

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Análisis de la eficiencia hídrica en el sistema de riego de la
comunidad de Para, distrito de Chaviña, región de Ayacucho basado
en la sostenibilidad agrícola - 2023**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Elvis Jhoseph SALCEDO CASAS

ASESOR:

Mtro. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO

AYACUCHO - PERÚ

2024

Dedicatoria

A Allison y Antonella, por ser la luz en medio del caos, recordándonos que, incluso en los momentos más oscuros, siempre surge una nueva esperanza. Su llegada nos llena de alegría y nos inspira a seguir adelante, con la certeza de que ustedes son el brillo que ilumina nuestro camino.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios, quien ha sido mi fortaleza y guía en todo momento. A pesar de las dificultades, su presencia constante me ha permitido avanzar y continuar en este camino con esperanza y determinación.

A mi familia, especialmente a mis Padres y hermanos, les extiendo mi más profundo agradecimiento por su apoyo incondicional, su amor inquebrantable y su fe en mí. Ustedes han sido mi inspiración y mi mayor motivación para lograr esta meta.

Agradezco también a mi asesor el Ing. Jaime Bendezú Prado, cuya guía y apoyo han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Sus consejos y conocimientos han enriquecido profundamente este proceso.

Al Ing. Alex Sander Ircañaupa Huamaní por sus observaciones presentadas en el tema de la estructura, de los objetivos de la investigación y los aportes que podría dar para la ampliación del conocimiento en temas de interpolación geoespacial.

Al Ing. Edward León Palacios por su consejo y dirección en los temas de contenido necesario de la presente investigación.

Finalmente, a mi alma mater, la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, expreso mi más sincera gratitud. Los años de aprendizaje en sus aulas no solo me han formado como profesional, sino también como persona. Donde quiera que vaya, llevaré su nombre en alto, con orgullo y gratitud por todo lo que me ha brindado.

Resumen

La investigación se centra en la eficiencia hídrica y sostenibilidad agrícola del sistema de riego de Para, en el Distrito de Chaviña, Región de Ayacucho. El objetivo principal es fortalecer la sostenibilidad agrícola a través de una gestión más eficiente del agua, ante los retos impuestos por el cambio climático y la creciente demanda hídrica. La metodología empleada abarca un diseño de investigación no experimental que se concentra en evaluar la hidrología, fisiografía y la infraestructura hidráulica existente para determinar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico. Además, se analizan las condiciones socioeconómicas y la interacción de la comunidad con los recursos hídricos para mejorar la eficiencia y sostenibilidad agrícola. El análisis de la eficiencia hídrica revela que el sistema de riego de Para podría no enfrentar fluctuaciones extremas en los caudales disponibles para riego, lo que indica una estabilidad favorable para la agricultura local. La sostenibilidad agrícola en Para se caracteriza por una gestión integrada y científicamente respaldada. Los resultados sugieren la importancia de aplicar modelos hidrológicos para anticipar periodos de escasez o exceso de agua y desarrollar planes de riego ajustados a la evapotranspiración y coeficientes de cultivo de los cultivos. Se recomienda implementar infraestructura de medición avanzada y sistemas de riego modernos que faciliten ajustes precisos en el riego, maximizando así la eficiencia del uso del agua. En conclusión, la aplicación de estrategias basadas en una evaluación hidrológica detallada y un análisis de la eficiencia hídrica puede resultar en una optimización significativa del uso del agua, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola y al bienestar de las poblaciones dependientes de la agricultura en Para.

Palabras claves: Agricultura, Clima, Evapotranspiración, Hidrología, Sostenibilidad, Tecnología.

Abstract

The research focuses on water efficiency and agricultural sustainability of the Para irrigation system in the Chaviña District, Ayacucho Region. The main objective is to strengthen agricultural sustainability through more efficient water management in the face of the challenges imposed by climate change and increasing water demand. The methodology employed includes a non-experimental research design that focuses on evaluating the hydrology, physiography and existing hydraulic infrastructure to determine the availability and quality of water resources. In addition, socioeconomic conditions and community interaction with water resources are analyzed to improve agricultural efficiency and sustainability. The analysis of water efficiency reveals that Para's irrigation system may not face extreme fluctuations in the flows available for irrigation, indicating a favorable stability for local agriculture. Agricultural sustainability in Para is characterized by integrated and scientifically supported management. The results suggest the importance of applying hydrological models to anticipate periods of water shortage or excess and to develop irrigation plans adjusted to evapotranspiration and crop coefficients. It is recommended to implement advanced metering infrastructure and modern irrigation systems that facilitate precise irrigation adjustments, thus maximizing water use efficiency. In conclusion, the implementation of strategies based on a detailed hydrological assessment and water efficiency analysis can result in a significant optimization of water use, contributing to agricultural sustainability and the welfare of agriculture-dependent populations in Para.

Keywords: Agriculture, Climate, Evapotranspiration, Hydrology, Sustainability, Technology

Índice general

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Índice general.....	vi
Índice de tablas	xi
Índice de figuras.....	xiii
Índice de anexos	xiv
Introducción.....	xv
Capítulo I Planteamiento del problema.....	17
1.1. Descripción del problema	17
1.2. Delimitación del problema	18
1.2.1. Espacial (geográfica).....	18
1.2.2. Temática y unidad de análisis.....	19
1.3. Formulación del problema	19
1.3.1. Problema general	19
1.3.2. Problemas específicos.....	19
1.4. Justificación e importancia.....	19
1.4.1. Justificación.....	19
1.4.2. Importancia.....	20
1.5. Limitaciones de la investigación	20
1.6. Objetivos	21
1.6.1. Objetivo general	21
1.6.2. Objetivos específicos.....	21
Capítulo II Marco teórico	22
2.1. Antecedentes	22
2.1.1. Investigaciones internacionales	22

2.1.2. Investigaciones nacionales	24
2.2. Bases teóricas	26
2.2.1. Ciclo Hidrológico.....	26
Evaporación	27
Precipitación.....	27
Infiltración	27
Escorrentía	28
2.2.2. Parámetros de una cuenca hidrográfica	28
Lineales.....	28
Perímetro.....	28
Longitud del Cauce Principal (Lc).....	28
Cantidad de Escurrimiento	30
Superficiales.....	31
Área de la Cuenca.....	31
2.2.3. Variables morfológicas de una cuenca	31
Densidad de Drenajes Dd.....	31
Variación en la formación de una Cuenca	32
Coeficiente de Compacidad Kc.....	33
Coeficiente de forma Kf.....	33
Índice de alargamiento Ia	34
Coeficiente de masividad Km	34
Relieve de la Cuenca	34
Altitud Promedio de la Cuenca (H)	34
Clasificación Climática.....	35
Índice de humedad	35
2.2.4. Eficiencia hídrica	38
Teoría de eficiencia hídrica.....	38
Modelo de eficiencia hídrica	40

Enfoque eficiencia hídrica.....	40
2.2.5. Sistema de riego.....	41
Volumen del sistema de riego.....	41
Caudal del sistema de riego	42
Precipitación del sistema de riego	43
Presión del agua del sistema de riego	43
Tiempo del sistema de riego.....	44
Eficiencia del sistema de riego	44
Teoría de sistema de riego	45
Modelo de sistema de riego.....	46
Enfoque sistema de riego	48
2.2.6. Oferta Hídrica	48
Oferta Hídrica total	50
2.2.7. Demanda Hídrica.....	50
Necesidad de Agua para Propósitos Industriales – NAPI	51
Demanda de Agua Uso Pecuario	52
2.3. Marco Conceptual	52
2.3.1. Sistema de riego.....	52
2.3.2. Sostenibilidad agrícola.....	52
2.3.3. Cuantificación de infiltración	52
2.3.4. Cuantificación del suelo.....	53
Capítulo III Método de la investigación.....	55
3.1. Enfoque.....	55
3.2. Alcance.....	55
3.3. Diseño de investigación.....	56
3.4. Población y muestra	56
3.4.1. Población	56
3.4.2. Muestra	56

3.5. Hipótesis.....	56
3.5.1. Hipótesis general.....	56
3.5.2. Hipótesis específicas.....	56
3.6. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional	57
3.7. Técnicas e instrumentos.....	59
3.7.1. Técnicas.....	59
3.7.2. Instrumentos.....	59
3.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.....	59
3.9. Desarrollo del trabajo de tesis	59
3.9.1. Ubicación del área en estudio.....	59
Ubicación Política	59
Ubicación Geográfica	60
Ubicación Hidrográfica.....	60
Ubicación Administrativa	61
3.9.2. Accesibilidad y Vías de Comunicación	61
3.9.3. Fisiografía de la zona de estudio	61
Características fisiográficas de la unidad hidrográfica de Hualo - Para.....	61
3.9.4. Hidrografía de la Zona del Proyecto	71
Cuenca Yauca.....	71
Unidad Hidrográfica Hualo-Para	71
3.9.5. Infraestructura hidráulica existente	72
Registro de la infraestructura hidráulica.....	72
Análisis meteorológico e hidrométrico	73
Análisis de las variables meteorológicas	74
Análisis de consistencia de la información pluviométrica e hidrométrica	79
Cálculo de la relación entre la altura y la precipitación	80
3.9.6. Hidrología.....	83

Análisis de la Eficiencia Hídrica	87
3.9.7. Condiciones socioeconómicas.....	97
Agricultura	97
Ganadería	97
Minería Artesanal	98
3.9.8. Demanda Hídrica en la Comunidad de Para.....	98
Evapotranspiración de referencia	102
Clasificación Climática.....	106
Capítulo IV Resultados.....	110
4.1. Análisis e Interpretación de los resultados.....	110
4.1.1. Análisis de la eficiencia hídrica del sistema de riego de Para	110
4.2. Análisis de la Sostenibilidad agrícola.....	112
4.3. Estrategias sostenibles para optimizar el riego en Para.....	114
Conclusiones.....	115
Recomendaciones.....	116
Referencias bibliográficas	117
Anexos	121

Índice de tablas

Tabla 1	Tipo de Clase de corriente	30
Tabla 2	Tipo de Clase de escurrimiento.....	31
Tabla 3	Clasificación Climática	36
Tabla 4	Clasificación por Subtipos de Humedad.....	37
Tabla 5	Clasificación Térmica según la Evapotranspiración Potencial	37
Tabla 6	Clasificación por Subtipos según Régimen Térmico.....	38
Tabla 7	Parámetros para la cuantificación de las condiciones de infiltración del suelo	53
Tabla 8	Cuadro: Parámetros para la cuantificación de las condiciones del suelo...54	
Tabla 9	Cuadro de Operacionalización de variables	58
Tabla 10	Ubicación de la fuente hídrica	61
Tabla 11	Altura y Superficies de la unidad hidrográfica Hualo Para	65
Tabla 12	Altitud media de la unidad hidrográfica Hualo Para	68
Tabla 13	Características morfométricas de la unidad hidrográfica Hualo - Para	72
Tabla 14	Ubicación de estaciones meteorológicas	73
Tabla 15	Temperatura Media Mensual (°C)	74
Tabla 16	Humedad relativa media mensual (%).....	75
Tabla 17	Evaporación promedio mensual.....	76
Tabla 18	Velocidad del viento en (m/s)	76
Tabla 19	Precipitación promedio mensual (mm)	77
Tabla 20	Horas de sol promedio diario mensual	79
Tabla 21	Datos de precipitación para la presa Chaquiccocha.....	80
Tabla 22	Precipitación predicha para la presa Chaquiccocha	82
Tabla 23	Precipitación efectiva generada en la unidad hidrográfica (mm).....	83
Tabla 24	Generación de caudales (m ³ /seg) en la Unidad Hidrográfica	85
Tabla 25	Proyección de caudal medio en 5 años futuros	95
Tabla 26	Duración aproximada de las fases en el periodo vegetativo.....	98

Tabla 27	Coeficiente de cultivo (kc) de varios cultivos	99
Tabla 28	Datos para calcular la evapotranspiración.....	102
Tabla 29	Radiación Solar Estimada	103
Tabla 30	Evapotranspiración de Referencia (ETo) en Lucanas – Comunidad de Para	105
Tabla 31	Cálculo de la ETc para los Cultivos.....	105
Tabla 32	Déficit excedente climático.....	107
Tabla 33	Estrategias propuestas para optimizar el riego en Para	114

Índice de figuras

Figura 1	Perímetro y longitud de una cuenca	29
Figura 2	Asignación en el Orden de corrientes.....	30
Figura 3	Variación de una cuenca.....	32
Figura 4	Ubicación política del área de estudio	60
Figura 5	Curva hipsométrica	66
Figura 6	Curvas de nivel del rectángulo	67
Figura 7	Variación de la Temperatura Media Mensual (°C).....	74
Figura 8	Variación de la Humedad relativa media mensual (%)	75
Figura 9	Variación de la Evaporación promedio mensual.....	76
Figura 10	Variación de la Velocidad del viento en (m/s).....	77
Figura 11	Variación de la Precipitación promedio mensual (mm).....	78
Figura 12	Horas de sol promedio diario mensual	79
Figura 13	Código en Python de la ecuación lineal.....	81
Figura 14	Altitud-precipitación ecuación de regresión	82
Figura 15	Precipitación vs Caudales	87
Figura 16	Modelo de regresión OLS	90
Figura 17	Resultados de la regresión OLS.....	91
Figura 18	Datos observados en la Simulación de Monte Carlo	92
Figura 19	Proyección de Caudales para los próximos 5 Años usando precipitación promedio de los últimos 5 años.....	94
Figura 20	Análisis de Residuos.....	95
Figura 21	Curva del coeficiente del cultivo	101
Figura 22	Cálculo en Python del excedente y déficit	106
Figura 23	Clasificación Climática según Thornthwaite Comunidad de Para	108
Figura 24	Precipitación, caudal y residuos en Monte Carlo.....	110

Índice de anexos

Anexo 1	Matriz de consistencia.....	122
Anexo 2	Precipitación Total Mensual en (mm) estación Lucanas.....	123
Anexo 3	Precipitación Total Mensual en (mm) estación Puquio	125
Anexo 4	Precipitación Total Mensual en (mm) estación Cora Cora.....	127
Anexo 5	Código en Python del cálculo de la correlación y regresión lineal	130
Anexo 6	Código en Python de la proyección de caudales y precipitación	132
Anexo 7	Código en Python del cálculo de la ETo.....	133
Anexo 8	Delimitación de la unidad geográfica obtenido de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).....	135

Introducción

La gestión eficiente de los recursos hídricos constituye un pilar fundamental en la actualidad, especialmente en un escenario global caracterizado por un incremento constante en la demanda de agua. En respuesta a esta situación crítica, se ha desarrollado un estudio en la Región de Ayacucho, enfocado en el sistema de riego de Para, en el distrito de Chaviña. Este sistema es vital para la sostenibilidad agrícola de la zona y, a pesar de su importancia, es crucial la adopción de métodos avanzados para optimizar su manejo hídrico. La relevancia de esta investigación radica en su enfoque en mejorar la eficiencia hídrica a través de la implementación de modelos y técnicas avanzadas que permitan un diagnóstico preciso de las dinámicas del agua, contribuyendo así a una gestión más efectiva y sostenible del recurso.

El estudio sobre el sistema de riego de Para resalta críticamente la importancia de mantener un balance hídrico adecuado que equilibre la oferta y la demanda de agua en la región de Ayacucho. Enfrentando el desafío de la variabilidad climática y el aumento de la demanda hídrica, se propone la implementación de modelos hidrológicos avanzados que integren conceptos como la evapotranspiración potencial (ET_o) y la evapotranspiración del cultivo (ET_c). Estos modelos son fundamentales para prever las fluctuaciones en la disponibilidad de agua y adaptar las prácticas de gestión de agua a las condiciones climáticas específicas. La Evapotranspiración de Referencia (ET_o), que se calcula usando datos meteorológicos locales, es un indicador crucial de la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos sin estrés. Este parámetro se complementa con la Evapotranspiración del Cultivo (ET_c), que ajusta la ET_o basándose en coeficientes específicos de cada tipo de cultivo y sus fases de crecimiento. Juntos, ET_o y ET_c forman la base para calcular las necesidades hídricas exactas y optimizar el uso del agua en el sistema de riego de Para. Además, el estudio aborda el uso de técnicas estadísticas como la regresión lineal para analizar las relaciones entre variables climáticas y hídricas. Esto permite una predicción más precisa

de los patrones de uso de agua y ayuda a identificar los factores más significativos que afectan la eficiencia hídrica.

Este documento organiza su análisis a través de una estructura sistemática: el primer capítulo aborda el planteamiento del problema y establece los objetivos de la investigación; el segundo capítulo revisa el marco teórico y las investigaciones previas que contextualizan el estudio; el tercer capítulo describe en detalle la metodología empleada; los resultados y su interpretación se discuten en el cuarto capítulo; y finalmente, el quinto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones.

Capítulo I

Planteamiento del problema

1.1. Descripción del problema

El agua constituye un recurso esencial que fluye a través de los ecosistemas terrestres, desempeñando un papel vital no solo en la preservación de la vida sino también como un componente indispensable para el avance de variadas actividades económicas y productivas. Este elemento, cuya importancia va más allá de lo natural, se posiciona como un elemento clave en ámbitos como la agricultura, la ganadería, la pesquería, la industria y la minería. En un escenario global donde aproximadamente el 70% del agua disponible se destina al riego, enfocado mayormente en la agricultura, la gestión eficiente de los recursos hídricos emerge como una necesidad imperante. Esta gestión cobra vital importancia no solo para asegurar la sostenibilidad medioambiental, sino también para promover una agricultura rentable, capaz de producir alimentos esenciales de manera sostenible (UNEP, 2018).

En la Región de Ayacucho, al igual que en el resto del país y del mundo, el recurso hídrico se manifiesta no solo como un reto significativo sino también como una ventana de oportunidades. La creciente demanda de agua, impulsada por sectores poblacionales, agrícolas, pecuarios, energéticos, industriales y mineros, resalta la necesidad de adoptar un enfoque de manejo prudente y sostenible. La extracción de este recurso esencial, procedente tanto de fuentes superficiales como subterráneas, junto con su utilización posterior, están reguladas por la adquisición de derechos específicos como licencias, autorizaciones o permisos (Villanueva, 2023). Estas regulaciones no solo buscan garantizar un uso racional y sostenible del agua, sino también promover la preservación de los ecosistemas y mantener el equilibrio ambiental. En este sentido, la eficiencia hídrica se convierte en un elemento crucial para el desarrollo sustentable, alineando las necesidades humanas con la conservación del entorno natural.

La Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338) y su reglamento proporcionan un marco normativo para este análisis, promoviendo la conservación y el aprovechamiento sostenible del agua. Esta legislación prioriza el uso del agua para la vida y la salud sobre otros usos, estableciendo un orden de prioridad y regulación para su uso en la agricultura, la industria y otros sectores. El estudio, por lo tanto, no solo aborda la eficiencia hídrica desde una perspectiva técnica y de gestión, sino que también la contextualiza dentro del marco legal y normativo vigente, garantizando que cualquier recomendación o estrategia propuesta esté alineada con los principios de sostenibilidad, equidad y justicia ambiental.

El estudio en cuestión profundiza la eficiencia hídrica en el sistema de riego de Para, ubicado en el distrito de Chaviña. Este análisis se enfoca en asegurar que cualquier intervención o uso del recurso hídrico se realice bajo un enfoque de sostenibilidad agrícola, considerando no solo las necesidades actuales sino también proyectándose hacia el futuro, en un marco de respeto y equilibrio con el medio ambiente. En este sentido el análisis aborda los desafíos que limitan el desarrollo y la productividad de la agricultura en la región, como es la escasez de agua de riego. Esta insuficiencia no solo afecta los cultivos, sino también la ganadería, al carecer de suficiente riego para la producción de pastos y forrajes en una escala óptima.

Ante esta problemática, el estudio investiga cómo el uso del agua para riego en la agricultura puede armonizarse con otros usos y demandas, sin comprometer la integridad de los ecosistemas acuáticos y terrestres de la región. Además, se evaluará el impacto de las prácticas de riego actuales en la sostenibilidad de los recursos hídricos para proponer soluciones que puedan mejorar la eficiencia del uso del agua sin comprometer las necesidades de las comunidades agrícolas.

1.2. Delimitación del problema

1.2.1. Espacial (*geográfica*)

La investigación se centra en el sistema de riego de Para, ubicado en el Distrito de Chaviña, que pertenece a la Región de Ayacucho.

1.2.2. Temática y unidad de análisis

La temática de esta investigación se enfoca en el análisis de la eficiencia hídrica, en el contexto de la sostenibilidad agrícola en el sistema de riego de Para.

La unidad de análisis se centrará en el sistema de riego y su interacción con los ecosistemas locales y las prácticas agrícolas.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo influye la eficiencia hídrica en la sostenibilidad agrícola del sistema de riego de Para, distrito de Chaviña, región de Ayacucho?

1.3.2. Problemas específicos

¿Cómo influyen la hidrología, la fisiografía y la infraestructura hidráulica existente en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico?

¿Cuál es el impacto de las condiciones socioeconómicas y la interacción de la comunidad con los recursos hídricos en la eficiencia hídrica y la sostenibilidad agrícola?

¿Qué estrategias sostenibles permiten optimizar el sistema de riego en Para, basándose en las evaluaciones hidrológicas y el análisis de la eficiencia hídrica?

1.4. Justificación e importancia

Justificación

La presente investigación se justifica por la necesidad crítica de optimizar el uso del agua en regiones agrícolas, frente a los desafíos impuestos por el cambio climático y la creciente demanda hídrica. La agricultura en Ayacucho, como en muchas áreas, depende intensamente del agua, y la eficiencia en su uso no solo es crucial para la sostenibilidad ambiental sino también para la viabilidad económica y social de las comunidades locales. Al evaluar la hidrología, la fisiografía, la infraestructura existente y las condiciones socioeconómicas, este estudio busca proporcionar una base científica para implementar estrategias que mejoren la gestión del agua, asegurando así la sostenibilidad agrícola y el bienestar de las poblaciones dependientes de la agricultura.

Con ello, se espera no solo preservar los recursos hídricos sino también fortalecer la resiliencia de las comunidades agrícolas de Chaviña ante los retos futuros.

Importancia

La importancia de esta investigación radica en su enfoque para mejorar la eficiencia hídrica y la sostenibilidad agrícola en Chaviña, una zona importante para la seguridad alimentaria y la economía local. Al integrar evaluaciones hidrológicas y socioeconómicas, el estudio ofrece soluciones para una gestión más eficiente del agua en la agricultura, esencial ante el cambio climático y la creciente demanda de recursos hídricos. Las estrategias derivadas de esta investigación tienen el potencial de garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos, fortaleciendo la resiliencia de la comunidad y asegurando su bienestar a largo plazo.

1.5. Limitaciones de la investigación

El estudio se enfocará principalmente en el análisis de la eficiencia hídrica sin incorporar otros factores ambientales como la calidad del suelo o la biodiversidad que podrían influir en la sostenibilidad agrícola.

La evaluación de la variabilidad estacional y el impacto del cambio climático en las fuentes de agua se limitará a los datos disponibles específicamente para el sistema de riego de Para.

Las estrategias propuestas para la gestión eficiente del agua estarán diseñadas específicamente para las condiciones del sistema de riego de Para, distrito de Chaviña.

A pesar de los esfuerzos realizados para llevar a cabo el modelado geográfico de la unidad de estudio, no fue posible obtener el archivo *shapefile* (SHP) oficial correspondiente a la delimitación geográfica. Esta falta de acceso a dicho archivo ha presentado un obstáculo para realizar las delimitaciones geográficas necesarias en software especializado como ArcMap.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Analizar la eficiencia hídrica del sistema de riego de Para, distrito de Chaviña, para fortalecer la sostenibilidad agrícola.

1.6.2. Objetivos específicos

Evaluar la hidrología, fisiografía y la infraestructura hidráulica existente para establecer la base de la disponibilidad y calidad del recurso hídrico.

Analizar las condiciones socioeconómicas y la interacción de la comunidad con los recursos hídricos en la eficiencia hídrica y la sostenibilidad agrícola.

Proponer estrategias sostenibles para optimizar el riego en Para, basadas en evaluaciones hidrológicas y análisis de la eficiencia hídrica.

Capítulo II

Marco teórico

2.1. Antecedentes

2.1.1. Investigaciones internacionales

Martínez et al. (2021) en su artículo *“Estimación y análisis de la demanda hídrica de la subcuenca del Río Estibaná como parte del balance hídrico (2018-2019)”*, tuvo como objetivo evaluar la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de tres sectores (población, ganadería y agricultura) durante un período de doce meses (2018-2019) de metodología correlacional, siendo su población y muestra 9285 personas. Obteniendo de resultados que, se calculó el consumo de agua por persona para tres supuestos, con un valor promedio de 79 litros por cabeza de ganado al día. La demanda agrícola se estimó a partir de la evapotranspiración potencial, los coeficientes de cultivo y eficiencia de riego, la superficie sembrada y los períodos de crecimiento. La demanda total se calculó en 6,32 millones de metros cúbicos al año, de los cuales el 81 % correspondió a la agricultura. Concluyendo que, la demanda hídrica en los meses críticos es de 1.58 M, donde el caudal del río disminuye y los pozos y plantas potabilizadoras disminuyen la capacidad de abastecimiento, por lo que es necesaria una gestión eficiente del recurso hídrico.

Sánchez (2021) en su tesis *“Análisis de la planeación y gestión del uso del agua para riego, en el sector agrícola de Mexicali, Baja California: un desafío de gobernabilidad”*, tuvo como fin evaluar cómo se planifica y gestiona el uso del agua para riego en el Valle de Mexicali; de metodología corte longitudinal, de enfoque cualitativo y cuantitativo. Obteniendo de resultados que, los cultivos de algodón, trigo y alfalfa son intensivos en agua, requieren más de 15,000 metros cúbicos de agua por hectárea. En cambio, los cultivos de ajo, apio, brócoli y cilantro son eficientes en agua, ya que requieren menos de 15,000 metros cúbicos de agua por hectárea. Concluyendo que, uno de los problemas de la introducción de sistemas de riego tecnificados es la topografía del terreno. La

modernización y tecnificación del riego no es posible en todas las zonas debido a las condiciones del terreno.

Bringas et al. (2020) en su artículo “Análisis de sistemas de riego por gravedad y goteo subsuperficial basada en una encuesta de muestra de conveniencia en el valle de Mexicali”, tuvo de objetivo evaluar el perfil productivo tradicional del cultivo de alfalfa utilizando el sistema de riego por gravedad y lo compara con un sistema de riego por goteo subterráneo, siendo de metodología correlacional; de población y muestra 23 cultivos. Dándose de resultados el análisis del agua subterránea (agua de pozo) mostró niveles de salinidad muy altos para ser clasificada como recurso no apto para la agricultura. Los usuarios sugieren que esta problemática se intensificó poco después del terremoto de abril del 2010. En contraste, el agua superficial resultó de buena calidad a ligeramente salina. Concluyendo que; el sistema de riego por gravedad puede considerarse un factor significativo para la presencia de plaga. Con respecto a los insumos utilizados, se encuentra una total dependencia de insumos locales para el sistema de riego por goteo con respecto al sistema de riego por gravedad (91%).

Kilchenmann et al. (2019) en su artículo “*Evaluación comparativa de la eficiencia técnica de los sistemas de riego de brinzales*”, tuvo como objetivo elaborar una descripción del estado actual de la tecnología utilizada en los sistemas de riego para el establecimiento de brinzales, de metodología descriptivo, correlacional, cuasi experimental. Obteniendo de datos bibliográficos sobre la eficiencia de aplicación de agua y el coste de los sistemas de riego de brinzales. Siendo de resultados que la eficiencia técnica de los sistemas de riego disponibles en el mercado varía. Los sistemas de riego convencionales son los menos eficientes y, a menudo, operan fuera de la escala del sector. Concluyendo que la eficiencia técnica de los sistemas de riego es un indicador importante que ayuda a los ingenieros y diseñadores a seleccionar la tecnología de riego más adecuada para un determinado proyecto.

Ruíz et al. (2019) en su artículo “*Análisis del requerimiento hídrico en un distrito de riego de Tamaulipas, México*”, tuvo como fin crear un modelo matemático para estimar la

cantidad de agua necesaria para el riego del distrito de riego 002 Mante en Tamaulipas, México, para los ciclos agrícolas 2007-2014, siendo de metodología cuasi experimental. Obteniendo de resultados que, el volumen de agua utilizado en el ciclo agrícola 2009-2010 fue un 51.78% menor que el volumen de agua estimado por el modelo. Concluyendo 14 que, en los últimos 5 ciclos agrícolas, el distrito de riego ha entregado menos agua de la que se estimaba necesaria para el cultivo de caña de azúcar. La disminución ha oscilado entre un 20% y un 47%, siendo los ciclos 2009-2010 y 2013-2014 los más afectados.

2.1.2. Investigaciones nacionales

Castañeda y Huaynacaqui (2022) en su tesis *“Análisis y diseño del sistema de riego agrícola en el caserío de Chipre, distrito de Cochabamba, Ancash – 2022”*, tuvo como objetivo diseñar un nuevo sistema que sea más eficiente y sostenible, con el fin de establecer las características y especificaciones de un sistema de riego agrícola para el caserío de Chipre, distrito de Cochabamba, Ancash, que se implementará en el año 2022. Siendo de metodología experimental; obteniendo de población 85 familias de agricultores y muestra 1,020.6 de terreno. Siendo sus resultados en los hallazgos en la zona de estudio, se calculó que el tipo de suelo era arena limosa. Además, se observó que la topografía presentaba terreno accidentado. En cuanto al sistema de riego, se utilizó un módulo de riego de 138 litros por segundo por hectárea y se implementó un sistema de riego por goteo. También se instaló una línea de conducción utilizando tubería de PVC UF ISO 4435 de 450 mm. Concluyendo que la falta de infraestructura adecuada, debido a un mal diseño, impide aprovechar al máximo el recurso hídrico, lo que afecta negativamente al sector agrícola.

Vega (2021) en su artículo *“Mejoramiento de la infraestructura de riego para incrementar la eficiencia de riego y aprovechamiento hídrico en la localidad de San Martín, distrito de la Encañada, Cajamarca”*, tuvo de propósito reducir las pérdidas de agua en los canales de riego de la Provincia de Cajamarca, mejorando la eficiencia del riego y el aprovechamiento hídrico. Siendo de metodología descriptiva, cuantitativo, obtuvo de población y muestra canal de riego La Paccha, localidad de San Martín, distrito la

Encañada, Cajamarca. Siendo sus resultados que, el caudal máximo de ingreso fue 20.00 l/s., el caudal máximo de salida: 13.84 l/s., la pérdida de caudal por filtraciones de 4.16 l/s y la disponibilidad hídrica (Oferta) es: 20.00 lt/seg. Concluyendo que la demanda hídrica para el sistema de riego por gravedad (Canal sin revestir) es: 32.53 lt/seg y la demanda hídrica para el sistema de riego por aspersión es: 18.59 lt/seg

Arrascue y Huaman (2021) en su tesis "*Análisis comparativo de sistemas de riego por aspersión y por goteo, distrito de Pucalá, Chiclayo, 2021*", tuvo como objetivo comparar los sistemas de riego por aspersión y por goteo en el distrito de Pucalá, Chiclayo, en el año 2021, para determinar cuál es el más eficiente. Siendo de metodología tipo aplicada, diseño no experimental y enfoque cuantitativo, de población sembríos del distrito de Pucalá y muestra terreno de 750m² (50m. x 15m.). obteniendo de resultados riego por goteo es de 7.54 Lt/h, riego por aspersión de 22.22 Lt/h y al sistema de riego por aspersión como aquel que necesita 53.39 m.c.a. Concluyendo que; tanto el sistema de riego por aspersión como el sistema de riego por goteo son aceptables debido a su efectividad en el área. Sin embargo, el sistema de riego por goteo muestra una mayor eficiencia en el uso del agua, alcanzando un 90% de eficiencia de riego, en comparación con el 75% presentado por el sistema de riego por aspersión.

Delgado (2020) en su tesis "*Análisis de la infraestructura hidráulica del sistema Chancay-Lambayeque y su impacto en la ecoeficiencia y la huella hídrica de la producción agrícola*", tuvo como propósito medir la sostenibilidad de la producción agrícola en Lambayeque, mediante la evaluación del uso eficiente del agua, siendo de metodología descriptiva, cuasi experimental. Obteniendo de resultados se comparan con el cálculo de la huella hídrica teórica hallada mediante simulaciones en el software CROPWAT 8.0, para determinar las diferencias entre ambas y sus posibles causas. Finalmente, se calculan indicadores económicos y se estima gráficamente la eficiencia ambiental entre comisiones. Concluyendo finalmente que, la infraestructura hidráulica menor juega un rol fundamental en cuanto a la conservación de los recursos naturales destinados a la agricultura y, por ende, su mejora y la implementación de nuevas tecnologías.

Bernuy (2020) en su tesis “Análisis de la implementación del sistema de riego tecnificado en Pataripucro, anexo de Villa Patarí, a cargo de la empresa minera Ares (2014-2018)”, tuvo como fin identificar y analizar los factores que pueden facilitar o dificultar la implementación del proyecto Sistema de Riego Tecnificado en la zona de Pataripucro, de 16 metodología descriptiva, correlacional, siendo de resultados que, el factor primordial que ha influido en la implementación del proyecto, es el diseño de los estudios técnicos acordes a la rípida geografía local que permitieron construir una adecuada infraestructura para el sistema de riego por aspersion El diseño de los estudios técnicos adaptados a la geografía local permitió construir una infraestructura adecuada para el sistema de riego por aspersion, lo que fue fundamental para el éxito del proyecto. Concluyendo que la consideración de los criterios de escasez en la planificación es importante porque, como se demuestra en este trabajo, alteran los resultados del balance de la cuenca.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico describe la circulación continua del agua en nuestro planeta, pasando de la atmósfera a la tierra y regresando a la atmósfera. Este proceso incluye varias fases: la evaporación del agua desde superficies como el suelo, los océanos y los cuerpos de agua interiores; la formación de nubes por condensación; la caída de precipitaciones; la recogida del agua en la tierra; su flujo superficial; y su eventual evaporación nuevamente. Este ciclo es un sistema de recirculación constante e indefinido, impulsado principalmente por dos factores: la energía solar, que provoca la evaporación del agua, y la fuerza de gravedad de la Tierra, que induce la caída del agua a través de la precipitación y su flujo superficial (Baldeon, 2016).

Es importante notar que la velocidad del agua en cada etapa del ciclo varía y es impredecible, tanto en tiempo como en espacio. Además, las propiedades del agua pueden cambiar a lo largo de su ciclo. Según Chow et al. (1988), este proceso complejo subraya la dinámica e interconexión de los sistemas naturales de nuestro planeta.

A continuación, se describe las etapas de un ciclo hidrológico:

Evaporación

El proceso por el cual el agua se convierte en vapor desde la superficie de los océanos, la tierra, y a través de la transpiración de los seres vivos, como las plantas, se conoce colectivamente como evapotranspiración, debido a la dificultad de separar la cantidad de agua evaporada de la que es transpirada. Las plantas y otros organismos aportan aproximadamente el 10% del total del agua que se eleva hacia la atmósfera. Adicionalmente, se produce la sublimación, aunque en una medida mucho menor, principalmente en las superficies congeladas de los glaciares. Este fenómeno también contribuye al ciclo del agua, aunque su impacto cuantitativo es limitado (Vásquez, 2000).

Precipitación

La atmósfera libera agua a través de la condensación, manifestándose en formas como lluvia y rocío, o mediante la sublimación inversa, que resulta en nieve y escarcha, dependiendo de las condiciones específicas, estas precipitaciones se depositan en el suelo o en la superficie terrestre. En situaciones de lluvia, nieve, y granizo (este último formado cuando las gotas de lluvia se congelan en pleno vuelo), es la gravedad la que impulsa su caída hacia la tierra. Por otro lado, el rocío y la escarcha se forman directamente sobre las superficies debido a cambios directos en su estado (Vásquez, 2000).

Infiltración

Sucede cuando el agua que llega al suelo se filtra a través de sus poros y se convierte en agua subterránea. La cantidad de agua que se infiltra en comparación con la que fluye sobre la superficie (escorrentía) está determinada por factores como la permeabilidad del suelo, la inclinación del terreno, que puede impedir la infiltración, y la presencia de vegetación. Una porción del agua que se ha infiltrado retorna a la atmósfera mediante evaporación o, en mayor medida, a través de la transpiración de las plantas, las cuales absorben el agua mediante raíces que pueden ser extensas y profundas. Además, parte del agua subterránea se acumula en los acuíferos, que son capas que contienen agua estancada o en movimiento. En algunos casos, el agua subterránea emerge a la

superficie en áreas donde los acuíferos, debido a condiciones topográficas, se encuentran con la superficie del suelo (Vásquez, 2000).

Escorrentía

Este concepto describe las distintas maneras en que el agua líquida fluye pendiente abajo a lo largo de la superficie terrestre. En climas predominantemente secos, incluyendo aquellos típicos de las zonas desérticas, la escorrentía se convierte en el agente geológico más significativo en términos de erosión y transporte de materiales (Vásquez, 2000).

2.2.2. Parámetros de una cuenca hidrográfica

Los parámetros de una cuenca se clasifican en tres categorías principales: La primera incluye los aspectos físicos relacionados con la configuración de la cuenca, enfocándose principalmente en su fisiografía. Los dos grupos restantes se centran esencialmente en las características del relieve, tales como la pendiente y la altitud (Baldeon, 2016).

Lineales

Estos factores detallan las propiedades físicas de las cuencas, abarcando desde sus dimensiones morfológicas hasta las lineales y de superficie, y suelen medirse en metros o kilómetros.

Perímetro

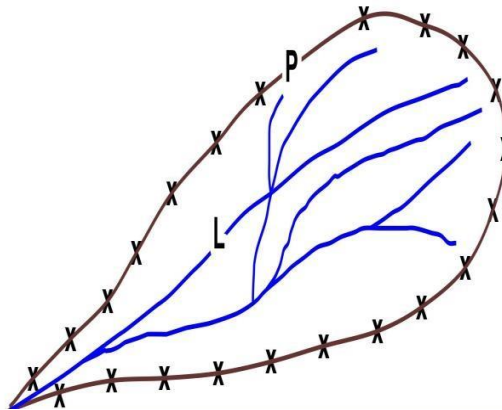
Corresponde a la longitud total de la frontera topográfica de la cuenca, medida desde el punto de salida o área de interés en el cauce principal (Remenieras, 1974; Linsley 1977).

Longitud del Cauce Principal (Lc)

Representa la medición de la extensión del cauce principal, desde el punto donde se une al río receptor hasta su origen en la proximidad de la línea divisoria. Al sumarle la longitud de los cauces secundarios (Lcs), obtenemos la longitud total de los cauces (Ltc). Este valor es crucial para determinar el tiempo de concentración y afecta significativamente a la mayoría de los índices morfométricos. Se calcula utilizando el mapa digital de la red hidrográfica (Linsley 1977).

Figura 1

Perímetro y longitud de una cuenca



Nota. Tomado de Baldeon (2016)

Longitud Axial (L_a)

Se refiere a la distancia más larga desde un extremo al otro de la cuenca, medida en línea recta a lo largo de su eje principal.

Ancho Medio (A_m)

Corresponde al ancho promedio de la cuenca, determinado tras medir el ancho en distintos puntos a lo largo de ella. Alternativamente, se puede calcular como la relación entre el área total de la cuenca y su longitud axial.

Longitud Total de Curvas de Nivel

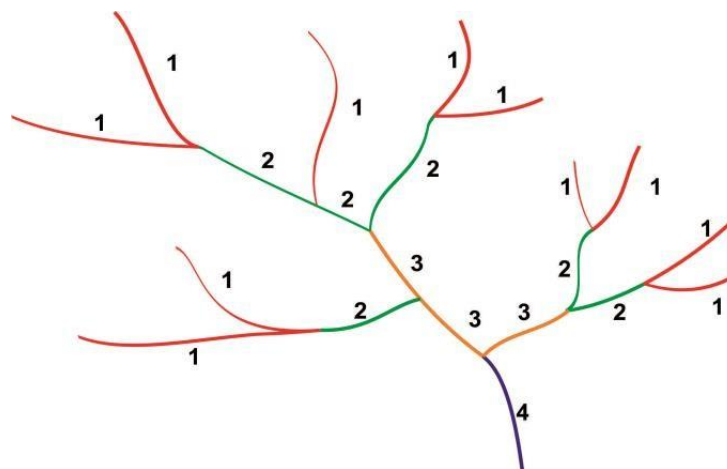
Representa el total combinado de las longitudes de todas las curvas de nivel que se encuentran dentro de la cuenca.

Orden de Corrientes

Describe el nivel de complejidad o ramificación de los cursos de agua dentro de una cuenca. Según Horton (1945), se asigna el primer orden a los cursos de agua sin afluentes; el segundo orden a aquellos que reciben afluentes de primer orden; y el tercer orden a los que tienen dos o más afluentes de segundo orden o inferior. De esta manera, el orden de la corriente principal indica el grado de ramificación y la amplitud de la red hidrográfica de la cuenca.

Figura 2

Asignación en el Orden de corrientes



Nota. Tomado de Baldeon (2016)

La clasificación del orden de las corrientes se realiza sumando las corrientes de acuerdo a su nivel de ramificación. Una corriente se considera de primer orden cuando no posee afluentes. Al unirse dos corrientes de primer orden, se forma una de segundo orden. Similarmente, cuando dos corrientes de segundo orden se encuentran, se crea una de tercer orden, y este proceso se repite en niveles sucesivos.

Tabla 1
Tipo de Clase de corriente

Rango de Orden	Tipo de Clase
1 a 2	Bajo
2 a 4	Medio
> 6	Alto

Cantidad de Escurrimiento

Refiere al número total de corrientes de agua naturales presentes en la cuenca. Esta cifra se determina usando Sistemas de Información Geográfica (SIG) al contar los segmentos identificados en el mapa digital. Este número sirve como indicador del potencial hidrológico de la cuenca, su habilidad para recolectar agua y el tamaño de su red de ríos. Una mayor cantidad de afluentes mejora el sistema de drenaje de la cuenca, facilitando así el flujo de agua. Los datos sobre la cantidad de afluentes se han organizado en la tabla a continuación.

Tabla 2*Tipo de Clase de escurrimiento*

Rango de Escurrimiento	Tipo de Clase
0 a 170	Bajo
171 a 340	Medio
341 a 510	Alto

Superficiales

Las áreas superficiales se determinan utilizando herramientas como el planímetro, el método de la red de puntos, técnicas de integración, descomposición geométrica, o mediante el uso de dispositivos electrónicos de digitalización. Comúnmente, estas medidas se presentan en hectáreas (ha) o kilómetros cuadrados (km²) (Remenieras, 1974).

Área de la Cuenca

Corresponde al tamaño de la cuenca medido en kilómetros cuadrados (km²), representando el área encerrada por su límite topográfico y proyectada en un plano horizontal. Este valor se calcula de manera automática mediante la digitalización y formación de polígonos de las cuencas en sistemas de información geográfica (SIG). Es importante señalar que el análisis de cuencas, ya sean de gran tamaño o pequeñas, no se realiza siempre bajo los mismos parámetros. En las cuencas menores, la forma y el volumen de escurrimiento se ven mayormente determinados por las características físicas del terreno, requiriendo un enfoque hidrológico centrado en la propia cuenca. Por otro lado, en las cuencas de mayor extensión, el efecto de retención de agua del cauce adquiere una relevancia significativa, necesitando un análisis detallado de las propiedades de este cauce (Tetuno, 1993).

2.2.3. Variables morfológicas de una cuenca**Densidad de Drenajes (D_d)**

La densidad de drenaje representa la cantidad de cauces presentes por cada unidad de superficie de la cuenca, lo cual es clave para entender la complejidad y el nivel de desarrollo del sistema de drenaje de una cuenca. Una densidad de drenaje elevada

sugiere una red fluvial más compleja o un aumento en el potencial de erosión (Gregory y Walling, 1973).

Este concepto establece una conexión entre la morfología de la cuenca y los procesos hidrológicos que ocurren a lo largo de sus cursos de agua. La densidad de drenaje, por tanto, es un reflejo de factores como la topografía, la geología, el suelo, la vegetación, y también el impacto humano en el área (Gregory y Walling, 1973).

Se mide en kilómetros por kilómetro cuadrado (km/km^2), y se obtiene dividiendo la longitud total de los cursos de agua dentro de la cuenca por el área total de la misma.

$$D_d = \frac{L_{tc}}{A} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

L_{tc} : Longitud de las corrientes efímeras e intermitentes de la cuenca (Km).

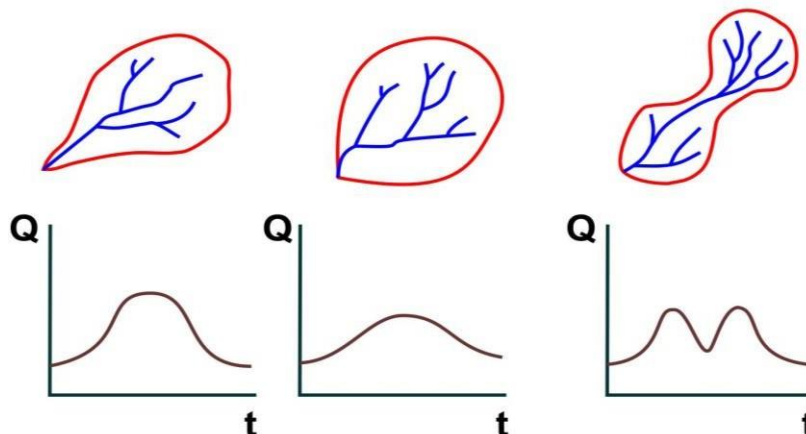
A : Área de la cuenca (km^2)

Variación en la formación de una Cuenca

Dos cuencas que compartan el mismo tamaño y perímetro pueden presentar configuraciones distintas, lo que resulta en comportamientos diferentes en términos de generación de crecidas. Para analizar la variación de las cuencas se emplean varios índices.

Figura 3

Variación de una cuenca



Nota. Tomado de Baldeon (2016)

Coefficiente de Compacidad (K_c)

Este índice compara la configuración de una cuenca con la de un círculo, cuya área es equivalente a la de la cuenca en análisis. El coeficiente K_c se calcula como la proporción entre el perímetro de la cuenca, es decir, la longitud de la divisoria que la delimita, y el perímetro de un círculo de igual área (Gregory y Walling, 1973). Las cuencas con una forma más cercana a la circular tienen una mayor capacidad para concentrar la escorrentía. Por otro lado, las cuencas más alargadas tienden a ser más susceptibles a inundaciones cuando la precipitación se desplaza en dirección hacia la parte baja de la cuenca. La fórmula específica para determinar este coeficiente es la siguiente:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

K_c = Representa el coeficiente de Compacidad

P = Perímetro de la cuenca

A = Área de la cuenca

Coefficiente de forma (K_f)

Este coeficiente se calcula mediante la proporción entre el área de captación de la cuenca y su longitud axial, que es la distancia desde el punto de desembocadura hasta el extremo más distante de la cuenca. El factor de forma se determina de la siguiente manera:

$$K_f = \frac{A}{La^2} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

A = Área de la cuenca

La = Longitud axial

Este coeficiente compara la configuración de la cuenca con la de un cuadrado, asignando un $K_f = 1$ a las áreas que teóricamente poseen esta forma. Un valor de K_f mayor a uno indica cuánto más aplanada es la cuenca o cuán corto es el río principal. Por ende, una cuenca con un valor elevado de K_f tiende a reunir el agua de precipitaciones intensas más rápidamente, facilitando la formación de crecidas significativas.

Índice de alargamiento (I_a)

Este índice, sugerido por Horton (1945), compara la máxima longitud presente en la cuenca, la cual se mide a lo largo del curso principal del río, con el ancho máximo de la cuenca, determinado de manera perpendicular. Se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$I_a = \frac{L_m}{l} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

I_a = Representa el índice de alargamiento de la cuenca

L_m = Longitud máxima

l = Ancho máximo

Coficiente de masividad (K_m)

Este coeficiente muestra la proporción existente entre la altitud promedio de la cuenca y su área total.

$$K_m = \frac{\text{Elevación de la cuenca (m)}}{\text{Área de la cuenca (km}^2\text{)}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Relieve de la Cuenca

La configuración del relieve de una cuenca se ilustra mediante la curva hipsométrica, y se puede evaluar a través de varios parámetros que vinculan la altura con el área de la cuenca. Entre estos parámetros destacan el rectángulo equivalente, la altitud promedio de la cuenca y la pendiente media.

Altitud Promedio de la Cuenca (H)

La altitud promedio (H) de la cuenca es crucial debido a su impacto en la precipitación, las pérdidas hídricas por evaporación y transpiración, y por ende, en el caudal

medio. Se determina calculando el área comprendida entre las líneas de contorno de diferentes altitudes dentro de la cuenca. En el punto de altitud media, el área se divide equitativamente, con un 50% ubicado por encima y un 50% por debajo.

Rectángulo Equivalente: Este indicador del relieve se basa en una conversión geométrica que establece las dimensiones de un rectángulo (longitud de los lados mayor y menor) cuyo área y perímetro son equivalentes a los de la cuenca.

$$\begin{aligned} L \times l &= A \text{ (Km}^2\text{)} \\ 2(L + l) &= P \text{ (Km)} \end{aligned} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

L = Longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (km)

l = Longitud del lado menor del rectángulo equivalente (km)

Clasificación Climática

Para clasificar el clima se utiliza la fórmula de Thornthwaite, la cual toma en cuenta la temperatura y la precipitación como las variables meteorológicas fundamentales. Estas permiten calcular la Evapotranspiración Potencial (ETP) y efectuar el Balance Hídrico, revelando períodos de superávit y déficit hídricos que son clave para la identificación de las características climáticas.

El sistema de clasificación climática de Thornthwaite se identifica mediante una secuencia de cuatro letras y ciertos subíndices. Las primeras dos letras, en mayúsculas, indican el “Índice de humedad” y la “Eficiencia térmica” de la región, respectivamente. Las tercera y cuarta letras, en minúsculas, se refieren a la “Variabilidad estacional de la humedad” y la “Agrupación térmica durante el verano”, respectivamente (Thornthwaite, 1948).

Índice de humedad

El Índice de humedad según Thornthwaite se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$I_h = I_E - 0.6I_D \quad \text{Ecuación (7)}$$

Siendo:

I_E = Índice de exceso, que se calcula por la siguiente expresión:

$$I_E = \frac{E}{ETP} \times 100$$

I_D = Índice de déficit, que se calcula por la siguiente expresión:

$$I_D = \frac{D}{ETP} \times 100$$

Evaluación de la eficiencia térmica: De acuerdo con Thornthwaite (1948), la evapotranspiración potencial (ETP) actúa como un indicador de la eficiencia térmica. El total de las evapotranspiraciones potenciales medias por mes se utiliza para evaluar la eficiencia térmica del clima en estudio.

Análisis de la variabilidad estacional de la humedad: Es importante identificar la presencia de períodos secos en climas húmedos y, de manera inversa, períodos húmedos en climas secos.

Cálculo de la concentración térmica durante el verano: Se calcula sumando la ETP de los meses de verano y comparándola con la ETP total del año, resultado que se presenta en porcentaje.

$$C_v = \frac{ETP_{\text{verano}}}{ETP_{\text{anual}}} \times 100 \quad \text{Ecuación (8)}$$

Los criterios para diferenciar los distintos tipos de regímenes hídricos se basan en los valores obtenidos del índice hídrico. Estos se identifican mediante letras mayúsculas sin tilde. En la tabla 3, se puede observar la clasificación climática de acuerdo al Índice Hídrico.

Tabla 3

Clasificación Climática

Provincias De humedad		
Clasificación según índice Hídrico		
Tipo	Índice de pluvial	Clima
A	>a 100	Super húmedo
B4	80 a 100	Muy húmedo

B3	60 a 80	húmedo
B2	40 a 60	Moderadamente húmedo
B1	20 a 40	Ligeramente húmedo
C2	0 a 20	Semi – húmedo
C1	(-20) a 0	Semi – seco
D	(-40 a -20)	Seco
E	(-60 a -40)	Árido

Nota. Tomado (Thornthwaite, 1948).

Estas zonas de humedad se dividen según el patrón anual de precipitación, evaluando el déficit o excedente de agua. Los subgrupos de humedad se señalan con letras minúsculas sin tilde y su interpretación se detalla en la tabla 4.

Tabla 4

Clasificación por Subtipos de Humedad

Sub-Clasificación de humedad según índice de exceso e índice de déficit		
Sub tipo	Índice de exceso (%)	Clima seco (por exceso de agua)
W'2	>a 20	Exceso grande en invierno
S'2	>a 20	Exceso grande en verano
W'	10 a 20	Exceso moderado en invierno
S'	10 a 20	Exceso moderado en verano
d	0 a 10	Poco o ningún exceso
Sub tipo	Índice de exceso (%)	Clima seco (por exceso de agua)
w2	>a 33.3	Déficit grande en invierno
s2	>a 33.3	Déficit grande en verano
w	16.7 a 33.3	Déficit moderado en invierno
s	16.7 a 33.3	Déficit moderado en verano
r	0 a 16.7	Déficit pequeño o ninguno

Nota. Tomado (Thornthwaite, 1948).

En la clasificación térmica que emplea la evapotranspiración potencial como criterio, esta última no se considera un índice hidrológico, sino más bien una variable dependiente de la temperatura media solar. Para diferenciar entre las categorías térmicas, se utilizan letras mayúsculas con acentos. La tabla 5 muestra cómo se distribuyen las clasificaciones térmicas en función de la evapotranspiración.

Tabla 5

Clasificación Térmica según la Evapotranspiración Potencial

Provincias terminas		
Provincias térmicas según índice de evapotranspiración potencial		
Tipo	ETo (cm)	Clima
A´	> a 114.0	Cálido
B´4	99.7 a 114.0	Semicálido
B´3	85.5 a 99.7	Templado cálido
B´2	71.2 a 85.5	Templado frío
B´1	57.0 a 71.2	Semi frío
C´2	42.7 a 57.0	Frío moderado
C´1	28.5 a 42.7	Frío acentuado
D´	14.2 a 28.5	De tundra
E´	< a 14.2	Helado

Nota. Tomado (Thornthwaite, 1948).

Estas categorías de clima se dividen en subcategorías basadas en el patrón térmico anual, considerando el porcentaje de acumulación de calor a lo largo del año, especialmente durante la temporada estival o veraniega.

Tabla 6

Clasificación por Subtipos según Régimen Térmico

Sub clasificación de provincias térmicas	
Sub tipo	Concentración estival (base % ETo del verano)
d´	> 88.0
c´1	76.3 a 88.0
c´2	68.0 a 76.3
b´1	61.6 a 68.0
b´2	56.3 a 61.6
b´3	51.9 a 56.3
b´4	48.0 a 51.9
a´	< a48.0

Nota. Tomado (Thornthwaite, 1948).

2.2.4. Eficiencia hídrica

Teoría de eficiencia hídrica

De acuerdo con Matioli y João (2022) refieren que la teoría de eficiencia hídrica en el sistema de riego se basa en la idea de que la eficiencia hídrica es la relación entre la cantidad de agua que es utilizada por las plantas y la cantidad de agua que es suministrada por el sistema de riego. La eficiencia hídrica se puede expresar como un porcentaje o como

una proporción. La eficiencia hídrica de un sistema de riego se puede dividir en tres componentes:

Eficiencia de aplicación

Es la relación entre la cantidad de agua que se aplica al suelo y la cantidad de agua que se suministra por el sistema de riego.

Eficiencia de distribución

Es la relación entre la cantidad de agua que llega a la zona de las raíces de las plantas y la cantidad de agua que se aplica al suelo.

Eficiencia de utilización

Es la relación entre la cantidad de agua que es utilizada por las plantas y la cantidad de agua que llega a la zona de las raíces de las plantas.

A la vez, Ruíz et al. (2019) mencionan que la eficiencia hídrica de un sistema de riego puede verse afectada por una serie de factores, como:

Tipo de sistema de riego

Los diferentes tipos de sistemas de riego tienen diferentes eficiencias hídricas. Por ejemplo, el riego por goteo es un sistema de riego eficiente, mientras que el riego por aspersión es un sistema de riego menos eficiente.

Tipo de cultivo

Los diferentes tipos de cultivos tienen diferentes necesidades de agua. Por ejemplo, los cultivos de clima templado suelen tener necesidades de agua más bajas que los cultivos tropicales.

Condiciones climáticas

Las condiciones climáticas, como la precipitación y la temperatura, pueden afectar la eficiencia hídrica de un sistema de riego.

Manejo del riego

El manejo del riego, como la frecuencia y la cantidad de agua aplicada, puede afectar la eficiencia hídrica de un sistema de riego.

Modelo de eficiencia hídrica

Un modelo de eficiencia hídrica es una herramienta que se utiliza para evaluar el rendimiento de un sistema de riego en términos de eficiencia hídrica. Los modelos de eficiencia hídrica pueden ayudar a los agricultores a identificar áreas donde pueden mejorar la eficiencia de sus sistemas de riego. Los modelos de eficiencia hídrica se basan en una serie de factores, como el tipo de sistema de riego, el tipo de cultivo, las condiciones climáticas y el manejo del riego. Los modelos pueden utilizar datos históricos o datos en tiempo real para calcular la eficiencia hídrica. Los modelos de eficiencia hídrica pueden ser simples o complejos. Los modelos simples suelen basarse en una serie de supuestos, mientras que los modelos complejos pueden tener en cuenta factores más detallados (Xuehua, 2019).

Enfoque eficiencia hídrica

Yaoxian et al. (2021) indican que el enfoque de eficiencia hídrica es un enfoque que se centra en la reducción del uso de agua en los sistemas de riego. Este enfoque se basa en la idea de que la agricultura puede ser sostenible si se utiliza el agua de forma eficiente, no obstante, el enfoque de eficiencia hídrica se puede dividir en tres componentes principales:

Selección del sistema de riego adecuado

El primer paso es seleccionar el sistema de riego adecuado para el cultivo y las condiciones climáticas. Los sistemas de riego más eficientes son el riego por goteo y el riego por microaspersión.

Manejo del riego optimizado

El segundo paso es optimizar el manejo del riego. Esto significa aplicar la cantidad correcta de agua en el momento adecuado.

Reducción de las pérdidas de agua

El tercer paso es reducir las pérdidas de agua. Esto se puede lograr mediante la reparación de fugas, el uso de cubiertas de riego y la implementación de prácticas de riego de conservación.

A la vez Yaoxian et al. (2021) mencionan que el enfoque de eficiencia hídrica ofrece una serie de beneficios, como:

Reduce el consumo de agua

La reducción del consumo de agua ayuda a proteger el medio ambiente y garantiza la disponibilidad de agua para las generaciones futuras.

Mejora la productividad agrícola

Los sistemas de riego eficientes pueden ayudar a mejorar la productividad agrícola al proporcionar agua de forma uniforme y controlada.

Reduce los costes de riego

Los sistemas de riego eficientes pueden ayudar a reducir los costes de riego al reducir la cantidad de agua utilizada.

2.2.5. Sistema de riego

Un sistema de riego es un conjunto de estructuras y dispositivos diseñados para la distribución artificial del agua a las plantas, optimizando su crecimiento al proveer la cantidad adecuada de humedad. Fundamental en la agricultura, estos sistemas varían desde simples métodos manuales hasta tecnologías avanzadas de riego automatizado. Su propósito es suplir la falta de precipitaciones, maximizando la eficiencia en el uso del agua y mejorando la productividad de los cultivos (Skripkin, 2021).

Volumen del sistema de riego

La Economic Commission for Europe (2020) indica que el volumen de un sistema de riego es la cantidad de agua que se necesita para regar un área determinada, se calcula multiplicando el área a regar por la lámina de riego; no obstante, la lámina de riego es el espesor de agua que se aplica por unidad de superficie, se expresa en milímetros, y se calcula dividiendo el volumen de agua por el área a regar; es importante destacar que el volumen de un sistema de riego es un factor importante a considerar al diseñar un sistema de riego, debido a que el volumen del agua disponible determinará el tamaño del sistema de riego, así como el tipo de equipo y accesorios necesarios, además del volumen de agua, hay otros factores que deben considerarse al diseñar un sistema de riego, como:

El tipo de suelo. Los suelos con buena capacidad de infiltración requieren menos agua que los suelos con mala capacidad de infiltración.

El tipo de cultivo. Los cultivos con alta demanda de agua requieren más riego que los cultivos con baja demanda de agua.

El clima. Los climas cálidos y secos requieren más riego que los climas fríos y húmedos.

A la vez, (Skripkin, 2021) indica que el volumen de un sistema de riego puede variar según las condiciones específicas del área a regar. Sin embargo, es importante tener en cuenta este factor al diseñar un sistema de riego para garantizar que las plantas reciban la cantidad de agua que necesitan, no obstante, el volumen de un sistema de riego se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen} = \text{Lámina} \times \text{Superficie} \times (1 - \text{Coeficiente de escurrimiento})$$

Caudal del sistema de riego

La Organización de Alimentación y Agricultura (2022) refiere que el caudal de un sistema de riego es la cantidad de agua que fluye a través de un sistema de riego en un tiempo determinado, se mide en litros por minuto (L/min) o metros cúbicos por hora (m³/h); el caudal de un sistema de riego es un factor importante a considerar al diseñar un sistema de riego, debido a que un sistema de riego con un caudal insuficiente no será capaz de suministrar la cantidad de agua necesaria para regar el área deseada; por otro lado, un sistema de riego con un caudal excesivo puede ser un desperdicio de agua y causar daños a la infraestructura del sistema.

A su vez, (Burovsky, 2022) menciona que el caudal de un sistema de riego se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\text{Caudal} = Q = \frac{V}{t} \qquad \text{Ecuación (9)}$$

Siendo:

Q : es el caudal (L/min o m³/h)

V : es el volumen (L o m³)

t : es el tiempo (min o h)

A su vez Oke et al. (2022) aducen que el caudal de un sistema de riego también se puede determinar midiendo el flujo de agua a través del sistema; para ello, se puede utilizar un medidor de caudal; no obstante, los diferentes tipos de sistemas de riego tienen diferentes caudales. Por ejemplo, un sistema de riego por goteo tiene un caudal mucho menor que un sistema de riego por aspersión.

Los siguientes factores afectan al caudal de un sistema de riego:

- El tamaño de los emisores o boquillas
- La presión del agua
- La longitud de las tuberías
- El número de emisores o boquillas

Precipitación del sistema de riego

La precipitación es un factor importante a considerar al diseñar un sistema de riego. En áreas con precipitaciones abundantes, es posible que no sea necesario un sistema de riego completo, sin embargo, en áreas con precipitaciones escasas o irregulares, un sistema de riego puede ser esencial para garantizar el crecimiento y la salud de las plantas menciona (Niggol, 2020).

Además, Abd et al. (2020) mencionan que otro factor a considerar es la distribución de la precipitación; en algunas zonas, la precipitación es uniformemente distribuida a lo largo del año; en otras zonas, la precipitación es más variable, con períodos de sequía seguidos de períodos de lluvias torrenciales, en estas zonas, es importante un sistema de riego que pueda proporcionar agua de manera uniforme durante todo el año.

Presión del agua del sistema de riego

La presión del agua es la fuerza que empuja el agua a través del sistema, se puede medir con un manómetro; la presión del agua se mide en unidades de presión, como bar, psi o metros de columna de agua (mca), el instrumento de medición de la presión del agua se puede medir con un manómetro, la presión del agua necesaria para un sistema de riego

depende de varios factores, como el tipo de sistema, el tamaño del sistema y el tipo de emisores o boquillas utilizados, en general, los sistemas de riego por goteo requieren una presión de agua más baja que los sistemas de riego por aspersión, esto se debe a que los emisores o boquillas de riego por goteo son más pequeños y requieren menos presión para funcionar menciona (Rodríguez et al., 2020).

Tiempo del sistema de riego

Para (Rodríguez et al., 2020) el tiempo de riego es la cantidad de tiempo que el sistema está funcionando. Se puede medir con un temporizador; se suele medir con un temporizador, los temporizadores pueden programarse para que el sistema de riego se encienda y apague a intervalos específicos, el riego excesivo puede provocar problemas, como:

- Encharcamiento del suelo, lo que puede provocar enfermedades de las plantas.
- Pérdida de nutrientes por lixiviación.
- Derroche de agua.

Por lo tanto, es importante determinar el tiempo de riego adecuado para evitar el riego excesivo.

Eficiencia del sistema de riego

Según Fredricks et al. (2021) la eficiencia del riego es la cantidad de agua que se utiliza para regar el área deseada. Se puede calcular dividiendo el volumen de agua suministrado por el área regada, la eficiencia de un sistema de riego depende de varios factores, como el tipo de sistema, el diseño del sistema, el mantenimiento del sistema y las prácticas de riego; los sistemas de riego por goteo son generalmente los más eficientes, ya que aplican agua directamente a la zona de las raíces de las plantas; no obstante, los sistemas de riego por aspersión son menos eficientes, ya que aplican agua a toda la superficie del suelo. El diseño del sistema de riego también afecta a la eficiencia, dado a que, un sistema de riego bien diseñado tendrá emisores o boquillas que aplican la cantidad adecuada de agua en el lugar correcto; el mantenimiento del sistema de riego también es importante para mantener la eficiencia, siendo los emisores o boquillas obstruidos los que

pueden estar goteando o pudiesen reducir la eficiencia del sistema; es importante destacar que las prácticas de riego también pueden afectar a la eficiencia, un riego excesivo puede provocar el desperdicio de agua mencionan (Fredricks et al., 2021).

Teoría de sistema de riego

Según Rakhimov et al. (2020) la teoría del sistema de riego es un campo de estudio que se centra en el diseño, operación y mantenimiento de los sistemas de riego. La teoría del sistema de riego se basa en una serie de principios científicos, como la hidráulica, la agronomía y la ingeniería, a la vez, la teoría del sistema de riego se utiliza para diseñar sistemas de riego que sean eficientes, efectivos y sostenibles. Los sistemas de riego diseñados utilizando la teoría del sistema de riego pueden ayudar a los agricultores a reducir el consumo de agua, mejorar la productividad agrícola y proteger el medio ambiente. Algunos de los principales principios de la teoría del sistema de riego incluyen:

Equilibrio hídrico. El equilibrio hídrico es un concepto clave en la teoría del sistema de riego. El equilibrio hídrico se refiere al equilibrio entre la cantidad de agua que entra en un sistema de riego y la cantidad de agua que sale del sistema de riego.

Evapotranspiración. La evapotranspiración es otro concepto clave en la teoría del sistema de riego. La evapotranspiración se refiere a la cantidad de agua que se evapora del suelo y de las plantas.

Necesidades de agua de los cultivos. Los diferentes cultivos tienen diferentes necesidades de agua. Es importante conocer las necesidades de agua de los cultivos para diseñar un sistema de riego adecuado.

Características del suelo. Las características del suelo, como la textura y la estructura, también afectan el diseño y operación de los sistemas de riego.

La teoría del sistema de riego según lo menciona Rakhimov et al. (2020) posee una serie de factores, como:

Las necesidades de agua de los cultivos. Los diferentes tipos de cultivos tienen diferentes necesidades de agua. Por ejemplo, los cultivos de clima templado suelen tener necesidades de agua más bajas que los cultivos tropicales.

Las condiciones climáticas. Las condiciones climáticas, como la precipitación y la temperatura, pueden afectar la demanda de agua de los cultivos.

Las propiedades del suelo. Las propiedades del suelo, como la textura y la estructura, pueden afectar la infiltración y la retención de agua en el suelo.

El tipo de sistema de riego. Los diferentes tipos de sistemas de riego tienen diferentes eficiencias hídricas. Por ejemplo, el riego por goteo es un sistema de riego eficiente, mientras que el riego por aspersión es un sistema de riego menos eficiente.

Modelo de sistema de riego

De acuerdo con Kashyap et al. (2021) un modelo de sistema de riego es una representación matemática o física de un sistema de riego donde los modelos de sistemas de riego pueden ser simples o complejos.

Los modelos simples suelen basarse en una serie de supuestos, mientras que los modelos complejos pueden tener en cuenta factores más detallados.

Según Kashyap et al. (2021) algunos tipos de modelos de sistemas de riego incluyen son:

Modelos de balance hídrico. Estos modelos calculan la cantidad de agua que entra y sale de un sistema de riego.

Modelos de evapotranspiración. Estos modelos calculan la cantidad de agua que se evapora del suelo y de las plantas.

Modelos de pérdida de agua. Estos modelos calculan la cantidad de agua que se pierde por evaporación, escorrentía o percolación.

Modelos de rendimiento de cultivo. Estos modelos calculan el rendimiento de un cultivo en función de la cantidad de agua aplicada.

Además, Gamal et al. (2023) mencionan que los modelos de sistemas de riego pueden ser una herramienta valiosa para los agricultores, los ingenieros y otros interesados en sistemas de riego. Los modelos de sistemas de riego se pueden utilizar para:

Diseñar sistemas de riego eficientes. Los modelos de sistemas de riego se pueden utilizar para determinar el tamaño y el tipo de sistema de riego adecuado para un cultivo y condiciones climáticas específicos.

Analizar sistemas de riego existentes. Los modelos de sistemas de riego se pueden utilizar para evaluar el rendimiento de un sistema de riego existente e identificar áreas donde se pueden mejorar.

Gestionar sistemas de riego. Los modelos de sistemas de riego se pueden utilizar para determinar la cantidad de agua que debe aplicarse a un cultivo en función de las condiciones climáticas y las necesidades del cultivo.

Hay una serie de factores que se deben tener en cuenta al seleccionar un modelo de sistema de riego. Estos factores incluyen:

El propósito del modelo. El modelo debe ser adecuado para el propósito para el que se va a utilizar.

El nivel de detalle. El modelo debe tener el nivel de detalle adecuado para el propósito para el que se va a utilizar.

Los datos disponibles. El modelo debe poder utilizar los datos disponibles.

Según Gamal et al. (2023) los beneficios de los modelos de sistemas de riego incluyen:

Mejora la eficiencia del diseño. Los modelos de sistemas de riego pueden ayudar a los diseñadores a identificar las mejores opciones de diseño para un sistema de riego.

Mejora la eficiencia de la gestión. Los modelos de sistemas de riego pueden ayudar a los gestores a optimizar el manejo de un sistema de riego.

Mejora la evaluación de sistemas de riego. Los modelos de sistemas de riego pueden ayudar a los científicos a evaluar el rendimiento de los sistemas de riego.

Enfoque sistema de riego

El enfoque de sistema de riego es una forma de pensar sobre el riego que considera todos los factores que afectan el rendimiento del sistema, desde el diseño y la construcción hasta el manejo y la operación. Este enfoque es importante para garantizar que los sistemas de riego sean eficientes, sostenibles y rentables (Kumar et al., 2019). Los siguientes son algunos de los factores que se deben tener en cuenta en un enfoque de sistema de riego:

Necesidades de agua de los cultivos. Los diferentes tipos de cultivos tienen diferentes necesidades de agua. Es importante seleccionar un sistema de riego que pueda proporcionar la cantidad adecuada de agua para satisfacer las necesidades de los cultivos.

Condiciones climáticas. Las condiciones climáticas, como la precipitación y la temperatura, pueden afectar la demanda de agua de los cultivos. El diseño y el manejo del sistema de riego deben tener en cuenta las condiciones climáticas locales.

Propiedades del suelo. Las propiedades del suelo, como la textura y la estructura, pueden afectar la infiltración y la retención de agua en el suelo. El diseño del sistema de riego debe tener en cuenta las propiedades del suelo.

Tipo de sistema de riego. Los diferentes tipos de sistemas de riego tienen diferentes eficiencias hídricas. Elegir el sistema de riego adecuado para las condiciones locales puede ayudar a reducir el consumo de agua.

Manejo del riego. El manejo del riego, como la frecuencia y la cantidad de agua aplicada, puede afectar la eficiencia hídrica y la productividad agrícola. El manejo adecuado del riego es esencial para garantizar el rendimiento del sistema

2.2.6. Oferta Hídrica

La disponibilidad de agua en una cuenca se refiere a la cantidad de agua accesible para cubrir las necesidades biológicas y las demandas surgidas de las actividades humanas sociales y económicas. Medir la esorrentía ayuda a determinar la cantidad de agua superficial disponible en la cuenca. Factores como el flujo del río, la fiabilidad de su medición y la longitud del registro histórico pueden afectar la precisión de esta estimación.

En casos donde hay registros históricos extensos y confiables de los caudales, el promedio anual de flujo del río representa la disponibilidad de agua de la cuenca (Gomez, 2022).

Tras la publicación del Estudio Nacional del Agua - ENA (2010) y la Política Nacional del Recurso Hídrico (2010), se ha definido la oferta hídrica como la cantidad de agua que fluye superficialmente debido a la escorrentía, formando así sistemas de drenaje superficial como las cuencas hidrográficas, además de aquella que se infiltra en el suelo y contribuye a la creación de fuentes de agua subterráneas. Esta oferta también se relaciona con el caudal, que se describe como la cantidad de agua que se produce en un periodo de tiempo específico y en un lugar concreto, según lo establece (Castillo en 2022).

Es aquella porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo – cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar. Usualmente esta porción de agua que escurre por los ríos es denominada por los hidrólogos como escorrentía superficial y su cuantificación conforma el elemento principal de medición en las redes de seguimiento hidrológico existentes en los distintos países. La oferta hídrica de una cuenca, corresponde también al volumen disponible de agua para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre. Al cuantificar la escorrentía superficial a partir del balance hídrico de la cuenca, se está estimando la oferta de agua superficial de la misma. El conocimiento del caudal del río, su confiabilidad y extensión de la serie del registro histórico son variables que pueden influir en la estimación de la oferta hídrica superficial. Cuando existe información histórica confiable de los caudales con series extensas, el caudal medio anual del río es la oferta hídrica de esa cuenca

Para aplicar adecuadamente esta fórmula se determina la Oferta Hídrica Neta, fue necesario convertir la cifra obtenida de la profundidad del agua, que proviene del análisis del mapa total de escurrimiento superficial, a una expresión de caudal en términos de millones de metros cúbicos por año. Este proceso de conversión se realiza empleando una

fórmula específica, la cual se encuentra detallada y recomendada en la guía metodológica diseñada por el IDEAM para el cálculo preciso del índice de escasez de agua.

$$Y = \frac{(Q \times t)}{A \times 10000} \rightarrow Q = \frac{Y \times (A \times 10000)}{t} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

Y = Escurrimiento superficial total (mm)

Q = Caudal (millones de m³ /año)

T = Tiempo en años

A = Área

Oferta Hídrica total

Tras aplicar los ajustes por el régimen de estiaje, que representa una reducción del 25%, y el decremento adicional del 25% por la vulnerabilidad de las fuentes en cuanto a calidad del agua, conforme al método recomendado por el IDEAM, se determina la disponibilidad real de recursos hídricos superficiales. Para ello, se utiliza una ecuación específica que incorpora estas disminuciones en la oferta total de agua.

$$OH_N = OH_T - (OH_T * (R_{FF} + R_{RE}))$$

Dónde:

OH_N = oferta hídrica neta (millones m³/año)

OH_T = oferta hídrica total (millones m³/año)

OH_T = factor de reducción por fuentes frágiles (%)

OH_T = factor de reducción por régimen de estiaje (%)

2.2.7. Demanda Hídrica

La demanda hídrica se refiere a la cantidad total de agua necesaria para satisfacer las necesidades de consumo, agrícolas, industriales, y ecosistémicas de una población o región. Incluye el agua usada en hogares, para riego de cultivos, procesos industriales, y mantenimiento de humedales y ríos. Es un indicador clave en la gestión de recursos

hídricos, destacando la importancia del equilibrio entre disponibilidad y uso sostenible del agua para garantizar su acceso a largo plazo (Gómez, 2022).

La Demanda Hídrica se determina sumando las demandas de distintos sectores (relacionadas con actividades humanas sociales y económicas) y se expresa en millones de metros cúbicos.

Fórmula:

$$DT = DUD + DUI + DUS + DUA + DUP$$

Dónde:

DT = demanda total de agua.

DUD = demanda de agua para uso doméstico.

DUI = demanda de agua para uso industrial.

DUS = demanda de agua para el sector servicios.

DUA = demanda de agua para el uso agrícola.

DUP = demanda de uso de agua para uso pecuario.

Necesidad de Agua para Propósitos Industriales – NAPI

La cantidad de agua utilizada por varios sectores de la industria manufacturera y de extracción se refiere al volumen de agua empleado por estas industrias. Para determinar la demanda de agua necesaria para fines industriales, se emplea la siguiente fórmula matemática:

$$DUI = \sum_{i=1}^n Vp_i \times Fc_i$$

En dónde:

DUI = Demanda de agua para uso industrial.

Vp_i = Volumen de producción según sector económico.

Fc_i = Factos de consumo según sector económico.

Eficiencia hídrica

Demanda de Agua Uso Pecuario

Se trata del producto de la cantidad total producida de animales comercialmente valiosos multiplicada por un coeficiente estimado de consumo promedio.

Fórmula:

$$DUP = \sum_{i=1}^n Vpa_i \times Fca$$

En dónde:

DUP = Demanda de agua para uso pecuario.

Vpa_i = Volumen de producción por tipo de animal industrial.

Fca = Factos de consumo según producto animal.

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Sistema de riego

Un sistema de riego se compone de diversas estructuras y equipos diseñados para suministrar agua a un terreno con el fin de cultivar plantas. Estos sistemas son utilizados en áreas donde la recepción pluvial no es adecuada o el agua subterránea se encuentra a una profundidad inaccesible para las plantas (Azzedine et al., 2019)

2.3.2. Sostenibilidad agrícola

La sostenibilidad agrícola implica llevar a cabo prácticas agrícolas que satisfagan las necesidades de las generaciones actuales sin poner en riesgo la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (Bhupendra et al., 2022).

2.3.3. Cuantificación de infiltración

El cuadro proporciona una serie de indicadores clave para analizar las condiciones de infiltración en el suelo, un aspecto esencial en la evaluación de la calidad del suelo y la gestión hídrica. Los parámetros se agrupan en dos categorías principales, considerando tanto las características de la infiltración como los factores que la afectan directamente.

Los intervalos y procedimientos propuestos se basan en fuentes técnicas reconocidas, como las directrices para la medición de infiltración de la FAO (1980) y estándares aceptados en el manejo sostenible de suelos agrícolas (Lal, 2001).

Tabla 7

Parámetros para la cuantificación de las condiciones de infiltración del suelo

Parámetros	Indicador Específico	Unidad de Medida	Método de evaluación	Intervalos de calidad
Velocidad de infiltración	Tasa de infiltración inicial	mm/h	Método del doble anillo	>25 mm/h (alta capacidad de infiltración)
	Tasa de infiltración estable	mm/h	Método del doble anillo	5-15 mm/h (promedio para suelos agrícolas)
Capacidad de infiltración	Infiltración acumulada	mm	Registro durante un período de prueba	Depende de la precipitación y tipo de suelo
Factores relacionados				
Textura del suelo	Proporción de arena, limo, arcilla	%	Análisis granulométrico	Arenoso: mayor infiltración; Arcilloso: menor
Estructura del suelo	Estabilidad de agregados	%	Prueba de estabilidad de agregados	>70% (estructura bien formada)
Porosidad	Poros totales	%	Método del cilindro de volumen conocido	40-60% (ideal para suelos agrícolas)
Compactación	Densidad aparente	g/cm ³	Cilindro de volumen conocido	1.1-1.6 g/cm ³ (óptimo para cultivos)
Cobertura vegetal	Porcentaje de cobertura	%	Observación en campo	>30% (disminuye escorrentía superficial)

Nota. Los rangos de calidad son valores de referencia aproximados y deben adaptarse según las condiciones específicas del estudio y el tipo de suelo analizado.

2.3.4. Cuantificación del suelo

El cuadro expone los principales parámetros utilizados para evaluar las condiciones de infiltración del suelo, organizados en indicadores que abarcan tanto las propiedades físicas del suelo como aquellas relacionadas con su estructura y cobertura. Estos parámetros son fundamentales para analizar cómo el agua interactúa con el suelo y su impacto en la productividad agrícola, la conservación del suelo y la sostenibilidad ambiental.

Este enfoque holístico permite valorar la calidad del suelo considerando su capacidad para gestionar el agua, lo que resulta crucial en prácticas de agricultura sostenible y en la preservación de los recursos hídricos.

Tabla 8

Cuadro: Parámetros para la cuantificación de las condiciones del suelo

Parámetros	Indicador Específico	Unidad de Medida	Método de evaluación	Intervalos de calidad
Físicos				
Textura del suelo	Porcentaje de arena, limo, arcilla	%	Análisis granulométrico	Clasificación USDA o triangular 1.1 – 1.6 g/cm ³ (Ideal para suelos agrícolas)
Compactación	Densidad aparente	g/cm ³	Cilindro de volumen conocido	
Capacidad de retención de agua	Capacidad de campo	%	Métodos de laboratorio	20-60% según tipo de suelo
Químicos				
pH	Nivel de acidez o alcalinidad	Sin unidad	Potenciómetro	6.0 – 7.5 (óptimo par agricultura)
Materia orgánica	Contenido de carbono orgánico	%	Método de Walkley y Black	>3% (ideal para cultivos)
Nutrientes disponibles	N, P, K, entre otros	mg/kg	Análisis químico estándar	Según necesidades de cultivo
Biológicos				
Actividad microbiana	Respiración del suelo	mg CO ₂ /kg/día	Método de incubación	>30 mg CO ₂ /kg/día (alta actividad)
Biodiversidad microbiana	Índice de diversidad de especies	Índice Shannon-Wiener	Análisis de ADN o cultivo microbiológico	>2 (alto nivel de biodiversidad)
Presencia de lombrices	Número de lombrices	Número/m ²	Recolección manual en monolitos	>50 lombrices/m ² (buena salud del suelo)

Capítulo III

Método de la investigación

1.7. Enfoque

La presente investigación presenta un enfoque cuantitativo. Según Hernández et al. (2014), este tipo de enfoque es ideal para estudios que buscan cuantificar variables y establecer patrones o tendencias en un conjunto de datos específico.

Adoptando este enfoque cuantitativo, la investigación se beneficia de la capacidad de medir y analizar variables específicas de manera precisa; esto permite el uso de métodos estadísticos para examinar los datos, facilitando la identificación de patrones, correlaciones y tendencias significativas, dado que un resultado clave de este enfoque es la generación de resultados basados en evidencia numérica, lo cual es indispensable para la toma de decisiones informadas y fundamentadas en la gestión de los recursos hídricos y en las recomendaciones de prácticas agrícolas sostenibles

1.8. Alcance

Esta investigación se caracteriza por tener un alcance descriptivo y explicativo. De acuerdo con Tamayo (2003) un alcance descriptivo implica caracterizar fenómenos, registrando sistemáticamente sus atributos, mientras que un alcance explicativo busca profundizar más allá de la descripción, identificando causas, efectos y relaciones subyacentes entre variables.

Este estudio apunta a describir las características de la eficiencia hídrica del sistema de riego de Para, así como las prácticas de gestión de agua en el contexto de la agricultura. Además de describir, la investigación busca explicar las condiciones socioeconómicas y la interacción con los recursos hídricos y cómo estas influyen en la sostenibilidad agrícola de la región. Este enfoque implica una comprensión profunda de las causas y efectos, como el impacto del cambio climático en las fuentes de agua y cómo las estrategias de gestión eficiente pueden mejorar la sostenibilidad agrícola.

1.9. Diseño de investigación

Esta investigación presenta un diseño de investigación no experimental. Según Hernández et al. (2014), este tipo de diseño de investigación se centra en observar fenómenos tal como ocurren naturalmente, sin manipular variables. Es un diseño no experimental ya que se registrarán las características de la eficiencia hídrica, así como las prácticas de gestión del agua, sin intervenir o alterar el sistema de riego o las condiciones ambientales.

1.10. Población y muestra

3.1.1. Población

En una investigación, la población se refiere al conjunto completo de individuos u objetos que poseen las características o respuestas de interés para el estudio (Supo, 2012).

La población en la presente investigación son todos los sistemas de riego en la región de Ayacucho.

3.1.2. Muestra

De acuerdo con Hernández et al. (2014), en el contexto de una investigación, la muestra consiste en una porción escogida de la población general sobre la cual se realiza el estudio. La muestra en este caso sería el sistema de riego de Para, ubicado en el distrito de Chaviña en la región de Ayacucho.

1.11. Hipótesis

3.1.3. Hipótesis general

El análisis de la eficiencia hídrica en el sistema de riego de Para, revelará áreas clave de ineficiencia y oportunidades de mejora, lo cual permitirá el desarrollo de estrategias efectivas para fortalecer la sostenibilidad agrícola en la región.

3.1.4. Hipótesis específicas

La evaluación de la hidrología, fisiografía y la infraestructura hidráulica en el sistema de riego de Para revelará patrones específicos de disponibilidad y calidad del agua, que

son factores críticos para determinar la eficiencia actual del sistema de riego y su capacidad para sostener la agricultura a largo plazo.

La interacción entre las condiciones socioeconómicas de la comunidad de Chaviña y el uso de los recursos hídricos influye significativamente en la eficiencia hídrica y la sostenibilidad agrícola.

Las estrategias sostenibles de riego, diseñadas sobre la base de evaluaciones hidrológicas completas y un análisis de la eficiencia hídrica, resultará en una optimización significativa del uso del agua en Para.

1.12. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional

Variable Independiente

Gestión de la eficiencia hídrica

Variable Dependiente

Sostenibilidad agrícola del sistema de riego de Para

Tabla 9

Cuadro de Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	TIPO	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Gestión de la eficiencia hídrica	Es el conjunto de estrategias y prácticas utilizadas para maximizar la productividad del uso del agua, minimizando el desperdicio y preservando los recursos hídricos. Se enfoca en la optimización del almacenamiento, distribución y consumo del agua, especialmente en sectores como la agricultura.	La Gestión de la eficiencia hídrica se define operativamente como el conjunto de acciones y estrategias implementadas para optimizar el uso del agua en un sistema de riego, minimizando pérdidas y maximizando la productividad agrícola, considerando factores climáticos, tecnológicos y socioeconómicos.	Independiente	Hidrología y fisiografía	Precipitación y Caudales máximos y mínimos	(mm/año) y (m³/s)
				Infraestructura hidráulica	Eficiencia en la distribución del agua	(%)
				Condiciones socioeconómicas	Nivel de acceso al agua de riego	(%)
				Gestión comunitaria del recurso hídrico	Recurso hídrico según la demanda agrícola	(m³/ha)
Sostenibilidad agrícola del sistema de riego de Para	Es la capacidad de este sistema para mantener y mejorar la productividad agrícola a lo largo del tiempo, sin agotar los recursos hídricos ni degradar el entorno. Implica equilibrar la demanda de agua para riego con la disponibilidad de recursos hídricos.	Es la del sistema para mantener y mejorar la productividad agrícola a largo plazo, garantizando un uso eficiente del agua, preservando los recursos naturales, y promoviendo la viabilidad económica y el bienestar social de la comunidad agrícola.	Dependiente	Productividad agrícola	Rendimiento agrícola y Eficiencia en el uso del agua por cultivo	(ton/ha) y (kg/m³)

Nota. Elaboración propia

1.13. Técnicas e instrumentos

3.1.5. Técnicas

Análisis documental: Este enfoque implica la revisión de documentos relevantes, como informes de proyectos, registros financieros y documentos de planificación, con el propósito de obtener información histórica.

Análisis de datos secundarios: Se emplearán datos recopilados previamente por fuentes gubernamentales o entidades agrícolas para enriquecer el estudio, ampliando la base de datos disponible.

Análisis estadístico: El análisis estadístico se aplicará para evaluar datos cuantitativos, como indicadores de productividad y eficiencia, brindando una comprensión más profunda de los resultados obtenidos.

3.1.6. Instrumentos

Se utilizaron los siguientes instrumentos. Fichas de evaluación de documentos, Fichas de registro de datos y Software de análisis de datos estadísticos (Excel y Python).

1.14. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información

Análisis descriptivo: Se utilizarán gráficos para resumir y visualizar datos sobre la eficiencia hídrica, así como variables relacionadas.

Regresión estadística: Se utilizará para analizar la relación entre variables, como la demanda hídrica y factores como el clima, el tipo de cultivo o la población.

Análisis de series temporales: Se utilizará, esta técnica para identificar patrones y tendencias a lo largo del tiempo en la eficiencia hídrica.

1.15. Desarrollo del trabajo de tesis

3.1.7. Ubicación del área en estudio

Ubicación Política

El proyecto está situado políticamente en la comunidad de Para, dentro del distrito de Chaviña, en la provincia de Lucanas, del departamento de Ayacucho.

Figura 4

Ubicación política del área de estudio



Ubicación Geográfica

Desde el punto de vista geográfico, el proyecto se sitúa en el sur de Perú, en el lado oriental de la Cordillera Occidental de los Andes, a una altitud que oscila entre los 4,000 y 4,800 metros sobre el nivel del mar, con una altitud promedio de 4,400 metros.

Ubicación Hidrográfica

En cuanto a la hidrografía, el proyecto se ubica en la Unidad Hidrográfica de Hualo-Para (Sicuayoq), que es un afluente del río Yauca. Este río a su vez es tributario del río Acarí, el cual desemboca finalmente en el Océano Atlántico.

Vertiente	: Pacífico
Cuenca	: Yauca
Subcuenca	: Paralmayocc
Unidad Hidrográfica	: Hualo - Para

Tabla 10*Ubicación de la fuente hídrica*

N° Captación	de Fuente Hidrográfica	Proyección UTM de Zona		
		Este (m)	Norte (m)	Cota (m)
1	Quebrada Sicuayoq	618309	8338398	3805

Ubicación Administrativa

Desde la perspectiva administrativa y en términos del uso de los recursos hídricos, el proyecto depende de las siguientes entidades:

- a) El Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI)
- b) La Autoridad Nacional del Agua (ANA)
- c) La Autoridad Administrativa del Agua Chaparra Chinchá
- d) La Administración Local de Agua Chaparra Acarí

3.1.8. Accesibilidad y Vías de Comunicación

La carretera Panamericana Sur Lima - Arequipa - Tacna es la principal vía de comunicación, de la cual se desprende la Carretera Nacional PE.30A Nazca Puquio - Abancay - Cusco, también conocida como la Ruta del Sol. Esta carretera atraviesa la provincia de Lucanas Puquio en el kilómetro 156. Adicionalmente, la provincia y sus distritos son cruzados de manera transversal por otras tres carreteras nacionales y seis carreteras departamentales.

3.1.9. Fisiografía de la zona de estudio

La unidad hidrográfica de Hualo Para exhibe una fisiografía con características morfológicas derivadas de un largo proceso evolutivo, influido por actividades tectónicas y erosivas que han conformado el paisaje actual.

Características fisiográficas de la unidad hidrográfica de Hualo - Para

Las propiedades fisiográficas de esta unidad hidrográfica se determinan por su forma, relieve y sistema de drenaje. Para esto, se han definido varios parámetros, los cuales, mediante el uso de ecuaciones matemáticas, facilitan la clasificación y comparación

de estas características. Los parámetros establecidos para un análisis más detallado incluyen:

- a) Parámetros de forma
- b) Parámetros de relieve
- c) Parámetros de la red hidrográfica

En el contexto del estudio hidrológico realizado en esta área, se utilizó la delimitación y las características fisiográficas de la unidad hidrográfica de Hualo-Para, como se muestra en los mapas correspondientes. A continuación, se presentan las características fisiográficas detalladas de esta unidad.

Parámetros de Forma

Los factores principales de Forma son:

Área de la cuenca (A). En términos generales, a medida que aumenta la superficie de la cuenca, aumenta también la cantidad de escorrentía superficial y, por ende, el flujo superficial. La superficie de la Unidad Hidrográfica Hualo-para es de 21.243 Km².

Perímetro de la cuenca (P). Para la Unidad Hidrográfica Hualo-para, este valor es de 19.140 Km.

Longitud del río principal (L). La extensión del río principal dentro de la Unidad Hidrográfica Hualo-para alcanza los 6.899 kilómetros.

Ancho medio de la cuenca (Ap). Es la relación entre el área de la cuenca y la longitud del curso principal del río, representada por la fórmula:

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

Donde:

Ap = Ancho promedio de la cuenca (en kilómetros).

A = Área de la cuenca (en kilómetros cuadrados).

L = Longitud del curso principal del río (en kilómetros).

El ancho promedio en la Unidad Hidrográfica Hualo-para se establece en 3.079 kilómetros.

Coefficiente de compacidad o índice de Gravelious (K_c)

El coeficiente de compacidad (K_c) se calcula mediante la fórmula

$$K_c = \frac{P}{2\pi R} = 0.282 \left[\frac{P}{\sqrt{A}} \right]$$

Donde P representa el perímetro de la cuenca en kilómetros y A representa el área de la cuenca en kilómetros cuadrados. Esta expresión indica que el valor de K_c siempre es igual o mayor que 1, y aumenta con la irregularidad de la forma de la cuenca. Este coeficiente, que no tiene dimensiones, sirve como indicador de la propensión a las crecidas en una cuenca.

Una cuenca con una forma circular tiene un coeficiente mínimo de 1 y tiende a experimentar mayores crecidas a medida que el valor de K_c se acerca a la unidad; por el contrario, cuando se aleja de la unidad, su forma se vuelve más irregular en comparación con un círculo. Cuando el valor de K_c es cercano a 1, el tiempo de concentración es menor, lo que indica una cuenca de forma circular con una mayor propensión a las crecidas. Por otro lado, cuando K_c es igual a 2, el tiempo de concentración es mayor, lo que sugiere una cuenca más alargada y menos propensa a las crecidas.

En este estudio, el coeficiente de compacidad para la Unidad Hidrográfica Hualo-para es de 1.16, lo que indica que se asemeja a una forma circular. Esto implica que los tiempos de concentración en los diferentes puntos de la unidad hidrográfica son similares, lo que aumenta la posibilidad de que se produzcan caudales máximos.

Factor de forma (Kf). La forma cuantitativa de una cuenca se describe mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

A = Área de la cuenca (en kilómetros cuadrados).

L = Longitud del cauce principal de la cuenca (en kilómetros).

El factor de forma sirve como otro indicador de la propensión a las crecidas en las unidades hidrográficas. Una cuenca con un factor de forma más bajo está menos susceptible a inundaciones que otra de tamaño similar, pero con un factor de forma mayor. Esto se debe a que, en una cuenca con un factor de forma bajo, el flujo de agua tiende a dispersarse más uniformemente a lo largo del cauce principal, reduciendo así el riesgo de inundaciones repentinas. En una cuenca estrecha y alargada, con un factor de forma bajo, es menos probable que ocurran lluvias intensas que cubran simultáneamente toda su extensión. Además, la contribución de los afluentes llega al curso principal de agua en varios puntos a lo largo del mismo, alejándose así de la condición ideal de una cuenca circular, donde toda la corriente de agua se concentra en un solo punto.

Según el análisis, la Unidad Hidrográfica Hualo - Para exhibe una forma irregular, con un factor de forma cercano a uno (0.45).

Parámetros del relieve

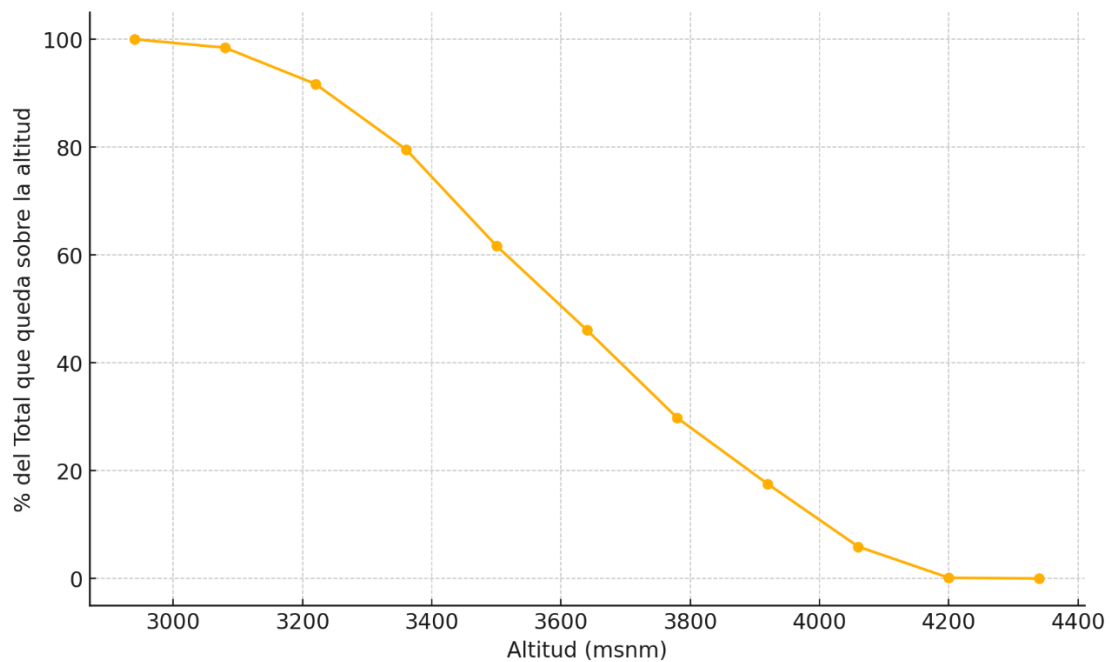
El relieve de una unidad hidrográfica ejerce una gran influencia sobre los factores meteorológicos e hidrológicos. La velocidad de la escorrentía superficial está determinada por la pendiente de la cuenca, mientras que variables como la temperatura, la precipitación, la evaporación y otras dependen de la altitud de la cuenca. Por lo tanto, es crucial determinar las características del relieve de la unidad hidrográfica en estudio.

Para describir el relieve de la cuenca de la zona de estudio se realizó una curva hipsométrica (Ver Figura 5).

Tabla 11*Altura y Superficies de la unidad hidrográfica Hualo Para*

Altitud (msnm)	Áreas parciales (km²)	Áreas acumuladas (km²)	Áreas que quedan sobre las alturas (km²)	% del total (Área parcial/Área total * 100)	% del Total que queda sobre la altitud (Área sobre alturas/Área total * 100)
2940	0	0	21.243	0	100
3080	0.332	0.332	20.911	1.55	98.44
3220	1.428	1.76	19.483	6.67	91.71
3360	2.575	4.335	16.908	12.12	79.59
3500	3.797	8.132	13.111	17.87	61.72
3640	3.323	11.455	9.788	15.64	46.08
3780	3.462	14.917	6.326	16.3	29.78
3920	2.605	17.522	3.721	12.26	17.52
4060	2.465	19.987	1.256	11.6	5.91
4200	1.227	21.214	0.029	5.78	0.14
4340	0.029	21.243	0	0.14	0

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

Figura 5*Curva hipsométrica***Rectángulo Equivalente**

El rectángulo equivalente es una técnica geométrica utilizada para representar una cuenca, que originalmente tiene una forma heterogénea, como un rectángulo que posee la misma área y perímetro. Esto garantiza que tenga el mismo índice de compacidad o índice de Gravelious, así como una distribución de altitudes uniforme, reflejada en una curva hipsométrica igual. Además, asegura una distribución similar del terreno en términos de sus condiciones de cobertura.

Para calcular los lados del rectángulo equivalente, se emplean las siguientes fórmulas:

Para el lado mayor (L), se utiliza el factor (+):

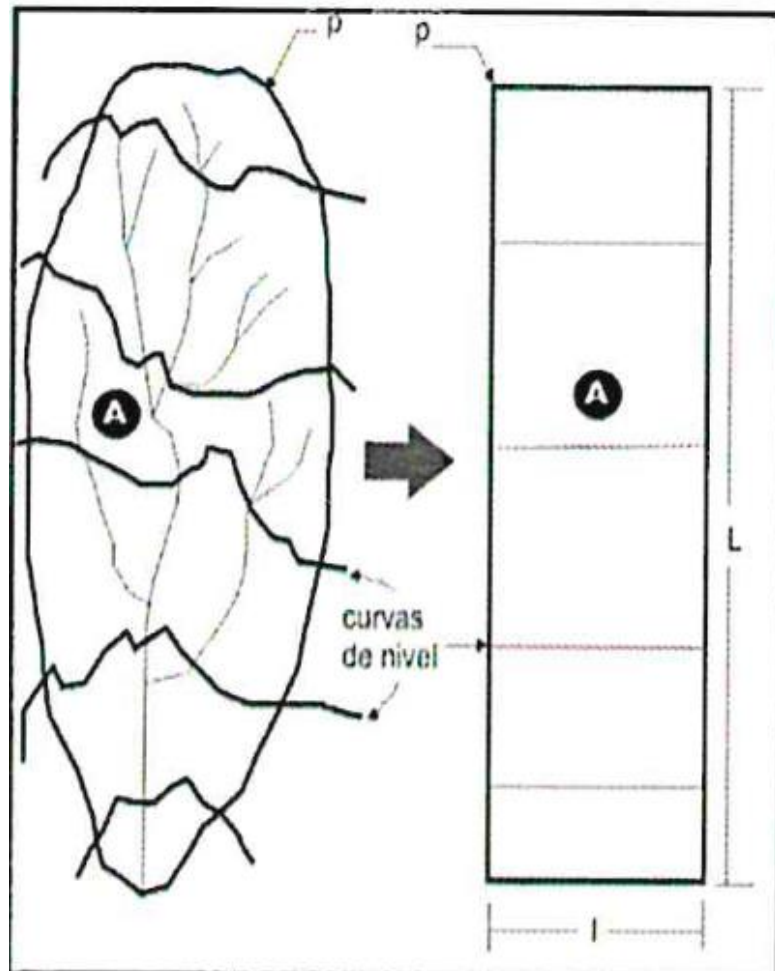
$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \left(\frac{1.12}{K} \right)^2 \right]$$

De manera análoga, para el lado menor (I), se emplea el factor (-):

$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2 \right]$$

Figura 6

Curvas de nivel del rectángulo



Nota. Tomado de Baldeon (2016)

Donde:

L = longitud del lado mayor del rectángulo.

l = longitud del lado menor del rectángulo.

K = índice de Gravelious.

A = área de la cuenca.

Se construye un rectángulo con base l y altura L . Luego, se calculan los cocientes: A_n

$$L1 = \frac{A_1}{l}, L2 = \frac{A_2}{l}, L3 = \frac{A_3}{l}, \dots m, Ln = \frac{A_n}{l}$$

Y estas dimensiones se reflejan en el lado mayor del rectángulo (Ver Figura 6).

Según los resultados, la longitud mayor (L) y la longitud menor (l) para la Unidad Hidrográfica Hualo-para son ($L = 6.234$ km y $l = 3.407$ km).

Elevación media de la cuenca. La elevación media de la cuenca se determina mediante el porcentaje de altura correspondiente al 25% del área, lo cual puede ser visualizado gráficamente en la tabla siguiente. La altura media de la unidad hidrográfica se representa mediante la intersección de las curvas.

Las variaciones en la altitud y la elevación media de una cuenca son significativas debido a su influencia en la precipitación, las pérdidas de agua por evaporación y transpiración, y consecuentemente en el caudal medio. Grandes variaciones en la altitud resultan en diferencias notables en la precipitación y la temperatura media, lo que a su vez afecta la evapotranspiración.

Para calcular la elevación media se utiliza la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sum ea}{A}$$

Donde:

E = elevación media

e = diferencia de elevación media entre dos curvas de nivel consecutivas

a = área entre las curvas de nivel (en kilómetros cuadrados)

A = área total de la cuenca (en kilómetros cuadrados)

El valor numérico de la altitud media de la unidad hidrográfica se presenta a continuación (Ver Tabla 10).

Tabla 12

Altitud media de la unidad hidrográfica Hualo Para

Áreas parciales (km ²)	Altitud (msnm)	Áreas acumuladas (km ²)
0.332	3010	999.32
1.428	3150	4498.2
2.575	3290	8471.75
3.797	3430	13023.71
3.323	3570	11863.11
3.462	3710	12844.02
2.605	3850	10029.25
2.465	3990	9835.35
1.227	4130	5067.51
0.029	4270	123.83
Total	33390	76632.22

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

Parámetros de la red Hidrográfica

La unidad hidrográfica que estamos estudiando cuenta con un sistema de drenaje compuesto por un cauce principal y sus tributarios, cuyo análisis es crucial para entender la velocidad con la que el agua se evacúa de la cuenca. El diseño de la red de drenaje es fundamental, ya que muestra la eficacia con la que el sistema maneja el escurrimiento del agua, revelando no solo la rapidez del desalojo del agua, sino también proporcionando pistas sobre las condiciones del suelo y la superficie de la cuenca.

Se han identificado varios parámetros para analizar esta red, entre ellos el tipo de corriente, la longitud de los tributarios, y la densidad tanto de corriente como de drenaje. Estos elementos nos permiten describir la red de manera detallada. Por ejemplo, distinguimos ríos perennes, que fluyen continuamente a lo largo del año, ríos intermitentes, que solo llevan agua en temporadas de lluvia, y ríos efímeros, que aparecen exclusivamente durante precipitaciones.

Un aspecto crucial es el orden de las corrientes, que nos ayuda a entender la estructura jerárquica del sistema de ríos y su capacidad para manejar el flujo de agua. En la Unidad Hidrográfica Hualo-para, de tamaño mediano, el orden de corriente es 3, lo que indica una capacidad moderada para gestionar el escurrimiento y la evacuación del agua. Este orden es significativo, ya que cuencas de mayor tamaño generalmente presentan un

orden de corriente más elevado, lo que sugiere una complejidad y capacidad mayor en el manejo de las aguas.

Densidad de Corriente (Dc). Para calcular el número de corrientes, se incluyen únicamente aquellas que son permanentes o intermitentes. La corriente principal se cuenta como una, desde su origen hasta su punto de desembocadura. Se trata de la proporción entre el número de cursos de agua y el área de drenaje, es decir:

$$Dc = \frac{Nc}{A}$$

Donde:

Dc = densidad de corriente

Nc = cantidad de cursos de agua permanentes o intermitentes

A = extensión total de la cuenca, medida en kilómetros cuadrados

Densidad de Drenaje (Dd). La densidad de drenaje es un indicador que sugiere la posible composición del suelo en la cuenca y proporciona una estimación del grado de cobertura vegetal en la misma. Se trata de la proporción entre el número de corrientes y el área drenada, expresada como:

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

Donde:

Dd = densidad de drenaje

Lt = número total de corrientes permanentes o intermitentes

A = área total de la cuenca, medida en kilómetros cuadrados

Valores elevados pueden indicar áreas con poca vegetación, suelos propensos a la erosión o impermeables. Por otro lado, valores bajos indican suelos resistentes a la erosión, permeables y con una densa vegetación. La densidad de drenaje en la Unidad Hidrográfica Hualo - Para es de 0.812 km/km², lo que sugiere una densidad de drenaje moderada al encontrarse dentro del rango de 0 a 1.5.

Extensión media del escurrimiento. La extensión media del escurrimiento se refiere a la distancia promedio que el agua tendría que recorrer sobre la cuenca para llegar

al cauce principal. Se calcula mediante la relación entre el área de la cuenca y cuatro veces la longitud total de todos los cursos de agua dentro de la cuenca.

$$d = \frac{A}{4Lt}$$

El valor del parámetro de extensión media del escurrimiento para la Unidad Hidrográfica Hualo - Para es de 1891.22 metros.

3.1.10. Hidrografía de la Zona del Proyecto

La zona hidrográfica considerada en el proyecto comprende las quebradas de Hualo - Para, que abarcan desde una altitud de 4400 metros sobre el nivel del mar en la parte alta, hasta 3600 metros sobre el nivel del mar en la parte baja.

Cuenca Yauca

La cuenca del río Yauca, ubicada en la vertiente del Pacífico en la región Ayacucho, tiene una extensión de 376,351.291 hectáreas y es la tercera cuenca más significativa a nivel regional. Se extiende por las provincias de Lucanas y Parinacochas, y en la provincia de Lucanas comprende los distritos de Chaviña y Sancos. Esta cuenca es de naturaleza birregional, ya que abarca las regiones de Ayacucho y Arequipa.

En términos de la vertiente del Atlántico, la cuenca del río Yauca es la tercera en extensión, cubriendo el 8.644% del territorio regional. En la provincia de Lucanas, la cuenca incluye los distritos de Sancos y Chaviña, mientras que en la provincia de Parinacochas abarca los distritos de Pullo, Chumpi y Coracora. Se han detectado niveles elevados de coliformes fecales en algunos puntos del río Yauca, como Sangarara y río San Luis, superando los estándares establecidos por la Clase I de la Ley General de Aguas y las pautas de la OMS. Esto indica la necesidad de tratar el agua para su uso en la población. El caudal promedio de la cuenca es de 16.2 m³/s. Los principales ríos de la cuenca incluyen el río Sangarara, Sancos, Paras, Tampa y Paralmayoc.

Unidad Hidrográfica Hualo-Para

Esta unidad hidrográfica tiene una superficie total de 284.66 kilómetros cuadrados, con altitudes que oscilan entre los 1600 metros sobre el nivel del mar en el punto más bajo

y los 5250 metros sobre el nivel del mar en sus fuentes, ubicadas en las partes altas de los cerros dentro de la unidad hidrográfica. Los parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica Hualo-Para se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 13

Características morfométricas de la unidad hidrográfica Hualo - Para

Parámetro	Valor	Unidad
Área de la cuenca	21.243	km ²
Perímetro	19.14	km
Elevación media	3607.41	msnm
Coeficiente de compacidad	1.163	-
Factor de forma	0.446	-
Lado mayor rectángulo equivalente	6.234	km
Lado menor rectángulo equivalente	3.407	km
Orden de ríos	Tercer Orden	-
Densidad de drenaje	0.812	-
Extensión media del escurrimiento	1891.22	m

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

3.1.11. Infraestructura hidráulica existente

El sistema de riego de Para, ubicado en el distrito de Chaviña, región de Ayacucho, cuenta con infraestructura hidráulica diseñada para optimizar el uso del agua, especialmente en temporadas de lluvias. La infraestructura principal incluye la presa Chaquiccocha, un reservorio de almacenamiento que permite la regulación del agua durante todo el año. Además, el sistema está equipado con tuberías en la línea de conducción principal y redes de distribución que facilitan una eficiente operación y mantenimiento, asegurando así una distribución equitativa y constante del agua para riego. Para evaluar el análisis hídrico de la infraestructura se realizó el análisis de consistencia de la información pluviométrica e hidrométrica junto a la regresión de precipitación.

Registro de la infraestructura hidráulica

La ubicación de la presa está ubicada en el distrito de Chaviña, provincia de Lucanas, donde las unidades hidrográficas tributarias a la presa se encuentran entre los 4,452 y 4,586 msnm, que es la altura media de las microcuencas que alimentan a la presa.

La Bocatoma Chaquiccocha estará ubicada a una altitud que varía entre los 2,780 y 3,461 metros sobre el nivel del mar, en las áreas agrícolas adyacentes. Morfológicamente, la superficie de la cuenca se encuentra en la geofoma conocida como “Altas Cumbres”, caracterizada por colinas con pendientes pronunciadas que descienden hacia la cuenca y picos prominentes. Su sistema de drenaje está conformado por pequeñas quebradas que, al unir sus afluentes, forman el cauce del río en diferentes puntos y altitudes.

Análisis meteorológico e hidrométrico

En la zona de estudio se han identificado cuatro estaciones meteorológicas, incluida la estación meteorológica Lucanas, que se encuentra dentro de la región de Ayacucho. Es importante señalar que no hay estaciones hidrométricas en el área del proyecto. La duración de los registros meteorológicos es variable ya que a menudo se observan interrupciones.

La ubicación y las principales características de la estación meteorológica se detallan en la Tabla 12. La información meteorológica disponible en la estación se encuentra en los anexos 2, 3, y 4.

Tabla 14

Ubicación de estaciones meteorológicas

Estación	Provincia	Distrito	Cuenca	Longitud	Latitud	Altitud (m)
Lucanas	Lucanas	San Miguel	Yauca	74°13'58"	14°27'23"	3733
Puquio	Lucanas	Puquio	Yauca	74°07'49"	14°41'17"	3216
Cora Cora	Parinacochas	Cora Cora	Acarí	73°47'41"	15°11'11"	3172
Andamarca	Lucanas	Carmen Salcedo	Sonondo	73°57'43"	14°23'14"	3509

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

Análisis de las variables meteorológicas

Temperatura

Para determinar la temperatura media mensual del área del proyecto se emplearon tres estaciones meteorológicas que se detallan en la Tabla 13.

Tabla 15

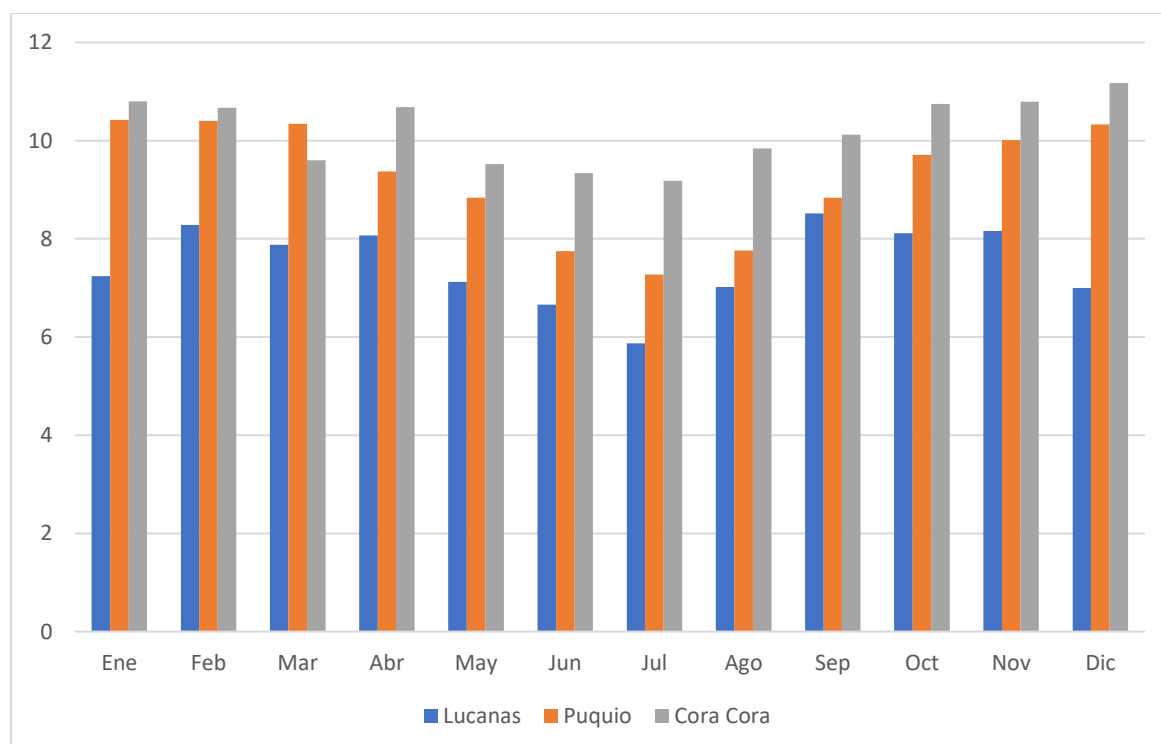
Temperatura Media Mensual (°C)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Lucanas	7.24	8.28	7.88	8.07	7.12	6.66	5.87	7.02	8.52	8.11	8.16	7
Puquio	10.42	10.4	10.34	9.37	8.84	7.75	7.27	7.76	8.84	9.71	10.01	10.33
Cora Cora	10.8	10.67	9.6	10.68	9.52	9.34	9.18	9.84	10.12	10.75	10.79	11.17

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

Figura 7

Variación de la Temperatura Media Mensual (°C)



Humedad Relativa

Además, se analizaron los datos de humedad relativa de las estaciones empleadas, presentando los promedios mensuales en la Tabla 14 y en la Figura 8. La humedad relativa

media anual en Lucanas es de 69.23%, con variaciones mensuales que van desde un mínimo del 60.22% en junio hasta un máximo del 73.93% en abril, evidenciando una variabilidad a lo largo del año.

Tabla 16

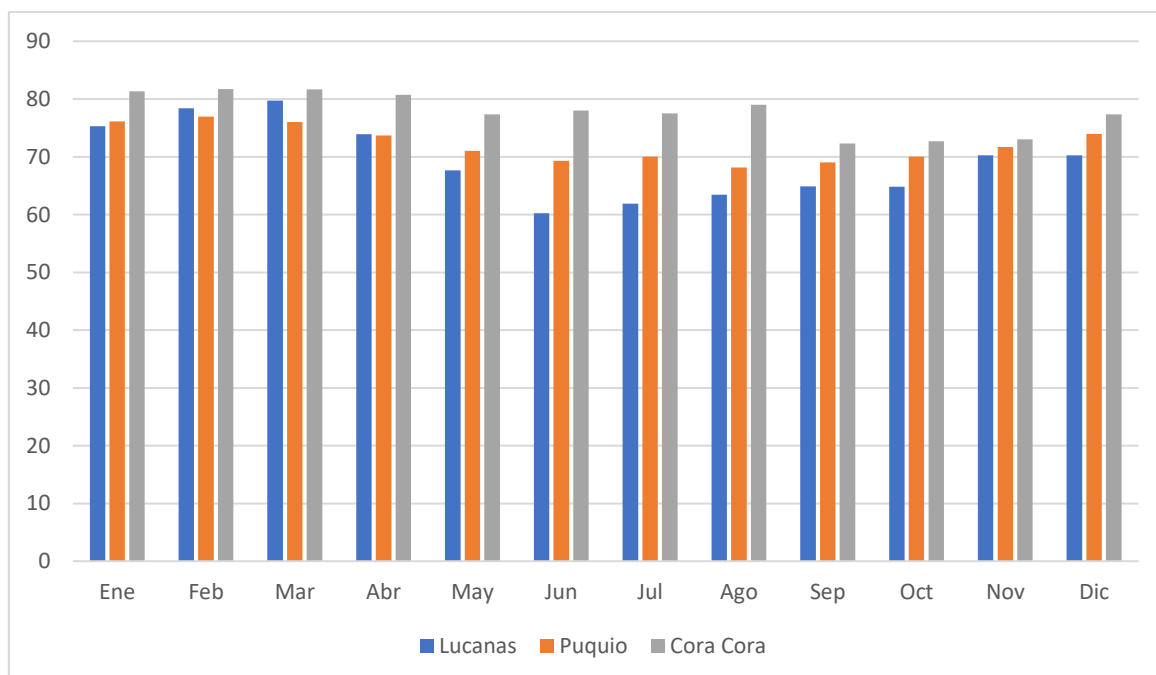
Humedad relativa media mensual (%)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Lucanas	75.3	78.41	79.71	73.93	67.65	60.22	61.9	63.46	64.86	64.82	70.24	70.24
Puquio	76.15	76.96	76.04	73.67	71.04	69.34	70.04	68.15	69.04	70.02	71.7	73.98
Cora Cora	81.33	81.75	81.67	80.75	77.33	78	77.5	79	72.33	72.67	73	77.33

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

Figura 8

Variación de la Humedad relativa media mensual (%)



Evaporación

La tabla a continuación presenta la evaporación en el área del proyecto.

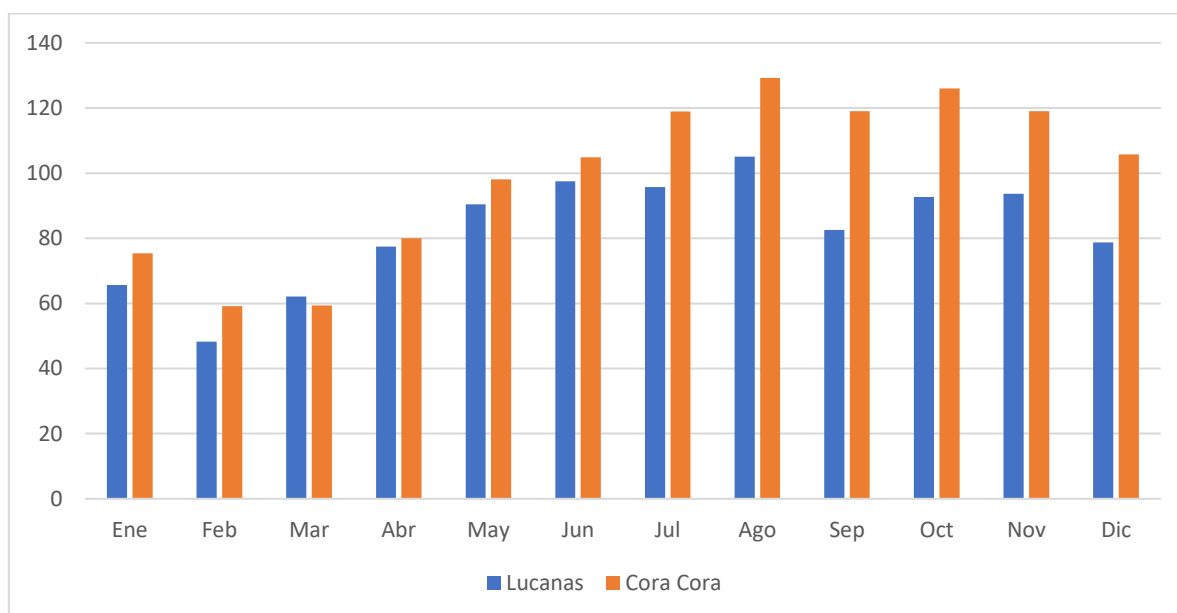
Tabla 17
Evaporación promedio mensual

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Lucanas	65.62	48.24	62.07	77.47	90.41	97.46	95.68	105.1	82.59	92.68	93.68	78.72
Cora Cora	75.34	59.21	59.34	80.05	98.13	104.9	119	129.3	119.1	126.1	119	105.8

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

Figura 9

Variación de la Evaporación promedio mensual



Viento

La Tabla 16 exhibe el promedio mensual de la velocidad media del viento en las Estaciones en estudio, registrando velocidades promedio de aproximadamente 3.33 m/s en la estación Lucanas. La Figura 10 representa los niveles de velocidad media por mes, destacando valores máximos registrados en enero, febrero, junio, agosto, noviembre y diciembre, con una velocidad máxima de 3.52 m/s, mientras que el mínimo se observa en abril, con 3.14 m/s. Durante este periodo, la dirección predominante del viento fue hacia el Oeste.

Tabla 18

Velocidad del viento en (m/s)

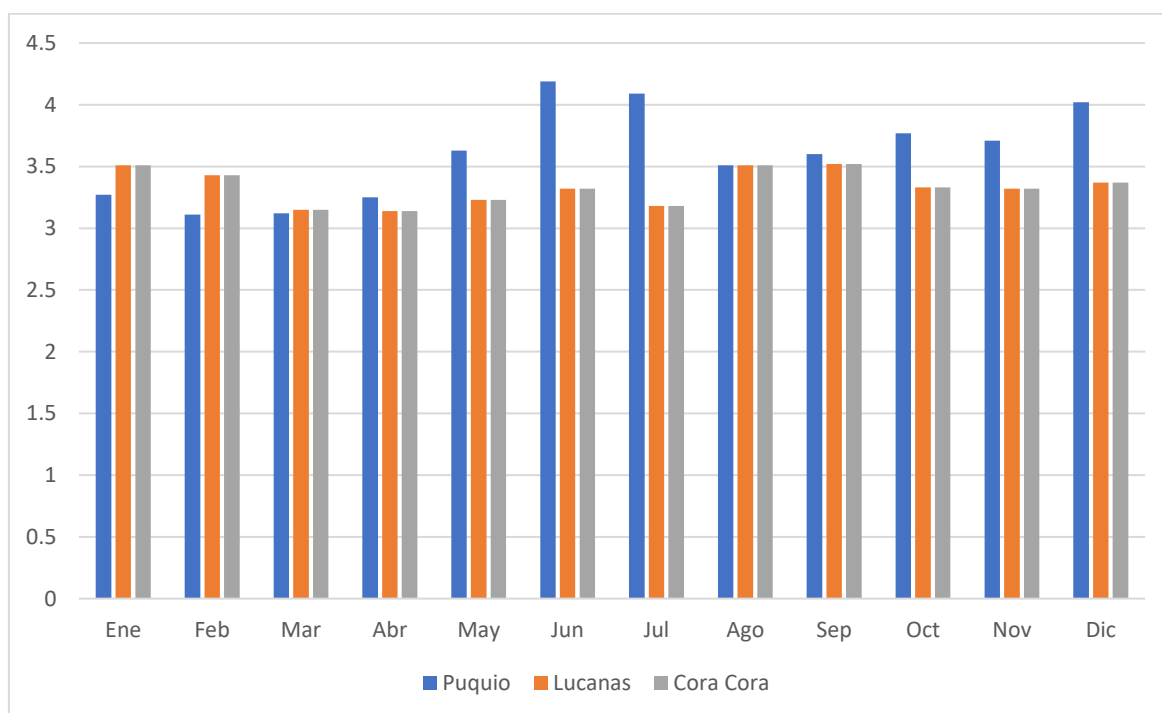
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Puquio	3.27	3.11	3.12	3.25	3.63	4.19	4.09	3.51	3.6	3.77	3.71	4.02
Lucanas	3.51	3.43	3.15	3.14	3.23	3.32	3.18	3.51	3.52	3.33	3.32	3.37
Cora Cora	3.51	3.43	3.15	3.14	3.23	3.32	3.18	3.51	3.52	3.33	3.32	3.37

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

Figura 10

Variación de la Velocidad del viento en (m/s)



Precipitación

Para analizar la precipitación dentro del área de la unidad hidrográfica Hualo-Para, se han empleado los datos recopilados de cuatro estaciones meteorológicas, cuyos registros se detallan en la Tabla 17.

Tabla 19

Precipitación promedio mensual (mm)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Lucanas	110.3	137	131.5	44.56	7.95	2.27	1.43	4.04	7.12	14.57	15.1	41.35
Puquio	95.39	104.4	96.44	23.2	8.51	5.7	7.8	8.37	10.74	10.26	16.87	37.6

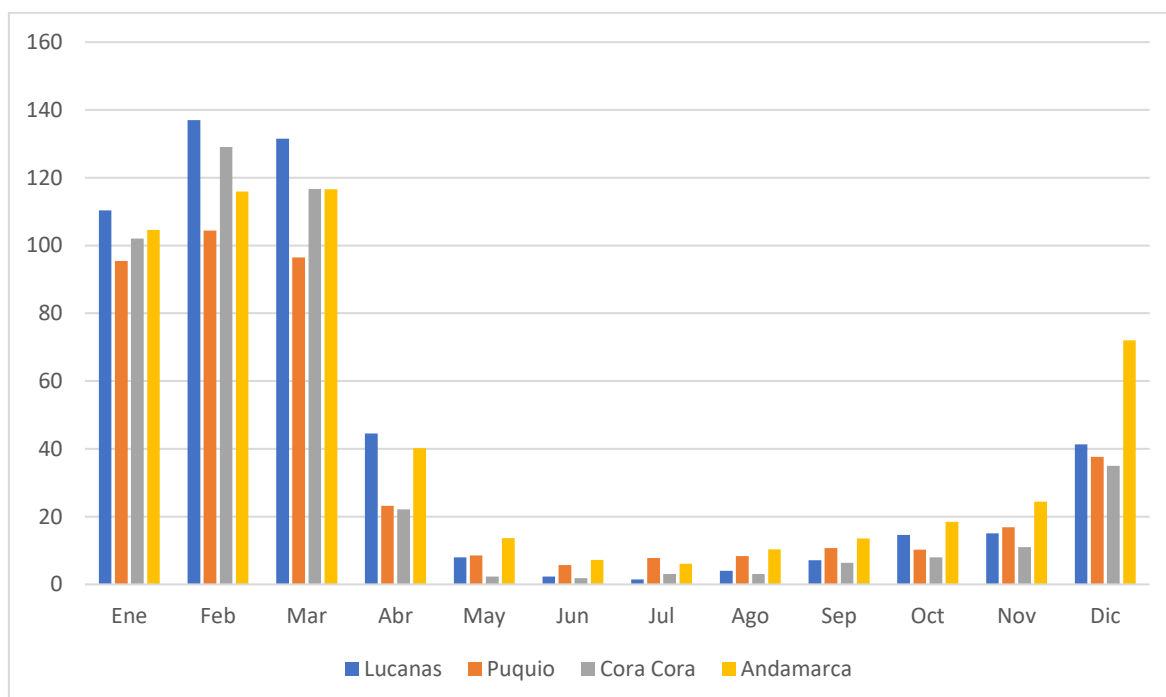
Cora Cora	102.1	129	116.7	22.16	2.31	1.83	3.02	3.05	6.38	7.99	10.95	35.01
Andamarca	104.6	116	116.6	40.18	13.6	7.21	6.04	10.33	13.57	18.49	24.43	71.99

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

La formación de la precipitación implica elevar una masa de aire en la atmósfera de manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres principales mecanismos de elevación de masas de aire son: la elevación frontal, donde el aire caliente se eleva sobre el aire frío debido al paso de un frente; la elevación convectiva, donde el aire se eleva debido a procesos convectivos, como en el núcleo de una tormenta eléctrica; y la elevación orográfica, donde una masa de aire se eleva al pasar sobre una cadena montañosa. En el área de estudio, la precipitación es principalmente de tipo orográfico debido a la presencia de la cordillera de los Andes. Sin embargo, en la naturaleza, los efectos de estos diferentes tipos de enfriamiento suelen estar interrelacionados, y la precipitación resultante no puede atribuirse a un solo tipo exclusivamente.

Figura 11

Variación de la Precipitación promedio mensual (mm)



Radiación Solar

La radiación solar se determinó con datos de la estación meteorológica de Cora. Cora se detallan a continuación en la siguiente Tabla:

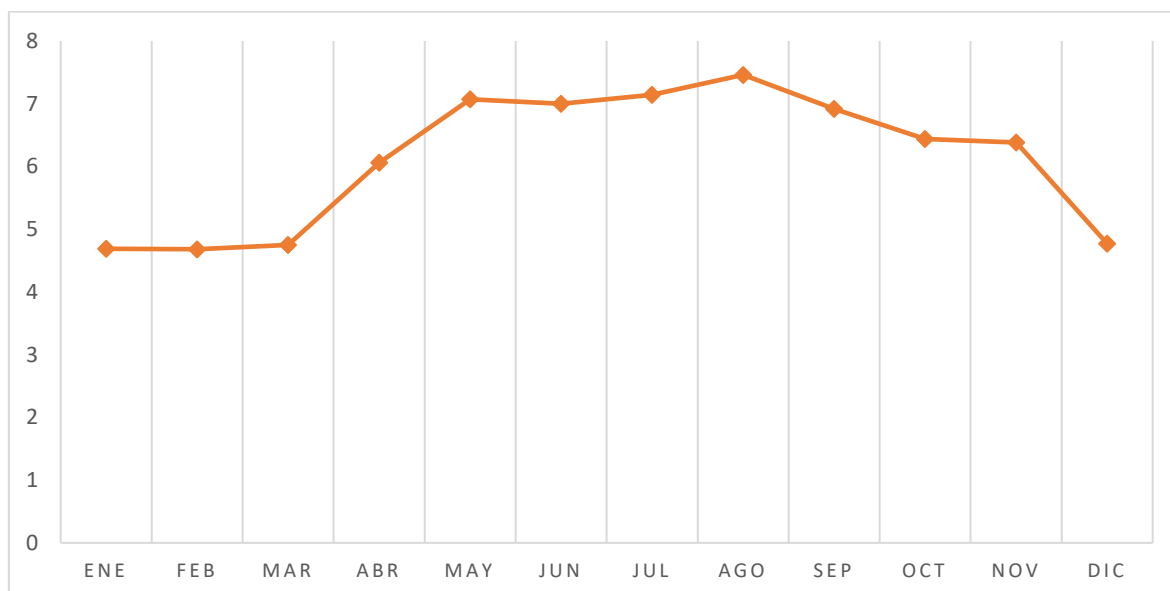
Tabla 20

Horas de sol promedio diario mensual

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Horas Solares Medias Diarias	4.69	4.68	4.75	6.06	7.07	7	7.14	7.46	6.92	6.44	6.38	4.77

Figura 12

Horas de sol promedio diario mensual



Análisis de consistencia de la información pluviométrica e hidrométrica

Se realizó el análisis de consistencia de las descargas medias mensuales empleando la misma metodología que se utilizó para el análisis de la información pluviométrica. Este proceso incluyó un análisis visual de hidrogramas, fundamental para detectar posibles inconsistencias en los datos hidrométricos. Al examinar los hidrogramas, se buscó identificar anomalías como picos inusualmente altos o valores extremadamente bajos, así como discontinuidades o tendencias inesperadas. Estos elementos podrían

indicar errores sistemáticos o eventos naturales reales, y se visualizaron mediante gráficos en coordenadas cartesianas que representan la información histórica de manera anual y mensual.

Para el estudio, se formó un solo grupo de estaciones hidrométricas para su análisis conjunto y, tras revisar los datos de las series anuales y mensuales de descargas, se determinó que no hay períodos dudosos significativos. Los hidrogramas generados no mostraron irregularidades que sugieran inconsistencias en los registros de las estaciones evaluadas.

Cálculo de la relación entre la altura y la precipitación

Se ha realizado el análisis regional, el cual facilita la estimación de precipitaciones en ubicaciones específicas mediante la inclusión de la variable de altitud. Este método posibilita la obtención de un valor promedio de precipitación para la cuenca en estudio. Al representar gráficamente una ecuación de regresión lineal, se evalúa el coeficiente de determinación R^2 . Un R^2 cercano a 1 indica una alta correlación entre los datos ingresados y la altitud, demostrando la efectividad del modelo para predecir las precipitaciones basadas en la altitud de la región. Este análisis proporciona una herramienta valiosa para mejorar la comprensión y gestión de los patrones de precipitación en la cuenca.

Sabiendo que:

Tabla 21

Datos de precipitación para la presa Chaquiccocha

Nombre Estación	Altitud Media (msnm)	Precipitación Media Anual (mm)
Lucanas	3,773.00	517.25
Puquio	3,216.00	425.27
Cora Cora	3,172.00	440.49
Andamarca	3,509.00	542.83
Suma	13,670.00	1,925.84
n	4	4
Promedio	3,417.50	481.46

El coeficiente de determinación R^2 para la relación entre la altitud media y la precipitación media anual es aproximadamente 0.677, lo que indica que aproximadamente el 67.7% de la variabilidad en la precipitación media anual puede ser explicada por la altitud media.

La ecuación de la regresión lineal es:

$$\text{Precipitación Media Anual (mm)} = 0.169 \times \text{Altitud Media (msnm)} - 94.63$$

Figura 13

Código en Python de la ecuación lineal

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.linear_model import LinearRegression

stations_data = {
    "Altitud Media (msnm)": [3773, 3216, 3172, 3509],
    "Precipitación Media Anual (mm)": [517.25, 425.27, 440.49, 542.83]
}

X = np.array(stations_data["Altitud Media (msnm)"]).reshape(-1, 1)
y = np.array(stations_data["Precipitación Media Anual (mm)"])
model = LinearRegression()
model.fit(X, y)

predictions = model.predict(X)

station_names = ["Lucanas", "Puquio", "Cora Cora", "Andamarca"]

results_df = pd.DataFrame({
    "Nombre Estación": station_names,
    "Altitud Media (msnm)": stations_data["Altitud Media (msnm)"],
    "Precipitación Media Anual Observada (mm)": stations_data["Precipitación Media Anual (mm)"],
    "Precipitación Media Anual Predicha (mm)": predictions
})

results_df
```

Aplicando la regresión lineal para cada estación (Ver Figura 13), incluyendo tanto la precipitación media anual observada como la precipitación media anual predicha, obtenemos lo siguiente:

Tabla 22

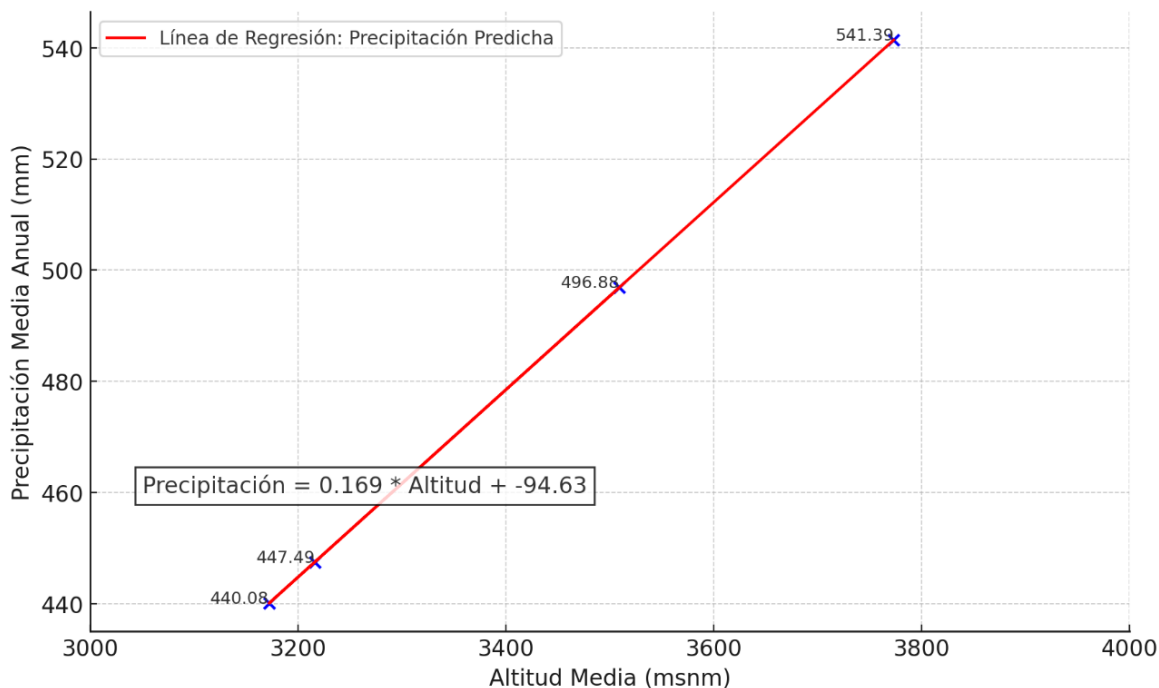
Precipitación predicha para la presa Chaquiccocha

Nombre Estación	Altitud Media (msnm)	Precipitación Media Anual Observada (mm)	Precipitación Media Anual Predicha (mm)
Lucanas	3773	517.25	541.39
Puquio	3216	425.27	447.49
Cora Cora	3172	440.49	440.08
Andamarca	3509	542.83	496.88

El coeficiente de regresión (pendiente de la línea de regresión) habiéndose anteriormente como parte de la ecuación de la regresión lineal indica que la cantidad de cambio en la precipitación media anual (en mm) por cada metro de cambio en la altitud media (msnm) es aproximadamente 0.169 mm/m. A continuación, se muestra la representación gráfica.

Figura 14

Altitud-precipitación ecuación de regresión



De la Tabla 20, se sugiere una correlación adecuada entre los datos ingresados y una distribución espacial uniforme, sin valores extremos. Una ecuación con un valor de R^2 cercano a 1 proporcionará estimaciones de precipitación más precisas, ya que generará información con una correlación sólida sin distorsionar la homogeneidad de los datos.

3.1.12. Hidrología

En hidrología, uno de los parámetros fundamentales es el caudal, pero en el área de estudio o en sus proximidades no hay estaciones hidrométricas disponibles. El modelo para estimar los caudales se ha desarrollado utilizando mediciones de caudal obtenidas de un estudio realizado por la Autoridad Nacional de Agua (ANA, 2019), además de un análisis estocástico para garantizar la precisión del modelo en la predicción del comportamiento hidrométrico de los arroyos y ríos estudiados. Asimismo, se llevó a cabo un análisis de los caudales generados para identificar posibles sitios de extracción de recursos hídricos.

Tabla 23

Precipitación efectiva generada en la unidad hidrográfica (mm)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag o	Sep	Oct	Nov	Dic
1972	33.57	166.9 4	199.0 8	15.89	16.2 2	4.37	3.9 4	9.8 6	4.02	2.02	0.59	3.82
1973	31.42	129.4 6	116.4 3	0.02	1.9	0.02	0.0 2	0.0 2	0.63	26.8 7	2.76	8.43

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag o	Sep	Oct	Nov	Dic
1974	25.83	166.5 9	109.3 2	43.24	9.11	0.02	0.0 2	0.0 2	0.02	0.02	0.02	22.0 6
1975	174.5 6	7.33	129.9 4	0.01	0.01	0.01	0.0 1	0.0 1	0.01	2.4	1.95	2.03
1976	6.65	83.83	192.3 9	95.53	0.02	0.02	0.0 2	0.0 2	0.02	0.02	12.4 6	75.5 3
1977	209.1 6	53.17	123.1 8	0.02	0.02	0.02	0.0 2	0.0 2	5.7	7.75	4.76	10.0 3
1978	45.97	101.9 1	107.6 7	36.59	0.02	0.02	0.0 2	0.0 2	0.02	0.02	0.02	3.01
1979	6.02	32.44	79.39	0.33	0.22	0.03	0.0 3	0.0 3	0.4	0.37	0.1	1.16
1980	79.5	120.2 1	114.1 6	62.68	1.82	1.27	0.0 2	0.0 2	12.0 9	0.02	9.83	14.2 5
1981	246.9 9	117.6 7	114.7 2	18.76	0.01	0.01	0.0 1	4.4 2	0.01	0.01	0.01	7.46
1982	110.2 8	78.06	133.7 1	2.64	9.09	0.62	0.6 2	0.0 2	0.16	3.3	0.31	26.8 3
1983	188.9 6	95.47	81.99	7.65	4.21	0.02	0.0 2	1.5 7	4.88	0.02	1.2	7.9
1984	6.09	215.9 9	131.4 8	0.86	0.58	0.02	0.6 6	0.0 2	20.6 9	3.21	7.83	11.0 8
1985	66.93	39.21	56.41	14.5	0.03	0.03	0.4 2	2.0 6	0.85	6.13	30.2 2	6.76
1986	30.58	28.57	150.6 3	1.72	0.59	0.03	1.4 5	4.3	0.03	11.7 9	1.04	8.28
1987	100.5 5	20.59	86.71	0.03	0.03	0.06	3.5 1	1.1 5	4.07	23.1 2	0.03	13.8 5
1988	99.12	145.8 4	28.02	22.19	0.02	0.02	0.0 2	4.5 3	0.02	4.5	10.8 5	90.5 8
1989	73.09	123.2 9	40.7	15.79	0.03	0.03	0.0 3	0.0 3	7.51	27.5 8	15.8 7	4.95
1990	34.25	33.66	8.18	2.33	0.04	0.04	0.0 4	0.0 4	0.04	5.73	1.16	9.41
1991	16.56	30.92	113.9 9	6.54	1.58	8.9	0.0 3	1.7 3	2.43	13.0 3	37.9 7	45.8 9
1992	5.32	158.8 8	224.8 3	2.71	3.97	0.01	0.0 1	0.0 1	0.01	0.01	0.01	30.3 5
1993	92.67	108.3 8	78.01	6.11	0.02	0.02	0.0 2	0.0 2	0.02	0.02	0.02	40.2 7
1994	120.4	6.75	4.19	0.02	0.02	0.02	0.0 2	0.0 2	0.02	2.79	1.19	0.6
1995	44.45	169.8 5	142.3 7	11.48	0.02	0.02	0.0 2	0.0 2	0.02	0.02	0.02	27.0 4
1996	161.7 8	81.82	143.6 3	0.9	0.78	1.17	0.5 1	0.2 4	0.01	0.01	0.48	2.05
1997	0.84	11.55	33.41	0.04	11.7 2	32.0 4	2.1	0.0 4	0.16	0.04	15.9 3	13.1 5
1998	22.67	13.82	179.0 4	4.71	0.02	0.02	0.0 2	0.0 2	0.02	0.02	5.06	5
1999	0.04	32.45	0.04	0.04	0.04	0.04	0.0 4	0.0 4	0.04	10.3 7	1.34	18.6 3
2000	113.6 2	109.2	106.7 1	22.6	2.53	0.02	0.0 5	0.0 2	0.02	0.02	4.42	5.32
2001	63.81	134.0 4	58.95	17.08	0.02	0.02	0.0 2	0.0 2	0.02	0.02	0.02	1.19
2002	18.74	22.78	163.8 9	8.45	0.03	0.03	0.0 3	0.0 3	4.87	3.61	36.9 7	42.6 9
2003	102.5 7	252.2 2	69.52	120.9 6	3.63	0.01	0.0 1	2.2	3.92	0.98	2.01	0.96
2004	77.39	117.3 8	40.74	32.42	3.29	0.03	1.8 8	5.6 6	10.5 6	4.03	23.0 2	97.7 1
2005	166.1 9	92.11	63.28	7.01	0.02	1.36	0.0 2	0.0 2	0.47	3.2	11.4 5	62.9 4

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag o	Sep	Oct	Nov	Dic
2006	78.74	209.6 5	76.41	31.63	2.07	0.05	0.9 7	0.0 5	2.57	45.5	0.75	47.2 3
2007	173.5 8	107.7	83.46	4.64	2.32	0.19	0.0 2	4.1	3.93	46.8 9	6.57	48.5
2008	89.79	91.9	174.7 1	57.25	1.58	0.1	0.1 6	1.1 6	5.31	3.55	0.8	2.55
2009	137.6 1	141.4 8	130.4	10.87	8.28	0.83	3.6 3	3.5 5	0.46	0.08	0.55	2.71
2010	85	34.76	2.26	1.01	4.71	0.03	0.0 6	1.3 5	2.44	0.22	0.03	46.5 6
2011	103.0 1	132.8 8	60.29	5.17	0.1	0.02	0.0 2	0.0 2	0.02	0.6	0.1	3.33
2012	5.35	47.09	75.22	60.07	0.14	0.03	0.2 6	0.0 3	6.42	27.9 6	2.92	40.3
2013	7.62	81.47	14.35	91.58	0.29	0.1	0.0 7	4.7 8	8.19	0.07	2.5	1.65
2014	16.59	27.87	69.23	4.72	48.4 3	0.08	0.0 8	0.0 3	0.42	4.05	8.83	11.5 5
2015	84.13	129.7 6	69.45	20.2	0.02	0.02	0.0 2	0.0 2	0.02	0.73	0.13	4.57
2016	84.33	120.6 6	11.15	128.5 6	0.05	0.02	0.0 8	0.1 9	0.36	6.65	6.37	0.25
2017	5.61	104.6 1	73.46	33.97	1.18	0.06	0.0 3	0.3 2	0.03	19.7 9	0.21	4.16
2018	143.6	192.2	41.05	49.53	5.04	0.69	1.4 6	2.1 6	0.85	0.19	42.3 2	86.2 2
2019	89.1	128.3 8	75.93	35.43	0.02	0.02	0.0 4	0.0 3	0.02	0.78	0.08	4.1
2020	86.55	110.6 3	52.2	14.58	0.01	0.02	0.0 1	0.0 1	0.03	0.71	0.14	3.15
2021	78.69	130.8 7	57.94	23.96	0.01	0.02	0.0 1	0.0 4	0.02	0.62	0.21	3.35
2022	86.22	110.1 6	56.17	22.17	0.03	0.02	0.0 2	0.0 2	0.01	0.66	0.08	5.63
N° Datos	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
Máximo	246.9 9	252.2 2	224.8 3	128.5 6	48.4 3	32.0 4	3.9 4	9.8 6	20.6 9	46.8 9	42.3 2	97.7 1
Mínimo	0.04	6.75	0.04	0.01	0.01	0.01	0.0 1	0.0 1	0.01	0.01	0.01	0.25

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

A continuación, se muestra la generación de caudales medios mensuales para la unidad hidrográfica de Sicuayoq

Tabla 24

Generación de caudales (m³/seg) en la Unidad Hidrográfica

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
1972	0.08	0.1412	0.1174	0.0992	0.0318	0.015	0.0115	0.0167	0.0212	0.0246	0.0707	0.0707	0.058333333
1973	0.0851	0.3093	0.1274	0.0468	0.0258	0.0155	0.0199	0.0157	0.0141	0.0392	0.0239	0.0239	0.062216667
1974	0.1624	0.1288	0.1617	0.0501	0.0394	0.0178	0.0129	0.0116	0.0178	0.0983	0.0922	0.0922	0.073766667
1975	0.2416	0.294	0.3788	0.1097	0.0311	0.0163	0.015	0.0146	0.0151	0.0216	0.0199	0.0199	0.098133333
1976	0.277	0.1738	0.2557	0.0703	0.0229	0.0156	0.0164	0.0179	0.0147	0.0544	0.0895	0.0895	0.091475
1977	0.1756	0.2288	0.155	0.054	0.0215	0.0142	0.0131	0.0138	0.0152	0.0462	0.0358	0.0358	0.067416667

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
1978	0.1997	0.2235	0.1765	0.0505	0.0265	0.0145	0.0136	0.015	0.0487	0.0332	0.0443	0.0443	0.074191667
1979	0.2121	0.3922	0.196	0.0717	0.0241	0.0148	0.0124	0.0123	0.0136	0.0203	0.0187	0.0187	0.083908333
1980	0.4518	0.3316	0.2502	0.0736	0.0229	0.014	0.0091	0.0115	0.0278	0.0362	0.0239	0.0239	0.106375
1981	0.2843	0.3907	0.229	0.0699	0.0209	0.0144	0.0136	0.0189	0.0283	0.021	0.0348	0.0348	0.096716667
1982	0.3736	0.461	0.1924	0.0734	0.0227	0.022	0.0126	0.0466	0.023	0.0145	0.0256	0.0256	0.10775
1983	0.1926	0.2413	0.2342	0.0689	0.0349	0.0254	0.0081	0.0142	0.023	0.0265	0.043	0.043	0.079591667
1984	0.1062	0.1931	0.2211	0.0581	0.0325	0.0266	0.0234	0.0204	0.0811	0.0287	0.0313	0.0313	0.07115
1985	0.0529	0.2106	0.1662	0.0623	0.0246	0.0126	0.0134	0.0123	0.0258	0.0211	0.1199	0.1199	0.070133333
1986	0.2232	0.1475	0.0835	0.0352	0.0125	0.0116	0.0126	0.0131	0.0151	0.0757	0.0593	0.0593	0.062383333
1987	0.0445	0.0787	0.0716	0.0388	0.0283	0.0149	0.0133	0.026	0.0199	0.0146	0.0296	0.0296	0.03415
1988	0.0397	0.1284	0.1382	0.0354	0.0402	0.0182	0.0116	0.0091	0.0096	0.0358	0.0207	0.0207	0.0423
1989	0.016	0.0346	0.0177	0.0749	0.0226	0.015	0.0125	0.0222	0.0603	0.0408	0.0525	0.0525	0.035133333
1990	0.0655	0.0446	0.1096	0.0389	0.0217	0.0206	0.0161	0.0185	0.0127	0.0465	0.0427	0.0427	0.040008333
1991	0.0653	0.1282	0.1029	0.0347	0.0194	0.0084	0.0236	0.0173	0.026	0.0193	0.0687	0.0687	0.048541667
1992	0.1406	0.1417	0.1302	0.064	0.031	0.0164	0.0107	0.009	0.0435	0.0264	0.0278	0.0278	0.055758333
1993	0.2478	0.2793	0.113	0.0495	0.0193	0.0144	0.0102	0.018	0.0432	0.0442	0.0266	0.0266	0.074341667
1994	0.197	0.0685	0.1061	0.0321	0.0259	0.0197	0.0108	0.0133	0.0151	0.0133	0.0228	0.0228	0.045616667
1995	0.1531	0.0633	0.0223	0.038	0.0097	0.0098	0.0108	0.0091	0.038	0.0627	0.0617	0.0617	0.045016667
1996	0.2905	0.1603	0.1556	0.1013	0.0333	0.0182	0.0117	0.014	0.022	0.0239	0.0209	0.0209	0.072716667
1997	0.3513	0.1969	0.2412	0.0718	0.0233	0.0154	0.0137	0.0094	0.0111	0.0157	0.0168	0.0168	0.08195
1998	0.1477	0.074	0.0582	0.0296	0.0317	0.0548	0.0257	0.0295	0.0364	0.069	0.1082	0.1082	0.064416667
1999	0.1735	0.1045	0.1844	0.0654	0.0476	0.0287	0.0139	0.01	0.0219	0.0275	0.0439	0.0439	0.063766667
2000	0.0808	0.1546	0.0809	0.0332	0.0155	0.0262	0.0112	0.0416	0.03	0.04	0.0384	0.0384	0.049233333
2001	0.1813	0.1425	0.173	0.0725	0.0373	0.0217	0.0196	0.0313	0.0304	0.077	0.1223	0.1609	0.08915
2002	0.1512	0.1974	0.1345	0.0596	0.0211	0.0116	0.0112	0.0135	0.0156	0.0238	0.0619	0.0863	0.065641667
2003	0.14	0.1259	0.2277	0.0713	0.026	0.0194	0.0201	0.0153	0.0146	0.0196	0.0575	0.0547	0.066008333
2004	0.1954	0.2357	0.1487	0.0694	0.0255	0.0164	0.0141	0.024	0.0213	0.0236	0.0344	0.0298	0.069858333
2005	0.2773	0.2183	0.1286	0.0498	0.0247	0.0127	0.0148	0.0346	0.0268	0.0246	0.0696	0.0453	0.077258333
2006	0.223	0.1251	0.0963	0.0549	0.0182	0.0132	0.0094	0.0103	0.0113	0.0259	0.0375	0.0567	0.056816667
2007	0.1236	0.2228	0.1694	0.0673	0.0206	0.014	0.0149	0.0081	0.0696	0.0341	0.0273	0.0697	0.070116667
2008	0.1626	0.2811	0.1536	0.0501	0.0215	0.0183	0.0196	0.0152	0.0228	0.1046	0.0466	0.0869	0.081908333
2009	0.2917	0.1677	0.1882	0.0604	0.0633	0.0241	0.0192	0.0257	0.0262	0.0306	0.043	0.0928	0.086075
2010	0.0849	0.1813	0.1868	0.0684	0.034	0.0163	0.0214	0.0206	0.0397	0.0383	0.0412	0.1089	0.07015
2011	0.1335	0.2097	0.1987	0.0851	0.0336	0.0209	0.0113	0.0291	0.0372	0.0293	0.027	0.0819	0.074775
2012	0.1155	0.17	0.0999	0.0677	0.0318	0.0225	0.035	0.0243	0.0351	0.0335	0.059	0.1211	0.06795
2013	0.1387	0.0502	0.0281	0.0223	0.0222	0.0184	0.0217	0.0207	0.0185	0.0213	0.0218	0.0203	0.033683333
2014	0.2356	0.1381	0.1628	0.0508	0.0199	0.0181	0.0118	0.0122	0.0159	0.0293	0.0969	0.0609	0.071025
2015	0.1052	0.1038	0.1598	0.0604	0.0272	0.0138	0.0202	0.0138	0.0162	0.0329	0.1023	0.1948	0.070866667
2016	0.196	0.1557	0.0999	0.0513	0.0262	0.015	0.0117	0.0107	0.0169	0.0329	0.1021	0.1938	0.076016667
2017	0.1503	0.2462	0.1653	0.075	0.0284	0.0136	0.013	0.0104	0.0144	0.0237	0.1086	0.1026	0.079291667
2018	0.2822	0.2588	0.0997	0.0426	0.017	0.0141	0.0156	0.0112	0.0109	0.0166	0.0163	0.1362	0.076766667
2019	0.2098	0.1886	0.2114	0.0709	0.0228	0.0146	0.0149	0.033	0.0345	0.082	0.0658	0.068	0.084691667
2020	0.193	0.1843	0.1944	0.0672	0.0221	0.0147	0.015	0.0331	0.0341	0.0824	0.0649	0.0605	0.080475
2021	0.189	0.1741	0.2286	0.0699	0.0227	0.0147	0.0152	0.0338	0.0369	0.082	0.0666	0.0654	0.083241667
2022	0.1957	0.1855	0.2068	0.0678	0.0229	0.0147	0.0149	0.0366	0.0337	0.0816	0.0653	0.0675	0.08275

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
N° Datos	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
Máximo	0.4518	0.461	0.3788	0.1097	0.0633	0.0548	0.035	0.0466	0.0811	0.1046	0.1223	0.1948	0.10775
Mínimo	0.016	0.0346	0.0177	0.0223	0.0097	0.0084	0.0081	0.0081	0.0096	0.0133	0.0163	0.0168	0.033683333

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

Análisis de la Eficiencia Hídrica

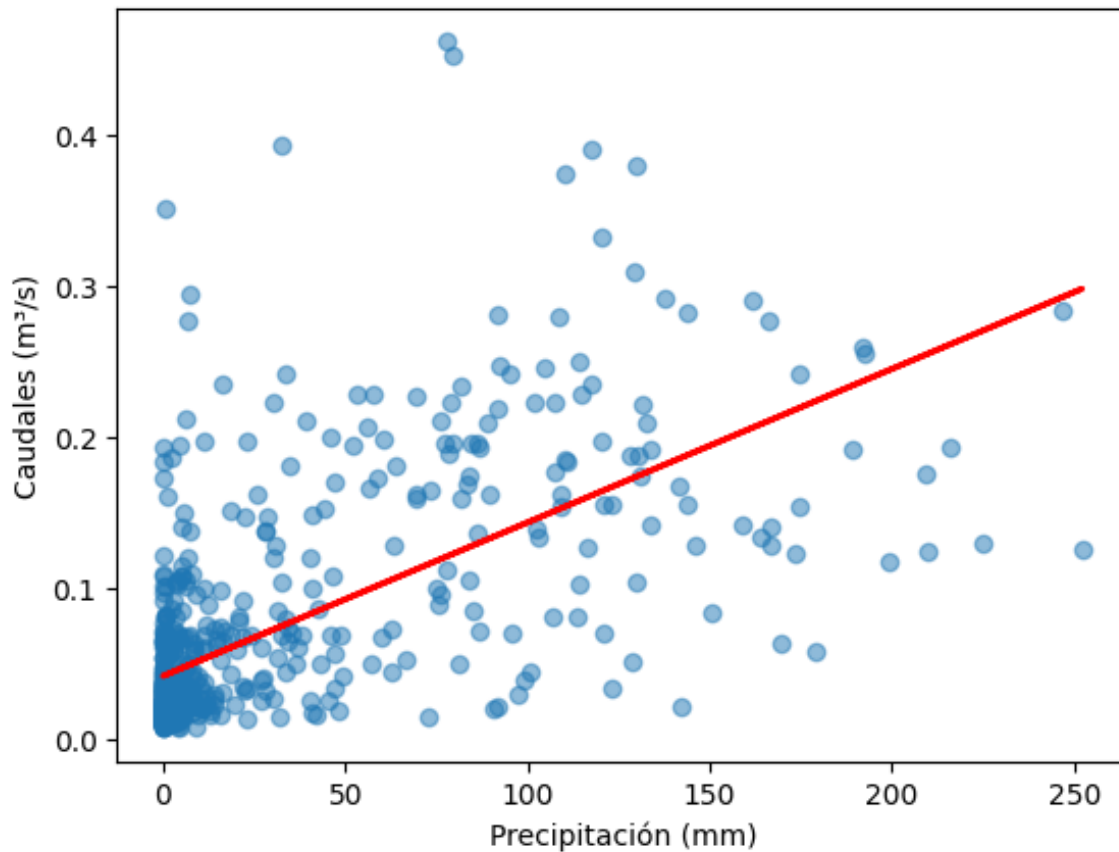
Para evaluar cómo se transforma la precipitación efectiva en caudales útiles a lo largo del tiempo, se aplicó un análisis de correlación y regresión lineal utilizando datos históricos mensuales desde 1972 hasta 2022 (Ver Anexo 5).

Para esto primero se halla el valor de la correlación utilizando las tablas 21 y 22, obteniendo un valor de Correlación de (0.6324310130150633), este valor indica una correlación positiva moderada entre la precipitación y los caudales. Una correlación de 0.63 sugiere que, en general, a medida que aumenta la precipitación, también lo hace la cantidad de caudales, aunque la relación no es perfectamente lineal ni determinística. Luego se halla el Coeficiente de determinación R^2 el cual explica qué porcentaje de la variabilidad en los caudales puede ser explicado por las variaciones en la precipitación. Al hallar R^2 se obtuvo un valor de (0.39996898622325916), esto indica que un R^2 de aproximadamente 0.40 significa que alrededor del 40% de la variabilidad en los caudales es explicada por la precipitación implicando que, aunque hay una relación significativa, hay otros factores no contemplados en el modelo que también afectan los caudales.

A continuación, se muestra la representación gráfica de la relación entre la cantidad de precipitación (en mm) y la generación de caudales (en m³/s) a partir de los datos analizados de las Tablas 21 y 22.

Figura 15

Precipitación vs Caudales



Donde:

- Cada punto azul representa una observación mensual del conjunto de datos de las Tablas 21 y 22, mostrando cuántos m^3/s de caudal se generaron para una cantidad específica de mm de precipitación en ese mes particular.
- La dispersión de los puntos indica la variabilidad de los caudales generados para niveles similares de precipitación. Por ejemplo, múltiples puntos verticales a lo largo de un mismo valor de precipitación muestran diferentes resultados de caudales para la misma cantidad de precipitación.
- La línea roja es la línea de regresión lineal ajustada a los datos. Representa la tendencia general en los datos, mostrando cómo cambian los caudales en promedio con cambios en la precipitación.
- La pendiente positiva de la línea indica que hay una relación positiva entre la precipitación y los caudales; es decir, a medida que aumenta la precipitación,

también tienden a aumentar los caudales, lo cual es coherente con lo que esperaríamos en la naturaleza.

Analizando la Figura 15 respecto a la concentración de puntos y datos anómalos se infiere que:

- La concentración de puntos hacia el extremo inferior izquierdo sugiere que la mayoría de los datos consisten en meses con baja precipitación y bajos caudales. Esto es típico en la región de Ayacucho en temporadas donde la lluvia es escasa.
- Los puntos que se desvían de la línea de regresión podrían ser meses donde otros factores (como el deshielo, eventos climáticos extremos, o cambios en el uso del suelo) podrían haber influenciado la generación de caudales más allá de lo que la precipitación sola puede explicar.

A partir de los datos hallados se realiza un Modelo de regresión OLS (Ordinary Least Squares) con Statsmodels que permitirá predecir los caudales basados en la precipitación. Este modelo no solo facilita la comprensión de la relación lineal entre estas dos variables importantes en la gestión de recursos hídricos, sino que también ofrece una base cuantitativa para planificar y tomar decisiones en contextos ambientales y de ingeniería. Al analizar la fuerza y la significancia de esta relación mediante estadísticas como el R^2 y el valor p , los responsables pueden evaluar cuánto de la variabilidad en los caudales se puede explicar exclusivamente por las variaciones en la precipitación.

Además, este análisis proporciona herramientas útiles para identificar deficiencias en el modelo actual, como la presencia de residuos no normales y la variabilidad en las predicciones para diferentes rangos de precipitación. Esto puede señalar la necesidad de incorporar variables adicionales que podrían estar influyendo en los caudales, tales como cambios estacionales, características geográficas del área de estudio, o incluso factores antropogénicos como la urbanización y cambios en el uso del suelo.

A continuación, se muestra el código del modelo de regresión OLS y los resultados correspondientes:

Figura 16*Modelo de regresión OLS*

```
import statsmodels.api as sm

X = df['Precipitación']
X = sm.add_constant(X)
y = df['Caudales']

# Modelo de regresión OLS con Statsmodels
model = sm.OLS(y, X)
results = model.fit()

print(results.summary())
print(results.conf_int())
```

Dando como resultado la Figura 17.

Figura 17

Resultados de la regresión OLS

OLS Regression Results

Dep. Variable:	Caudales	R-squared:	0.400
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.399
Method:	Least Squares	F-statistic:	406.6
Date:	Wed, 08 May 2024	Prob (F-statistic):	1.12e-69
Time:	08:15:28	Log-Likelihood:	860.43
No. Observations:	612	AIC:	-1717.
DF Residuals:	610	BIC:	-1708.
DF Model:	1		
Covariance Type:	nonrobust		

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	0.0423	0.003	15.287	0.000	0.037	0.048
Precipitación	0.0010	5.03e-05	20.165	0.000	0.001	0.001

Omnibus:	264.895	Durbin-Watson:	1.546
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):	1565.874
Skew:	1.840	Prob(JB):	0.00
Kurtosis:	9.918	Cond. No.	63.4

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

	0	1
const	0.036867	0.047736
Precipitación	0.000915	0.001113

Donde:

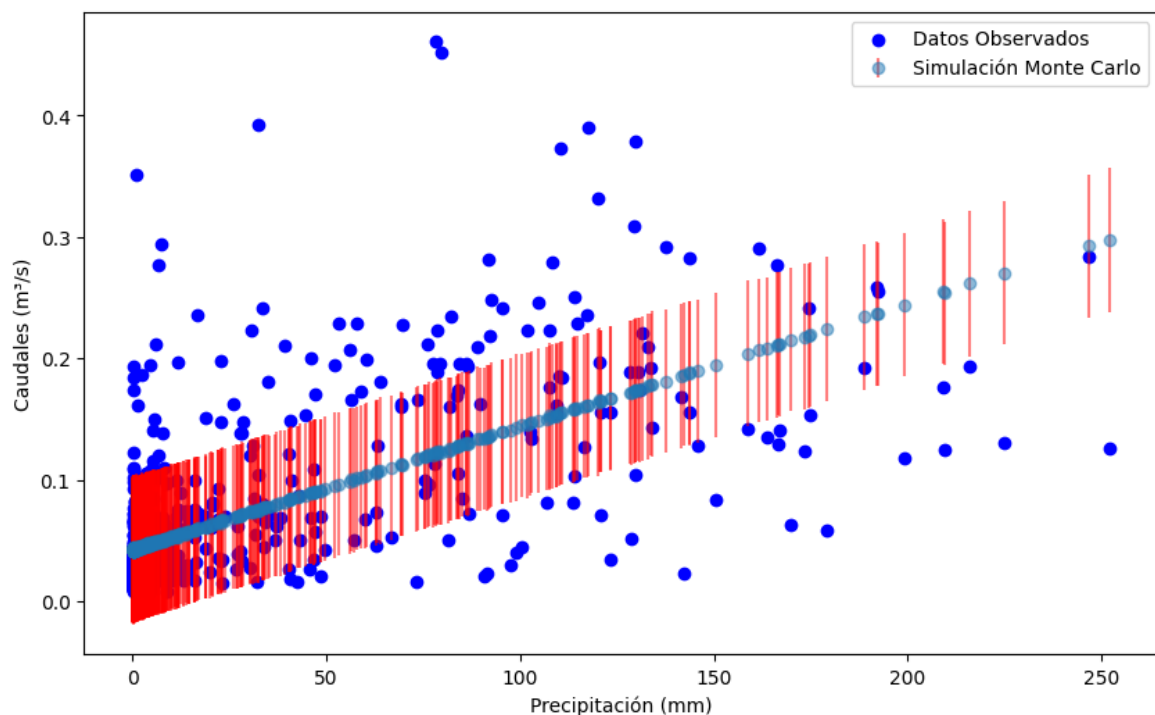
- **Dep. Variable (Variable Dependiente): Caudales.** Esto indica que el modelo está tratando de predecir los valores de caudales.
- **R-squared (R^2): 0.400.** Este valor indica que el 40% de la variabilidad en los caudales es explicada por la variabilidad en la precipitación. Es una medida de qué tan bien las predicciones del modelo se ajustan a los datos reales.
- **Adj. R-squared (R^2 ajustado): 0.399.** Similar al R^2 pero ajustado por el número de predictores en el modelo (en este caso, solo la precipitación). Es una medida ajustada que penaliza por la inclusión de predictores adicionales que no mejoran el modelo.
- **F-statistic: 406.6.** Esta es una prueba que verifica si al menos uno de los coeficientes en el modelo es significativamente diferente de cero. En términos simples, verifica la utilidad global del modelo.
- **Prob (F-statistic): 1.12e-69.** Este es el p-valor de la F-estadística. Un valor muy bajo (prácticamente cero) indica que el modelo es estadísticamente significativo.
- **Log-Likelihood: 860.43.** Una medida de la verosimilitud del modelo; los valores más altos indican un mejor ajuste.

- **AIC (Criterio de Información de Akaike) y BIC (Criterio de Información Bayesiano): -1717 y -1708, respectivamente.** Estas son medidas que penalizan modelos más complejos (con más variables) y son útiles para comparar modelos. Los valores más bajos indican un mejor modelo.
- **Df Residuals: 610.** Número de grados de libertad de los residuos, calculado como el número total de observaciones menos el número de parámetros estimados.
- **Df Model: 1.** Número de parámetros en el modelo, excluyendo el término constante.

Una vez definido estos parámetros se procede a realizar una simulación de Monte Carlo aplicada al modelo de predicción de caudales basado en la precipitación (Ver Figura 18), que muestra una tendencia positiva: a medida que aumenta la precipitación, a su vez también lo hace el caudal estimado, lo que es consistente con la comprensión general de que más lluvia suele resultar en mayores flujos de agua.

Figura 18

Datos observados en la Simulación de Monte Carlo



Donde:

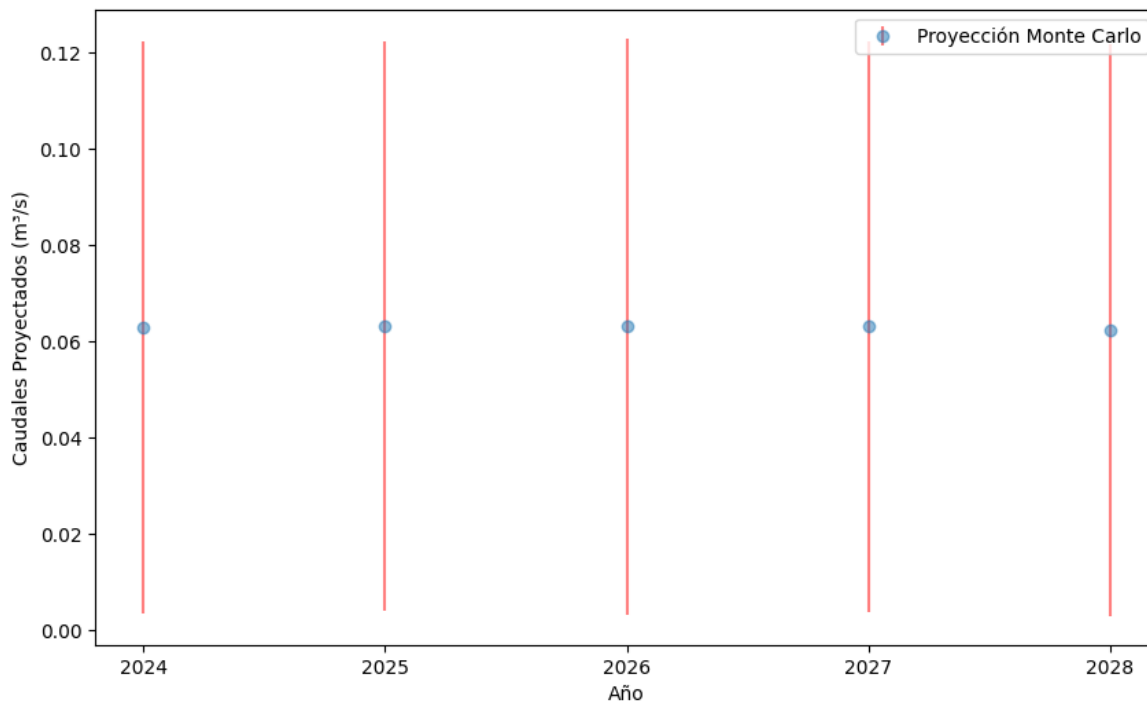
- Los puntos de simulación de Monte Carlo que se alinean bien con los datos observados indican que el modelo es efectivo en capturar la relación general entre precipitación y caudales.
- La dispersión de los puntos simulados y el ancho de las barras de error revelan la incertidumbre en las predicciones, particularmente a mayores niveles de precipitación. Esto sugiere que, aunque el modelo puede capturar la tendencia central de los datos, hay una considerable variabilidad en los caudales que podría no ser completamente explicada solo por las variaciones en la precipitación.

La Figura 18 muestra claramente una tendencia positiva: a medida que aumenta la precipitación, también lo hace el caudal estimado, lo que es consistente con la comprensión general de que más lluvia suele resultar en mayores flujos de agua. Esta visualización es muy útil para los planificadores y gestores de recursos hídricos, ya que proporciona una estimación visual de los posibles rangos de caudales para diferentes niveles de precipitación.

Una vez analizado la relación de datos observados con la simulación de Monte Carlo, se procede a estimar una proyección de eficiencia hídrica en relación a las precipitaciones y caudales de las Tablas 15 y 16.

Figura 19

Proyección de Caudales para los próximos 5 Años usando precipitación promedio de los últimos 5 años



Donde:

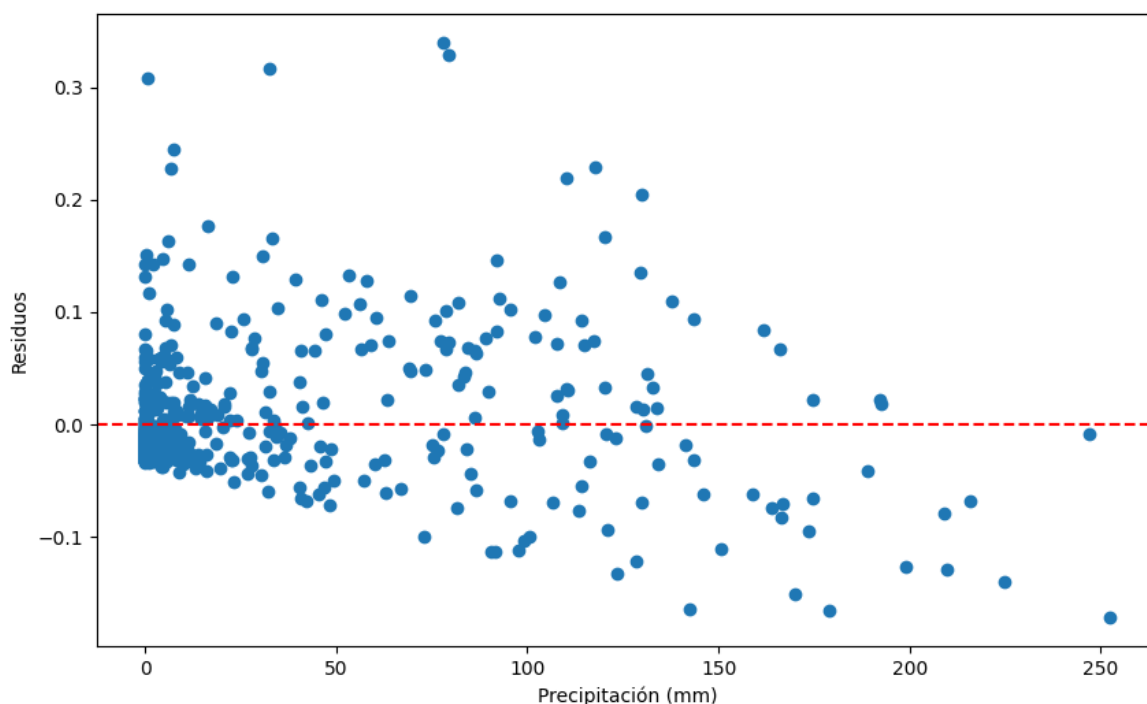
- Cada punto azul representa el valor medio de caudal proyectado para cada año, desde 2024 hasta 2028. Estos valores medios son calculados a partir de las simulaciones de Monte Carlo, que incorporan la variabilidad observada en los datos históricos y utilizan la precipitación promedio de los últimos cinco años como base para las proyecciones futuras.
- Las barras verticales rojas indican los intervalos de confianza de las proyecciones de caudales. Estas barras reflejan la incertidumbre en las estimaciones y están calculadas a partir de la desviación estándar de los resultados de las simulaciones de Monte Carlo. El rango de las barras muestra dónde esperamos que caigan los valores reales de caudales con una cierta probabilidad, considerando la variabilidad natural y la incertidumbre modelada.

Los datos proyectados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 25*Proyección de caudal medio en 5 años futuros*

Año	Caudal Medio Proyectado (m³/s)	Desviación Estándar (m³/s)
2024	0.0627	0.0593
2025	0.0625	0.0589
2026	0.0634	0.0594
2027	0.0628	0.059
2028	0.0628	0.0593

Continuando con el análisis de la Figura 18 y profundizando en el tema del análisis de residuos, se muestra la variabilidad y la precisión del modelo de regresión para los casos de estudio (Ver Figura 20).

Figura 20*Análisis de Residuos*

Al examinar los residuos, es decir, las diferencias entre los valores de caudales observados y los predichos por el modelo, observamos patrones adicionales. Los residuos

se distribuyen alrededor de una línea horizontal en $y = 0$, que representa la predicción perfecta. La concentración de residuos cerca de esta línea en condiciones de baja precipitación, especialmente en la parte inferior izquierda del gráfico, confirma que el modelo es más eficaz bajo estas condiciones, coherente con la naturaleza de los datos observados en Ayacucho durante períodos secos.

Sin embargo, la dispersión de los residuos aumenta con mayores niveles de precipitación. Esta variabilidad incrementada sugiere que el modelo se vuelve menos preciso y confiable en condiciones de alta precipitación. Esta tendencia puede ser el resultado de factores adicionales no contemplados en el modelo actual, tales como:

- **Capacidad de Infiltración del Suelo:** En períodos de alta precipitación, la capacidad de infiltración del suelo puede estar saturada, afectando la relación entre precipitación y caudales.
- **Cambios en la Topografía y Uso del Suelo:** Modificaciones en la superficie del terreno o en la cobertura vegetal pueden alterar significativamente cómo el agua fluye y se acumula, afectando los caudales generados durante eventos de lluvia intensa.
- **Eventos Climáticos Extremos y Deshielo:** Como se mencionó, eventos atípicos como tormentas severas o períodos de deshielo rápido pueden causar picos en los caudales que el modelo lineal simple no puede predecir correctamente.
- **Implicaciones para la Gestión Hídrica:** El análisis de residuos no solo ayuda a validar la precisión del modelo en diferentes condiciones, sino que también es crucial para la planificación de recursos hídricos. Identificar bajo qué condiciones el modelo falla o es menos preciso puede guiar la implementación de medidas correctivas o preventivas en la gestión del agua. Por ejemplo, en Ayacucho, sería prudente diseñar infraestructuras hídricas que puedan manejar variaciones significativas en los caudales, especialmente durante la temporada de lluvias, y considerar medidas de adaptación para mitigar el impacto de los cambios en el uso del suelo y la topografía.

3.1.13. Condiciones socioeconómicas

Agricultura

En la provincia de Lucanas, se encuentra una extensión agrícola de 34,732.15 hectáreas, lo que constituye solo el 6% de las tierras a nivel provincial. Esta área está compuesta por suelos destinados al riego, donde se cultivan tanto cultivos permanentes como cultivos transitorios, que incluyen cebada, trigo, maíz, haba, papa, alfalfa, entre otros. A pesar de la limitada extensión de tierras agrícolas, la actividad agropecuaria emplea al 50% de la población económicamente activa en la provincia. La producción se caracteriza por su enfoque tradicional y tecnología básica, con cultivos en pequeñas parcelas ubicadas en laderas de propiedad individual (minifundios). La producción está mayormente orientada al autoconsumo, con pequeños excedentes dirigidos al mercado local y regional. No se observa en la provincia una producción agrícola a gran escala o con tecnología avanzada, ni tampoco propiedades de tamaño medio o grande (latifundios).

Los principales desafíos que enfrenta la agricultura en la provincia incluyen la escasez de agua para riego debido a la limitada infraestructura, la baja fertilidad del suelo, la limitada adopción de tecnologías productivas, la degradación de semillas, la falta de capacitación agrícola, y un bajo nivel de asociativismo, entre otros. Aunque existen grandes reservas de agua en lagos y lagunas, se requiere la construcción de más represas y sistemas de riego para gestionar eficazmente este recurso. Como resultado, gran parte de la producción agrícola se concentra en cultivos estacionales durante la temporada de verano o época de lluvias.

Ganadería

La ganadería en el distrito de Chaviña constituye una actividad económica complementaria a la agricultura y representa otra fuente de ingresos para la población que se dedica a ella. La comercialización de productos pecuarios se dirige tanto al mercado interno como al exterior de la provincia. La falta de disponibilidad de agua para el riego de pastos y forrajes es un desafío importante para la actividad pecuaria, al igual que para la agricultura. Esto se debe a la limitada infraestructura de riego, la falta de capacitación de

los productores, la escasa asistencia técnica y los limitados recursos financieros disponibles. Estos factores contribuyen a una promoción limitada de la producción ganadera en la provincia.

Minería Artesanal

La provincia de Lucanas, especialmente los distritos de Ocaña, Llauta, Otoa, Sancos y Huac Huas, se caracterizan por la presencia de pequeñas minas de oro, donde miles de pobladores migrantes se dedican a la minería informal. Las modalidades de trabajo en estas minas varían, desde socavones hasta lavaderos en Kimbaletes, donde los mineros informales obtienen un promedio diario de 26.3 gramos de oro.

Una de las minas artesanales más importantes es Santa Filomena, ubicada en el distrito de Sancos, a la que se accede desde la localidad de Yauca en Arequipa. Esta mina emplea a más de 2,000 mineros informales. Otras minas de oro con una fuerte presencia de mineros informales incluyen Huanca en Santa Lucía, Saramarca, Lomo de Callo y Pate Grande en Ocaña, Jabonería en Llauta, Chavincha y Huarasaca en Otoa, y Pacolla en Huac Huas, entre otras.

3.1.14. Demanda Hídrica en la Comunidad de Para

Para considerar cómo las características específicas de un cultivo influyen en sus requerimientos hídricos, se introducen coeficientes de cultivo (Kc). Estos coeficientes vinculan la evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones ideales con su rendimiento óptimo. Los valores adecuados de Kc, que reflejan las características del cultivo, el tiempo de siembra, las etapas de desarrollo vegetativo y las condiciones climáticas, se muestran en el cuadro a continuación:

Tabla 26

Duración aproximada de las fases en el periodo vegetativo

Cultivo	Total	Fase Inicial	Fase de Desarrollo	Fase de Media Estación	Fase de Última Estación
Algodón	180-195	30-30	50-50	55-65	45-50
Avena	120-150	15-15	25-30	40-65	30-40

Cultivo	Total	Fase Inicial	Fase de Desarrollo	Fase de Media Estación	Fase de Última Estación
Berenjena	130-140	30-30	40-40	50-55	30-40
Maní	130-140	25-30	35-40	45-45	25-25
Calabaza	95-120	20-25	30-35	30-35	15-25
Cebada	120-150	15-15	25-30	50-65	30-40
Cebolla verde	70-95	20-25	20-25	40-45	5-10
Cebolla seca	150-210	15-20	25-35	10-110	5-10
Col	120-140	20-25	25-30	60-65	15-20
Espinaca	60-100	20-20	20-20	15-40	5-20
Girasol	125-130	20-25	35-45	40-45	30-35
Guisante	90-100	15-20	25-30	35-35	15-15
Vainita	75-90	15-20	25-30	25-30	42278
Judía seca	95-110	15-20	25-30	35-40	20-20
Judía seca	95-110	15-20	25-30	35-40	20-20
Lechuga	75-140	20-25	30-50	15-45	10-10
Lenteja	80-195	20-30	30-50	55-65	45-50
Lino	180-195	30-30	50-50	65-65	50-50
Maíz dulce	80-110	20-20	20-25	25-50	15-15
Maíz grano	125-160	20-25	30-40	40-65	35-40
Melón	105-140	20-25	30-35	30-50	20-30
Mijo	105-145	25-30	30-35	30-50	20-30
Papa	105-145	25-30	30-35	30-50	20-30
Pepino	105-130	20-25	25-30	30-50	15-20
Pequeñas semillas	150-165	20-25	25-30	40-65	20-40
Pimiento	120-210	25-30	35-40	60-110	40-50
Rábano	35-40	5-10	10-10	15-15	5-5
Remolacha azucarera	160-230	25-45	45-65	60-80	40-40
Soja	135-150	20-20	30-30	70-70	25-30
Sorgo	120-180	20-20	30-35	40-45	30-40
Tomate	135-180	20-25	30-35	40-45	30-40
Trigo	120-150	15-15	25-30	50-65	30-40
Zanahoria	100-150	20-25	30-35	30-70	20-20

Nota. Tomado del estudio realizado por C. Brouwer y M. Heibloem

A continuación, se muestra los coeficientes de cultivos desde la fase inicial hasta la fase final de cultivo.

Tabla 27

Coeficiente de cultivo (kc) de varios cultivos

Cultivo	Fase Inicial	Fase de Desarrollo	Fase de Media Estación	Fase de Última Estación
Algodón	0.45	0.75	1.15	0.75
Avena	0.35	0.75	1.15	0.45
Berenjena	0.45	0.75	1.15	0.85
Cacahuete	0.45	0.75	1.05	0.8
Calabaza	0.45	0.75	0.9	0.75
Cebada	0.35	0.75	0.9	0.75
Cebolla verde	0.5	0.7	1.15	0.45
Cebolla seca	0.5	0.75	1	1
Col	0.45	0.75	1.05	0.85
Espinaca	0.45	0.6	1	0.9
Girasol	0.35	0.75	1.15	0.55
Guisante	0.45	0.8	1.15	1.05
Judía verde	0.35	0.7	1.1	0.9
Judía seca	0.35	0.7	1.1	0.3
Lechuga	0.45	0.6	1	0.9
Lenteja	0.45	0.75	1.15	0.75
Lino	0.45	0.75	1.15	0.7
Maíz dulce	0.4	0.8	1.15	0.7
Maíz grano	0.4	0.8	1.15	0.7
Melón	0.45	0.75	1	0.75
Mijo	0.35	0.7	1.1	0.65
Papa	0.45	0.75	1.15	0.85
Pepino	0.45	0.75	0.9	0.75
Pequeñas semillas	0.35	0.75	1.1	0.65
Pimiento fresco	0.35	0.7	1.05	0.9
Rábano	0.45	0.6	1.05	0.9
Remolacha azucarera	0.45	0.8	1.15	0.8
Soja	0.35	0.75	1.1	0.6
Sorgo	0.35	0.75	1.1	0.6
Tabaco	0.35	0.75	1.1	0.8
Tomate	0.35	0.75	1.15	0.9
Trigo	0.35	0.75	1.15	0.45
Zanahoria	0.45	0.75	1.05	0.9

Nota. Tomado del estudio realizado por C. Brouwer y M. Heibloem

Las etapas del cultivo se pueden describir de la siguiente manera:

Etapas de germinación o fase inicial. Esta fase incluye la germinación, emergencia y primeros estados del cultivo, cuando la cobertura del suelo es mínima. Durante este periodo, predomina la evaporación sobre la transpiración. Esta etapa se extiende desde la

siembra, que generalmente comienza en septiembre y se prolonga hasta enero; la germinación en sí misma dura de 18 a 21 días durante la primera fase de crecimiento.

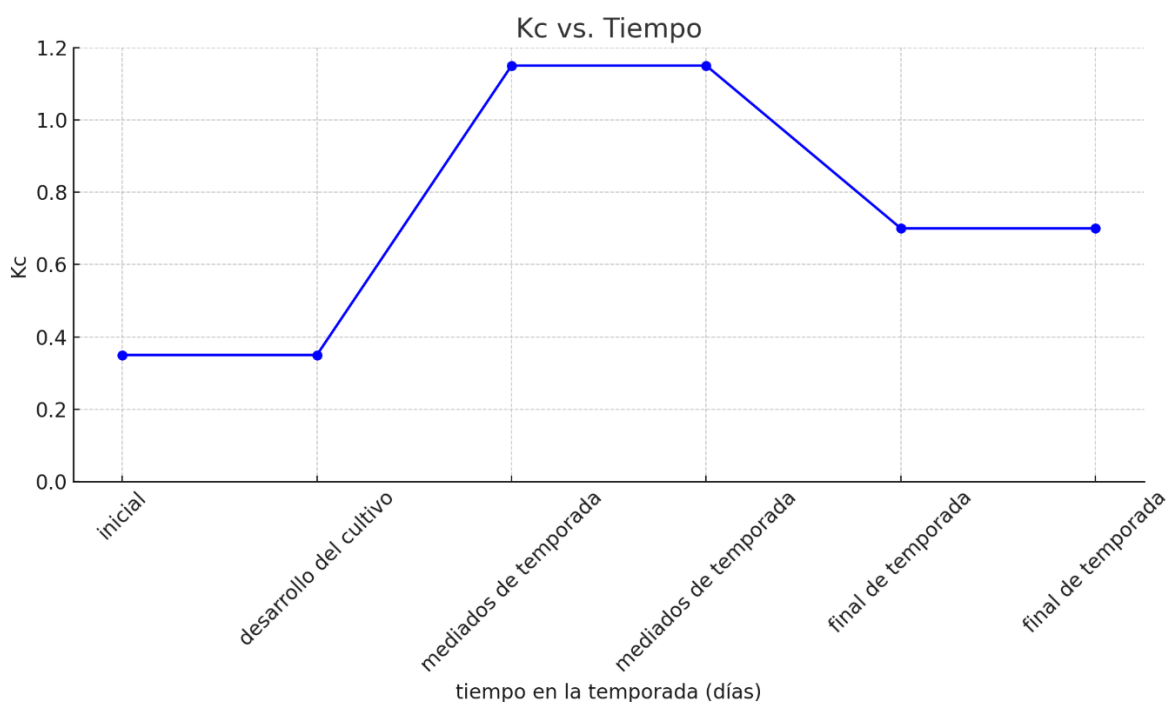
Etapa de crecimiento vegetativo o fase de desarrollo. Esta etapa comienza al finalizar la fase inicial y se extiende hasta la aparición de la cuarta a la séptima hoja trifoliar, así como el crecimiento de las yemas de la corona que forman una estructura de roseta. Este es el estado inicial después de cada poda y dura cerca de 60 días.

Fase intermedia o fase de media estación. Se distingue por el rápido alargamiento de los tallos y de los entrenudos, con una notable producción de materia seca. Esta fase tiene una duración aproximada de 120 días.

Fase final o de madurez. Esta etapa se caracteriza por la aparición de botones y yemas florales, que marcan el inicio de la formación de los órganos reproductores y la floración, que ocurre alrededor de los 150 días desde la siembra.

Figura 21

Curva del coeficiente del cultivo



La elección de los cultivos en cualquier región está considerablemente afectada por factores como el clima y las prácticas agrícolas predominantes en la zona. Estos elementos

definen las posibilidades agrícolas de un área y determinan qué cultivos pueden prosperar mejor bajo condiciones ambientales específicas. Por ejemplo, cultivos que requieren periodos prolongados de sequía o temperaturas específicas para desarrollarse óptimamente serán seleccionados en áreas donde estas condiciones climáticas son la norma.

Para optimizar el uso del agua en la agricultura en la comunidad de Para, se hace esencial comprender cómo las características propias de cada cultivo influyen en sus necesidades hídricas. Aquí es donde entran en juego los coeficientes de cultivo (K_c), una herramienta crucial en la gestión agrícola. Los K_c son valores numéricos que se utilizan para estimar la evapotranspiración de referencia de un cultivo, es decir, la cantidad de agua que un cultivo evapora o transpira bajo condiciones óptimas. Estos coeficientes son vitales para calcular la cantidad de agua necesaria para alcanzar rendimientos máximos sin desperdiciar recursos hídricos. Al crear las cédulas de cultivo para la situación bajo estudio, se han considerado los criterios siguientes:

Evapotranspiración de referencia

Para calcular la evapotranspiración de referencia (E_{To}), se utilizó la Ecuación de Penman-Monteith FAO-56, que es ampliamente reconocida por su precisión en estimar la E_{To} bajo una variedad de condiciones climáticas y geográficas. Este método combina factores meteorológicos claves que afectan la evapotranspiración, incluyendo temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, y radiación solar.

Tabla 28

Datos para calcular la evapotranspiración

Mes	Temperatura Media (°C)	Humedad Relativa Media (%)	Velocidad del Viento (m/s)	Horas de Sol Diarias	Altitud (m)
Enero	7.24	75.3	3.51	4.69	3733
Febrero	8.28	78.41	3.43	4.68	3733
Marzo	7.88	79.71	3.15	4.75	3733
Abril	8.07	73.93	3.14	6.06	3733
Mayo	7.12	67.65	3.23	7.07	3733

Junio	6.66	60.22	3.32	7	3733
Julio	5.87	61.9	3.18	7.14	3733
Agosto	7.02	63.46	3.51	7.46	3733
Septiembre	8.52	64.86	3.52	6.92	3733
Octubre	8.11	64.82	3.33	6.44	3733
Noviembre	8.16	70.24	3.32	6.38	3733
Diciembre	7	70.24	3.37	4.77	3733

Notas:

- **Temperatura Media:** Valores tomados de la Tabla 13 específica para Lucanas.
- **Humedad Relativa Media:** Valores extraídos de la Tabla 14 para Lucanas.
- **Velocidad del Viento:** Datos proporcionados por la Tabla 16, también para Lucanas.
- **Horas de Sol Diarias:** Provenientes de la Tabla 18, que listan las horas de sol promedio diarias.
- **Altitud:** Valor constante tomado de la Tabla 12, especificado para Lucanas.

Para el cálculo de la (ETo) faltaria encontrar los valores de la Radiación Solar (R_s), para ello se utilizo los datos de la tabla 18, con el cual la radiación solar (R_s) puede estimarse a partir de las horas de sol usando una relación empírica que considera la radiación solar máxima posible (R_a) para la latitud y el mes específicos. La formula para convertir horas de sol en radiación solar es aproximadamente:

$$R_s = \left(\frac{\text{Horas del Sol}}{\text{Horas de luz del días}} \right) \times R_a$$

Dado que la longitud del día varía según la estación y la latitud. Se usa un método simplificado para estimar las horas de luz del día basado en la latitud de Lucanas ($14^{\circ}27'23''$) (Ver Tabla 12) y la declinación solar para cada mes. Se utilizo un valor medio para R_a basado en un promedio para la latitud cercana a Lucanas (aproximadamente 15 MJ/m²/día) y ajustaremos según las horas de luz del día que fluctúan estacionalmente.

Tabla 29

Radiación Solar Estimada

Mes	Horas de Sol Diarias	Horas de Luz del Día Estimadas	Rs Estimada (MJ/m ² /día)
Enero	4.69	12	5.87
Febrero	4.68	12	5.86
Marzo	4.75	12	5.94
Abril	6.06	12	7.58
Mayo	7.07	11	9.64
Junio	7	11	9.55
Julio	7.14	11	9.75
Agosto	7.46	12	9.33
Septiembre	6.92	12	8.65
Octubre	6.44	12	8.05
Noviembre	6.38	12	7.98
Diciembre	4.77	12	5.96

La Ecuación de Penman-Monteith FAO-56, reconocida por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) el cual proporciona una estimación precisa de la evapotranspiración de referencia (ET_o), que luego se ajusta para un cultivo específico utilizando coeficientes de cultivo (K_c), se representa de la siguiente forma:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor respecto a la temperatura (kPa/°C)

R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²/día)

G : Flujo de calor del suelo (MJ/m²/día) (generalmente pequeño y asumido como cero en cálculos diarios)

Γ : Constante psicrométrica (kPa/°C)

T : Temperatura media diaria del aire a 2 metros de altura (°C)

u₂ : Velocidad del viento a 2 metros de altura (m/s)

e_s : Presión de saturación de vapor (kPa) a la temperatura del aire

e_a : Presión de vapor actual (kPa)

$e_s - e_a$: Déficit de presión de vapor (kPa)

Reemplazando los datos obtenidos y calculados en la E_{To} (Ver Anexo 7).

Obtenemos los siguientes valores:

Tabla 30

Evapotranspiración de Referencia (E_{To}) en Lucanas – Comunidad de Para

Mes	E_{To} (mm/mes)
Enero	39.99
Febrero	33.32
Marzo	32.55
Abril	41.10
Mayo	50.22
Junio	58.50
Julio	53.94
Agosto	58.28
Septiembre	60.00
Octubre	58.90
Noviembre	48.30
Diciembre	46.50

Una vez obtenidos los datos de la Evapotranspiración de referencia E_{To} , calculamos la E_{Tc} para los Cultivos de la Tabla 25, para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$E_{Tc} = E_{To} \times K_c$$

Tabla 31

Cálculo de la E_{Tc} para los Cultivos

Cultivo	Kc Fase de Media Estación	E_{To} Media (mm/día)	Kc x E_{To} (mm/día)
Algodón	1.15	46.67	53.67
Avena	1.15	46.67	53.67
Berenjena	1.15	46.67	53.67
Cacahuete	1.05	46.67	49
Calabaza	0.9	46.67	42
Cebada	0.9	46.67	42
Cebolla verde	1.15	46.67	53.67
Cebolla seca	1	46.67	46.67
Col	1.05	46.67	49

Cultivo	Kc Fase de Media Estación	ETo Media (mm/día)	Kc x ETo (mm/día)
Espinaca	1	46.67	46.67
Girasol	1.15	46.67	53.67
Guisante	1.15	46.67	53.67
Judía verde	1.1	46.67	51.33
Judía seca	1.1	46.67	51.33
Lechuga	1	46.67	46.67
Lenteja	1.15	46.67	53.67
Lino	1.15	46.67	53.67
Maíz dulce	1.15	46.67	53.67
Maíz grano	1.15	46.67	53.67
Melón	1	46.67	46.67
Mijo	1.1	46.67	51.33
Papa	1.15	46.67	53.67
Pepino	0.9	46.67	42
Pequeñas semillas	1.1	46.67	51.33
Pimiento fresco	1.05	46.67	49
Rábano	1.05	46.67	49
Remolacha azucarera	1.15	46.67	53.67
Soja	1.1	46.67	51.33
Sorgo	1.1	46.67	51.33
Tabaco	1.1	46.67	51.33
Tomate	1.15	46.67	53.67
Trigo	1.15	46.67	53.67
Zanahoria	1.05	46.67	49

Clasificación Climática

Para calcular la clasificación climática dentro de la comunidad de Para primero hallamos el excedente y el déficit de la subcuenca hacia el canal de riego Para (Ver Figura 22).

Figura 22

Cálculo en Python del excedente y déficit

```
ETo_datos = {
    'Lucanas - Para': [39.99, 33.32, 32.55, 41.1, 50.22, 58.5, 53.94, 58.28, 60,
                      58.9, 48.3, 46.5],
}

pmm_datos = {
    'Lucanas - Para': [110.3, 137, 131.5, 44.56, 7.95, 2.27, 1.43, 4.04, 7.12, 14.57, 15.1, 41.35],
}
```

```

deficit_excedente = {}
for canal, ETo in ETo_datos.items():
    pmm = pmm_datos[canal]
    deficit_excedente[canal] = {'Deficit': [], 'Excedente': []}
    for eto_mensual, pmm_mensual in zip(eto, pmm):
        if eto_mensual > pmm_mensual:
            deficit_excedente[canal]['Deficit'].append(eto_mensual - pmm_mensual)
            deficit_excedente[canal]['Excedente'].append(0)
        else:
            deficit_excedente[canal]['Excedente'].append(0)
            deficit_excedente[canal]['Deficit'].append(pmm_mensual - eto_mensual)

deficit_excedente

```

Los resultados de los cálculos son presentados en la Tabla 30.

Tabla 32

Déficit excedente climático

Mes	Déficit (mm)	Excedente (mm)
Enero	0	70.31
Febrero	0	103.68
Marzo	0	98.95
Abril	0	3.46
Mayo	42.27	0
Junio	56.23	0
Julio	52.51	0
Agosto	54.24	0
Septiembre	52.88	0
Octubre	44.33	0
Noviembre	33.2	0
Diciembre	5.15	0

Donde:

Déficit (mm): Indica la cantidad de agua que falta para satisfacer la evapotranspiración de referencia cuando la precipitación mensual no es suficiente.

Excedente (mm): Indica el exceso de agua disponible después de satisfacer la evapotranspiración de referencia.

Una vez calculado el déficit y excedente se procede a realizar un análisis climático según la clasificación de Thornthwaite (Ver Figura 23). Este análisis se centra en varios aspectos importantes del clima de la Comunidad de Para, incluyendo el índice de humedad,

los índices de exceso y déficit, la concentración térmica en verano, y la categorización de la provincia térmica.

Figura 23

Clasificación Climática según Thornthwaite Comunidad de Para

Clasificación Climática según Thornthwaite Comunidad de Para	
<p>Índice de humedad de Thornthwaite (Ih)</p> $I_h = I_E - 0.6I_D$ <p>$I_h =$ <input type="text" value="12.36"/> Semi - húmedo</p> <p>C2 0 a 20 Semi-húmedo</p>	<p>Provincias Térmicas según Índice de Evapotranspiración Potencial</p> <p>Etp anual en cm. <input type="text" value="58.16"/> Semi frío</p> <p>B'1 57.0 a 71.2 Semi frío</p>
<p>IE = el índice de exceso, que se calcula por la siguiente expresión:</p> $I_E = \frac{E}{ETP} \times 100$ <p>$I_E =$ <input type="text" value="47.524"/> Exceso grande en Invierno</p> <p>w'2 > 20 Exceso grande en invierno</p>	<p>C2 w'2 w2 a' B'1</p>
<p>ID = el índice de déficit y se calcula de la siguiente forma:</p> $I_D = \frac{D}{ETP} \times 100$ <p>$I_D =$ <input type="text" value="58.60"/> Déficit grande en Invierno</p> <p>w2 > 33.3 Déficit grande en invierno</p>	
<p>Concentración Térmica en Verano (Cv)</p> $C_v = \frac{ETP_{\text{verano}}}{ETP_{\text{anual}}} \times 100$ <p>$C_v =$ <input type="text" value="26.20"/> a'</p> <p>a' < a 48.0</p>	

Donde:

Índice de Humedad de Thornthwaite (Ih). Valor de Ih: 12.36, clasificado como "Semi-húmedo". Este valor indica que la región tiene una disponibilidad moderada de humedad. No es ni demasiado seca ni excesivamente húmeda, lo cual puede ser ideal para ciertos tipos de cultivos y vegetación que requieren un balance de humedad.

Índice de Exceso (IE). Valor de IE: 47.524, lo que indica un "Exceso grande en Invierno". Durante el invierno, la región experimenta una cantidad significativa de precipitación o humedad más allá de lo que se evapora, lo que puede llevar a condiciones de suelo saturado o incremento en flujos de ríos y arroyos, potencialmente elevando el riesgo de inundaciones.

Índice de Déficit (ID). Valor de ID: 58.60, indicando un "Déficit grande en Invierno". Contradictoriamente, también se señala un déficit considerable durante el mismo periodo (invierno), lo que podría sugerir variabilidad en los datos o en la distribución de la

precipitación y la evaporación a lo largo del año. Un déficit alto implica que hay menos agua disponible de lo necesario para satisfacer las necesidades de evapotranspiración de la vegetación.

Concentración Térmica en Verano (Cv). Valor de Cv: 26.20. Este valor está por debajo del umbral de 48.0, indicando que la región no alcanza altas concentraciones de calor durante el verano, lo cual podría significar veranos más frescos y posiblemente más agradables en términos de clima.

Provincias Térmicas según Índice de Evapotranspiración Potencial (Etp). Etp anual: 58.16 cm, clasificado como "Semi frío". La clasificación de "semi frío" sugiere que la Comunidad de Para tiene características climáticas que pueden ser beneficiosas para ciertos tipos de cultivos que prefieren condiciones menos extremas de calor, especialmente aquellos sensibles a altas temperaturas. Esto puede tener implicaciones importantes en términos de selección de cultivos, estrategias de riego, y planificación agrícola general para asegurar la sostenibilidad y la productividad agrícola en esta región.

Capítulo IV

Resultados

1.16. Análisis e Interpretación de los resultados

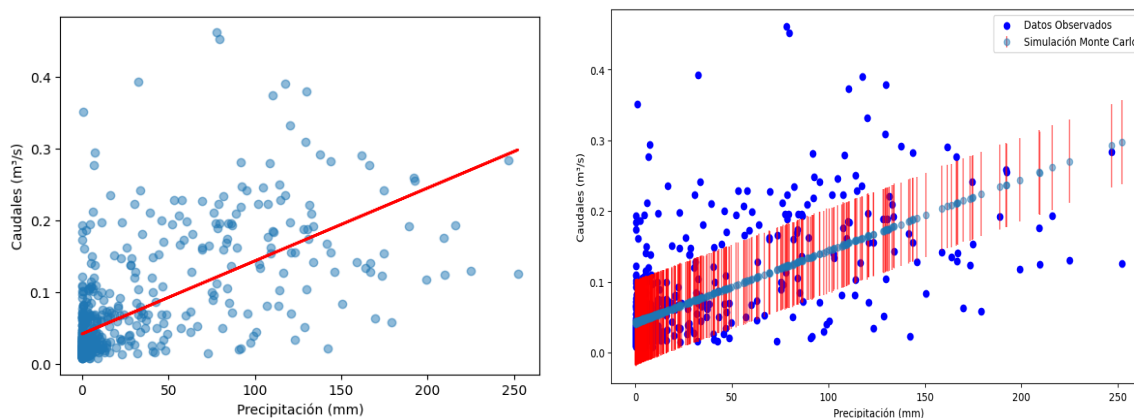
4.1.1. Análisis de la eficiencia hídrica del sistema de riego de Para

Para evaluar la eficiencia hídrica del sistema de riego en Para, se analizó cómo la precipitación efectiva se transforma en caudales útiles utilizando datos históricos desde 1972 hasta 2022. Este análisis es crucial para optimizar el uso del agua en contextos agrícolas, especialmente en regiones susceptibles a variabilidades climáticas y hidrológicas como la de Para. A continuación, se detalla cómo cada componente del análisis contribuye a entender y mejorar la eficiencia hídrica del sistema de riego:

Utilizando las Tablas 21 y 22, se encontró que la correlación entre la precipitación y los caudales es moderadamente positiva (0.6324), con un R^2 de 0.40. Esto indica que cerca del 40% de la variabilidad en los caudales puede ser explicada por la precipitación. Sin embargo, el hecho de que el 60% de la variabilidad no sea explicada por este modelo sugiere la existencia de otros factores significativos que también impactan los caudales, tales como el uso del suelo, prácticas de manejo agrícola y cambios topográficos.

Figura 24

Precipitación, caudal y residuos en Monte Carlo



La figura 24 visualiza la relación entre la precipitación y los caudales con el análisis de residuos en Monte Carlo, donde se observa una tendencia positiva en la generación de

caudales con el aumento de la precipitación. La dispersión de puntos indica variabilidad, resaltando la necesidad de un manejo adaptable y preciso del riego para maximizar la eficiencia hídrica. Es por ello que se realiza una proyección de datos futuros los cuales son mostrados en la Tabla 23, con un caudal medio proyectado de 0.0627 en 2024, un 0.0625 en 2025, un 0.0634 en 2026, un 0.0628 en 2027 y un 0.0628 en 2028, esto indica que se espera una relativa estabilidad en los caudales proyectados a lo largo de los próximos cinco años. Esta estabilidad sugiere que, a pesar de las variabilidades anuales y estacionales típicas en la precipitación y otros factores ambientales, el sistema de riego de Para podría no enfrentar fluctuaciones extremas en los caudales disponibles para riego. Esto es crucial para la planificación agrícola y la gestión del agua, ya que permite a los agricultores y gestores de recursos hídricos anticipar con mayor certeza las disponibilidades de agua futuras y planificar de manera eficiente las temporadas de siembra, la selección de cultivos y las estrategias de riego.

Esta proyección subraya la importancia de un monitoreo continuo de los factores climáticos y ambientales que podrían influir en estas estimaciones. La variabilidad en las condiciones climáticas puede tener un impacto directo en la precisión de las proyecciones de caudales y, por ende, en la gestión eficiente del agua para riego. Por ejemplo, cambios en los patrones de lluvia, aumento de eventos climáticos extremos o variaciones en las temperaturas pueden alterar significativamente los caudales disponibles. Es por esta razón que se ha llevado a cabo la clasificación climática de Para según Thornthwaite. Esta clasificación muestra que el clima de Para se categoriza como semi-húmedo y semi-frío. Entender esta clasificación es crucial porque afecta directamente las dinámicas de evaporación y transpiración en la región. La evaporación y la transpiración son componentes significativos del ciclo hidrológico que afectan la cantidad de agua disponible para los cultivos y la eficiencia de los sistemas de riego.

Por lo tanto, al clasificar el clima de la región, se pueden ajustar mejor las prácticas de manejo del agua a las condiciones específicas del clima local. Esto incluye la selección de cultivos más adecuados para las condiciones climáticas, la planificación de los

calendarios de riego más efectivos y la implementación de tecnologías de riego que minimicen la pérdida de agua por evaporación. Además, esta clasificación ayuda a anticipar los posibles cambios en la disponibilidad de agua debidos a las variaciones climáticas, permitiendo una gestión más proactiva y adaptativa del recurso hídrico.

1.17. Análisis de la Sostenibilidad agrícola

Los coeficientes de cultivo (K_c) de la Tabla 25 reflejan cómo cambian las necesidades de agua de un cultivo a lo largo de sus diferentes fases de crecimiento (inicial, desarrollo, media estación, y última estación). Cada fase tiene diferentes requerimientos de agua, influenciados por la extensión del sistema radicular del cultivo, la cobertura del suelo, y la tasa de crecimiento. Los valores de K_c se utilizan para multiplicar la E_{To} y obtener la E_{Tc} específica para cada cultivo y fase. Por ejemplo, un K_c alto durante la fase de media estación refleja una mayor demanda de agua debido al rápido crecimiento y mayor cobertura foliar. Esta multiplicación ajusta la evapotranspiración teórica (E_{To}) a la realidad específica del cultivo, lo que permite una programación de riego más precisa y efectiva.

Es por ello que para entender completamente cómo el conocimiento de la Evapotranspiración de Referencia (E_{To}), Evapotranspiración del Cultivo (E_{Tc}) y los coeficientes de cultivo (K_c) contribuyen a una gestión hídrica eficiente y sostenible se presenta el siguiente análisis:

- Supongamos que la E_{To} calculada para la Comunidad de Para durante el mes de mayo es de 5.0 mm/día, que es un valor típico en regiones semiáridas durante el periodo de crecimiento activo.
- Para el cultivo de maíz, por ejemplo, los K_c varían según la fase de crecimiento:
 - Fase inicial: 0.4
 - Fase de desarrollo: 0.8
 - Fase de media estación: 1.15
 - Fase final: 0.7
- El cálculo de E_{Tc} para Maíz en Fase de Media Estación sería el siguiente:

- Si la ET_o es 5.0 mm/día, y el K_c en la fase de media estación es 1.15,
- $ET_c = ET_o \times K_c = 5.0 \text{ mm/día} \times 1.15 = 5.75 \text{ mm/día}$
- Este valor representa la cantidad de agua que el maíz evapora y transpira en condiciones óptimas cada día durante su fase de crecimiento más activa.

Cuando se maneja un cultivo de maíz en una hectárea de terreno, la capacidad de calcular con precisión las necesidades hídricas es crucial para la eficiencia del riego y la salud del cultivo. Considerando que la evapotranspiración del cultivo (ET_c) del maíz durante su fase de crecimiento más activa es de 5.75 mm/día, esto se traduce en un requerimiento de agua diario de aproximadamente 57,500 litros por hectárea. Este cálculo se obtiene multiplicando la ET_c por el área del campo, en este caso, 10,000 m² (1 hectárea).

Este conocimiento del volumen exacto de agua necesario permite a los agricultores ajustar y optimizar sus sistemas de riego. Al aplicar la cantidad precisa de agua, se evitan problemas comunes como la sobre-irrigación, que puede causar la lixiviación de nutrientes esenciales del suelo, y la subirrigación, que puede inducir estrés hídrico en las plantas. Ambos extremos pueden tener efectos adversos significativos en el rendimiento y la calidad del cultivo de maíz. Al aplicar los coeficientes de cultivo adecuados de la Tabla 29, los agricultores pueden irrigar sus cultivos de manera más eficiente, proporcionando exactamente la cantidad de agua que los cultivos necesitan durante sus diferentes fases de crecimiento. Esto reduce el desperdicio de agua y aumenta la productividad de los cultivos, dado que utilizar K_c ajustados para cada etapa de crecimiento del cultivo ayuda a evitar la sobre irrigación, que puede llevar a la lixiviación de nutrientes, la erosión del suelo y la reducción de la calidad del agua subterránea.

En base a todo lo mencionado anteriormente y considerando que la clasificación climática de Para, según Thornthwaite, muestra que es una zona semi-húmedo y semi-frío. La sostenibilidad agrícola en Para se caracteriza por una gestión integrada y científicamente fundamentada de los recursos agrícolas y hídricos. La utilización eficiente del agua, adaptada a las necesidades específicas de los cultivos y ajustada a las condiciones climáticas locales, junto con la planificación basada en proyecciones a futuro

y una sólida formación de los agricultores, son aspectos que destacan en la estrategia de sostenibilidad de Para. Estos esfuerzos colectivos no solo mejoran la resiliencia de la agricultura local frente a desafíos ambientales y climáticos, sino que también aseguran la viabilidad económica y ambiental de la comunidad a largo plazo.

1.18. Estrategias sostenibles para optimizar el riego en Para

La Tabla 31, muestran las estrategias sostenibles considerando el análisis realizado en esta investigación.

Tabla 33

Estrategias propuestas para optimizar el riego en Para

Estrategias	Descripción
Implementación de Infraestructura de Medición Avanzada	Instalar estaciones meteorológicas avanzadas y sensores de humedad del suelo para obtener datos en tiempo real que permitan ajustes precisos y oportunos en el riego.
Modelado Hidrológico y Pronóstico	Utilizar modelos hidrológicos para prever la disponibilidad de agua basándose en patrones históricos de precipitación y caudales, ayudando a anticipar períodos de escasez o exceso de agua.
Optimización del Uso de Agua	Desarrollar planes de riego que consideren las necesidades específicas de agua de diferentes cultivos en varias etapas de crecimiento, usando datos de evapotranspiración y coeficientes de cultivo para aplicar la cantidad exacta de agua necesaria.
Capacitación en Gestión del Agua	Ofrecer programas de capacitación para agricultores y gestores de agua sobre técnicas avanzadas de gestión del riego y uso sostenible del agua, incluyendo la interpretación de datos meteorológicos y la operación de sistemas de riego tecnológicamente avanzados.
Sistemas de Riego Tecnológicamente Avanzados	Promover el uso de sistemas de riego tecnológicamente avanzados, como riego por goteo y aspersión controlada por computadora, que pueden ajustarse automáticamente según las necesidades hídricas calculadas y las condiciones climáticas actuales.
Auditorías de Riego y Mejora Continua	Realizar auditorías regulares de los sistemas de riego para evaluar su eficacia y eficiencia, identificando áreas de mejora y aplicando ajustes para optimizar el uso del agua.
Desarrollo de Políticas de Gestión de Agua	Colaborar con autoridades locales y regionales para desarrollar políticas que apoyen prácticas de riego sostenibles y la conservación del agua, incluyendo incentivos para la adopción de tecnologías de riego eficiente y la restauración de infraestructuras hídricas.

Conclusiones

El análisis de la unidad hidrográfica Hualo-Para reveló que su área total es de 21.243 km², con un coeficiente de compacidad de 1.163 y un factor de forma de 0.446, lo que indica la capacidad del terreno para manejar el escurrimiento del agua de manera efectiva. La infraestructura hidráulica, incluyendo la presa Chaquiccocha, permite una regulación eficaz del agua durante todo el año, asegurando así la disponibilidad y calidad del recurso hídrico necesario para la agricultura.

La interacción entre las condiciones socioeconómicas de la comunidad de Chaviña y el uso de los recursos hídricos demostró ser significativa en la eficiencia hídrica y la sostenibilidad agrícola, ya que los valores de K_c varían de acuerdo con las fases de crecimiento del cultivo. Adicionalmente, la clasificación climática de Para según Thornthwaite muestra que es una zona semi-húmeda y semi-fría. Esto es crucial porque afecta las dinámicas de evaporación y transpiración en la región, que son componentes significativos del ciclo hidrológico y afectan la cantidad de agua disponible para los cultivos y la eficiencia de los sistemas de riego.

Las estrategias propuestas abarcan la implementación de infraestructura de medición avanzada y sistemas de riego de última tecnología, permitiendo ajustes precisos y oportunos en la distribución del agua, maximizando así su eficiencia de uso. Se espera que estas innovaciones mejoren significativamente la gestión hídrica, apoyadas por modelos hidrológicos avanzados que permiten prever y adaptarse a variaciones en la disponibilidad del agua, ya sea por escasez o por excedentes, asegurando una respuesta adaptativa y eficiente ante las fluctuaciones climáticas y de demanda agrícola.

Recomendaciones

Se recomienda implementar estaciones meteorológicas y sensores de humedad del suelo para recoger datos climáticos y de suelo en tiempo real, ya que esta información es esencial para ajustar los sistemas de riego a las condiciones ambientales actuales, asegurando una aplicación eficiente del agua y minimizando el desperdicio.

Se recomienda utilizar modelos hidrológicos avanzados que integren datos de precipitaciones históricas y flujo de caudales, puesto que estos modelos permitirán prever periodos de déficit o exceso de agua, facilitando una gestión proactiva del recurso hídrico que puede mejorar la resiliencia del sistema agrícola frente a variaciones climáticas.

Se recomienda desarrollar e implementar planes de riego que se ajusten a la evapotranspiración real y a los coeficientes de cultivo específicos de las plantas en sus diferentes etapas de crecimiento, dado que ajustar el riego a estas variables puede reducir significativamente el consumo de agua y aumentar la eficiencia del uso del agua en la agricultura.

Se recomienda ofrecer capacitación continua a agricultores y gestores del agua sobre técnicas modernas de riego y gestión sostenible del agua. Esta formación debería incluir la interpretación de datos meteorológicos y la operación de sistemas de riego tecnológicamente avanzados para optimizar el uso del agua en la agricultura.

Referencias bibliográficas

- Abd , A. N., Faezeh , E., Albaji, M., y Eslamian, S. (2020). Handbook of Irrigation System Selection for Semi-Arid Regions. Londres: CRC Press
- ANA (2019). Proyecto mejoramiento del servicio de agua del sistema de riego de Para, en la comunidad campesina de Para, distrito de Chaviña, provincia Lucanas, región Ayacucho. Ana.gob.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4732>
- Azzedine Mohamed, T. A., Mohamed , E. B., Thierry , S. G., y Djamel , A. (2019). Cartographie du risque feu de forêt dans le Nord-est algérien : cas de la wilaya d'El Tarf. Environnement, Nature, Paysage, XX(8), 01-13. <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.32304>
- Baldeon, L. (2016). Modelamiento hidrológico de la sub cuenca del Rio Achamayo. Uncp.edu.pe. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4588>
- Bhupendra, K., Mohammad, Y., & Shah, M. (2022). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. Investigación ambiental, X(6), 01-16. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>
- Bringas-Burgos, B., Mendoza-Muñoz, I., Navarro-González, C., González-Ángeles, Á., & Jacobo-Galicia, G. (2020). Análisis de sistemas de riego por gravedad y goteo subsuperficial basada en una encuesta de muestra de conveniencia en el valle de Mexicali. Revista Vínculos ESPE, 13–32. <https://doi.org/10.24133/vinculosespe.v5i3.1725>
- BROUWER, C.; HEIBLOEM, M. Irrigation water management: irrigation water needs. Training manual, v. 3, 1986.66 p
- Burovsky, A. (2022). Китайская цивилизация. LitRes. <https://www.litres.ru/book/marsel-grane/kitayskaya-civilizaciya-21151207/>
- Castañeda Tambo, S. R., y Huaynacaqui Rimac, L. Y. (2022). Análisis y diseño del sistema de riego agrícola en el caserío de Chipre, distrito de Cochabamba, Ancash - 2022. Repositorio universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/109219>

- Chow, Ven Te; Maidment, David R. and Mays, Larry W (1998). Hidrología aplicada. Ed. McGraw-Hill. Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Delgado Mansilla, J. A. (2020). Análisis de la infraestructura hidráulica del sistema Chancay Lambayeque y su impacto en la ecoeficiencia y la huella hídrica de la producción agrícola. Repositorio PUCP Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/16141>
- Economic Commission for Europe. (2020). Обзоры результативности экологической деятельности: Казахстан. UN. https://www.google.com.pe/books/edition/Environmental_Performance_Review_Kazakhstan/1y3sDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=0
- Castillo (2022) Oferta de la demanda Hídrica. Corponariño. <https://www.corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhmirafloresp3.pdf>
- Fredricks, G., Thorstenson, S., Seymour, K., Mohamed, A., y McMoran, D. (2021). Overview of Irrigated Agriculture in Lewis County. Washington: Washington State University Extension
- Gamal, Y., Soltan, A., Said, L., y Madian, A. (2023). Smart Irrigation Systems: Overview. IEEE, I(1), 01-01. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3251655>
- Gomez, M. (2022). Propuesta de un plan de manejo para el recurso hídrico de la cuenca del Río Anisacate [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ciencias Agropecuarias]. <http://hdl.handle.net/11086/28701>
- Gregory, K.J. y Walling, D.E. (1973) Drainage Basin. Form and Process: A Geomorphological Approach. Edward Arnold, London.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). Metodología de la Investigación. México: Mc Graw Hill
- Kashyap, P. K., Kumar, S., Jaiswal, A., Prasad, M., y Gandomi, A. (2021). Towards Precision Agriculture: IoT-Enabled Intelligent Irrigation Systems Using Deep

- Learning Neural Network. *IEEE Sensors Journal*, XXI(16), 17479 - 17491.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3069266>
- Kilchenmann, J., Del Rio, J., y Martínez, A. (2019). Evaluación comparativa de la eficiencia técnica de los sistemas de riego de brinzales. *Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 45(1), 219–230.
<https://doi.org/10.31167/csecfv2i45.19516>
- Linsley, R. (1977). *Hidrología para Ingenieros*. Ed. McGraw. Ed. 2ª. México, D.F.
- Lvovitch, M. I. (1970). *World water balance (General Report)*. Symposium on the world water balance. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. No 93, Vol. II, pp. 401-415.
- Matiolli Grejo, L., & João Lunkes, R. (2022). Does Sustainability Maturity Contribute to Sustainable Goals? A look at Resource Efficiency. *Revista De Gestão Social E Ambiental*, XVI(3), 01-15. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v16n3-001>
- Martínez, A., Rodríguez, Z., y Fábrega Duque, J. (2021). Estimación y análisis de la demanda hídrica de la subcuenca del Río Estibaná como parte del balance hídrico (2018-2019). XVIII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología (APANAC 2021) Congreso Virtual, 23-25 de Junio, 2021, Panamá., I(1), 205-211.
<https://doi.org/10.33412/apanac.2021.318>
- Niggol. (2020). *The Economics of Globally Shared and Public Goods*. Elsevier Science.
<https://www.sciencedirect.com/topics/economics-econometrics-and-finance/public-goods>
- Oke, Traore, Nati-Bama, Igbadun, Ahmed, & Zwart. (2022). *Technologies d'irrigation à petite échelle et de gestion de l'eau pour la transformation agricole Africaine*. In French. International Water Management Institute (IWMI).
- Organización de Alimentación y Agricultura. (2022). *Печать Отправить Модернизация систем ирригации в Центральной Азии*. FAO

- Rakhimov, Seytov, & Kudaibergenov. (2020). ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ВОДЫ В МАГИСТРАЛЬНЫХ. Serie de revistas científicometódicas: Ciencias naturales-técnicas, XLII(4), 08-10.
- Remenieras, G. (1974). Tratado de hidrología aplicada. Editores Asociados, S.A. 2ª ed Barcelona España.
- Rodríguez Díaz, J. A., Moreno, M., y González Perea, R. (2020). Modelling and Management of Irrigation System. Basilea: Mdpi AG. <https://doi.org/10.3390/w12030697>
- Ruiz-del Ángel, E. O., Vargas-Castilleja, R. d., y Rolón-Aguilar, J. C. (2019). Análisis del requerimiento hídrico en un distrito de riego de Tamaulipas, México. Revista Ingeniería Agrícola, 3-13. <https://ojs.edicionescervantes.com/index.php/IAgric/article/view/1097/1738>
- Sánchez Ortega, N. L. (2021). Análisis de la planeación y gestión del uso del agua para riego, en el sector agrícola de Mexicali, Baja California: un desafío de gobernabilidad. Baja California: Repositorio universidad autonoma de Baja California. <https://hdl.handle.net/20.500.12930/7985>
- Skripkin, A. (2021). История отечественной археологии. Учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. liTRes.
- Supo, J. (2012). Seminarios de investigación científica: metodología de la investigación científica para las ciencias de la salud. Perú: Bioestadístico EIRL.
- Tamayo y Tamayo, M. (2003). La investigación: serie aprender a investigación. Santa Fe de Bogotá: ARFO EDITORES LTDA.
- Tetumo García, J. (1993). Apuntes de hidrología superficial. Tesis de ingeniería en irrigación. Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de Irrigación, Chapingo, México.
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical review, 38(1), 55-94.

- UNEP (2018). Plan Operativo Sectorial Agropecuario 2018. UNEP Law and Environment Assistance Platform. (2018). Unep.org.
<https://leap.unep.org/en/countries/do/national-legislation/plan-operativo-sectorial-agropecuario-2018>
- Vasquez Villanueva, A. (2000). Manejo de cuencas altoandinas (1a. ed.). LIMA: escuela superior de administración de aguas "Charles Sutton".
- Villanueva, G. (2023). Mercados de aguas residuales de actividades de saneamiento: oportunidad para diversificar la oferta de recurso hídrico y conservar la calidad de los ecosistemas. *Justicia Ambiental*, 3(3), 115–145.
<https://doi.org/10.35292/justiciaambiental.v3i3.726>
- Xuehua, C. (2019). 梯级泵站提水效率评估模型设计与应用探讨. *Shaanxi Water Conservancy*, XX(6), 01-15.
<http://www.cqvip.com/qk/97244x/201904/7001979831.html>

Anexo 1

Matriz de consistencia

Trabajo de investigación: Análisis de la eficiencia hídrica en el sistema de riego de la comunidad de Para, distrito de Chaviña, región de

Ayacucho basado en la sostenibilidad agrícola-2023

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodologías
General	General	General	Variable Independiente	
¿Cómo influye la eficiencia hídrica en la sostenibilidad agrícola del sistema de riego de Para, distrito de Chaviña, región de Ayacucho?	Analizar la eficiencia hídrica del sistema de riego de Para, distrito de Chaviña, para fortalecer la sostenibilidad agrícola.	El análisis de la eficiencia hídrica en el sistema de riego de Para, revelará áreas clave de ineficiencia y oportunidades de mejora, lo cual permitirá el desarrollo de estrategias efectivas para fortalecer la sostenibilidad agrícola en la región.	Gestión de la eficiencia hídrica Dimensiones: Hidrología y fisiografía Infraestructura hidráulica Condiciones socioeconómicas Gestión comunitaria del recurso hídrico	La presente investigación presenta un enfoque cuantitativo.
Específicos	Específicos	Específicos		
¿Cómo influyen la hidrología, la fisiografía y la infraestructura hidráulica existente en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico?	Evaluar la hidrología, fisiografía y la infraestructura hidráulica existente para establecer la base de la disponibilidad y calidad del recurso hídrico.	La evaluación de la hidrología, fisiografía y la infraestructura hidráulica en el sistema de riego de Para revelará patrones específicos de disponibilidad y calidad del agua, que son factores críticos para determinar la eficiencia actual del sistema de riego y su capacidad para sostener la agricultura a largo plazo.	Indicadores: Precipitación Caudales máximos y mínimos Eficiencia en la distribución del agua. Nivel de acceso al agua de riego. Recurso hídrico según la demanda agrícola.	Esta investigación se caracteriza por tener un alcance descriptivo y explicativo. Esta investigación presenta un diseño de investigación no experimental.
¿Cuál es el impacto de las condiciones socioeconómicas y la interacción de la comunidad con los recursos hídricos en la eficiencia hídrica y la sostenibilidad agrícola?	Analizar las condiciones socioeconómicas y la interacción de la comunidad con los recursos hídricos en la eficiencia hídrica y la sostenibilidad agrícola.	La interacción entre las condiciones socioeconómicas de la comunidad de Chaviña y el uso de los recursos hídricos influye significativamente en la eficiencia hídrica y la sostenibilidad agrícola.	Variable Dependiente Sostenibilidad agrícola del sistema de riego de Para Dimensiones: Productividad agrícola	La población en la presente investigación son todos los sistemas de riego en la región de Ayacucho. La muestra en este caso sería el sistema de riego de Para, ubicado en el distrito de Chaviña en la región de Ayacucho.
¿Qué estrategias sostenibles permiten optimizar el sistema de riego en Para, basándose en las evaluaciones hidrológicas y el análisis de la eficiencia hídrica?	Proponer estrategias sostenibles para optimizar el riego en Para, basadas en evaluaciones hidrológicas y análisis de la eficiencia hídrica	Las estrategias sostenibles de riego, diseñadas sobre la base de evaluaciones hidrológicas completas y un análisis de la eficiencia hídrica, resultará en una optimización significativa del uso del agua en Para.	Indicadores: Rendimiento agrícola Eficiencia en el uso del agua por cultivo	

Nota. Elaboración propia

Anexo 2*Precipitación Total Mensual en (mm) estación Lucanas*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total, Anual (mm)
1965	65.6	212.6	247.3	42.5	43	15.2	13.7	32	14	7	2	13.3	708.2
1966	62.3	168.5	155	0	6.5	0	0	21	2.1	56.8	9.5	28.5	510.2
1967	56.2	213	150.8	77.2	0	0	0	0	0	0	51.3	28.5	577
1968	233.1	36.1	188.1	0	0	0	0	0	12.2	12.2	9.9	10.3	501.9
1969	24	131	259	144.6	30.4	0	0	0	0	0	33	121.1	743.1
1970	273.1	92.1	173.6	0	0	0	0	20.4	20.4	27.5	17	33	657.1
1971	80.7	143.7	149.8	69.6	0.5	0	0	1	0	0	0	10.5	455.8
1972	15.9	54	109.1	0.3	6.2	0	0	0	0	0.9	0.2	3	189.6
1973	115.7	157.7	151.6	97.3	6.2	4.3	0	0	35.9	31.6	39.5	36.8	676.6
1974	309.8	177.4	174.4	63.7	9.2	0	0	22.7	0.5	0	36.8	39.5	834
1975	152.4	117.6	178.1	9.2	30.4	2.1	0	0.5	11.5	57.6	27.7	57.6	644.7
1976	244.9	139.8	124.7	27	30.9	0	0	5.5	17.3	4.2	11.4	27.7	633.4
1977	21.7	278	181.7	3	14.9	0	0	50.4	0.4	114	27.6	35	726.7
1978	88.4	58.5	77.4	30.3	4.5	1.2	5.2	2.1	15.6	48.2	17.2	35	383.6
1979	52.1	49.5	192.1	4.5	0	9.3	3	11.3	10.8	21.6	2.7	30	386.9
1980	135.2	39.3	119.3	0	0	0	0	0	0	0	28.1	22	343.9
981	136.9	185.6	58.1	50.8	0	0	0	15.6	0	33.7	13.1	128	621.8
1982	102.9	160.3	64.8	0	33	0	0	0	19.9	48.1	33.1	13.1	475.2
1983	42.9	49.8	14.6	0	4.1	0	0	0	6.2	10.2	2	16.8	146.6
1984	33.5	48	13.4	22.9	4.4	0	0	0	6.2	8	16.8	58.1	211.3
1985	27.7	221.4	289.7	14	20.5	22.9	0	0	4.4	6.2	12.4	82.3	701.5
1986	134.8	151.7	118.5	21.5	0	0	0	0	0	9.5	4	74.4	514.4
1987	156.4	23.1	143.3	36.1	0	0	0	0	0	0	59.3	4	422.2
1988	82.2	231.2	198.9	0	0	0	0	0	2.4	10.6	4	59.3	588.6
1989	225.3	142.1	206.4	4.6	4	6	2.6	1.2	1.2	2.4	10.6	2	608.4
1990	1.4	20.1	46.1	16	20.4	44.6	3.6	0	0.2	26.9	22.9	26.9	229.1
1991	50.8	38.5	25	0	0	0	0	0	0	17.2	17.2	17.2	165.9
1992	0	46.2	0	0	0	0	0	18.3	23.4	30.3	2.3	30.3	150.8
1993	159	154.2	151.5	52.7	8.9	0	0.1	0	0	15.6	18.8	18.8	579.6
1994	101.2	78.4	97.5	44.4	22.6	0	0	13	9.6	61	61	61	549.7
1995	37.1	42.4	210.8	0	0	0	0	0	4.1	61	61	61	477.4
1996	162.7	316.9	128.4	181.6	18.7	0	0	11.3	20.2	10.3	10.3	4.9	865.3
1997	111.1	158.9	66.6	55.7	8.8	0	0	15.2	26.8	10.8	43.1	135.1	632.1
1998	214.7	133.7	101.2	24.6	7	0	0	9.1	11.8	3.6	25.6	108.9	640.2
1999	121.4	269.4	118.7	64.7	7.3	0.1	0	3.4	0.1	9.1	11.2	83.9	689.3
2000	223.5	150.8	124.5	16.3	8.1	0.6	0	14.4	13.8	82.2	84.1	84.1	802.4
2001	136	138.4	234	97.3	5.6	0.3	0.5	4.1	19	12.7	2.8	9.1	659.8
2002	191.9	196.4	183.5	34.8	29	2.9	13	12.7	1.6	0	9.7	9.7	685.2
2003	115	56.8	5.9	2.6	12.4	0	0.1	3.5	6.4	0.5	0	71.3	274.5
2004	150.7	185.3	100.9	18.5	0.3	0	0	0	0	2.1	0.5	11.9	470.2
2005	14	70.9	102.5	85.8	0	0	0	0	6.8	47.6	7.6	62.8	398

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total, Anual (mm)
2006	20	109.7	30.9	120.7	0.7	0.2	0.1	12.5	21.5	0.1	6.5	4.3	327.2
2007	31.2	44.7	90.1	9.8	67.5	0.1	0.1	0	0.8	8.4	18.4	24.1	295.2
2008	124.9	174.4	108.3	4.9	0	0	0	0	1.2	23.5	22.5	0.8	460.5
2009	126.5	166.2	34.9	175.3	0.1	0.2	0	0	0.6	2.5	0.4	16	522.7
2010	15	142.2	105.7	57.4	3.1	0	0	0	0.6	38.6	0.5	11.1	374.2
2011	192.2	255.9	77.6	82.2	18.1	2.37	5.2	7.72	3	0.6	79.2	132.6	856.69
2012	108.9 ₉	243.3	244.2	170.3	8.6	2.42	1.78	16.2	6	17.97	21.81	69.04	910.61
N° Datos	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Máx.	309.8	316.9	289.7	181.6	67.5	48	48	50.4	48	114	84.1	135.1	910.61
Mín.	0	20.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	48

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

Anexo 3*Precipitación Total Mensual en (mm) estación Puquío*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total, Anual (mm)
1965	49.69	119.5	53.51	14.7	7.32	7.32	7.32	7.32	10.69	10.49	7.32	30.25	325.43
1966	44.57	9.5	115.5	12.1	7.32	7.32	7.32	7.32	30.42	27.46	32.96	28.61	330.4
1967	184.79	332.39	135.04	58.89	37.1	7.32	12.27	7.32	13.92	7.32	7.32	3.11	806.79
1968	107.69	56.9	112.03	8.88	7.32	7.32	7.32	7.32	13.06	20.78	53.95	51.51	454.08
1969	32.15	78.17	134.52	41.44	7.32	7.32	7.32	7.32	11.84	7.32	16.44	56.29	407.45
1970	171.21	67.58	66.01	4.14	7.32	7.32	7.32	7.32	23.97	18.8	5.68	25.29	411.96
1971	61.15	90.15	139.99	38.93	11.49	7.32	7.32	7.32	7.32	9.23	8.71	45.7	434.63
1972	143.11	173.67	178.36	13.92	7.32	10.62	10.62	7.32	28.65	28.68	7.32	71.47	681.06
1973	115.33	97.96	127.83	57.85	7.32	7.32	7.32	7.32	37.6	37.8	7.32	27.17	538.14
1974	98.49	63.58	34.76	22.43	7.32	8.54	7.32	24.17	12.01	7.32	10.97	9.93	306.84
1975	47.09	60.37	74.96	9.75	14.09	7.32	7.32	7.32	7.32	9.41	10.45	7.32	262.72
1976	146.59	139.99	68.62	7.32	7.32	7.32	7.32	7.32	37.6	37.6	11.32	4.1	482.42
1977	8.54	160.04	68.44	7.32	7.32	7.32	7.32	7.32	24.6	10.27	20.69	3.36	332.54
1978	87.84	31.63	52.11	19.56	7.32	7.32	7.32	7.32	7.32	7.32	31.46	7.32	273.84
1979	24.6	68.71	115.24	7.32	7.32	7.32	7.32	7.32	7.32	18.96	7.32	7.32	286.07
1980	47.09	14.35	78.86	7.32	7.32	7.32	13.49	7.32	22.95	7.32	20.87	10.27	244.48
1981	80.43	105.6	75.13	35.54	7.32	7.32	7.32	22.52	7.32	20.87	7.32	23.89	400.58
1982	75.82	79.65	23.58	7.32	7.32	7.32	7.32	22.95	7.32	20.87	7.32	17.7	284.49
1983	37.02	33.8	66.62	33.19	13.23	7.32	7.32	7.32	14.18	9.84	11.4	61.78	303.02
1984	84.51	119.69	111.07	26.36	11.41	8.55	7.32	35.49	7.32	13.65	7.58	14.51	447.46
1985	24.8	123.89	67.89	52.99	14.67	7.32	7.32	17.33	13.67	7.32	7.58	34.83	379.61
1986	122.88	145.2	133.56	27.12	7.32	7.32	20.95	7.32	7.32	7.32	8.88	6.98	502.17
1987	110.99	76.87	26.77	17.22	12.62	9.93	9.49	10.79	7.76	10.19	13.75	11.4	317.78
1988	131.65	79.47	51.69	33.19	28.51	7.32	8.5	7.32	12.66	12.35	17.54	38.32	428.52
1989	350.7	227.5	226.64	13.57	11.14	7.32	7.32	7.32	7.32	15.66	7.32	7.32	889.13
1990	36.67	20.69	59.68	10.62	22.26	16.53	7.32	7.32	8.35	9.41	11.29	8.52	218.66
1991	70.62	33.19	100.57	25.9	7.32	7.32	7.32	7.32	7.32	17.39	11.14	7.32	302.73
1992	8.22	29.25	30.83	0.87	6.19	1.55	3.04	7.85	26.09	16.82	43.74	4.16	178.61
1993	164.3	82.1	161.4	23.3	20.9	0	0	10.4	0	28.2	14.2	49.8	554.6
1994	144.4	175.6	82	0	3.6	4	0	0	0	2.4	0	19.3	431.3
1995	112.7	15.1	134.3	0	0	0	17	0	0	0	5.3	30.3	314.7
1996	83.1	150.8	31.9	24.2	0	0	4.8	1.6	0	6.4	3.3	25.5	331.6
1997	54	167.4	62.3	0	0	0	0	41.2	14.3	6.4	5	53.6	404.2
1998	191.8	115.3	86.8	1.3	0	10.3	0	0	0	0	33.4	79.8	518.7
1999	64.4	221	89	17.5	1.5	0	0	0	0	16.8	0.6	29.2	440
2000	187.2	129.2	140.9	16.5	7.2	0	0	0	0	12.6	4.6	77.8	576
2001	107	145.6	136.1	43.7	0	0	0	0	0	5.7	5.3	5.1	448.5
2002	96.3	142.2	132.5	33.4	3.8	0	13.8	2.6	6.2	7.6	37.5	22.9	498.8
2003	48.5	78.2	30.8	0	12.4	0	1.2	14.6	6.9	14.3	0.2	52	259.1
2004	57	89.4	94.9	58.7	0	0	14.6	6.9	14.3	0	52	70.6	458.4

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total, Anual (mm)
2005	41	74.6	45.7	22.1	0	0	1.4	23.9	3.6	0	0	87.7	300
2006	84.3	167.4	122.5	13.3	0	2.3	0	4.2	0	0	18.5	13.3	425.8
2007	71.65	79.42	73.26	16.08	5.94	4.02	4.17	5.95	5.2	11.2	18.1	20.34	315.33
2008	178.1	115.2	90	3.2	8.86	6	6.23	8.87	11.8	6.2	17.17	19.6	471.23
2009	101	166.4	87.1	46.7	8.89	6.02	9.5	8.91	11.21	7.99	13.3	4.9	471.92
2010	66	76.3	90.4	29.1	4.68	4.85	6.55	8.89	11.21	7.93	13.8	68.9	388.61
2011	159.9	119.1	61.6	42.8	12.9	7.75	95.7	6.3	14.44	14.02	13.9	66.3	614.71
2012	61	161.1	122.9	74.5	1.2	6.85	7.11	10.13	12.77	12.39	196.1	48.77	714.82
N° Datos	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Máx.	350.7	332.39	226.64	74.5	37.1	16.53	95.7	41.2	37.6	37.8	196.1	87.7	889.13
Mín.	8.22	9.5	23.58	0	0	0	0	0	0	0	0	3.11	178.61

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

Anexo 4

Precipitación Total Mensual en (mm) estación Cora Cora

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total, Anual (mm)
1965	136.95	93.81	76.83	32.64	0.5	9.4	29.42	1.74	1.69	0.27	11.52	27.48	422.25
1966	3	27.1	88	12.8	0	2	0	16	0	16	10	13.5	188.4
1967	158.2	288.1	206.6	68.5	0	0	0	0	0	3	0	13	737.4
1968	215.5	31	141.7	0	7.5	0	0	0	7.5	1	34.5	40.5	479.2
1969	45	89.5	151	19	0	0	0	0	4	0.8	26.5	80	415.8
1970	176	84	49	6.5	0	0	0	5	0	34	2	20	376.5
1971	94	100.5	117.5	70.5	0	0	0	0	0	13.5	11.5	49.8	457.3
1972	166.2	145.9	260.5	20	0	5.5	0	0	0	34	0	69	701.1
1973	135	113.7	165	5	0	0	8	0	16.5	0	22	19.5	484.7
1974	232.8	131	75.5	32	0	0	12	0	0	0	20	195	698.3
1975	79.5	141	146.5	10	0.11	0	0	0	0	0	0	0	377.11
1976	150.45	219.74	193.81	57.75	1.96	0.18	2.32	1.86	12.43	23.79	3.5	7.95	675.74
1977	0.67	216.93	187.58	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	104.59	0.67	21.6	39.71	575.1
1978	64.57	57.12	119.61	49.96	0.67	0.67	0.67	1.84	0.67	0.67	0.67	9.1	306.22
1979	25.81	89.42	193.62	2.92	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	15.7	0.67	17.52	349.01
1980	143.91	80.86	128.04	6.15	0.67	6.7	9.8	0.67	7.69	34.66	3.48	44.49	467.12
1981	40.41	263.69	12.47	0.67	0.67	1.22	0.67	22.3	0.67	0.67	12.33	88.44	444.21
1982	86.33	46.31	131.41	32.55	0.67	0.67	0.67	17.24	0.67	67.94	26.37	10.92	421.75
1983	75.1	75.1	10.14	0.67	0.67	5.64	0.67	0.67	8.46	0.67	0.67	62.04	240.5
1984	257.93	188.64	97.57	0.67	0.67	4.35	0.67	0.67	5.34	0.67	26.58	12.84	596.6
1985	79.38	213.83	211.13	67.26	0.55	0.45	0.1	0.97	0.28	1.34	2.32	81.97	659.58
1986	10.69	269.12	188.66	3.99	1.47	3.23	11.05	15.06	14.22	13.98	39.4	133.65	704.52
1987	95.9	34	30.6	6.4	18.3	0.05	0.79	0	2.2	4.3	0	1	193.54

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total, Anual (mm)
1988	89	88.2	46.2	7.6	1.42	0.08	1.11	0.8	5.31	5.97	7.71	17.87	271.27
1989	183.97	269.42	197.17	7.74	3.74	0.75	2.71	1.14	5.35	14.84	13.5	3.93	704.26
1990	17.84	35.85	92.22	4.85	2.29	0.27	3.15	0.43	16.89	19.95	37.2	3.72	234.66
1991	55.7	65	146.2	5.1	1.44	0	0	0	0	1.5	0.4	1.3	276.64
1992	0	5.1	16.2	0	0.13	0	0.07	0.49	0.54	0.7	1.63	0	24.86
1993	225.4	8.53	112.15	2.89	1.38	1.38	1.38	9.08	11.83	9.05	26.65	14.32	424.04
1994	141.41	289.17	69.81	12.96	3.64	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	16.62	14.32	554.83
1995	108.39	3.26	81.09	1.38	1.38	1.38	4.99	2.43	12.06	22.98	258.03	50.85	548.22
1996	46.43	129.9	40.11	15.67	1.38	1.38	5.22	5.89	1.38	9.03	28.83	286.6	571.82
1997	73.35	82.9	50.11	7.4	1.76	1.38	2.67	29.51	20.86	1.38	7.47	52.29	331.08
1998	201.26	74.03	86.28	7.1	1.38	4.47	3.31	1.38	1.35	11.7	16.2	78.91	487.37
1999	83.5	258.49	87.94	15.97	1.38	1.38	1.38	1.38	5.82	1.38	15.77	50.34	524.73
2000	185.7	126.82	108.02	32.14	6.87	1.38	2.13	1.38	1.83	1.38	1.83	29.88	499.36
2001	103.14	227.42	154.38	62.35	0	0	4.56	0	0	0	0	551.85	1103.7
2002	47.79	126.75	119.08	62.35	0	0	15.81	0	0.29	0	23.74	26.61	422.42
2003	55	144.4	112.7	7.5	9.3	0	0	1.3	0	2.4	0	322	654.6
2004	66.3	103.6	104.2	18.2	0	0	17.2	2.7	2.6	0	0	336.9	651.7
2005	42.9	79.1	53.9	15.4	0	0	0	10.2	0	6.3	14.59	222.39	444.78
2006	79.1	234.4	145.1	19.1	0	0	0	0.1	6.1	1.5	41.7	10.2	537.3
2007	98.88	104.77	107.9	42.7	3.9	0	0	0	1	2.8	6.6	34.7	403.25
2008	177.1	181.9	107.9	10.1	0	0	0	0	0	0	0	33.49	510.49
2009	80.6	225.1	152.99	32.4	0	0	0	0	0	0	5.9	13.9	510.89
2010	57.9	61.5	50.9	25.4	0.9	0.06	1.78	0.89	7.29	0	0	13.9	220.52
2011	138.24	130.99	37	36.16	7.09	0.12	6.2	1.78	0.89	0.89	7.29	53.79	420.44
2012	66.66	191.18	333.98	69.6	4.07	0.22	3.19	2.3	15.23	17.11	22.11	51.2	776.85
N° Datos	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total, Anual (mm)
Máximo	257.93	289.17	333.98	70.5	18.3	9.4	29.42	29.51	104.59	67.94	258.03	551.85	1103.7
Mínimo	0	3.26	10.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24.86

Nota. Tomado del Informe N° 046-2019 MINAGRI-DVDIAR-DGAAA-DGAA. Fuente (ANA, 2019).

Anexo 5

Código en Python del cálculo de la correlación y regresión lineal

```
import pandas as pd

import matplotlib.pyplot as plt

from sklearn.linear_model import LinearRegression

from sklearn.metrics import r2_score

# Carga de Datos de Excel

Data_Precipitacion = pd.read_excel('/content/Precipitación.xlsx')

DataCaudal = pd.read_excel('/content/Caudal.xlsx')

Data_Precipitacion_long = pd.melt(Data_Precipitacion, id_vars=['Año'],
var_name='Mes', value_name='Precipitación')

DataCaudal_long = pd.melt(DataCaudal, id_vars=['Año'], var_name='Mes',
value_name='Caudales')

df = pd.merge(Data_Precipitacion_long, DataCaudal_long, on=['Año', 'Mes'])

correlation = df['Precipitación'].corr(df['Caudales'])

print(f"Correlación: {correlation}")

model = LinearRegression()

model.fit(df[['Precipitación']], df['Caudales'])

# Predección y calculo R^2

predictions = model.predict(df[['Precipitación']])

r2 = r2_score(df['Caudales'], predictions)

print(f"Coeficiente de determinación R^2: {r2}")

plt.scatter(df['Precipitación'], df['Caudales'], alpha=0.5)
```

```
plt.plot(df['Precipitación'], predictions, color='red', linewidth=2)
plt.title('Precipitación vs Caudales')
plt.xlabel('Precipitación (mm)')
plt.ylabel('Caudales (m3/s)')
plt.show()
```

Anexo 6

Código en Python de la proyección de caudales y precipitación

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

n_simulations = 10000

intercept, slope = results.params
sigma = np.sqrt(results.scale)

precipitacion_values = df['Precipitación'].values.reshape(-1, 1)

simulated_caudales = intercept + slope * precipitacion_values + np.random.normal(0,
sigma, (len(df), n_simulations))

mean_simulated = np.mean(simulated_caudales, axis=1)
std_simulated = np.std(simulated_caudales, axis=1)

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.errorbar(df['Precipitación'], mean_simulated, yerr=std_simulated, fmt='o', ecolor='r',
alpha=0.5, label='Simulación Monte Carlo')
plt.scatter(df['Precipitación'], df['Caudales'], color='blue', label='Datos Observados')
plt.xlabel('Precipitación (mm)')
plt.ylabel('Caudales (m³/s)')
plt.title('Simulación de Monte Carlo para Caudales')
plt.legend()
plt.show()

intercept, slope = results.params
sigma = np.sqrt(results.scale)

last_5_years_avg = df['Precipitación'][-5:].mean()
future_precipitation = np.full((5, 1), last_5_years_avg)

simulated_future_caudales = intercept + slope * future_precipitation +
np.random.normal(0, sigma, (5, n_simulations))

mean_future_simulated = np.mean(simulated_future_caudales, axis=1)
std_future_simulated = np.std(simulated_future_caudales, axis=1)

plt.figure(figsize=(10, 6))
years = np.arange(2024, 2029)
plt.errorbar(years, mean_future_simulated, yerr=std_future_simulated, fmt='o',
ecolor='r', alpha=0.5, label='Proyección Monte Carlo')
plt.title('Proyección de Caudales para los Próximos 5 Años Usando Precipitación
Promedio de los Últimos 5 Años')
plt.xlabel('Año')
plt.ylabel('Caudales Proyectados (m³/s)')
plt.xticks(years)
plt.legend()
plt.show()

```

Anexo 7

Código en Python del cálculo de la ETo

```

import numpy as np

# Constantes

alfa = 0.23 # (coeficiente de reflexión de la superficie)

sigma = 4.903e-9 # Constante de Stefan-Boltzmann en MJ/K^4/m^2/día

cp = 1.013 # Calor específico del aire a presión constante en kJ/kg°C

epsilon = 0.622 # Relación molecular del peso del agua al peso seco del aire

lambda_v = 2.45 # Calor latente de vaporización, MJ/kg

z = 3733 # Altitud en metros

T = np.array([7.24, 8.28, 7.88, 8.07, 7.12, 6.66, 5.87, 7.02, 8.52, 8.11, 8.16, 7.00]) #
Temperatura media diaria en °C

RH = np.array([75.3, 78.41, 79.71, 73.93, 67.65, 60.22, 61.9, 63.46, 64.86, 64.82, 70.24,
70.24]) # Humedad relativa media en %

u2 = np.array([3.51, 3.43, 3.15, 3.14, 3.23, 3.32, 3.18, 3.51, 3.52, 3.33, 3.32, 3.37]) #
Velocidad del viento a 2 metros en m/s

Rs = np.array([5.87, 5.86, 5.94, 7.58, 9.64, 9.55, 9.75, 9.33, 8.65, 8.05, 7.98, 5.96]) #
Radiación solar en MJ/m^2/día

ETo = np.zeros(12)

for i in range(12):
    es = 0.6108 * np.exp((17.27 * T[i]) / (T[i] + 237.3)) # es en kPa
    ea = es * (RH[i] / 100) # ea en kPa
    Delta = 4098 * es / ((T[i] + 237.3)**2) # en kPa/°C
    gamma = (cp * (101.3 * ((293 - 0.0065 * z) / 293)**5.26)) / (epsilon * lambda_v) # en
kPa/°C

```

$R_n = (1 - \alpha) * R_{s[i]} - \sigma * ((T[i] + 273.16)^{**4}) * (0.34 - 0.14 * \text{np.sqrt}(e_a)) * (1.35 * (R_{s[i]} / R_{s[j]}) - 0.35)$

$E_{To}[i] = (0.408 * \Delta * (R_n) + \gamma * (900 / (T[i] + 273)) * u_2[i] * (e_s - e_a)) / (\Delta + \gamma * (1 + 0.34 * u_2[i]))$

months = ["Enero", "Febrero", "Marzo", "Abril", "Mayo", "Junio",

"Julio", "Agosto", "Septiembre", "Octubre", "Noviembre", "Diciembre"]

for month, value **in** zip(months, ETo):

print(f"La Evapotranspiración de Referencia (ETo) para Lucanas en {month} es:
{value:.2f} mm/día")

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 088-2024-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 N° 724-2024-FIMGC-D**, a los veinte y dos días del mes de noviembre de 2024, siendo las 10:00 a.m, reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, bajo la presidencia del MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS y los miembros; Mg. Ing. Edward LEON PALACIOS, MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO y Mg. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMAN actuando como secretario docente el MSc. Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO, para proceder a la sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, del bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil:

Elvis Jhoseph SALCEDO CASAS

Quien presentó la tesis denominada:

Análisis de la eficiencia hídrica en el sistema de riego de la comunidad de Para, distrito de Chaviña, región de Ayacucho basado en la sostenibilidad agrícola-2023

Los señores miembros del jurado luego de expuesto la tesis y absueltas las preguntas, delibera y lo declaran:

APROBADO CON NOTA DIECISÉIS (16)

Siendo las 12:10 p.m. del día 22 de noviembre de 2024, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad a lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS
Presidente

Mg. Ing. Edward LEON PALACIOS
Miembro

MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO
Miembro

Mg. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMAN
Miembro

MSc. Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO
Secretario docente de la FIMGC

cc:
Archivo



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 001-2025-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 : Elvis Jhoseph SALCEDO CASAS
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : Análisis de la eficiencia hídrica en el sistema de riego de la comunidad de Para, distrito de Chaviña, región de Ayacucho basado en la sostenibilidad agrícola-2023
Evaluación de la Originalidad : 19 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2598568612

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, 25 de febrero 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

Análisis de la eficiencia hídrica en el sistema de riego de la comunidad de Para, distrito de Chaviña, región de Ayacucho basado en la sostenibilidad agrícola-2023

por ELVIS JHOSEPH SALCEDO CASAS

Fecha de entrega: 25-feb-2025 02:07p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2598568612

Nombre del archivo: 2025TE_SALCEDO_CASAS_ELVIS_JHOSEPH.pdf (2.77M)

Total de palabras: 36272

Total de caracteres: 180924

Análisis de la eficiencia hídrica en el sistema de riego de la comunidad de Para, distrito de Chaviña, región de Ayacucho basado en la sostenibilidad agrícola-2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

17%

FUENTES DE INTERNET

10%

PUBLICACIONES

10%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	4%
2	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	1%
3	pdfcookie.com Fuente de Internet	1%
4	www.scribd.com Fuente de Internet	1%
5	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
6	corponarino.gov.co Fuente de Internet	1%
7	idoc.pub Fuente de Internet	1%
8	munipuquio.gob.pe Fuente de Internet	1%

9	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	1 %
10	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
11	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
12	1library.co Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to Universidad Católica de Colombia Trabajo del estudiante	<1 %
15	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %
16	idoc.tips Fuente de Internet	<1 %
17	www.bvcooperacion.pe Fuente de Internet	<1 %
18	www.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
19	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

20	ECOFLUIDOS INGENIEROS S.A.. "Plan de Cierre del Plantel ECH-05-IGA0013898", R.D.G. N° 156-2020-MINAGRI-DVDIAR-DGAAA, 2021 Publicación	<1 %
21	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	WALSH PERU S.A. INGENIEROS Y CIENTIFICOS CONSULTORES. "EIA para el Proyecto de Explotación de la Concesión Minera No Metálica Dunas 3 Segunda-IGA0007037", R.D. N°005-2016-PRODUCE/DVMYPE-I/DIGGAM, 2020 Publicación	<1 %
23	fdocuments.ec Fuente de Internet	<1 %
24	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
25	bibliotecadigital.ciren.cl Fuente de Internet	<1 %
26	www.grafiati.com Fuente de Internet	<1 %
27	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
28	www.repositorioacademico.usmp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

29	Submitted to Universidad de Manizales Trabajo del estudiante	<1 %
30	revistas.utp.ac.pa Fuente de Internet	<1 %
31	bibliotecadigital.univalle.edu.co Fuente de Internet	<1 %
32	Submitted to Universidad Manuela Beltrán Virtual Trabajo del estudiante	<1 %
33	zagan.unizar.es Fuente de Internet	<1 %
34	documents.mx Fuente de Internet	<1 %
35	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
36	Submitted to Universidad Católica Boliviana "San Pablo" Trabajo del estudiante	<1 %
37	www.elsevier.es Fuente de Internet	<1 %
38	pricila.senacyt.gob.pa Fuente de Internet	<1 %
39	www.cuatrocieneegas.mx Fuente de Internet	<1 %

40

Submitted to colpos

Trabajo del estudiante

<1 %

41

AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
SOCIEDAD ANONIMA CERRADA - AMBIDES
S.A.C.. "ITS para la Ampliación de las
Operaciones de la Infraestructura de
Disposición Final de Residuos Sólidos del
Ámbito No Municipal (Relleno de Seguridad)-
IGA0009296", R.D. N° 00125-2019-SENACE-
PE/DEIN, 2020

Publicación

<1 %

42

uvadoc.uva.es

Fuente de Internet

<1 %

43

CLEAN TECHNOLOGY S.A.C.. "EIA-SD del
Proyecto Infraestructura de Tratamiento y
Disposición Final de Residuos Sólidos de
Gestión No Municipal - Relleno de Seguridad
Majes-IGA0003710", R.D. N° 00161-2019-
SENACE-PE/DEIN, 2021

Publicación

<1 %

44

FOREST SOIL SERVICIOS AMBIENTALES S.R.L..
"MEIA – Social para la Perforación de un Pozo
Exploratorio, un Pozo Confirmatorio y Sísmica
3D en el Área Noroeste del Lote 64 y Área de
influencia-IGA0002598", R.D. N° 053-2004-
MEM/AAE, 2022

Publicación

<1 %

45	Submitted to Universidad Internacional del Ecuador Trabajo del estudiante	<1 %
46	agris.fao.org Fuente de Internet	<1 %
47	www.sendas.org.ec Fuente de Internet	<1 %
48	Ángel Marcelo Calvache-Ulloa. "Manejo del Agua de Riego en Zonas de Ladera", Eidos, 1970 Publicación	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo