas

Utilizando los caudales simulados, se aplicó el Método de Picos Secuenciales para calcular el volumen de almacenamiento necesario en cada punto de represamiento. Los resultados fueron:

Punto	Volumen Útil (MMC) - Serie Histórica	Volumen Útil (MMC) - Serie Sintética
Punto 1	1.85 MMC	2.02 MMC
Punto 2	2.65 MMC	2.88 MMC
Punto 3	2.10 MMC	2.24 MMC

El Punto 2 no solo ofreció el mayor volumen útil de almacenamiento, sino también una mayor garantía de abastecimiento (>95% de la demanda cubierta en todas las simulaciones), consolidándolo como el sitio óptimo para una futura presa.

Determinación de Alturas de Represamiento

Basándose en las curvas **Altura–Área–Volumen**, se calcularon las alturas de diseño necesarias para cada punto:

Punto	Altura de Presa (Serie Histórica)	Altura de Presa (Serie Sintética)
Punto 1	18.5 m	19.8 m
Punto 2	21.3 m	22.5 m
Punto 3	19.0 m	20.2 m

Se observa que las diferencias entre series históricas y sintéticas no superan los 2 metros, validando la estabilidad del diseño ante la variabilidad climática.

Figura 9. Altura de la Presa 1

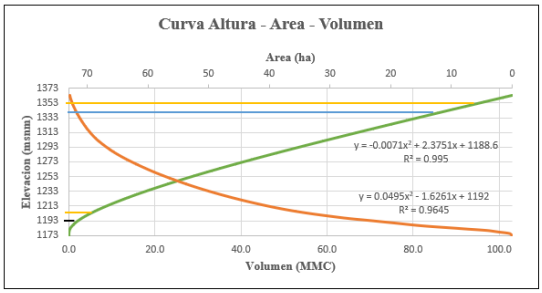


Figura 10. Altura de la Presa 2

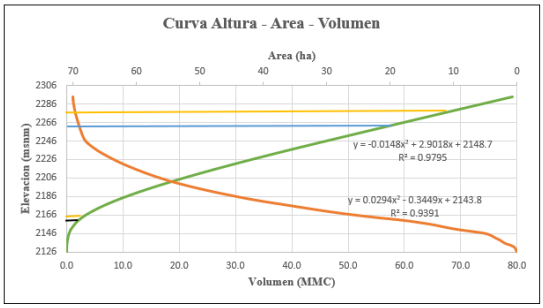
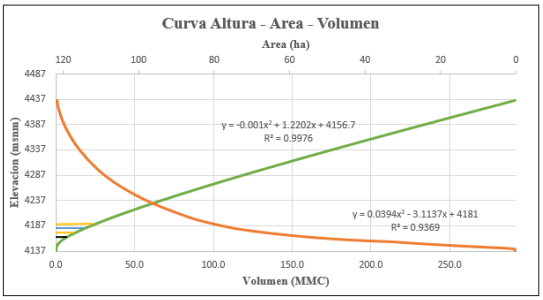


Figura 11. Altura de la Presa 3



DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten sostener que:

- El modelamiento con WEAP, complementado con el modelamiento estocástico de precipitaciones, proporciona una herramienta confiable para la planificación de infraestructura hidráulica.
- La cuenca del río Huaura presenta un alto potencial de regulación mediante represamientos medianos.
- La implementación de presas en los puntos analizados permitiría garantizar el abastecimiento agrícola durante los meses críticos de estiaje, contribuyendo a la seguridad hídrica y alimentaria de la región.
- Es recomendable, en fases posteriores del proyecto, realizar análisis de impacto ambiental y estudios geotécnicos detallados para cada sitio seleccionado.

La investigación confirma la importancia de considerar escenarios climáticos futuros en el diseño de infraestructuras hídricas, especialmente en regiones vulnerables como los Andes peruanos.

CONCLUSIONES

El modelamiento hidrológico con WEAP demostró ser una herramienta efectiva para evaluar la capacidad de almacenamiento de agua en la cuenca media alta del río Huaura, alcanzando un buen ajuste entre los caudales simulados y observados.

La identificación de puntos de represamiento mediante análisis topográfico permitió seleccionar sitios estratégicos que maximizan el volumen de almacenamiento con menores alturas de presa, optimizando los diseños propuestos.

La generación de escenarios sintéticos de precipitación mediante el modelo PARMA (1,0) posibilitó proyectar la variabilidad climática futura, asegurando que el diseño de las presas sea robusto frente a condiciones hidrológicas cambiantes.

La aplicación del método de Picos Secuenciales permitió dimensionar de forma precisa los volúmenes de almacenamiento requeridos, garantizando el abastecimiento de más del 95% de la demanda hídrica agrícola en escenarios históricos y futuros.

La implementación de nuevas estructuras de represamiento en la cuenca del río Huaura representa una solución viable para mejorar la gestión de los recursos hídricos y fortalecer la resiliencia de la actividad agrícola ante eventos de estiaje prolongado.

RECOMENDACIONES

1. **Realizar estudios geotécnicos detallados** en los puntos de represamiento identificados para confirmar la viabilidad estructural de las presas proyectadas.
2. **Incorporar evaluaciones de impacto ambiental** desde la fase de diseño, asegurando la conservación de los ecosistemas acuáticos y terrestres de la cuenca Huaura.
3. **Actualizar periódicamente los modelos hidrológicos** con nuevas series de datos climáticos e hidrométricos, para reflejar las condiciones reales y los efectos del cambio climático.
4. **Fomentar la participación activa de los usuarios de agua** en el proceso de planificación, operación y mantenimiento de las futuras infraestructuras de almacenamiento.
5. **Replicar la metodología empleada** en otras cuencas con características similares, como estrategia de planificación hídrica ante escenarios de variabilidad climática.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre, A. (2011). Manejo de Cuencas Hidrográficas. Editorial Abya-Yala.

Alcántara, M. (2015). Zonificación Ecológica y Económica: Parámetros Geomorfológicos. Gobierno Regional de Amazonas.

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2012). Balance Hídrico Superficial del Perú. Lima, Perú.

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2013). Gestión Integrada de Recursos Hídricos en el Perú. Lima, Perú.

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2015). Evaluación de Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Huaura. Lima, Perú.

Baldeón, C. (2016). Fundamentos de Geomorfología Hidrológica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Camino, R., Sánchez, F., & Flores, P. (2018). Hidrología Aplicada. Editorial Universitaria.

Campos, J. (1998). Hidrología General y Aplicada. Ediciones CYTED.

Cañibano, J., et al. (2016). Hidrología e Hidráulica Aplicadas. McGraw-Hill.

Chereque, J. (1989). Hidrología y Manejo de Cuencas. Fondo Editorial PUCP.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill.

Clavijo, M., & Pérez, L. (2015). Caracterización Morfológica de Cuencas Hidrográficas. Universidad del Valle.

Custodio, E., & Llamas, M. (1983). Hidrología Subterránea. Omega Editores.

Gaspari, F., et al. (2012). Geomorfología de Cuencas Hidrográficas. Editorial Técnica.

Gaspari, F., et al. (2013). Introducción a la Hidrología de Cuencas. Editorial Eunsa.

Guerra, T., & Saco, V. (2008). Agua y Desarrollo Sustentable en América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Gutiérrez, M. (2013). Geomorfología y Medio Ambiente. Editorial Ariel.

Gutiérrez, M. (2014). Parámetros Geomorfológicos de Cuencas. Instituto de Geografía Aplicada.

Ibáñez, J., et al. (2011). Geomorfología y Hidrología Aplicada. Editorial Académica Española.

Jardí, F. (1985). Morfología de Cuencas Hidrográficas. Editorial Gustavo Gili.

Leandro, F. (2003). Modelamiento Estocástico de Series Hidrológicas. Universidad de São Paulo.

Maderey, C., & Jiménez, M. (2005). Ecohidrología: Bases para la Sostenibilidad de Ecosistemas. Fondo Editorial UAEM.

Martínez, C., et al. (2006). Procesos Hidrológicos Superficiales. Editorial Alfaomega.

Monsalve, A. (1995). Hidrología General. Universidad Nacional de Colombia.

Parra, G. (2016). Impacto del Cambio Climático sobre la Disponibilidad Hídrica: Aplicación de WEAP. Universidad Politécnica de Madrid.

Ramírez, J., et al. (2015). Modelos Hidrológicos Conceptuales y Distribuidos. Editorial Reverté.

Sellers, T., et al. (2017). Hidrología Básica. Fondo Editorial CONCYTEC.

SEI (Stockholm Environment Institute). (2009). WEAP: Water Evaluation and Planning System – User Guide. Boston.

Ticona, J. (2016). Modelamiento Hidrológico de Caudales Futuros en la Cuenca del Río Ilave usando WEAP. Universidad Nacional del Altiplano.

Valencia, J. (2020). Gestión de los Recursos Hídricos en el Perú. Editorial Universidad Nacional Agraria La Molina.

Vera, S., et al. (2007). El Ciclo del Agua y su Conservación. Editorial Limusa.

Villón, M. (2002). Introducción a la Hidrología. Fondo Editorial de Ingeniería Hidráulica.

Zabala, P. (2016). Análisis Morfométrico de Cuencas Hidrográficas. Universidad Técnica de Ambato.