

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE  
HUAMANGA**

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

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS:**

**Análisis computacional de los patrones de flujo en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho 2023**

Para optar el título profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR:

**Bach. Hercilio PACOTAYPE YARANGA**

ASESOR:

**Msc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2024**

## RESUMEN

Esta investigación aborda la optimización del uso del agua en la agricultura en la comunidad de Challhualla, Ayacucho, que enfrenta problemas significativos de eficiencia en el riego. El objetivo general es desarrollar y aplicar técnicas computacionales para analizar y optimizar los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de la comunidad. Se desarrolló un modelo matemático utilizando regresión lineal múltiple y árboles de regresión, incorporando variables como precipitación, evapotranspiración y temperatura. Los experimentos realizados involucraron la aplicación de algoritmos genéticos para optimizar la distribución del agua, ajustando los coeficientes del modelo para maximizar la eficiencia. Los resultados mostraron que el mejor individuo encontrado por el algoritmo genético tenía coeficientes de ajuste específicos para cada mes, permitiendo optimizar la oferta de agua en relación con la demanda. Los valores obtenidos indicaron una alta disponibilidad de agua en los meses de enero (4194.17 m<sup>3</sup>/s), febrero (7263.48 m<sup>3</sup>/s) y marzo (5965.63 m<sup>3</sup>/s), y una baja disponibilidad en mayo, septiembre, octubre y noviembre. Esto subraya la necesidad de estrategias de almacenamiento y conservación de agua. En conclusión, la investigación ha demostrado que el uso de técnicas computacionales avanzadas puede mejorar significativamente la eficiencia del uso del agua en sistemas de riego tecnificado. Las estrategias propuestas, como la implementación de embalses y sistemas de riego eficientes, junto con un monitoreo en tiempo real y la planificación de cultivos, contribuirán a la sostenibilidad del recurso hídrico y a la mejora de la productividad agrícola en Challhualla.

**Palabras Claves:** Algoritmos de optimización, Análisis computacional, Modelos matemáticos, Patrones de flujo de agua, Recursos hídricos, Sistemas de riego tecnificado.

## ABSTRACT

This research addresses the optimization of water use in agriculture in the community of Challhualla, Ayacucho, which faces significant irrigation efficiency problems. The overall objective is to develop and apply computational techniques to analyze and optimize water flow patterns in the community's technified irrigation system. A mathematical model was developed using multiple linear regression and regression trees, incorporating variables such as precipitation, evapotranspiration and temperature. The experiments carried out involved the application of genetic algorithms to optimize water distribution, adjusting the model coefficients to maximize efficiency. The results showed that the best individual found by the genetic algorithm had specific adjustment coefficients for each month, allowing optimization of water supply in relation to demand. The values obtained indicated high water availability in the months of January (4194.17 m<sup>3</sup>/s), February (7263.48 m<sup>3</sup>/s) and March (5965.63 m<sup>3</sup>/s), and low availability in May, September, October and November. This underscores the need for water storage and conservation strategies. In conclusion, the research has shown that the use of advanced computational techniques can significantly improve water use efficiency in technified irrigation systems. The proposed strategies, such as the implementation of efficient reservoirs and irrigation systems, together with real-time monitoring and crop planning, will contribute to water resource sustainability and improved agricultural productivity in Challhualla.

**Keywords:** Optimization algorithms, Computational analysis, Mathematical models, Water flow patterns, Water resources, Technified irrigation systems.

## INTRODUCCIÓN

La optimización del uso del agua en la agricultura es un desafío crítico, especialmente en regiones con recursos hídricos limitados. La comunidad de Challhualla, ubicada en el distrito de Lucanas, provincia de Lucanas, en el departamento de Ayacucho, enfrenta problemas significativos relacionados con la eficiencia del riego. El uso ineficiente del agua y la falta de una infraestructura de riego adecuada han llevado a una baja productividad agrícola y a la insostenibilidad del recurso hídrico en esta área. Según estudios realizados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), los terrenos de cultivo en Challhualla sufren de baja productividad debido a la falta de infraestructura de riego eficiente y a sistemas de riego en mal estado.

La problemática central de esta investigación se centra en la ineficiencia de los métodos tradicionales de riego utilizados en Challhualla, que a menudo resultan en un uso excesivo o inadecuado del agua, afectando negativamente la productividad agrícola y comprometiendo la sostenibilidad del recurso hídrico. La hipótesis principal de esta investigación es que, mediante el uso de técnicas computacionales avanzadas, como el modelado hidrológico y los algoritmos de optimización, es posible mejorar significativamente la eficiencia y efectividad de los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de Challhualla, Ayacucho. Esto permitirá una gestión más sostenible del recurso hídrico y un aumento en la productividad agrícola.

El objetivo general de esta investigación es desarrollar y aplicar técnicas computacionales para analizar y optimizar los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho. Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos: en primer lugar, desarrollar un modelo matemático sobre los patrones de flujo de agua del sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho; en segundo lugar, utilizar el modelo matemático desarrollado para aplicar técnicas de análisis computacional mediante algoritmos de optimización, con el fin de evaluar la eficiencia en la distribución del agua; y, en tercer lugar, desarrollar y proponer estrategias de optimización del sistema de riego basadas en los resultados del análisis computacional.

La metodología de esta investigación se basa en un enfoque cuantitativo con un diseño de investigación no experimental. Se utilizarán técnicas computacionales avanzadas, incluyendo modelado matemático y algoritmos genéticos, para analizar y optimizar los

patrones de flujo de agua. La población del estudio incluye todos los sistemas de riego tecnificado en la región de Ayacucho, con una muestra específica en el sistema de riego de la comunidad de Challhualla. Para el desarrollo del modelo matemático, se realizará un modelado hidrológico utilizando datos de precipitación, evapotranspiración, temperatura y características del suelo para simular los patrones de flujo de agua en el sistema de riego. En el análisis computacional y optimización, se aplicarán algoritmos genéticos para evaluar y optimizar la distribución del agua, identificando deficiencias y áreas de mejora en el sistema de riego actual. Basándose en los resultados del análisis computacional, se desarrollarán estrategias específicas para mejorar la eficiencia del sistema de riego, incluyendo recomendaciones para la implementación de tecnologías de riego más eficientes y prácticas de gestión del agua.

El alcance de este trabajo no solo se enfoca en la comunidad de Challhualla, sino que también busca establecer un modelo replicable para otras regiones con desafíos similares. Al abordar la problemática del uso ineficiente del agua en la agricultura, la investigación contribuirá a la sostenibilidad del recurso hídrico y a la seguridad alimentaria en áreas rurales. Además, promoverá el uso de tecnologías avanzadas en la agricultura, un paso esencial hacia la modernización y la resiliencia frente al cambio climático.

En conclusión, la optimización del sistema de riego tecnificado en Challhualla, mediante el uso de herramientas computacionales y estrategias de gestión del agua, tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia del uso del agua y la productividad agrícola, asegurando la sostenibilidad del recurso hídrico en la región. Esta investigación proporciona un marco para futuras iniciativas en la gestión eficiente del agua en la agricultura, contribuyendo a un desarrollo agrícola más sostenible y resiliente.

## DEDICATORIA

Al gran divino de los cielos al gran misericordioso, el que me ha bendecido con la vida y haberme brindado las fuerzas para no caer en el camino, en mis metas en mis proyectos, con la toda humildad que cargo agradezco en primer lugar el presente el presente trabajo a DIOS.

A mis padres Demetrio y Maximiliana, por su ayuda incondicional, me inculcaron valores, Me han educado para lidiar con las dificultades sin importar los obstáculos.

A mis 6 hermanos, por haberme brindado todo el apoyo moral como familia en todos los años de mi vivir.

A mi pareja Rosmeri por ser la persona más comprensible y con vasta paciencia en todo este tiempo de mi investigación, por su apoyo incondicional.

A mi hija Sunmy Khaely, a ella en especial le dedico esta tesis , por su cariño y amor cándido.

## **AGRADECIMIENTOS**

Debo expresar mi agradecimiento más sincero y especial al Msc. Ing. Jaime Leonardo Bendezú Prado, Gracias por aceptar acompañarme para terminar esta investigación con sus consejos. Agradezco profundamente su dedicación y paciencia, porque sin sus palabras y correcciones precisas no podría haber llegado a este momento tan ansiado. Gracias por tu guía y todos tus consejos en este largo viaje. Siempre los recordaré y los aplicaré en mi carrera.

Agradezco al profesorado de la universidad su paciencia, palabras útiles y conocimientos profesionales y valiosos. Debo toda mi formación profesional a mis queridos profesores.

También quiero agradecer a mi familia, que ha sido el motor de mis objetivos y que ha estado a mi lado en mis momentos más difíciles durante estos años de aprendizaje y sacrificio. Son los mejores guías de mi vida. Dedicar este éxito a tu preciosa familia, otra meta cumplida.

Finalmente, quisiera expresar mi agradecimiento a mi institución educativa, la Universidad Nacional de San Cristóbal Huamanga, por brindarme la oportunidad de culminar la carrera que estoy siguiendo. Agradezco a todos los fideicomisarios y miembros de mi prestigiosa universidad por su trabajo y administración.

## ÍNDICE GENERAL

|  |      |
|--|------|
| RESUMEN.....                                     | ii   |
| ABSTRACT.....                                    | iii  |
| INTRODUCCIÓN.....                                | iv   |
| DEDICATORIA .....                                | vi   |
| AGRADECIMIENTOS.....                             | vii  |
| ÍNDICE GENERAL .....                             | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                           | xi   |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                            | xii  |
| GLOSARIO.....                                    | xiii |
| ACRÓNIMOS.....                                   | xiv  |
| SÍMBOLOS.....                                    | xv   |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                 | 16   |
| 1.1 Descripción del problema .....               | 16   |
| 1.2 Delimitación del problema .....              | 17   |
| 1.2.1 Espacial (geográfica).....                 | 17   |
| 1.2.2 Temporal .....                             | 17   |
| 1.2.3 Temática y unidad de análisis .....        | 17   |
| 1.3 Formulación del problema .....               | 17   |
| 1.3.1 Problema general .....                     | 17   |
| 1.3.2 Problemas específicos .....                | 18   |
| 1.4 Justificación e importancia.....             | 18   |
| 1.4.1 Justificación.....                         | 18   |
| 1.4.2 Importancia.....                           | 18   |
| 1.5 Limitaciones de la investigación .....       | 18   |
| 1.6 Objetivos.....                               | 19   |
| 1.6.1 Objetivo general .....                     | 19   |
| 1.6.2 Objetivos específicos.....                 | 19   |
| MARCO TEÓRICO .....                              | 20   |
| 2.1 Antecedentes.....                            | 20   |
| 2.1.1 Investigaciones internacionales.....       | 20   |
| 2.1.2 Investigaciones nacionales.....            | 20   |
| 2.2 Bases teóricas .....                         | 21   |
| 2.2.1 Cuencas Hidrográficas .....                | 22   |
| 2.2.2 Ciclo Hidrológico.....                     | 23   |
| 2.2.3 Parámetros de una cuenca hidrográfica..... | 25   |

|        |   |           |
|--------|---|-----------|
| 2.2.4  | Variables morfológicas de una cuenca.....                                 | 26        |
| 2.2.5  | Caudal .....  | 28        |
| 2.2.6  | Flujo.....  | 30        |
| 2.2.7  | Ecuación de continuidad .....   | 30        |
| 2.2.8  | Ecuación de Conservación de Energía .....                                 | 32        |
| 2.2.9  | Navier Stokes .....   | 32        |
| 2.2.10 | Numero de Courant.....  | 32        |
| 2.2.11 | Error Porcentual .....  | 33        |
| 2.2.12 | Modelos Matemáticos.....  | 33        |
| 2.2.13 | Algoritmos de Optimización.....   | 41        |
| 2.3    | Marco conceptual .....  | 49        |
| 2.3.1  | Sistemas de Riego Tecnificado .....                                       | 49        |
| 2.3.2  | Patrones de Flujo de Agua .....   | 49        |
| 2.3.3  | Análisis Computacional .....  | 50        |
| 2.3.4  | Optimización de Recursos Hídricos .....                                   | 50        |
| 2.3.5  | Sostenibilidad en Agricultura .....                                       | 50        |
|        | <b>MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>                                   | <b>52</b> |
| 3.1    | Enfoque .....   | 52        |
| 3.2    | Alcance .....   | 52        |
| 3.3    | Diseño de investigación.....  | 52        |
| 3.4    | Población y muestra .....   | 53        |
| 3.4.1  | Población.....  | 53        |
| 3.4.2  | Muestra.....  | 53        |
| 3.5    | Hipótesis.....  | 53        |
| 3.5.1  | Hipótesis General .....   | 53        |
| 3.5.2  | Hipótesis específicas.....  | 53        |
| 3.6    | Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional..... | 54        |
| 3.7    | Técnicas e instrumentos.....  | 56        |
| 3.7.1  | Técnicas .....  | 56        |
| 3.7.2  | Instrumentos.....   | 56        |
| 3.7.3  | Confiabilidad, validez y objetividad de los instrumentos .....            | 56        |
| 3.8    | Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información .....       | 58        |
| 3.9    | Desarrollo de Trabajo de Tesis.....                                       | 59        |
| 3.9.1  | Ubicación del área de estudio .....                                       | 59        |
| 3.9.2  | Fisiografía y geología del área de estudio.....                           | 59        |
| 3.9.3  | Usos y demandas de agua.....  | 67        |
| 3.9.4  | Oferta Hídrica .....  | 77        |

|                                  |   |     |
|----------------------------------|---|-----|
| 3.9.5                            | Determinación de caudal para un año promedio.....   | 89  |
| 3.9.6                            | Balance hídrico.....  | 90  |
| RESULTADOS .....                 |   | 93  |
| 4.1                              | Análisis e Interpretación de los resultados .....   | 93  |
| 4.1.1                            | Modelo matemático sobre los patrones de flujo de agua .....   | 93  |
| 4.1.2                            | Aplicación de técnicas de análisis computacional mediante algoritmos de optimización .....                  | 103 |
| 4.1.3                            | Estrategias de optimización del sistema de riego basadas en los resultados del análisis computacional ..... | 113 |
| CONCLUSIONES .....               |   | 117 |
| RECOMENDACIONES.....             |   | 118 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... |   | 119 |
| ANEXOS.....                      |   | 124 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 1 Ecuación de continuidad - Conservación de la energía en los fluidos .....                   | 31  |
| Figura 2 Regresión lineal y su interpretación geométrica.....  | 35  |
| Figura 3 Elementos del Árbol de regresión.....   | 38  |
| Figura 4 Modelo de algoritmo CART .....  | 39  |
| Figura 5 Regresión lineal y decisión de árbol.....   | 40  |
| Figura 6 Cadena S.....   | 41  |
| Figura 7 Esquema de modelo de algoritmo genético simple .....  | 42  |
| Figura 8 Límites de coordenadas en un individuo genético.....  | 44  |
| Figura 9 Ruleta de selección .....   | 45  |
| Figura 10 Cruce de 2 individuos genéticos.....   | 46  |
| Figura 11 Rango de Mutación.....   | 47  |
| Figura 12 Mutación del algoritmo genético .....  | 48  |
| Figura 13 Funcionamiento de un algoritmo genético.....   | 48  |
| Figura 14 Área del sistema de riego .....  | 61  |
| Figura 15 Área acumulada (Km <sup>2</sup> ).....   | 63  |
| Figura 16 Temperatura máxima vs Mínima .....   | 69  |
| Figura 17 Evaluación de la humedad relativa.....   | 70  |
| Figura 18 Evapotranspiración potencial por Hargraveas.....   | 72  |
| Figura 19 Volumen de Demanda (m <sup>3</sup> ).....  | 77  |
| Figura 20 Descargas y retención durante la estación seca .....                                       | 86  |
| Figura 21 Descargas y retención durante la estación seca en base al coeficiente de agotamiento ..... | 88  |
| Figura 22 Variación en el balance hidrológico .....  | 92  |
| Figura 23 Nodos del Árbol .....  | 101 |
| Figura 24 Coeficientes de Ajuste del Mejor Individuo.....  | 106 |
| Figura 25 Ajuste de Oferta de Agua vs Demanda de Agua.....   | 107 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1 <i>Cuadro de Operacionalización de variables</i> .....                        | 55  |
| Tabla 2 <i>Datos para la elaboración de la curva hipsométrica</i> .....               | 62  |
| Tabla 3 <i>Características Fisiográficas de la Microcuenca Rio</i> .....              | 63  |
| Tabla 4 <i>Ubicación de Estaciones Pluviométricas</i> .....                           | 64  |
| Tabla 5 <i>Precipitación Total Mensual Estación Puquio</i> .....                      | 65  |
| Tabla 6 <i>Precipitación Total Mensual Estación Lucanas</i> .....                     | 66  |
| Tabla 7 <i>Temperatura máxima y mínima</i> .....                                      | 68  |
| Tabla 8 <i>Humedad Relativa</i> .....   | 70  |
| Tabla 9 <i>Evapotranspiración potencial</i> .....                                     | 71  |
| Tabla 10 <i>Modalidad de la cédula de cultivo (kc)</i> .....                          | 74  |
| Tabla 11 <i>Kc de los cultivos</i> .....  | 75  |
| Tabla 12 <i>Demanda de agua del sistema de riego</i> .....                            | 76  |
| Tabla 13 <i>Cálculo del del Coeficiente de Escurrimiento (C)</i> .....                | 78  |
| Tabla 14 <i>Resumen de la Precipitación Efectiva (PE)</i> .....                       | 83  |
| Tabla 15 <i>Abastecimiento de la retención (Gi) mm</i> .....                          | 84  |
| Tabla 16 <i>Cálculo de <math>Q_t</math> para cada mes de la estación seca</i> .....   | 86  |
| Tabla 17 <i>Recálculo de <math>Q_t</math> para cada mes de la estación seca</i> ..... | 88  |
| Tabla 18 <i>Descargas medias mensuales Generadas (m<sup>3</sup>/s)</i> .....          | 89  |
| Tabla 19 <i>Caudales 75% Persistencia (m<sup>3</sup>/s)</i> .....                     | 90  |
| Tabla 20 <i>Cálculo de oferta</i> .....   | 90  |
| Tabla 21 <i>Balance Hidrológico</i> .....   | 91  |
| Tabla 22 <i>Predicción del algortimo genético</i> .....                               | 112 |

## GLOSARIO

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Algoritmos de Optimización</b>         | : | Métodos computacionales utilizados para encontrar soluciones óptimas a problemas complejos mediante técnicas como los algoritmos genéticos, que ajustan y mejoran iterativamente las soluciones propuestas  |
| <b>Análisis Computacional</b>             | : | Método que utiliza algoritmos y modelos matemáticos para procesar y analizar grandes volúmenes de datos, permitiendo la extracción de patrones, tendencias y conclusiones significativas.   |
| <b>Coefficiente de Esguerrimiento (C)</b> | : | Parámetro que representa la fracción de precipitación que se convierte en escorrentía. Se calcula considerando la pendiente del terreno, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y el uso del suelo.   |
| <b>Cuenca Hidrográfica</b>                | : | Unidad morfológica compuesta por sistemas fluviales y acuíferos subterráneos, definida por la topografía que dirige el flujo de agua hacia una salida común. Es crucial para realizar balances hidrológicos y comprender las dinámicas internas de los recursos hídricos. |
| <b>Evapotranspiración (ET)</b>            | : | Proceso combinado de evaporación del agua desde superficies terrestres y transpiración de las plantas. Es una medida clave en la gestión del agua y en la planificación de riegos.  |
| <b>Modelos Matemáticos</b>                | : | Representaciones matemáticas de sistemas reales utilizados para simular y analizar el comportamiento de estos sistemas bajo diferentes condiciones. En este contexto, se utilizan para simular los patrones de flujo de agua en sistemas de riego                         |

## ACRÓNIMOS

ANA : Autoridad Nacional del Agua

UNSCH : Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga

## SÍMBOLOS

|            |   |                                |
|------------|---|--------------------------------|
| <b>Kc</b>  | : | Coeficiente de Cultivo         |
| <b>ET</b>  | : | Evapotranspiración             |
| <b>ETc</b> | : | Evapotranspiración del Cultivo |
| <b>ETo</b> | : | Evapotranspiración Potencial   |
| <b>Pm</b>  | : | Probabilidad de Mutación       |
| <b>VA</b>  | : | Variable Aleatoria             |

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción del problema

El análisis computacional de los patrones de flujo en sistemas de riego tecnificado es una investigación enfocada en optimizar el uso del agua en la agricultura, un recurso cada vez más escaso y vital (Gonzales, 2020). La comunidad de Challhualla en Ayacucho, una región con un clima variado y un terreno complejo, representa un caso de estudio ideal para esta investigación.

La problemática central se centra en la ineficiencia de los métodos tradicionales de riego utilizados en Challhualla, estas prácticas, a menudo, conducen a un uso excesivo o inapropiado del agua, lo que repercute negativamente en la productividad agrícola y compromete la sostenibilidad del recurso hídrico. Según un estudio realizado por la ANA (Autoridad Nacional del Agua) en el Informe Técnico N° 0062-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC los terrenos de cultivo en Challhualla, ubicados en el distrito de Lucanas, enfrentan una baja productividad agrícola debido a la falta de una infraestructura de riego adecuada. En estas áreas, no existe un sistema de riego eficiente en las zonas iniciales de las chacras. Además, la presencia de un sistema de riego en mal estado impide el aumento de los rendimientos de los cultivos (Lobos, 2021). Esta situación plantea un desafío crítico relacionado a cómo mejorar las técnicas de riego para asegurar una gestión más eficiente y sostenible del agua.

El objetivo del estudio es analizar los patrones de flujo de agua existentes en las comunidades utilizando herramientas computacionales avanzadas. Esto incluye una evaluación detallada del terreno local, los tipos de suelo, el clima y las prácticas agrícolas. Una parte importante de este análisis es la modelización de diferentes escenarios de riego, teniendo en cuenta variables como la distribución del agua, los diferentes tipos de absorción del cultivo y la evapotranspiración.

La finalidad es identificar áreas donde se puede mejorar la eficiencia del agua a través de la tecnificación del riego. Esto podría incluir la implementación de sistemas de riego, que utilizan menos agua y la distribuyen de manera más uniforme y precisa. Además, se busca desarrollar un modelo predictivo que pueda ser utilizado por los agricultores locales para tomar decisiones más informadas sobre cuándo y cómo regar sus cultivos.

Este estudio es significativo no solo para la comunidad de Challhualla, sino también como un modelo replicable para otras regiones con desafíos similares. Al

abordar la problemática del uso ineficiente del agua en la agricultura, la investigación contribuye a la sostenibilidad del recurso hídrico y a la seguridad alimentaria en áreas rurales. Además, promueve el uso de tecnologías avanzadas en la agricultura, un paso esencial hacia la modernización y la resiliencia frente al cambio climático.

## **1.2 Delimitación del problema**

### **1.2.1 Espacial (geográfica)**

La delimitación espacial se centra en la comunidad de Challhualla, ubicada en el distrito de Lucanas, provincia de Lucanas, dentro del Departamento de Ayacucho. Este ámbito geográfico define el área de estudio para el análisis de los patrones de flujo en el sistema de riego. Además, la localización se sitúa en la hoya hidrográfica del Océano Atlántico, dentro de la cuenca del río Acarí, específicamente en el sector del río Ccachccalla. Este contexto geográfico es fundamental para la comprensión de los patrones hidrológicos y su impacto en las prácticas agrícolas de la región.

### **1.2.2 Temporal**

La investigación se realizará en el año 2023.

### **1.2.3 Temática y unidad de análisis**

La temática se enfoca en el análisis computacional de los patrones de flujo de agua en sistemas de riego tecnificado, esto incluye el estudio de cómo se distribuye el agua, la eficiencia del riego, y los efectos de diferentes métodos de riego en la agricultura.

La unidad de análisis son los patrones de uso del agua a nivel comunitario.

## **1.3 Formulación del problema**

### **1.3.1 Problema general**

¿Cómo pueden desarrollarse y aplicarse técnicas computacionales para analizar y optimizar eficazmente los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho, con el fin de mejorar la eficiencia del uso del agua y la productividad agrícola en la región?

### **1.3.2 Problemas específicos**

- ¿Cómo puede desarrollarse un modelo matemático que refleje de manera precisa los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho?
- ¿De qué manera se pueden utilizar los algoritmos de optimización en el modelo matemático desarrollado para evaluar y mejorar la eficiencia en la distribución del agua en el sistema de riego de Challhualla?
- ¿Cuáles son las estrategias de optimización más efectivas para el sistema de riego de Challhualla que se pueden desarrollar y proponer a partir de los resultados obtenidos en el análisis computacional?

## **1.4 Justificación e importancia**

### **1.4.1 Justificación**

La presente investigación se justifica ya que aborda la optimización del uso del agua en la agricultura, un recurso cada vez más limitado y esencial, ya que la eficiencia en el uso del agua es fundamental para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos y la investigación contribuye significativamente a este objetivo. Además, la investigación tiene un impacto directo en la mejora de la productividad agrícola, dado que, al optimizar los patrones de riego, se puede aumentar los rendimientos de los cultivos en la comunidad de Challhualla, lo que es vital para su desarrollo económico y sustento.

### **1.4.2 Importancia**

Esta investigación es crucial debido a su enfoque en optimizar el uso del agua, un recurso vital y cada vez más escaso. Al emplear tecnologías computacionales avanzadas para analizar y mejorar los sistemas de riego, este estudio permitirá una evaluación de cómo se incrementaría significativamente la productividad agrícola en Challhualla. Además, representa un avance importante en la aplicación de soluciones tecnológicas en la agricultura, estableciendo un modelo que puede ser replicado en otras regiones con desafíos similares.

## **1.5 Limitaciones de la investigación**

Se presentan la siguiente limitación:

- Los hallazgos y conclusiones solo serán específicos para las condiciones del sistema de riego en Challhualla, Ayacucho.

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 *Objetivo general***

Desarrollar y aplicar técnicas computacionales para analizar y optimizar los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho.

### **1.6.2 *Objetivos específicos***

- Desarrollar un modelo matemático sobre los patrones de flujo de agua del sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho.
- Utilizar el modelo matemático desarrollado para aplicar técnicas de análisis computacional mediante algoritmos de optimización, para evaluar la eficiencia en la distribución del agua.
- Desarrollar y proponer estrategias de optimización del sistema de riego basadas en los resultados del análisis computacional.

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Investigaciones internacionales

Díaz (2023) en su investigación *Análisis del comportamiento hidráulico del flujo en una rápida escalonada mediante un modelo matemático en OpenFoam*, tiene como objetivo principal analizar el comportamiento hidráulico del flujo en rápidas escalonadas, estructuras claves en la construcción de presas y canales, usando un modelo matemático en OpenFoam. El objetivo es comprender su complejidad e impacto en la seguridad y eficiencia de los proyectos de ingeniería. Este enfoque implica construir y validar un modelo matemático, comparar sus resultados con datos experimentales y centrarse en identificar patrones de flujo y regiones de recirculación. Los resultados confirman que el modelo puede predecir con precisión estos patrones, incluidas las regiones críticas de recirculación. Esto resalta la importancia de estos modelos en la planificación y seguridad de los proyectos de construcción.

Chica y Hernández (2022) en su investigación *Optimización hidráulica de una laguna de estabilización del cantón La Troncal mediante un estudio hidrodinámico computacional*, se enfocaron en las características hidráulicas de sistemas de tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades. Utilizando ANSYS para la evaluación hidrodinámica de una laguna de maduración, se aplicaron modelos de turbulencia y transporte de trazadores virtuales. El análisis reveló problemas como cortocircuitos y zonas estancadas. Como solución, se propusieron modificaciones usando deflectores longitudinales y transversales al 70% y 90%. Los resultados mostraron una mejora notable en las características hidráulicas, siendo los modelos al 90% los más eficientes. Esto subraya la importancia de optimizar el diseño de estos sistemas para mejorar su eficiencia.

#### 2.1.2 Investigaciones nacionales

Gonzales (2020) en su investigación *Comportamiento hidráulico del sistema de riego por aspersion mediante herramientas computacionales, Paras, Ayacucho 2020*, tuvo como objetivo determinar el cambio en el comportamiento hidráulico del sistema de riego por aspersion usando herramientas computacionales. Los métodos utilizados son el método científico, el tipo de aplicación, el grado de interpretación y el diseño no experimental. Los resultados muestran que la velocidad en la tubería en diferentes turnos es inferior a 0,50 m/s y no cumple con los parámetros de velocidad estándar. Además, se observó que la presión mínima de operación de los aspersores fue menor

a la esperada durante los dos primeros turnos. En comparación, otros turnos estaban por encima de la presión laboral requerida. Como conclusión, se encontró que los cambios en las presiones de los primeros dos turnos eran menores en la práctica comparados con lo proyectado en los programas WaterCad y Epanet.

Rivera (2023) en su investigación *Análisis del comportamiento hidráulico del filtro lento de Piscan – Yamango mediante Ansys CFX*, se centró en analizar el comportamiento hidráulico de un filtro lento de arena en Piscan - Yamango, mediante la modelación numérica para comparar con los valores reales de la estructura. Se empleó un caudal de diseño de 0.88 l/s y se simuló con distintas configuraciones de compuertas. Utilizando el programa Ansys CFX, Las dimensiones reales del filtro se replicaron para las simulaciones 3D. El objetivo es probar la eficiencia del filtro en términos de velocidad de filtración, patrón de flujo y calidad del agua purificada. Los resultados muestran que el modelo numérico representa con precisión el comportamiento del filtro real. En cuanto a la calidad del agua, el número de bacterias se reduce significativamente, pero la dureza y el pH aumentan debido a la falta de mantenimiento del filtro. Aunque se ha demostrado que el filtro es eficaz para eliminar las bacterias, el agua tratada no cumplía con los estándares de consumo humano, lo que subraya la importancia de mantener regularmente la potabilidad del agua..

Espinoza (2021) en su investigación *Diseño de un sistema para riego tecnificado en el poblado de San Juan de Viscas, provincia de Yauyos, Lima 2017* Diseñado para superar los problemas del riego por inundación, caracterizado por la ineficiencia y el tiempo limitado de riego disponible para cada agricultor, afectando con ello la calidad de los cultivos. El método se aplica midiendo las propiedades del suelo, recopilando datos estadísticos y realizando estudios de población, que ayudan a adaptar el sistema al terreno irregular y a las necesidades locales. Se introdujo un sistema de riego tecnificado, controlado por un microcontrolador que controla las señales y el funcionamiento del sistema, una exigencia del cambio climático y las limitaciones de suministro de agua. Además, se utilizaron células solares y paquetes de baterías para aprovechar las condiciones de alta radiación solar de la región durante gran parte del año. Este enfoque no sólo mejora la eficiencia del uso del agua y reduce los requisitos de mano de obra, sino que también permite que el sistema se adapte a diferentes patrones de flujo de agua, ajuste el riego según las condiciones climáticas y la humedad del suelo, gestionando así los recursos hídricos de manera más eficiente y mejorando significativamente la calidad del agua. . una manzana.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Cuencas Hidrográficas**

Las cuencas hidrológicas se consideran unidades morfológicas compuestas por sistemas fluviales y acuíferos subterráneos. La forma y simetría únicas de su relieve y fisiografía, frecuentemente distintas de la estructura geológica subyacente, pueden crear cuencas subterráneas que alteran los flujos superficiales hacia otras áreas hidrológicas. Este fenómeno, denominado “Cuenca Hidrológica”, es crucial para realizar balances hidrológicos, resaltando la importancia de comprender las dinámicas internas de estas cuencas (Sánchez, 2022). Esta comprensión es vital, ya que a veces se llevan a cabo balances hidrológicos sin considerar los intercambios de agua entre cuencas adyacentes. Según World Vision (2004), una cuenca hidrográfica se considera también una cuenca hidrogeológica cuando no hay transferencias significativas de agua subterránea entre ellas, permitiendo que las divisiones topográficas que separan los flujos superficiales también actúen como límites para los flujos subterráneos entre cuencas vecinas, especialmente en cuencas grandes de más de 1000 o 2000 km<sup>2</sup>.

Por otro lado, una cuenca hidrológica se define como un área geográfica delimitada por límites topográficos naturales que captan y canalizan agua hacia un punto común. Este espacio rico en recursos naturales es esencial para los humanos y la vida silvestre y está influenciado por el ciclo hidrológico, la cultura local y su interacción con el medio ambiente. La dinámica constante de formación, regeneración o degradación de estos sistemas está directamente relacionada con la actividad humana y puede contribuir a su preservación o degradación. Se caracteriza por ser una zona rodeada de tierras altas como montañas y cerros que forman sistemas de drenaje que convergen en grandes ríos que eventualmente desembocan en el mar, lagos o ríos más grandes. Los límites de estas cuencas se pueden trazar a lo largo de líneas divisorias en mapas topográficos. Contiene tierra, agua, vegetación y otros recursos y es el lugar de la actividad humana. Todas las infraestructuras y actividades humanas se ubican en cuencas hidrológicas, lo que significa que ningún lugar de la Tierra puede escapar a esta clasificación. (Faustino y Jiménez, 2000).

#### **2.2.1.1 Manejo integrado de cuencas hidrográficas**

El manejo integrado de cuencas hidrográficas es un enfoque de gestión que busca utilizar, manejar y preservar los recursos naturales dentro de las cuencas hidrográficas, considerando las necesidades humanas. Este enfoque pretende alcanzar

Equilibrio entre justicia social, sostenibilidad ambiental, viabilidad económica y desarrollo sostenible. Promueve un equilibrio entre los diferentes usos posibles de los recursos naturales y el impacto de estos usos en la conservación a largo plazo del recurso, lo que requiere una interacción coordinada entre el recurso natural y las comunidades que viven en la cuenca. Esto requiere la aplicación conjunta del conocimiento de las ciencias sociales y naturales. El énfasis en perspectivas integrales, interdisciplinarias y multidisciplinarias fomenta la participación pública activa en todas las etapas del proceso, desde la planificación hasta la toma de decisiones, la implementación, el seguimiento y la evaluación. En este sentido, la gestión de cuencas pretende promover el desarrollo de habilidades locales que permitan la participación efectiva y significativa de todos los involucrados. (Faustino y Jiménez, 2000).

### **2.2.1.2 Gestión de recursos hídricos en cuencas hidrográficas**

La gestión de los recursos hídricos de la cuenca incluye la coordinación de la planificación, el desarrollo y la gestión de los recursos hídricos y terrestres de la cuenca. Este proceso tiene como objetivo optimizar de manera justa los beneficios sociales y económicos sin comprometer la viabilidad de los ecosistemas críticos. Esto incluye la gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas, la protección de los ecosistemas, la prevención de la contaminación y la promoción del uso responsable del agua en la agricultura, la industria y la vivienda. Para gestionar eficazmente los recursos hídricos de la cuenca, la cooperación entre departamentos y áreas de investigación, además de la participación pública directa, es esencial para garantizar el uso sostenible del agua y su protección para las generaciones futuras. (Faustino y Jiménez, 2000).

### **2.2.2 Ciclo Hidrológico**

El ciclo hidrológico ilustra el movimiento ininterrumpido del agua en la Tierra, moviéndose desde la atmósfera hacia el suelo y volviendo a ascender. Este ciclo comprende múltiples etapas, incluyendo la evaporación del agua de superficies como el suelo, los océanos y los cuerpos de agua dulce; la formación de nubes a través de la condensación; la precipitación de agua; la acumulación de agua en la tierra; su traslado superficial y su posterior re-evaporación. Se trata de un sistema de reciclaje constante y perenne, impulsado principalmente por la energía solar, que induce la evaporación, y la gravedad terrestre, que facilita la precipitación y el movimiento superficial del agua (Baldeon, 2016).

Es crucial destacar que la velocidad del agua varía y es impredecible en cada fase del ciclo, tanto en términos de tiempo como de espacio. Además, las características del agua pueden alterarse durante su ciclo. Conforme a Chow et al. (1988), este complejo proceso enfatiza la dinámica y la interconexión de los sistemas naturales de nuestro planeta. Las fases del ciclo hidrológico se detallan a continuación:

- A. Evaporación:** En este proceso, el agua se transforma en vapor desde la superficie de los océanos y la tierra, y mediante la transpiración de seres vivos como las plantas, conocido colectivamente como evapotranspiración debido a la dificultad de distinguir entre la cantidad de agua evaporada y transpirada. Los seres vivos contribuyen aproximadamente con el 10% del total del vapor de agua que asciende a la atmósfera. Adicionalmente, ocurre la sublimación en menor medida, especialmente en las superficies heladas de los glaciares, contribuyendo así al ciclo del agua, aunque su impacto cuantitativo sea limitado (Vásquez, 2000).
  
- B. Precipitación:** Dependiendo de las condiciones ambientales, la atmósfera expulsa agua por condensación, en diversas formas como lluvia y rocío, o por sublimación inversa, produciendo nieve y escarcha. Esta precipitación se deposita en el suelo o en las superficies del suelo. En el caso de la lluvia, la nieve y el granizo (este último se forma cuando las gotas de lluvia se congelan durante el vuelo), la gravedad las fuerza a caer al suelo. Por otro lado, el rocío y la escarcha se forman directamente sobre la superficie, cambiando directamente su condición. (Vásquez, 2000).
  
- C. Infiltración:** Este proceso ocurre cuando el agua que llega al suelo se filtra a través de los poros del suelo y se convierte en agua subterránea. La proporción entre el agua infiltrada y el agua superficial que fluye (escorrentía) está influenciada por factores como la permeabilidad del suelo, la pendiente del terreno y la presencia de vegetación. Parte del agua infiltrada regresa a la atmósfera por evaporación o, en mayor medida, por transpiración de las plantas, que a menudo captan agua a través de sus extensas y profundas raíces. Además, parte del agua subterránea se acumula en acuíferos, acuíferos estancados o fluidos. En algunos casos, debido a las condiciones topográficas, el agua subterránea reaparece en la superficie donde el acuífero se encuentra con el suelo. (Vásquez, 2000).

**D. Escorrentía:** Este término describe las diferentes formas en que el agua líquida se mueve por la superficie terrestre. En climas secos como los desiertos, la escorrentía se convierte en el factor geológico más importante para la erosión y el transporte de materiales. (Vásquez, 2000).

### **2.2.3 Parámetros de una cuenca hidrográfica**

Los parámetros que definen una cuenca se agrupan en tres categorías principales: La primera se enfoca en los aspectos físicos y la configuración geográfica de la cuenca. Las otras dos categorías se concentran en las características del terreno, como la pendiente y la elevación (Baldeon, 2016).

#### **A. Lineales**

Estos parámetros describen las características físicas lineales y superficiales de las cuencas, generalmente medidas en metros o kilómetros.

- **Perímetro:** Se refiere a la longitud total del contorno topográfico de la cuenca, medida desde el punto más bajo o de interés en el curso principal del río (Remenieras, 1974; Linsley 1977).
- **Longitud del Cauce Principal (Lc):** Es la longitud del curso de agua principal, desde su confluencia con el río receptor hasta su origen cerca de la divisoria de aguas. Al agregar la longitud de los cauces secundarios (Lcs), se obtiene la longitud total de los cauces (Ltc). Este valor es esencial para calcular el tiempo de concentración y tiene un impacto significativo en la mayoría de los índices morfométricos, basándose en mapas digitales de la red hidrográfica (Linsley 1977).
- **Longitud Axial (La):** Representa la distancia más larga de un extremo a otro de la cuenca, medida en línea recta a lo largo de su eje principal.
- **Ancho Medio (Am):** Es el ancho promedio de la cuenca, calculado a partir de mediciones en diferentes puntos a lo largo de la misma o como la relación entre el área total y la longitud axial.
- **Longitud Total de Curvas de Nivel:** Suma de las longitudes de todas las curvas de nivel presentes en la cuenca.

- **Orden de Corrientes:** Define los niveles de ramificación de los cursos de agua en la cuenca. Según Horton (1945), un canal de primer orden es un canal sin afluentes, un país de segundo orden que recibe peajes de los afluentes de primer orden; Este sistema clasifica los principales arroyos para reflejar la complejidad de la red hidrológica de la cuenca..
- **Cantidad de Esgurrimiento:** Representa el número total de arroyos naturales de la cuenca, calculado mediante un sistema de información geográfica (SIG) mediante el conteo de los segmentos identificados en el mapa digital. Este número indica el potencial hidrológico de la cuenca, la capacidad de almacenamiento de agua y el tamaño de la red fluvial. Varios afluentes mejoran el sistema de drenaje de la cuenca y contribuyen así al flujo de agua.

## B. Superficiales

Las mediciones de áreas superficiales se realizan utilizando herramientas como planímetros, métodos de redes de puntos, técnicas de integración, descomposición geométrica, o dispositivos electrónicos de digitalización. Estas medidas suelen presentarse en hectáreas (ha) o kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) (Remenieras, 1974).

- **Área de la Cuenca:** Representa el tamaño de la cuenca en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>), delimitada por los contornos del terreno y proyectada sobre un plano horizontal. Este valor se calcula automáticamente digitalizando y creando polígonos de cuenca en un sistema de información geográfica (SIG). Cabe mencionar que el análisis de cuencas, independientemente de su tamaño, variará según las características físicas del terreno y requiere un enfoque hidrológico específico de la propia cuenca. En cuencas más grandes, la capacidad de retención de agua de los canales de los arroyos es significativa y requiere un análisis detallado del carácter de los extremos de los canales. (Tetuno, 1993).

### 2.2.4 Variables morfológicas de una cuenca

- A. **Densidad de Drenajes ( $D_d$ ):** La densidad de drenaje representa el número de cursos de agua por unidad de área en una cuenca y es esencial para comprender la complejidad y evolución de los sistemas de drenaje. Una alta densidad de drenaje significa redes fluviales más complejas y posiblemente más erosión

(Gregory y Walling, 1973). Este indicador refleja la influencia de la topografía, la geología, el suelo, la vegetación y las actividades humanas en la cuenca. El método de cálculo es la longitud total de la vía fluvial dividida por el área total de la cuenca, expresada en kilómetros por kilómetro cuadrado (km/km<sup>2</sup>).

$$D_d = \frac{Ltc}{A}$$

**B. Variación en la Formación de una Cuenca:** A pesar de tener el mismo tamaño y perímetro, dos cuencas pueden diferir en configuración, afectando su comportamiento frente a crecidas.

- **Coefficiente de Compactación ( $K_c$ ):** Este índice compara la forma de la piscina con la de un círculo de la misma área y se calcula como la relación entre la circunferencia de la piscina y la circunferencia del círculo correspondiente. Las piscinas que son casi circulares tienden a concentrar mejor el escurrimiento, mientras que las piscinas que son más largas son más propensas a inundarse.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

- **Coefficiente de Forma ( $K_f$ ):** Calcula la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de su longitud axial, comparando su forma con la de un cuadrado. Un  $K_f$  mayor indica una cuenca más aplanada y potencialmente más rápida en la acumulación de agua de lluvia.

$$K_f = \frac{A}{L\alpha^2}$$

- **Índice de Alargamiento ( $I_a$ ):** Propuesto por Horton (1945), compara la máxima longitud de la cuenca con su ancho máximo.

$$I_a = \frac{L_m}{l}$$

- **Coefficiente de Masividad ( $K_m$ ):** Muestra la relación entre la elevación promedio de la cuenca y su área total.  $K$

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

**C. Relieve de la Cuenca:** Se analiza mediante parámetros que relacionan la altura con el área de la cuenca, como el rectángulo equivalente y la altitud promedio.

- **Altitud Promedio de la Cuenca (H):** Crucial por su impacto en la precipitación y el caudal medio, se calcula con el área entre las líneas de contorno a diferentes altitudes.
- **Rectángulo Equivalente:** Indica las dimensiones de un rectángulo cuya área y perímetro son equivalentes a los de la cuenca.

$$L \times l = A (Km^2)$$

$$2(L + l) = P (Km)$$

Donde:

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

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

### 2.2.5 Caudal

El caudal se refiere a la cantidad de agua (medida en volumen) que fluye a través de una sección determinada de un río en un momento determinado. Se expresa en términos de volumen por tiempo, como litros por segundo (l/s) o metros cúbicos por día ( $m^3/día$ ), que son los formatos más habituales. Medir el caudal ( $Q$ ) de una fuente de agua es esencial porque varía con las condiciones climáticas, aumentando en las estaciones húmedas y disminuyendo en los períodos secos. (Cieza, 2019).

#### 2.2.5.1 Medición de Caudal

Farfán (2022) Explique que el flujo, también conocido como descarga, es una medida de la cantidad de agua que fluye a través de una sección transversal de un río, canal o tubería durante un intervalo de tiempo determinado. Esta medición es esencial para el control y la distribución eficiente del agua. Esto se hace mediante medidores de flujo, que son dispositivos que miden el flujo de agua basándose en principios mecánicos o físicos. En este estudio se utilizó un galvanómetro.

La investigación se ha basado en principios de hidrodinámica para medir el caudal en un canal. Se utiliza la fórmula  $Q = V \times A$ , donde  $Q$  representa el caudal en volumen por tiempo ( $m^3/h$  o l/s),  $A$  es el área de la sección transversal del canal, que en

este caso trapezoidal se calcula como  $\frac{(b+h)t}{2}$ , y V es la velocidad del agua, que indica la distancia recorrida por unidad de tiempo y se calcula con la fórmula  $\frac{d}{t}$ , expresada en unidades de longitud por tiempo (m/s o km/h).

### 2.2.5.2 Hidrometría

La hidrometría se utiliza para determinar varios parámetros, como la fuerza, la velocidad, el caudal y otras propiedades de los líquidos en movimiento. Para esto, se aplican diversos métodos, que incluyen:

- Método volumétrico
- Método del flotador
- Método de vertederos
- Método del correntómetro.

### 2.2.5.3 Diferencia de caudal de entrada y salida

Cieza (2019) explica que la medición se realiza entre dos tramos del canal y si se realiza en varios tramos del canal se llama medición de entrada y salida. Las mediciones se toman en condiciones de operación del canal y reflejan los flujos de corriente.

En cuanto a la Fórmula de Chezy, esta es la primera fórmula de fricción conocida y se utiliza para calcular la velocidad media en una sección de un canal. La fórmula se expresa como:  $V = C\sqrt{RS}$ , donde:

- V representa la Velocidad Media del agua en metros por segundo (m/s).
- C es el Coeficiente de Chezy.
- R es el Radio Hidráulico, en metros (m).
- S es la Pendiente longitudinal del fondo del canal, en metros por metro (m/m).

Esta fórmula se emplea para determinar el caudal que fluye a través de un canal trapezoidal.

## **2.2.6 Flujo**

El flujo es el movimiento de un líquido o gas a través de un espacio o superficie. El flujo es fundamental para campos tan diversos como la ingeniería, la meteorología y la hidrología, y es fundamental para comprender cómo se comportan los fluidos en diferentes condiciones. Este movimiento puede ser constante o variable y a menudo se describe como velocidad, presión y volumen. La investigación del flujo es esencial para desarrollar sistemas eficientes para industrias como la aeroespacial, la automotriz y la civil para garantizar el transporte seguro y eficiente de líquidos y gases. Además, las corrientes de agua desempeñan un papel importante en los sistemas naturales que afectan los patrones climáticos, las corrientes oceánicas y los ciclos del agua. (Cieza, 2019).

### **2.2.6.1 Tipos de Flujo**

El flujo en un canal se clasifica como permanente o no permanente según la variabilidad temporal de sus parámetros, como la profundidad, velocidad y área de sección transversal. En un flujo permanente, estas variables no cambian con el tiempo en una sección específica del canal, lo que implica que el estado del flujo es constante y predecible. Por otro lado, en un flujo no permanente, uno o más de estos parámetros varían significativamente, reflejando un comportamiento dinámico donde el estado del flujo puede alterarse por factores como cambios en el caudal, las condiciones meteorológicas o intervenciones humanas en el cauce del río. Estas diferencias son cruciales para la ingeniería hidráulica y la gestión de recursos hídricos, ya que afectan el diseño de estructuras y la planificación de estrategias de manejo del agua. Esto se representa matemáticamente donde la derivada de cada parámetro respecto al tiempo es igual a cero:

$$\frac{dA}{dt} = 0; \frac{dV}{dt} = 0; \frac{dY}{dt} = 0$$

Por otro lado, en la mayoría de los estudios sobre canales abiertos, se analiza el flujo bajo condiciones permanentes. No obstante, si los cambios temporales en el flujo son significativos, este debe ser considerado como no permanente (Rodríguez, 2008)

### **2.2.7 Ecuación de continuidad**

Se basa en la ley de conservación de la masa, que establece que en un canal o tubería, independientemente de su forma o tamaño, la cantidad de fluido que entra por

un extremo debe ser igual a la cantidad de fluido que sale por el otro extremo y siempre que exista No hay desviación en el camino, esto significa que el volumen de líquido en esta línea permanece constante. (González, 2014).

$$Q = S \times V$$

En donde:

Q: es el caudal dado en  $m^3/s$

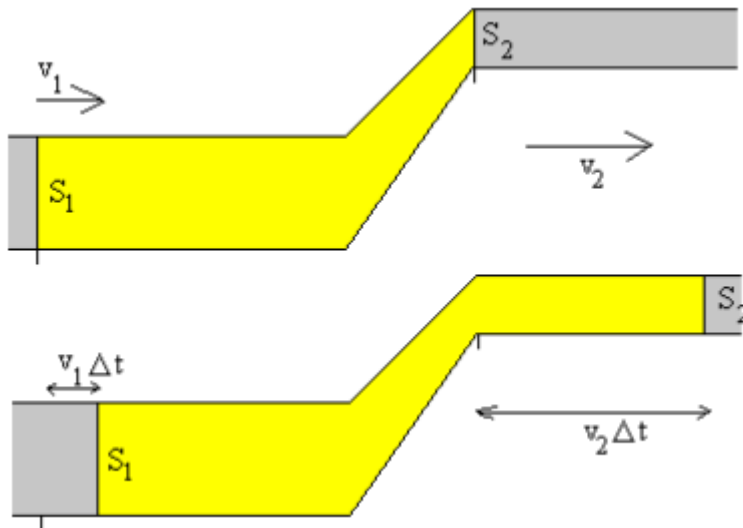
S: La superficie transversal de la conducción  $m^2/s$

V: la velocidad de fluido  $m/s$

La Figura 1 ilustra un sistema de flujo genérico.

**Figura 1**

*Ecuación de continuidad - Conservación de la energía en los fluidos*



Nota. Elaboración propia

Donde se verifica la condición de conservación de masa, expresada como  $M = M_1 + M_2$ , y asumiendo que la densidad permanece invariable, entonces:

$$S_1 V_1 = S_2 V_2$$

Se le denomina a esta fórmula como Ecuación de Continuidad.

### 2.2.8 Ecuación de Conservación de Energía

Esta fórmula tiene en cuenta los cambios en la energía potencial debido a la gravedad y relaciona la presión, la velocidad y la altura entre dos puntos en un fluido con flujo laminar constante y densidad uniforme. (González, 2014).

$$\rho \frac{DE}{Dx} + p(\nabla \vec{v}) = \frac{\partial q}{\partial t} - \nabla q + \rho F$$

Donde:

$E$  = Energía interna

$q$  = Fuente de calor

$\nabla q$  = Pérdida de calor por conducción

### 2.2.9 Navier Stokes

La ecuación de Navier-Stokes describe el comportamiento de la velocidad del flujo de un fluido viscoso incompresible en la región de deflexión cero. La ecuación representa la conservación de la masa asumiendo la incompresibilidad del fluido (a partir de un estado inicial específico). (Cruz et al., 2020).

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} + p \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \theta \nabla \vec{v}$$

Donde:

$\theta$  = Coeficiente de viscosidad dinámica

### 2.2.10 Numero de Courant

El número de Courant, también conocido como número de Courant-Friedrichs-Lewy o número CFL(C), se refiere a las condiciones requeridas para la convergencia utilizando ciertos algoritmos para resolver ecuaciones diferenciales parciales. Esta condición significa que los intervalos de tiempo en la simulación deben permanecer por debajo de un cierto valor para evitar resultados de simulación erróneos. (Bhaskaran, 2018).

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x}$$

Donde:

C: Numero de Courant

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo  $s$

$\Delta x$ : Intervalo de espacio  $m$

$u$ : Velocidad  $m/s$

### **2.2.11 Error Porcentual**

Se refiere a la diferencia entre una medición obtenida en un experimento o prueba y un valor que se cree que es exacto o verdadero. Esta diferencia puede ser positiva o negativa dependiendo de si el valor medido es mayor o menor que el valor real. Suele expresarse como porcentaje o en la misma unidad de medida. Utilice la siguiente fórmula para calcularlo. (Díaz,2022).

$$Ep = \left| \frac{Vt - Vv}{Vt} \right| \times 100\%$$

Donde:

$Ep$ : Error porcentual.

$Vt$ : Valor teórico.

$Vv$ : Valor experimental.

### **2.2.12 Modelos Matemáticos**

#### **2.2.12.1 Modelos de Regresión Lineal/Múltiple**

Damodar N. y Dawn C. (2010) explican que el concepto de "regresión" propuesto por primera vez por Francis Galton. Galton sugirió en un artículo que, independientemente de si los padres son altos o bajos, la altura de los niños tiende a acercarse a la altura promedio de la población. Galton denominó este fenómeno el "regreso a la mediocridad" y luego fue confirmado por Carl Pearson. Pearson, amigo de Galton, analizó los registros de altura de más de mil familias y descubrió que los hijos de padres altos tendían a ser más bajos que ellos, mientras que los hijos de padres bajos eran más altos que ellos. Básicamente, observamos que tanto los niños más altos como los más bajos convergen a la altura promedio de la población.

De acuerdo con Pat Fernandez, Martínez Menchaca, Pat Fernández y Martínez Luis (2013), la regresión es un pilar estadístico moderno que implica el análisis

simultáneo de dos o más variables interrelacionadas. La variable dependiente, denotada como  $Y$ , y las variables independientes  $X_i$  forman parte de una ecuación:

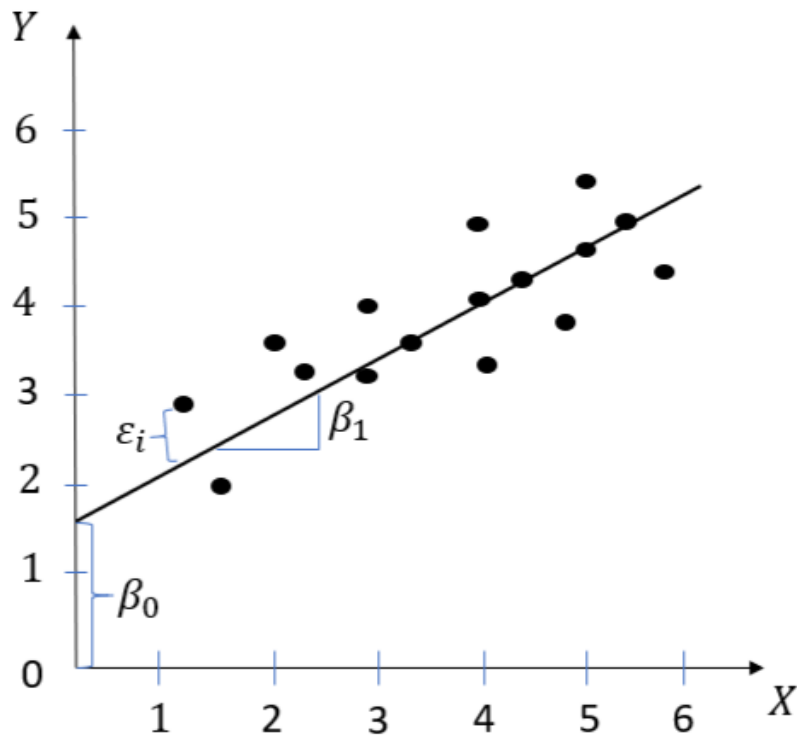
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$$

Las variables independientes pueden ser tanto métricas como cualitativas.

Según García, Morales Serrano y González Cavazos (2013), el proceso de análisis de regresión se divide en varios pasos. Comienza con la identificación de áreas problemáticas o de oportunidad, seguida de la selección de variables dependientes e independientes, la recopilación de datos y el análisis descriptivo para comprender las relaciones entre las variables. A continuación, seleccione un método de análisis, calcule los coeficientes del modelo de regresión múltiple e identifique posibles problemas de colinealidad o multicolinealidad. Luego realice pruebas globales y ad hoc de los coeficientes del modelo para verificar la coherencia de los supuestos del modelo, interpretar los coeficientes y hacer predicciones..

Este enfoque proporciona una identificación y resolución óptimas de problemas, y la selección de variables se clasifica como completamente especificada, completamente no especificada y mixta. Las técnicas de selección incluyen selección hacia adelante, eliminación hacia atrás y selección por pasos para garantizar que las variables más relevantes se incluyan en el modelo..

**Figura 2**  
*Regresión lineal y su interpretación geométrica*



Nota. Tomado de (Maydana, 2019)

### **A. Condiciones para la regresión lineal múltiple**

Los modelos de regresión lineal múltiple deben cumplir ciertos requisitos adicionales a los modelos lineales simples, enfatizando la independencia de las variables predictoras para evitar problemas de colinealidad o multicolinealidad. La colinealidad ocurre cuando la variable predictora tiene una relación lineal directa con otra variable predictora o variables, o es una combinación lineal de otras variables predictoras, lo que dificulta determinar el efecto específico de cada variable sobre la variable dependiente y aumenta significativamente la regresión estimada. coeficiente. . número de variaciones. Además, pequeños cambios en los datos pueden provocar grandes fluctuaciones en las estimaciones de los coeficientes. Aunque la colinealidad perfecta, representada por un coeficiente de correlación de 1 entre predictores, es rara, la colinealidad aproximada o la multicolinealidad imperfecta son más comunes.

Según Tobergte y Curtis (2013), para que los datos sean adecuados para estimaciones de mínimos cuadrados ordinarios, las variables independientes deben mostrar variabilidad y no mantener una relación lineal constante entre sí. No existe un método específico para determinar colinealidad entre predictores; sin embargo, se han

desarrollado diversas reglas prácticas para evaluar su impacto en los modelos de regresión. Algunas de estas incluyen:

- Verificar si un alto coeficiente de determinación  $R^2$  coincide con predictores no significativos, lo que puede sugerir colinealidad.
- Crear una matriz de correlación para analizar las relaciones lineales entre cada par de predictores, teniendo en cuenta que correlaciones bajas no descartan la posibilidad de multicolinealidad, especialmente cuando involucra a tres o más variables.
- Usar medidas como la Tolerancia (TOL) y el Factor de Inflación de la Varianza (VIF), donde el VIF se calcula como el inverso de la TOL, para cuantificar el grado de multicolinealidad de cada predictor.

El Factor de Inflación de la Varianza (VIF) y la Tolerancia son medidas utilizadas para evaluar la colinealidad en los modelos de regresión lineal múltiple. Se define el VIF para un predictor  $X_j$  como  $VIF_{\beta_j} = \frac{1}{1-R^2}$ , donde  $R^2$  es el coeficiente de determinación obtenido de la regresión de  $X_j$  sobre los otros predictores. La Tolerancia, que es el inverso del VIF, se calcula como  $Tolerancia_{\beta_j} = \frac{1}{VIF_{\beta_j}}$ .

Los umbrales comúnmente utilizados para el VIF son:

- VIF = 1 indica ausencia de colinealidad.
- VIF entre 1 y 5 sugiere una colinealidad moderada que podría afectar la regresión.
- VIF entre 5 y 10 es motivo de preocupación debido a la colinealidad significativa.
- Un valor de Tolerancia entre 1 y 0.1 es considerado aceptable.

Para abordar la colinealidad entre predictores, una estrategia es excluir uno de los predictores redundantes, lo cual generalmente no afecta la capacidad predictiva del modelo debido a la naturaleza redundante de la información proporcionada. Otra opción es combinar los predictores colineales en uno solo, aunque esto puede complicar la interpretación de los resultados.

La colinealidad puede llevar a una interpretación errónea de las relaciones causales al atribuir efectos a variables equivocadas. La robustez, el principio que favorece modelos más simples con menos variables predictivas y suposiciones, es fundamental para la claridad y eficacia del modelo. Además, es fundamental que cada variable predictora numérica mantenga una relación lineal con la variable de respuesta  $Y$  mientras se controlan otras variables predictoras, y esto se puede probar de manera

aproximada mediante el análisis residual del modelo. Si la relación es adecuadamente lineal, debería distribuirse aleatoriamente alrededor de cero. Tobergte y Curtis (2013) enfatizan que el modelo general debe expresar claramente una relación lineal entre los parámetros a estimar.

La distribución normal de los residuos es un requisito clave en los modelos de regresión, donde los residuos deben estar normalmente distribuidos con una media de cero. Esto se verifica utilizando histogramas, cuantiles normales o pruebas de normalidad estadística. En cuanto al error poblacional, debe ser independiente de las variables explicativas  $x_1, x_2, \dots, x_k$  y distribuirse normalmente con media cero y varianza  $\sigma^2: u \sim N(0, \sigma^2)$  Aunque el supuesto de normalidad puede omitirse en muestras grandes, su inclusión permite realizar pruebas de hipótesis más precisas y aprovechar la eficiencia del Método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), que posee la menor varianza entre todos los estimadores insesgados.

Una herramienta utilizada para probar la normalidad es la prueba de Shapiro-Wilk, que es efectiva tanto en muestras pequeñas como grandes. Esta prueba evalúa si los datos provienen de una distribución normal. Se define el estadístico de prueba  $W$ , donde  $x(i)$  es el valor en la  $i$  –ésima posición de la muestra ordenada,  $\bar{x}$  es la media de la muestra, y las constantes  $a_i$  se calculan a partir de valores medios ordenados y una matriz de covarianzas.

En relación con la homocedasticidad, es esencial que la varianza de los residuos sea constante. Esto se verifica visualmente a través de la representación gráfica de los residuos, buscando una dispersión uniforme sin patrones específicos. La prueba de Breusch-Pagan es una técnica común para contrastar la homocedasticidad, rechazando la hipótesis nula de homocedasticidad si el estadístico de prueba es superior al valor crítico o si el valor  $p$  es menor que  $\alpha$ .

Por último, la independencia de las observaciones es crucial, especialmente en series temporales donde los datos pueden mostrar autocorrelación. Esto se verifica con la prueba de Durbin-Watson, entre otras técnicas, observando los residuos ordenados en el tiempo para detectar patrones que indican autocorrelación.

### **2.2.12.2 Árboles de regresión**

Métodos predictivos como la regresión lineal o polinómica crean modelos unificados que se aplican a toda la muestra. Estos modelos enfrentan dificultades al

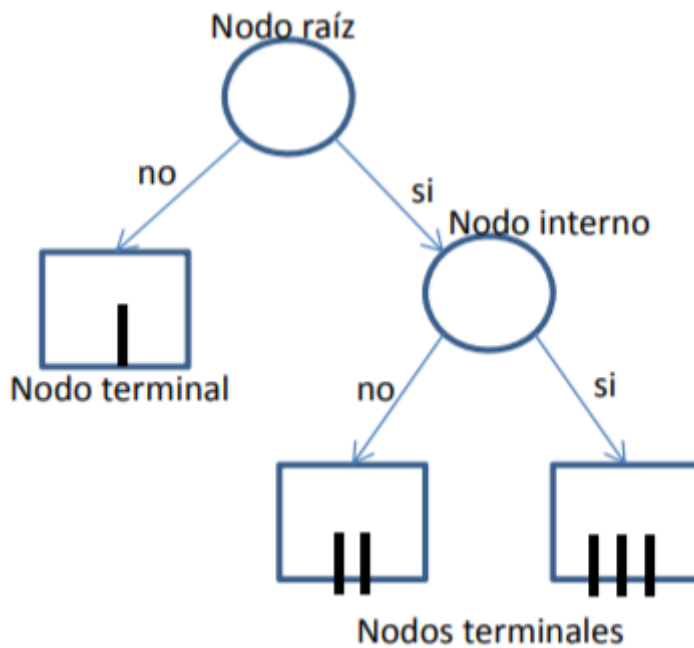
Tratar con múltiples variables predictivas con interacciones complejas y no lineales, lo que dificulta representar relaciones precisas entre variables. Para resolver este problema, existen métodos de ajuste no lineales, como funciones escalonadas y splines, que permiten el ajuste local pero son difíciles de interpretar. Alternativamente, los métodos basados en árboles (métodos supervisados no paramétricos) simplifican la partición del espacio de predicción en regiones manejables que facilitan el manejo de las interacciones. (Maydana, 2019)

En el lenguaje de programación R, varios paquetes facilitan la implementación de modelos basados en árboles:

- `tree` y `rpart` ofrecen funciones para crear y visualizar árboles de regresión y clasificación.
- `rpart.plot` proporciona herramientas para visualizar detalladamente modelos desarrollados con `rpart`.
- `randomForest` y `gbm` son paquetes para algoritmos de bosques aleatorios y boosting, respectivamente.
- `C50` incluye algoritmos para árboles de clasificación C5.0.

En términos de predicciones, luego de construir el árbol, las observaciones se agrupan en nodos terminales. Para predecir nuevas observaciones, se rastrea el árbol en función de las variables predichas hasta llegar a un nodo terminal. Normalmente, el valor predicho es la media de los valores observados de las variables de respuesta en ese nodo, pero también se pueden utilizar otras estadísticas como la media o el cuantil. Algunos de los métodos principales son CHAID, QUEST y CART, el último de los cuales

es particularmente notable por su relativa simplicidad e implementación en R. **Figura 3**  
*Elementos del Árbol de regresión*

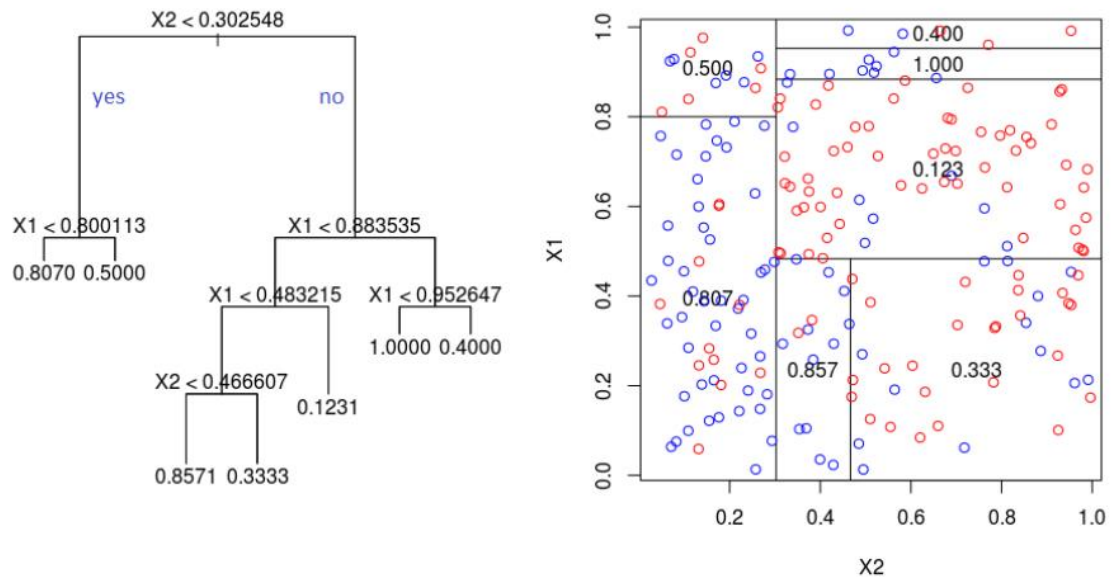


*Nota.* Tomado de (Maydana, 2019)

La figura ilustra que el árbol consta de tres niveles de nodos: un nodo raíz en la cúspide, un nodo interno en el segundo nivel y tres nodos terminales distribuidos entre el segundo y tercer nivel. Tanto el nodo raíz como el nodo interno se dividen en dos nodos hijos, denominados nodos izquierdo y derecho, en el nivel siguiente.

Heredia, B y Balzarini, M (2010) Describe los árboles de clasificación y regresión, también conocidos como algoritmo CART (árboles de clasificación y regresión). Estos modelos son métodos multivariados no paramétricos que ayudan a identificar y cuantificar las variables X que tienen mayor efecto sobre la variable Y. El modelo CART divide recursivamente los datos según criterios de partición en variables explicativas para formar subconjuntos progresivamente más homogéneos. Cada árbol se crea dividiendo el nodo raíz que inicialmente contiene todos los datos utilizando un algoritmo de división estándar basado en el tamaño del nodo resultante o la variabilidad de los datos dentro del nodo. Un árbol de regresión o clasificación consta de un conjunto de reglas creadas mediante un proceso de ajuste que implica descomposición binaria recursiva. En cada etapa de la partición, el algoritmo evalúa todos los regresores y selecciona la variable que mejor divide los datos en dos subgrupos que son más homogéneos entre sí y más heterogéneos entre sí.

Modelo de algoritmo CART

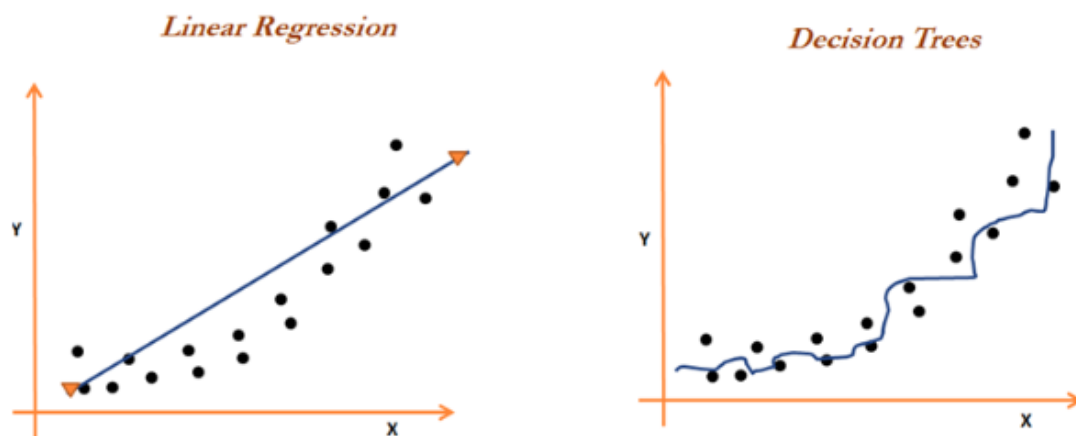


Nota. Tomado de (Maydana, 2019)

Según la figura 4, los árboles de regresión se utilizan para predecir variables de respuesta continua. Estos clasifican las observaciones según los umbrales establecidos por las variables regresoras, utilizando la suma de cuadrados de la respuesta para medir la heterogeneidad dentro de cada partición. Similar a los árboles de clasificación, la heterogeneidad de las observaciones dentro de un nodo debe ser menor que la heterogeneidad entre observaciones de diferentes nodos.

Figura 5

Regresión lineal y decisión de árbol



Nota. Tomado de (Maydana, 2019)

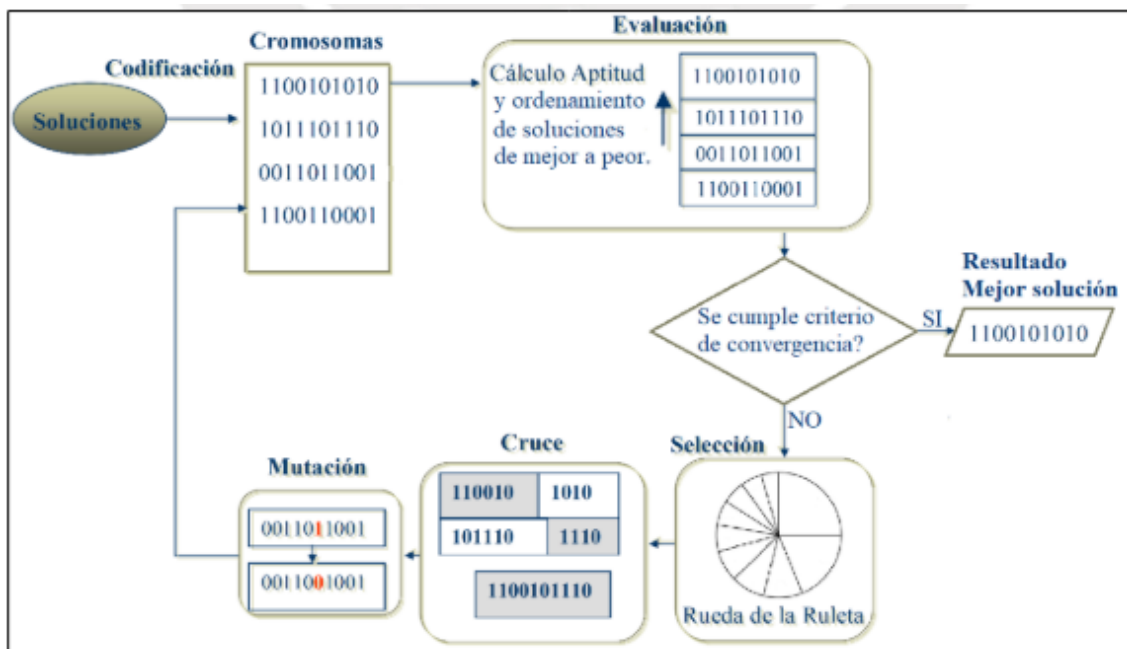


distintas variantes de un gen se conocen como alelos. El cromosoma  $S$  se refiere al genotipo de un individuo; una solución potencial a un problema representada por una cadena  $S$  se llama fenotipo.

Según Mitchell (1999), un algoritmo genético es una técnica de optimización inspirada en la evolución darwiniana que puede aplicarse a una variedad de problemas. El algoritmo simula el proceso de selección natural para elegir la mejor solución al problema y utiliza operadores genéticos como el cruce y la mutación para generar una nueva generación de soluciones. De manera similar a la evolución biológica, los cromosomas contienen la información genética de un organismo. En el contexto de un problema, cada solución se representa como un individuo y el cromosoma correspondiente es el vector de datos que codifica esa solución. El algoritmo comienza con un conjunto inicial de soluciones y, mediante generación continua, reemplaza este conjunto de soluciones por otras nuevas, priorizando las soluciones más eficientes para influir en el siguiente conjunto. Como señaló Mitchell (1999), este proceso iterativo mejora continuamente la solución hasta que se alcanza un criterio de convergencia o un límite algebraico predeterminado.

**Figura 7**

*Esquema de modelo de algoritmo genético simple*



*Nota.* Tomado de (Borda, 2020).

Inicialmente, el algoritmo genético crea una población aleatoria de soluciones, de la cual se seleccionan las más prometedoras, dándoles una mayor probabilidad de ser elegidas. Las soluciones seleccionadas son luego combinadas y alteradas para

formar una nueva población, la cual debería mostrar mejoras o, al menos, mantener la calidad de la población anterior. Este método busca, por tanto, converger hacia las soluciones óptimas, y el proceso general de un algoritmo genético se ilustra en la Figura 7.

### **A. Individuo genético**

En el contexto de los algoritmos genéticos, un individuo genético consiste en un conjunto de parámetros que configuran una solución posible a un problema. Estos parámetros son conocidos como genes, que en este caso particular se representan por números reales (Gestal et al., 2010). Cada gene de un individuo genético se denota como  $G_{ij}$ , donde  $j$  es el índice del gen en el individuo  $i$ .

### **B. Población genética inicial**

Esta población es el primer conjunto de individuos genéticos, cada uno de los cuales es una solución potencial al problema. Para generar el primer individuo genético de la población, a cada gen se le debe asignar un rango de valores y un valor aleatorio para cada gen en el rango seleccionado. Este proceso se repite para todos los individuos de la población utilizando los rangos determinados para los genes del primer individuo. (Gestal et al., 2010).

Cada individuo genético se evalúa mediante un valor de aptitud, que mide cuán adecuada es la solución representada por el individuo al problema. Esta aptitud se expresa como  $A_i$  para el individuo genético  $i$ .

En un escenario de minimización, los individuos genéticos se ordenan de acuerdo a su aptitud, de menor a mayor, lo que implica que las mejores soluciones son aquellas con menor valor de aptitud (Gestal et al., 2010).

### **C. Generación de soluciones potenciales iniciales**

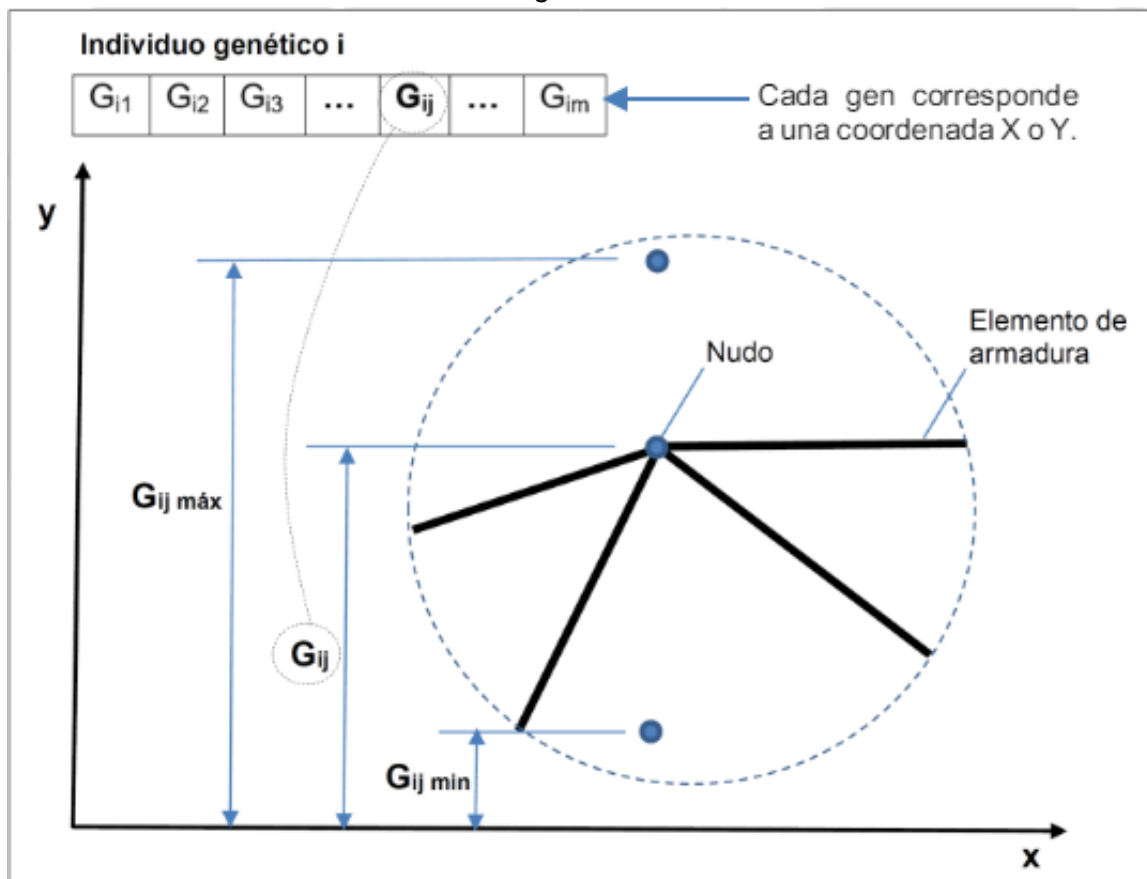
Para optimizar el peso de las estructuras de acero 2D, cada solución potencial (llamada individuo genético) está determinada por un conjunto de parámetros. En este caso, son las coordenadas X e Y de determinados puntos o nodos clave de la estructura. Los valores de las coordenadas de estos nodos se ajustarán durante el proceso de optimización, inicialmente dentro de unos límites predefinidos establecidos para cada coordenada. Estos límites se establecen de forma independiente para cada coordenada. Para generar los valores de coordenadas iniciales, se eligen aleatoriamente dentro de límites fijos. Este proceso se aplica por igual a todas las soluciones, asegurando que todos los

individuos genéticos comiencen con valores de nodos en el mismo rango definido. En la visualización, como la Figura 8, el valor del gen  $G_{ij}$  representa la coordenada Y de un nudo, seleccionado aleatoriamente entre un mínimo  $G_{ij \text{ min}}$  y un máximo  $G_{ij \text{ máx.}}$ .

Este enfoque no solo es pertinente para tu trabajo con estructuras metálicas, sino que también puede ofrecer perspectivas adicionales para el modelado y análisis en tus otros proyectos, como la optimización de sistemas de extracción de agua o la mejora de la calidad de la energía en instalaciones fotovoltaicas, donde la precisión en la configuración inicial puede ser crucial para el rendimiento general del sistema.

**Figura 8**

*Límites de coordenadas en un individuo genético*



Nota. Tomado de (Borda, 2020).

#### D. Elitismo

El elitismo es una estrategia dentro de los algoritmos genéticos que implica la selección y transferencia de los mejores individuos de una generación a la siguiente. Se debe especificar el número de individuos destacados, denotado

actual. Estos individuos se copian directamente a la nueva generación, asegurando la preservación de las soluciones de alta calidad (Gestal et al., 2010)

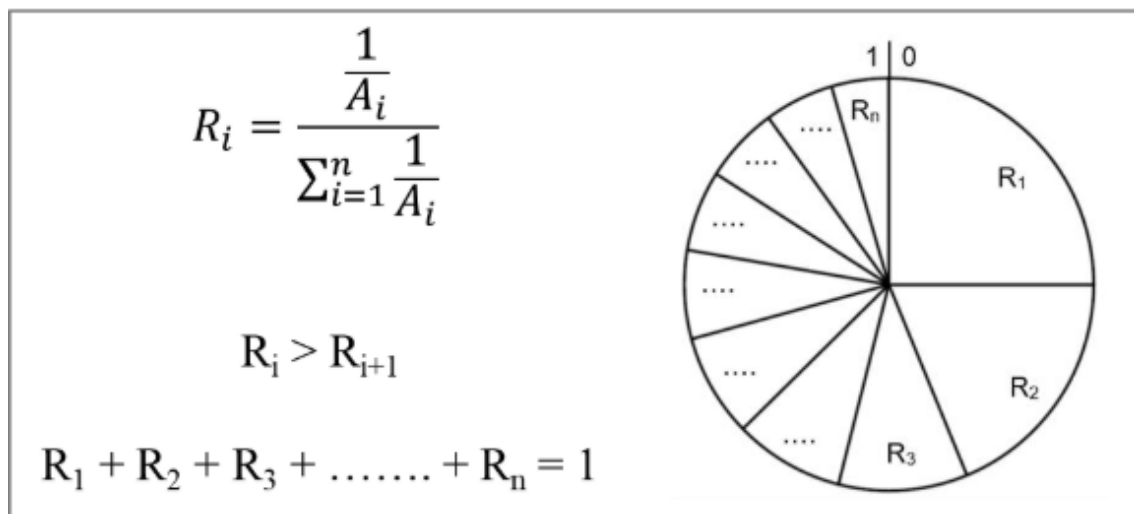
### E. Selección de individuos para el cruce

Formar el resto de la población de próxima generación, a partir de la población actual según 2.1.6. para los operadores genéticos descritos en la sección, se seleccionan individuos adicionales que tendrán la oportunidad de participar en cruces. Este proceso de selección se realiza mediante el método de la ruleta que es muy adecuado a las preguntas formuladas. En esta técnica, a cada persona se le asigna una parte de la rueda que es inversamente proporcional a su condición física, consiguiendo que todos los puntos sumen uno (Gestal et al., 2010). El desglose se muestra en la figura. Figura 9.

- **R<sub>i</sub>**: Proporción de la ruleta asignada al individuo genético en la posición *i*.

**Figura 9**

*Ruleta de selección*



*Nota.* Tomado de (Borda, 2020).

Para elegir un individuo, se genera un número aleatorio entre 0 y 1 mediante una distribución uniforme. Luego, se procede a revisar las proporciones asignadas a cada individuo en la población, acumulándolas sucesivamente hasta que la suma acumulada sobrepase el número aleatorio generado.

El individuo seleccionado es aquel cuya acumulación de proporciones excede primero el valor aleatorio (Gestal et al., 2010).

## F. Cruce

El operador de cruce se emplea en dos individuos genéticos previamente seleccionados. Para decidir si se procederá al cruce, se establece una probabilidad de cruce, generalmente cerca del 90%, subrayando la frecuencia deseada de esta operación (Gestal et al., 2010).

Se denomina  $P_c$  a la Probabilidad de cruce. Para cada par de individuos, se genera otro número aleatorio entre 0 y 1. Si este número es menor que  $P_c$ , se realiza el cruce; si es mayor, se transfiere el mejor de los dos individuos a la siguiente generación.

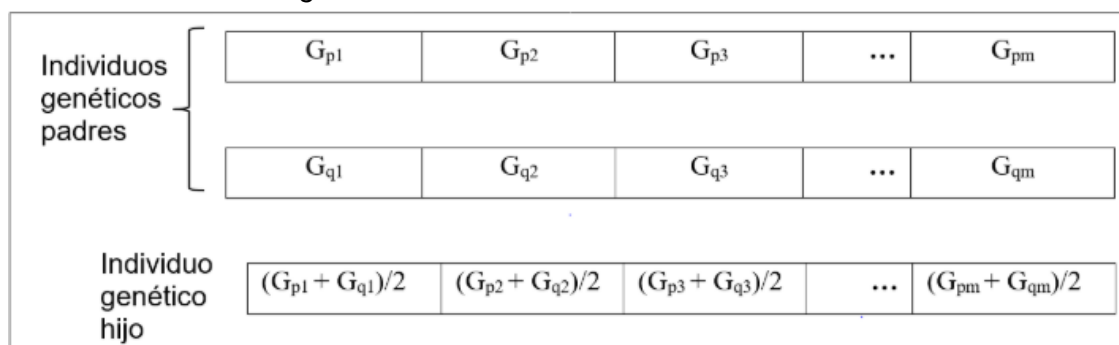
- **VA:** Variable Aleatoria
- **Si  $VA < P_c$   $VA < P_c$ :** Se realiza el cruce entre el par de individuos genéticos.
- **Si  $VA > P_c$   $VA > P_c$ :** Se copia el mejor de los individuos seleccionados a la siguiente generación.

El proceso de hibridación implica la recombinación genética de dos individuos seleccionados para producir descendencia que pasará a formar parte de una nueva generación. En este caso, se encontró que un método de cruce llamado "cruce medio" para genes representados como números reales era el más adecuado para el problema. En este tipo de cruce, los genes de la descendencia se forman a partir del promedio de los genes de los dos padres.

- $G_{pj}$ : Gen  $j$  del individuo genético seleccionado  $p$ .
- $G_{qj}$ : Gen  $j$  del individuo genético seleccionado  $q$ .
- $(G_{pj} + G_{qj}) / 2$ : Gen  $j$  del hijo resultante de los individuos  $p$  y  $q$ .

**Figura 10**

*Cruce de 2 individuos genéticos*



*Nota.* Tomado de (Borda, 2020).

## G. Mutación

Después de crear un descendiente, se decide si aplicar o no el operador de mutación. Para esto, se establece una probabilidad de mutación que generalmente varía entre 0.5% y 2% (Gestal et al., 2010).

- **Pm** = Probabilidad de mutación.

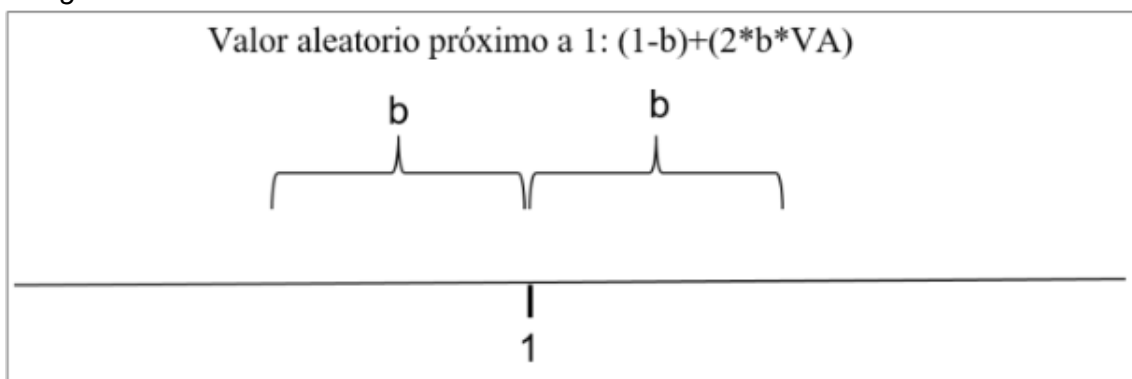
Se genera un número aleatorio entre 0 y 1 mediante una distribución uniforme. Si este número es menor que la probabilidad de mutación  $Pm$ , entonces se realiza la mutación en el descendiente. Si el número es mayor, el descendiente no sufre mutaciones (Gestal et al., 2010).

- **VA** = Variable aleatoria uniforme entre 0 y 1.
- **Si  $VA < Pm$** : Se muta el individuo genético descendiente.
- **Si  $VA > Pm$** : El individuo genético descendiente permanece sin cambios.

Se elige aleatoriamente un gen particular para ser mutado, y la mutación implica multiplicar el gen por un valor aleatorio cercano a 1, cambiando así su expresión (Gestal et al., 2010), como se muestra en la Figura 10.

**Figura 11**

*Rango de Mutación*

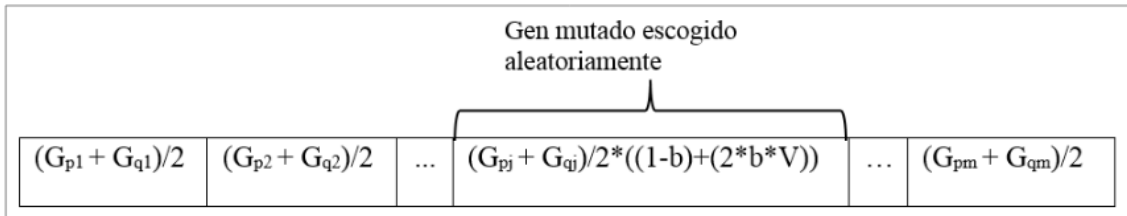


*Nota.* Tomado de (Borda, 2020).

Donde:

$b$  = Representa la diferencia de 1 entre los valores mínimo y máximo en el rango permitido para la mutación.

**Figura 12**  
Mutación del algoritmo genético



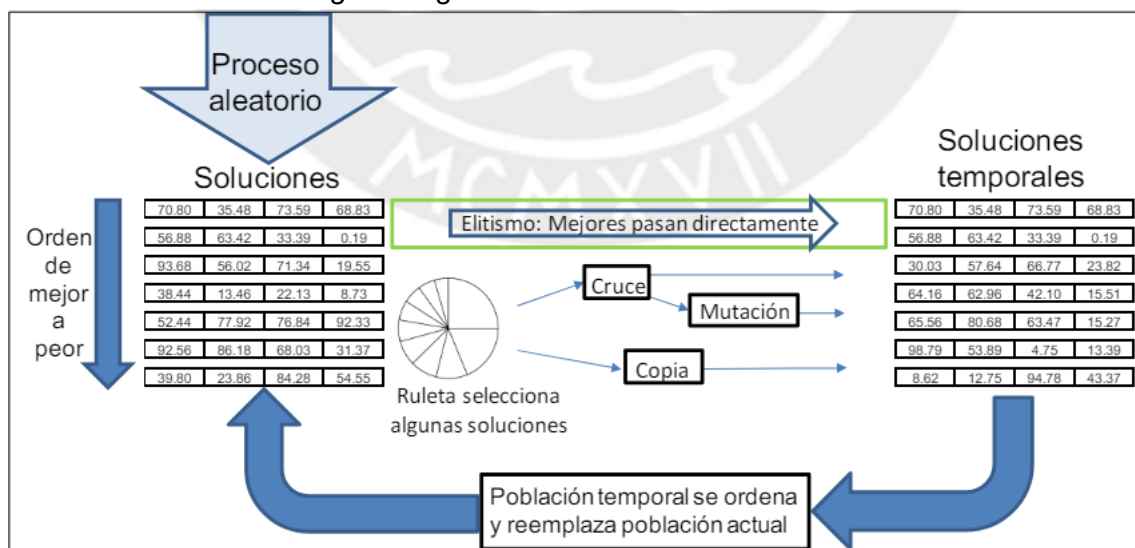
Nota. Tomado de (Borda, 2020).

### 2.2.13.2 Proceso del algoritmo en el programa

El objetivo del programa es optimizar el peso de una estructura de acero bidimensional ajustando las coordenadas "X" y/o "Y" de ciertos puntos clave de la estructura, llamados nodos. El usuario define qué nodos y el rango de variación de estas coordenadas. El programa utiliza un algoritmo genético para explorar diferentes alternativas para las coordenadas de los nodos seleccionados y puede realizar ajustes. El algoritmo evalúa la idoneidad de cada posible solución en función del peso de la estructura, que es calculado automáticamente por el programa durante el análisis de la viga y el diseño de la estructura.

La Figura 13 ilustra el funcionamiento general del algoritmo genético empleado por el programa.

**Figura 13**  
Funcionamiento de un algoritmo genético



*Nota.* Tomado de (Borda, 2020).

### **2.2.13.3 Programación lineal**

La programación lineal (LP) es una de las áreas fundamentales de la investigación de operaciones, y esta categoría abarca todos los modelos de optimización donde la función objetivo y las restricciones son lineales con respecto a las variables de decisión. Debido a su simplicidad, los modelos de programación lineal se utilizan a menudo para resolver una variedad de problemas del mundo real en campos como la ingeniería y las ciencias sociales, proporcionando importantes beneficios y ahorros de costos para empresas y organizaciones. Los modelos de programación lineal asumen el comportamiento lineal de las variables de decisión y pueden aplicarse a la función objetivo y las restricciones del problema. Por tanto, la programación lineal es una de las herramientas más utilizadas en la investigación de operaciones, la cual facilita los cálculos y generalmente proporciona una buena representación de la realidad (Noya y Sutizal, 2023).

## **2.3 Marco conceptual**

### **2.3.1 Sistemas de Riego Tecnificado**

Los sistemas de riego tecnificado proporcionan el agua necesaria para el desarrollo y crecimiento de los cultivos durante todo el ciclo de siembra a través de una red de tuberías distribuidas eficientemente por la superficie de la finca. Este método de riego mejorado puede optimizar el uso del agua, promover el crecimiento saludable de los cultivos y mejorar la eficiencia de la gestión del agua, lo cual es esencial para la permacultura y la conservación del agua en entornos agrícolas (Manrique, 2022).

### **2.3.2 Patrones de Flujo de Agua**

Los patrones de flujo son las características y el comportamiento del movimiento y distribución del agua en un entorno determinado, como un sistema de riego o un ecosistema natural. Estos modelos incluyen la dirección, la velocidad y el volumen del agua y son esenciales para comprender cómo fluye el agua y su uso. En la agricultura, los patrones de flujo de agua son esenciales para garantizar que el agua llegue a las plantas de manera uniforme y se adapte a sus necesidades, ya que el análisis y la optimización de estos patrones pueden mejorar la gestión del agua, aumentar la eficiencia del uso de los recursos y apoyar las prácticas de permacultura. (Spinosa Egipto, 2021).

### **2.3.3 Análisis Computacional**

El análisis computacional es un método que utiliza algoritmos y modelos matemáticos para procesar y analizar grandes cantidades de datos para extraer patrones, tendencias y conclusiones importantes. Esta tecnología está respaldada por software avanzado y hardware especializado para gestionar y procesar información de determinadas formas. Exactamente. En campos como la ciencia, la ingeniería y la economía, el análisis computacional es esencial para predecir comportamientos, optimizar procesos y tomar decisiones basadas en datos. Su capacidad para abordar la complejidad y múltiples variables lo hace indispensable en la investigación moderna, brindando soluciones innovadoras y mejorando la comprensión de fenómenos complejos en todas las disciplinas (Valero, 2019).

### **2.3.4 Optimización de Recursos Hídricos**

La optimización de los recursos hídricos es el proceso de mejorar la eficiencia y eficacia del uso y gestión del agua. Este enfoque tiene como objetivo equilibrar la oferta y la demanda de agua, reducir el desperdicio y garantizar el uso sostenible del agua, especialmente para la agricultura, la industria y el consumo. Las estrategias y tecnologías de optimización, incluida la conservación del agua, el riego eficiente, la recarga de acuíferos y la gestión de cuencas, son esenciales para combatir el cambio climático, aumentar la demanda de agua y proteger los ecosistemas, y su implementación contribuye a la sostenibilidad ambiental y social en el desarrollo económico que ha propiciado importantes inversiones. . inversión (mezquita, 2022).

### **2.3.5 Sostenibilidad en Agricultura**

La sostenibilidad agrícola es un concepto clave, lo que significa que los sistemas agrícolas pueden continuar existiendo a largo plazo sin agotar los recursos necesarios ni dañar el medio ambiente natural, asegurando que las generaciones futuras puedan satisfacer sus propias necesidades. Este enfoque agrícola tiene como objetivo combinar productos alimentarios eficientes, equilibrar la producción y la conservación de los recursos naturales, proteger el medio ambiente y apoyar el bienestar socioeconómico de los agricultores y las zonas rurales. La permacultura es una disciplina de la agroecología que combina conocimientos de ciencias ecológicas y sociales para comprender los procesos fundamentales de la producción de alimentos. Adoptar prácticas que promuevan la biodiversidad, mejoren la salud del suelo y mejoren la

capacidad de los sistemas agrícolas para hacer frente a los desafíos ambientales y económicos (Schwab et al., 2020).

## MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1 Enfoque

En esta investigación se utilizará un enfoque cuantitativo, dado que este enfoque se caracteriza por el uso de métodos computacionales y matemáticos para analizar datos, lo que implica la cuantificación de variables y la utilización de estadísticas para interpretar los resultados. El análisis computacional, por su naturaleza, requiere de la recopilación y procesamiento de datos numéricos sobre los patrones de flujo de agua, los cuales son analizados mediante algoritmos y modelos matemáticos. Esto permite obtener conclusiones objetivas y medibles sobre la eficiencia y eficacia del sistema de riego. De acuerdo con Hernández et al. (2014), el enfoque cuantitativo se caracteriza por la recolección, medición y análisis de datos numéricos, utilizando métodos estadísticos para examinar y comprender aspectos relacionados con el balance hídrico y la administración del agua en la presa.

### 3.2 Alcance

Esta investigación presenta un alcance explicativo ya que tiene como objetivo principal desentrañar las causas esenciales que subyacen a los eventos o fenómenos objeto de investigación (Hernández et al., 2014). En este caso, el estudio se enfoca en analizar y entender cómo y por qué los patrones de flujo en un sistema de riego tecnificado afectan la eficiencia del uso del agua en la agricultura.

Utilizando análisis computacional, el estudio no solo describe patrones de flujo de agua, sino que también intenta explicar cómo estos patrones se relacionan con la eficiencia de un sistema de riego. Implica una investigación profunda de las causas fundamentales que determinan cómo y cuándo se distribuyen los flujos de agua en un sistema de riego. afecta la productividad agrícola y la gestión sostenible del agua.

### 3.3 Diseño de investigación

Este estudio ofrece un diseño de investigación no experimental porque en un estudio no experimental el investigador no manipula variables ni asigna sujetos aleatoriamente a diferentes condiciones. En cambio, los fenómenos se observan y analizan tal como ocurren en el entorno natural (Hernández et al., 2014).

Este estudio en particular se enfoca en analizar los patrones existentes de flujo de agua utilizando herramientas computacionales y modelos matemáticos. No se realiza una manipulación directa de las variables del sistema de riego; más bien, se recolectan y analizan datos del sistema tal como opera actualmente. Este enfoque permite evaluar

y comprender los patrones de flujo de agua en un contexto real, lo que es típico de los diseños de investigación no experimentales.

### **3.4 Población y muestra**

#### **3.4.1 Población**

Según Arias (2006), una población se caracteriza como un conjunto de elementos, que pueden ser finitos o infinitos en número y compartir características comunes. El objetivo de este estudio incluye todos los sistemas de riego tecnificado de la región de Ayacucho. Se refiere a todas las tierras agrícolas en un área geográfica determinada que utilizan sistemas de riego tecnificados, así como todos los patrones de flujo asociados con estos sistemas.

#### **3.4.2 Muestra**

Bernal (2006) define una muestra como una porción seleccionada de la población en la que se miden y observan variables. El propósito de seleccionar este subconjunto fue recopilar datos representativos y significativos que proporcionarían información valiosa sobre toda la población. El Sistema Técnico de Riego Comunitario Sharval en Ayacucho es un estudio de caso para esta investigación.

La muestra se seleccionó mediante técnicas de muestreo aleatorio, específicamente muestreo por conveniencia, también conocido como muestreo intencional. El sistema de riego técnico de la comunidad de Challhualla es particularmente importante y fácil de usar para los propósitos específicos de este estudio, lo que justifica este enfoque. Se espera que este sistema de riego sirva como un caso ilustrativo e importante en el contexto más amplio de los sistemas de riego desarrollados en Ayacucho, permitiendo un análisis detallado y en profundidad de los patrones de flujo de agua y la eficiencia del riego.

### **3.5 Hipótesis**

#### **3.5.1 Hipótesis General**

Mediante el uso de técnicas computacionales avanzadas, como modelado hidrológico, algoritmos de optimización y análisis de datos, es posible mejorar significativamente la eficiencia y efectividad de los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho.

#### **3.5.2 Hipótesis específicas**

- Es posible representar de manera precisa y eficaz los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de Challhualla a través de un modelo matemático, el cual captura las variables dinámicas del sistema, permitiendo una comprensión más profunda y detallada de su funcionamiento.
- La aplicación de técnicas de análisis computacional, específicamente algoritmos de optimización y simulación, utilizando el modelo matemático desarrollado, permitirá evaluar y mejorar la eficiencia de la distribución del agua en el sistema de riego, identificando posibles deficiencias y áreas de mejora en la gestión actual del recurso hídrico.
- Las estrategias de optimización del sistema de riego, desarrolladas a partir de los resultados obtenidos del análisis computacional, resultarán en una mejora significativa en términos de eficiencia y efectividad en el uso del agua para riego, contribuyendo a una gestión sostenible del recurso en la comunidad de Challhualla.

### **3.6 Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional**

Un término empleado en investigaciones para referirse a un elemento, suceso, condición o fenómeno relevante que necesita ser analizado y medido en cuanto a su magnitud o clasificación, se conoce como variable.

**Variable Independiente:**

Técnicas de análisis computacional

**Variable dependiente:**

Patrones de Flujo en el Sistema de Riego Tecnificado

**Tabla 1**

*Cuadro de Operacionalización de variables*

| Operacionalización de las Variables: "ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LOS PATRONES DE FLUJO EN EL SISTEMA DE RIEGO TECNIFICADO DE LA COMUNIDAD DE CHALLHUALLA, AYACUCHO" |   |                      |                     |                |  |                                   |                                     |                                   |
|--|---|----------------------|---------------------|----------------|--|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| VARIABLES  | DEFINICION CONCEPTUAL   | TIPO                 | NATURALEZA          | MEDICIÓN       | DIMENSIONES                              | INDICADORES                       | UNIDAD DE MEDIDA                    | INSTRUMENTO                       |
| <b>Técnicas de análisis computacional</b>  | Métodos y herramientas utilizados para simular, modelar y evaluar sistemas o problemas complejos mediante el uso de software y algoritmos. Estas técnicas permiten procesar grandes volúmenes de datos, realizar cálculos precisos, y obtener insights que facilitan la toma de decisiones informadas en diversos campos de estudio y aplicación (Mosquea, 2022).                                 | <b>Independiente</b> | <b>Cuantitativa</b> | <b>Nominal</b> | Métodos y herramientas de análisis       | <b>Modelo matemático</b>          | <b>Error cuadrático medio (MSE)</b> | Librería y Herramientas de Python |
|  |   |                      |                     |                |  | <b>Algoritmos de optimización</b> | <b>Precisión (%)</b>                | Visual Studio Code                |
| <b>Patrones de Flujo en el Sistema de Riego Tecnificado</b>  | Los patrones de flujo en un sistema de riego tecnificado describen la manera en que el agua se mueve y distribuye a través de la red de riego. Estos patrones incluyen la velocidad, cantidad, y frecuencia del flujo de agua, influenciados por factores como la topografía, diseño del sistema, y necesidades hídricas de los cultivos, impactando así la eficiencia de riego (Espinoza, 2021). | <b>Dependiente</b>   | <b>Cuantitativa</b> | <b>Nominal</b> | Variables dinámicas del sistema de riego | <b>Caudal del agua</b>            | <b>m<sup>3</sup>/s</b>              | Fichas de recolección de datos    |
|  |   |                      |                     |                |  | <b>Pérdidas de Agua</b>           | <b>%</b>                            |                                   |
|  |   |                      |                     |                |  | <b>Volumen</b>                    | <b>m<sup>3</sup></b>                |                                   |

Nota. Elaboración propia

### 3.7 Técnicas e instrumentos

#### 3.7.1 Técnicas

Para el análisis computacional de los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de Challhualla, se utilizaron las siguientes técnicas:

- **Revisión de documentos técnicos y registros operativos:** Revisión de informes técnicos y registros históricos de uso del agua de la zona de estudio para comprender la estructura y funcionamiento del sistema de riego, así como para identificar áreas de mejora.
- **Modelado matemático:** Se desarrolló un modelo matemático empleando regresión lineal múltiple y árboles de regresión para representar los patrones de flujo de agua.
- **Algoritmos de optimización:** Se aplicaron algoritmos genéticos para optimizar la distribución del agua, ajustando los coeficientes del modelo para maximizar la eficiencia del riego.

#### 3.7.2 Instrumentos

Se utilizaron los siguientes instrumentos de recolección de datos:

- **Software estadístico:** Excel para el análisis y procesamiento de datos.
- **Fichas de recolección de datos:** Formularios estructurados para la captura de datos relevantes del sistema de riego.
- **Librerías y herramientas de Python:** Utilizadas para el modelamiento matemático y la implementación de algoritmos de optimización.
- **Visual Studio Code:** Entorno de desarrollo integrado (IDE) para escribir, depurar y ejecutar los scripts de Python.

#### 3.7.3 Confiabilidad, validez y objetividad de los instrumentos

##### A. Software estadístico: R y Excel

###### Confiabilidad:

- **Excel:** Es ampliamente utilizado en la comunidad científica y académica para el análisis estadístico. Ofrece una gran cantidad de paquetes y funciones que han sido validados y probados por la comunidad. La confiabilidad de R depende del correcto uso de sus funciones y paquetes.

**Validez:**

- **Excel:** Ofrece herramientas de análisis estadístico que se basan en principios estadísticos sólidos, lo que garantiza la validez de los análisis realizados.

**Objetividad:**

- Este software permite realizar análisis de datos de manera objetiva, siempre y cuando se utilicen de manera adecuada y siguiendo los procedimientos estadísticos correctos.

**B. Fichas de recolección de datos****Confiabilidad:**

- Son claros y precisos lo que permite minimizar errores de interpretación y captura.

**Validez:**

- La validez radica en que se tomando en consideración formatos realizados por estudios hidrológicos realizados por la ANA, específicamente del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC.

**Objetividad:**

- Permite identificar y analizar los datos capturados.

**C. Librerías y herramientas de Python****Confiabilidad:**

- Las librerías de Python como NumPy, Pandas, SciPy y otras son ampliamente utilizadas y probadas en la comunidad científica. Su confiabilidad está respaldada por su uso extensivo y la comunidad activa que las mantiene.

**Validez:**

- Estas herramientas son diseñadas basándose en teorías matemáticas y estadísticas robustas, lo que garantiza la validez de los modelos y algoritmos implementados.

**Objetividad:**

- Al ser herramientas de código abierto y ampliamente documentadas, permiten la reproducción y verificación de resultados, manteniendo la objetividad en el análisis.

**D. Visual Studio Code****Confiabilidad:**

- Visual Studio Code es un IDE confiable utilizado por desarrolladores en diversas disciplinas. Su confiabilidad proviene de su estabilidad, características avanzadas de depuración y una comunidad activa de usuarios.

**Validez:**

- Aunque Visual Studio Code no afecta directamente la validez de los análisis, proporciona un entorno robusto para el desarrollo y ejecución de scripts que pueden influir en la precisión y validez del trabajo realizado.

**Objetividad:**

- Visual Studio Code es una herramienta neutral que facilita la escritura y ejecución de código de manera objetiva, sin introducir sesgos en el análisis de datos.

**3.8 Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información**

Se utilizarán técnicas estadísticas, como análisis descriptivo para recopilar datos, pruebas de hipótesis y regresión para explorar relaciones entre variables y análisis multivariado para identificar patrones significativos. Además, se utilizarán análisis de series temporales y métodos espaciales para estudiar la variación temporal y la distribución espacial, los métodos de simulación y optimización también permitirán predecir y mejorar el sistema, y las herramientas de visualización ayudarán a interpretar y presentar los resultados de este trabajo.

### **3.9 Desarrollo de Trabajo de Tesis**

#### **3.9.1 Ubicación del área de estudio**

##### **3.9.1.1 Ubicación Política**

**Departamento:** Ayacucho

**Provincia:** Lucanas

**Distrito:** Lucanas

**Sector:** Challhualla

Los mapas de la Ubicación Política se encuentran en el Anexo N°2.

##### **3.9.1.2 Ubicación Geográfica**

**Hoya Hidrográfica:** Océano Atlántico.

**Cuenca:** Acarí

**Río:** Ccachccalla

Los mapas de la Ubicación Geográfica se encuentran en el Anexo N°2.

##### **3.9.1.3 Ubicación Administrativa**

El sistema de riego se encuentra bajo la jurisdicción de la Autoridad Administrativa del Chaparra - Chíncha, en la Autoridad Local del Agua del Chaparra - Acarí y forma parte de la Unidad Hidrográfica de la Cuenca del Río Acarí.

#### **3.9.2 Fisiografía y geología del área de estudio**

##### **3.9.2.1 Fisiografía**

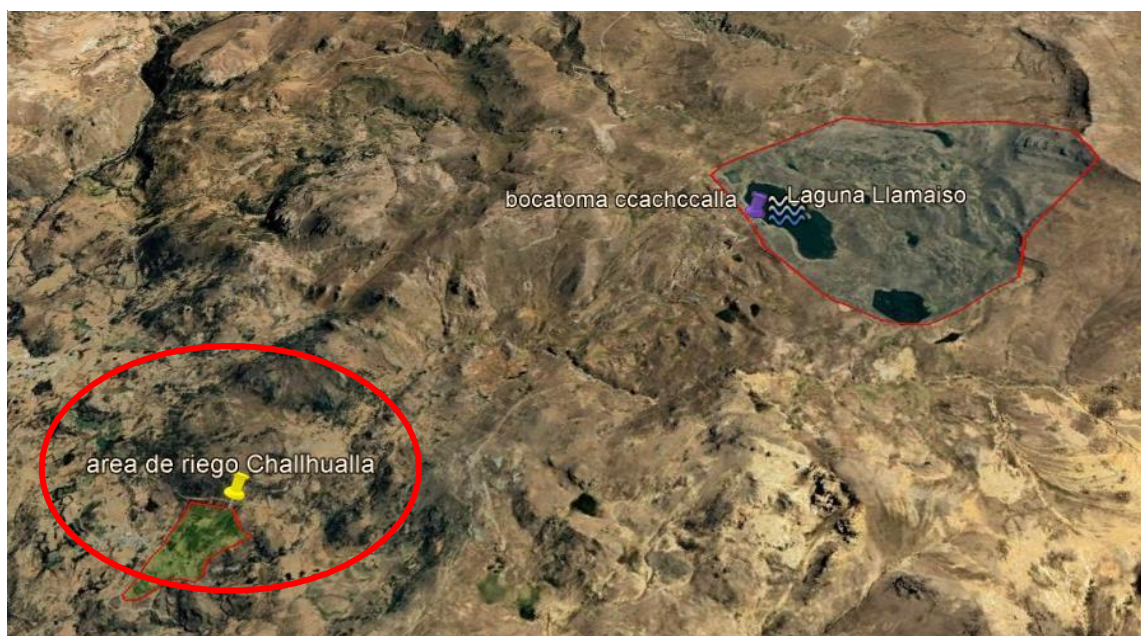
El distrito de Lucan está situado entre los Andes y tiene una forma mayoritariamente ovalada con su mayor extensión de este a oeste. Este eje está orientado a través de un eje vertical más corto que corre de sur a norte y está inclinado respecto al eje principal del departamento. La parte occidental del distrito cubre 367,34 kilómetros cuadrados, lo que representa el 38,46% del área total. El terreno montañoso es escarpado y accidentado.

El relieve de las tierras lucanas es variado, con terrazas quebradas, terrenos llanos y pendientes que oscilan entre pendientes suaves y pronunciadas. La topografía se caracteriza por profundos valles formados por la erosión fluvial y la socavación lateral, formando barrancos y conos aluviales aguas abajo. Entre 3.500 y 3.700 metros sobre el nivel del mar, el terreno del cerro es principalmente laderas planas y colinas, pero también hay pendientes más pronunciadas y terrenos más empinados. Con base en estas características, se definen para la región las siguientes unidades geográficas físicas:

- A. Gran Paisaje: Cordillera Occidental de los Andes:** Este sector de la Cordillera Occidental se distingue por su elevada altitud y una topografía irregular, modelada continuamente por los cauces fluviales que la erosionan permanentemente.
  
- B. Paisaje: Laderas:** Compuesto por las faldas y estribaciones de montañas y colinas, este paisaje se caracteriza por su inclinación y susceptibilidad a la erosión hídrica. Su microclima favorece la implantación y desarrollo de cultivos adaptados, haciendo de este uno de los paisajes más significativos por su potencial agrícola.
  
- C. Subpaisaje: Laderas Residuales:** Los suelos formados in situ se forman sobre el material original y no se ven afectados significativamente por depósitos coluviales o aluviales. Este paisaje lateral con su microclima frío limita el desarrollo de cultivos económicamente importantes, pero permite la producción de cultivos adaptativos como patatas, guisantes, trigo y maíz, así como pastos forrajeros como avena, trébol y raigrás, que son la base de producción ganadera en la zona. En este paisaje se encuentra la comunidad de Challhualla.

## Figura 14

### Área del sistema de riego



Nota. Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021).

#### 3.9.2.2 Hidrografía

El río Kachkar nace en la laguna de Lameso y se alimenta de manantiales y drenaje constante del suelo. Además, aquí hay flujos de agua temporales, que solo aumentan el caudal durante la temporada de lluvias. El río se extiende desde una altitud de 4.454 metros hasta una altitud de 2.617 metros y tiene una longitud total de unos 124 kilómetros. La pendiente media del cauce principal del río es del 1,18%. La altura media del río desde el nacimiento hasta los lugares turísticos es de 4.500 metros.

A lo largo de su curso, las aguas del río Ccachccalla se incorporan progresivamente al río San José, y juntos forman el río Acarí, que finalmente desemboca en el océano Pacífico en el departamento de Arequipa.

La cuenca del río Kachkalá tiene una forma generalmente alargada y se ensancha en su parte superior. La cuenca es dendrítica y el ancho de la cuenca varía de 4,8 kilómetros a 2,2 kilómetros. La superficie total de la cuenca es de 8,54 kilómetros cuadrados, 12,61 kilómetros cuadrados y 23,71 kilómetros cuadrados respectivamente. La longitud máxima del recorrido fluvial desde su nacimiento hasta su desembocadura es de 3,8 km, 7,41 km y 8,24 km, respectivamente.

**A. Altura Media de la Subcuenca (Hm):** La altura media de una unidad hidrográfica, también conocida como elevación de la cuenca, se determina como la ordenada media de la curva hipsométrica. Este parámetro se calcula mediante la fórmula:

$$Hm = \frac{\sum(Ai \times Hi)}{\sum Ai}$$

donde *Hm* representa la altura media, *Hi* la altura media de cada área parcial y *Ai* el área parcial correspondiente. El resultado obtenido para la altura media es de 4,125.68 metros sobre el nivel del mar. En la Tabla 2 se detalla la información utilizada para la elaboración de la curva hipsométrica, y la propia Curva Hipsométrica se ilustra en la Figura 15.

**Tabla 2**

*Datos para la elaboración de la curva hipsométrica*

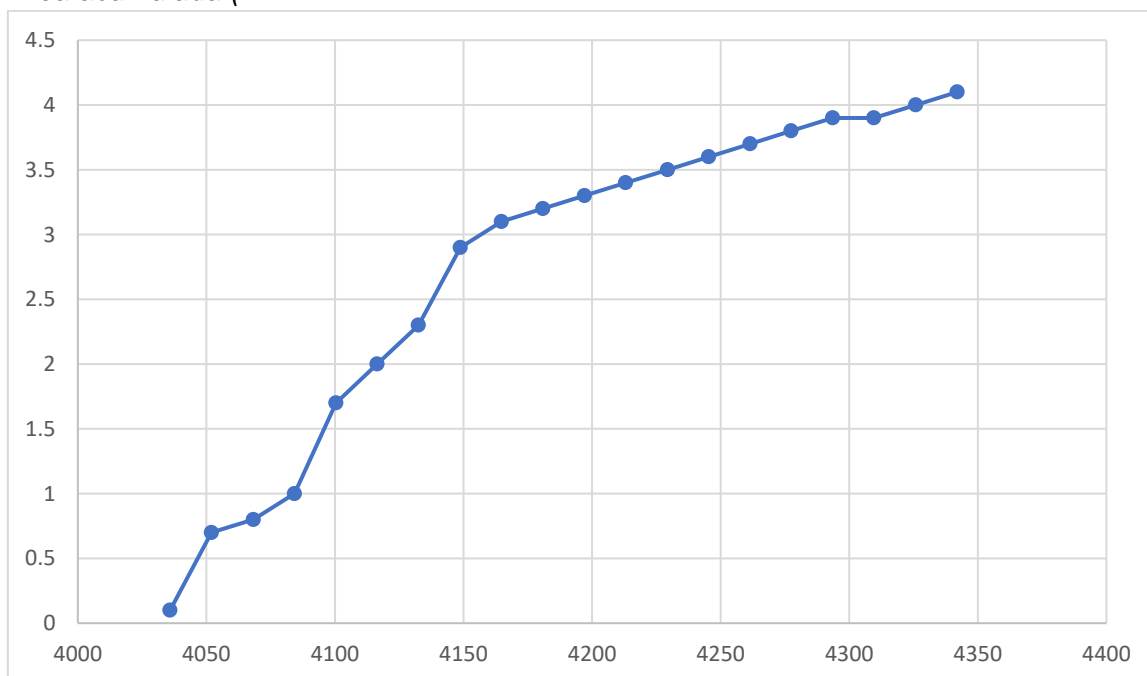
| Cota baja     | Cota alta | Área parcial (Km <sup>2</sup> ) | altitud media | hi x si | Área acumulada (Km <sup>2</sup> ) | Área Sobre la cota (Km <sup>2</sup> ) | Área sobre cota (%) |
|---------------|-----------|---------------------------------|---------------|---------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
|               | 4027.9    |                                 |               |         |                                   | 4.1                                   | 100.0               |
| <b>4027.9</b> | 4043.9    | 0.1                             | 4035.9        | 268.8   | 0.1                               | 4.0                                   | 98.4                |
| <b>4044.0</b> | 4060.0    | 0.6                             | 4052.0        | 2432.4  | 0.7                               | 3.4                                   | 83.6                |
| <b>4060.5</b> | 4076.1    | 0.2                             | 4068.3        | 626.1   | 0.8                               | 3.3                                   | 79.8                |
| <b>4076.2</b> | 4092.3    | 0.2                             | 4084.3        | 790.3   | 1.0                               | 3.1                                   | 75.1                |
| <b>4092.4</b> | 4108.4    | 0.7                             | 4100.4        | 2668.1  | 1.7                               | 2.4                                   | 59.1                |
| <b>4108.4</b> | 4124.5    | 0.3                             | 4116.4        | 1433.8  | 2.0                               | 2.1                                   | 50.6                |
| <b>4124.5</b> | 4140.4    | 0.3                             | 4132.5        | 1368.7  | 2.3                               | 1.7                                   | 42.4                |
| <b>4140.9</b> | 4156.7    | 0.6                             | 4148.8        | 2460.6  | 2.9                               | 1.1                                   | 27.9                |
| <b>4156.8</b> | 4172.8    | 0.2                             | 4164.8        | 656.0   | 3.1                               | 1.0                                   | 24.0                |
| <b>4172.9</b> | 4188.9    | 0.1                             | 4180.9        | 560.7   | 3.2                               | 0.8                                   | 20.7                |
| <b>4189.1</b> | 4205.0    | 0.1                             | 4197.1        | 434.4   | 3.3                               | 0.7                                   | 18.2                |
| <b>4205.4</b> | 4220.8    | 0.1                             | 4213.1        | 371.6   | 3.4                               | 0.7                                   | 16.0                |
| <b>4221.6</b> | 4237.2    | 0.1                             | 4229.4        | 335.0   | 3.5                               | 0.6                                   | 14.1                |
| <b>4237.4</b> | 4253.3    | 0.1                             | 4245.4        | 424.1   | 3.6                               | 0.5                                   | 11.6                |
| <b>4253.5</b> | 4269.4    | 0.1                             | 4261.5        | 375.9   | 3.7                               | 0.4                                   | 9.5                 |

|               |        |     |        |       |     |     |     |
|---------------|--------|-----|--------|-------|-----|-----|-----|
| <b>4269.6</b> | 4285.2 | 0.1 | 4277.4 | 377.3 | 3.8 | 0.3 | 7.3 |
| <b>4285.6</b> | 4301.6 | 0.1 | 4293.6 | 347.8 | 3.9 | 0.2 | 5.3 |
| <b>4301.7</b> | 4317.5 | 0.1 | 4309.6 | 236.6 | 3.9 | 0.2 | 4.0 |
| <b>4318.2</b> | 4333.5 | 0.0 | 4325.9 | 183.0 | 4.0 | 0.1 | 2.9 |
| <b>4334.1</b> | 4350.0 | 0.1 | 4342.0 | 515.8 | 4.1 | 0.0 | 0.0 |

Nota. Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

**Figura 15**

Área acumulada (Km<sup>2</sup>)



A continuación, se ofrece una visión general de los parámetros que caracterizan la microcuenca del Río Ccachccalla, los cuales abarcan aspectos geométricos e hidrológicos esenciales para su estudio y manejo.

**Tabla 3**

Características Fisiográficas de la Microcuenca Río

| Microcuenca Río Ccachccalla |            |                 |
|-----------------------------|------------|-----------------|
| Parámetros                  | Resultados | Unidades        |
| Área                        | 4.07       | Km <sup>2</sup> |

|                                     |         |                          |
|-------------------------------------|---------|--------------------------|
| <b>Perímetro</b>                    | 8.19    | <b>Km</b>                |
| <b>Kc</b>                           | 1.14    |                          |
| <b>Ff</b>                           | 0.34    |                          |
| <b>Grado de ramificación</b>        | 2.00    |                          |
| <b>Dd</b>                           | 1.1964  | <b>Km/Km<sup>2</sup></b> |
| <b>Es</b>                           | 0.29    | <b>Km</b>                |
| <b>Hm</b>                           | 0.24550 | <b>m.s.n.m</b>           |
| <b>Pendiente media</b>              | 4125.68 | <b>m/m</b>               |
| <b>Longitud del Río principal</b>   | 0.093   | <b>Km</b>                |
| <b>Longitud total de ríos</b>       | 3.48    | <b>Km</b>                |
| <b>TC (Tiempo de concentración)</b> | 1.22    | <b>Hrs.</b>              |
| <b>CN</b>                           | 81      |                          |
| <b>la (Abstracción inicial)</b>     | 4.87    | <b>mm.</b>               |
| <b>Lag Time (Tiempo de retardo)</b> | 11.92   | <b>Min.</b>              |

*Nota.* Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

### 3.9.2.3 Información Pluviométrica

A continuación, se aborda el tratamiento de datos de precipitación de las estaciones Lucanas y Puquio, dado que no hay estaciones hidrométricas en el área del proyecto. La calidad de los modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía depende de la consistencia de los datos de entrada, que deben ser continuos y sin inconsistencias. Los datos provienen de las estaciones pluviométricas de Puquio, Lucanas y Copara, proporcionados por el SENAMHI, y están disponibles para consulta en su página web. La ubicación de estas estaciones y los datos detallados utilizados se muestran en la Tabla 4, respectivamente.

**Tabla 4**

*Ubicación de Estaciones Pluviométricas*

| <b>ESTACIONES<br/>PLUVIOMETRICAS</b> | <b>Coordenadas</b> |                     | <b>Altitud<br/>(msnm)</b> |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
|                                      | <b>Latitud (S)</b> | <b>Longitud (W)</b> |                           |
| <b>Puquio</b>                        | 14° 41' 57.39"     | 74° 7' 53.75"       | 3176                      |
| <b>Lucanas</b>                       | 14° 37' 13.39"     | 74° 13' 58"         | 3350                      |

*Nota.* Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

En base a estas estaciones escogidas se muestra las Tablas 5 y 6, los cuales hacen referencia a la Precipitación Total Mensual, de estas dos estaciones como se muestra a continuación:

**Tabla 5**  
*Precipitación Total Mensual Estación Puquio*

| Año  | ENE   | FEB   | MAR   | ABR  | MAY  | JUN  | JUL | AGO  | SEP  | OCT  | NOV   | DIC  | PROM |
|------|-------|-------|-------|------|------|------|-----|------|------|------|-------|------|------|
| 1962 | 98.9  | 106.3 | 98.8  | 20.5 | 4.3  | 0.9  | 3.1 | 3.5  | 5.3  | 6.0  | 0.3   | 18.1 | 30.5 |
| 1963 | 229.9 | 148.0 | 25.7  | 13.7 | 0.0  | 0.9  | 3.1 | 3.5  | 5.3  | 0.0  | 0.0   | 35.1 | 38.8 |
| 1964 | 9.0   | 53.3  | 44.6  | 21.8 | 14.0 | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 3.3  | 20.5  | 48.5 | 17.9 |
| 1965 | 48.8  | 129.2 | 53.2  | 8.5  | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 5.3  | 6.0  | 0.0   | 0.0  | 20.9 |
| 1966 | 42.9  | 53.9  | 47.7  | 5.5  | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 26.6 | 23.2  | 29.5 | 19.1 |
| 1967 | 204.4 | 374.4 | 147.1 | 59.4 | 35.0 | 0.0  | 5.7 | 0.0  | 7.6  | 0.0  | 0.0   | 27.4 | 71.8 |
| 1968 | 115.6 | 57.1  | 120.6 | 1.8  | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 6.0  | 53.7  | 50.9 | 33.8 |
| 1969 | 28.6  | 81.6  | 146.5 | 39.3 | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 5.2  | 0.0  | 12.8  | 56.4 | 30.9 |
| 1970 | 189.8 | 69.5  | 67.7  | 7.3  | 10.8 | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 18.6 | 3.8  | 1.8   | 24.6 | 32.8 |
| 1971 | 62.0  | 95.4  | 152.8 | 36.4 | 4.8  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 2.2  | 1.6   | 44.2 | 33.3 |
| 1972 | 156.4 | 191.6 | 197.0 | 7.6  | 0.0  | 3.8  | 3.8 | 0.0  | 21.8 | 24.6 | 0.0   | 80.8 | 57.3 |
| 1973 | 124.4 | 104.4 | 138.8 | 58.2 | 0.0  | 5.8  | 0.0 | 1.6  | 35.0 | 0.0  | 4.6   | 22.8 | 41.3 |
| 1974 | 105.0 | 64.9  | 31.6  | 17.4 | 0.0  | 1.4  | 0.0 | 19.4 | 5.4  | 0.0  | 4.2   | 3.0  | 21.0 |
| 1975 | 45.8  | 61.1  | 77.9  | 2.8  | 7.8  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 2.4  | 3.6  | 0.0   | 36.9 | 19.9 |
| 1976 | 160.4 | 152.8 | 70.6  | 4.0  | 6.1  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 11.1 | 0.0  | 0.0   | 22.5 | 35.6 |
| 1977 | 1.4   | 175.9 | 70.4  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 19.9 | 0.0  | 3.4   | 15.4 | 23.9 |
| 1978 | 69.7  | 28.1  | 63.1  | 14.1 | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 27.8  | 0.0  | 16.9 |
| 1979 | 19.9  | 70.7  | 124.3 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 13.4 | 0.0   | 0.0  | 19.0 |
| 1980 | 45.8  | 8.1   | 82.4  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 7.1 | 0.0  | 20.5 | 18.0 | 0.0   | 3.4  | 15.5 |
| 1981 | 84.2  | 113.2 | 78.1  | 32.5 | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 17.5 | 0.0  | 0.0  | 15.6  | 76.1 | 34.8 |
| 1982 | 78.9  | 106.3 | 32.3  | 18.5 | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 24.1  | 0.0  | 21.7 |
| 1983 | 34.2  | 30.5  | 70.6  | 29.8 | 6.8  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 7.9  | 2.9  | 4.7   | 65.1 | 21.1 |
| 1984 | 90.0  | 106.3 | 98.8  | 20.5 | 4.3  | 0.9  | 0.0 | 33.6 | 5.3  | 6.0  | 11.4  | 37.3 | 34.5 |
| 1985 | 21.6  | 134.7 | 318.3 | 52.6 | 4.3  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 0.4  | 0.0   | 85.3 | 51.4 |
| 1986 | 133.1 | 158.8 | 145.4 | 22.8 | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 15.7 | 0.0  | 0.0  | 2.8   | 37.3 | 43.0 |
| 1987 | 119.4 | 82.1  | 22.4  | 11.4 | 6.1  | 3.0  | 2.5 | 4.0  | 0.5  | 3.3  | 7.4   | 4.7  | 22.2 |
| 1988 | 143.2 | 83.1  | 51.1  | 29.8 | 24.4 | 0.0  | 3.1 | 0.0  | 5.3  | 6.0  | 11.4  | 37.3 | 32.9 |
| 1989 | 395.5 | 253.6 | 252.8 | 7.2  | 4.4  | 0.1  | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 9.6  | 0.0   | 0.0  | 76.9 |
| 1990 | 33.8  | 15.4  | 60.3  | 3.8  | 17.2 | 10.6 | 0.0 | 0.0  | 1.2  | 2.4  | 121.6 | 89.7 | 29.7 |
| 1991 | 72.9  | 29.9  | 107.4 | 21.4 | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 11.6 | 4.5   | 0.0  | 20.6 |
| 1992 | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 3.5  | 5.3  | 6.0  | 11.4  | 37.3 | 5.3  |
| 1993 | 164.3 | 82.1  | 161.4 | 23.3 | 20.9 | 0.9  | 0.0 | 10.4 | 0.0  | 28.2 | 14.3  | 49.9 | 46.3 |
| 1994 | 144.5 | 175.6 | 82.1  | 0.0  | 3.6  | 4.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 2.4  | 0.0   | 19.4 | 36.0 |
| 1995 | 112.7 | 15.1  | 134.3 | 0.1  | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 17.0 | 0.0  | 51.3  | 30.3 | 30.1 |
| 1996 | 83.1  | 150.8 | 31.9  | 24.2 | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 4.8  | 1.6  | 0.0  | 3.3   | 25.5 | 27.1 |

|             |             |              |             |             |            |            |            |            |            |            |             |             |      |
|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|------|
| <b>1997</b> | 73.2        | 54.0         | 62.3        | 0.0         | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 41.2       | 14.3       | 6.4        | 5.0         | 53.6        | 25.8 |
| <b>1998</b> | 191.8       | 115.3        | 86.8        | 1.3         | 0.0        | 10.3       | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 33.4        | 79.8        | 43.2 |
| <b>1999</b> | 64.4        | 221.0        | 89.0        | 17.5        | 1.5        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 16.8       | 0.6         | 29.2        | 36.7 |
| <b>2000</b> | 187.2       | 129.2        | 140.9       | 16.5        | 7.2        | 0.0        | 0.0        | 4.0        | 0.0        | 12.6       | 4.6         | 77.8        | 48.3 |
| <b>2001</b> | 107.0       | 145.6        | 136.1       | 43.7        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.6        | 5.7        | 5.3         | 5.1         | 37.4 |
| <b>2002</b> | 98.3        | 142.2        | 132.5       | 33.4        | 3.8        | 0.0        | 13.8       | 2.8        | 5.2        | 7.6        | 37.5        | 22.9        | 41.7 |
| <b>2003</b> | 46.0        | 71.5         | 80.8        | 12.5        | 12.4       | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 1.2        | 0.0         | 45.8        | 22.5 |
| <b>2004</b> | 57.0        | 89.4         | 94.9        | 58.7        | 0.0        | 0.0        | 14.6       | 6.9        | 14.3       | 0.0        | 5.2         | 70.6        | 34.3 |
| <b>2005</b> | 42.0        | 74.6         | 45.7        | 22.1        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 1.4        | 23.9       | 3.6        | 0.0         | 87.7        | 25.1 |
| <b>2006</b> | 84.3        | 167.4        | 122.5       | 13.3        | 0.0        | 2.3        | 0.0        | 4.2        | 0.0        | 0.0        | 18.5        | 13.3        | 35.5 |
| <b>2007</b> | 59.1        | 85.5         | 159.9       | 31.5        | 4.6        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 5.2        | 11.2       | 18.1        | 20.4        | 33.0 |
| <b>2008</b> | 178.1       | 115.2        | 90.0        | 3.2         | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 6.2        | 0.0         | 19.6        | 34.4 |
| <b>2009</b> | 101.0       | 166.4        | 87.1        | 46.7        | 0.0        | 0.0        | 9.5        | 0.0        | 0.0        | 7.9        | 13.3        | 4.9         | 36.4 |
| <b>2010</b> | 68.0        | 73.0         | 90.4        | 19.2        | 3.6        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 2.6        | 7.9        | 0.0         | 68.9        | 27.8 |
| <b>2011</b> | 158.9       | 119.1        | 61.6        | 54.1        | 12.9       | 0.0        | 92.5       | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 13.9        | 66.3        | 48.3 |
| <b>2012</b> | 60.0        | 161.1        | 122.9       | 74.5        | 1.2        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 21.6       | 0.0         | 121.9       | 46.9 |
| <b>2013</b> | 112.7       | 119.9        | 70.6        | 1.9         | 0.0        | <b>0.9</b> | 2.2        | 2.8        | 0.0        | 10.3       | 0.0         | 37.0        | 29.9 |
| <b>2014</b> | 82.3        | 20.3         | 153.0       | <b>20.5</b> | <b>4.3</b> | 0.0        | <b>3.1</b> | <b>3.5</b> | <b>5.3</b> | <b>6.0</b> | <b>11.4</b> | <b>37.3</b> | 28.9 |
| <b>PROM</b> | <b>98.9</b> | <b>106.3</b> | <b>98.8</b> | <b>20.5</b> | <b>4.3</b> | <b>0.9</b> | <b>3.1</b> | <b>3.5</b> | <b>5.3</b> | <b>6.0</b> | <b>11.4</b> | <b>37.3</b> | 33.0 |

Nota. Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

**Tabla 6**  
*Precipitación Total Mensual Estación Lucanas*

| <b>Año</b>  | <b>ENE</b> | <b>FEB</b> | <b>MAR</b> | <b>ABR</b> | <b>MAY</b> | <b>JUN</b> | <b>JUL</b> | <b>AGO</b> | <b>SEP</b> | <b>OCT</b> | <b>NOV</b> | <b>DIC</b> |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>1963</b> | 136.7      | 171.3      | 154.3      | 9          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 20         | 0          | 127        |
| <b>1964</b> | 2.7        | 105.9      | 78.2       | 46.4       | 31         | 0          | 3.3        | 0          | 0          | 8          | 39.3       | 157.7      |
| <b>1965</b> | 65.6       | 212.6      | 247.3      | 42.5       | 43         | 15.2       | 13.7       | 32         | 14         | 7          | 2          | 13.3       |
| <b>1966</b> | 136.7      | 171.3      | 163.7      | 40.1       | 6.5        | 0          | 0          | 0          | 2.1        | 56.8       | 9.5        | 28.5       |
| <b>1967</b> | 56.2       | 635.3      | 653.5      | 77.2       | 30.4       | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 51.3       |
| <b>1968</b> | 452.3      | 36.1       | 557.4      | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 12.2       | 9.9        | 10.3       |
| <b>1969</b> | 24         | 131        | 259        | 144.6      | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 38         | 121.1      |
| <b>1970</b> | 961        | 826        | 391.7      | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 20.4       | 27.5       | 17         | 33         |
| <b>1971</b> | 80.7       | 143.7      | 149.8      | 69.6       | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 10.5       |
| <b>1972</b> | 15.9       | 54         | 109.1      | 0.8        | 0.5        | 0          | 0          | 0          | 1          | 0.9        | 0.2        | 3          |
| <b>1973</b> | 115.7      | 157.7      | 151.6      | 97.3       | 6.2        | 4.3        | 0          | 0          | 35.9       | 0          | 31.6       | 39.5       |
| <b>1974</b> | 309.8      | 177.4      | 174.4      | 63.7       | 0          | 0          | 0          | 22.7       | 0          | 0          | 0          | 36.8       |
| <b>1975</b> | 152.4      | 117.6      | 178.1      | 9.2        | 30.4       | 2.1        | 2.1        | 0          | 0.5        | 11.5       | 1          | 57.6       |
| <b>1976</b> | 244.9      | 139.8      | 124.7      | 27         | 14.9       | 0          | 0          | 5.5        | 17.3       | 0          | 4.2        | 27.7       |
| <b>1977</b> | 21.7       | 278        | 181.7      | 3          | 2          | 0          | 2.3        | 0          | 50.4       | 11.4       | 27.6       | 35         |
| <b>1978</b> | 88.4       | 58.5       | 77.4       | 30.3       | 0          | 0          | 1          | 5.2        | 2.1        | 15.6       | 48.2       | 17.2       |
| <b>1979</b> | 52.1       | 49.5       | 192.1      | 4.5        | 1.5        | 0          | 3.8        | 11.4       | 0          | 28.1       | 2.7        | 22         |

|             |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1980        | 135.2 | 39.3  | 119.3 | 0     | 0    | 0.1  | 9.3  | 3    | 10.8 | 42.6 | 0    | 30.7  |
| 1981        | 136.9 | 185.6 | 163.7 | 50.8  | 0    | 0    | 0    | 15.6 | 0    | 15.5 | 33.7 | 128   |
| 1982        | 102.9 | 160.3 | 64.8  | 33    | 0    | 0    | 0    | 0    | 19.9 | 48.1 | 33.1 | 13.1  |
| 1983        | 49.5  | 48.8  | 14.6  | 4.1   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 10.2 | 2    | 16.8  |
| 1984        | 32.9  | 49.8  | 138.9 | 16.8  | 4    | 22.9 | 0    | 4.4  | 6.2  | 28.9 | 58.1 | 67.2  |
| 1985        | 27.7  | 221.4 | 289.7 | 14    | 20.5 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 82.3  |
| 1986        | 134.8 | 151.7 | 118.5 | 21.5  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 74.4  |
| 1987        | 156.4 | 23.1  | 14.3  | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 9.5  | 4    | 2     |
| 1988        | 82.2  | 231.2 | 198.9 | 36.1  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 59.8  |
| 1989        | 225.3 | 142.1 | 206.4 | 4.6   | 4    | 6    | 2.6  | 1.2  | 0    | 0    | 2.4  | 10.6  |
| 1990        | 1.4   | 20.1  | 46.1  | 0     | 7.2  | 1.7  | 3.3  | 5.5  | 6.7  | 14.5 | 16.8 | 58.9  |
| 1991        | 50.8  | 38.5  | 215   | 16    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 17.2 | 17    |
| 1992        | 0     | 46.2  | 0     | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 18.3 | 16.8 | 58.9  |
| 1993        | 159   | 154.2 | 151.5 | 52.7  | 8.9  | 0    | 0.1  | 0    | 0    | 0    | 15.6 | 18.8  |
| 1994        | 101.2 | 178.1 | 95.6  | 44.4  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 4.1   |
| 1995        | 37.1  | 42.4  | 210.8 | 22.6  | 0    | 0    | 0    | 0    | 13   | 9.6  | 61   | 68.3  |
| 1996        | 162.7 | 316.9 | 128.4 | 181.6 | 18.7 | 0    | 0    | 21.4 | 20.2 | 5    | 10.3 | 58.9  |
| 1997        | 111.1 | 158.9 | 66.6  | 55.7  | 8.8  | 0    | 5    | 88.8 | 26.8 | 10.8 | 43.1 | 135.1 |
| 1998        | 214.7 | 133.7 | 101.2 | 24.6  | 0    | 4.7  | 0    | 0    | 1.6  | 11.2 | 35.3 | 100.8 |
| 1999        | 121.4 | 269.4 | 118.7 | 64.7  | 7.3  | 0.1  | 3.4  | 0.1  | 9.1  | 81.8 | 2.6  | 83.9  |
| 2000        | 223.5 | 150.8 | 124.5 | 16.3  | 8.1  | 0.6  | 0    | 14.4 | 13.8 | 82.2 | 23.1 | 84.1  |
| 2001        | 136   | 138.4 | 234   | 97.3  | 5.6  | 0.3  | 0.5  | 4.1  | 19   | 12.7 | 2.8  | 9.1   |
| 2002        | 191.9 | 196.4 | 183.5 | 34.8  | 29   | 2.9  | 54.1 | 12.7 | 1.6  | 0.2  | 35.3 | 51.1  |
| 2003        | 80.4  | 135.8 | 100.5 | 28.9  | 15.5 | 0    | 3.8  | 0    | 0    | 7.1  | 0.2  | 98.4  |
| 2004        | 58.2  | 148.1 | 78.1  | 47.9  | 0    | 1.6  | 19.5 | 4.2  | 3.5  | 3.2  | 11   | 54.9  |
| 2005        | 60.4  | 88.1  | 66.4  | 33    | 0    | 0    | 0    | 6.2  | 19.5 | 1.8  | 3.5  | 130.6 |
| 2006        | 149.6 | 222   | 121.6 | 41    | 0    | 1.2  | 0    | 5.9  | 5.2  | 0    | 55   | 16.8  |
| 2007        | 104.4 | 143.2 | 181.3 | 44.9  | 6.4  | 6    | 0    | 0    | 3.6  | 4.3  | 17.1 | 39.8  |
| 2008        | 296.6 | 158.2 | 143.5 | 28.3  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 2.8  | 0    | 36.1  |
| 2009        | 125.8 | 275.6 | 164   | 38.9  | 1.3  | 0    | 7    | 0    | 1.9  | 16.4 | 11   | 52    |
| 2010        | 163.4 | 203   | 116.4 | 57    | 2.2  | 0    | 0    | 0    | 3.3  | 10.2 | 0    | 109.1 |
| 2011        | 204.1 | 251   | 77.6  | 88.2  | 18.1 | 0    | 21.8 | 0    | 3    | 0    | 79.2 | 137.2 |
| 2012        | 103.5 | 243.3 | 247.3 | 170.3 | 8.6  | 0    | 0    | 10.2 | 6    | 77.4 | 20.7 | 243.3 |
| 2013        | 115.4 | 304.7 | 204   | 10.9  | 27.5 | 17.9 | 11.4 | 8.3  | 1.2  | 14.5 | 16.1 | 58.9  |
| <b>PROM</b> | 136.7 | 171.3 | 163.7 | 40.1  | 7.2  | 1.7  | 3.3  | 5.5  | 6.7  | 14.5 | 16.8 | 58.9  |

Nota. Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

### 3.9.3 Usos y demandas de agua

El diseño hidráulico del proyecto contempla la utilización de las aguas del río Ccachccalla, las cuales serán captadas y dirigidas a través de un canal de conducción para irrigar los sectores de riego previstos. Además, se considerará el agua procedente de las precipitaciones en el área de riego dentro del balance hidrológico.

### 3.9.3.1 Uso Consuntivo de Agua

Se eligió el método HARGREAVES para el cálculo del consumo de agua debido a su alta precisión y correspondencia con los datos obtenidos para el sistema de riego en la zona de estudio, específicamente en la sierra del Perú. Además, para determinar la demanda de agua se tienen en cuenta los cultivos dominantes, los sistemas de rotación de cultivos y el uso del agua en un área, que son fundamentales para determinar la demanda de agua mensual o total.

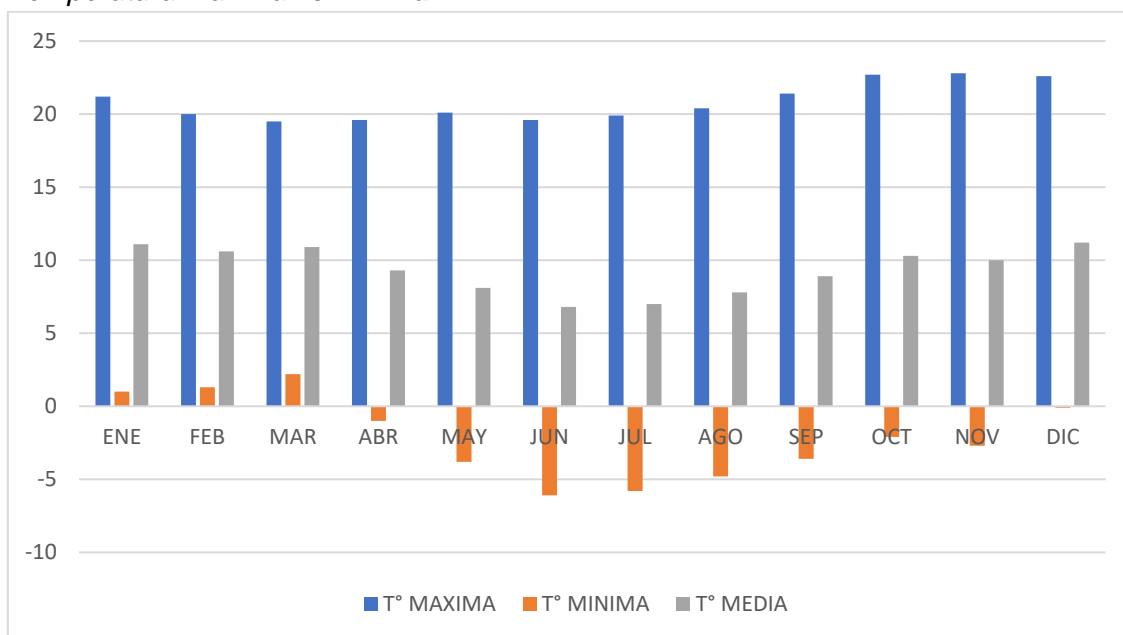
**Tabla 7**

*Temperatura máxima y mínima*

| <b>MES</b> | <b>T° MAXIMA</b> | <b>T° MINIMA</b> | <b>T° MEDIA</b> |
|------------|------------------|------------------|-----------------|
| <b>ENE</b> | 21.2             | 1                | 11.1            |
| <b>FEB</b> | 20               | 1.3              | 10.6            |
| <b>MAR</b> | 19.5             | 2.2              | 10.9            |
| <b>ABR</b> | 19.6             | -1               | 9.3             |
| <b>MAY</b> | 20.1             | -3.8             | 8.1             |
| <b>JUN</b> | 19.6             | -6.1             | 6.8             |
| <b>JUL</b> | 19.9             | -5.8             | 7               |
| <b>AGO</b> | 20.4             | -4.8             | 7.8             |
| <b>SEP</b> | 21.4             | -3.6             | 8.9             |
| <b>OCT</b> | 22.7             | -2.1             | 10.3            |
| <b>NOV</b> | 22.8             | -2.7             | 10              |
| <b>DIC</b> | 22.6             | -0.1             | 11.2            |

*Nota.* Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

**Figura 16**  
*Temperatura máxima vs Mínima*



La figura 16 muestra la evolución de las temperaturas máximas, mínimas y medias a lo largo de los meses del año. A continuación, se presenta una interpretación de los datos:

- Temperaturas Máximas (T° MÁXIMA):** Las temperaturas máximas se mantienen relativamente constantes a lo largo del año, con valores que oscilan entre aproximadamente 19°C y 23°C. Se observa un pico en octubre y noviembre, donde las temperaturas máximas alcanzan los valores más altos del año (alrededor de 22.7°C y 22.8°C, respectivamente).
- Temperaturas Mínimas (T° MÍNIMA):** Las temperaturas mínimas muestran una mayor variabilidad a lo largo del año. Se aprecia una disminución significativa durante los meses de invierno (mayo, junio, julio, agosto), donde las temperaturas mínimas caen por debajo de los 0°C, alcanzando su valor más bajo en junio y julio (-6.1°C y -5.8°C, respectivamente). Las temperaturas mínimas más altas se registran en los primeros meses del año (enero, febrero, marzo) y en diciembre, oscilando entre 1.0°C y 2.2°C.
- Temperaturas Medias (T° MEDIA):** Las temperaturas medias siguen una tendencia similar a las temperaturas mínimas, aunque con menos variabilidad extrema. Los valores más bajos de temperatura media se observan durante los meses de invierno, especialmente en junio (6.8°C) y julio (7.0°C). Los valores

más altos se registran en los primeros y últimos meses del año, con un pico en diciembre (11.2°C).

**Tabla 8**

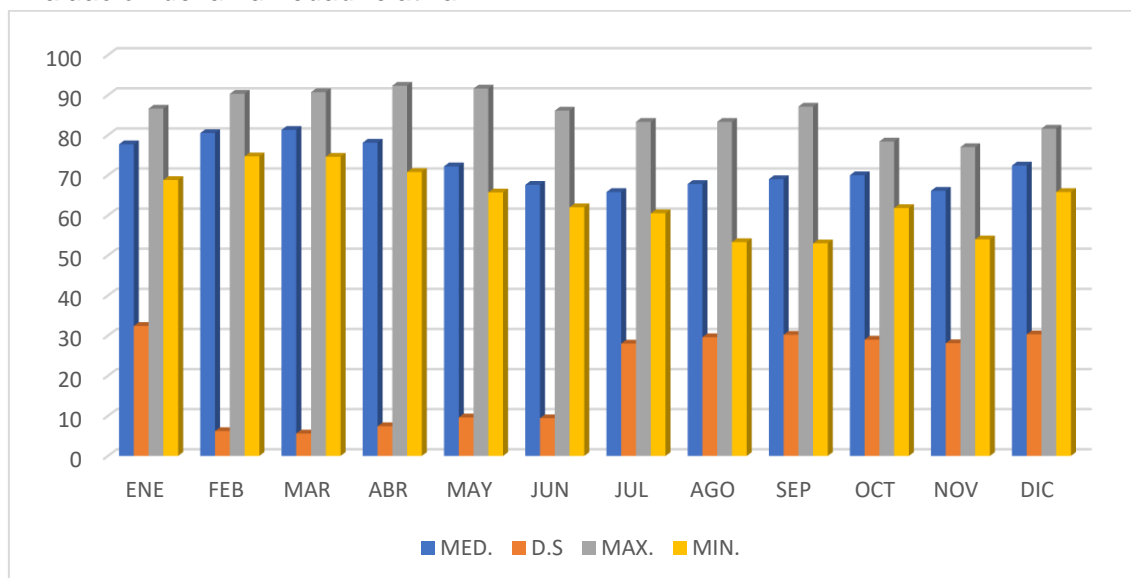
*Humedad Relativa*

| <b>AÑO</b>  | <b>ENE</b> | <b>FEB</b> | <b>MAR</b> | <b>ABR</b> | <b>MAY</b> | <b>JUN</b> | <b>JUL</b> | <b>AGO</b> | <b>SEP</b> | <b>OCT</b> | <b>NOV</b> | <b>DIC</b> |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>2010</b> | NaN        | 75.8       | 78.6       | 75         | 65.7       | 64.7       | 61.2       | 60.3       | 65.9       | 61.8       | 70.2       | 70.6       |
| <b>2011</b> | 81         | 84.1       | 81.4       | 77.6       | 70.5       | 63.8       | 63.6       | 68.9       | 69.4       | 73.3       | 67.6       | 78.2       |
| <b>2012</b> | 79.9       | 82.3       | 83.8       | 76.3       | 72.3       | 62         | 63.5       | 73.3       | 69.5       | 72.4       | 77         | 81.6       |
| <b>2013</b> | 86.6       | 90.3       | 90.7       | 92.3       | 91.6       | 86.1       | 83.3       | 83.3       | 87.1       | 78.4       | 61.7       | 80.6       |
| <b>2014</b> | 68.8       | 75.7       | 74.6       | 73.6       | 65.2       | 62.5       | 63.3       | 53         | 53         | 64.3       | 54         | 65.8       |
| <b>2015</b> | 72.1       | 74.7       | 78.5       | 70.8       | 66         | 63.4       | NaN        | NaN        | NaN        | NaN        | NaN        | NaN        |
| <b>MED.</b> | 77.7       | 80.5       | 81.3       | 78.1       | 72.2       | 67.6       | 65.8       | 67.8       | 69         | 70         | 66.1       | 72.4       |
| <b>D.S</b>  | 32.4       | 6.2        | 5.6        | 7.4        | 9.6        | 9.4        | 28         | 29.6       | 30.2       | 29         | 28.1       | 30.3       |
| <b>MAX.</b> | 86.6       | 90.3       | 90.7       | 92.3       | 91.6       | 86.1       | 83.3       | 83.3       | 87.1       | 78.4       | 77         | 81.6       |
| <b>MIN.</b> | 68.8       | 74.7       | 74.6       | 70.8       | 65.7       | 62         | 60.5       | 53.3       | 53         | 61.8       | 54         | 65.8       |

*Nota.* Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

**Figura 17**

*Evaluación de la humedad relativa*



La figura 17 presenta las estadísticas de temperatura a lo largo de los meses del año, incluyendo la temperatura media (MED.), la desviación estándar (D.S.), la temperatura máxima (MAX.), y la temperatura mínima (MIN.). A continuación, se ofrece una interpretación de estos datos:

- **Temperatura Media (MED.):** La temperatura media muestra una variabilidad moderada a lo largo del año. Los valores son relativamente altos en los primeros y últimos meses del año, alcanzando su pico en enero y diciembre. Los valores más bajos se registran en junio y julio, indicando un patrón estacional con inviernos fríos y veranos más cálidos.
- **Desviación Estándar (D.S.):** La desviación estándar indica la variabilidad de las temperaturas. Se observa que enero tiene una desviación estándar significativamente alta, sugiriendo una gran variabilidad en las temperaturas durante este mes. La desviación estándar es relativamente baja en otros meses, especialmente en marzo y abril, indicando una mayor consistencia en las temperaturas durante estos meses.
- **Temperatura Máxima (MAX.):** La temperatura máxima se mantiene relativamente constante a lo largo del año, con valores altos en la mayoría de los meses. Las temperaturas máximas más altas se registran en los meses de verano (enero, febrero, marzo) y en diciembre, reflejando los periodos más cálidos del año.
- **Temperatura Mínima (MIN.):** La temperatura mínima muestra una variabilidad considerable. Los valores más bajos se registran en los meses de invierno (mayo, junio, julio, agosto), con un aumento en los meses de transición (septiembre, octubre). Las temperaturas mínimas más altas se observan en los primeros y últimos meses del año.

A continuación, se presenta la evapotranspiración potencial.

**Tabla 9**

*Evapotranspiración potencial*

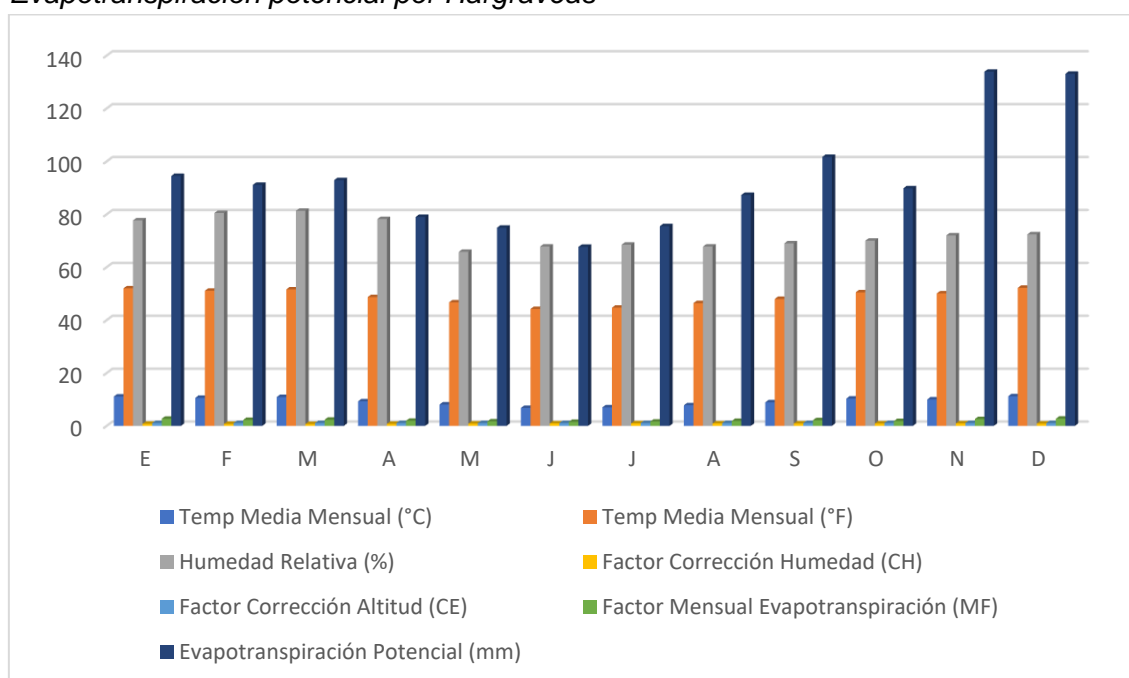
| MES | Temp Media Mensual (°C) | Temp Media Mensual (°F) | Humedad Relativa (%) | Factor Corrección Humedad (CH) | Factor Corrección Altitud (CE) | Factor Mensual Evap. (MF) | Evap. Potencial (mm) |
|-----|-------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------|
| E   | 11.1                    | 52                      | 77.7                 | 0.784                          | 1.072                          | 2.698                     | 94.5                 |
| F   | 10.6                    | 51.1                    | 80.5                 | 0.733                          | 1.072                          | 2.264                     | 91.1                 |
| M   | 10.9                    | 51.6                    | 81.3                 | 0.718                          | 1.072                          | 2.336                     | 92.9                 |
| A   | 9.3                     | 48.7                    | 78.2                 | 0.777                          | 1.072                          | 1.944                     | 79                   |

|          |      |      |      |       |       |       |       |
|----------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| <b>M</b> | 8.1  | 46.7 | 65.8 | 0.875 | 1.072 | 1.711 | 74.9  |
| <b>J</b> | 6.8  | 44.2 | 67.8 | 0.945 | 1.072 | 1.512 | 67.7  |
| <b>J</b> | 7    | 44.7 | 68.5 | 0.97  | 1.072 | 1.624 | 75.5  |
| <b>A</b> | 7.8  | 46.4 | 67.8 | 0.942 | 1.072 | 1.876 | 87.3  |
| <b>S</b> | 8.9  | 48   | 69   | 0.925 | 1.072 | 2.135 | 101.7 |
| <b>O</b> | 10.3 | 50.5 | 70   | 0.909 | 1.072 | 1.825 | 89.8  |
| <b>N</b> | 10   | 50.1 | 72   | 0.967 | 1.072 | 2.581 | 133.9 |
| <b>D</b> | 11.2 | 52.2 | 72.4 | 0.871 | 1.072 | 2.727 | 133.1 |

Nota. Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

**Figura 18**

*Evapotranspiración potencial por Hargreaves*



La figura 18 muestra la evolución mensual de varios parámetros climáticos y de evapotranspiración potencial calculados usando el método de Hargreaves, que se basa en la humedad relativa y la temperatura. A continuación, se presenta una interpretación de los datos:

- **Temperatura Media Mensual (°C y °F):** Las temperaturas medias mensuales en °C y °F muestran una disminución durante los meses de invierno (junio y julio) y un aumento durante los meses de verano (enero, febrero, y diciembre). Esto refleja el patrón estacional típico de la región.

- **Humedad Relativa (%):** La humedad relativa es más alta durante los meses de verano y otoño (enero a abril y octubre a diciembre), y disminuye en los meses de invierno (mayo a septiembre). Esto sugiere que la humedad en el aire es mayor durante los meses más cálidos y baja en los meses más fríos.
- **Factor de Corrección Humedad (CH):** El factor de corrección de humedad muestra ligeras variaciones a lo largo del año, con valores más altos en los meses de invierno, lo que sugiere ajustes en el cálculo de la evapotranspiración para compensar las variaciones de humedad relativa.
- **Factor de Corrección Altitud (CE):** Este factor se mantiene constante en 1.072 a lo largo del año, indicando que la corrección por altitud no varía mensualmente.
- **Factor Mensual de Evapotranspiración (MF):** Este factor varía a lo largo del año, con valores más bajos en los meses de invierno y más altos en los meses de verano y otoño. Este factor es crucial para ajustar el cálculo de la evapotranspiración potencial.
- **Evapotranspiración Potencial (mm):** La evapotranspiración potencial muestra variaciones significativas a lo largo del año. Los valores son más altos en los meses de octubre, noviembre y diciembre, alcanzando su pico en diciembre. Los valores más bajos se observan en los meses de invierno (junio y julio).

El cálculo de la evapotranspiración potencial mediante el método de Hargreaves, basado en la humedad relativa y la temperatura, muestra cómo estos factores influyen en la cantidad de agua que se evapora y transpira en diferentes meses del año. La mayor evapotranspiración potencial en los meses más cálidos y la menor en los meses más fríos es coherente con las variaciones esperadas en un clima estacional.

A continuación, se muestra la determinación de Coeficiente de uso consuntivo para la cédula de cultivo ( $k_c$ )

**Tabla 10***Modalidad de la cédula de cultivo (kc)*

| Cultivo        | Área (Ha) | Área (%) | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|----------------|-----------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <b>Papa</b>    | 6         | 30.00%   | B | B | B | B | R | R | R | R | R | B | B | B |
| <b>Cebada</b>  | 4         | 20.00%   | B | B | B | B | R | R | R | R | R | B | B | B |
| <b>Arveja</b>  | 2         | 10.00%   | B | B | B | B | R | R | R | R | R | B | B | B |
| <b>Alfalfa</b> | 8         | 40.00%   | B | B | B | B | B | B | B | B | B | B | B | B |

*Nota.* Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

La tabla 10 proporciona información sobre la distribución de cultivos y su modalidad a lo largo del año en una determinada área de cultivo. A continuación, se presenta una interpretación de los datos presentados en la tabla:

#### **A. Distribución de Área por Cultivo:**

- **Papa:** Ocupa 6 hectáreas, lo que representa el 30% del área total de cultivo.
- **Cebada:** Ocupa 4 hectáreas, lo que representa el 20% del área total de cultivo.
- **Arveja:** Ocupa 2 hectáreas, lo que representa el 10% del área total de cultivo.
- **Alfalfa:** Ocupa 8 hectáreas, lo que representa el 40% del área total de cultivo.

**B. Papa, Cebada y Arveja:** Estos cultivos tienen un ciclo de cultivo similar. Se realizan actividades de barbecho (B) en los primeros cuatro meses y en los últimos tres meses del año. Durante los meses de mayo a septiembre, estos cultivos están en rotación (R). Este ciclo sugiere una estrategia de manejo que optimiza el uso de la tierra y posiblemente gestiona la disponibilidad de agua y nutrientes en función de las temporadas.

**C. Alfalfa:** Este cultivo se mantiene en fase de barbecho durante todo el año. Esto puede indicar que la alfalfa se utiliza como un cultivo perenne que no requiere las mismas prácticas de rotación que los otros cultivos mencionados. La alfalfa podría estar destinada a usos como forraje, que necesita estar disponible durante todo el año.

**Tabla 11***Kc de los cultivos*

| <b>Cultivo</b> | <b>E</b> | <b>F</b> | <b>M</b> | <b>A</b> | <b>J</b> | <b>S</b> | <b>O</b> | <b>N</b> | <b>D</b> |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Papa</b>    | 1.01     | 1.05     | 0.53     | 1.1      | 1.07     | 0.95     | 0.9      | 0.85     | 0.7      |
| <b>Cebada</b>  | 1.05     | 1.08     | 0.5      | 1        | 0.85     | 0.85     | 0.8      | 0.85     | 0.65     |
| <b>Arveja</b>  | 1.18     | 1.17     | 0.45     | 1.05     | 1.01     | 0.9      | 0.85     | 0.8      | 0.8      |
| <b>Alfalfa</b> | 0.95     | 0.95     | 0.8      | 0.95     | 0.95     | 0.95     | 0.95     | 0.95     | 0.95     |

*Nota.* Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

La tabla 11 muestra los coeficientes de uso consuntivo del agua (kc) para diferentes cultivos a lo largo del año, en los meses de enero (E), febrero (F), marzo (M), abril (A), junio (J), septiembre (S), octubre (O), noviembre (N) y diciembre (D). A continuación, se ofrece una interpretación de estos valores:

**1. Papa:**

- Los valores más altos de kc se observan en abril (1.1) y junio (1.07), lo que indica que, durante estos meses, el cultivo de papa requiere más agua.
- Los valores más bajos se encuentran en marzo (0.53) y diciembre (0.7), lo que sugiere que el consumo de agua es menor durante estos meses.

**2. Cebada:**

- El coeficiente kc es más alto en febrero (1.08) y abril (1.0), indicando una mayor demanda de agua en estos meses.
- Los valores más bajos se registran en marzo (0.5) y diciembre (0.65), mostrando una menor necesidad de agua.

**3. Arveja:**

- Los valores máximos de kc se presentan en enero (1.18) y febrero (1.17), reflejando una mayor demanda hídrica al inicio del año.
- El valor más bajo se observa en marzo (0.45), indicando que la arveja necesita menos agua durante este mes.

**4. Alfalfa:**

- El coeficiente kc es constante durante la mayor parte del año (0.95), lo que sugiere que la alfalfa tiene una demanda de agua relativamente uniforme.
- La única excepción es marzo (0.8), cuando el uso consuntivo es ligeramente menor.

Además, observando la tabla también se puede inferir lo siguiente:

- **Variabilidad Estacional:** Los coeficientes de uso consuntivo varían significativamente entre los meses para los cultivos de papa, cebada y arveja, reflejando cambios estacionales en las necesidades de agua. En contraste, la alfalfa muestra una demanda de agua más estable a lo largo del año.
- **Meses de Mayor Demanda:** Para los cultivos de papa y arveja, los meses de mayor demanda de agua coinciden con los primeros meses del año, mientras que, para la cebada, la demanda es alta tanto a inicios como a mediados del año.
- **Meses de Menor Demanda:** Marzo y diciembre tienden a ser los meses con menor coeficiente kc para la mayoría de los cultivos, sugiriendo una menor necesidad de riego en estos periodos.

Una vez, obtenido los principales datos, se realiza el cálculo de la demanda hídrica (Ver Anexo N°3). Mientras que la demanda de agua del sistema de riego es el siguiente:

**Tabla 12**

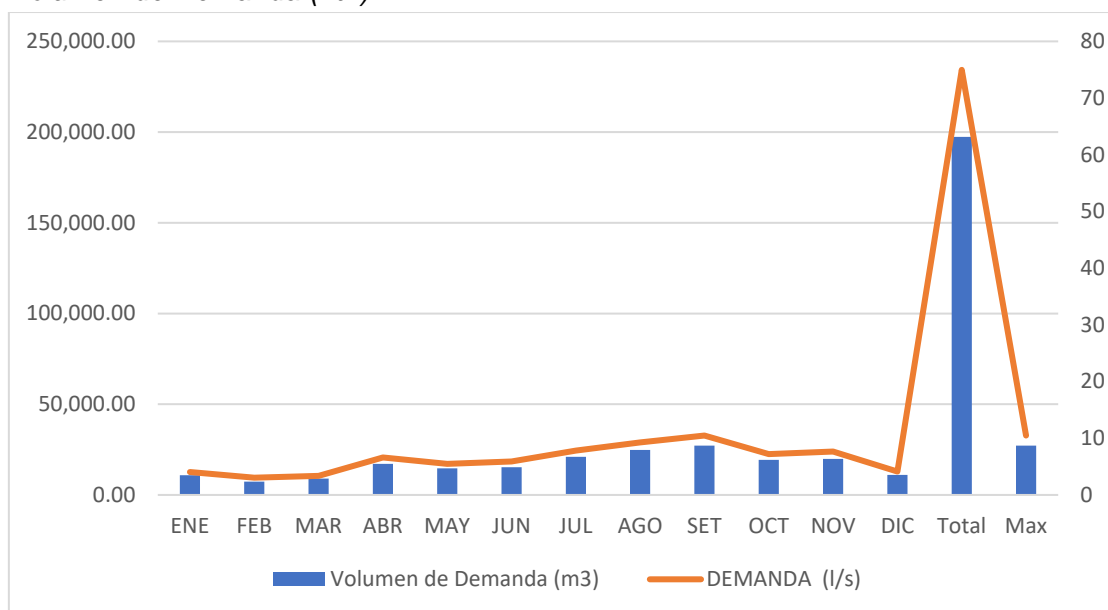
*Demanda de agua del sistema de riego*

| <b>Mes</b>   | <b>Volumen de Demanda (m<sup>3</sup>)</b> | <b>DEMANDA (l/s)</b> |
|--------------|---|----------------------|
| <b>ENE</b>   | 10,847.5                                  | 4.05                 |
| <b>FEB</b>   | 7,354.4                                   | 3.04                 |
| <b>MAR</b>   | 9,026.2                                   | 3.37                 |
| <b>ABR</b>   | 17,107.2                                  | 6.60                 |
| <b>MAY</b>   | 14,650.8                                  | 5.47                 |
| <b>JUN</b>   | 15,292.8                                  | 5.9                  |
| <b>JUL</b>   | 20,971.9                                  | 7.83                 |
| <b>AGO</b>   | 24,802.0                                  | 9.26                 |
| <b>SET</b>   | 27,164.2                                  | 10.48                |
| <b>OCT</b>   | 19,311.3                                  | 7.21                 |
| <b>NOV</b>   | 19,828.8                                  | 7.65                 |
| <b>DIC</b>   | 11,035.0                                  | 4.12                 |
| <b>Total</b> | 197,392.0                                 | 74.98                |
| <b>Max</b>   | 27,164.2                                  | 10.48                |

*Nota.* Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

**Figura 19**

Volumen de Demanda (m<sup>3</sup>)



### 3.9.4 Oferta Hídrica

Se detalla cómo se realizó la estimación de la disponibilidad de agua en la cuenca utilizando modelos matemáticos específicos en hidrología. Debido a la diversidad de problemas hidrológicos y la falta de un modelo universal, se aplicó el método “Generación de Caudales Mensuales en la Sierra Peruana – Lutz Scholz”, desarrollado en 1980 por el Programa Nacional de Pequeñas y Medianas Irrigaciones – Plan Meris II. Este enfoque, basado en la modelación matemática del ciclo hídrico, se adaptó a la ausencia de registros de caudal en la sierra peruana, empleando parámetros físicos y meteorológicos medidos mediante técnicas cartográficas y de campo.

#### 3.9.4.1 Coeficiente de Escurrimiento

Se ha considerado el uso de la fórmula propuesta por L. Turc:

$$C = \frac{P - D}{P}$$

Donde:

C = Coeficiente de escurrimiento (mm/año)

P = Precipitación total anual (mm/año)

D = Déficit de escurrimiento (mm/año)

Para calcular D, se emplea la siguiente fórmula:

$$D = P \frac{1}{\left[0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right]^{\left(\frac{1}{2}\right)}}$$

$$L = 300 + 25(T) + 0.05(T)^3$$

L = Coeficiente de Temperatura

T = Temperatura media anual (°C)

Sabiendo que  $Pe = P - ET$ , usaremos los datos de precipitación mensual de la Tabla 6 y la fórmula del método SCS

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

Donde:

$$I_a = 0.2 S$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Para CN=81

$$S = \frac{1000}{81} - 10 = 2.35 \text{ mm}$$

$$I_a = 0.2 \times 2.35 = 0.47 \text{ mm}$$

Aplicando la ecuación del Coeficiente de Escurrimiento (C) se obtiene los siguiente:

$$C = \frac{Q}{P}$$

**Tabla 13**

*Cálculo del del Coeficiente de Escurrimiento (C)*

| Mes     | P (mm) | ET (mm) | Pe (mm) | Q (mm) | C    |
|---------|--------|---------|---------|--------|------|
| Enero   | 136.7  | 94.5    | 42.2    | 42.1   | 0.31 |
| Febrero | 171.3  | 91.1    | 80.2    | 80     | 0.47 |
| Marzo   | 163.7  | 92.9    | 70.8    | 70.7   | 0.43 |

|                   |      |       |   |   |   |
|-------------------|------|-------|---|---|---|
| <b>Abril</b>      | 40.1 | 79    | 0 | 0 | 0 |
| <b>Mayo</b>       | 7.2  | 74.9  | 0 | 0 | 0 |
| <b>Junio</b>      | 1.7  | 67.7  | 0 | 0 | 0 |
| <b>Julio</b>      | 3.3  | 75.5  | 0 | 0 | 0 |
| <b>Agosto</b>     | 5.5  | 87.3  | 0 | 0 | 0 |
| <b>Septiembre</b> | 6.7  | 101.7 | 0 | 0 | 0 |
| <b>Octubre</b>    | 14.5 | 89.8  | 0 | 0 | 0 |
| <b>Noviembre</b>  | 16.8 | 133.9 | 0 | 0 | 0 |
| <b>Diciembre</b>  | 58.9 | 133.1 | 0 | 0 | 0 |

En los meses donde la evapotranspiración es mayor que la precipitación, no se produce escorrentía ( $Q = 0$ ). El coeficiente de escurrimiento es mayor en los meses con mayores precipitaciones y menor evapotranspiración relativa.

Los valores de  $Q$  y  $C$  para cada mes se calculan como se muestra en la tabla anterior, con valores significativos en los primeros tres meses del año, debido a la mayor precipitación en comparación con la evapotranspiración.

### 3.9.4.2 Precipitación Efectiva

Para calcular la precipitación efectiva, se supone que el caudal medio en la cuenca corresponde a un estado de equilibrio entre el gasto en conservación y la oferta. La lluvia efectiva está determinada por el coeficiente de escorrentía promedio, y la relación entre la lluvia efectiva y la lluvia total es el coeficiente de escorrentía.

Para efectos hidrológicos, la lluvia efectiva se define como la fracción del total de lluvia mensual correspondiente al déficit según el método USBR. Cabe señalar que la lluvia hidrológicamente efectiva es lo opuesto a la lluvia efectiva para los cultivos. Para simplificar el cálculo de la lluvia efectiva, se determinó un polinomio de quinto orden.

Para hallar la Precipitación Total Mensual ( $P$ ) se utilizará los datos proporcionados por la Tabla 6 (Promedio de la Estación Lucanas). A su vez se utilizarán los siguientes Coeficientes del polinomio para cada curva.

- **Curva I:**

$$a_0 = 0$$

$$a_1 = -0.0185$$

a2 = 0.001105  
a3 = -1.204E-05  
a4 = 1.440E-07  
a5 = -2.85E-10

- **Curva II:**

a0 = 0  
a1 = 0.1358  
a2 = -0.002296  
a3 = 4.35E-05  
a4 = -8.90E-08  
a5 = -8.79E-11

- **Curva III:**

a0 = 0  
a1 = 0.2756  
a2 = -0.004103  
a3 = 5.53E-05  
a4 = 1.24E-07  
a5 = -1.42E-09

Según el rango de precipitación mensual:

- **Curva I:**  $P > 177.8$  mm/mes
- **Curva II:**  $P > 152.4$  mm/mes
- **Curva III:**  $P > 127.0$  mm/mes

Dado que ninguna de las precipitaciones mensuales promedio supera los 127 mm, utilizaremos los coeficientes de la **Curva III**. Para esto utilizaremos el siguiente polinomio de Precipitación Efectiva (PE).

$$PE = a_0 + a_1P + a_2P^2 + a_3P^3 + a_4P^4 + a_5P^5$$

Se calcula  $PE$  para cada mes.

**ENERO:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 136.7 + (-0.004103) \times 136.7^2 + 5.53E - 05 \times 136.7^3 + 1.24E - 07 \times 136.7^4 + (-1.42E - 09) \times 136.7^5$$

$$PE \cong 0 + 37.66952 + (-76.560604) + 140.255091 + 43.122161 - 0.583595 \\ \approx 143.9 \text{ mm}$$

**FEBRERO:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 171.3 + (-0.004103) \times 171.3^2 + 5.53E - 05 \times 171.3^3 + 1.24E - 07 \times 171.3^4 + (-1.42E - 09) \times 171.3^5$$

$$PE \cong 0 + 47.19968 + (-120.4829) + 264.364417 + 85.600148 - 1.32696 \approx 275.4 \text{ mm}$$

**MARZO:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 163.7 + (-0.004103) \times 163.7^2 + 5.53E - 05 \times 163.7^3 + 1.24E - 07 \times 163.7^4 + (-1.42E - 09) \times 163.7^5$$

$$PE \cong 0 + 45.10972 + (-110.497861) + 238.462014 + 73.225428 - 0.923291 \\ \approx 245.4 \text{ mm}$$

**ABRIL:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 40.1 + (-0.004103) \times 40.1^2 + 5.53E - 05 \times 40.1^3 + 1.24E - 07 \times 40.1^4 + (-1.42E - 09) \times 40.1^5$$

$$PE \cong 0 + 11.05756 + (-6.593081) + 0.354845 + 0.030547 - 0.000042 \approx 4.85 \text{ mm}$$

**MAYO:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 7.2 + (-0.004103) \times 7.2^2 + 5.53E - 05 \times 7.2^3 + 1.24E - 07 \times 7.2^4 \\ + (-1.42E - 09) \times 7.2^5$$

$$PE \cong 0 + 1.9832 + (-0.21208) + 0.020674 + 0.000482 - 0.000001 \approx 1.79 \text{ mm}$$

**JUNIO:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 1.7 + (-0.004103) \times 1.7^2 + 5.53E - 05 \times 1.7^3 + 1.24E - 07 \times 1.7^4 \\ + (-1.42E - 09) \times 1.7^5$$

$$PE \cong 0 + 0.46852 + (-0.011857) + 0.000274 + 0.000007 - 0.000000 \approx 0.46 \text{ mm}$$

**JULIO:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 3.3 + (-0.004103) \times 3.3^2 + 5.53E - 05 \times 3.3^3 + 1.24E - 07 \times 3.3^4 \\ + (-1.42E - 09) \times 3.3^5$$

$$PE \cong 0 + 0.90948 + (-0.044793) + 0.001964 + 0.000053 - 0.000000 \approx 0.87 \text{ mm}$$

**AGOSTO:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 5.5 + (-0.004103) \times 5.5^2 + 5.53E - 05 \times 5.5^3 + 1.24E - 07 \times 5.5^4 \\ + (-1.42E - 09) \times 5.5^5$$

$$PE \cong 0 + 1.5158 + (-0.124168) + 0.016653 + 0.000231 - 0.000000 \approx 1.41 \text{ mm}$$

**SEPTIEMBRE:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 6.7 + (-0.004103) \times 6.7^2 + 5.53E - 05 \times 6.7^3 + 1.24E - 07 \times 6.7^4 \\ + (-1.42E - 09) \times 6.7^5$$

$$PE \cong 0 + 1.84652 + (-0.184759) + 0.027147 + 0.000465 - 0.000000 \approx 1.69 \text{ mm}$$

**OCTUBRE:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 14.5 + (-0.004103) \times 14.5^2 + 5.53E - 05 \times 14.5^3 + 1.24E \\ - 07 \times 14.5^4 + (-1.42E - 09) \times 14.5^5$$

$$PE \cong 0 + 3.9932 + (-0.276821) + 0.115412 + 0.002019 - 0.000000 \approx 3.83 \text{ mm}$$

**NOVIEMBRE:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 16.8 + (-0.004103) \times 16.8^2 + 5.53E - 05 \times 16.8^3 + 1.24E - 07 \times 16.8^4 + (-1.42E - 09) \times 16.8^5$$

$$PE \cong 0 + 4.63128 + (-0.324182) + 0.153736 + 0.003887 - 0.000000 \approx 4.46 \text{ mm}$$

**DICIEMBRE:**

$$PE = 0 + 0.2756 \times 58.9 + (-0.004103) \times 58.9^2 + 5.53E - 05 \times 58.9^3 + 1.24E - 07 \times 58.9^4 + (-1.42E - 09) \times 58.9^5$$

$$PE \cong 0 + 16.22684 + (-14.277801) + 10.429538 + 0.003887 - 0.000000 \approx 12.38 \text{ mm}$$

A continuación, se presenta un resumen de los cálculos realizados:

**Tabla 14***Resumen de la Precipitación Efectiva (PE)*

| <b>Mes</b>        | <b>P (mm)</b> | <b>PE (mm)</b> |
|-------------------|---------------|----------------|
| <b>Enero</b>      | 136.7         | 143.9          |
| <b>Febrero</b>    | 171.3         | 275.4          |
| <b>Marzo</b>      | 163.7         | 245.4          |
| <b>Abril</b>      | 40.1          | 4.85           |
| <b>Mayo</b>       | 7.2           | 1.79           |
| <b>Junio</b>      | 1.7           | 0.46           |
| <b>Julio</b>      | 3.3           | 0.87           |
| <b>Agosto</b>     | 5.5           | 1.41           |
| <b>Septiembre</b> | 6.7           | 1.69           |
| <b>Octubre</b>    | 14.5          | 3.83           |
| <b>Noviembre</b>  | 16.8          | 4.46           |
| <b>Diciembre</b>  | 58.9          | 12.38          |

Estos son los valores de la precipitación efectiva (PE) para cada mes utilizando el polinomio de quinto grado y los coeficientes proporcionados para la Curva III.

### 3.9.4.3 Retención de la Cuenca

Para calcular la Retención de la Cuenca se utilizarán los valores de PE calculados anteriormente (Ver Tabla 14). A su vez, se calcula el Caudal Mensual (CMi) el cual es equivalente a la Precipitación Efectiva Mensual (PEi):

$$CMi = PEi$$

Para cada mes:

$$Ri = Gi \text{ si } PEi > 0$$

$$Ri = Ai \text{ si } PEi < 0$$

En este caso, todos los valores de PEi son positivos, por lo que:  $Ri = Gi$ . Sumando los valores de G (abastecimiento de la retención) para obtener la retención total de la cuenca para el año promedio (Ver Tabla 15).

**Tabla 15**

*Abastecimiento de la retención (Gi) mm*

| Mes        | PE (mm) | Gi (mm) |
|------------|---------|---------|
| Enero      | 143.9   | 143.9   |
| Febrero    | 275.4   | 275.4   |
| Marzo      | 245.4   | 245.4   |
| Abril      | 4.85    | 4.85    |
| Mayo       | 1.79    | 1.79    |
| Junio      | 0.46    | 0.46    |
| Julio      | 0.87    | 0.87    |
| Agosto     | 1.41    | 1.41    |
| Septiembre | 1.69    | 1.69    |
| Octubre    | 3.83    | 3.83    |
| Noviembre  | 4.46    | 4.46    |
| Diciembre  | 12.38   | 12.38   |

Sumando los valores mensuales de Gi para obtener la retención total anual de la cuenca:

$$R_{total} = \sum_{i=1}^{12} Gi$$

$$R_{total} = 143.9 + 275.4 + 245.4 + 4.85 + 1.79 + 0.46 + 0.87 + 1.41 + 1.69 + 3.83 + 4.46 \\ + 12.38$$

$$R_{total} = 696.78 \text{ mm}$$

La retención total anual de la cuenca para el año promedio es 696.78 mm.

#### 3.9.4.4 Relación entre Descargas y Retención

Para calcular la relación entre descargas y retención, usaremos el coeficiente de agotamiento  $A$  el cual se calcula usando la siguiente fórmula:

$$k = \frac{1}{T_c}$$

donde  $T_c$  es el tiempo de concentración el cual en la Tabla 3, se calculó previamente con un valor de 1.22 horas.

$$k = \frac{1}{1.22} \approx 0.82 \text{ horas}^{-1}$$

Sin embargo, para el cálculo de la descarga durante la estación seca, el coeficiente de agotamiento  $A$  debe estar en una unidad de tiempo más apropiada para largos periodos (como días), ya que la estación seca se calcula en días y no en horas. Por lo tanto, recalculamos  $A$  en términos de días:

$$A = \frac{0.82}{24} \approx 0.034 \text{ días}^{-1}$$

Ahora vamos a recalcular  $Q_t$  usando el coeficiente de agotamiento  $A$  adecuado. La descarga inicial  $Q_0$  se mantiene:

$$Q_0 = \frac{R_{total}}{t} = \frac{696.78 \text{ mm}}{180 \text{ días}} \approx 3.87 \text{ mm/día}$$

Para calcular  $Q_t$  para cada mes de la estación seca utilizamos la siguiente fórmula:

$$Q_t = Q_0 e^{-A(t)}$$

Obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 16**

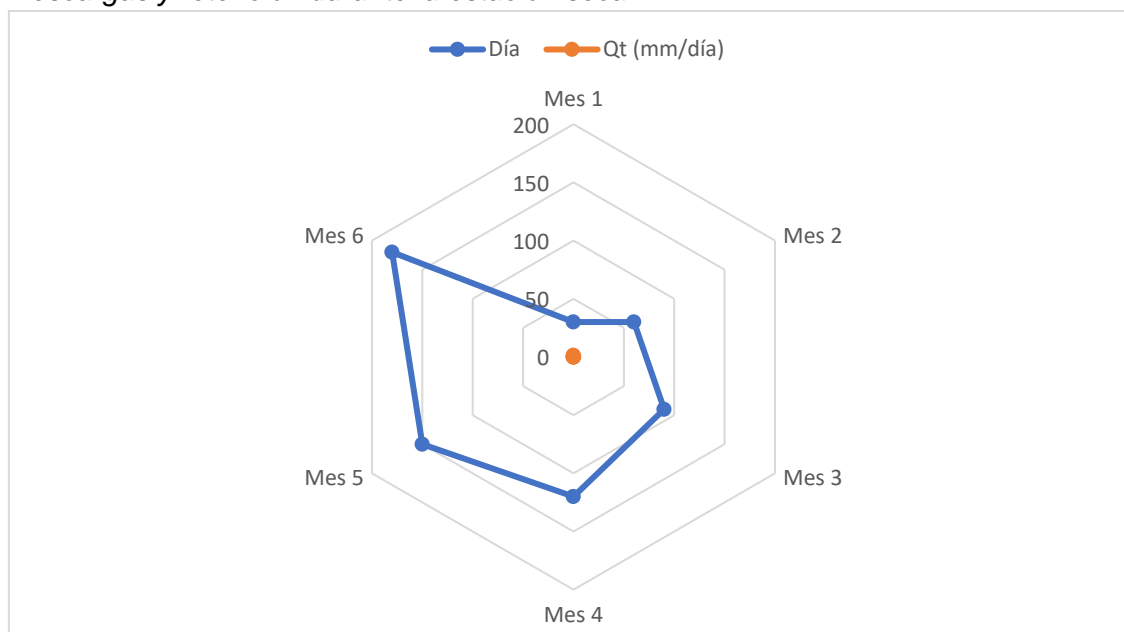
*Cálculo de  $Q_t$  para cada mes de la estación seca*

| Mes   | Día | $Q_t$ (mm/día) |
|-------|-----|----------------|
| Mes 1 | 30  | 1.39           |
| Mes 2 | 60  | 0.5            |
| Mes 3 | 90  | 0.19           |
| Mes 4 | 120 | 0.07           |
| Mes 5 | 150 | 0.03           |
| Mes 6 | 180 | 0.008          |

Esta tabla muestra la relación entre descargas y retención durante la estación seca, con descargas disminuyendo exponencialmente con el tiempo debido al coeficiente de agotamiento ajustado a días.

**Figura 20**

*Descargas y retención durante la estación seca*



### 3.9.4.5 Coeficiente de Agotamiento

Para calcular el coeficiente de agotamiento  $a$  se seguirán los siguientes pasos:

**Determinar los parámetros de entrada:**

- Área de la cuenca (AR)
- Evapotranspiración potencial anual (EP)
- Duración de la temporada seca (T)
- Retención total de la cuenca (R)

Sabiendo que:

**Área de la Cuenca (AR):**  $AR=4.07 \text{ km}^2$

**Evapotranspiración Potencial Anual (EP):**

Sumamos la evapotranspiración mensual (Ver Tabla 9) para obtener el valor anual:

$$EP_{\text{anual}} = 94.5 + 91.1 + 92.9 + 79.0 + 74.9 + 67.7 + 75.5 + 87.3 + 101.7 + 89.8 \\ + 133.9 + 133.1 = 1221.4 \text{ mm/año}$$

**Duración de la Temporada Seca (T):**  $T=180$  días

**Retención Total de la Cuenca (R):**  $R=696.78$  mm/año

Dado que la retención es alta (arriba de 100 mm/año) y asumiendo vegetación mezclada, usamos la fórmula para el agotamiento reducido:

$$a = -0.00252 \times \ln(AR) + 0.023$$

**El Área de la Cuenca (AR):**  $\ln(4.07) \approx 1.406$

$$a = -0.00252 \times 1.406 + 0.023$$

$$a = -0.00354 + 0.023$$

$$a \approx 0.01946 \text{ por día}$$

Para validar lo hallado, se procede a utilizar la ecuación empírica:

$$a = 3.1249 \times 10^{67} \times (AR)^{-0.1144} \times (EP)^{-19.336} \times (T)^{-3.369} \times (R)^{-1.429}$$

Substituyendo los valores:

$$a = 3.1249 \times 10^{67} \times (4.07)^{-0.1144} \times (1221.4)^{-19.336} \times (180)^{-3.369} \times (696.78)^{-1.429}$$

El coeficiente de agotamiento  $a$ , usando la fórmula para agotamiento reducido, es:

$$a \approx 0.01946 \text{ por día}$$

Ahora recalculamos la relación entre descargas y retención utilizando este valor actualizado.

Usamos la fórmula:

$$Q_t = Q_0 e^{-A(t)}$$

**Tabla 17**

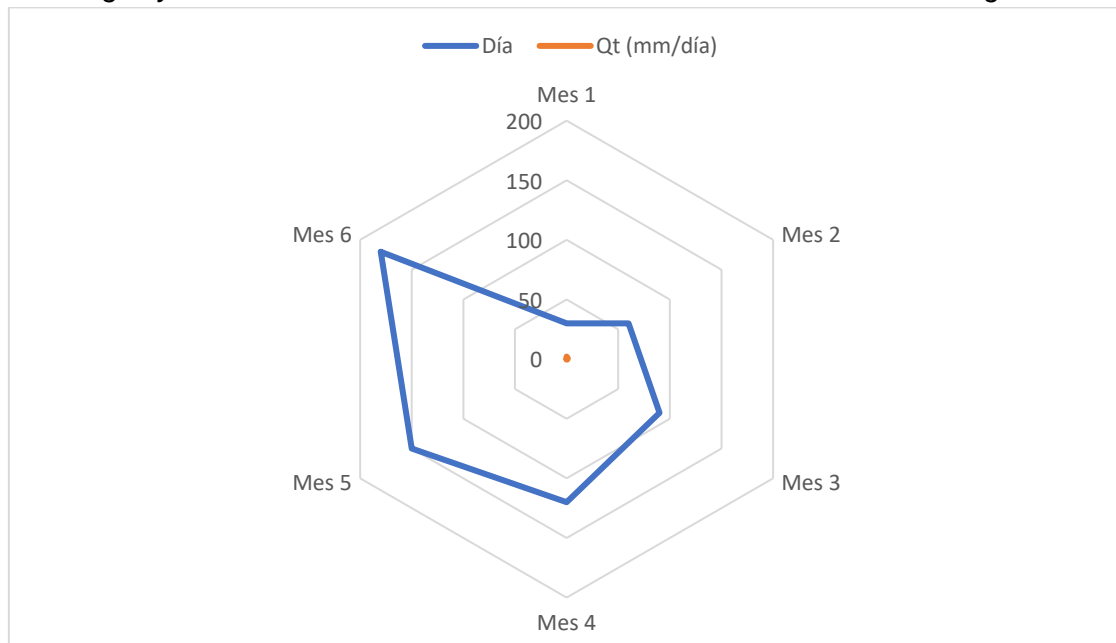
Recálculo de  $Q_t$  para cada mes de la estación seca

| Mes   | Día | $Q_t$ (mm/día) |
|-------|-----|----------------|
| Mes 1 | 30  | 2.16           |
| Mes 2 | 60  | 1.2            |
| Mes 3 | 90  | 0.67           |
| Mes 4 | 120 | 0.37           |
| Mes 5 | 150 | 0.21           |
| Mes 6 | 180 | 0.12           |

Esta tabla muestra la relación entre descargas y retención durante la estación seca con el coeficiente de agotamiento ajustado a 0.01946 por día.

**Figura 21**

*Descargas y retención durante la estación seca en base al coeficiente de agotamiento*



### 3.9.5 Determinación de caudal para un año promedio

Se fundamenta en la ecuación principal que determina el balance hídrico mensual usando los componentes mencionados previamente:

$$CMi = PEi + Gi - Ai$$

donde:

- $CMi$  es el caudal del mes  $ii$  (mm/mes),
- $PEi$  es la precipitación efectiva del mes  $ii$  (mm/mes),
- $Gi$  es el gasto de retención del mes  $ii$  (mm/mes),
- $Ai$  es el abastecimiento del mes  $ii$  (mm/mes).

Los resultados del modelo están presentados en la tabla 18, donde se indica que el volumen anual de producción de caudales de la Cuenca Ccachccalla es de 0.85 MMC.

**Tabla 18**

*Descargas medias mensuales Generadas (m<sup>3</sup>/s)*

| MES  | CAUDALES<br>AL 75<br>% PERSIS.<br>CUEN<br>CA<br>(m <sup>3</sup> /s) | VOLUMEN<br>AL 75 %<br>PERSIS.<br>CUENCA<br>(m <sup>3</sup> ) | CAUAL<br>ECOL<br>ÓGICO<br>CUENCA<br>(m <sup>3</sup> /s) | VOLUMEN<br>ECOLÓ<br>GICO<br>CUENCA<br>(m <sup>3</sup> ) | VOLUMEN<br>DE<br>OFERTA DE<br>LA<br>CUENCA<br>(m <sup>3</sup> ) | CAUDAL<br>OFERTA<br>DE LA<br>CUENCA<br>(m <sup>3</sup> /s) | CAUDAL<br>OFER<br>TA DE<br>LA<br>CUENCA<br>(l/s) | VOLUMEN<br>OFERTA<br>(MMC) |
|------|---|--|---|---|---|--|--|----------------------------|
| Ene. | 0.053   | 140924.10  | 0.010   | 27161.63  | 113,762.48  | 0.0425   | 42.47  | 0.11                       |
| Feb. | 0.109   | 263163.99  | 0.018   | 42634.93  | 220,529.06  | 0.0912   | 91.16  | 0.22                       |
| Mar. | 0.126   | 336168.12  | 0.018   | 48868.06  | 287,300.06  | 0.1073   | 107.27   | 0.29                       |
| Abr. | 0.013   | 33172.37   | 0.002   | 6271.55   | 26,900.82   | 0.0104   | 10.38  | 0.03                       |
| May. | 0.013   | 34278.11   | 0.003   | 7239.56   | 27,038.56   | 0.0101   | 10.10  | 0.03                       |
| Jun. | 0.013   | 33172.37   | 0.002   | 6223.19   | 26,949.18   | 0.0104   | 10.40  | 0.03                       |
| Jul. | 0.013   | 34278.11   | 0.003   | 7265.60   | 27,012.51   | 0.0101   | 10.09  | 0.03                       |
| Ago. | 0.013   | 34278.11   | 0.003   | 6827.41   | 27,450.70   | 0.0102   | 10.25  | 0.03                       |
| Set. | 0.013   | 33172.37   | 0.002   | 6008.21   | 27,164.16   | 0.0105   | 10.48  | 0.03                       |
| Oct. | 0.013   | 34278.11   | 0.003   | 7052.91   | 27,225.20   | 0.0102   | 10.16  | 0.03                       |
| Nov. | 0.013   | 33172.37   | 0.002   | 4366.58   | 28,805.79   | 0.0111   | 11.11  | 0.03                       |
| Dic. | 0.013   | 34278.11   | 0.003   | 7675.18   | 26,602.94   | 0.0099   | 9.93   | 0.03                       |

*Nota.* Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

### 3.9.5.1 Generación de Caudales al 75% de Persistencia

La tabla 19 muestra los datos de caudales con un 75 % de persistencia calculados para la cuenca que se está estudiando.

**Tabla 19**

Caudales 75% Persistencia ( $m^3/s$ )

| MES  | CAUDALES AL 75 % PERSIS. CUENCA ( $m^3/s$ ) | VOLUMEN AL 75 % PERSIS. CUENCA ( $m^3$ ) |
|------|---|--|
| Ene. | 0.053                                       | 140924.10                                |
| Feb. | 0.109                                       | 263163.99                                |
| Mar. | 0.126                                       | 336168.12                                |
| Abr. | 0.013                                       | 33172.37                                 |
| May. | 0.013                                       | 34278.11                                 |
| Jun. | 0.013                                       | 33172.37                                 |
| Jul. | 0.013                                       | 34278.11                                 |
| Ago. | 0.013                                       | 34278.11                                 |
| Set. | 0.013                                       | 33172.37                                 |
| Oct. | 0.013                                       | 34278.11                                 |
| Nov. | 0.013                                       | 33172.37                                 |
| Dic. | 0.013                                       | 34278.11                                 |

Nota. Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

### 3.9.6 Balance hídrico

Previo a la ejecución del balance hidrológico, se incluye el cuadro de oferta, donde también se muestra el caudal ecológico.

**Tabla 20**

Cálculo de oferta

| MES  | CAUDALES AL 75 % PERSIS. CUENCA ( $m^3/s$ ) | VOLUMEN AL 75 % PERSIS. CUENCA ( $m^3$ ) | CAUDAL ECOLÓGICO CUENCA ( $m^3/s$ ) | VOLUMEN ECOLÓGICO CUENCA ( $m^3$ ) | VOLUMEN DE OFERTA DE LA CUENCA ( $m^3$ ) | CAUDAL OFERTA DE LA CUENCA ( $m^3/s$ ) | CAUDAL OFERTA DE LA CUENCA (l/s) | VOLUMEN OFERTA (MMC) |
|------|---|--|-------------------------------------|------------------------------------|--|--|----------------------------------|----------------------|
| Ene. | 0.053                                       | 140924.10                                | 0.015                               | 40742.44                           | 100,181.66                               | 0.0374                                 | 37.40                            | 0.10                 |
| Feb. | 0.109                                       | 263163.99                                | 0.026                               | 63952.40                           | 199,211.59                               | 0.0823                                 | 82.35                            | 0.20                 |
| Mar. | 0.126                                       | 336168.12                                | 0.027                               | 73302.09                           | 262,866.03                               | 0.0981                                 | 98.14                            | 0.26                 |
| Abr. | 0.013                                       | 33172.37                                 | 0.004                               | 9407.33                            | 23,765.04                                | 0.0092                                 | 9.17                             | 0.02                 |

|             |       |          |       |          |           |        |       |      |
|-------------|-------|----------|-------|----------|-----------|--------|-------|------|
| <b>May.</b> | 0.013 | 34278.11 | 0.003 | 7239.56  | 27,038.56 | 0.0101 | 10.10 | 0.03 |
| <b>Jun.</b> | 0.013 | 33172.37 | 0.002 | 6223.19  | 26,949.18 | 0.0104 | 10.40 | 0.03 |
| <b>Jul.</b> | 0.013 | 34278.11 | 0.003 | 7265.60  | 27,012.51 | 0.0101 | 10.09 | 0.03 |
| <b>Ago.</b> | 0.013 | 34278.11 | 0.003 | 6827.41  | 27,450.70 | 0.0102 | 10.25 | 0.03 |
| <b>Set.</b> | 0.013 | 33172.37 | 0.002 | 6008.21  | 27,164.16 | 0.0105 | 10.48 | 0.03 |
| <b>Oct.</b> | 0.013 | 34278.11 | 0.003 | 7052.91  | 27,225.20 | 0.0102 | 10.16 | 0.03 |
| <b>Nov.</b> | 0.013 | 33172.37 | 0.003 | 6549.87  | 26,622.50 | 0.0103 | 10.27 | 0.03 |
| <b>Dic.</b> | 0.013 | 34278.11 | 0.004 | 11512.77 | 22,765.35 | 0.0085 | 8.50  | 0.02 |

*Nota.* Tomado del Informe Técnico N° 0040-2022-ANA-AAA-CHCH/LAMC. Fuente (Ana, 2021)

En el balance hídrico del proyecto, se tomaron en cuenta las fuentes de agua del río Cachccalla que facilitarán el riego de las áreas. A continuación, se presentan los valores del balance hídrico en metros cúbicos y litros por segundo.

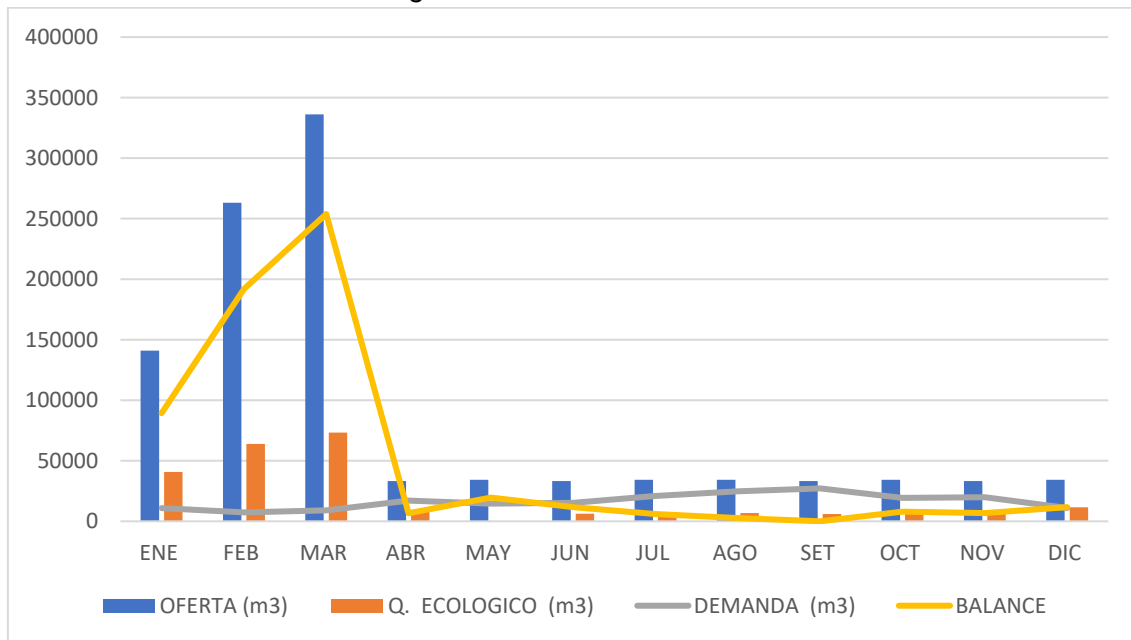
**Tabla 21**

*Balance Hidrológico*

| <b>VARIABLE</b> | <b>OFERTA<br/>(m<sup>3</sup>)</b> | <b>Q. ECOLOGICO (m<sup>3</sup>)</b> | <b>DEMANDA<br/>(m<sup>3</sup>)</b> | <b>BALANCE</b> |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------|
| <b>ENE</b>      | 140924.1                          | 40742.4                             | 10847.5                            | 89334.2        |
| <b>FEB</b>      | 263164                            | 63952.4                             | 7354.4                             | 191857.2       |
| <b>MAR</b>      | 336168.1                          | 73302.1                             | 9026.2                             | 253839.8       |
| <b>ABR</b>      | 33172.4                           | 9407.3                              | 17107.2                            | 6657.8         |
| <b>MAY</b>      | 34278.1                           | 0                                   | 14650.8                            | 19627.3        |
| <b>JUN</b>      | 33172.4                           | 6223.2                              | 15292.8                            | 11656.4        |
| <b>JUL</b>      | 34278.1                           | 7265.6                              | 20971.9                            | 6040.6         |
| <b>AGO</b>      | 34278.1                           | 6827.4                              | 24802                              | 2648.7         |
| <b>SET</b>      | 33172.4                           | 6008.2                              | 27164.2                            | 0              |
| <b>OCT</b>      | 34278.1                           | 7052.9                              | 19311.3                            | 7913.9         |
| <b>NOV</b>      | 33172.4                           | 6549.9                              | 19828.8                            | 6793.7         |
| <b>DIC</b>      | 34278.1                           | 11512.8                             | 11035                              | 11730.3        |

**Figura 22**

*Variación en el balance hidrológico*



## RESULTADOS

### 4.1 Análisis e Interpretación de los resultados

#### 4.1.1 Modelo matemático sobre los patrones de flujo de agua

Usaremos modelos de regresión lineal/múltiple y árboles de regresión para desarrollar un modelo matemático del patrón de flujo del Sistema Técnico de Riego Comunitario de Challhualla. Este proceso se divide en varios pasos, que incluyen la recopilación y preparación de datos, el desarrollo y validación de modelos matemáticos y la interpretación de resultados. A continuación se presenta el desarrollo del modelo matemático.

Los datos utilizados son los mencionados anteriormente:

- **Precipitación Mensual (P):** Datos de las Tablas 5 y 6.
- **Evapotranspiración Potencial (ET):** Datos de la Tabla 9.
- **Temperatura Media Mensual (T):** Datos de la Tabla 7.
- **Caudal (Q):** Datos calculados de Precipitación Efectiva (PE) de la Tabla 14.

#### Ecuación del Modelo

La regresión lineal simple busca establecer una relación directa entre dos variables. En este caso, modelaremos la relación entre la precipitación mensual y el caudal.

$$Q_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot P_i + \epsilon_i$$

Donde:

- $Q_i$  es el caudal en el mes  $i$ .
- $P_i$  es la precipitación en el mes  $i$ .
- $\beta_0$  es la intercepción o término independiente.
- $\beta_1$  es el coeficiente de la pendiente.
- $\epsilon_i$  es el término de error o residual.

Aplicamos este modelo utilizando el siguiente código de programación en Python, además los resultados simulados se pueden observar en el Anexo N°4.

```

import pandas as pd
from sklearn.linear_model import LinearRegression

data = {
    'Mes': ['Enero', 'Febrero', 'Marzo', 'Abril', 'Mayo', 'Junio',
            'Julio', 'Agosto', 'Septiembre', 'Octubre', 'Noviembre',
            'Diciembre'],
    'Precipitación': [136.7, 171.3, 163.7, 40.1, 7.2, 1.7, 3.3, 5.5,
                      6.7, 14.5, 16.8, 58.9],
    'Caudal': [143.9, 275.4, 245.4, 4.85, 1.79, 0.46, 0.87, 1.41,
              1.69, 3.83, 4.46, 12.38]
}

df = pd.DataFrame(data)

X = df[['Precipitación']]
y = df['Caudal']

model = LinearRegression()
model.fit(X, y)

beta_0 = model.intercept_
beta_1 = model.coef_[0]

print(f"Intercepción (β0): {beta_0}")
print(f"Coeficiente (β1): {beta_1}")

print(f"Q_i = {beta_0} + {beta_1} * P_i")

```

La ecuación de la regresión lineal simple que se ha obtenido es:

$$Q_i = -20.256482177851787 + 1.4998687518106986 \cdot P_i$$

Donde:

- $Q_i$  es el caudal en el mes  $i$ .
- $P_i$  es la precipitación en el mes  $i$ .

La interpretación de esta ecuación se define de la siguiente forma:

**A. Intercepción ( $\beta_0$ ): -20.256482177851787:** La intercepción, también conocida como término independiente o constante, representa el valor de  $Q_i$  cuando  $P_i$  es cero. En otras palabras, es el valor del caudal cuando no hay precipitación.

**Interpretación:**

- En este caso, si no hubiera precipitación (es decir,  $P_i=0$ ), el modelo predice que el caudal  $Q_i$  sería aproximadamente  $-20.256 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Aunque un caudal negativo no tiene un significado físico directo, este valor negativo puede ser indicativo de ajustes necesarios en el modelo o la presencia de otras variables no consideradas que influyen en el caudal.

**B. Coeficiente de la pendiente ( $\beta_1$ ): 1.4998687518106986:** El coeficiente de la pendiente indica el cambio en el caudal  $Q_i$  por cada unidad adicional de precipitación  $P_i$ .

**Interpretación:**

- Por cada incremento de 1 mm en la precipitación, el caudal aumenta en aproximadamente  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Este coeficiente refleja la sensibilidad del caudal respecto a los cambios en la precipitación.

La aplicación de este modelo radica en que, si queremos predecir el caudal para un mes con una precipitación específica, digamos  $P_i=100$ , podemos usar la ecuación del modelo para calcular  $Q_i$ :

$$Q_i = -20.256482177851787 + 1.4998687518106986 \cdot 100$$

$$Q_i = -20.256482177851787 + 149.98687518106986$$

$$Q_i = 129.73 \text{ m}^3/\text{s}$$

Esto significa que, según el modelo, si la precipitación en un mes es de 100 mm, se espera que el caudal sea aproximadamente  $129.73 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Es importante evaluar el ajuste del modelo a los datos, utilizando métricas como el error cuadrático medio (MSE), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), y análisis de residuales. Esto nos permitirá verificar si el modelo es adecuado para hacer predicciones precisas, y es por ello que se debe de tener en consideración las siguientes limitaciones:

- 1. Simplicidad del Modelo:** La regresión lineal simple solo considera una variable predictora (precipitación). En realidad, el caudal también puede depender de otras variables como la evapotranspiración y la temperatura.
- 2. Valores Negativos de Caudal:** La presencia de una intercepción negativa puede indicar la necesidad de revisar el modelo o incluir más variables para mejorar la predicción.
- 3. Suposiciones del Modelo:** El modelo de regresión lineal asume una relación lineal entre las variables, lo cual puede no ser siempre válido

En base a las limitaciones mencionadas anteriormente se toma en consideración un modelo más desarrollado, el cual es un modelo de regresión múltiple.

### Ecuación del Modelo

La regresión lineal múltiple amplía la regresión simple al incluir más variables predictoras, permitiendo capturar mejor la complejidad del sistema.

$$Q_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot P_i + \beta_2 \cdot ET_i + \beta_3 \cdot T_i + \epsilon_i$$

Donde:

- $ET_i$  es la evapotranspiración en el mes  $i$ .
- $T_i$  es la temperatura media en el mes  $i$ .

Aplicamos este modelo utilizando el siguiente código de programación en Python, además los resultados simulados se pueden observar en el Anexo N°4.

```
data_extended = {
    'Mes': ['Enero', 'Febrero', 'Marzo', 'Abril', 'Mayo', 'Junio',
           'Julio', 'Agosto', 'Septiembre', 'Octubre', 'Noviembre',
           'Diciembre'],
    'Precipitación': [136.7, 171.3, 163.7, 40.1, 7.2, 1.7, 3.3, 5.5,
                     6.7, 14.5, 16.8, 58.9],
    'Evapotranspiración': [94.5, 91.1, 92.9, 79.0, 74.9, 67.7, 75.5,
                          87.3, 101.7, 89.8, 133.9, 133.1],
    'Temperatura': [11.1, 10.6, 10.9, 9.3, 8.1, 6.8, 7.0, 7.8, 8.9,
                   10.3, 10.0, 11.2],
    'Caudal': [143.9, 275.4, 245.4, 4.85, 1.79, 0.46, 0.87, 1.41,
              1.69, 3.83, 4.46, 12.38]
}

df_extended = pd.DataFrame(data_extended)
```

```

X = df_extended[['Precipitación', 'Evapotranspiración',
'Temperatura']]
y = df_extended['Caudal']

model = LinearRegression()
model.fit(X, y)

beta_0 = model.intercept_
beta_1, beta_2, beta_3 = model.coef_

print(f"Intercepción (β0): {beta_0}")
print(f"Coefficiente de Precipitación (β1): {beta_1}")
print(f"Coefficiente de Evapotranspiración (β2): {beta_2}")
print(f"Coefficiente de Temperatura (β3): {beta_3}")

print(f"Q_i = {beta_0} + {beta_1} * P_i + {beta_2} * ET_i + {beta_3}
* T_i")

```

En la regresión lineal múltiple, los coeficientes obtenidos del modelo proporcionan información sobre cómo cada una de las variables predictoras (precipitación, evapotranspiración y temperatura) influye en la variable de respuesta (caudal).

La ecuación de la regresión lineal múltiple obtenida es:

$$Q_i = 113.63142479511544 + 1.7905230422931788 \cdot P_i + 0.13593822421258484 \cdot ET_i + (-17.331802284516293) \cdot T_i$$

Donde:

- $Q_i$  es el caudal en el mes  $i$ .
- $P_i$  es la precipitación en el mes  $i$ .
- $ET_i$  es la evapotranspiración en el mes  $i$ .
- $T_i$  es la temperatura media en el mes  $i$ .

La interpretación de esta ecuación se define de la siguiente forma:

**A. Intercepción (β0): 113.6314247951154:** La intercepción representa el valor de  $Q_i$  cuando todas las variables predictoras ( $P_i$ ,  $ET_i$ , y  $T_i$ ) son cero. Es el punto donde la línea de regresión cruza el eje y.

**Interpretación:**

- En este caso, si la precipitación, la evapotranspiración y la temperatura fueran cero (lo cual puede no ser físicamente posible), el modelo predice que el caudal sería aproximadamente 113.631 m<sup>3</sup>/s.
- Este valor sirve como un punto de referencia para la base del caudal sin la influencia de las variables predictoras.

**B. Coeficiente de Precipitación ( $\beta_1$ ): 1.7905230422931788:** Este coeficiente indica el cambio esperado en el caudal  $Q_i$  por cada unidad adicional de precipitación  $P_i$ , manteniendo constantes las demás variables.

**Interpretación:**

- Por cada incremento de 1 mm en la precipitación, el caudal aumenta en aproximadamente 1.791 m<sup>3</sup>/s.
- Esto muestra una relación positiva entre la precipitación y el caudal, indicando que más lluvia generalmente conduce a un mayor flujo de agua.

**C. Coeficiente de Evapotranspiración ( $\beta_2$ ): 0.13593822421258484:** Este coeficiente indica el cambio esperado en el caudal  $Q_i$  por cada unidad adicional de evapotranspiración  $ET_i$ , manteniendo constantes las demás variables.

**Interpretación:**

- Por cada incremento de 1 mm en la evapotranspiración, el caudal aumenta en aproximadamente 0.136 m<sup>3</sup>/s.
- Esto puede parecer contraintuitivo, ya que la evapotranspiración generalmente reduce el caudal. Sin embargo, este resultado podría estar capturando efectos específicos del sistema de riego o de la región estudiada.

**D. Coeficiente de Temperatura ( $\beta_3$ ): -17.331802284516293:** Este coeficiente indica el cambio esperado en el caudal  $Q_i$  por cada unidad adicional de temperatura  $T_i$ , manteniendo constantes las demás variables.

### Interpretación:

- Por cada incremento de 1°C en la temperatura, el caudal disminuye en aproximadamente 17.332 m³/s.
- Esto refleja una relación negativa entre la temperatura y el caudal, sugiriendo que temperaturas más altas están asociadas con una disminución en el flujo de agua, posiblemente debido a una mayor evapotranspiración y menor aporte de nieve derretida en la cuenca.

Este modelo realizado es útil en aplicaciones cuando queremos predecir el caudal para un mes con datos específicos, por ejemplo:

- Precipitación ( $P_i$ ): 100 mm
- Evapotranspiración ( $ET_i$ ): 80 mm
- Temperatura ( $T_i$ ): 15°C

Aplicando la ecuación realizada

$$Q_i = 113.63142479511544 + 1.7905230422931788 \cdot P_i + 0.13593822421258484 \cdot ET_i + (-17.331802284516293) \cdot T_i$$

Se obtiene un resultado de:

$$Q_i = 54.456810464576926 \text{ m}^3/\text{s}$$

Esto significa que, según el modelo, si la precipitación es de 100 mm, la evapotranspiración es de 80 mm y la temperatura es de 15°C, se espera que el caudal sea aproximadamente 54.457 m³/s.

Para modelar relaciones no lineales entre las variables predictoras y la variable de respuesta, se realizó una evaluación topología árbol para la relación entre los datos del modelo matemático de regresión múltiple y el Error Cuadrático Medio (MSE), para esto se aplicó el siguiente código en Python:

```
from sklearn.tree import DecisionTreeRegressor
from sklearn.model_selection import train_test_split

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y,
test_size=0.2, random_state=42)
```

```

regressor = DecisionTreeRegressor()
regressor.fit(X_train, y_train)

y_pred = regressor.predict(X_test)

from sklearn.metrics import mean_squared_error

mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
print(f"Error Cuadrático Medio (MSE): {mse}")

from sklearn.tree import plot_tree
import matplotlib.pyplot as plt

plt.figure(figsize=(20,10))
plot_tree(regressor, filled=True, feature_names=['Precipitación',
'Evapotranspiración', 'Temperatura'], rounded=True)
plt.show()

```

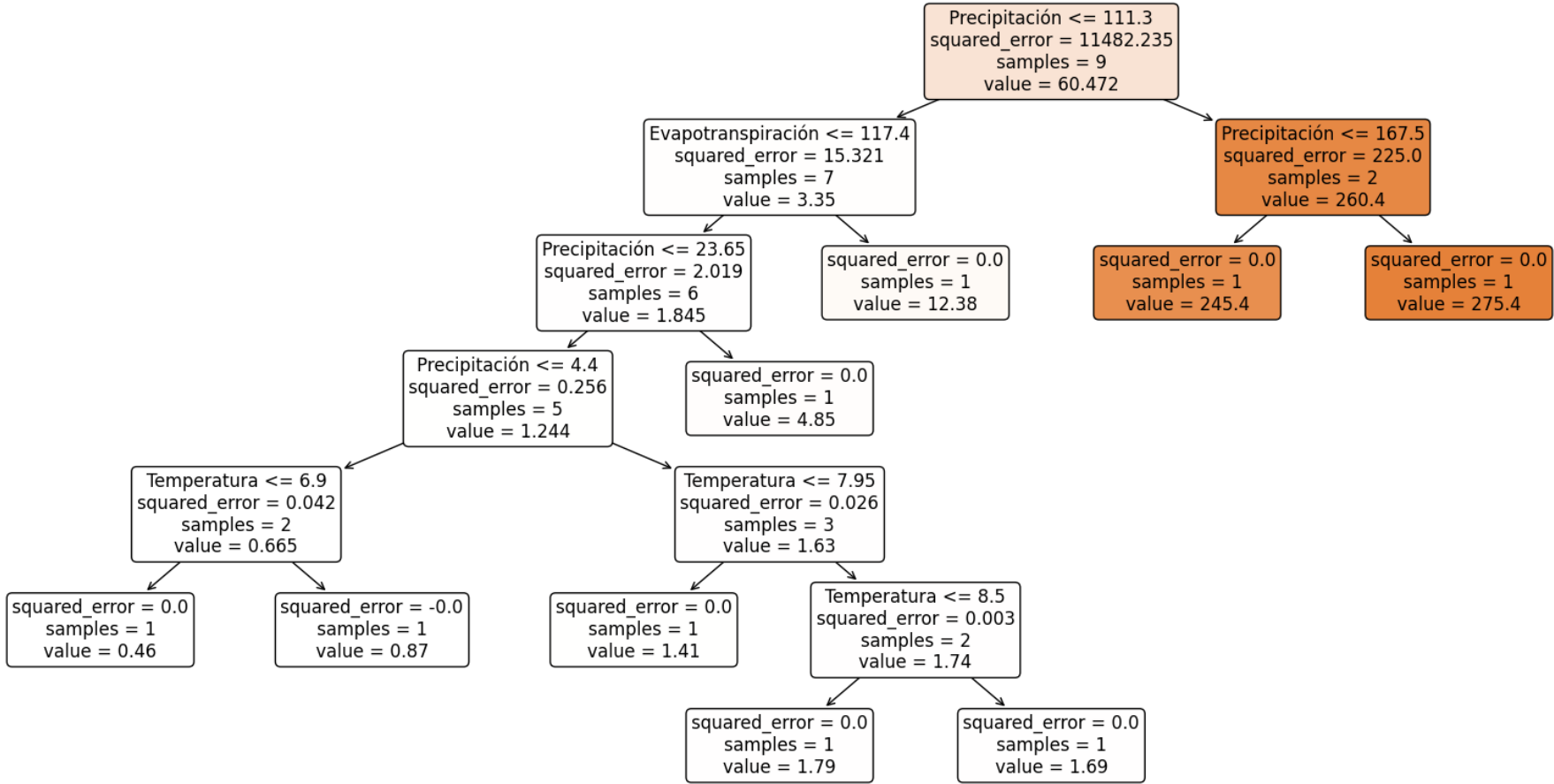
Una vez simulado el código mostrado anteriormente se obtiene el Error Cuadrático Medio (MSE), el cual es una métrica que mide la calidad del modelo de regresión y se calcula como el promedio de los cuadrados de los errores, es decir, la diferencia entre los valores predichos y los valores reales. Además, un MSE más bajo indica un mejor ajuste del modelo a los datos; el valor de la simulación del MSE se muestra:

**MSE: 3456.518666666667**

Este valor indica que, en promedio, el cuadrado de las diferencias entre las predicciones del modelo y los valores reales es 3456.52. Esto sugiere que hay una cierta cantidad de error en las predicciones del modelo, y un valor más bajo sería deseable para un mejor ajuste.

A continuación, se muestra la figura 23 que representa la lógica del árbol de regresión y en ella se aprecian cómo se realizan las divisiones en los datos basándose en las diferentes variables predictoras (Precipitación, Evapotranspiración y Temperatura) para predecir el caudal.

**Figura 23**  
*Nodos del Árbol*



Cada nodo en el árbol de regresión representa una decisión basada en una variable predictora y un valor umbral. Los elementos dentro de cada nodo incluyen:

- **Condición de División:** Por ejemplo, "Precipitación  $\leq 111.3$ " indica que los datos se dividen en dos ramas: una para valores de precipitación menores o iguales a 111.3 y otra para valores mayores.
- **Error Cuadrático Medio (squared\_error):** El MSE del nodo, que indica la varianza de los valores en ese nodo.
- **Número de Muestras (samples):** La cantidad de muestras de datos en ese nodo.
- **Valor (value):** El valor promedio de la variable de respuesta (caudal) para las muestras en ese nodo.

La interpretación de los nodos de árbol de la figura 23 se infiere de la siguiente manera:

#### A. Raíz del Árbol:

- **Precipitación  $\leq 111.3$**
- squared\_error = 11482.235
- samples = 9
- value = 60.472

La raíz del árbol divide los datos en dos ramas basándose en la precipitación. Si la precipitación es menor o igual a 111.3, el árbol sigue a la izquierda; de lo contrario, a la derecha.

#### B. Primera Rama Izquierda:

- **Evapotranspiración  $\leq 117.4$**
- squared\_error = 15.321
- samples = 7
- value = 3.35

Si la precipitación es menor o igual a 111.3, el siguiente nivel de decisión es la evapotranspiración. Si la evapotranspiración es menor o igual a 117.4, seguimos a la izquierda; de lo contrario, a la derecha.

### C. Segunda Rama Izquierda:

- **Precipitación  $\leq 23.65$**
- squared\_error = 2.019
- samples = 6
- value = 1.845

Aquí, la decisión se basa nuevamente en la precipitación. Si la precipitación es menor o igual a 23.65, seguimos a la izquierda; de lo contrario, a la derecha.

### D. Hojas del Árbol:

Cuando se llega a un nodo hoja, como:

- value = 12.38 (si evapotranspiración  $> 117.4$ )
- value = 4.85 (si precipitación  $> 23.65$ )
- value = 0.46, 0.87, 1.41, 1.69, etc., en los nodos más profundos.

Las hojas representan las predicciones finales del modelo para esas condiciones específicas de las variables.

El árbol de regresión muestra cómo diferentes combinaciones de precipitación, evapotranspiración y temperatura influyen en el caudal. Cada nodo de decisión reduce la varianza dentro del conjunto de datos, y las hojas proporcionan predicciones finales basadas en estas decisiones. El MSE global del modelo (3456.518666666667) proporciona una medida de cuán bien se ajusta el modelo a los datos de entrenamiento.

#### ***4.1.2 Aplicación de técnicas de análisis computacional mediante algoritmos de optimización***

Para optimizar la distribución del agua, se ha utilizado algoritmos genéticos, una técnica de optimización inspirada en los procesos de selección natural y evolución biológica. Los algoritmos genéticos son adecuados para problemas complejos con múltiples variables y espacios de búsqueda no lineales.

#### **Proceso del Algoritmo Genético:**

1. **Inicialización:** Se creó una población inicial de 100 individuos, donde cada individuo representa una posible solución con un conjunto de coeficientes de ajuste para los valores predichos de caudal.

**2. Evaluación:** La función de evaluación calcula la suma de los errores absolutos entre la demanda de agua y la oferta de agua ajustada por cada individuo. Este valor de fitness es lo que el algoritmo genético intenta minimizar.

### 3. Operadores Genéticos:

- **Selección:** Se seleccionan los mejores individuos de la población para reproducirse y generar la siguiente generación.
- **Cruzamiento (cxBlend):** Se combinan los genes de dos individuos padres para producir descendencia, manteniendo diversidad genética.
- **Mutación (mutGaussian):** Se aplican perturbaciones gaussianas a los genes de los individuos para introducir variabilidad y explorar nuevas soluciones.

**4. Iteración:** Este proceso se repite durante 50 generaciones, mejorando progresivamente las soluciones.

Para esto se desarrolló un código en Python, el cual nos permita simular la evaluación de los algoritmos genéticos, el código utilizado es el siguiente:

```
import random
import numpy as np
import pandas as pd
from deap import base, creator, tools, algorithms

data = {
    'Mes': ['Enero', 'Febrero', 'Marzo', 'Abril', 'Mayo', 'Junio',
            'Julio', 'Agosto', 'Septiembre', 'Octubre', 'Noviembre', 'Diciembre'],
    'Precipitación': [136.7, 171.3, 163.7, 40.1, 7.2, 1.7, 3.3, 5.5,
                     6.7, 14.5, 16.8, 58.9],
    'Evapotranspiración': [94.5, 91.1, 92.9, 79.0, 74.9, 67.7, 75.5,
                          87.3, 101.7, 89.8, 133.9, 133.1],
    'Temperatura': [11.1, 10.6, 10.9, 9.3, 8.1, 6.8, 7.0, 7.8, 8.9,
                   10.3, 10.0, 11.2],
    'Demanda_Agua': [10847.5, 7354.4, 9026.2, 17107.2, 14650.8,
                    15292.8, 20971.9, 24802.0, 27164.2, 19311.3, 19828.8, 11035.0]
}

df = pd.DataFrame(data)

def predict_caudal(precip, et, temp):
    return 113.63142479511544 + 1.7905230422931788 * precip +
           0.13593822421258484 * et + (-17.331802284516293) * temp

def evalEfficiency(individual):
```

```

oferta_agua = [predict_caudal(p, et, t) * adj for p, et, t, adj in
zip(df['Precipitación'], df['Evapotranspiración'], df['Temperatura'],
individual)]
error = np.abs(df['Demanda_Agua'] - oferta_agua)
return np.sum(error),

creator.create("FitnessMin", base.Fitness, weights=(-1.0,))
creator.create("Individual", list, fitness=creator.FitnessMin)

toolbox = base.Toolbox()
toolbox.register("attr_float", random.uniform, 0.5, 1.5)
toolbox.register("individual", tools.initRepeat, creator.Individual,
toolbox.attr_float, n=12)
toolbox.register("population", tools.initRepeat, list,
toolbox.individual)

toolbox.register("mate", tools.cxBlend, alpha=0.5)
toolbox.register("mutate", tools.mutGaussian, mu=1, sigma=0.1,
indpb=0.2)
toolbox.register("select", tools.selTournament, tournsize=3)
toolbox.register("evaluate", evalEfficiency)

# Inicializar la población
population = toolbox.population(n=100)

# Aplicar el algoritmo genético
NGEN = 50
CXPB = 0.5
MUTPB = 0.2

for gen in range(NGEN):
    offspring = algorithms.varAnd(population, toolbox, cxpb=CXPB,
mutpb=MUTPB)
    fits = toolbox.map(toolbox.evaluate, offspring)

    for fit, ind in zip(fits, offspring):
        ind.fitness.values = fit

    population = toolbox.select(offspring, k=len(population))

# Selección del mejor individuo
best_ind = tools.selBest(population, 1)[0]
print("Mejor individuo es: ", best_ind)
print("Con fitness de: ", best_ind.fitness.values[0])
print("Ajuste de oferta de agua: ", [predict_caudal(p, et, t) * adj
for p, et, t, adj in zip(df['Precipitación'],
df['Evapotranspiración'], df['Temperatura'], best_ind)])
print("Demanda de agua: ", df['Demanda_Agua'].tolist())

```

Se utilizó el modelo de regresión múltiple desarrollado anteriormente para predecir el caudal de agua en función de las variables climáticas (precipitación, evapotranspiración y temperatura).

A continuación, se muestran los resultados simulados en base al código anterior.

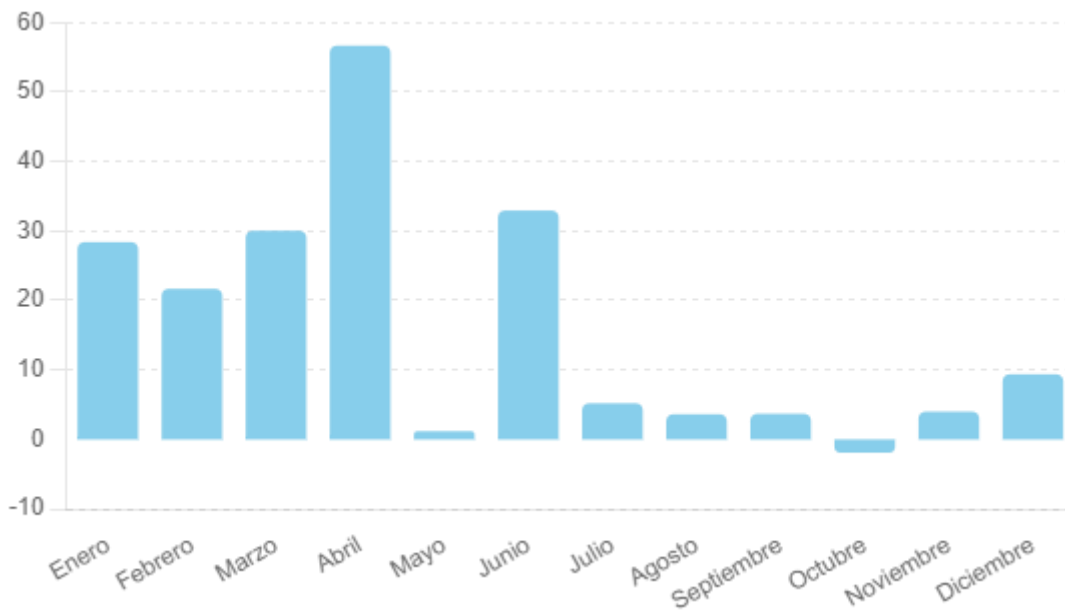
### A. Mejor Individuo

Mejor individuo es: [28.389139673763854, 21.67029150250975, 30.02290276421131, 56.649708367233664, 1.1828214709186773, 32.93178851221566, 5.197433853105549, 3.6237970076002703, 3.693348450873212, -1.8917075650855, 3.99739969597161, 9.376588968629981]

Este vector representa los coeficientes de ajuste para cada mes del año (12 meses) que el algoritmo genético encontró como la mejor solución. Estos coeficientes se multiplican con los valores predichos de caudal (usando el modelo de regresión múltiple) para ajustar la oferta de agua.

**Figura 24**

*Coeficientes de Ajuste del Mejor Individuo*



Estos coeficientes ayudan a ajustar la oferta de agua mensual de manera que se acerque lo más posible a la demanda, optimizando así el uso del recurso hídrico y evitando tanto la escasez como el desperdicio.

### B. Fitness

Con fitness de: 177358.87828224932

Este valor representa la suma de los errores absolutos entre la demanda de agua y la oferta de agua ajustada por el mejor individuo. Un valor de fitness más bajo indica

un mejor ajuste. En este caso, la fitness es bastante alta, lo que sugiere que el modelo podría no estar ajustando perfectamente la oferta a la demanda.

Un valor de fitness alto indica que todavía hay una diferencia significativa entre la oferta y la demanda de agua. Esto señala la necesidad de mejorar el modelo o de considerar variables adicionales para lograr un ajuste más preciso.

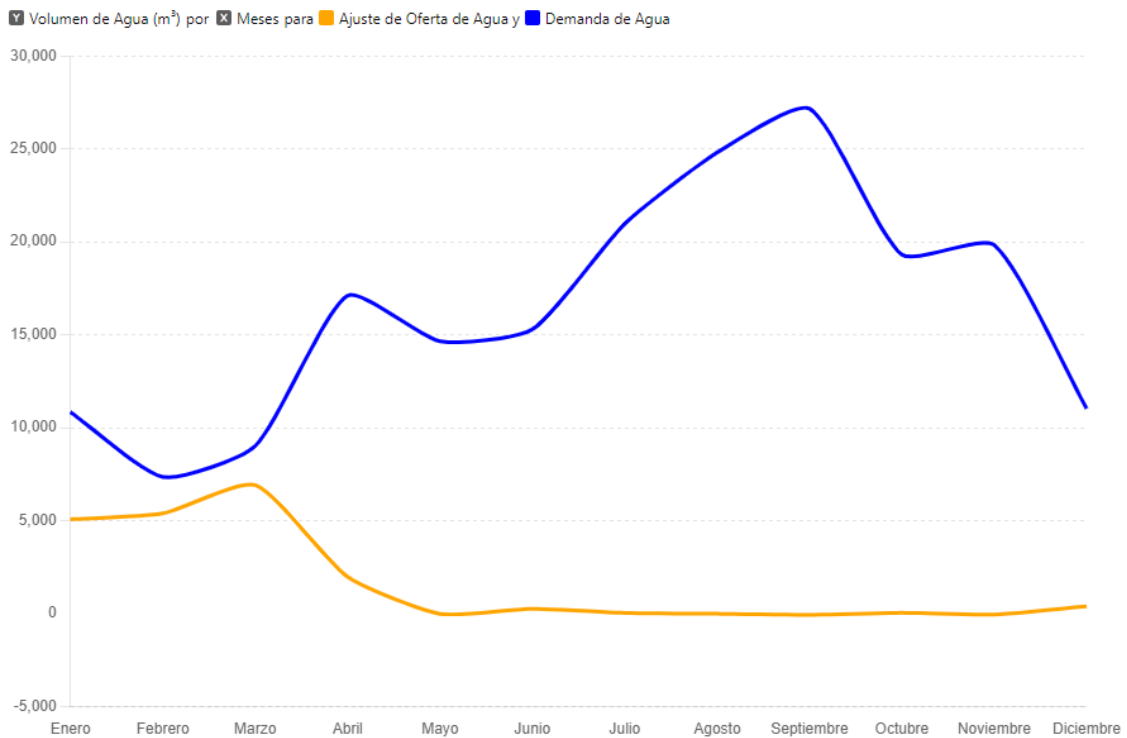
### C. Ajuste de Oferta de Agua

**Ajuste de oferta de agua: [5077.655446810599, 5396.225253678217, 6918.839877658587, 1981.8762959564892, -4.3558995245155625, 264.18131722583115, 44.07876484962748, 0.5749178676256859, -54.66227266397029, 50.539430770716535, -45.58507782771921, 403.85366294921033]**

Estos valores representan la oferta de agua ajustada por el mejor individuo para cada mes. Esta es la cantidad de agua que se espera esté disponible después de aplicar los coeficientes de ajuste del mejor individuo a las predicciones del modelo de regresión múltiple.

**Figura 25**

*Ajuste de Oferta de Agua vs Demanda de Agua*



La capacidad de ajustar la oferta de agua según las condiciones mensuales específicas ayuda a optimizar el uso del recurso hídrico, mejorando la eficiencia en la distribución y reduciendo las pérdidas.

#### **D. Demanda de Agua**

**Demanda de agua: [10847.5, 7354.4, 9026.2, 17107.2, 14650.8, 15292.8, 20971.9, 24802.0, 27164.2, 19311.3, 19828.8, 11035.0]**

Estos valores representan las necesidades mensuales de agua según los datos proporcionados. El objetivo del modelo es ajustar el suministro de agua lo más cerca posible de estos valores de demanda. Además, comprender las necesidades mensuales de agua es fundamental para una planificación y gestión eficaz de los recursos hídricos. Ajustar su suministro para satisfacer esta demanda ayuda a garantizar que su sistema de riego funcione de manera óptima.

En este caso, el uso de algoritmos genéticos puede optimizar eficazmente la asignación de agua, incluso cuando el sistema tiene múltiples variables y relaciones complejas. Los algoritmos genéticos son muy potentes y pueden encontrar soluciones casi óptimas en grandes espacios de búsqueda no lineales. Esto es particularmente beneficioso para la gestión del agua, donde es fundamental equilibrar la oferta y la demanda para evitar la escasez y el desperdicio de agua. Por tanto, en el caso de los coeficientes de cultivo se utilizará el algoritmo genético, siguiendo el mismo procedimiento anterior.

Los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) son importantes para determinar las necesidades de agua de los cultivos en diferentes etapas de crecimiento, se utilizará estos coeficientes para ajustar las predicciones de caudal y mejorar la precisión del modelo. A su vez, La evapotranspiración potencial ( $ET_o$ ) es un componente crucial en la determinación de las necesidades de agua para los cultivos, es por esto que se utilizarán los datos de  $ET_o$  junto con los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ).

La evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) se calcula utilizando la fórmula:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde:

- $K_c$  es el coeficiente de cultivo.
- $ET_o$  es la evapotranspiración potencial.

Ahora vamos a integrar esta información en el modelo de optimización utilizando algoritmos genéticos para ajustar mejor la oferta de agua a la demanda. Los datos adicionales que se utilizara incluyen:

- Coeficientes de cultivo (Kc) para cada mes.
- Evapotranspiración potencial (ET<sub>0</sub>) para cada mes.

```
import random
import numpy as np
import pandas as pd
from deap import base, creator, tools, algorithms

coeficientes_cultivo = [0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.2, 1.1, 1.0,
0.9, 0.8, 0.7] # Coeficientes de cultivo (Kc) para cada mes
evapotranspiracion_potencial = [94.5, 91.1, 92.9, 79.0, 74.9, 67.7,
75.5, 87.3, 101.7, 89.8, 133.9, 133.1] # ET0 para cada mes

precipitacion = [136.7, 171.3, 163.7, 40.1, 7.2, 1.7, 3.3, 5.5, 6.7,
14.5, 16.8, 58.9]
demanda_agua = [10847.5, 7354.4, 9026.2, 17107.2, 14650.8, 15292.8,
20971.9, 24802.0, 27164.2, 19311.3, 19828.8, 11035.0]

et_cultivo = [kc * et0 for kc, et0 in zip(coeficientes_cultivo,
evapotranspiracion_potencial)]

data = {
    'Mes': ['Enero', 'Febrero', 'Marzo', 'Abril', 'Mayo', 'Junio',
'Julio', 'Agosto', 'Septiembre', 'Octubre', 'Noviembre', 'Diciembre'],
    'Precipitación': precipitacion,
    'Evapotranspiración': evapotranspiracion_potencial,
    'Coeficiente_Cultivo': coeficientes_cultivo,
    'ET_Cultivo': et_cultivo,
    'Demanda_Agua': demanda_agua
}

df = pd.DataFrame(data)
```

Luego se utilizará la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) en lugar de la evapotranspiración potencial en el modelo de regresión múltiple:

$$Q_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot P_i + \beta_2 \cdot ET_{ci} + \beta_3 \cdot T_i + \epsilon_i$$

Esta integración se puede visualizar en el código mostrado a continuación:

```
def predict_caudal(precip, etc, temp):
    return 113.63142479511544 + 1.7905230422931788 * precip +
0.135938222421258484 * etc + (-17.331802284516293) * temp
```

```

def evalEfficiency(individual):
    oferta_agua = [predict_caudal(p, etc, t) * adj for p, etc, t, adj
in zip(df['Precipitación'], df['ET_Cultivo'], df['Temperatura'],
individual)]
    error = np.abs(df['Demanda_Agua'] - oferta_agua)
    return np.sum(error),

# Configuración del Algoritmo Genético
creator.create("FitnessMin", base.Fitness, weights=(-1.0,))
creator.create("Individual", list, fitness=creator.FitnessMin)

toolbox = base.Toolbox()
toolbox.register("attr_float", random.uniform, 0.5, 1.5)
toolbox.register("individual", tools.initRepeat, creator.Individual,
toolbox.attr_float, n=12)
toolbox.register("population", tools.initRepeat, list,
toolbox.individual)

toolbox.register("mate", tools.cxBlend, alpha=0.5)
toolbox.register("mutate", tools.mutGaussian, mu=1, sigma=0.1,
indpb=0.2)
toolbox.register("select", tools.selTournament, tournsize=3)
toolbox.register("evaluate", evalEfficiency)

# Inicializar la población
population = toolbox.population(n=100)

# Aplicar el algoritmo genético
NGEN = 50
CXPB = 0.5
MUTPB = 0.2

for gen in range(NGEN):
    offspring = algorithms.varAnd(population, toolbox, cxpb=CXPB,
mutpb=MUTPB)
    fits = toolbox.map(toolbox.evaluate, offspring)

    for fit, ind in zip(fits, offspring):
        ind.fitness.values = fit

    population = toolbox.select(offspring, k=len(population))

# Selección del mejor individuo
best_ind = tools.selBest(population, 1)[0]
print("Mejor individuo es: ", best_ind)
print("Con fitness de: ", best_ind.fitness.values[0])
print("Ajuste de oferta de agua: ", [predict_caudal(p, etc, t) * adj
for p, etc, t, adj in zip(df['Precipitación'], df['ET_Cultivo'],
df['Temperatura'], best_ind)])
print("Demanda de agua: ", df['Demanda_Agua'].tolist())

```

Los resultados de la simulación son los siguientes:

**A. Mejor individuo es:** [23.965973887017075, 29.461914460158972, 26.029280441971228, 3.0503943214085125, 3.1415214151863244, 7.106677146187606, 2.3987486785443255, 3.3346488525793285, 6.252783553586912, 2.856621909072496, 2.83444475351219, 7.428429465276621]

**B. Con fitness de:** 179705.98917937774

**C. Ajuste de oferta de agua:** [4194.170840577428, 7263.484280929311, 5965.629878914695, 106.71730487524533, -8.370450334055867, 70.09088090267551, 25.267310254100302, 4.486407820371217, -92.54240807799972, -79.8055243774869, -42.6416940175713, 279.6239931555399]

**D. Demanda de agua:** [10847.5, 7354.4, 9026.2, 17107.2, 14650.8, 15292.8, 20971.9, 24802.0, 27164.2, 19311.3, 19828.8, 11035.0]

Considerados los resultados hallados se procede a realizar una predicción considerando el modelo de algoritmo genéticos obtenido, el código de esta modelo de predicción es el siguiente, y la simulación de código se puede apreciar en el Anexo N°4.

```
import random
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from deap import base, creator, tools, algorithms

coeficientes_cultivo = [0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.2, 1.1, 1.0, 0.9, 0.8, 0.7]
evapotranspiracion_potencial = [94.5, 91.1, 92.9, 79.0, 74.9, 67.7, 75.5, 87.3, 101.7, 89.8, 133.9, 133.1]
temperatura = [11.1, 10.6, 10.9, 9.3, 8.1, 6.8, 7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 10.0, 11.2]
precipitacion = [136.7, 171.3, 163.7, 40.1, 7.2, 1.7, 3.3, 5.5, 6.7, 14.5, 16.8, 58.9]
demanda_agua = [10847.5, 7354.4, 9026.2, 17107.2, 14650.8, 15292.8, 20971.9, 24802.0, 27164.2, 19311.3, 19828.8, 11035.0]

et_cultivo = [kc * et0 for kc, et0 in zip(coeficientes_cultivo, evapotranspiracion_potencial)]

mejor_individuo = [23.965973887017075, 29.461914460158972, 26.029280441971228, 3.0503943214085125, 3.1415214151863244, 7.106677146187606, 2.3987486785443255, 3.3346488525793285,
```

```

6.252783553586912,          2.856621909072496,          2.83444475351219,
7.428429465276621]

def predict_caudal(precip, etc, temp, ajuste):
    return max(0, (113.63142479511544 + 1.7905230422931788 * precip +
0.13593822421258484 * etc + (-17.331802284516293) * temp) * ajuste)

prediccion_caudal = [predict_caudal(p, etc, t, adj) for p, etc, t, adj
in zip(precipitacion, et_cultivo, temperatura, mejor_individuo)]

plt.figure(figsize=(12, 8))
plt.plot(meses, prediccion_caudal, label='Predicción de Caudal
Ajustada', marker='o', color='green')
plt.xlabel('Meses')
plt.ylabel('Caudal (m³/s)')
plt.title('Predicción de Caudal Ajustada para Cada Mes')
plt.legend()
plt.xticks(rotation=45)
plt.tight_layout()
plt.show()

prediccion_df = pd.DataFrame({
    'Mes': meses,
    'Predicción de Caudal Ajustada (m³/s)': prediccion_caudal
})
prediccion_df

```

Los resultados de la simulación del código anterior se presentan en la Tabla 22.

**Tabla 22**  
*Predicción del algoritmo genético*

| Mes        | Predicción de Caudal Ajustada<br>(m³/s) |
|------------|---|
| Enero      | 4194.17                                 |
| Febrero    | 7263.48                                 |
| Marzo      | 5965.63                                 |
| Abril      | 106.72                                  |
| Mayo       | 0                                       |
| Junio      | 70.09                                   |
| Julio      | 25.27                                   |
| Agosto     | 4.49                                    |
| Septiembre | 0                                       |
| Octubre    | 0                                       |
| Noviembre  | 0                                       |

La interpretación de la Tablas 26, se infiere de la siguiente forma:

- **Enero, Febrero, Marzo:** Estos meses presentan una alta disponibilidad de agua (4194.17, 7263.48, y 5965.63 m<sup>3</sup>/s respectivamente), lo que indica que durante estos periodos, la oferta de agua ajustada es suficiente para satisfacer las demandas elevadas de agua. Esto podría coincidir con la temporada de lluvias, donde la precipitación es alta, y la demanda de los cultivos también puede ser mayor.
- **Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre, Diciembre:** Durante estos meses, especialmente en mayo, septiembre, octubre y noviembre, la predicción de caudal es extremadamente baja o nula. Esto puede indicar periodos secos con poca o ninguna precipitación y alta evapotranspiración, donde la oferta de agua ajustada no es suficiente para satisfacer la demanda.
- **Abril a Mayo, Marzo a Abril:** La caída drástica de la predicción de caudal de marzo a abril y de abril a mayo sugiere una transición rápida de periodos de alta disponibilidad de agua a periodos de escasez. Este cambio drástico puede requerir estrategias de almacenamiento y conservación de agua durante los meses de alta disponibilidad para ser utilizada en los meses secos.

#### ***4.1.3 Estrategias de optimización del sistema de riego basadas en los resultados del análisis computacional***

Los resultados del análisis computacional han proporcionado información valiosa sobre la disponibilidad de agua a lo largo del año. Basándonos en esta información, se pueden diseñar estrategias de optimización del sistema de riego para garantizar un uso eficiente y sostenible del recurso hídrico. A continuación, se detallan las estrategias recomendadas:

##### **A. Almacenamiento y Conservación de Agua**

**Estrategia:**

- **Construcción de Embalses y Reservorios:** Durante los meses de alta disponibilidad de agua (Enero, Febrero, Marzo), se debe almacenar el exceso de agua en embalses y reservorios. Esta agua puede ser utilizada durante los meses secos (Mayo, Septiembre, Octubre, Noviembre) para asegurar un suministro constante.

#### **Implementación:**

- **Dimensionamiento de Embalses:** Calcular la capacidad necesaria de los embalses para almacenar el caudal excedente.
- **Monitoreo de Niveles de Agua:** Implementar sistemas de monitoreo en tiempo real para gestionar los niveles de agua en los embalses y asegurarse de que siempre haya suficiente almacenamiento.

#### **Beneficios:**

- Asegura la disponibilidad de agua durante los meses críticos.
- Reduce la dependencia de las lluvias estacionales.

### **B. Implementación de Técnicas de Riego Eficientes**

#### **Estrategia:**

- **Riego por Goteo y Riego Subterráneo:** Implementar sistemas de riego por goteo y riego subterráneo que son más eficientes en el uso del agua comparado con el riego por aspersión o por inundación.

#### **Implementación:**

- **Instalación de Sistemas de Riego por Goteo:** Diseñar e instalar sistemas de riego por goteo en los campos agrícolas.
- **Capacitación para Agricultores:** Proporcionar capacitación a los agricultores sobre el uso y mantenimiento de estos sistemas.

#### **Beneficios:**

- Reduce el desperdicio de agua y asegura que el agua llegue directamente a las raíces de las plantas.
- Mejora la eficiencia del riego y promueve un uso sostenible del agua.

### **C. Monitoreo y Gestión Inteligente del Agua**

#### **Estrategia:**

- **Sistemas de Monitoreo y Gestión en Tiempo Real:** Implementar tecnologías avanzadas de monitoreo y gestión de agua que permitan una supervisión continua y ajustes automáticos según las necesidades de riego.

**Implementación:**

- **Sensores de Humedad y Caudal:** Instalar sensores de humedad del suelo y caudal en diferentes puntos del sistema de riego.
- **Software de Gestión de Agua:** Utilizar software de gestión que integre los datos de los sensores y permita la toma de decisiones informadas.

**Beneficios:**

- Proporciona datos precisos para ajustar el riego en tiempo real.
- Mejora la eficiencia operativa y reduce el consumo de agua.

**D. Planificación de Cultivos Basada en la Disponibilidad de Agua**

**Estrategia:**

**Selección de Cultivos y Rotación de Cultivos:** Basar la selección de cultivos y la rotación de cultivos en la disponibilidad de agua predicha para cada mes.

**Implementación:**

- **Cultivos Resilientes al Agua:** Introducir cultivos que sean menos dependientes de grandes cantidades de agua durante los meses secos.
- **Planificación de Calendario de Cultivos:** Ajustar el calendario de siembra y cosecha para aprovechar al máximo los períodos de alta disponibilidad de agua.

**Beneficios:**

- Aumenta la productividad agrícola mientras se minimiza el uso de agua.
- Promueve la sostenibilidad a largo plazo del sistema agrícola.

**E. Educación y Conciencia sobre la Conservación del Agua**

**Estrategia:**

- **Programas de Educación y Capacitación:** Implementar programas educativos para agricultores y comunidades sobre la importancia de la conservación del agua y las prácticas de riego eficientes.

**Implementación:**

- **Talleres y Seminarios:** Organizar talleres y seminarios sobre gestión sostenible del agua y técnicas de riego eficiente.
- **Materiales Educativos:** Distribuir materiales educativos que promuevan la conservación del agua y las mejores prácticas agrícolas.

**Beneficios:**

- Fomenta una cultura de conservación del agua entre los agricultores y las comunidades.
- Aumenta la adopción de prácticas sostenibles y eficientes de riego.

## CONCLUSIONES

Se logró desarrollar un modelo matemático detallado para representar los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de Challhualla, Ayacucho. Este modelo utilizó técnicas de regresión lineal múltiple y árboles de regresión, incorporando variables clave como precipitación, evapotranspiración y temperatura. Los coeficientes obtenidos en la regresión lineal múltiple fueron: una intercepción ( $\beta_0$ ) de 113.63, un coeficiente de precipitación ( $\beta_1$ ) de 1.79, un coeficiente de evapotranspiración ( $\beta_2$ ) de 0.14 y un coeficiente de temperatura ( $\beta_3$ ) de -17.33. Estos valores indican que la precipitación y la evapotranspiración tienen un impacto positivo en el caudal, mientras que la temperatura tiene un impacto negativo.

El modelo matemático desarrollado fue utilizado para aplicar algoritmos genéticos con el fin de optimizar la distribución del agua en la comunidad de Challhualla. Los resultados del análisis computacional mostraron que el mejor individuo encontrado por el algoritmo genético tenía coeficientes de ajuste para cada mes específicos, tales como 23.97 para enero, 29.46 para febrero, y así sucesivamente. El valor de fitness obtenido fue de 179705.99, y los ajustes en la oferta de agua predijeron valores como 4194.17 m<sup>3</sup>/s para enero, 7263.48 m<sup>3</sup>/s para febrero, entre otros. Estos resultados demuestran cómo se puede mejorar la oferta de agua en relación con la demanda, garantizando así la sostenibilidad del sistema de riego en Challhualla.

Con base en los resultados del uso de técnicas de análisis computacional, se desarrollaron y propusieron varias estrategias de optimización del sistema de riego. Entre ellas, se incluyó la implementación de sensores de humedad y caudal en puntos críticos del sistema, así como el uso de software de gestión de agua para realizar ajustes en tiempo real. También se recomendó la planificación de cultivos basada en la disponibilidad de agua, seleccionando y rotando cultivos de acuerdo con las predicciones de disponibilidad de agua, y promoviendo cultivos más resilientes al agua. Finalmente, se sugirió la implementación de programas educativos y talleres para agricultores sobre prácticas de riego eficiente y conservación del agua, distribuyendo materiales educativos que fomenten estas prácticas. Estas estrategias están diseñadas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del uso del agua en la comunidad de Challhualla, asegurando una distribución adecuada y una gestión más eficaz de los recursos hídricos.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda la construcción de embalses y reservorios para almacenar el exceso de agua durante los meses de alta disponibilidad (Enero, Febrero y Marzo). Esta agua almacenada puede ser utilizada durante los meses secos (Mayo, Septiembre, Octubre y Noviembre) para asegurar un suministro constante y evitar déficits hídricos, ya que durante los meses de alta disponibilidad de agua, los caudales predichos fueron de 4194.17 m<sup>3</sup>/s en enero, 7263.48 m<sup>3</sup>/s en febrero y 5965.63 m<sup>3</sup>/s en marzo. Estos valores indican un excedente de agua que puede ser almacenado.

Se recomienda implementar sistemas de riego por goteo y riego subterráneo que son más eficientes en el uso del agua comparado con el riego por aspersión o por inundación. Se debe diseñar e instalar estos sistemas en los campos agrícolas y proporcionar capacitación a los agricultores sobre su uso y mantenimiento, ya que, durante meses con baja disponibilidad de agua, como junio (70.09 m<sup>3</sup>/s) y julio (25.27 m<sup>3</sup>/s), es fundamental utilizar sistemas que minimicen el desperdicio y aseguren que el agua llegue directamente a las raíces de las plantas.

Se recomienda implementar tecnologías avanzadas de monitoreo y gestión de agua que permitan una supervisión continua y ajustes automáticos según las necesidades de riego. Esto incluye la instalación de sensores de humedad y caudal en diferentes puntos del sistema de riego y el uso de software de gestión de agua, puesto que el monitoreo en tiempo real permite ajustar el riego de manera precisa, basándose en datos actuales de humedad del suelo y caudal. Esto es especialmente útil durante las transiciones rápidas de períodos de alta disponibilidad de agua a períodos de escasez, como la observada de marzo a abril y de abril a mayo.

Basar la selección de cultivos y la rotación de cultivos en la disponibilidad de agua predicha para cada mes. Se recomienda introducir cultivos que sean menos dependientes de grandes cantidades de agua durante los meses secos y ajustar el calendario de siembra y cosecha para aprovechar al máximo los períodos de alta disponibilidad de agua.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA (2021). Mejoramiento del servicio de agua a nivel parcelario con un sistema de riego tecnificado en la comunidad de Challhualla del distrito de Lucanas - provincia Lucanas - departamento Ayacucho: Memoria descriptiva para la acreditación de la disponibilidad hídrica superficial (anexo N°06). Concytec.gob.pe.  
[https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/ANAI\\_8f4c9195f468be4026da13a5aac645be](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/ANAI_8f4c9195f468be4026da13a5aac645be)
- Arias, F. (2006). El proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica. Caracas, Editorial Episteme.
- Baldeon, L. (2016). Modelamiento hidrológico de la sub cuenca del Rio Achamayo. *Uncp.edu.pe*. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4588>
- Bernal, C. (2006). Metodología de la Investigación. México, D.F., Pearson educación.
- Bhaskaran R (2018). Introduction to CFD Basics, by Lance Collins.  
<https://dragonfly.tam.cornell.edu/teaching/mae5230-cfd-intro-notes.pdf>
- Borda, E. (2020). Programa para optimización en peso de armaduras de acero mediante algoritmos genéticos. *Pucp.edu.pe*. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/17617>
- Chica, B. y Hernández, C. (2022). *Optimización hidráulica de una laguna de estabilización del cantón La Troncal mediante un estudio hidrodinámico computacional*. Ug.edu.ec; Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/60196>
- Chow, Ven Te; Maidment, David R. and Mays, Larry W (1998). Hidrología aplicada. Ed. McGraw-Hill. Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Cieza Zamudio, G. (2019). Un análisis de la eficiencia de conducción en canales de irrigación para zonas altoandinas caso: Turuco, del distrito de Bellavista, provincia de Jaén- Cajamarca. [Tesis para optar el título de Ingeniero Agrícola, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque – Perú]  
<https://hdl.handle.net/20.500.12893/4964>.

- Cruz, G., Valdés, H., Laffita, L., Gómez, A., y Chuairey, C. M. (2020). Dinámica de Fluido Computacional: Revisión y análisis de las aplicaciones en la ingeniería. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(4).
- Damodar N., G., & Dawn C., P. (2010). *Econometría* (Quinta ed.). México, D.F.: Mc Graw Hi
- Díaz, R. (2023). "Análisis del comportamiento hidráulico del flujo en una rápida escalonada mediante un modelo matemático en OpenFoam." *Unesum.edu.ec*.  
<https://hdl.handle.net/10983/27168>
- Espinoza, T. (2021). Diseño de un sistema para riego tecnificado en el poblado de San Juan de Viscas, provincia de Yauyos, Lima 2017. *Utp.edu.pe*.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12867/5058>
- Farfán López, G. (2022). Determinación de la eficiencia de conducción del canal 5+838 La Quebrada desde la progresiva 0+000 hasta la progresiva 1+280, para optimizar la distribución de agua de riego en la comisión del subsector hidráulico Hualtaco III – 125 Junta de Usuarios del Sector Hidráulico menor San Lorenzo – distrito de Tambogrande, región Piura. [Tesis para optar el título de Ingeniero Agrícola, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Piura]  
<http://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/3525>
- Faustino, J., y Jiménez, F. (2000). Manejo de cuencas hidrográficas. *Catie.ac.cr*.  
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8431>
- García, J., Morales Serrano, B., & González Cavazos, B. (2013). *Análisis Estadístico Multivariante*. Mc Graw Hill
- Gestal, M., Rivero, D., Rabuñal, J. R., Dorado, J., y Pazos, A. (2010). *Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética*. Coruña: Universidad de Da Coruña
- Gonzales, H. (2020). Comportamiento hidráulico del sistema de riego por aspersión mediante herramientas computacionales, Paras, Ayacucho 2020. *Ucv.edu.pe*.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/63382>

- González, J. L., y Castellano, G. (2014). Fundamentos de la mecánica de fluidos. Editorial Club Universitario
- Heredia, S. R., Bruno, Cecilia, y Balzarini, Monica (2010). Identificación de relaciones entre rendimientos y variables ambientales vía árboles de clasificación y regresión (CART). *Interciencia*, 35(12), 876-882
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). Metodología de la Investigación. México: Mc Graw Hill
- Horton, R. (1945) Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-370.
- Linsley, R. (1977). Hidrología para Ingenieros. Ed. McGraw. Ed. 2ª. México, D.F.
- Lobos, R. (2021). *Mejoramiento del servicio de agua a nivel parcelario con un sistema de riego tecnificado en la comunidad de Challhualla del distrito de Lucanas - provincia Lucanas - departamento Ayacucho: Memoria descriptiva para la acreditación de la disponibilidad hídrica superficial (anexo N°06)*. Concytec.gob.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/5343>
- Manrique, H. (2022). Diseño de un sistema de riego tecnificado para el sector Coirocshu, distrito de Jangas, provincia de Huaraz, 2022. *Ucv.edu.pe*. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/99874>
- Maydana, A. (2019). Elección del mejor modelo entre regresión lineal múltiple y árboles de regresión para predecir el precio máximo de las acciones de Intel en función al precio de apertura y volumen de ventas de acciones por día - 2019. *Unap.edu.pe*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/15333>
- Mitchell, M. (1999). An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, Massachusetts • London, England: Massachusetts Institute of Technology.
- Mosquera, B. (2022). Aplicación de la tecnología iot (internet of things) para la medición de variables hidrometeorológicas en la agricultura sostenible. *Epn.edu.ec*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22944>

- Noya, R., y Sutizal, R. (2023). Soluciones para una clase de programación lineal en dos niveles, vía algoritmos genéticos. *Unac.edu.pe*.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12952/7930>
- Remenieras, G. (1974). Tratado de hidrología aplicada. Editores Asociados, S.A. 2ª ed  
Barcelona España.
- Rivera, V. (2023). Análisis del comportamiento hidráulico del filtro lento de Piscan – Yamango mediante Ansys CFX. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.  
<https://hdl.handle.net/11042/6100>
- Rodríguez Ruiz, Pedro (2008) Hidráulica II: Hidráulica de Canales. Academia.edu  
[https://www.academia.edu/25000821/Hidr%C3%A1ulica\\_de\\_Canales\\_Pedro\\_Rodr%C3%ADguez\\_Ruiz](https://www.academia.edu/25000821/Hidr%C3%A1ulica_de_Canales_Pedro_Rodr%C3%ADguez_Ruiz)
- Sánchez, F. J. (2022). Hidrología Superficial y Subterránea. 2ª ed. Kindle Direct Publishing., 440 pp.
- Schwab, F., Calle, C., y Muñoz, B. (2020). Economía social y solidaria y agroecología en cooperativas de agricultura familiar en Brasil como forma de desarrollo de una agricultura sostenible. *C.I.R.I.E.C. España, 98*, 189–189.  
<https://doi.org/10.7203/ciriec-e.98.14161>
- Tetumo García, J. (1993). Apuntes de hidrología superficial. Tesis de ingeniería en irrigación. Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de Irrigación, Chapingo, México.
- Tobergte, D. R., y Curtis, S. (2013). Introducción a la econometría: Un enfoque moderno. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53.
- Valero, G. (2019). *Análisis de modelos predictivos basados en visión computacional aplicados al paralelismo*. Unam.edu.pe; Universidad Nacional de Moquegua.  
<https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/91>
- Vasquez Villanueva, A. (2000). Manejo de cuencas altoandinas (1a. ed.). LIMA: escuela superior de administración de aguas “Charles Sutton”.

World Vision (2004). Manual de Manejo de Cuencas: Módulo 7. Monitoreo y evaluación de manejo de cuencas, pp. 139 – 141. El Salvador.

## ANEXOS

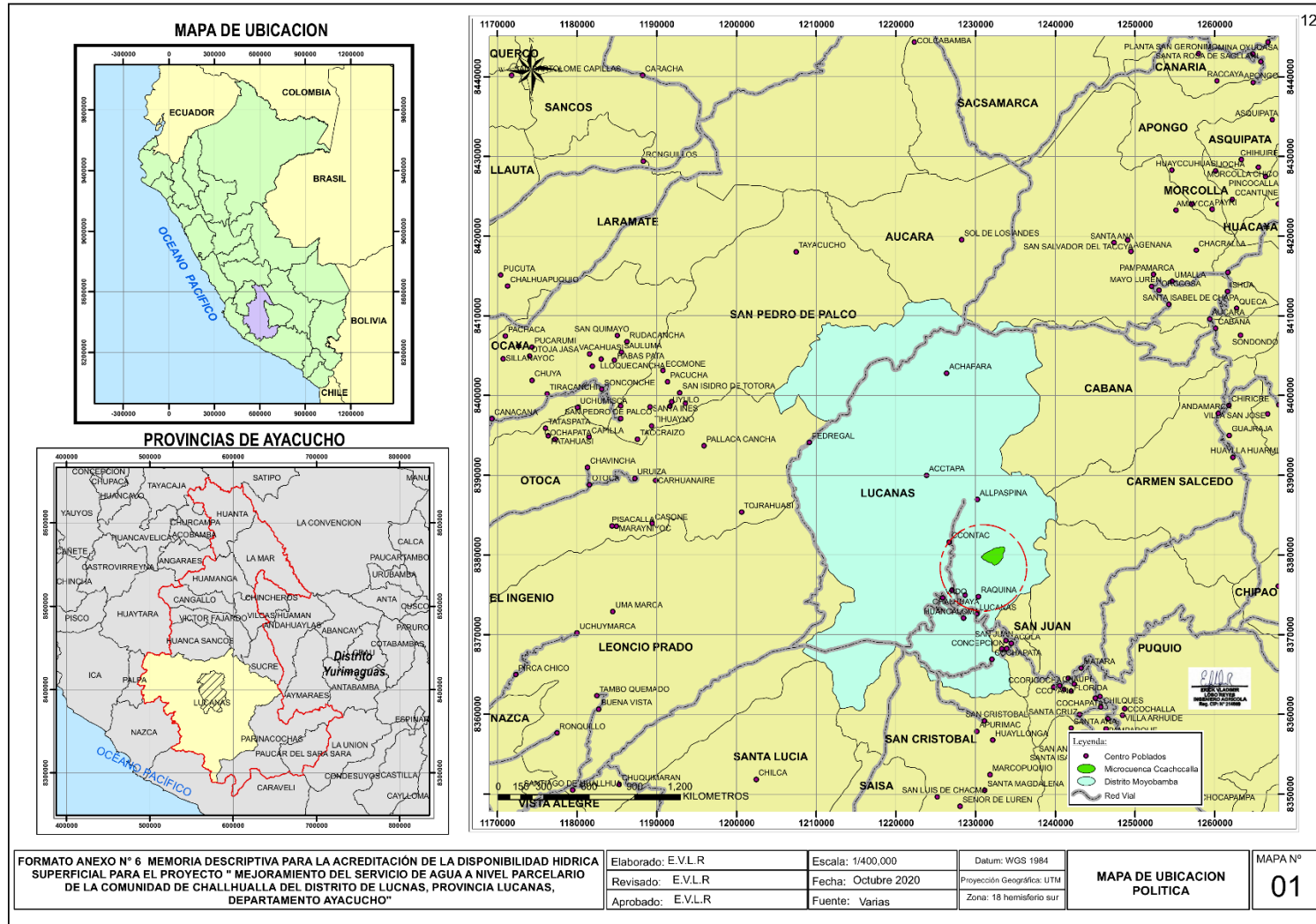
### a) Matriz de consistencia

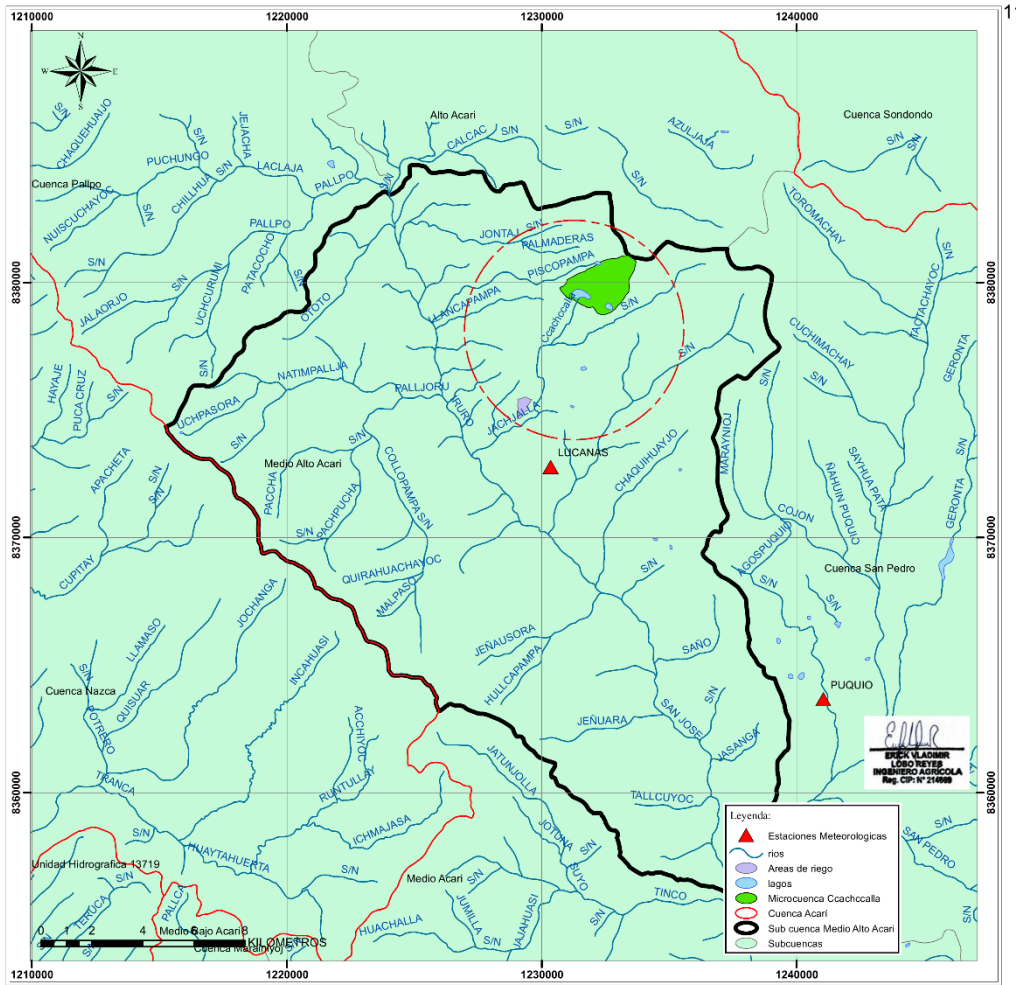
| <b>TITULO:" ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LOS PATRONES DE FLUJO EN EL SISTEMA DE RIEGO TECNIFICADO DE LA COMUNIDAD DE CHALLHUALLA, AYACUCHO"</b>  |   |   |   |  |   |   |  |   |
|---|---|---|---|--|---|---|--|---|
| <b>PROBLEMA</b>   | <b>OBJETIVOS</b>  | <b>HIPÓTESIS</b>  | <b>VARIABLES</b>  | <b>DIMENSIÓN</b>                         | <b>INDICADORES</b>                              | <b>INSTRUMENTOS</b>   | <b>METODOLOGIA</b>   | <b>POBLACIÓN Y MUESTRA</b>  |
| <b>Problema General</b>   | <b>Objetivo General</b>   | <b>Hipótesis General</b>  |   |  |   |   |  |   |
| ¿Cómo pueden desarrollarse y aplicarse técnicas computacionales para analizar y optimizar los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho, con el fin de mejorar la eficiencia del uso del agua y la productividad agrícola en la región? | Desarrollar y aplicar técnicas computacionales para analizar y optimizar los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho. | Mediante el uso de técnicas computacionales avanzadas, como modelado hidrológico, algoritmos de optimización y análisis de datos, es posible mejorar significativamente la eficiencia y efectividad de los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho. | <b>Independiente:</b><br>Técnicas de análisis computacional                 | Métodos y herramientas de análisis       | Modelo matemático<br>Algoritmos de optimización | Librería y Herramientas de Python<br><br>Visual Studio Code | En esta investigación se utilizará un enfoque cuantitativo.<br><br>Esta investigación presenta un alcance explicativo.<br><br>La presente investigación presenta un diseño de investigación no experimental. | La población de esta investigación incluye todos los sistemas de riego tecnificado en la región de Ayacucho. Esto abarca la totalidad de los campos agrícolas que utilizan el sistema de riego tecnificado en esta área geográfica específica, así como todos los patrones de flujo de agua asociados con estos sistemas.<br><br>La muestra de esta investigación es el sistema de riego tecnificado de la Comunidad de Challhualla, Ayacucho.<br><br>La muestra se ha seleccionado utilizando un método de muestreo no probabilístico, específicamente mediante muestreo por conveniencia, también conocido como muestreo intencional. |
| <b>Problema específico</b>  | <b>Objetivos específicos</b>  | <b>Hipótesis específico</b>   |   |  |   |   |  |   |
| ¿Cómo puede desarrollarse un modelo matemático que refleje de manera precisa los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho?   | Desarrollar un modelo matemático sobre los patrones de flujo de agua del sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho.                                     | Es posible representar de manera precisa y eficaz los patrones de flujo de agua en el sistema de riego tecnificado de Challhualla a través de un modelo matemático, el cual captura las variables dinámicas del sistema, permitiendo una comprensión más profunda y detallada de su funcionamiento.               | <b>Dependiente:</b><br>Patrones de Flujo en el Sistema de Riego Tecnificado | Variables dinámicas del sistema de riego | Caudal del agua<br><br>Pérdidas de Agua         | Fichas de recolección de datos                              |  |   |

|  |  |  |  |  |                |  |  |  |
|--|--|--|--|--|----------------|--|--|--|
| <p>¿De qué manera se pueden utilizar los algoritmos de optimización en el modelo matemático desarrollado para evaluar y mejorar la eficiencia en la distribución del agua en el sistema de riego de Challhualla?</p> | <p>Utilizar el modelo matemático desarrollado para aplicar técnicas de análisis computacional mediante algoritmos de optimización, para evaluar la eficiencia en la distribución del agua.</p> | <p>La aplicación de técnicas de análisis computacional, específicamente algoritmos de optimización, utilizando el modelo matemático desarrollado, permitirá evaluar y mejorar la eficiencia de la distribución del agua en el sistema de riego, identificando posibles deficiencias y áreas de mejora en la gestión actual del recurso hídrico.</p>          |  |  | <p>Volumen</p> | <p>Librería y Herramientas de Python</p> |  |  |
| <p>¿Cuáles son las estrategias de optimización más efectivas para el sistema de riego de Challhualla que se pueden desarrollar y proponer a partir de los resultados obtenidos en el análisis computacional?</p>     | <p>Desarrollar y proponer estrategias de optimización del sistema de riego basadas en los resultados del análisis computacional.</p>   | <p>Las estrategias de optimización del sistema de riego, desarrolladas a partir de los resultados obtenidos del análisis computacional y la simulación, resultarán en una mejora significativa en términos de eficiencia y efectividad en el uso del agua para riego, contribuyendo a una gestión sostenible del recurso en la comunidad de Challhualla.</p> |  |  |                |  |  |  |

*Nota.* Elaboración propia

## ANEXO N°2: Mapas de Ubicación Política y Geográfica





FORMATO ANEXO N° 6 MEMORIA DESCRIPTIVA PARA LA ACREDITACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HIDRICA SUPERFICIAL PARA EL PROYECTO " MEJORAMIENTO DEL SERVICIO DE AGUA A NIVEL PARCELARIO DE LA COMUNIDAD DE CHALLHUALLA DEL DISTRITO DE LUCNAS, PROVINCIA LUCANAS, DEPARTAMENTO AYACUCHO"

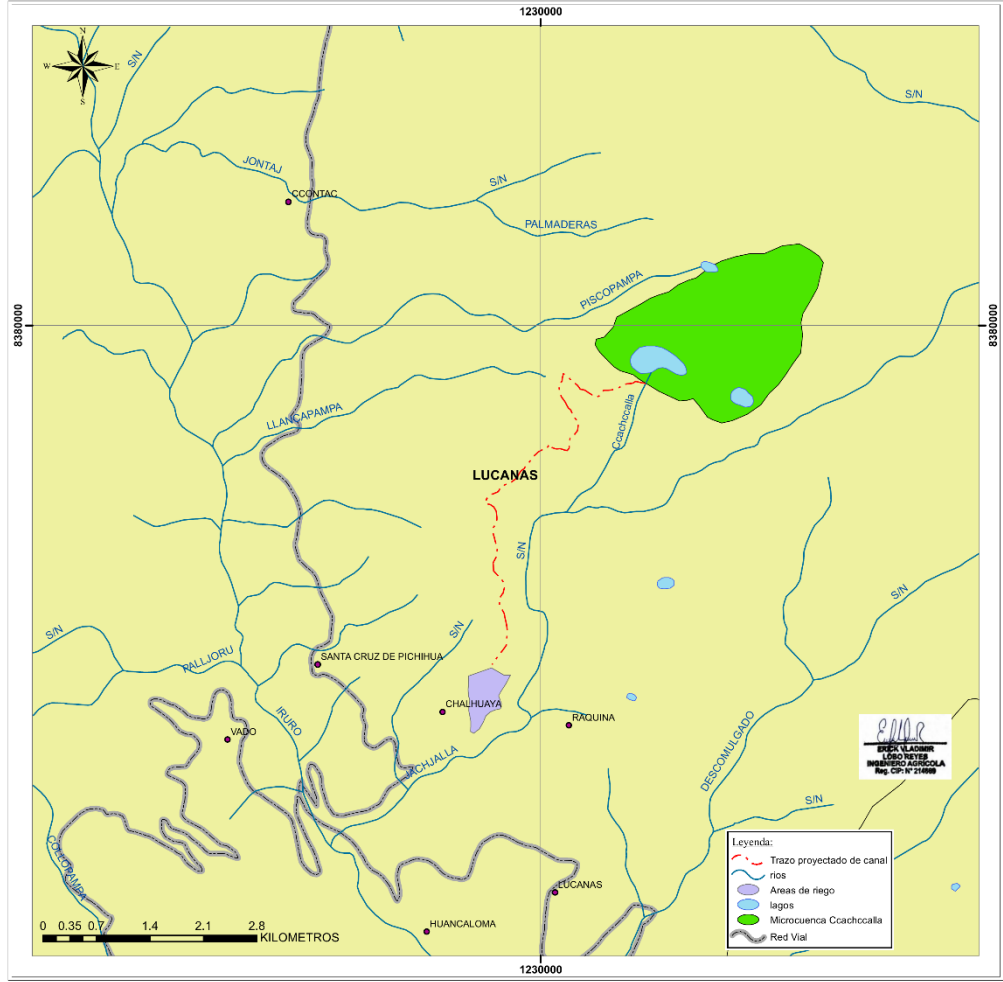
Elaborado: E.V.L.R  
 Revisado: E.V.L.R  
 Aprobado: E.V.L.R

Escala: 1/150 000  
 Fecha: Octubre 2020  
 Fuente: Varias

Datum: WGS 1984  
 Proyección Geográfica: UTM  
 Zona: 18 hemisferio sur

**MAPA DE CUENCA  
 HIDROGRAFICA**

MAPA N°  
**02**



FORMATO ANEXO N° 6 MEMORIA DESCRIPTIVA PARA LA ACREDITACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HIDRICA SUPERFICIAL PARA EL PROYECTO " MEJORAMIENTO DEL SERVICIO DE AGUA A NIVEL PARCELARIO DE LA COMUNIDAD DE CHALLHUALLA DEL DISTRITO DE LUCANAS, PROVINCIA LUCANAS, DEPARTAMENTO AYACUCHO"

Elaborado: E.V.L.R  
 Revisado: E.V.L.R  
 Aprobado: E.V.L.R

Escala: 1/50,000  
 Fecha: Octubre 2020  
 Fuente: Varias

Datum: WGS 1984  
 Proyección Geográfica: UTM  
 Zona: 18 hemisferio sur

**MAPA PLAN DE APROVECHAMIENTO HIDRICO**

MAPA N° **03**

**ANEXO N°3: Demanda Hídrica**

| <b>CALCULOS</b>                       | <b>ENE</b> | <b>FEB</b> | <b>MAR</b> | <b>ABR</b> | <b>MAY</b> | <b>JUN</b> | <b>JUL</b> | <b>AGO</b> | <b>SEP</b> | <b>OCT</b> | <b>NOV</b> | <b>DIC</b> |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>N° de días/mes</b>                 | 31         | 28         | 31         | 30         | 31         | 30         | 31         | 31         | 30         | 31         | 30         | 31         |
| <b>Eto (mm/día)</b>                   | 3.05       | 3.25       | 3          | 3          | 2.63       | 2.42       | 2.26       | 2.44       | 2.81       | 3.39       | 2.9        | 4.46       |
| <b>Eto (mm/mes)</b>                   | 94.46      | 91.13      | 92.89      | 90         | 81.63      | 72.6       | 70.07      | 75.51      | 87.66      | 101.7      | 89.78      | 138.3      |
| <b>Kc Ponderado</b>                   | 1.01       | 1.03       | 0.9        | 0.81       | 0.68       | 0.79       | 1          | 1          | 0.94       | 0.87       | 0.66       | 0.8        |
| <b>U.C. (mm)</b>                      | 95.5       | 93.06      | 83.5       | 63.95      | 51.26      | 53.48      | 73.39      | 86.83      | 95.06      | 78.11      | 87.87      | 106.1      |
| <b>Pp. Registrada al 75% (mm/mes)</b> | 52.56      | 81.75      | 61.89      | 3.94       | 0          | 0          | 0          | 0.51       | 3.04       | 16.04      | 24.44      | 81.6       |
| <b>P. efectiva al 75% (mm/mes)</b>    | 44.05      | 67.89      | 51.9       | 4.12       | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 10.49      | 18.47      | 67.79      |
| <b>Requerimiento (mm)</b>             | 51.45      | 25.71      | 31.6       | 59.83      | 51.26      | 73.39      | 86.83      | 95.06      | 67.62      | 67.62      | 69.4       | 38.66      |
| <b>Req. Vol. Bruto (m3/ha)</b>        | 514.5      | 257.1      | 315.1      | 598.3      | 512.6      | 734        | 868.26     | 950.62     | 676.2      | 676.2      | 694        | 386.6      |
| <b>Ef. De Riego (%)</b>               | 0.7        | 0.7        | 0.7        | 0.7        | 0.7        | 0.7        | 0.7        | 0.7        | 0.7        | 0.7        | 0.7        | 0.7        |
| <b>Req. Vol Neto. (mm)</b>            | 686        | 367.3      | 451.9      | 732.3      | 764        | 1049       | 1240.4     | 1358       | 966        | 966        | 991.4      | 552.3      |
| <b>N° de Horas de riego (hrs)</b>     | 24         | 24         | 24         | 24         | 24         | 24         | 24         | 24         | 24         | 24         | 24         | 24         |
| <b>Area total de riego (has)</b>      | 15.8       | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         |
| <b>Módulo de Riego (lt/seg/ha)</b>    | 0.296      | 0.152      | 0.16       | 0.2        | 0.273      | 0.295      | 0.391      | 0.463      | 0.524      | 0.361      | 0.382      | 0.206      |
| <b>Q. demanda (lt/seg)</b>            | 4.05       | 3.04       | 3.37       | 6.6        | 5.47       | 5.9        | 7.83       | 9.26       | 10.48      | 7.21       | 7.65       | 4.12       |

## ANEXO N°4: Simulación de los códigos realizados

### • Regresión Simple

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

data = {
    'Mes': ['Enero', 'Febrero', 'Marzo', 'Abril', 'Mayo', 'Junio', 'Julio', 'Agosto', 'Septiembre', 'Octubre', 'Noviembre', 'Diciembre'],
    'Precipitación': [136.7, 171.3, 163.7, 40.1, 7.2, 1.7, 3.3, 5.5, 6.7, 14.5, 16.8, 58.9],
    'Caudal': [143.9, 275.4, 245.4, 4.85, 1.79, 0.46, 0.87, 1.41, 1.69, 3.83, 4.46, 12.38]
}

df = pd.DataFrame(data)

X = df[['Precipitación']]
y = df['Caudal']

model = LinearRegression()
model.fit(X, y)

beta_0 = model.intercept_
beta_1 = model.coef_[0]

print(f"Intercepción (β0): {beta_0}")
print(f"Coefficiente (β1): {beta_1}")

print(f"Q_i = {beta_0} + {beta_1} * P_i")
```

Intercepción (β0): -20.256482177851787  
Coefficiente (β1): 1.4998687518106986  
Q\_i = -20.256482177851787 + 1.4998687518106986 \* P\_i

### • Regresión Múltiple

```
data_extended = {
    'Mes': ['Enero', 'Febrero', 'Marzo', 'Abril', 'Mayo', 'Junio', 'Julio', 'Agosto', 'Septiembre', 'Octubre', 'Noviembre', 'Diciembre'],
    'Precipitación': [136.7, 171.3, 163.7, 40.1, 7.2, 1.7, 3.3, 5.5, 6.7, 14.5, 16.8, 58.9],
    'Evapotranspiración': [94.5, 91.1, 92.9, 79.0, 74.9, 67.7, 75.5, 87.3, 101.7, 89.8, 133.9, 133.1],
    'Temperatura': [11.1, 10.6, 10.9, 9.3, 8.1, 6.8, 7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 10.0, 11.2],
    'Caudal': [143.9, 275.4, 245.4, 4.85, 1.79, 0.46, 0.87, 1.41, 1.69, 3.83, 4.46, 12.38]
}

df_extended = pd.DataFrame(data_extended)

X = df_extended[['Precipitación', 'Evapotranspiración', 'Temperatura']]
y = df_extended['Caudal']

model = LinearRegression()
model.fit(X, y)

beta_0 = model.intercept_
beta_1, beta_2, beta_3 = model.coef_

print(f"Intercepción (β0): {beta_0}")
print(f"Coefficiente de Precipitación (β1): {beta_1}")
print(f"Coefficiente de Evapotranspiración (β2): {beta_2}")
print(f"Coefficiente de Temperatura (β3): {beta_3}")

print(f"Q_i = {beta_0} + {beta_1} * P_i + {beta_2} * ET_i + {beta_3} * T_i")
```

Intercepción (β0): 113.63142479511544  
Coefficiente de Precipitación (β1): 1.7905230422931788  
Coefficiente de Evapotranspiración (β2): 0.13593822421258484  
Coefficiente de Temperatura (β3): -17.331802284516293  
Q\_i = 113.63142479511544 + 1.7905230422931788 \* P\_i + 0.13593822421258484 \* ET\_i + -17.331802284516293 \* T\_i

## • Algoritmo Genético Inicial

```

import random
import numpy as np
import pandas as pd
from deap import base, creator, tools, algorithms

data = {
    'Mes': ['Enero', 'Febrero', 'Marzo', 'Abril', 'Mayo', 'Junio', 'Julio', 'Agosto', 'Septiembre', 'Octubre', 'Noviembre', 'Diciembre'],
    'Precipitación': [136.7, 171.3, 163.7, 40.1, 7.2, 1.7, 3.3, 5.5, 6.7, 14.5, 16.8, 58.9],
    'Evapotranspiración': [94.5, 91.1, 92.9, 79.0, 74.9, 67.7, 75.5, 87.3, 101.7, 89.6, 133.9, 133.1],
    'Temperatura': [11.1, 10.6, 10.9, 9.3, 8.1, 6.8, 7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 10.0, 11.2],
    'Demanda_Agua': [10847.5, 7354.4, 9026.2, 17107.2, 14650.8, 15292.8, 20971.9, 24802.0, 27164.2, 19311.3, 19828.8, 11035.0]
}

df = pd.DataFrame(data)

def predict_caudal(precip, et, temp):
    return 113.63142479511544 + 1.7905230422931788 * precip + 0.13593822421258404 * et + (-17.331802284516293) * temp

def evalEfficiency(individual):
    oferta_agua = [predict_caudal(p, et, t) * adj for p, et, t, adj in zip(df['Precipitación'], df['Evapotranspiración'], df['Temperatura'], individual)]
    error = np.abs(df['Demanda_Agua'] - oferta_agua)
    return np.sum(error)

creator.create("FitnessMin", base.Fitness, weights=(-1.0,))
creator.create("Individual", list, fitness=creator.FitnessMin)

toolbox = base.Toolbox()
toolbox.register("attr_float", random.uniform, 0.5, 1.5)
toolbox.register("individual", tools.initRepeat, creator.Individual, toolbox.attr_float, n=12)
toolbox.register("population", tools.initRepeat, list, toolbox.individual)

toolbox.register("mate", tools.cxBlend, alpha=0.5)
toolbox.register("mutate", tools.mutGaussian, mu=1, sigma=0.1, indpb=0.2)

toolbox.register("mate", tools.cxBlend, alpha=0.5)
toolbox.register("mutate", tools.mutGaussian, mu=1, sigma=0.1, indpb=0.2)
toolbox.register("select", tools.selTournament, tournsize=3)
toolbox.register("evaluate", evalEfficiency)

# Inicializar la población
population = toolbox.population(n=100)

# Aplicar el algoritmo genético
NGEN = 50
CXPB = 0.5
MUTPB = 0.2

for gen in range(NGEN):
    offspring = algorithms.varAnd(population, toolbox, cxpb=CXPB, mutpb=MUTPB)
    fits = toolbox.map(toolbox.evaluate, offspring)

    for fit, ind in zip(fits, offspring):
        ind.fitness.values = fit

    population = toolbox.select(offspring, k=len(population))

# Selección del mejor individuo
best_ind = tools.selBest(population, 1)[0]
print("Mejor individuo es: ", best_ind)
print("Con fitness de: ", best_ind.fitness.values[0])
print("Ajuste de oferta de agua: ", [predict_caudal(p, et, t) * adj for p, et, t, adj in zip(df['Precipitación'], df['Evapotranspiración'], df['Temperatura'], best_ind)])
print("Demanda de agua: ", df['Demanda_Agua'].tolist())

Mejor individuo es: [28.389139673763854, 21.67029150250975, 30.02298276421131, 56.649780367233664, 1.1828214709186773, 32.93178851221566, 5.197433853105549, 3.6237970076002703, 3.693348458073212, -1.891707]
Con fitness de: 177358.87828224892
ajuste de oferta de agua: [507.655446810599, 5396.225283678217, 6918.839877658587, 1981.8762959564892, -4.3558995245155625, 264.18131722583115, 44.07876484962746, 0.5749178676256659, -54.66227266397029, 5]
Demanda de agua: [10847.5, 7354.4, 9026.2, 17107.2, 14650.8, 15292.8, 20971.9, 24802.0, 27164.2, 19311.3, 19828.8, 11035.0]

```

## • Algoritmo Genético Secundario con coeficiente de cultivo

```

# Función de predicción basada en el modelo de regresión múltiple ajustado
def predict_caudal(precip, etc, temp):
    return 113.63142479511544 + 1.7905230422931788 * precip + 0.13593822421258404 * etc + (-17.331802284516293) * temp

# Función de evaluación del algoritmo genético
def evalEfficiency(individual):
    oferta_agua = [predict_caudal(p, etc, t) * adj for p, etc, t, adj in zip(df['Precipitación'], df['Cultivo'], df['Temperatura'], individual)]
    error = np.abs(df['Demanda_Agua'] - oferta_agua)
    return np.sum(error)

# Configuración del Algoritmo Genético
creator.create("FitnessMin", base.Fitness, weights=(-1.0,))
creator.create("Individual", list, fitness=creator.FitnessMin)

toolbox = base.Toolbox()
toolbox.register("attr_float", random.uniform, 0.5, 1.5)
toolbox.register("individual", tools.initRepeat, creator.Individual, toolbox.attr_float, n=12)
toolbox.register("population", tools.initRepeat, list, toolbox.individual)

toolbox.register("mate", tools.cxBlend, alpha=0.5)
toolbox.register("mutate", tools.mutGaussian, mu=1, sigma=0.1, indpb=0.2)
toolbox.register("select", tools.selTournament, tournsize=3)
toolbox.register("evaluate", evalEfficiency)

# Inicializar la población
population = toolbox.population(n=100)

# Aplicar el algoritmo genético
NGEN = 50
CXPB = 0.5
MUTPB = 0.2

for gen in range(NGEN):
    offspring = algorithms.varAnd(population, toolbox, cxpb=CXPB, mutpb=MUTPB)
    fits = toolbox.map(toolbox.evaluate, offspring)

```

```

toolbox.register('mate', tools.mate, sigma=0.1, indpb=0.2)
toolbox.register('mutate', tools.mutGaussian, mu=1, sigma=0.1, indpb=0.2)
toolbox.register('select', tools.selTournament, tournsize=3)
toolbox.register('evaluate', evalEfficiency)

# Inicializar la población
population = toolbox.population(n=100)

# Aplicar el algoritmo genético
NGEN = 50
CXPB = 0.5
MUTPB = 0.2

for gen in range(NGEN):
    offspring = algorithms.varAnd(population, toolbox, cxpb=CXPB, mutpb=MUTPB)
    fits = toolbox.map(toolbox.evaluate, offspring)

    for fit, ind in zip(fits, offspring):
        ind.fitness.values = fit

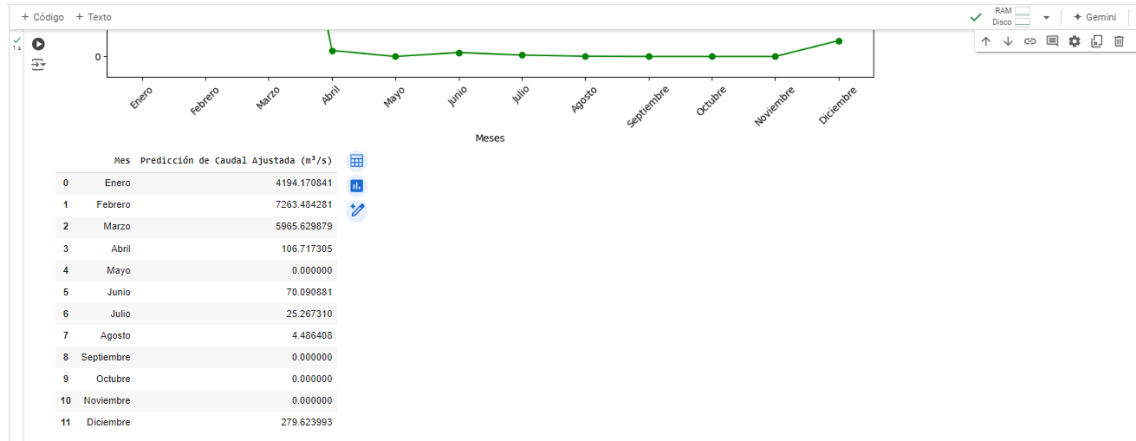
    population = toolbox.select(offspring, k=len(population))

# Selección del mejor individuo
best_ind = tools.selBest(population, 1)[0]
print("Mejor individuo es: ", best_ind)
print("Con fitness de: ", best_ind.fitness.values[0])
print("Ajuste de oferta de agua: ", [predict_caudal(p, etc, t) * adj for p, etc, t, adj in zip(df['Precipitación'], df['ET_cultivo'], df['Temperatura'], best_ind)])
print("Demanda de agua: ", df['Demanda_agua'].tolist())

```

Mejor individuo es: [23.965973887017075, 29.461914460158972, 26.029280441971228, 3.0503943214085125, 3.1415214151863244, 7.106677146187606, 2.3987486785443255, 3.3346468525793285, 6.25278355386912, 2.8566  
Con fitness de: 179705.98917937774  
ajuste de oferta de agua: [4194.170841, 7263.484281, 5965.629879, 106.717305, 0.000000, 70.090081, 25.267310, -8.370450334055667, 70.0908090267551, 25.267310254100392, 4.486407820371217, -92.54240807799972, -79  
Demanda de agua: [18847.5, 7354.4, 9026.2, 17107.2, 14650.8, 15292.8, 20971.9, 24802.0, 27164.2, 19311.3, 19828.8, 11035.0]

- **Predicción de los datos obtenidos del Algoritmo Genético Secundario con coeficiente de cultivo**





**UNSCH**

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

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 055-2024-FIMGC**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA CIVIL**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal N° 565-2024-FIMGC-D, MEMORANDO N° 412-2024-FIMGC/UNSCH**, a los veintiocho días del mes de agosto de 2024, siendo las 10:00 a.m, reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, bajo la presidencia del MSc. Ing. Javier TAIPE CARBAJAL y los miembros; MSc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ, Mg. Ing. Edward LEON PALACIOS y MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO, 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:

**Hercilio PACOTAYPE YARANGA**

Quien presentó la tesis denominada:

**ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LOS PATRONES DE FLUJO EN EL SISTEMA DE RIEGO TECNIFICADO DE LA COMUNIDAD DE CHALLHUALLA, AYACUCHO 2023**

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

**APROBADO CON NOTA QUINCE (15)**

Siendo las 12:15 p.m. del día 28 de agosto 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. Javier TAIPE CARBAJAL  
Presidente

MSc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ  
Miembro

Mg. Ing. Edward LEON PALACIOS  
Miembro

MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO  
Miembro

MSc. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO.  
Secretario docente de la FIMGC

cc:  
Archivo



**UNSCH**

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



"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### CONSTANCIA N° 123-2024-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° 476-2023-FIMGC-UNSCH-D**, deja constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

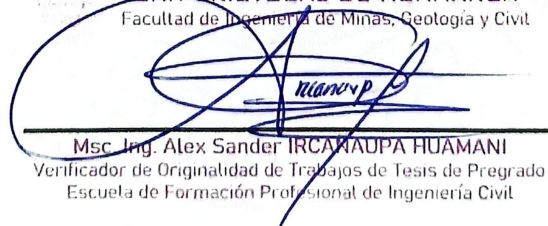
**Apellidos y Nombres** : HERCILIO PACOTAYPE YARANGA  
**Escuela Profesional** : INGENIERÍA CIVIL  
**Título de la Tesis** : ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LOS PATRONES DE FLUJO EN EL SISTEMA DE RIEGO TECNIFICADO DE LA COMUNIDAD DE CHALLHUALLA, AYACUCHO 2023  
**Evaluación de la Originalidad** : 17 % Índice de Similitud  
**Identificador de la entrega** : 2501444527

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, 30 de octubre del 2024

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

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

# Análisis computacional de los patrones de flujo en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho 2023

*por* HERCILIO PACOTAYPE YARANGA

---

**Fecha de entrega:** 29-oct-2024 09:06a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2501444527

**Nombre del archivo:** TESIS\_HERCILIO\_PACOTAYPE\_YARANGA.pdf (3.34M)

**Total de palabras:** 32615

**Total de caracteres:** 168568

# Análisis computacional de los patrones de flujo en el sistema de riego tecnificado de la comunidad de Challhualla, Ayacucho 2023

## INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | <a href="https://repositorio.ana.gob.pe">repositorio.ana.gob.pe</a><br>Fuente de Internet  | 6% |
| 2 | Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga<br>Trabajo del estudiante   | 2% |
| 3 | <a href="https://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a><br>Fuente de Internet  | 1% |
| 4 | Galindo, Eimer Adrian Borda. "Programa para Optimizacion en Peso de Armaduras de Acero Mediante Algoritmos Geneticos", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2021<br>Publicación | 1% |
| 5 | <a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a><br>Fuente de Internet  | 1% |
| 6 | <a href="https://vsip.info">vsip.info</a><br>Fuente de Internet  | 1% |

|    |   |      |
|----|---|------|
| 7  | <a href="#">idoc.pub</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 8  | <a href="#">Submitted to Coventry University</a><br>Trabajo del estudiante                      | <1 % |
| 9  | <a href="#">repositorio.ug.edu.ec</a><br>Fuente de Internet                                     | <1 % |
| 10 | <a href="#">repositorio.unheval.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                                | <1 % |
| 11 | <a href="#">Submitted to Universidad Internacional de la Rioja</a><br>Trabajo del estudiante    | <1 % |
| 12 | <a href="#">repositorio.caen.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                                   | <1 % |
| 13 | <a href="#">repositorio.upecen.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                                 | <1 % |
| 14 | <a href="#">Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru</a><br>Trabajo del estudiante | <1 % |
| 15 | <a href="#">www.scribd.com</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 16 | <a href="#">livrosdeamor.com.br</a><br>Fuente de Internet                                       | <1 % |
| 17 | <a href="#">repositorio.unfv.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                                   | <1 % |

|    |  |      |
|----|--|------|
| 18 | <a href="https://repository.ucc.edu.co">repository.ucc.edu.co</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 19 | Submitted to Universidad TecMilenio<br>Trabajo del estudiante  | <1 % |
| 20 | <a href="https://dokumen.pub">dokumen.pub</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 21 | <a href="https://upc.aws.openrepository.com">upc.aws.openrepository.com</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 22 | <a href="https://repositorio.urp.edu.pe">repositorio.urp.edu.pe</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 23 | <a href="https://voelkel.pages.cs.uni-duesseldorf.de">voelkel.pages.cs.uni-duesseldorf.de</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 24 | <a href="https://www.lumensoft.pe">www.lumensoft.pe</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 25 | <a href="https://ruidera.uclm.es">ruidera.uclm.es</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 26 | #N/A. "Informe de Gestión Ambiental del Proyecto de Instalación de la Presa Shishan para el Servicio del Sistema de Riego de Copa y Poquian-IGA0019108", R.D.G. N° 082 -2019-MINAGRI-DVDIAR-DGAAA, 2022<br>Publicación | <1 % |
| 27 | <a href="https://repositorio.lamolina.edu.pe">repositorio.lamolina.edu.pe</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |

|    |   |      |
|----|---|------|
| 28 | <a href="https://repositorio.unesum.edu.ec">repositorio.unesum.edu.ec</a><br>Fuente de Internet   | <1 % |
| 29 | <a href="http://www.ijisae.org">www.ijisae.org</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 30 | "Nuevas territorialidades. Gestión de los territorios y recursos naturales con sustentabilidad ambiental", Universidad Nacional Autónoma de México, 2023<br>Publicación | <1 % |
| 31 | <a href="http://qdoc.tips">qdoc.tips</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 32 | <a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 33 | Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC<br>Trabajo del estudiante  | <1 % |
| 34 | Submitted to Universidad de Cantabria<br>Trabajo del estudiante   | <1 % |
| 35 | <a href="http://studfile.net">studfile.net</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo