

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**AGRÍCOLA**



**Evaluación de disponibilidad hídrica superficial en la  
Subcuenca Angostura para fines de riego, 2024**

**TESIS**  
**para optar el título Profesional de Ingeniera Agrícola**

**Autora: Bach. Stefani Mercedes Clavijo Ortiz**

**Tumbes, 2026**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**AGRÍCOLA**



**Evaluación de disponibilidad hídrica superficial en la  
Subcuenca Angostura para fines de riego, 2024**

**Proyecto de tesis aprobada en forma y estilo por:**

**Dr. José Modesto Carrillo Sarango (presidente)**

**Código ORCID: 0000-0003-0841-3064**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Modesto', written over a horizontal line.

**Mg. Felix Enrique Alcoser Torres (secretario)**

**Código ORCID: 0000-0001-9929-4763**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Felix', written over a horizontal line.

**Dr. Napoleón Puño Lecarnaqué (vocal)**

**Código ORCID: 0000-0002-5008-8085**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Napoleón', written over a horizontal line.

**Tumbes, 2026**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**AGRÍCOLA**



**Evaluación de disponibilidad hídrica superficial en la  
Subcuenca Angostura para fines de riego, 2024**

**Los suscritos declaramos que el proyecto de tesis es original  
en su contenido y forma**

**Bach. Stefani Mercedes Clavijo Ortiz (autora)** .....

**Dr. Napoleón Puño Lecarnaqué (asesor)** .....

<https://orcid.org/0000-0002-5008-8085>

**Mg. Henry Fernando More Medrano (coasesor)** .....

**Ing. Dayana del Carmen Cruz Peña (Coasesora)** ....

**Tumbes, 2026**



Universidad Nacional  
de Tumbes



Facultad de Ciencias Agrarias  
Programa Académico de Ingeniería Agrícola  
Ex Fundo Fiscal La Cruz – Campus Universitario

**"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"**

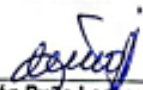
**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL**

En Tumbes, a los TRES días del mes de Agosto del dos mil veintiséis, siendo las ONCE horas con Diez minutos, en el Campus Universitario, de la Facultad de Ciencias Agrarias en el aula 2, del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concreto y Asfalto, de forma presencial, se reunieron los miembros del el Jurado Calificador designados por RESOLUCIÓN N°070-2025/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D, de fecha 28 de marzo del 2025, Dr. José Modesto Carrillo Sarango (Presidente); Mg. Félix Enrique Alcoser Torres (secretario); Dr. Napoleón Puño Lecarnaque (Vocal) y el Dr. Francisco Alburquerque Viera (Accesitario); reconociendo en la misma resolución, al Dr. Napoleón Puño Lecarnaque como (Asesor), se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación del informe final de la tesis, titulada: "Evaluación de disponibilidad hídrica superficial en la Subcuenca Angostura para fines de riego, 2024", presentado por la Br. Stefani Mercedes Clavijo Ortiz, del Programa Académico Profesional de Ingeniería Agrícola. Concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte del sustentante y después de la deliberación, en concordancia con el artículo N° 75 del Reglamento de Tesis para Pregrado y Posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes, Aprobado por Resolución N° 0714-2023/UNTUMBES-CU, con fecha 25 de mayo del 2023, declaró APROBADO por UNANIMIDAD, con el calificativo EXCELENTE. Se le hace conocer al sustentante, que deberá levantar las observaciones realizadas si las hubiera que el jurado calificador indique.

En consecuencia, queda APTO para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del título profesional de Ingeniera Agrícola, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria N° 30220, el Estatuto, Reglamento General, Reglamento General de Grados y Títulos y Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo las DOCE horas con VEINTE minutos del mismo día, mes y año se dio por terminado el acto académico, procediendo a firmar el acta en presencia del público asistente.

Tumbes, 03 de Agosto del año 2026

|                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>Dr. José Modesto Carrillo Sarango<br>DNI N° 00223850<br>CODIGO ORCID: 0000-0003-0841-3064<br>Presidente | <br>Mg. Félix Enrique Alcoser Torres<br>DNI N° 00210369<br>CODIGO ORCID : 0000/0001-9929-4763<br>Secretario  |
| <br>Dr. Napoleón Puño Lecarnaque<br>DNI N° : 00225904<br>CODIGO ORCID: 0000-0002-5008-8085<br>Vocal         | <br>Dr. Francisco Alburquerque Viera<br>DNI N° 03605124<br>CODIGO ORCID : 0000-0002-7468-5386<br>Accesitario |

# Stefani Mercedes Clavijo Ortiz

## Tesis Final\_Stefani Clavijo

 informe Final deTesis

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:626747733

Fecha de entrega

19 sept 2026, 16:51 GMT-5

Fecha de descarga

19 sept 2026, 16:58 GMT-5

Nombre del archivo

Tesis Final\_Stefani Clavijo.docx

Tamaño del archivo

11.9 MB

90 páginas

15.861 palabras

90.692 caracteres

## 11% Similitud general

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

### Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

### Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

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

## Fuentes principales

10%  Fuentes de Internet  
3%  Publicaciones  
5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

|    |             |                                                                                   |     |
|----|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1  | Internet    | repositorio.senamhi.gob.pe                                                        | 2%  |
| 2  | Internet    | repositorio.unap.edu.pe                                                           | <1% |
| 3  | Internet    | renati.sunedu.gob.pe                                                              | <1% |
| 4  | Internet    | es.slideshare.net                                                                 | <1% |
| 5  | Internet    | hdl.handle.net                                                                    | <1% |
| 6  | Internet    | www.datosabiertos.gob.pe                                                          | <1% |
| 7  | Internet    | scielo.cl                                                                         | <1% |
| 8  | Publicación | GARRO ROSAS ARTURO ALCIDES. "Informe de Gestión Ambiental del Proyecto Mej...     | <1% |
| 9  | Internet    | repositorio.continental.edu.pe                                                    | <1% |
| 10 | Publicación | David Houéwanou Ahoton, Aymar Yaovi Bossa, Taofic Bacharou, Luc Ollivier Sinto... | <1% |
| 11 | Internet    | repositorio.chapingo.edu.mx                                                       | <1% |

|    |                         |                                                                                      |     |
|----|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12 | Internet                | www.coursehero.com                                                                   | <1% |
| 13 | Internet                | jurnal.untan.ac.id                                                                   | <1% |
| 14 | Internet                | www.cbu.ac.zm                                                                        | <1% |
| 15 | Internet                | www.sciencepg.com                                                                    | <1% |
| 16 | Internet                | oldri.ues.edu.sv                                                                     | <1% |
| 17 | Trabajos del estudiante | University of Leeds on 2023-09-07                                                    | <1% |
| 18 | Internet                | dialnet.unirioja.es                                                                  | <1% |
| 19 | Trabajos del estudiante | Universidad del Valle de Guatemala on 2024-04-03                                     | <1% |
| 20 | Internet                | investigacion.unirioja.es                                                            | <1% |
| 21 | Internet                | repositorio.upsc.edu.pe                                                              | <1% |
| 22 | Internet                | www.arcotel.gob.ec                                                                   | <1% |
| 23 | Publicación             | Andrea Manrique-Cantillo, Enrique Morales-Acuña, Diana Escobedo-Urias, Jean R. ...   | <1% |
| 24 | Publicación             | De Jesús Martínez, Lyanne. "Actitudes hacia el Ejercicio Físico como Herramienta ... | <1% |
| 25 | Internet                | utoronto.scholaris.ca                                                                | <1% |

|    |                         |                                                  |     |
|----|-------------------------|--------------------------------------------------|-----|
| 26 | Internet                | www.gob.pe                                       | <1% |
| 27 | Internet                | pdfcoffee.com                                    | <1% |
| 28 | Trabajos del estudiante | Universidad Nacional de San Martín on 2023-05-16 | <1% |
| 29 | Internet                | alicia.concytec.gob.pe                           | <1% |
| 30 | Internet                | repositorio.unprg.edu.pe                         | <1% |
| 31 | Internet                | letrasdiferentes.org                             | <1% |
| 32 | Trabajos del estudiante | Webster University on 2022-11-16                 | <1% |
| 33 | Internet                | repositorio.puce.edu.ec                          | <1% |
| 34 | Trabajos del estudiante | Universidad Estatal Amazonica- on 2025-02-13     | <1% |
| 35 | Trabajos del estudiante | Universiti Malaysia Terengganu UMT on 2026-02-13 | <1% |
| 36 | Internet                | repositorio.utc.edu.ec                           | <1% |
| 37 | Internet                | tesis.unap.edu.pe                                | <1% |
| 38 | Internet                | www.ub.edu                                       | <1% |
| 39 | Trabajos del estudiante | Universidad Andina del Cusco on 2019-12-18       | <1% |

|    |                         |                                              |     |
|----|-------------------------|----------------------------------------------|-----|
| 40 | Trabajos del estudiante | Universidad Nacional de Tumbes on 2026-01-22 | <1% |
| 41 | Trabajos del estudiante | Universidad Peruana Del Centro on 2025-02-08 | <1% |
| 42 | Trabajos del estudiante | Universidad de Guayaquil on 2026-02-11       | <1% |
| 43 | Internet                | repositorio.uct.edu.pe                       | <1% |
| 44 | Internet                | repositorio.uladech.edu.pe                   | <1% |
| 45 | Internet                | repositoriocdim.esap.edu.co                  | <1% |
| 46 | Internet                | www.keneamazon.net                           | <1% |

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo de investigación, en primer lugar, a Dios, por ser mi signo de fe y fortaleza, por brindarme sabiduría, salud y la oportunidad de culminar una etapa importante en mi vida profesional.*

*También dedico este logro a mi abuelo, Filomeno Ortiz, quien siempre fue un ejemplo de fuerza y valentía para mí, y quien me motivó a seguir adelante en mi vida profesional. Sé que hubiera sido muy feliz compartiendo este logro conmigo.*

*A mis queridos padres, Armando y Doris:*

*Con profundo amor, respeto y gratitud les dedico este trabajo. Gracias por su amor, esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional a lo largo de mi formación personal y profesional. Cada enseñanza, consejo y valor que me inculcaron han sido la base que me permitió superar los desafíos y alcanzar esta meta profesional.*

*Este logro también les pertenece a ustedes, porque sin su confianza, dedicación y constante aliento nada de esto habría sido posible.*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco infinitamente a Dios por ser mi guía, mi fortaleza y mi refugio en cada momento de este camino académico. Por darme sabiduría, paciencia y perseverancia para no rendirme ante las dificultades y permitirme culminar esta importante etapa de mi vida profesional. “El Señor es mi fortaleza y mi escudo; en Él confió mi corazón, y fui ayudado.” (Salmos 28:7)*

*A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación durante mi formación profesional y a lo largo de este proceso académico, siendo un pilar fundamental para alcanzar esta meta.*

*Asimismo, expreso un especial agradecimiento a mi asesor, el **Dr. Napoleón Puño Lecarnaqué**, por su orientación, conocimientos y valiosos aportes brindados durante el desarrollo de la presente investigación. Su apoyo y guía académica fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.*

*De igual manera, agradezco a mis coasesores y amigos, la **Ing. Dayana Cruz Peña** y al **Ing. Henry More Medrano**, por su disposición, apoyo, sugerencias y contribuciones brindadas durante el desarrollo de la investigación, permitiendo fortalecer y enriquecer el contenido de este estudio.*

*También agradezco a los miembros del jurado, el **Ing. José Carrillo**, **Ing. Francisco Alburqueque**, y al **Ing. Felix Alcoser**, docentes que formaron parte de mi preparación profesional en la Escuela, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias, contribuyendo a mi formación académica y personal.*

*Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones, que de una u otra manera brindaron su apoyo y de manera significativa agradecer a la Autoridad Nacional del Agua y el Proyecto Blue Deal, por su apoyo y colaboración para la realización y culminación de este trabajo de investigación.*

## ÍNDICE

|                                                              |       |
|--------------------------------------------------------------|-------|
| RESUMEN.....                                                 | xviii |
| ABSTRACT.....                                                | xix   |
| I. INTRODUCCIÓN .....                                        | 20    |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA.....                              | 22    |
| 2.1. ANTECEDENTES .....                                      | 22    |
| 2.1.1. Nivel Internacional.....                              | 22    |
| 2.1.2. Nivel Nacional .....                                  | 24    |
| 2.1.3. Nivel Regional.....                                   | 26    |
| 2.2. MARCO CONCEPTUAL .....                                  | 27    |
| 2.2.1. Cuenca Hidrográfica.....                              | 27    |
| 2.2.2. Disponibilidad hídrica .....                          | 27    |
| 2.2.3. Demanda de agua para Riego.....                       | 28    |
| 2.2.4. Balance oferta – demanda de agua .....                | 28    |
| 2.2.5. Riego .....                                           | 28    |
| 2.2.6. Evapotranspiración del cultivo (Etc) .....            | 29    |
| 2.2.7. Coeficiente de Cultivo (Kc) .....                     | 30    |
| 2.2.8. Precipitación efectiva (Pe).....                      | 30    |
| 2.2.9. Propiedades físicas del Suelo.....                    | 30    |
| 2.2.10. Modelo Hidrológico SWAT .....                        | 31    |
| 2.2.11. Producto Pisco.....                                  | 31    |
| III. MATERIALES Y METODOS.....                               | 32    |
| 3.1. UBICACIÓN.....                                          | 32    |
| 3.1.1. Ubicación geopolítica.....                            | 32    |
| 3.1.2. Ubicación geodésica.....                              | 32    |
| 3.2. MATERIALES Y EQUIPOS .....                              | 33    |
| 3.3. SOFTWARE .....                                          | 33    |
| 3.4. PROCEDIMIENTO METODOLOGICO .....                        | 35    |
| 3.4.1. Recolección de información.....                       | 36    |
| 3.1.1. Construcción del modelo SWAT.....                     | 39    |
| 3.1.2. Construcción del modelo SWAT.....                     | 40    |
| 3.1.3. Calibración y validación del Modelo Hidrológico ..... | 44    |

|         |                                                                         |    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.4.  | Cálculo de la demanda agrícola.....                                     | 44 |
| 3.1.5.  | Balance Hídrico.....                                                    | 48 |
| IV.     | RESULTADOS Y DISCUSIONES .....                                          | 49 |
| 4.1.    | RESULTADOS.....                                                         | 49 |
| 4.1.1.  | Delimitación de la cuenca y subcuencas.....                             | 49 |
| 4.1.2.  | Mapa de uso de suelo .....                                              | 51 |
| 4.1.3.  | Mapa de tipo de suelo .....                                             | 53 |
| 4.1.4.  | Mapa de Pendientes .....                                                | 55 |
| 4.1.5.  | Unidades de Respuesta Hidrológica .....                                 | 57 |
| 4.1.6.  | Modelamiento Hidrológico – SWAT .....                                   | 59 |
| 4.1.7.  | La Precipitación Diaria Mensual de la Subcuenca Angostura (mm)<br>..... | 60 |
| 4.1.8.  | Mapa de Evapotranspiración Mensual (mm) .....                           | 65 |
| 4.1.9.  | Caudales Promedio Mensual (m <sup>3</sup> /s) .....                     | 68 |
| 4.1.10. | Oferta Hídrica .....                                                    | 70 |
| 4.1.11. | Demanda Agrícola.....                                                   | 72 |
| 4.1.12. | Balance Hídrico.....                                                    | 74 |
| 4.2.    | DISCUSIONES.....                                                        | 77 |
| V.      | CONCLUSIONES.....                                                       | 82 |
| VI.     | RECOMENDACIONES .....                                                   | 84 |
| VII.    | REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....                                          | 85 |
| VIII.   | ANEXOS .....                                                            | 90 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Proceso de la Evapotranspiración. ....                                                         | 30 |
| <b>Figura 2.</b> Ubicación de la Subcuenca Quebrada Angostura. ....                                             | 32 |
| <b>Figura 3.</b> Flujograma de Metodología para Evaluar la Disponibilidad Superficial con fines Agrícolas. .... | 35 |
| <b>Figura 4.</b> Plataforma de descarga de la Data Climática PISCO del SENAMHI. ....                            | 36 |
| <b>Figura 5.</b> Descarga de DEM en la web del USGS.....                                                        | 37 |
| <b>Figura 6.</b> Data de descarga de tipo y uso de Suelo. ....                                                  | 38 |
| <b>Figura 7.</b> Plataforma de descarga de Información Vectorial. ....                                          | 38 |
| <b>Figura 8.</b> Metodología del Modelo Hidrológico Swat. ....                                                  | 40 |
| <b>Figura 9.</b> Proceso de la Delimitación de las Subcuencas. ....                                             | 41 |
| <b>Figura 10.</b> Resultados del procesamiento de las HRU.....                                                  | 42 |
| <b>Figura 11.</b> Registro de la Data Pisco en RStudio. ....                                                    | 43 |
| <b>Figura 12.</b> Lectura de datos climáticos PISCO en SWAT. ....                                               | 44 |
| <b>Figura 13.</b> Delimitación de la Cuenca Angostura y sus Subcuencas. ....                                    | 50 |
| <b>Figura 14.</b> Mapa de Uso de Suelo de la Subcuenca Angostura.....                                           | 52 |
| <b>Figura 15.</b> Mapa representativo del Tipo de Suelo.....                                                    | 54 |
| <b>Figura 16.</b> Mapa de Pendientes. ....                                                                      | 56 |
| <b>Figura 17.</b> Mapa de Clasificación de Subcuencas - SWAT.....                                               | 58 |
| <b>Figura 18.</b> Mapa de Precipitación Mensual - Modelamiento Hidrológico SWAT. ....                           | 62 |
| <b>Figura 19.</b> Mapa de Evapotranspiración mensual (mm). ....                                                 | 66 |
| <b>Figura 20.</b> Variación del Caudal Mensual de la Subcuenca Angostura. ....                                  | 69 |
| <b>Figura 21.</b> Gráfico de relación entre Oferta y demanda Hídrica.....                                       | 76 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Ubicación de la Geopolítica de la Subcuenca. ....                                               | 32 |
| <b>Tabla 2.</b> Ubicación Geodésica de la Subcuenca. ....                                                       | 32 |
| <b>Tabla 3.</b> Materiales utilizados para realización de la Investigación. ....                                | 33 |
| <b>Tabla 4.</b> Equipos utilizados para la realización de la Investigación. ....                                | 33 |
| <b>Tabla 5.</b> Softwares utilizados para la realización de la Investigación. ....                              | 33 |
| <b>Tabla 6.</b> Información base necesaria para la Investigación.....                                           | 39 |
| <b>Tabla 7.</b> Estaciones Virtuales - Sub Cuenca Angostura.....                                                | 42 |
| <b>Tabla 8.</b> Data de Cultivos Agrícolas del Área de Estudio. ....                                            | 45 |
| <b>Tabla 9.</b> Coeficiente de cultivos predominantes de la Subcuenca Angostura. .                              | 46 |
| <b>Tabla 10.</b> Tabla Promedio de Precipitación Mensual (mm). ....                                             | 64 |
| <b>Tabla 11.</b> Valores de Evapotranspiración Mensual de la Subcuenca Angostura<br>(mm). ....                  | 67 |
| <b>Tabla 12.</b> Serie generada de Caudales Medios Mensuales - Modelamiento<br>Swat. - Subcuenca Angostura..... | 70 |
| <b>Tabla 13.</b> Cuadro Resumen de Cálculo de la Demanda Agrícola.....                                          | 73 |
| <b>Tabla 14.</b> Balance Hídrico .....                                                                          | 75 |
| <b>Tabla 15.</b> Valores comparativos de Estudios realizados en la Cuenca<br>Angostura. ....                    | 79 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Anexo 1.</b> Exploración del área de estudio y áreas agrícolas. ....                                                        | 90 |
| <b>Anexo 2.</b> Vista de las parcelas agrícolas con los cultivos predominantes. ....                                           | 90 |
| <b>Anexo 3.</b> Exploración de parcelas con dron para la inspección de los cultivos predominantes. ....                        | 91 |
| <b>Anexo 4.</b> Preparando el equipo para realizar el aforo en la Quebrada Cabuyal con apoyo profesional técnico del ANA. .... | 91 |
| <b>Anexo 5.</b> Participación y sugerencias del personal Técnico del ANA. ....                                                 | 92 |
| <b>Anexo 6.</b> Realizando las mediciones del fondo del Cauce de la Quebrada. ...                                              | 92 |
| <b>Anexo 7.</b> Midiendo el ancho del cauce de la Quebrada para posteriormente realizar los cálculos correspondientes. ....    | 93 |
| <b>Anexo 8.</b> Conversatorio con personas del Sector y representantes de juntas de usuarios. ....                             | 93 |

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la disponibilidad hídrica superficial para fines de riego en la subcuenca Angostura, ubicada en el distrito de Pampas de Hospital, provincia y región de Tumbes. Para ello, se empleó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), integrando información topográfica, climática, edafológica, de uso y cobertura del suelo. La subcuenca fue delimitada en 11 microcuencas y 93 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), permitiendo mediante la caracterización física-morfométrica de la cuenca, la estimación de la oferta hídrica superficial y la determinación de la demanda hídrica agrícola. Los resultados mostraron una marcada variabilidad estacional de la disponibilidad hídrica, registrándose los mayores caudales durante el periodo lluvioso entre febrero y abril, con valores de hasta 8.00 m<sup>3</sup>/s, y los menores durante la época seca, alcanzando un mínimo de 0.06 m<sup>3</sup>/s en septiembre. La demanda hídrica agrícola presentó su máximo requerimiento en septiembre con 5.29 m<sup>3</sup>/s, influenciada por las condiciones climáticas y la evapotranspiración del cultivo. El balance hídrico evidenció que durante los meses de enero a mayo la oferta hídrica fue suficiente para cubrir la demanda agrícola, registrándose un excedente máximo de 3.45 m<sup>3</sup>/s en marzo. Sin embargo, entre junio y diciembre se presentaron déficits progresivos, alcanzando un valor crítico de -5.28 m<sup>3</sup>/s en septiembre. Asimismo, el análisis de uso y tipo de suelo mostró el predominio de coberturas de matorral y áreas de cultivo con bosque, así como suelos con limitaciones severas y posibles problemas de drenaje, factores que influyen en la dinámica hidrológica de la subcuenca. Se concluye que la disponibilidad natural de agua en la quebrada Angostura no garantiza el abastecimiento continuo para fines de riego durante todo el año, por lo que resulta necesaria la implementación de medidas de regulación y almacenamiento hídrico para asegurar la sostenibilidad de las actividades agrícolas.

Palabras clave: Disponibilidad Hídrica, Modelo SWAT, Balance hídrico, demanda agrícola, Subcuenca Angostura.

## ABSTRACT

This research aimed to evaluate surface water availability for irrigation purposes in the Angostura sub-basin, located in the Pampas de Hospital district, Tumbes province and region. To achieve this, the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrological model was employed, integrating topographic, climatic, and soil data, as well as land use and land cover information. The sub-basin was delineated into 11 micro-basins and 93 Hydrologic Response Units (HRUs); the physical-morphometric characterization of the basin enabled the estimation of surface water supply and the determination of agricultural water demand. The results revealed marked seasonal variability in water availability: peak flow rates were recorded during the rainy season (February to April), reaching up to 8.00 m<sup>3</sup>/s, while the lowest flows occurred during the dry season, dropping to a minimum of 0.06 m<sup>3</sup>/s in September. Agricultural water demand peaked in September at 5.29 m<sup>3</sup>/s, driven by climatic conditions and crop evapotranspiration. The water balance showed that water supply was sufficient to meet agricultural demand from January to May, with a maximum surplus of 3.45 m<sup>3</sup>/s recorded in March. However, progressive deficits occurred between June and December, reaching a critical level of -5.28 m<sup>3</sup>/s in September. Furthermore, the analysis of land use and soil types revealed a predominance of scrubland and cultivated areas interspersed with forest, alongside soils characterized by severe limitations and potential drainage issues—factors that influence the sub-basin's hydrological dynamics. It is concluded that the natural water availability in the Angostura stream does not guarantee a continuous supply for irrigation throughout the year; therefore, implementing water regulation and storage measures is essential to ensure the sustainability of agricultural activities.

Keywords: Water Availability, SWAT Model, Water Balance, Agricultural Demand, Angostura Sub-basin.

## I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable, esencial para sostener la vida, apoyar los ecosistemas y promover el desarrollo económico. Fenner (2017).

AAA Jequetepeque-Zarumilla, destacó que la problemática del agua en el país se agrava debido a la degradación de los ecosistemas, el cambio climático y el aumento de la población. Enfatizó la necesidad de desarrollar herramientas que garanticen la disponibilidad de este recurso esencial en todo el territorio nacional. En este contexto, durante los últimos seis años se han coordinado esfuerzos para la formulación del Plan de Aprovechamiento de Disponibilidades Hídricas (PADH). (MIDAGRI, 2020)

El principal problema asociado con la agricultura dependiente de la lluvia en el país es la alta variabilidad e incertidumbre de las precipitaciones. Debido a esta variabilidad, las pérdidas de cultivos debido a períodos secos y sequías son frecuentes. Como consecuencia, la inseguridad alimentaria a menudo se convierte en hambruna ante el más mínimo incidente climático adverso, afectando especialmente a los medios de vida de los pobres rurales. Ante la disminución de la productividad en la agricultura de secano y la necesidad de duplicar la producción de alimentos en las próximas dos décadas, el agua ha sido reconocida como el factor más importante para transformar la agricultura de secano de baja productividad en una agricultura de riego más efectiva y eficiente. Es evidente que el uso de los recursos hídricos en la agricultura de riego proporciona riego suplementario y de temporada completa para contrarrestar los efectos de la variabilidad e incertidumbre de las precipitaciones. Por lo tanto, el desarrollo del riego podría ser la solución a la inseguridad alimentaria, ya que reduciría la variabilidad en las cosechas y permitiría la intensificación del cultivo al producir más de una cosecha por año. Abawa et al. (2024)

Los dos recursos naturales más cruciales para la producción de cultivos en todo el mundo son la tierra y el agua. A lo largo de su ciclo de vida, las plantas requieren agua de manera continua para sobrevivir, mientras que el suelo proporciona los nutrientes necesarios y el soporte físico. Estos recursos son

fundamentales para las economías que dependen de la agricultura. Khadatare et al. (2024)

El agua es un recurso natural muy fundamental para la actividad agrícola, especialmente en zonas donde su disponibilidad varía a lo largo del año. En el distrito de Tumbes, en el centro poblado Cabuyal, la quebrada angostura representa una posible fuente de agua superficial para riego; sin embargo, aun no se ha realizado un análisis detallado sobre la cantidad de agua que existe. El aumento en la demanda hídrica para actividades agrícolas, los efectos del cambio climático y la constante variabilidad hidrológica, hace necesario evaluar la disponibilidad de agua en esta subcuenca para optimizar su uso y garantizar una gestión eficiente y sostenible del recurso.

En este aspecto, la presente investigación tiene como objetivo, determinar la disponibilidad de agua superficial en la Quebrada Angostura y su viabilidad para riego. Para ello, se emplearán herramientas de análisis hidrológico que incluyen el uso de datos climáticos, registros de caudal y modelos matemáticos, con el fin de estimar la oferta de agua en distintos periodos de tiempo.

Lo más importante de esta investigación, radica en su contribución a la gestión eficiente del agua en la región, proporcionando información esencial para la planificación y administración del recurso hídrico. Los resultados obtenidos facilitarán un manejo óptimo del agua, promoviendo una gestión más efectiva del recurso hídrico y favoreciendo al desarrollo agrícola en el distrito de Tumbes.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. ANTECEDENTES**

#### **2.1.1. Nivel Internacional**

Mwelwa et al. (2025) analizaron la disponibilidad hídrica en la cuenca de Luwombwa mediante el modelo SWAT, destacando la importancia de mejorar la predicción del caudal en cuencas con datos hidrológicos limitados para una gestión sostenible del agua. Durante la calibración (2017-2022) y validación (2009-2015), el modelo mostró un buen desempeño (NSE entre 0.66 y 0.74,  $R^2$  entre 0.67 y 0.77, y PBIAS entre 3.84 y 5.67). El balance hídrico estimado indicó una precipitación promedio de 1107.7 mm/año, con un 63% de evapotranspiración, 18% de escorrentía y 19% de percolación y recarga profunda. Estos resultados validan la capacidad del modelo para predecir la disponibilidad de agua superficial y proporcionar información clave para la planificación y gestión sostenible del recurso hídrico.

Abawa et al. (2024) destacan la importancia de evaluar los recursos hídricos y la idoneidad del terreno para riego a nivel de cuenca como herramienta clave en la planificación agrícola. Su estudio empleó Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para evaluar la idoneidad del riego superficial y la disponibilidad de agua en la cuenca del río Beles. Para ello, construyeron una curva de duración de caudales (FDC) y evaluaron el caudal disponible en un 90% del tiempo. Paralelamente, analizaron la idoneidad del terreno mediante una evaluación multicriterio basada en SIG, considerando factores como pendiente, proximidad a ríos y carreteras, características edáficas y uso del suelo, ponderados mediante matrices de comparación por pares. Los resultados indicaron que el 13.84% del área es altamente apta para riego, el 73.05% moderadamente apta y el 13.11% marginalmente apta. El análisis de la FDC mostró que el río Beles mantiene un caudal de 1.6 m<sup>3</sup>/s el 90% del tiempo. La variabilidad estacional del caudal limita la irrigación en la temporada seca, resaltando la necesidad de infraestructura de almacenamiento para garantizar el suministro de agua todo el año.

Torres-Suárez et al. (2024) realizaron un estudio para estimar la disponibilidad espacio - temporal del agua dentro de una cuenca, a partir de la modelación de elementos del balance hídrico superficial. Para ello, emplearon el modelo SWAT, calibrado y validado mediante el programa SWATCUP. La comparación de los valores de escorrentía estimados con los registros de la Estación Hidrométrica Venados arrojó buenos niveles de ajuste, con coeficientes estadísticos de  $R^2 = 0.89$  y Nash Sutcliffe (NS) = 0.86 en la calibración (1982-2002), y  $R^2 = 0.77$  y NS = 0.62 en la validación (2003-2013). Además, se identificó un cambio significativo en el estado hidrológico de la cuenca durante el período julio -octubre ( $p < 0.001$ ), asociado principalmente a variaciones en la precipitación, lo que influyó en la tendencia de la escorrentía superficial. Este estudio resalta la importancia del uso de modelos hidrológicos para evaluar la disponibilidad hídrica superficial y sus variaciones espacio - temporales, contribuyendo al entendimiento de la dinámica del recurso hídrico en el contexto del cambio climático y la gestión del agua.

Khadatare et al. (2024) investigaron la disponibilidad de agua en la cuenca del río Arjuna, situada en el distrito de Ratnagiri, estado de Maharashtra empleando el modelo ArcSWAT, una herramienta avanzada de simulación hidrológica. El estudio se basó en el análisis de datos meteorológicos e hidrológicos recopilados entre 1996 y 2016, aplicando un riguroso proceso de calibración y validación asegurar la precisión de los resultados. Se consideraron factores como el uso del suelo, la cobertura vegetal y la topografía. El modelo se sometió a un período de calentamiento de 3 años, con una fase de calibración entre 1996 y 2003, seguida de una validación que abarcó de 2007 a 2012. Los análisis estadísticos evidenciaron que el modelo ArcSWAT simuló de manera satisfactoria la escorrentía mensual, obteniendo coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0.78 en calibración y 0.67 en validación. Además, el NSE fue de 0.75 en calibración y 0.65 en validación, mientras que los valores de RMSE fueron 0.50 y 0.60, respectivamente, lo que confirmó la efectividad del modelo para simular la disponibilidad de agua en la cuenca.

Sekaranom et al. (2022) realizaron un estudio para evaluar la disponibilidad de agua superficial con fines de riego en la regencia de Kediri, Indonesia. La

investigación integró datos de agencias gubernamentales, como la Oficina de Meteorología, Climatología y Geofísica de Indonesia y la Oficina de Agricultura de Kediri, junto con información obtenida mediante trabajo de campo. Se analizaron variables climáticas e hidrológicas, incluyendo precipitación, temperatura, capacidad de infiltración, textura del suelo, profundidad de raíces y extensión de tierras agrícolas. Para estimar la disponibilidad de agua superficial, se aplicó el método de balance hídrico de Thornthwaite-Mather, cuyos resultados fueron comparados con la demanda hídrica agrícola, determinada según el área cultivada y el tipo de cultivo predominante, con énfasis en los arrozales. La investigación clasificó las condiciones de disponibilidad hídrica en críticas y no críticas, considerando la relación entre el volumen de agua disponible y la demanda agrícola. Los hallazgos indicaron que la disponibilidad de agua superficial varía estacionalmente, con un superávit hídrico en la temporada de lluvias y un déficit generalizado en la estación seca. En términos generales, el estudio evidenció que los recursos hídricos superficiales en Kediri presentan condiciones críticas durante todo el año, siendo más severas en la estación seca. Estos resultados resaltan la importancia de una gestión eficiente del recurso hídrico para garantizar su sostenibilidad en el riego agrícola.

### **2.1.2. Nivel Nacional**

Quispe & Huanca (2021) Evaluaron la disponibilidad hídrica superficial en la cuenca del río Ilave, en las provincias de Puno, Collao y Chucuito considerando escenarios de cambio climático y su impacto en la oferta del agua para riego. Aplicaron el modelo hidrológico SWAT, calibrado y validado con datos climáticos y caudales diarios (1986-2016). Los resultados indicaron una disminución de la precipitación entre -38.08 mm y -0.29 mm, con mayor reducción en la temporada de lluvias. La temperatura máxima aumentaría en 0.06 °C, mientras que la mínima disminuiría en -0.20 °C. En cuanto a los caudales, se prevé una reducción de hasta -41.2% en época de lluvias y de hasta -33.8% en estiaje, lo que afectaría la disponibilidad del agua para riego. Se concluyó que para el año 2050, el recurso hídrico disminuiría considerablemente, lo que resalta la necesidad de evaluar y gestionar eficientemente el agua superficial para riego, tal como se plantea en el presente estudio.

Morales (2022) analizó la relación entre la disponibilidad hídrica superficial y los sistemas de riego presurizado durante el periodo de estiaje en la localidad de Coema, distrito de San Francisco de Cayrán, Huánuco, en el año 2021. Se empleó un enfoque aplicado, con un alcance correlacional descriptivo y un diseño no experimental de tipo transversal. La disponibilidad hídrica fue evaluada mediante el análisis de precipitaciones y monitoreo en el área de estudio, complementado con aforos in situ en la quebrada Yacutoma. La población incluyó las microcuencas de la subcuenca del río Cayrán, seleccionándose como muestra la microcuenca del río Huancán. Los resultados mostraron que la disponibilidad hídrica en esta microcuenca, durante los meses de abril a septiembre, osciló entre 0.7980 y 0.0141 millones de metros cúbicos. En los meses críticos de julio y agosto, la demanda hídrica fue de 220033.09 m<sup>3</sup>, mientras que la oferta alcanzó 274952.06 m<sup>3</sup>, cubriendo las necesidades de riego. Se identificó una relación positiva entre la disponibilidad hídrica y los sistemas de riego presurizado, destacando que el riego por goteo presentó el mejor ajuste. Esto indica que la implementación de técnicas de ingeniería de riego podría optimizar la disponibilidad hídrica en microcuencas, lo que resulta relevante para estudios como el presente, enfocados en la gestión del agua superficial con fines de riego.

Leandro (2022) llevó a cabo una investigación en la cuenca del río Coata, en Puno, con el propósito de cuantificar la disponibilidad hídrica durante el periodo 1990-2013, utilizando el modelo hidrológico GR4J (Genie Rural à 4 paramètres Journalier). Para ello, se generaron Unidades Hidrológicas Ecológicas (UHE) en la plataforma Rs Minerve, representando cada unidad con el modelo GR4J. Además, se incorporó la presa Lagunillas mediante el objeto hidráulico RESERVOIR, incluyendo su canal de descarga (HQ) y las derivaciones (DIVERSION). Los datos meteorológicos, como temperatura máxima, mínima y precipitación, fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La calibración del modelo se realizó con el algoritmo SCE-UA (Shuffled Complex Evolution – University of Arizona), obteniendo valores de Nash de 0.809 y 0.818 en las etapas de calibración y validación, respectivamente, junto con un coeficiente de correlación superior a

0.91 en ambas fases. Los caudales simulados fueron mensualizados y su frecuencia determinada mediante la distribución de Weibull, obteniendo valores de 26.087 m<sup>3</sup>/s y 14.750 m<sup>3</sup>/s para persistencias del 75% y 95%, respectivamente, con un caudal medio mensual de 40.522 m<sup>3</sup>/s. Este estudio demuestra la eficacia del uso de modelos hidrológicos en la estimación de la disponibilidad hídrica, lo que resulta relevante para investigaciones como la presente, enfocadas en la evaluación del recurso hídrico superficial para fines de riego en cuencas específicas.

Mamani (2023) evaluó la disponibilidad hídrica futura en la microcuenca Huenque – llave bajo escenarios de cambio climático, con el objetivo de identificar estrategias de mejora hídrica. Utilizando el método de humedad del suelo y el software WEAP, analizó dos escenarios proyectados al 2030: RCP4.5 (clima estable) y RCP8.5 (aumento de gases de efecto invernadero).

Los resultados indicaron que la disponibilidad hídrica aumentaría en ambos escenarios, pasando de 420,211.66 MilMC en 2021 a 969,379.42 MilMC (RCP4.5) y 1,285,158.73 MilMC (RCP8.5). Se identificó a las zanjas de infiltración como la mejor estrategia de adaptación, optimizando la captación y retención de agua. El estudio concluyó que la disponibilidad hídrica futura será mayor, destacando la necesidad de implementar medidas de conservación del recurso. Estos hallazgos son relevantes para estudios centrados en la evaluación de la disponibilidad hídrica superficial para riego.

### **2.1.3. Nivel Regional**

Rujel (2022) desarrolló una investigación orientada a la elaboración de un documento práctico sobre el manejo y gestión de la subcuenca de la Quebrada Angostura-Cabuyal, en el distrito de Pampas de Hospital, con el propósito de contribuir al desarrollo sostenible de sus habitantes. Su estudio buscó facilitar la toma de decisiones que armonicen la relación entre la sociedad, la economía y el medio ambiente, permitiendo además la realización de futuras investigaciones y proyectos enfocados en la mejora social y económica de la población.

El objetivo principal del estudio fue la formulación de un Plan de Manejo y Gestión de la subcuenca para el período 2021-2022, con el fin de promover su desarrollo sostenible. La metodología empleada fue de tipo descriptivo, con un diseño no experimental, transeccional y descriptivo, analizando fenómenos, situaciones y características de la realidad en un momento específico. La población de estudio estuvo conformada por los 2,905 habitantes distribuidos en siete centros poblados, seleccionando una muestra no probabilística e intencionada.

El estudio identificó la existencia de un marco legal a nivel local, regional y nacional que respalda la elaboración del Plan de Manejo y Gestión. Asimismo, evidenció la disponibilidad de recursos hídricos, suelos y forestales suficientes para su implementación. En el plan se definieron siete proyectos estratégicos: tres relacionados con los recursos hídricos, dos con el uso del suelo y dos con la gestión forestal, todos orientados a garantizar el desarrollo sostenible de la subcuenca y mejorar la calidad de vida de su población.

## **2.2. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.2.1. Cuenca Hidrográfica**

Una cuenca hidrográfica es un área delimitada por la topografía que recoge y dirige el agua de lluvia hacia una red de drenaje, desembocando en un punto específico de un río, lago u otro cuerpo de agua. Representa una unidad fundamental en el estudio del ciclo hidrológico, ya que abarca toda la superficie terrestre que contribuye al flujo del agua en un determinado sistema fluvial. Lanza-Espino et al. (1999) (p. 92).

### **2.2.2. Disponibilidad hídrica**

La disponibilidad hídrica está influenciada por la evaporación atmosférica, las propiedades del suelo que determinan su capacidad de retención de agua y el tipo de cobertura vegetal. Mientras que la evaporación regula la pérdida de agua, el suelo y la vegetación juegan un papel clave en su almacenamiento y conservación. Jimenez & Hernandez (1990) (p. 3)

### **2.2.3. Demanda de agua para Riego**

Según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2008), en su documento titulado “Plan Nacional de Regadío” La demanda bruta de agua para un cultivo se determina al calcular el cociente entre las necesidades hídricas netas de los cultivos y el coeficiente de riego, el cual está influenciado por el tipo de sistema de riego empleado. Este coeficiente refleja la eficiencia del riego y las pérdidas de agua asociadas al método utilizado, lo que impacta directamente en la cantidad total de agua requerida para satisfacer las necesidades del cultivo. (p. 369)

### **2.2.4. Balance oferta – demanda de agua**

El objetivo es determinar la disponibilidad del recurso hídrico en una cuenca o subcuenca a través del análisis de la diferencia entre la oferta y la demanda de agua.

$$\textit{Disponibilidad del Recurso Hídrico} = \textit{Oferta de Agua} - \textit{Demanda de Agua}$$

La disponibilidad de agua se expresa a través del balance hídrico o del caudal presente en la zona de estudio, mientras que la demanda se refiere al volumen de agua requerido para distintas actividades dentro de cada microcuenca. Este análisis facilita la evaluación del equilibrio entre la oferta natural del recurso y su utilización, brindando datos fundamentales para una gestión eficiente y sostenible del agua. Davila (2010) (p. 62)

### **2.2.5. Riego**

Según Fuentes (2003), en su libro técnicas de riego, el autor define el riego como un método en el que el agua es conducida por gravedad a lo largo del terreno, aprovechando la superficie del suelo agrícola como un canal natural para su distribución. Este sistema facilita una infiltración de manera progresiva del agua, garantizando el suministro hídrico a los cultivos de manera eficiente y reduciendo la necesidad de infraestructura artificial.

### 2.2.6. Evapotranspiración del cultivo (Etc)

La transpiración se puede describir como el proceso mediante el cual un cultivo pierde agua en forma de vapor a lo largo de un período determinado. Esta pérdida total de agua ocurre como resultado de la combinación de dos procesos fundamentales: la evaporación, que se da en la superficie del suelo y las hojas, y la transpiración, que es el proceso por el cual las plantas liberan vapor de agua a través de sus estomas. De Santa-Olalla (1994) (p. 184).

Según Valverde (1985), la evapotranspiración de un cultivo (ET cultivo), también denominada evaporación real, se determina a partir de dos factores clave: la evapotranspiración de referencia o potencial (ET<sub>o</sub>), que puede calcularse mediante distintos métodos, y el coeficiente de cultivo (Kc), el cual varía según la fase de desarrollo de la planta.

$$ET \text{ (cultivo)} = ET_o \times Kc$$

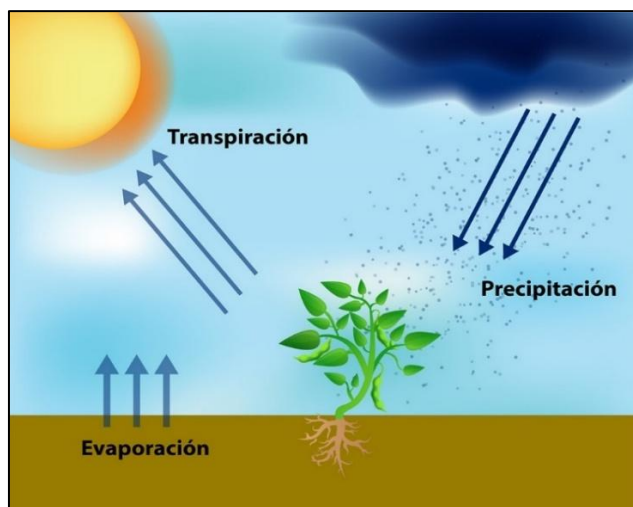
***Donde:***

ET<sub>o</sub>: Evapotranspiración de referencia o potencial, expresada en milímetros.

Kc: Coeficiente de cultivo, que refleja las necesidades hídricas específicas del cultivo en cada etapa de crecimiento.

En la **Figura 1**. Representa el proceso de evapotranspiración, que es el conjunto de pérdidas de agua hacia la atmósfera debido a la evaporación y la transpiración de las plantas.

**Figura 1.** Proceso de la Evapotranspiración.



*Fuente: Arable (2024). Medición de la evapotranspiración y el coeficiente de cultivo.*

#### **2.2.7. Coeficiente de Cultivo ( $K_c$ )**

Es un factor influenciado por las características anatómicas, morfológicas y fisiológicas de la planta. Su magnitud varía en función de la etapa de crecimiento y las condiciones climáticas. Está determinado por la capacidad de la planta para absorber agua del suelo, de acuerdo con su estado de desarrollo vegetativo. Secretaría de Educación Pública (1985).

#### **2.2.8. Precipitación efectiva ( $P_e$ )**

La precipitación efectiva está determinada por la intensidad de la lluvia y las características del suelo, las cuales influyen en la velocidad de infiltración. Su estimación se basa en considerar una fracción de la precipitación total, cuyo valor varía en función de diversos factores, como el tipo de suelo, su capacidad de absorción, la pendiente del terreno y la intensidad con la que se presenta la lluvia. Estos elementos en conjunto condicionan la cantidad de agua que logra infiltrarse en el suelo y la que escurre superficialmente. Barranco et al. (2004) (p. 351)

#### **2.2.9. Propiedades físicas del Suelo**

Las propiedades físicas del suelo pueden modificarse debido a la actividad humana o animal, ya sea a través de la labranza o por el pisoteo del ganado.

Estas características influyen en el movimiento del aire, la transferencia de calor, la circulación del agua y el transporte de sustancias solubles dentro del suelo. Arias (2001), (p. 62).

#### **2.2.10. Modelo Hidrológico SWAT**

El modelo hidrológico de tiempo continuo llamado SWAT (“Soil and Water Assessment Tools”) es de dominio público, ha sido desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del USDA (USDA-ARS) y Texas A&M Agrilife Research, por parte del sistema universitario Texas A&M; el objetivo de SWAT fue predecir el impacto en la gestión del rendimiento de agua, sedimentos y productos químicos agrícolas en grandes cuencas, para cumplir el objetivo se requiere a) calibración, b) utiliza insumos fácilmente disponibles para grandes áreas y c) computacionalmente eficiente para operar grandes cuencas (Arnold, 1998); el ciclo hidrológico del modelo SWAT viene representado por la ecuación de balance:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - ET_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Las variables de la ecuación representan:  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo,  $SW_o$  es el contenido inicial de agua en el suelo,  $t$  es el tiempo en días,  $R_{day}$  representa la precipitación en el día  $i$ ,  $Q_{surf}$  representa la escorrentía en la superficie del día  $i$ ,  $ET_a$  es la evapotranspiración en el día  $i$ ,  $W_{seep}$  es el agua que ingresa a la zona vadosa desde el perfil del suelo y  $Q_{gw}$  representa el caudal de retorno en el día  $i$ .

#### **2.2.11. Producto Pisco**

“Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (PISCO) es un nuevo conjunto de datos pluviométricos reticulados disponibles para el Perú, el cual ha sido desarrollado para el período 1981 al 2016 con una resolución espacial de 0.1°” (Aybar et al., 2019).

### III. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. UBICACIÓN

##### 3.1.1. Ubicación geopolítica

*Tabla 1. Ubicación de la Geopolítica de la Subcuenca.*

| País | Región | Provincia | Distrito           | Localidad/ Centro Poblado |
|------|--------|-----------|--------------------|---------------------------|
| Perú | Tumbes | Tumbes    | Pampas de Hospital | Cabuyal                   |

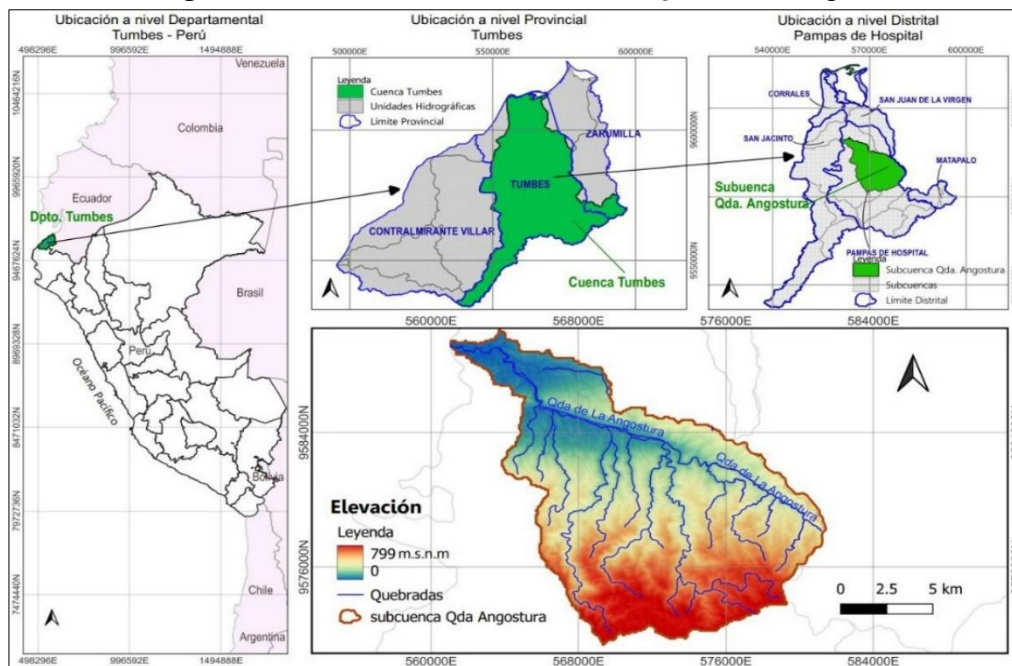
##### 3.1.2. Ubicación geodésica

Su ubicación geodésica se presenta en la **Tabla 2**, mientras que su representación gráfica se ilustra en la **Figura 2**.

*Tabla 2. Ubicación Geodésica de la Subcuenca.*

| Coordenadas UTM |          | Datum  | Zona | Altitud Media   |
|-----------------|----------|--------|------|-----------------|
| Norte           | Este     |        |      |                 |
| 9580253,0       | 571411,0 | WGS 84 | 17S  | 450.33 m.s.n.m. |

*Figura 2. Ubicación de la Subcuenca Quebrada Angostura.*



### 3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

Durante el desarrollo de la presente investigación, se utilizaron los siguientes materiales y equipos descritos en la **Tabla 3** y la **Tabla 4** correspondientemente.

*Tabla 3. Materiales utilizados para realización de la Investigación.*

| Materiales                           | Descripción                                                                                       |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cuaderno de apuntes/Libreta de Campo | Para elaboración de metodología y notas de informaciones obtenidas por web, libros y en el campo. |

*Tabla 4. Equipos utilizados para la realización de la Investigación.*

| Equipo               | Detalle                                                                                                                               |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Laptop Gammer Legion | Procesador Intel Core i7 de 11va generación, memoria RAM 16GB +16GB, tarjeta gráfica NVIDIA Geo Force RTX 3070 8GB y Disco SSD 1Tera. |
| Disco duro portátil  | Dispositivo de almacenamiento externo de 1TB, utilizados para respaldar los datos procesados y los resultados del modelado.           |
| GPS Portátil         | Para verificar, ubicar y guardar puntos de control y relevantes de la cuenca.                                                         |

### 3.3. SOFTWARE

Para el análisis, procesamiento y modelamiento de la información recopilada se utilizaron los siguientes softwares detallados en la siguiente **Tabla 5**.

*Tabla 5. Softwares utilizados para la realización de la Investigación.*

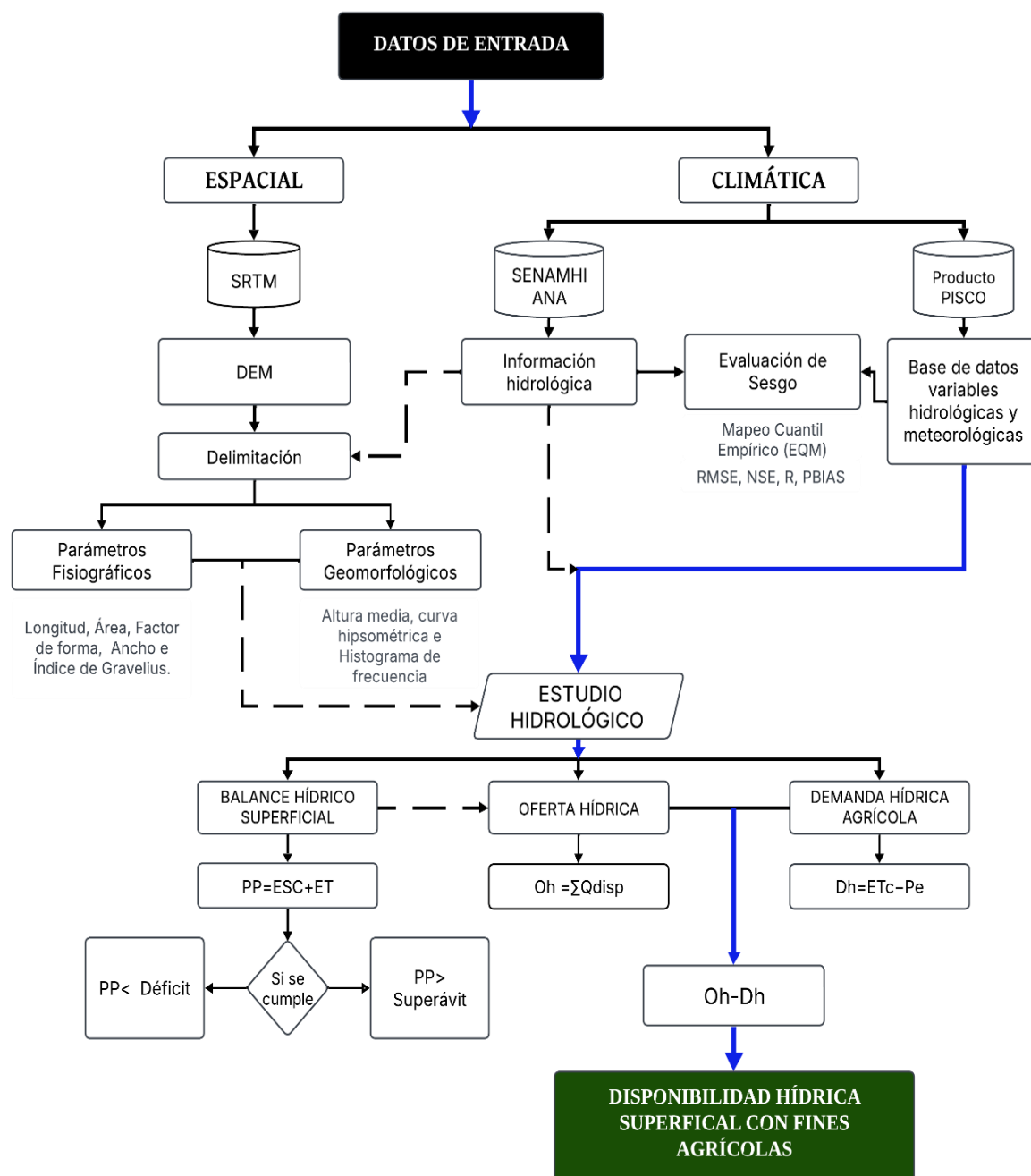
| Software                               | Descripción                                                  |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Lenguaje de Programación R x 64 v4.1.1 | Se utilizará para la organización y estructuración de datos. |

|                                                      |                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| R Studio                                             | Para evaluar tendencias, y crear visualizaciones para el análisis de las variables, mediante un script.                                                                       |
| Quantum GIS x 64 v3.16.13                            | Para la delimitación de la cuenca y elaboración temática de los mapas para el desarrollo de la investigación.                                                                 |
| SWAT (Soil and Water Assessment Tool)                | Empleado para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca, estimar la disponibilidad hídrica superficial y analizar los procesos de escorrentía y rendimiento hídrico. |
| Arc SWAT o QSWAT+                                    | Interfaz del modelo SWAT para la integración con los datos espaciales y la ejecución de las simulaciones.                                                                     |
| Grass (Geographic Resources Analysis Support System) | Herramientas de geoprocso para datos vectoriales.                                                                                                                             |
| MS Office                                            | Para la edición, almacenamiento y transmisión de información de redacción.                                                                                                    |
| Sistema operativo Windows 10                         | Para la administración de archivos y la ejecución de aplicaciones.                                                                                                            |
| Google Earth Pro                                     | Para la visualización y validación espacial de la subcuenca, identificación de coberturas vegetales y análisis de cambios en el uso del suelo.                                |
| Microsoft Word                                       | Para la redacción del presente documento de investigación bajo las normal APA.                                                                                                |
| Microsoft Excel                                      | Utilizado para la organización, validación, limpieza y análisis preliminar de los datos metereológicos e hidrológicos.                                                        |

### 3.4. PROCEDIMIENTO METODOLOGICO

La metodología de la investigación se esquematiza en la **Figura 3**, detallando los procesos principales para la evaluación de la disponibilidad hídrica superficial para fines de riego en la subcuenca Quebrada Angostura.

**Figura 3.** *Flujograma de Metodología para Evaluar la Disponibilidad Superficial con fines Agrícolas.*



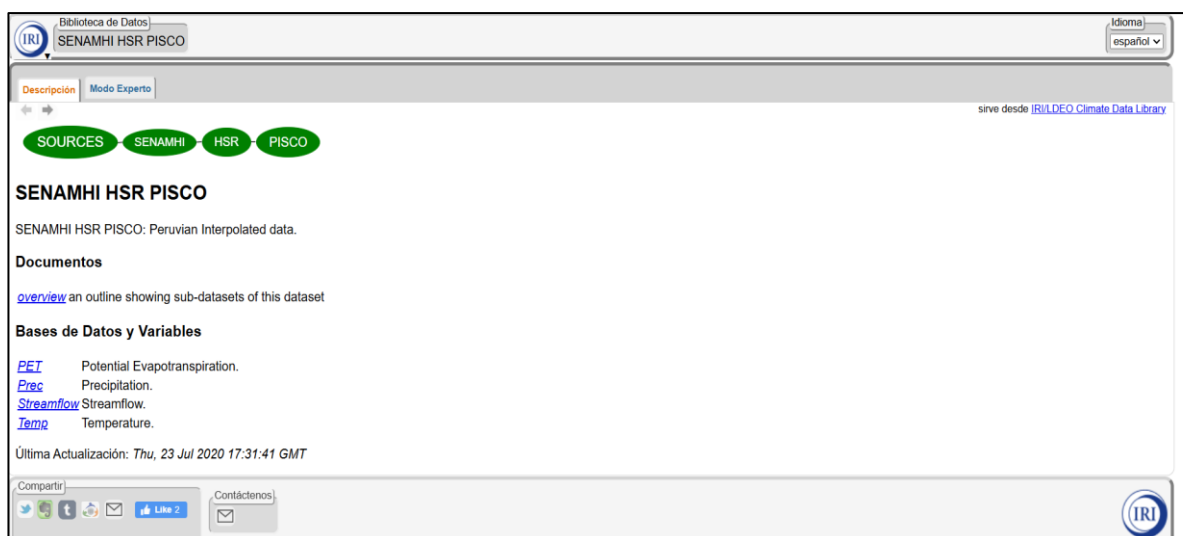
### 3.4.1. Recolección de información

#### a) Datos Climáticos

La información climatológica se obtuvo de la base de datos del IRI (Instituto Internacional de Investigación sobre el Clima y la Sociedad). Esta información está consolidada en formato ráster en el Producto Pisco, cuya descarga gratuita es a través del siguiente enlace <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/index.html?Set-Language=es>.

Se descendieron series diarias de precipitación, temperatura máxima y mínima. Los datos fueron revisados para identificar valores faltantes, inconsistencias, rupturas y comportamientos atípicos. En algunos casos, se aplicaron métodos de interpolación o correlación con estaciones cercanas para completar la información.

**Figura 4.** Plataforma de descarga de la Data Climática PISCO del SENAMHI.

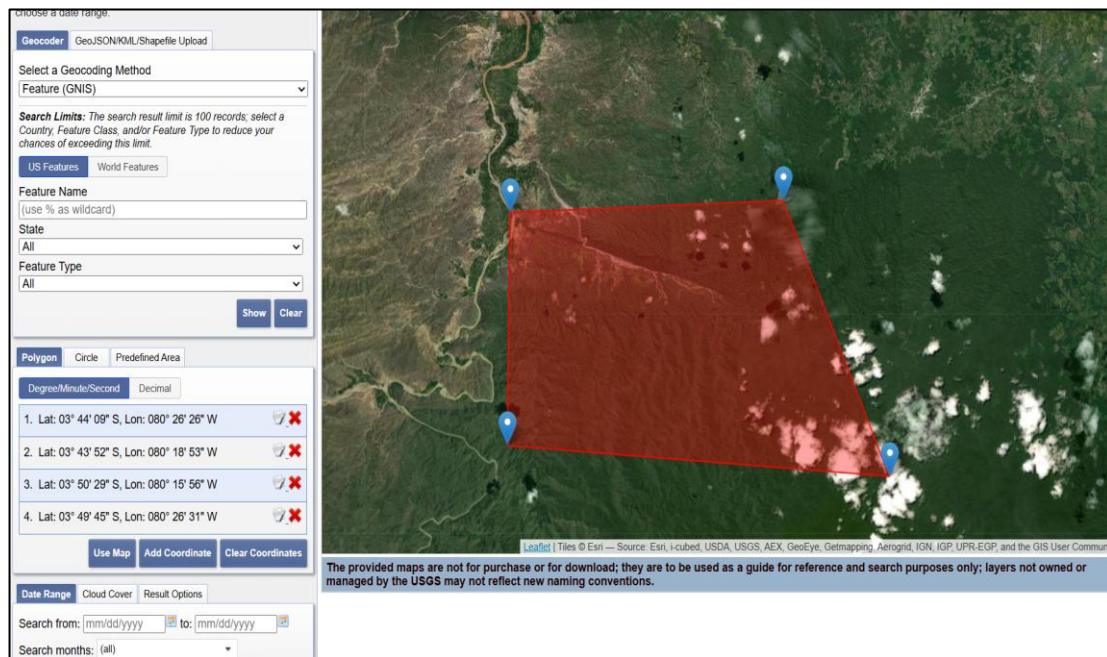


#### b) Modelo Digital de Elevación

Se empleó un MDE con resolución de 30 m (SRTM), descargado de la Web <https://earthexplorer.usgs.gov/>, requerido para delimitar la cuenca y generar parámetros morfométricos. Este DEM ofrece una representación tridimensional detallada de la superficie terrestre a nivel nacional, cubriendo todo Perú. Sin embargo, para el análisis específico de esta investigación, se descargó únicamente el DEM correspondiente al área de estudio.

<https://www.geogpsperu.com/2018/08/descargar-imagenes-aster-gdem-aster.html>.

**Figura 5.** Descarga de DEM en la web del USGS.



### c) Tipo de suelo

Durante la implementación del modelo SWAT se utilizó como fuente de datos el mapa de tipo de suelo de la FAO, disponible en <https://swat.tamu.edu/data/>. El mismo que se elaboró utilizando como base la serie de mapas topográficos de la Sociedad Geográfica Americana de Nueva York. Esta información global sobre propiedades físicas y suelos se proporciona a escala 1:5 millones, con proyección geográfica (latitud y longitud) interceptada con una plantilla que incluye formas del terreno relacionadas con el agua (costas, lagos, glaciares y ríos de doble ruta).

### d) Cobertura de Suelo

Los datos de cobertura del suelo corresponden a la base de datos de caracterización de la cobertura terrestre global (GLCC) del USGS, la misma que se descarga en <https://swat.tamu.edu/data/>. Esta fuente proporciona mapas de cobertura terrestre a escala global, elaborados mediante la interpretación de imágenes satelitales, incluyendo propiedades físicas del suelo, textura, densidad aparente y capacidad de infiltración.

**Figura 6. Data de descarga de tipo y uso de Suelo.**

The screenshot shows the SWAT website interface. At the top, there's a navigation bar with links like 'Noticias', 'Software', 'Documentos', 'Datos', 'Talleres', 'Conferencias', 'Publicaciones', 'Apoyo', and 'Empleos'. Below the navigation bar, a note states: 'Nota: recomendamos utilizar los mapas de uso del suelo y de suelos que aparecen a continuación únicamente cuando no haya ninguna otra opción mejor disponible.' The main content is divided into two columns. The left column is titled 'Mapas de uso del suelo' and describes the availability of soil use maps in ZIP format, mentioning resolutions of 400m and 800m. It lists download links for various continents: África (original/remuestreada), Australia/Pacífico (original/remuestreada), Europa/Asia (original/remuestreada), Norteamérica (original/remuestreada), and Sudamérica (original/remuestreada). The right column is titled 'Mapas de suelos' and describes soil maps in ZIP format, listing download links for África, Australia/Pacífico, Europa/Asia, América del norte, and Sudamérica. Below these columns, there's a section for 'Cuadrículas de datos mundiales' (Global Data Grids) mentioning a QGIS project and a ZIP file for selecting DEM, soil use maps, and soil maps. A small 'up' arrow icon is visible in the bottom right corner of the content area.

## e) Información Vectorial

Este tipo de información corresponde a ríos, quebradas, límites políticos, etc. en formato shapefile, cuya descarga se realiza a través del siguiente link <https://www.geogpsperu.com/> siendo de utilidad en la elaboración de mapas temáticos.

**Figura 7. Plataforma de descarga de Información Vectorial.**

The screenshot shows the geogpsperu.com website. The browser's address bar displays 'geogpsperu.com'. The website has a navigation bar with links like 'Popular Trends' and 'geogpsperu'. The main content area is divided into two columns. The left column shows two maps: the top one is a satellite image with a red boundary, and the bottom one is a map with orange and yellow areas. The right column is titled 'LINEA BASE AMBIENTAL - DESCARGA' and lists various vector data categories for download, including: ASTER DEM, ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS, BATIMETRÍA, CAPACIDAD DE USO MAYOR DE TIERRAS, CARTAS NACIONALES, CENTROS POBLADOS, CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA, COBERTURA VEGETAL, COMUNIDADES CAMPESINAS, COMUNIDADES NATIVAS, CUENCAS HIDROGRÁFICAS, CUENCAS HIDROGRÁFICAS MENORES, ESTABLECIMIENTOS DE SALUD, ESTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA, FISIOGRAFÍA, GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA, LÍMITE DEPARTAMENTAL, LÍMITE PROVINCIAL, LÍMITE DISTRITAL, INUNDACIÓN - TSUNAMI, and SUELOS.

#### f) Data predial

La información corresponde a los predios agrícolas de la zona, de la cual se obtendrá el valor de la demanda del recurso hídrico con fines de riego, para ello se ha utilizado fuente de información catastral de Midagri y Cofopri, así como visitas de campo para poder delimitar las áreas agrícolas.

A continuación, se muestra la **Tabla 6**, en la que se realiza un resumen de la información base necesaria para proceder con el modelamiento hidrológico.

#### 3.4.2. Construcción del modelo SWAT

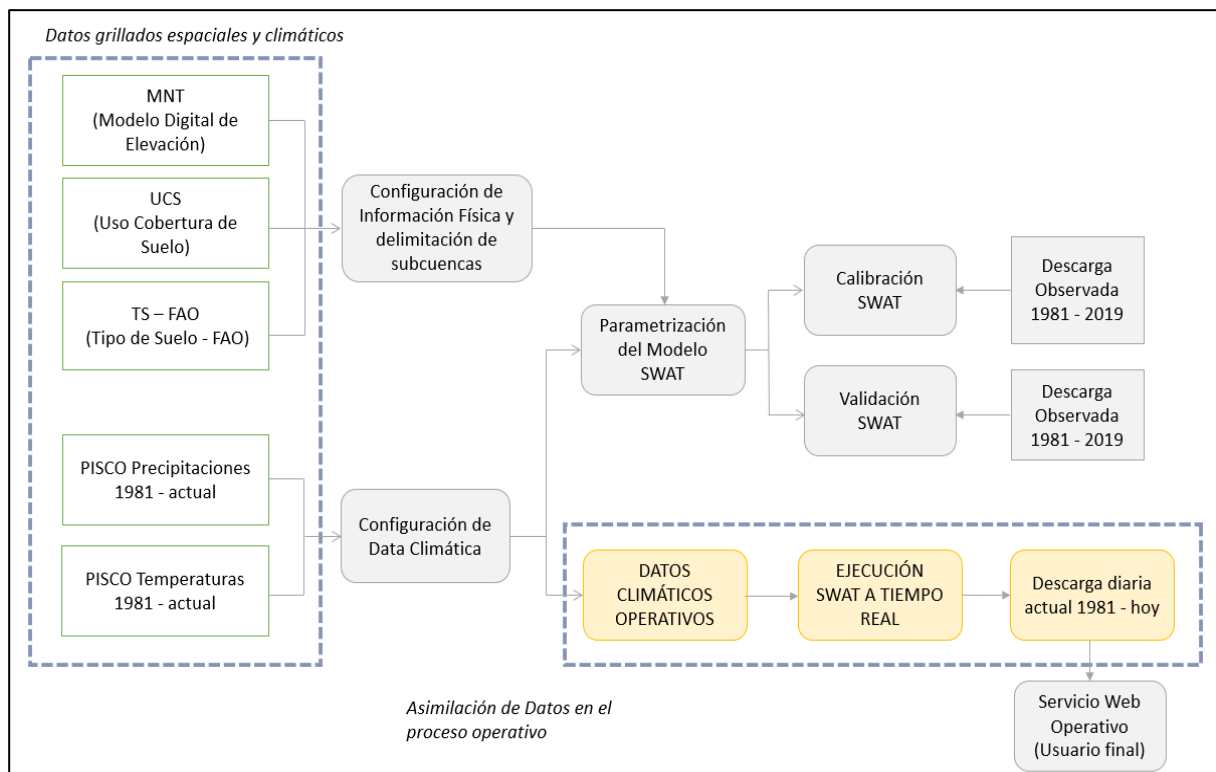
**Tabla 6.** Información base necesaria para la Investigación.

| Información            | Resolución de Pixel | Descripción Fuente                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Topográfica            | 90 m                | Modelo digital de terreno (MNT) de la base HydroSHEDS (Lehner et al., 2013) ( <a href="https://www.hydrosheds.org/">https://www.hydrosheds.org/</a> )                                                                                                                                                     |
| Uso/Cobertura de suelo | 300 m               | Representación de la clasificación de uso/cobertura de suelo del año 2015, ESA-CCI-LAND COVER (CCI-LC PUCV2, 2017) ( <a href="https://www.esa-landcover-cci.org/">https://www.esa-landcover-cci.org/</a> )                                                                                                |
| Tipo de suelo          | 1000 m              | Digital Soil Map of the World (DSMW) – FAO – SOIL ( <a href="https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/">https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/</a> ) |
| Precipitación          | ~10 km              | Datos grillados de precipitación del Perú (Aybar et al., 2019) ( <a href="https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/SENAMHI/.HSR/.PISCO/">https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/SENAMHI/.HSR/.PISCO/</a> )                                                                                                |
| Temperatura            | ~10 km              | Datos grillados de precipitación del Perú (Huerta et al., 2018) ( <a href="https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/SENAMHI/.HSR/.PISCO/">https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/SENAMHI/.HSR/.PISCO/</a> )                                                                                               |
| Información Vectorial  | Formato Shp         | <a href="https://www.geogpsperu.com/">https://www.geogpsperu.com/</a> Descarga de Información Vectorial, Imágenes.                                                                                                                                                                                        |

### 3.4.3. Metodología del Modelo SWAT

La representación metodológica empleada en este estudio se muestra en la **Figura 8**. Primeramente, se recopiló el modelo digital de elevación, cobertura de suelo y tipo de suelo, del mismo modo los datos climáticos PISCO (precipitación y temperatura). Seguidamente se ha construido y realizado la modelación hidrológica tal como se muestra en el siguiente flujograma.

**Figura 8.** Metodología del Modelo Hidrológico Swat.



#### a) Delimitación de la cuenca

La delimitación de la cuenca es un proceso fundamental para estructurar el modelo hidrológico, ya que define los límites espaciales del área que drena hacia la quebrada Angostura. Para lo cual se ha definido el punto de aforo en las coordenadas 565693.946834E, 9586025.379984N.

Se ha considerado en la investigación el término “Subcuenca” para el área de estudio; a partir de la cual se delimitaron en su interior en 11 subcuencas, tomando en consideración una acumulación de flujo de 7.919 sq.km.

**Figura 9. Proceso de la Delimitación de las Subcuencas.**

Delineate Watershed

Select DEM

NTO\_1/MODELAMIENTO\_ANGOSTURA/Angostura1/Watershed/Rasters/DEM/MDE.tif

Delineate watershed Use existing watershed DEM properties TauDEM output

☐ Burn in existing stream network

Channel threshold 836 Cells 0.791 Area sq. km Create streams

Stream threshold 8370 Cells 7.919 Area sq. km

☒ Use an inlets/outlets shapefile

O\_1/MODELAMIENTO\_ANGOSTURA/Angostura1/Watershed/Shapes/drawoutlets.shp

Draw inlets/outlets Select inlets/outlets

Snap threshold (metres) 300 Review snapped

☐ Make grid 1 Grid size Create watershed

Create landscape Merge subbasins Add Lakes

Add lakes shapefile

☐ Don't display lake messages

8 Number of processes Show Taudem output

OK Cancel

REF: 34 SEPTIEMBRE 0.0298 2015 2.7 5.07 13

### **b) Unidades de respuesta hidrológica - HRU**

La definición de las HRU es un paso crítico en el funcionamiento de SWAT, ya que estas representan combinaciones únicas de uso de suelo, tipo de suelo y rango de pendiente dentro de cada subcuenca.

Al realizar la delimitación de la cuenca se ingresa como insumos el mapa de uso y cobertura del suelo, el mapa de tipos de suelo y el Modelo Digital de Elevación a fin de generar las HRU. Para evitar la creación de unidades de área muy reducida y optimizar la simulación, se aplicaron umbrales de definición de URH entre 5 % y 20 %.

**Figura 10.** Resultados del procesamiento de las HRU.

La delimitación de estas unidades permitió representar adecuadamente la variabilidad espacial de la cuenca y mejorar la simulación de la disponibilidad hídrica superficial para fines de riego.

### c) Ingreso de data climática

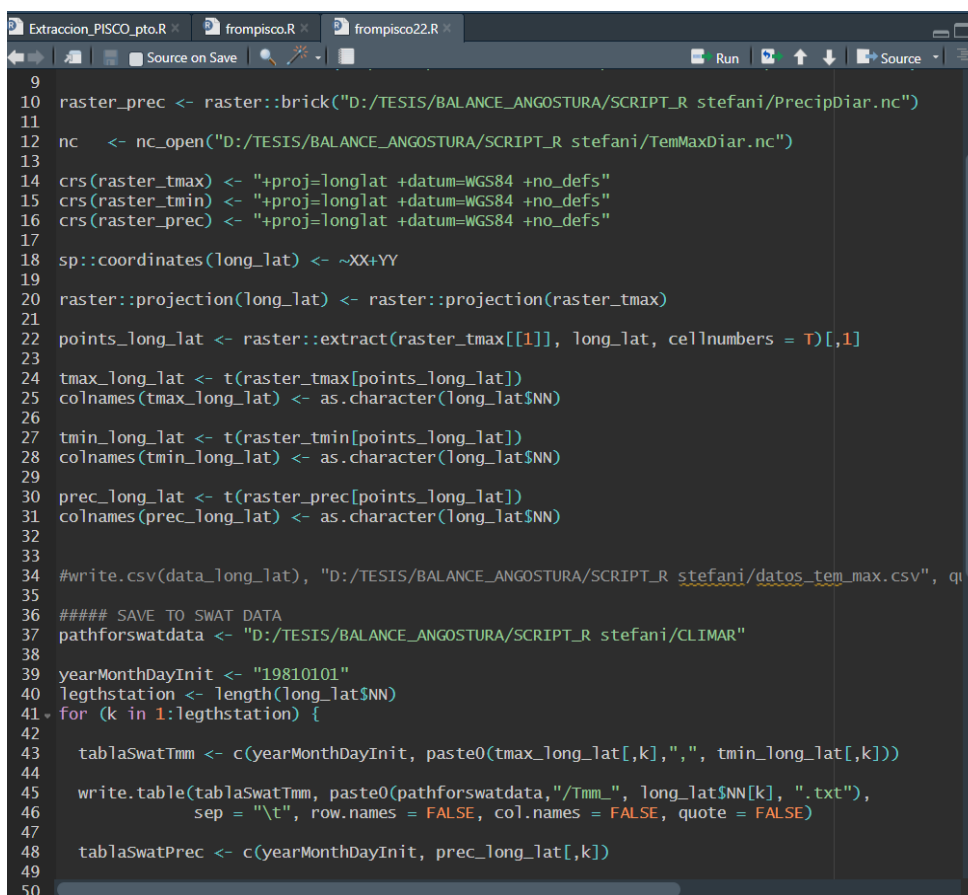
Para la simulación hidrológica se incorporó información climática, debido a que las variables meteorológicas controlan los procesos de precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía dentro de la cuenca. Por lo cual se han generado 6 estaciones virtuales distribuidas en el área de estudio.

**Tabla 7.** Estaciones Virtuales - Subcuenca Angostura.

| Estaciones Virtuales | X       | Y      |
|----------------------|---------|--------|
| EV-1                 | -80.443 | -3.757 |
| EV-2                 | -80.431 | -3.847 |
| EV-3                 | -80.35  | -3.88  |
| EV-4                 | -80.338 | -3.751 |
| EV-5                 | -80.249 | -3.752 |
| EV-6                 | -80.248 | -3.843 |

La extracción de dicha información (temperatura y precipitación) se ha realizado mediante un Script para leer puntos de interés (estaciones virtuales) mediante el software R.

**Figura 11.** Registro de la Data Pisco en RStudio.



```

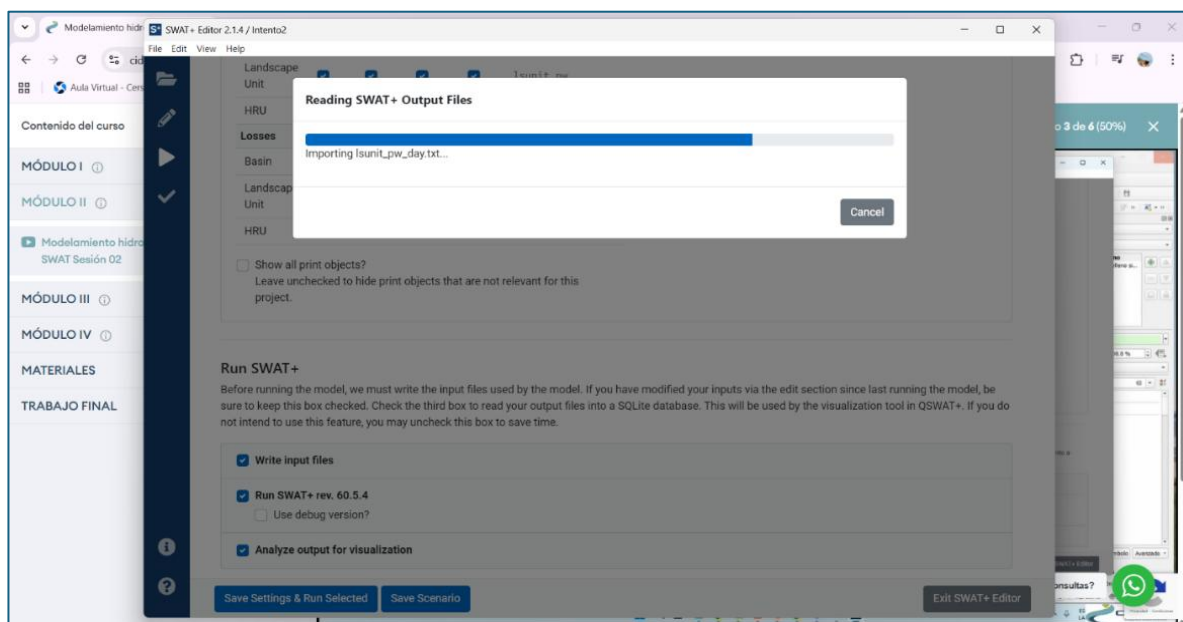
9
10 raster_prec <- raster::brick("D:/TESIS/BALANCE_ANGOSTURA/SCRIPT_R stefani/PrecipDiar.nc")
11
12 nc <- nc_open("D:/TESIS/BALANCE_ANGOSTURA/SCRIPT_R stefani/TemMaxDiar.nc")
13
14 crs(raster_tmax) <- "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs"
15 crs(raster_tmin) <- "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs"
16 crs(raster_prec) <- "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs"
17
18 sp::coordinates(long_lat) <- ~XX+YY
19
20 raster::projection(long_lat) <- raster::projection(raster_tmax)
21
22 points_long_lat <- raster::extract(raster_tmax[[1]], long_lat, cellnumbers = T)[,1]
23
24 tmax_long_lat <- t(raster_tmax[points_long_lat])
25 colnames(tmax_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)
26
27 tmin_long_lat <- t(raster_tmin[points_long_lat])
28 colnames(tmin_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)
29
30 prec_long_lat <- t(raster_prec[points_long_lat])
31 colnames(prec_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)
32
33
34 #write.csv(data_long_lat), "D:/TESIS/BALANCE_ANGOSTURA/SCRIPT_R stefani/datos_tem_max.csv", qt
35
36 ##### SAVE TO SWAT DATA
37 pathforswatdata <- "D:/TESIS/BALANCE_ANGOSTURA/SCRIPT_R stefani/CLIMAR"
38
39 yearMonthDayInit <- "19810101"
40 legthstation <- length(long_lat$NN)
41 for (k in 1:legthstation) {
42
43   tablaSwatTmm <- c(yearMonthDayInit, paste0(tmax_long_lat[,k],",", tmin_long_lat[,k]))
44
45   write.table(tablaSwatTmm, paste0(pathforswatdata,"/Tmm_", long_lat$NN[k], ".txt"),
46             sep = "\t", row.names = FALSE, col.names = FALSE, quote = FALSE)
47
48   tablaSwatPrec <- c(yearMonthDayInit, prec_long_lat[,k])
49
50

```

Posteriormente, la información climática procesada fue incorporada al modelo SWAT a través de la interfaz QSWAT, lo cual permitió disponer de los insumos meteorológicos necesarios para la simulación de los procesos hidrológicos del área de estudio.

Para la estimación de la evapotranspiración potencial se empleó el método de Hargreaves, debido a la disponibilidad de información climática requerida por el modelo. Asimismo, la escorrentía superficial fue simulada mediante el método de almacenamiento variable incorporado en el modelo SWAT. Una vez ingresada y procesada la información necesaria, se procedió a ejecutar la simulación hidrológica de la cuenca mediante la corrida del modelo.

**Figura 12.** Lectura de datos climáticos PISCO en SWAT.



#### **3.4.4. Calibración y validación del Modelo Hidrológico**

La calibración y validación del modelo hidrológico implementado en SWAT se realizó bajo una condición limitante propia de la cuenca de estudio: la inexistencia de una estación hidrométrica con registros históricos continuos que permita efectuar un proceso clásico de calibración estadística basado en series temporales observadas.

Ante esta restricción, se adoptó una estrategia alternativa de validación puntual, sustentada en la ejecución de aforos de campo realizados durante los meses de marzo y abril, periodo representativo de la temporada húmeda y de mayor respuesta hidrológica de la cuenca. Estos aforos permitieron obtener valores reales de caudal en secciones estratégicas del cauce principal, los cuales fueron utilizados como referencia para contrastar los caudales simulados por el modelo SWAT para las mismas fechas.

#### **3.4.5. Cálculo de la demanda agrícola**

##### **a. Cédula de cultivos y extensión del área agrícola**

Para evaluar la demanda hídrica agrícola total se debe contar con datos de área cultivada, tipo de cultivos sembrados y sus requerimientos hídricos. De la Junta de Usuarios del sector hidráulico Tumbes se obtuvo información geoespacial de cultivos (2011) y datos estadísticos de los cultivos sembrados. Dado que la

información geoespacial estaba desactualizada se realizó un trabajo de campo con el fin de completar y corroborar la información mediante vuelos de dron.

La cédula de cultivos ha sido elaborada de acuerdo con la información proporcionada por la Junta de usuarios y la obtenida en campo. En el siguiente cuadro se presenta la cédula de cultivos existente.

**Tabla 8.** Data de Cultivos Agrícolas del Área de Estudio.

| CULTIVOS    | AREAS (HAS) | MESES |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------|-------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|             |             | ENE   | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SET | OCT | NOV | DIC |
| CACAO       | 7           |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| LIMON       | 1215        |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| MAIZ CHOCLO | 43          |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| MANGO       | 3           |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| PLATANO     | 3668        |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

Fuente: Manual FAO 56.

#### b. Evapotranspiración potencial (ETP)

Para la determinación de la evapotranspiración de referencia se ha utilizado el Método de Hargreaves Simplificado es una ecuación empírica que permite estimar la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) usando solo temperaturas y radiación extraterrestre.

Es muy usado en zonas donde no hay datos de radiación solar, humedad ni viento, como la mayoría de las estaciones agroclimáticas básicas.

La evapotranspiración potencial se determinó por el método de Hargreaves, en base a la temperatura mínima, máxima y media. La fórmula para aplicar es la siguiente:

$$Eto = 0,0023 * R_a (T_m + 17,78) (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

Donde:

$Eto$  = Evapotranspiración (mm/mes)

$T_{max}$  = Temperatura Maxima

$T_m$  = Temperatura Media Mensual °C

$T_{max}$  = Temperatura Maxima promedio mensal °C

$T_{min}$  = Temperatura Mínima promedio mensal °C

$R_a$  = Radiación extraterrestre (mm/dia)

### c. Coeficiente de cultivo (Kc)

Los coeficientes de cultivo fueron obtenidos de otros estudios de referencia y del Manual N.º 56 de la FAO, con la cual se ha determinado el Kc ponderado. La duración de las etapas de desarrollo dependerá de la variedad del cultivo y las condiciones climáticas de la zona. La profundidad efectiva de raíces varía progresivamente durante el periodo vegetativo, en función de la humedad aprovechable. El agotamiento admisible, representa el punto crítico de nivel de humedad del suelo que inciden directamente en la evapotranspiración y el desarrollo de los cultivos. En el siguiente cuadro se muestra el Kc por cultivo.

**Tabla 9.** Coeficiente de cultivos predominantes de la Subcuenca Angostura.

| CULTIVO BASE | MESES |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|              | ENE   | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SET  | OCT  | NOV  | DIC  |
| Cacao        | 0.95  | 0.95 | 0.95 | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.95 |
| Limón        | 0.7   | 0.7  | 0.7  | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.7  | 0.7  | 0.7  |
| Maíz Choclo  |       | 0.8  | 0.8  | 1.2  | 0.6  | 0.6  |      |      |      |      |      |      |
| Mango        | 0.75  |      |      |      |      |      |      |      | 0.65 | 0.65 | 0.8  | 0.8  |
| Plátano      |       |      | 0.9  | 0.9  | 0.8  | 0.8  | 0.8  | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |      |

Fuente: Elaboración Propia

### d. Evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>)

Para referirse a la cantidad de agua que efectivamente es utilizada por la evapotranspiración se debe utilizar el concepto de evapotranspiración actual o efectiva, o bien, más adecuadamente, el de evapotranspiración real. Para determinarla se debe corregir la ETP con un factor Kc dependiente del nivel de humedad del suelo y de las características de cada cultivo.

$$ET_r = ET_o \times K_c$$

Donde:

$ET_r$  = Evapotranspiración del Cultivo

$ET_o$  = Evapotranspiración de Referencia

$K_c$  = Coeficiente de Cultivo

### e. Eficiencia de riego

La eficiencia de riego se considera como resultado del efecto de tres modalidades de eficiencia parcial: conducción, distribución y aplicación. Las

dos primeras se deben a las características y condiciones del sistema de conducción y distribución o entrega del agua y la última, depende de la forma de aplicación del agua en la parcela de riego. Por lo tanto, la eficiencia de riego ( $E_r$ ) se determina como el producto de la eficiencia de conducción ( $E_c$ ), la eficiencia de distribución ( $E_d$ ) y la eficiencia de aplicación ( $E_a$ ).

$$E_r = \frac{A_u}{A_a} \times 100$$

Donde:

$E_r$  = Eficiencia de Riego

$A_u$  = Agua útil aprovechada por el cultivo

$A_a$  = Agua aplicada al Sistema

Considerando:

*Ef. Riego (gravedad) = 0.40*  
*Ef. Riego (aspersión) = 0.70*  
*Ef. Riego (goteo) = 0.90*

Fuente del MEF, 2023

#### f. Precipitación efectiva (ecuación FAO/AGLW)

El método USDA fue desarrollado a partir de balances hídricos, relacionándose los ingresos de agua por precipitación con las salidas por escurrimiento superficial y percolación, así como el agua retenida en la zona radicular para varios cultivos.

$$\begin{aligned} P_e &= P \left( 125 - \frac{0.2 P_t}{125} \right) & \text{para } P < 250\text{mm} \\ P_e &= 125 + 0.1 P & \text{para } P > 250\text{mm} \end{aligned}$$

Donde:

$P_e$  = Precipitación Efectiva (mm)

$P$  = Precipitación total mensual (mm)

#### **g. Cálculo de la demanda de agua**

Cuando nos referimos al consumo o demanda de agua de los cultivos, uno de los términos usados es el “uso consuntivo del agua de los cultivos”. Su definición refiere a la cantidad total de agua que necesita un determinado cultivo para realizar la evapotranspiración y la construcción celular, desde la plantación hasta la cosecha en un régimen climático específico. Para este fin, se ha calculado la demanda hídrica, utilizando los datos previamente calculados como: evapotranspiración potencial (ETP), coeficiente del cultivo (Kc), precipitación efectiva (PE) y la eficiencia de riego (Er).

#### **3.4.6. Balance Hídrico**

La disponibilidad de agua se expresa a través del balance hídrico o del caudal presente en la zona de estudio, mientras que la demanda se refiere al volumen de agua requerido para la actividad agrícola.

Disponibilidad del Recurso Hídrico = Oferta de Agua - Demanda de Agua

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **4.1. RESULTADOS**

El modelo se implementó en SWAT utilizando la interfaz QSWAT. Por lo tanto, esta sección describe los resultados obtenidos en el proceso.

#### **4.1.1. Delimitación de la cuenca y subcuencas**

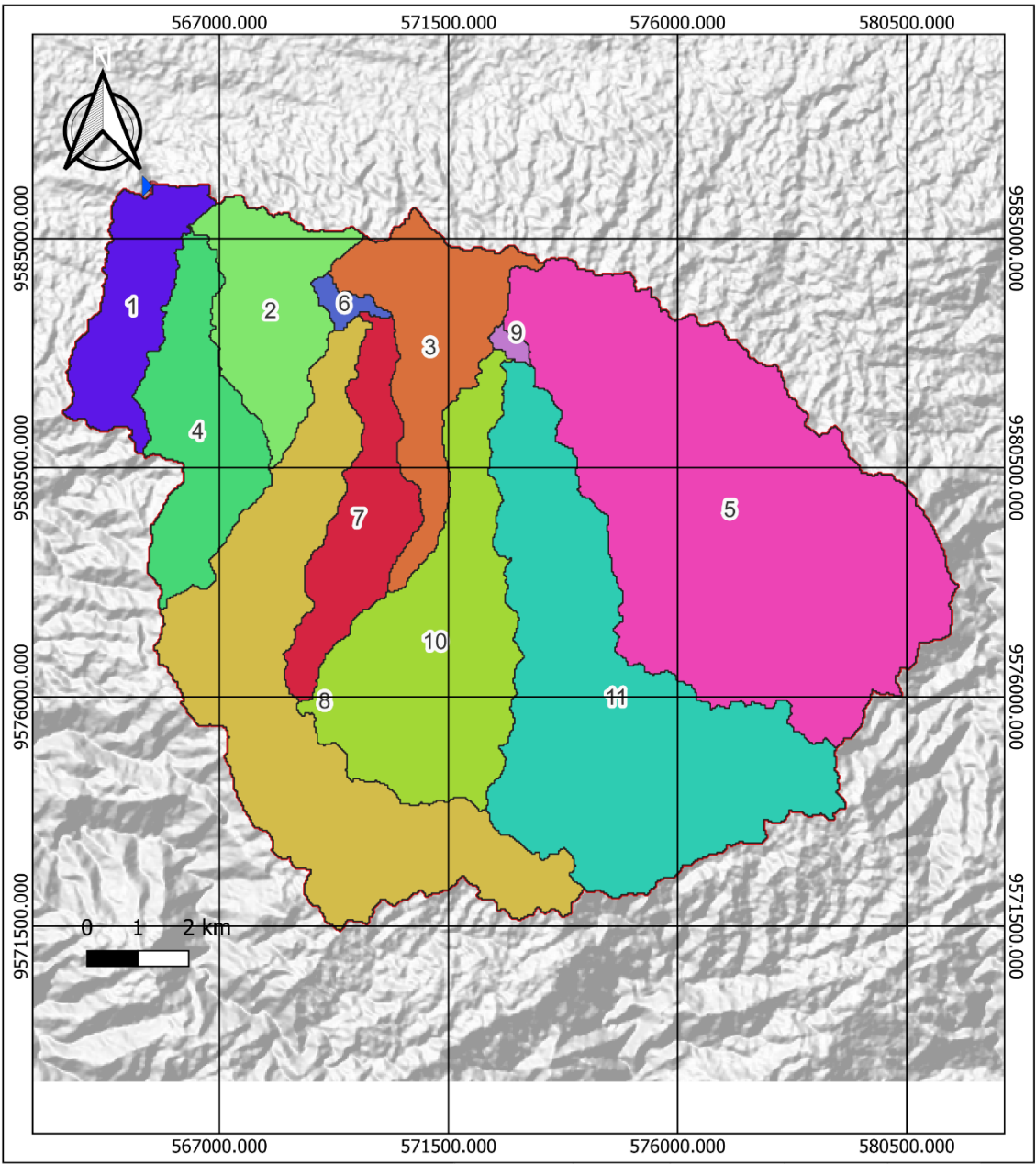
El proceso de delimitación hidrológica permitió identificar un total de 11 subcuencas dentro del área de estudio, las cuales presentan una distribución espacial heterogénea en función de la topografía y la red de drenaje.

Se observa que las microcuencas ubicadas en la parte oriental (subcuenca 5 y 11) abarcan mayor extensión territorial, lo cual se sugiere zonas de menor pendiente relativa y mayor acumulación de flujo. En contraste, las microcuencas de la parte occidental y noroccidental (microcuencas 1, 2, 3 y 6) presentan menores áreas asociadas a una topografía más accidentada y una mayor densidad de drenaje.

La configuración espacial evidencia un patrón de flujo general desde las zonas altas hacia la parte central y baja de la cuenca, lo cual condiciona la generación y concentración del caudal. Esta subdivisión permite una representación más detallada de los procesos hidrológicos en el modelo SWAT, facilitando el análisis de la disponibilidad hídrica a nivel de subunidad.

Se obtuvo la delimitación de la cuenca con un área total de 16,862.95 km<sup>2</sup>, la cual fue subdividida en 11 microcuencas, permitiendo representar espacialmente la dinámica hidrológica del área de estudio.

Figura 13. Delimitación de la Subcuenca Angostura y sus Microcuencas.



**MAPA DE MICROCUENCAS**

Subcuencas

|   |        |
|---|--------|
| 1 | 7      |
| 2 | 8      |
| 3 | 9      |
| 4 | 10     |
| 5 | 11     |
| 6 | CUENCA |

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRÍCOLA**

**"Evaluación de Disponibilidad Hídrica Superficial en la Subcuenca Angostura para fines de Riego, Tumbes - 2024"**

**MAPA DE MICROCUENCAS**

| UBICACIÓN                    | SISTEMA DE COORDENADAS: |
|------------------------------|-------------------------|
| DEPARTAMENTO: TUMBES         | WGS 84 - Zona 17 Sur    |
| PROVINCIA: TUMBES            | ESCALA:                 |
| DISTRITO: PAMPAS DE HOSPITAL | 1/100000                |
|                              | FECHA: FEBRERO 2026     |

ELAB. BACH. STEFANI M. CLAVIJO ORTIZ

#### **4.1.2. Mapa de uso de suelo**

La caracterización del uso del suelo basada en el producto GlobelLand30 para la cuenca Angostura se detalla en la siguiente figura.

El mapa de uso de suelo muestra una distribución especial diversa de coberturas dentro de la cuenca, predominando principalmente las áreas clasificadas como TUWO (zonas agrícolas o intervenidas), seguidas por coberturas de tipo SAVA (sabanas), GRAS (pastizales) y en menor proporción CRWO (bosques o vegetación densa).

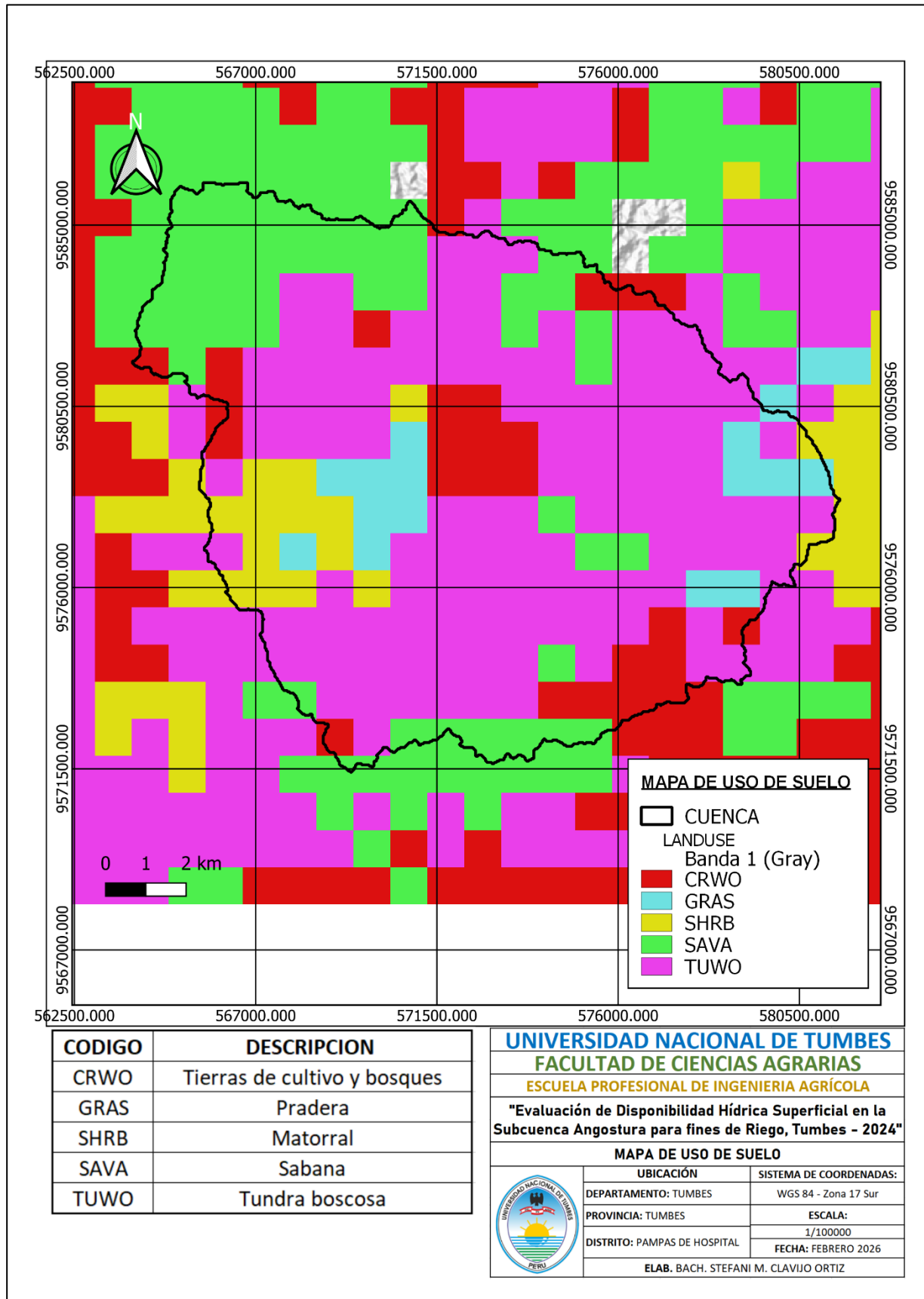
La predominancia de áreas intervenidas sugiere una influencia antrópica significativa en la cuenca, lo cual puede afectar a los procesos hidrológicos naturales, especialmente en términos de infiltración, escorrentía y evapotranspiración.

Las zonas con cobertura vegetal más densa, como bosques y pastizales, favorecen la infiltración del agua y reducen la escorrentía superficial, actuando como áreas de regulación hídrica. En contraste, las zonas agrícolas o con menor cobertura vegetal tienden a generar mayor escorrentía debido a la menor protección del suelo.

Desde el enfoque hidrológico, el uso de suelo influye directamente en la respuesta del modelo SWAT, ya que condiciona la distribución del agua en el sistema. En este sentido, las áreas con menor cobertura vegetal pueden contribuir a una mayor generación de caudales rápidos, mientras que las zonas con mayor cobertura favorecen la recarga hídrica.

En términos de disponibilidad hídrica para riego, esta distribución implica que la gestión del uso de suelo es un factor clave para la sostenibilidad del recurso hídrico dentro de la cuenca.

**Figura 14.** Mapa de Uso de Suelo de la Subcuenca Angostura.



#### **4.1.3. Mapa de tipo de suelo**

En cuanto a la distribución espacial de los tipos de suelo discretizados en la cuenca Angostura se obtuvieron los siguientes resultados:

El mapa de tipo de suelo muestra una marcada predominancia de la unidad edafológica Vp5-3a en casi la totalidad de la cuenca, mientras que la unidad Re5-1a se presenta de forma localizada en la parte oriental.

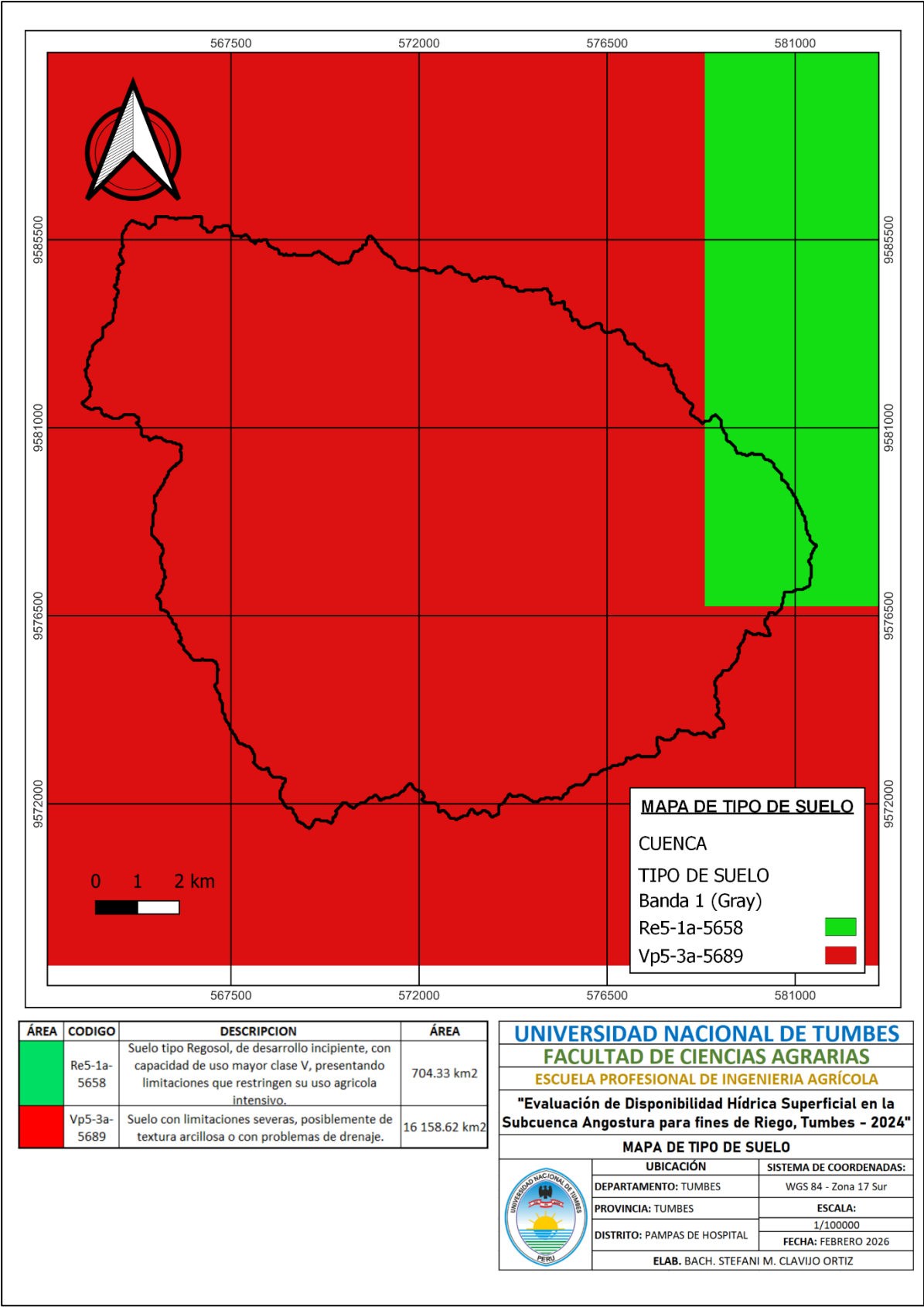
Esta distribución indica que la cuenca presenta condiciones relativamente homogéneas en cuanto a propiedades físicas del suelo, tales como textura, capacidad de infiltración y retención de humedad, especialmente en las áreas dominadas por la unidad Vp5-3<sup>a</sup>.

Por otro lado, la presencia puntual de la unidad Re5-1<sup>a</sup> sugiere la existencia de zonas con características diferenciadas, posiblemente asociadas a suelos más delgados o con menor capacidad de almacenamiento de agua.

Desde el punto de vista hidrológico, esta configuración implica que la mayor parte de la cuenca tendría un comportamiento similar en términos de infiltración y generación de escorrentía, mientras que las zonas con suelos distintos podrían generar respuestas hidrológicas más rápidas o limitadas en cuanto a retención hídrica.

En términos de disponibilidad hídrica, los suelos predominantes juegan un rol importante en la regulación del agua, favoreciendo procesos de infiltración que contribuyen al flujo base y a la sostenibilidad del recurso hídrico para fines de riego.

Figura 15. Mapa representativo del Tipo de Suelo.



#### 4.1.4. Mapa de Pendientes

En cuanto a las clases de pendientes, se obtuvo del MDE para que SWAT nos permita clasificar las pendientes en 5 clases:  $< 0\%$ ,  $0 - 5\%$ ,  $5 - 10\%$ ,  $10-15\%$ ,  $15-20$  y  $>20\%$ ) los cuales se presentan en la **Figura 16**.

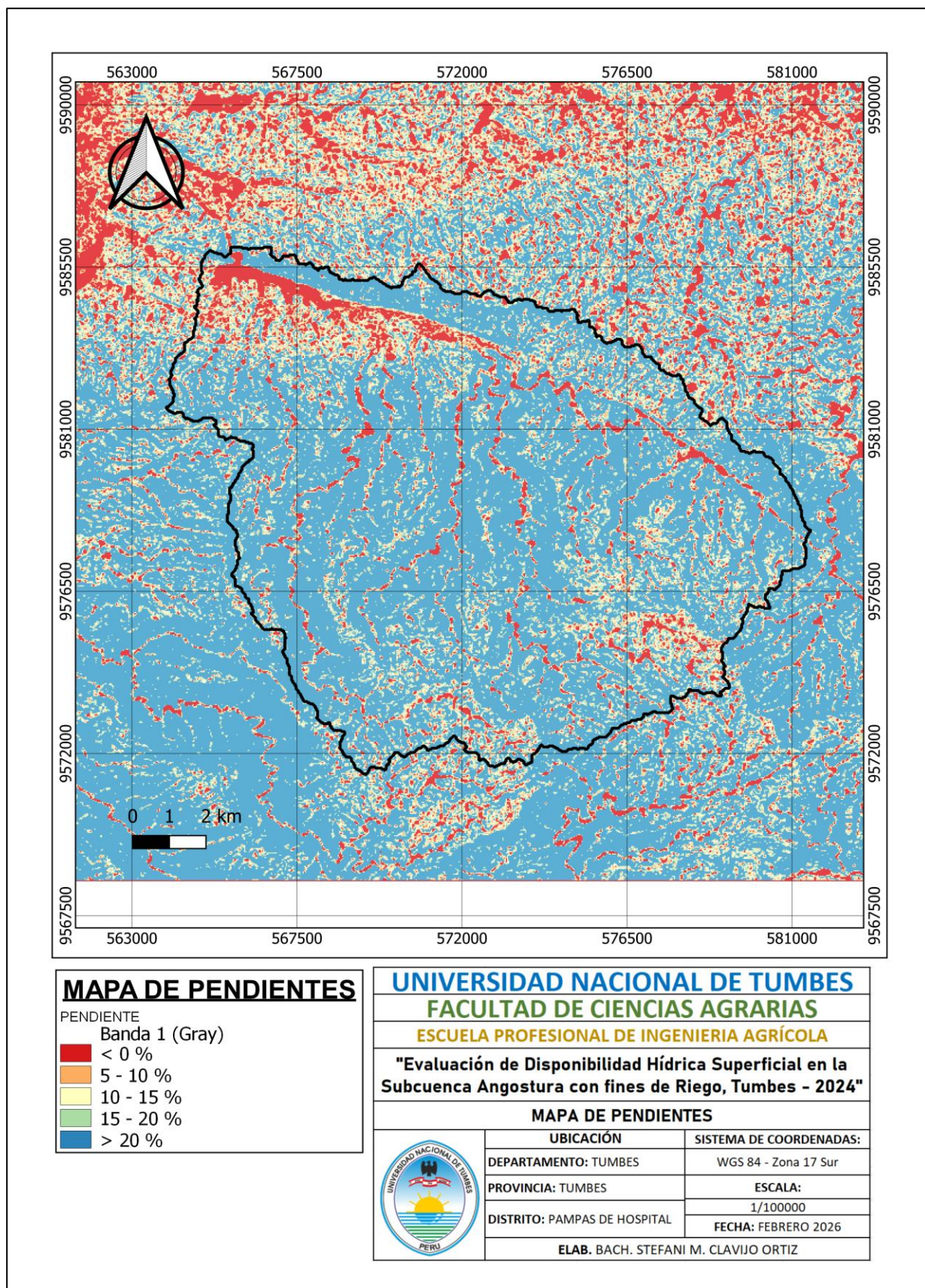
El mapa de pendientes muestra una predominancia de valores moderados a altos en gran parte de la cuenca, especialmente en las zonas periféricas y de cabecera, lo que indica un relieve accidentado.

Las mayores pendientes se concentran en la parte alta y en los bordes de la cuenca, lo que favorece la generación de escorrentía superficial debido a la menor capacidad de infiltración del agua en el suelo.

En contraste, las zonas con pendientes bajas se localizan principalmente en la parte central y algunas áreas de la zona baja, donde es más probable la acumulación de agua y procesos de infiltración.

Este patrón topográfico tiene una influencia directa en la dinámica hidrológica, ya que controla la velocidad del flujo, la erosión y la generación de caudales, siendo un factor determinante en la disponibilidad hídrica para fines de riego.

**Figura 16. Mapa de Pendientes.**



#### **4.1.5. Unidades de Respuesta Hidrológica**

De la integración de estos 3 mapas el modelo calcula valores cuantitativos para diferentes procesos en cada unidad espacial. La unidad básica de cálculo es la Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU). Habiéndose generado en total 93 Unidades de Respuesta Hidrológica.

Posteriormente, mediante la integración de los mapas de uso y cobertura del suelo y tipos de suelo, junto con la información topográfica derivada del DEM, se generaron las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU). Aplicando umbrales entre 5 y 20% de clasificación para optimizar la representación espacial y evitar unidades de tamaño reducido, se obtuvo un total de 93 HRU.

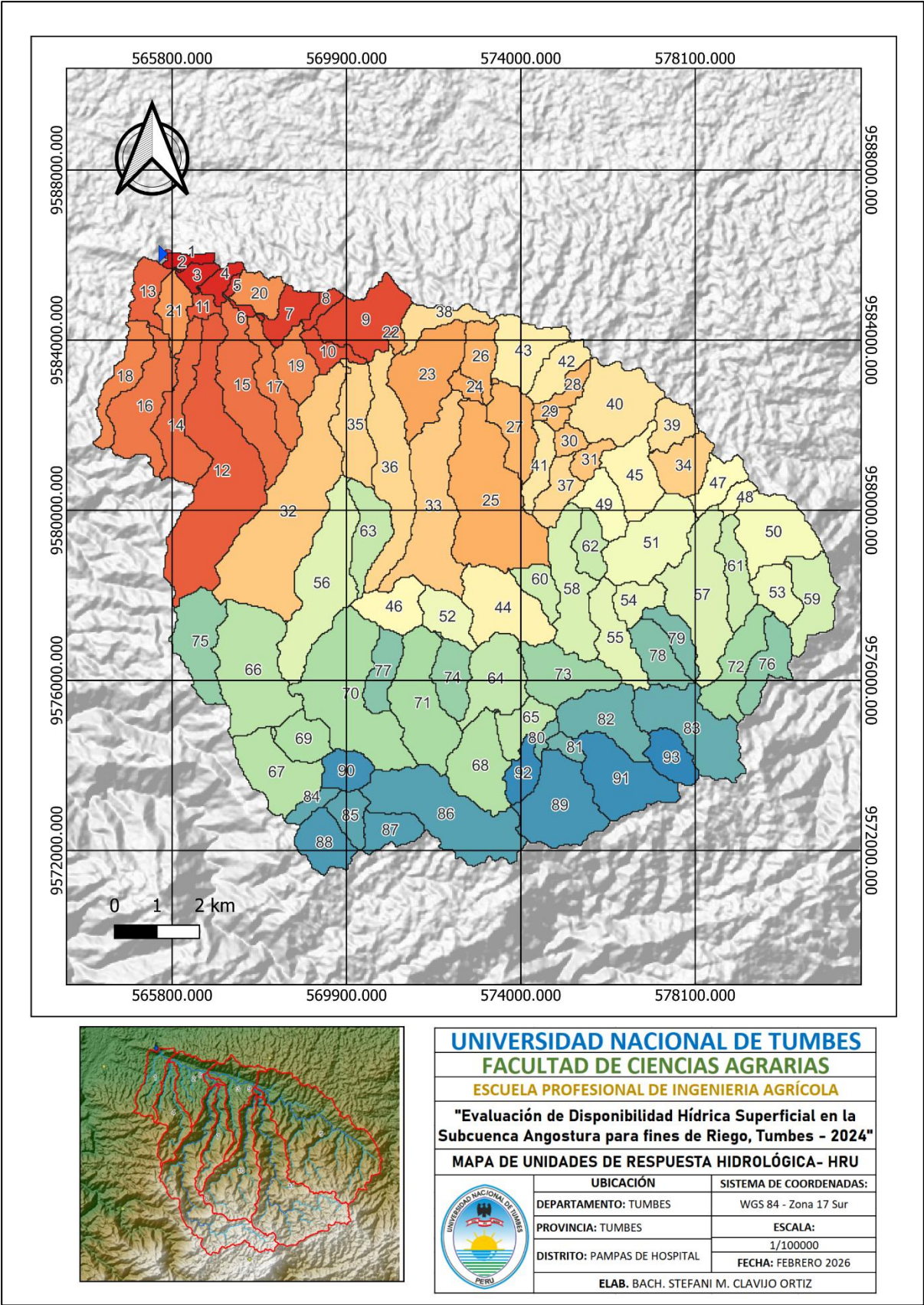
En el mapa de unidades de respuesta hidrológica (HRU) evidencia una alta heterogeneidad espacial dentro de la cuenca, resultado de la combinación de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente.

Se observa una mayor concentración de HRU en la parte media y alta de la cuenca, lo que indica una mayor variabilidad en las características físicas del territorio, especialmente en zonas con cambios abruptos de pendiente y cobertura vegetal.

En la parte occidental predominan Unidades de Respuesta Hidrológica con características más homogéneas, mientras que en la zona central y oriental se incrementa la fragmentación espacial, reflejando una mayor diversidad de condiciones hidrológicas.

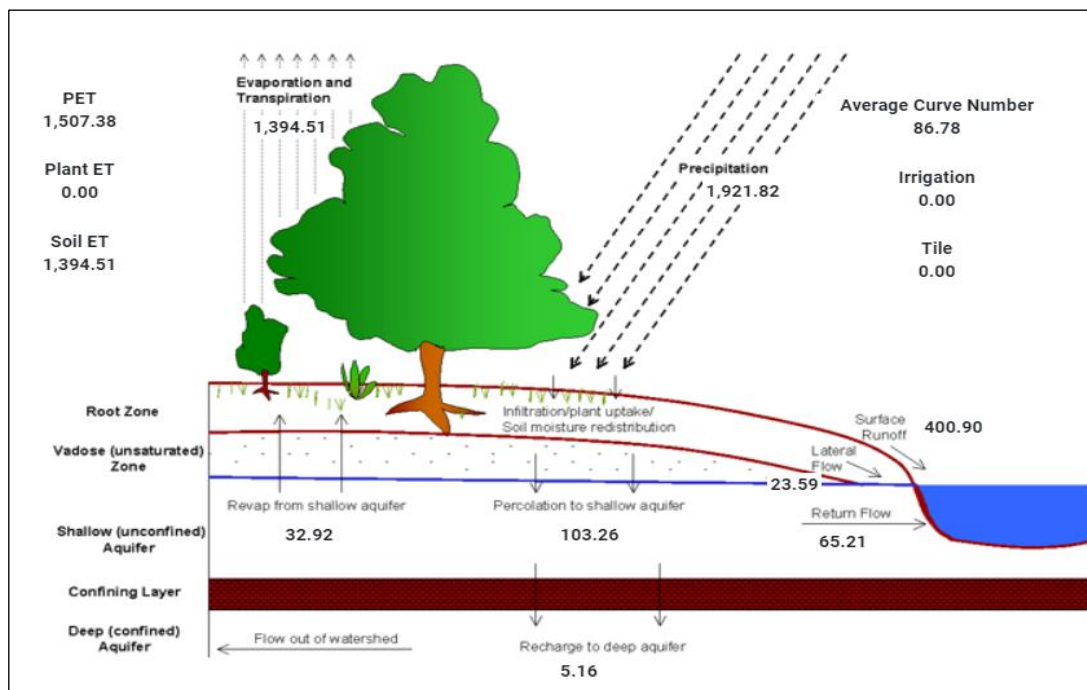
Esta distribución influye directamente en la respuesta del modelo, ya que cada Unidad de Respuesta Hidrológica simula de manera independiente procesos como infiltración, escorrentía y evapotranspiración. Por tanto, la configuración obtenida permite representar con mayor precisión la dinámica hídrica de la subcuenca Angostura.

Figura 17. Mapa de Clasificación de las Unidades de Respuesta Hidrológica - SWAT



#### 4.1.6. Modelamiento Hidrológico – SWAT

Finalmente, se incorporó la información climática procesada y se configuraron los métodos de simulación correspondientes, ejecutándose la corrida inicial del modelo para representar el comportamiento hidrológico de la cuenca en el periodo de estudio, obteniendo los siguientes valores:



La figura representa el balance hídrico promedio de la subcuenca Angostura, mostrando los principales componentes del ciclo hidrológico simulados por el modelo SWAT.

Se observa que la precipitación total constituye la principal entrada del sistema, con un valor de 1921.82 mm, la cual se distribuye en diferentes procesos hidrológicos dentro de la cuenca.

Uno de los componentes predominantes es la evapotranspiración (1394.51 mm), la cual representa la mayor salida de agua del sistema. Este comportamiento indica que una gran proporción del agua precipitada retorna a la atmósfera, lo cual es característico de zonas con alta radiación solar y cobertura vegetal activa. Además, se evidencia que la evapotranspiración está dominada por la

evapotranspiración del suelo, mientras que la contribución de las plantas es mínima, lo que podría estar relacionado con el tipo de cobertura vegetal o condiciones de humedad del suelo.

Con relación al escurrimiento, se identifica que la escorrentía superficial alcanza 400.90 mm, constituyendo un componente importante del balance hídrico. Este valor sugiere que una fracción significativa de la precipitación no infiltra, sino que fluye directamente sobre la superficie, lo cual puede estar asociado a suelos con baja permeabilidad, pendientes pronunciadas o valores relativamente altos del número de curva ( $CN = 86.78$ ), indicando condiciones favorables para la generación de escorrentía.

Por otro lado, los procesos de infiltración y flujo subterráneo también presentan aportes relevantes. La percolación hacia el acuífero somero (103.26 mm) evidencia que parte del agua logra infiltrarse y recargar el sistema subterráneo. Este almacenamiento contribuye posteriormente al flujo base, representado por el flujo de retorno (65.21 mm) hacia los cuerpos de agua superficiales.

Asimismo, el flujo lateral (23.59 mm) indica un movimiento subsuperficial del agua dentro del perfil del suelo, el cual aporta de manera gradual al sistema de drenaje. La evaporización desde el acuífero somero (32.92 mm) refleja pérdidas adicionales de agua hacia la atmósfera desde zonas poco profundas.

Finalmente, la recarga al acuífero profundo (5.16 mm) es relativamente baja, lo que sugiere una limitada transferencia de agua hacia capas más profundas, manteniéndose la mayor parte del flujo dentro del sistema superficial y subsuperficial.

#### **4.1.7. La Precipitación Diaria Mensual de la Subcuenca Angostura (mm)**

Dentro de los resultados obtenidos también tenemos el mapa de precipitación mensual, donde se evidencia una distribución espacial heterogénea dentro de la cuenca, con mayores valores concentrados en la parte noroccidental, mientras que las zonas sur y sureste presentan menores niveles de precipitación.

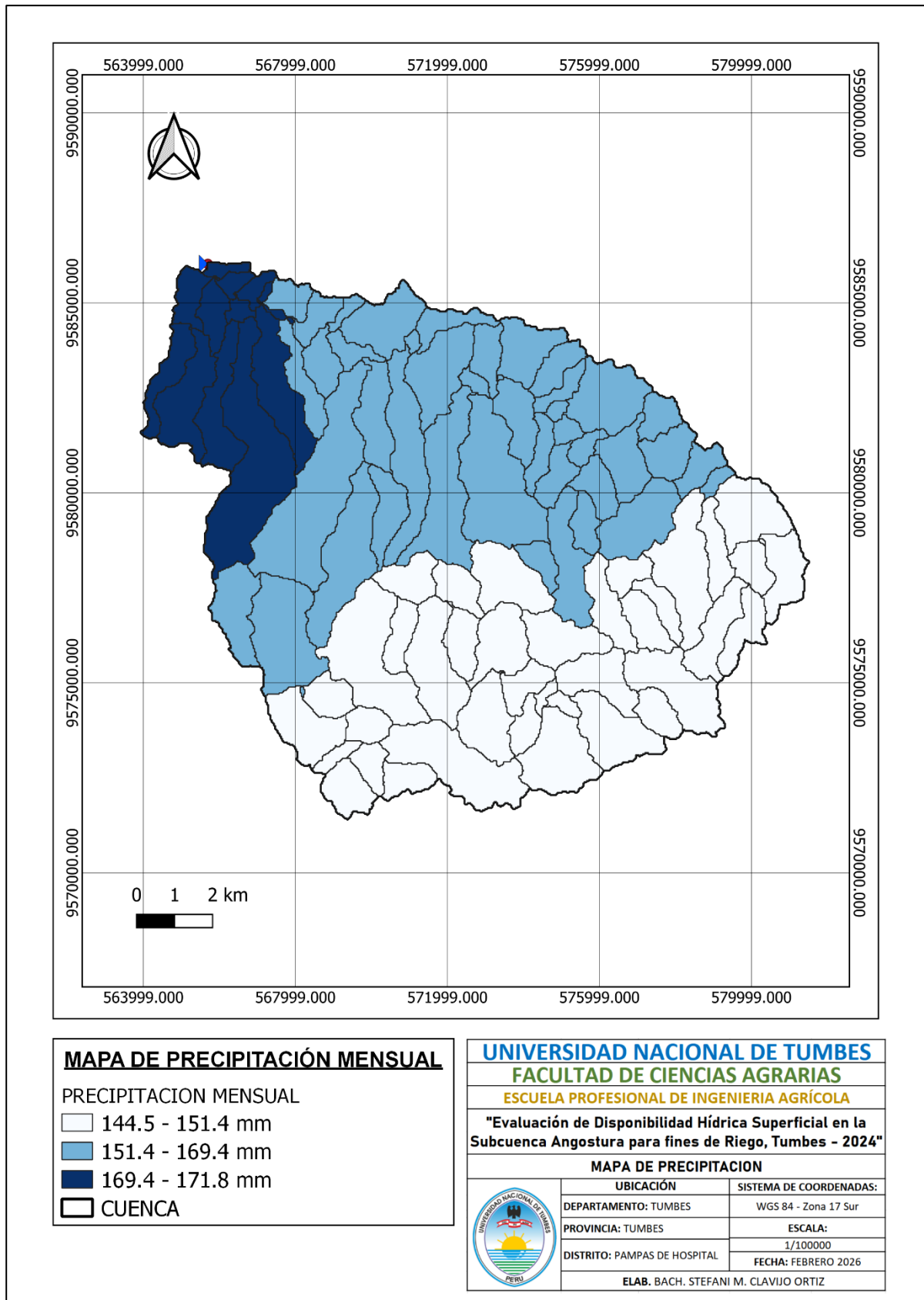
Este patrón espacial está asociado a factores orográficos, donde las zonas de mayor altitud favorecen la condensación de humedad y la ocurrencia de precipitaciones más intensas, mientras que las áreas más bajas reciben menores aportes hídricos.

La gradiente de precipitación observada indica que las zonas altas funcionan como áreas de recarga hídrica, contribuyendo significativamente a la generación de escorrentía y al abastecimiento de caudales hacia las partes bajas de la cuenca.

Desde el enfoque de disponibilidad hídrica para riego, estas diferencias espaciales son determinantes, ya que las zonas con mayor precipitación presentan un mayor potencial de generación de recursos hídricos, mientras que las áreas con menores valores podrían ser más vulnerables a déficit hídrico, especialmente en periodos secos.

En consecuencia, la distribución de la precipitación constituye uno de los principales factores que controlan la dinámica hidrológica de la subcuenca Angostura.

**Figura 18.** Mapa de Precipitación Mensual - Modelamiento Hidrológico SWAT.



A continuación, la **Tabla 10**. La Tabla de precipitación mensual evidencia una marcada variabilidad temporal de las lluvias durante el año hidrológico. Los valores promedio mensuales fluctuaron entre **46.71 mm y 324.82 mm**, mostrando una distribución irregular de las precipitaciones.

Los mayores registros promedio ocurrieron durante **febrero (324.82 mm)**, seguido por **marzo (253.94 mm)** y **abril (239.36 mm)**, indicando la presencia de una temporada lluviosa concentrada durante los primeros meses del año. En contraste, los menores valores se registraron en **septiembre (46.71 mm)**, **agosto (54.12 mm)** y **julio (66.04 mm)**, evidenciando un periodo de escasez hídrica.

Este patrón estacional indica que la disponibilidad hídrica superficial se concentra principalmente entre enero y abril, mientras que durante los meses de julio a septiembre ocurre una disminución significativa de las precipitaciones, generando periodos de déficit hídrico potencial.

**Tabla 10.** Tabla Promedio de Precipitación Mensual (mm).

| <b>PRECIPITACION MENSUAL (mm)</b> |               |                |               |               |               |               |              |               |                  |                |                  |                  |
|-----------------------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|------------------|----------------|------------------|------------------|
| <b>AÑOS</b>                       | <b>ENERO</b>  | <b>FEBRERO</b> | <b>MARZO</b>  | <b>ABRIL</b>  | <b>MAYO</b>   | <b>JUNIO</b>  | <b>JULIO</b> | <b>AGOSTO</b> | <b>SETIEMBRE</b> | <b>OCTUBRE</b> | <b>NOVIEMBRE</b> | <b>DICIEMBRE</b> |
| 1984                              | 213           | 328            | 207           | 164           | 171           | 144           | 59           | 52.7          | 38.1             | 165            | 182              | 124              |
| 1985                              | 160           | 239            | 269           | 211           | 187           | 96.2          | 88.8         | 51.5          | 55               | 144            | 150              | 208              |
| 1986                              | 226           | 366            | 171           | 272           | 182           | 92.2          | 41           | 75.5          | 49.6             | 142            | 140              | 179              |
| 1987                              | 247           | 293            | 214           | 226           | 83.7          | 66.6          | 98.1         | 44.3          | 40.1             | 157            | 135              | 105              |
| 1988                              | 181           | 224            | 143           | 197           | 128           | 91.5          | 28.8         | 34.2          | 26               | 143            | 117              | 105              |
| 1989                              | 365           | 339            | 212           | 256           | 158           | 195           | 64.8         | 64.4          | 43               | 173            | 104              | 152              |
| 1990                              | 204           | 276            | 224           | 269           | 147           | 130           | 45.8         | 58.4          | 52.8             | 137            | 151              | 177              |
| 1991                              | 148           | 307            | 293           | 200           | 182           | 189           | 31.7         | 22.4          | 49.8             | 114            | 137              | 155              |
| 1992                              | 118           | 358            | 231           | 197           | 179           | 111           | 29.1         | 58.4          | 46.3             | 202            | 133              | 241              |
| 1993                              | 247           | 370            | 359           | 374           | 104           | 82.1          | 58.3         | 59.4          | 47.8             | 169            | 214              | 162              |
| 1994                              | 200           | 325            | 311           | 225           | 144           | 114           | 43.7         | 49.6          | 46.3             | 125            | 146              | 176              |
| 1995                              | 194           | 296            | 279           | 208           | 85.7          | 107           | 79.6         | 31            | 48.4             | 134            | 154              | 207              |
| 1996                              | 184           | 266            | 209           | 202           | 187           | 96            | 39.2         | 70.9          | 60               | 152            | 115              | 121              |
| 1997                              | 211           | 394            | 249           | 275           | 177           | 204           | 21.3         | 60.4          | 83.1             | 144            | 221              | 268              |
| 1998                              | 331           | 496            | 333           | 330           | 110           | 101           | 47.1         | 38.9          | 29               | 225            | 154              | 114              |
| 1999                              | 281           | 462            | 253           | 360           | 118           | 140           | 63.5         | 43.5          | 67               | 112            | 103              | 163              |
| 2000                              | 213           | 292            | 199           | 231           | 155           | 143           | 81.8         | 74            | 38.4             | 121            | 153              | 182              |
| 2001                              | 234           | 333            | 307           | 262           | 185           | 99            | 103          | 53.3          | 48.9             | 145            | 123              | 196              |
| 2002                              | 164           | 334            | 321           | 305           | 192           | 77.6          | 178          | 77            | 50               | 157            | 154              | 153              |
| 2003                              | 184           | 325            | 204           | 199           | 165           | 263           | 43.5         | 67.3          | 54.4             | 158            | 149              | 189              |
| 2004                              | 131           | 244            | 208           | 215           | 188           | 134           | 137          | 75.5          | 67               | 151            | 141              | 215              |
| 2005                              | 176           | 274            | 226           | 184           | 108           | 102           | 36           | 39            | 30               | 184            | 99.9             | 163              |
| 2006                              | 187           | 306            | 324           | 175           | 113           | 203           | 66.6         | 85.9          | 42.9             | 143            | 192              | 180              |
| 2007                              | 223           | 179            | 258           | 185           | 142           | 72.5          | 64.4         | 31.7          | 41.4             | 149            | 157              | 166              |
| 2008                              | 295           | 340            | 217           | 158           | 149           | 96.9          | 61.9         | 48.5          | 54.2             | 154            | 138              | 128              |
| 2009                              | 246           | 407            | 288           | 286           | 109           | 127           | 94.2         | 57.7          | 47.2             | 126            | 220              | 208              |
| 2010                              | 151           | 303            | 257           | 234           | 139           | 80.1          | 70           | 36.1          | 33.2             | 110            | 87.3             | 115              |
| 2011                              | 152           | 260            | 209           | 283           | 151           | 156           | 104          | 38.1          | 58.6             | 152            | 115              | 177              |
| 2012                              | 251           | 399            | 309           | 312           | 77.5          | 133           | 61.3         | 30.7          | 38.4             | 172            | 161              | 178              |
| 2013                              | 191           | 373            | 270           | 136           | 242           | 192           | 68.4         | 79.9          | 37               | 136            | 196              | 141              |
| 2014                              | 186           | 214            | 221           | 181           | 152           | 85.6          | 43.6         | 56.1          | 45.8             | 144            | 128              | 183              |
| 2015                              | 227           | 293            | 362           | 255           | 149           | 131           | 57.7         | 74.4          | 38               | 153            | 145              | 134              |
| 2016                              | 166           | 504            | 243           | 332           | 78.5          | 81.4          | 68.2         | 45.3          | 33.8             | 148            | 129              | 142              |
| <b>Promedio</b>                   | <b>208.70</b> | <b>324.82</b>  | <b>253.94</b> | <b>239.36</b> | <b>146.62</b> | <b>125.35</b> | <b>66.04</b> | <b>54.12</b>  | <b>46.71</b>     | <b>149.73</b>  | <b>146.79</b>    | <b>166.88</b>    |

#### **4.1.8. Mapa de Evapotranspiración Mensual (mm)**

El mapa de evapotranspiración mensual presenta una distribución espacial diferenciada dentro de la cuenca, con valores más altos concentrados en la parte noroccidental, mientras que las zonas central y sur muestran valores moderados a bajos.

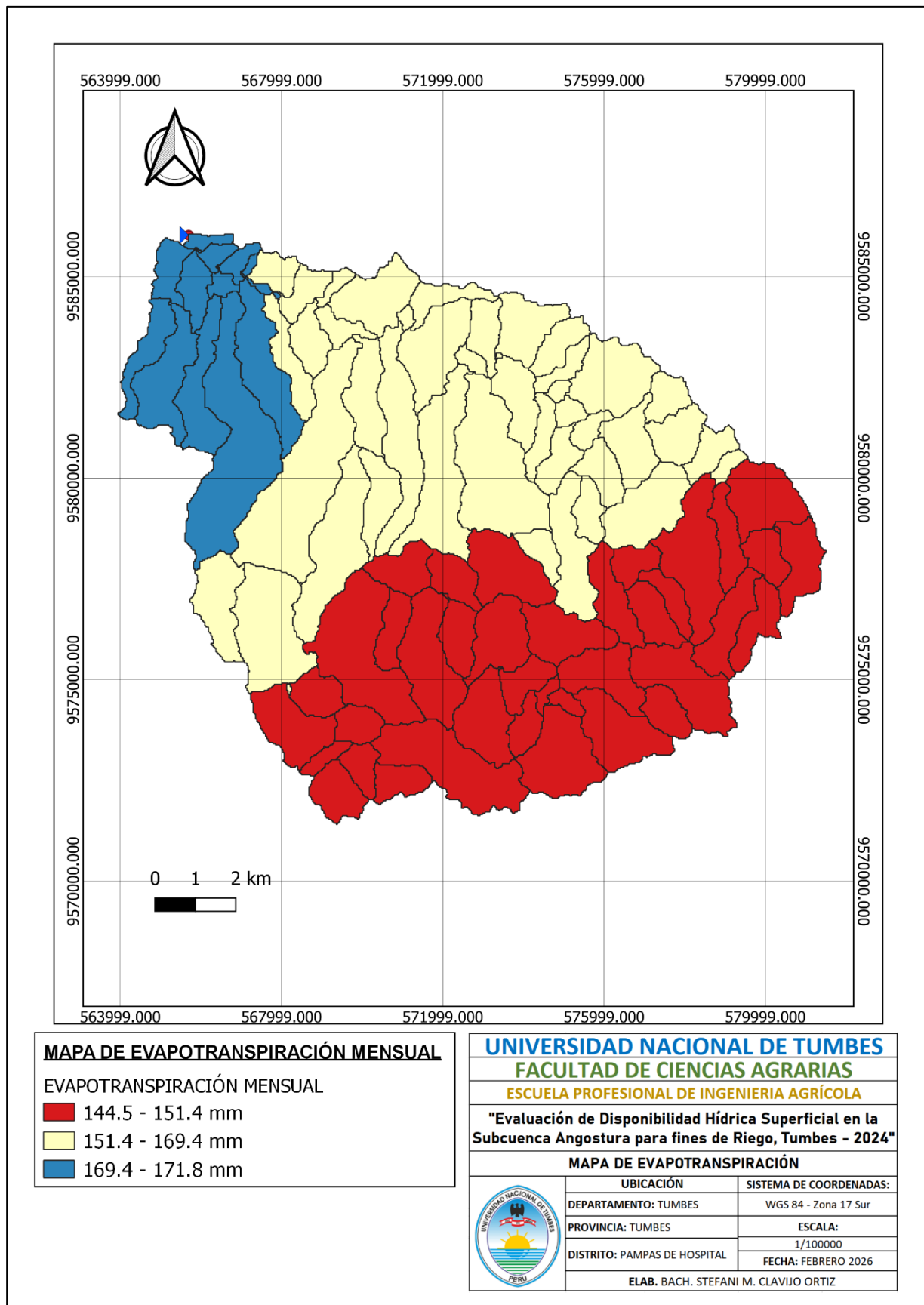
Este patrón espacial está asociado a factores como la cobertura vegetal, disponibilidad de humedad en el suelo y condiciones climáticas locales. Las zonas con mayor evapotranspiración corresponden a áreas donde existe mayor disponibilidad de agua y cobertura vegetal activa, lo que favorece los procesos de evaporación y transpiración.

En contraste, las áreas con menores valores de evapotranspiración, ubicadas principalmente en la parte sur de la cuenca, podrían estar relacionadas con menor disponibilidad de humedad en el suelo o condiciones que limitan la actividad vegetal, reduciendo así la pérdida de agua hacia la atmósfera.

Desde el punto de vista hidrológico, la evapotranspiración representa una de las principales salidas del sistema, por lo que su distribución influye directamente en la disponibilidad hídrica. Las zonas con mayores tasas de evapotranspiración tienden a reducir la cantidad de agua disponible para escorrentía y recarga, mientras que en las zonas con menor evapotranspiración existe un mayor potencial de conservación del recurso hídrico.

En el contexto del aprovechamiento del agua para riego, este comportamiento es relevante, ya que permite identificar áreas donde las pérdidas de agua son más significativas, lo cual debe ser considerado en la planificación y gestión del recurso hídrico dentro de la cuenca.

**Figura 19.** Mapa de Evapotranspiración mensual (mm).



**Tabla 11.** Valores de Evapotranspiración Mensual de la Subcuenca Angostura (mm).

| TABLA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL (mm) |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Años                                     | Enero       | Febrero     | Marzo       | Abril       | Mayo        | Junio       | Julio       | Agosto      | Setiembre   | Octubre     | Noviembre   | Diciembre   |
| 1981                                     | 4.76        | 4.41        | 4.65        | 4.59        | 4.08        | 3.92        | 4.10        | 4.54        | 4.72        | 4.64        | 4.90        | 4.79        |
| 1982                                     | 4.62        | 4.68        | 4.65        | 4.51        | 3.81        | 4.05        | 4.07        | 4.39        | 4.50        | 4.72        | 4.87        | 4.17        |
| 1983                                     | 3.85        | 4.34        | 4.43        | 4.47        | 4.00        | 4.36        | 4.36        | 4.57        | 4.60        | 4.40        | 4.57        | 4.48        |
| 1984                                     | 5.04        | 4.60        | 4.66        | 4.52        | 4.12        | 3.98        | 3.99        | 4.48        | 4.47        | 4.75        | 5.03        | 4.84        |
| 1985                                     | 4.52        | 4.89        | 4.80        | 4.86        | 4.37        | 4.26        | 4.05        | 4.36        | 4.80        | 4.77        | 5.11        | 4.84        |
| 1986                                     | 4.37        | 4.96        | 4.97        | 4.51        | 4.16        | 4.06        | 4.06        | 4.37        | 4.59        | 4.73        | 4.80        | 4.79        |
| 1987                                     | 4.33        | 4.32        | 4.67        | 4.52        | 4.38        | 4.35        | 4.22        | 4.57        | 4.70        | 4.85        | 4.87        | 4.75        |
| 1988                                     | 4.50        | 4.54        | 4.95        | 4.67        | 4.37        | 4.31        | 4.27        | 4.67        | 4.74        | 4.71        | 4.53        | 4.96        |
| 1989                                     | 4.33        | 4.34        | 4.64        | 4.56        | 4.15        | 3.90        | 4.13        | 4.49        | 4.61        | 4.46        | 4.96        | 5.22        |
| 1990                                     | 4.63        | 4.73        | 4.79        | 4.63        | 4.27        | 4.19        | 4.35        | 4.77        | 4.94        | 4.84        | 4.83        | 5.04        |
| 1991                                     | 4.68        | 4.83        | 4.76        | 4.83        | 4.39        | 4.26        | 4.34        | 4.55        | 4.96        | 4.79        | 4.96        | 4.93        |
| 1992                                     | 4.54        | 4.66        | 4.51        | 4.25        | 4.26        | 4.17        | 4.29        | 4.64        | 4.54        | 4.80        | 4.80        | 4.90        |
| 1993                                     | 4.72        | 4.57        | 4.69        | 4.56        | 4.37        | 4.12        | 4.27        | 4.61        | 4.58        | 4.62        | 4.91        | 4.59        |
| 1994                                     | 4.36        | 4.57        | 4.70        | 4.53        | 4.27        | 4.03        | 4.14        | 4.47        | 4.60        | 4.83        | 4.83        | 4.68        |
| 1995                                     | 4.62        | 4.67        | 4.89        | 4.74        | 4.23        | 4.25        | 4.27        | 4.73        | 4.86        | 4.71        | 4.65        | 4.92        |
| 1996                                     | 4.63        | 4.80        | 4.61        | 4.61        | 4.34        | 3.95        | 4.21        | 4.46        | 4.70        | 4.48        | 5.02        | 4.98        |
| 1997                                     | 4.94        | 4.73        | 5.12        | 4.73        | 4.22        | 4.23        | 4.39        | 4.73        | 5.03        | 4.90        | 4.73        | 4.30        |
| 1998                                     | 4.23        | 4.45        | 4.42        | 4.39        | 4.28        | 4.37        | 4.44        | 4.72        | 4.93        | 4.75        | 4.87        | 5.19        |
| 1999                                     | 4.75        | 4.57        | 4.91        | 4.49        | 4.06        | 3.89        | 4.01        | 4.54        | 4.54        | 4.87        | 4.75        | 4.57        |
| 2000                                     | 4.88        | 4.77        | 4.61        | 4.34        | 4.02        | 3.89        | 4.00        | 4.45        | 4.49        | 4.99        | 4.85        | 4.57        |
| 2001                                     | 4.34        | 4.59        | 4.59        | 4.51        | 4.10        | 3.95        | 3.92        | 4.51        | 4.61        | 4.60        | 4.52        | 4.64        |
| 2002                                     | 4.74        | 4.61        | 4.64        | 4.52        | 4.39        | 4.29        | 4.13        | 4.57        | 4.88        | 4.58        | 4.58        | 4.50        |
| 2003                                     | 4.50        | 4.65        | 4.89        | 4.67        | 4.24        | 3.95        | 4.14        | 4.54        | 4.69        | 4.67        | 4.67        | 4.77        |
| 2004                                     | 5.23        | 4.87        | 4.73        | 4.74        | 4.31        | 4.03        | 4.03        | 4.64        | 4.76        | 4.65        | 4.69        | 4.74        |
| 2005                                     | 4.82        | 4.60        | 4.58        | 4.75        | 4.44        | 4.05        | 4.37        | 4.57        | 4.76        | 4.63        | 4.90        | 4.80        |
| 2006                                     | 4.66        | 4.35        | 4.64        | 4.80        | 4.41        | 4.06        | 4.11        | 4.53        | 4.74        | 4.90        | 4.87        | 4.66        |
| 2007                                     | 4.14        | 4.99        | 4.77        | 4.69        | 4.40        | 3.96        | 4.21        | 4.46        | 4.72        | 4.54        | 4.18        | 4.72        |
| 2008                                     | 4.22        | 4.43        | 4.66        | 4.43        | 4.08        | 3.91        | 4.07        | 4.38        | 4.46        | 4.54        | 4.55        | 5.15        |
| 2009                                     | 4.20        | 4.41        | 4.63        | 4.64        | 4.34        | 3.92        | 4.10        | 4.44        | 4.65        | 4.67        | 4.89        | 4.60        |
| 2010                                     | 4.47        | 4.59        | 4.72        | 4.70        | 4.38        | 4.06        | 4.40        | 4.69        | 4.78        | 4.86        | 4.81        | 4.91        |
| 2011                                     | 4.84        | 5.08        | 5.17        | 4.58        | 4.37        | 4.03        | 4.15        | 4.62        | 4.68        | 4.78        | 4.72        | 4.56        |
| 2012                                     | 4.26        | 4.62        | 4.78        | 4.90        | 4.26        | 4.24        | 4.14        | 4.54        | 4.80        | 4.56        | 4.68        | 5.15        |
| 2013                                     | 4.36        | 4.94        | 4.69        | 4.85        | 4.19        | 4.08        | 4.26        | 4.53        | 4.92        | 4.72        | 5.04        | 5.11        |
| 2014                                     | 4.64        | 4.94        | 4.72        | 4.86        | 4.22        | 4.07        | 4.42        | 4.65        | 5.06        | 4.92        | 4.89        | 4.96        |
| 2015                                     | 4.45        | 4.90        | 4.62        | 4.87        | 4.28        | 4.16        | 4.24        | 4.72        | 4.95        | 4.86        | 4.80        | 4.62        |
| 2016                                     | 4.53        | 4.46        | 4.63        | 4.74        | 4.51        | 4.20        | 4.38        | 4.76        | 4.73        | 4.96        | 5.29        | 4.89        |
| <b>Promedio</b>                          | <b>4.55</b> | <b>4.65</b> | <b>4.72</b> | <b>4.63</b> | <b>4.25</b> | <b>4.10</b> | <b>4.20</b> | <b>4.56</b> | <b>4.73</b> | <b>4.72</b> | <b>4.80</b> | <b>4.79</b> |

En la **Tabla 11**. Detalla los resultados de evapotranspiración mensual, donde se muestra la variación temporal de la evapotranspiración durante el periodo de estudio. Los valores promedio mensuales oscilaron entre **4.10 mm y 4.80 mm**, evidenciando una variabilidad relativamente baja a lo largo del año.

Los mayores valores promedio se registraron en **noviembre (4.80 mm)**, seguido de **diciembre (4.79 mm)** y **septiembre (4.73 mm)**, mientras que el menor valor se presentó en **junio (4.10 mm)**. Asimismo, meses como **marzo (4.72 mm)**, **octubre (4.72 mm)** y **febrero (4.65 mm)** también mostraron valores relativamente elevados.

Este comportamiento indica que la pérdida de agua por evapotranspiración mantiene una distribución relativamente uniforme durante el año; sin embargo, presenta ligeros incrementos durante los últimos meses del año, posiblemente debido a condiciones climáticas como el aumento de temperatura, radiación solar y demanda atmosférica. En contraste, los menores valores observados durante junio y julio podrían estar asociados a una disminución de dichas condiciones atmosféricas.

En términos generales, los resultados indican que la evapotranspiración constituye una demanda hídrica continua en la cuenca, con valores promedio cercanos a **4.6 mm diarios**, representando una pérdida constante de agua del sistema hidrológico.

#### **4.1.9. Caudales Promedio Mensual (m<sup>3</sup>/s)**

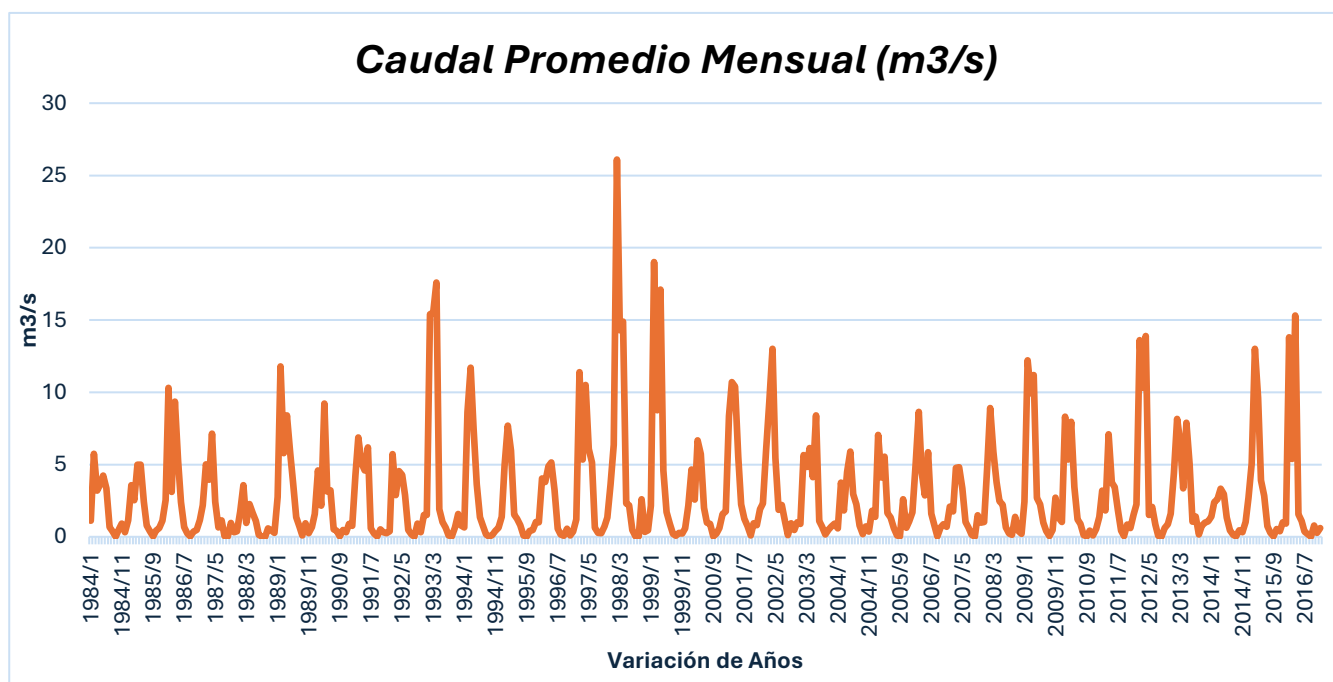
La simulación hidrológica desarrollada mediante el modelo SWAT permitió estimar los caudales medios mensuales en la subcuenca Angostura, observándose una marcada variación temporal durante el año hidrológico.

Los resultados muestran que los mayores caudales se presentan durante los meses de febrero, marzo y abril, con valores de **7.937 m<sup>3</sup>/s**, **6.250 m<sup>3</sup>/s** y **8.004 m<sup>3</sup>/s**, respectivamente, evidenciando una relación directa con la temporada de mayores precipitaciones en la cuenca.

Por otro lado, durante el periodo comprendido entre julio y septiembre se registraron los menores caudales, alcanzando valores mínimos de **0.896 m³/s**, **0.368 m³/s** y **0.056 m³/s**, respectivamente, indicando una reducción considerable de la disponibilidad hídrica superficial durante la época seca.

Este comportamiento evidencia una dependencia significativa del régimen hidrológico respecto a la distribución temporal de las precipitaciones.

**Figura 20.** Variación del Caudal Mensual de la Subcuenca Angostura.



#### 4.1.10. Oferta Hídrica

**Tabla 12.** Serie generada de Caudales Medios Mensuales - Modelamiento Swat. - Subcuenca Angostura

| AÑOS               | ENERO       | FEBRERO     | MARZO       | ABRIL       | MAYO        | JUNIO       | JULIO       | AGOSTO      | SETIEMBRE   | OCTUBRE     | NOVIEMBRE   | DICIEMBRE   |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1984               | 1.12        | 5.74        | 4.80        | 3.60        | 4.23        | 3.35        | 0.67        | 0.39        | 0.02        | 0.51        | 0.91        | 0.31        |
| 1985               | 1.13        | 3.57        | 4.30        | 5.00        | 4.99        | 2.42        | 0.78        | 0.38        | 0.04        | 0.44        | 0.60        | 1.12        |
| 1986               | 2.54        | 10.30       | 9.80        | 9.35        | 5.26        | 2.40        | 0.68        | 0.24        | 0.03        | 0.36        | 0.48        | 1.15        |
| 1987               | 2.18        | 5.01        | 6.20        | 7.14        | 2.42        | 0.66        | 1.14        | 0.04        | 0.01        | 0.95        | 0.31        | 0.38        |
| 1988               | 1.74        | 3.58        | 2.95        | 2.26        | 1.65        | 1.10        | 0.14        | 0.01        | 0.00        | 0.58        | 0.46        | 0.26        |
| 1989               | 2.75        | 11.80       | 10.22       | 8.41        | 5.86        | 3.79        | 1.36        | 0.70        | 0.09        | 0.93        | 0.25        | 0.67        |
| 1990               | 1.57        | 4.60        | 7.00        | 9.22        | 3.14        | 3.21        | 0.51        | 0.44        | 0.02        | 0.47        | 0.32        | 0.89        |
| 1991               | 0.76        | 4.26        | 4.20        | 5.10        | 4.60        | 6.19        | 0.59        | 0.22        | 0.03        | 0.52        | 0.32        | 0.25        |
| 1992               | 0.38        | 5.73        | 5.10        | 4.54        | 4.27        | 2.88        | 0.48        | 0.17        | 0.01        | 0.92        | 0.32        | 1.51        |
| 1993               | 1.52        | 15.40       | 17.38       | 17.60       | 1.90        | 1.02        | 0.62        | 0.09        | 0.02        | 0.66        | 1.57        | 0.78        |
| 1994               | 0.65        | 8.62        | 8.90        | 7.54        | 3.64        | 1.36        | 0.78        | 0.15        | 0.01        | 0.15        | 0.41        | 0.64        |
| 1995               | 1.39        | 4.94        | 5.46        | 5.97        | 1.54        | 1.25        | 0.80        | 0.09        | 0.01        | 0.42        | 0.47        | 1.03        |
| 1996               | 1.01        | 4.04        | 5.02        | 4.87        | 5.15        | 3.24        | 0.55        | 0.16        | 0.07        | 0.56        | 0.10        | 0.36        |
| 1997               | 1.21        | 11.40       | 10.95       | 10.50       | 6.07        | 5.14        | 0.63        | 0.28        | 0.26        | 0.71        | 1.34        | 3.62        |
| 1998               | 6.36        | 26.10       | 20.10       | 14.90       | 2.30        | 2.18        | 0.48        | 0.03        | 0.04        | 2.60        | 0.34        | 0.46        |
| 1999               | 2.15        | 19.00       | 18.07       | 17.10       | 4.59        | 1.71        | 0.91        | 0.21        | 0.06        | 0.27        | 0.24        | 0.59        |
| 2000               | 2.15        | 4.66        | 5.70        | 6.67        | 5.72        | 1.99        | 0.98        | 0.90        | 0.02        | 0.22        | 0.61        | 1.57        |
| 2001               | 1.75        | 8.36        | 9.39        | 10.40       | 5.53        | 2.25        | 1.25        | 0.75        | 0.10        | 0.93        | 0.80        | 1.92        |
| 2002               | 2.31        | 6.01        | 9.52        | 13.00       | 5.45        | 1.87        | 2.21        | 1.06        | 0.13        | 0.94        | 0.47        | 1.01        |
| 2003               | 0.89        | 5.65        | 5.93        | 6.15        | 4.12        | 8.41        | 1.09        | 0.70        | 0.17        | 0.49        | 0.71        | 0.91        |
| 2004               | 0.59        | 3.74        | 4.12        | 4.47        | 5.90        | 2.95        | 2.24        | 0.78        | 0.19        | 0.71        | 0.37        | 1.81        |
| 2005               | 1.39        | 7.04        | 6.32        | 5.55        | 1.64        | 1.33        | 0.60        | 0.10        | 0.02        | 2.60        | 0.62        | 1.08        |
| 2006               | 1.69        | 4.97        | 4.71        | 4.45        | 2.87        | 5.86        | 1.60        | 0.85        | 0.02        | 0.65        | 0.86        | 0.70        |
| 2007               | 2.08        | 1.75        | 3.30        | 4.82        | 3.34        | 1.03        | 0.66        | 0.13        | 0.01        | 1.48        | 0.99        | 1.03        |
| 2008               | 4.94        | 8.92        | 6.37        | 3.77        | 2.46        | 2.23        | 0.65        | 0.23        | 0.14        | 1.37        | 0.40        | 0.20        |
| 2009               | 2.43        | 12.20       | 11.75       | 11.20       | 2.69        | 2.24        | 0.99        | 0.40        | 0.05        | 0.48        | 2.71        | 1.32        |
| 2010               | 1.02        | 8.32        | 8.20        | 7.95        | 3.43        | 1.20        | 0.89        | 0.12        | 0.03        | 0.42        | 0.10        | 0.53        |
| 2011               | 1.39        | 3.19        | 5.18        | 7.10        | 3.76        | 3.44        | 1.85        | 0.44        | 0.05        | 0.85        | 0.61        | 1.53        |
| 2012               | 2.25        | 13.60       | 13.95       | 13.90       | 1.51        | 2.07        | 0.85        | 0.07        | 0.02        | 0.61        | 0.88        | 1.61        |
| 2013               | 4.42        | 8.16        | 5.82        | 3.36        | 7.88        | 5.04        | 1.04        | 1.41        | 0.16        | 0.77        | 0.97        | 1.08        |
| 2014               | 1.40        | 2.39        | 3.08        | 3.33        | 2.95        | 1.33        | 0.45        | 0.14        | 0.03        | 0.45        | 0.31        | 1.03        |
| 2015               | 2.70        | 5.07        | 7.86        | 9.62        | 3.90        | 2.85        | 0.75        | 0.30        | 0.03        | 0.54        | 0.38        | 1.01        |
| 2016               | 0.92        | 13.80       | 15.96       | 15.30       | 1.56        | 1.09        | 0.36        | 0.18        | 0.00        | 0.78        | 0.27        | 0.60        |
| <b>PROMEDIO</b>    | <b>1.90</b> | <b>7.94</b> | <b>8.11</b> | <b>8.00</b> | <b>3.83</b> | <b>2.70</b> | <b>0.90</b> | <b>0.37</b> | <b>0.06</b> | <b>0.77</b> | <b>0.62</b> | <b>1.00</b> |
| <b>Q 75%</b>       | <b>1.12</b> | <b>4.60</b> | <b>5.02</b> | <b>4.82</b> | <b>2.46</b> | <b>1.33</b> | <b>0.60</b> | <b>0.13</b> | <b>0.02</b> | <b>0.47</b> | <b>0.32</b> | <b>0.59</b> |
| <b>Q ecológico</b> | <b>0.29</b> | <b>1.19</b> | <b>1.22</b> | <b>1.20</b> | <b>0.57</b> | <b>0.40</b> | <b>0.13</b> | <b>0.06</b> | <b>0.01</b> | <b>0.12</b> | <b>0.09</b> | <b>0.15</b> |
| <b>Q Oferta</b>    | <b>0.83</b> | <b>3.41</b> | <b>3.80</b> | <b>3.62</b> | <b>1.89</b> | <b>0.93</b> | <b>0.47</b> | <b>0.07</b> | <b>0.01</b> | <b>0.35</b> | <b>0.23</b> | <b>0.44</b> |

En la **Tabla 12** se presenta la oferta hídrica mensual estimada para la subcuenca Angostura, obtenida a partir de los caudales medios mensuales generados mediante el modelamiento hidrológico SWAT y ajustados considerando el caudal ecológico y el caudal con una persistencia del 75 %.

Los resultados muestran que la oferta hídrica presenta una marcada variabilidad estacional a lo largo del año. Los mayores valores de disponibilidad hídrica se registran durante los meses de febrero, marzo y abril, con caudales de **3.41 m³/s**, **3.80 m³/s** y **3.62 m³/s**, respectivamente. Este comportamiento está asociado a la temporada de lluvias en la cuenca, la cual incrementa significativamente los aportes de escorrentía superficial.

Por otro lado, los menores valores de oferta hídrica se presentan entre agosto y septiembre, alcanzando valores mínimos de **0.07 m³/s** y **0.01 m³/s**, respectivamente. Esta disminución coincide con la época seca, caracterizada por una reducción considerable de las precipitaciones y, en consecuencia, de los caudales disponibles en la quebrada.

Asimismo, se observa que la oferta hídrica comienza a incrementarse nuevamente a partir de octubre, pasando de **0.35 m³/s** en dicho mes a **0.44 m³/s** en diciembre, evidenciando el inicio de la recuperación del recurso hídrico previo a la temporada de mayores precipitaciones.

En términos generales, la disponibilidad de agua en la subcuenca Angostura es mayor durante el primer cuatrimestre del año, concentrándose aproximadamente el 69 % de la oferta hídrica anual entre los meses de febrero y abril. En contraste, durante el periodo comprendido entre julio y octubre se presentan las condiciones más críticas de disponibilidad, situación que podría generar restricciones para el abastecimiento de agua destinada al riego agrícola si no se implementan medidas adecuadas de gestión y almacenamiento del recurso hídrico.

#### **4.1.11. Demanda Agrícola**

La demanda agrícola fue determinada con el objetivo de estimar el volumen de agua requerido por los cultivos presentes en el área de estudio para satisfacer sus necesidades hídricas durante su ciclo productivo. Para ello se consideró la evapotranspiración del cultivo, el área cultivada y la eficiencia del sistema de riego.

La estimación de la demanda hídrica de los cultivos se realizó a partir de la evapotranspiración del cultivo ( $E_c$ ), la cual fue obtenida mediante la relación entre la evapotranspiración de referencia ( $E_o$ ) y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ).

**Tabla 13.** Cuadro Resumen de Cálculo de la Demanda Agrícola.

| CÁLCULO DE LA DEMANDA HIDRICA          |             |             |          |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------------------------------|-------------|-------------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| DESCRIPCIÓN                            | UNIDAD      | ENE         | FEB      | MAR     | ABR     | MAY      | JUN      | JUL      | AGO      | SEP      | OCT      | NOV      | DIC      |
| Número de días                         |             | 31.0        | 29.0     | 31.0    | 30.0    | 31.0     | 30.0     | 31.0     | 31.0     | 30.0     | 31.0     | 30.0     | 31.0     |
| Área de Riego                          | ha          | 4936        | 4936     | 4936    | 4936    | 4936     | 4893     | 4893     | 4893     | 4893     | 4893     | 4893     | 4893     |
| Eto                                    | (mm/día)    | 4.55        | 4.65     | 4.72    | 4.63    | 4.25     | 4.10     | 4.20     | 4.56     | 4.73     | 4.72     | 4.80     | 4.79     |
| Kc ponderado                           |             | 1.08        | 1.08     | 1.09    | 1.09    | 1.09     | 1.09     | 1.09     | 1.09     | 1.09     | 1.09     | 1.09     | 1.09     |
| Evapotranspiración del Cultivo (a x b) | (mm/día)    | 4.92        | 5.05     | 5.12    | 5.04    | 4.61     | 4.46     | 4.56     | 4.96     | 5.14     | 5.14     | 5.22     | 5.21     |
| Precipitación Efectiva                 | (mm/día)    | 4.4         | 5.4      | 4.9     | 4.8     | 3.7      | 3.5      | 2.2      | 1.7      | 1.4      | 3.6      | 3.8      | 4.0      |
| Lamina Neta (c - d)                    | (mm/día)    | 0.52        | -0.31    | 0.25    | 0.24    | 0.92     | 1.01     | 2.33     | 3.27     | 3.74     | 1.51     | 1.47     | 1.22     |
| Eficiencia de riego                    | (%)         | 0.4         | 0.4      | 0.4     | 0.4     | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      |
| Lamina Bruta (e / f)                   | (mm/día)    | 1.30        | -0.79    | 0.61    | 0.59    | 2.30     | 2.52     | 5.82     | 8.18     | 9.35     | 3.77     | 3.67     | 3.06     |
| Módulo de riego                        | (lt/seg/ha) | 0.15        | -0.09    | 0.07    | 0.07    | 0.27     | 0.29     | 0.67     | 0.95     | 1.08     | 0.44     | 0.43     | 0.35     |
| Requerimiento Total                    | (m3/seg)    | 0.74        | -0.45    | 0.35    | 0.34    | 1.31     | 1.42     | 3.29     | 4.63     | 5.29     | 2.13     | 2.08     | 1.73     |
| Requerimiento Total                    | (m3/día)    | 64361.5     | -38793.5 | 30319.6 | 29215.9 | 113533.3 | 123094.2 | 284576.1 | 400084.2 | 457299.2 | 184451.9 | 179735.3 | 149763.4 |
| Requerimiento Total                    | (MMC)       | 2.00        | -1.09    | 0.94    | 0.88    | 3.52     | 3.69     | 8.82     | 12.40    | 13.72    | 5.72     | 5.39     | 4.64     |
| Requerimiento del caudal para riego    | <b>5.29</b> | <b>m3/s</b> |          |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |

#### **4.1.12. Balance Hídrico**

El balance hídrico fue realizado con la finalidad de determinar la relación entre la oferta y la demanda de agua en el área de estudio, permitiendo identificar periodos de disponibilidad o déficit hídrico para fines de riego. Este análisis consistió en comparar el volumen de agua disponible en la quebrada Angostura con los requerimientos hídricos de los cultivos presentes en la zona.

La oferta hídrica corresponde al volumen de agua superficial disponible obtenido a partir de los resultados del modelamiento hidrológico desarrollado mediante el modelo SWAT, el cual permitió estimar la escorrentía y los caudales generados en la subcuenca de estudio.

La demanda agrícola corresponde al volumen de agua requerido por los cultivos identificados dentro del área de estudio, calculado a partir de los requerimientos hídricos de cada cultivo considerando la evapotranspiración del cultivo, el coeficiente de cultivo y el área agrícola.

El balance hídrico fue obtenido mediante la diferencia entre la disponibilidad hídrica superficial y la demanda agrícola.

Durante los meses de febrero, marzo y abril se observó superávit hídrico debido a la mayor generación de escorrentía superficial y mayores caudales disponibles.

Sin embargo, durante los meses secos, especialmente entre julio y septiembre, se presentan condiciones cercanas al déficit hídrico debido a la disminución progresiva de la oferta y al mantenimiento de las demandas agrícolas.

Estos resultados permiten identificar periodos críticos para la gestión del recurso hídrico y la planificación de sistemas de riego.

**Tabla 14.** Balance Hídrico

| PARAMETRO | UNIDAD | ENE  | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN   | JUL   | AGO   | SET   | OCT   | NOV   | DIC   |
|-----------|--------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| DEMANDA   | (m3/s) | 0.74 | 0.00 | 0.35 | 0.34 | 1.31 | 1.42  | 3.29  | 4.63  | 5.29  | 2.13  | 2.08  | 1.73  |
| OFERTA    | (m3/s) | 0.83 | 3.41 | 3.80 | 3.62 | 1.89 | 0.93  | 0.47  | 0.07  | 0.01  | 0.35  | 0.23  | 0.44  |
| BALANCE   | (m3/s) | 0.09 | 3.41 | 3.45 | 3.28 | 0.57 | -0.50 | -2.83 | -4.56 | -5.28 | -1.78 | -1.85 | -1.30 |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la **Tabla 14**. Muestra la variación significativa entre la oferta y la demanda de agua durante el periodo analizado. Se observa que durante los meses de enero a mayo el balance presenta valores positivos, indicando que la disponibilidad hídrica natural es suficiente para cubrir las necesidades agrícolas de la zona de estudio.

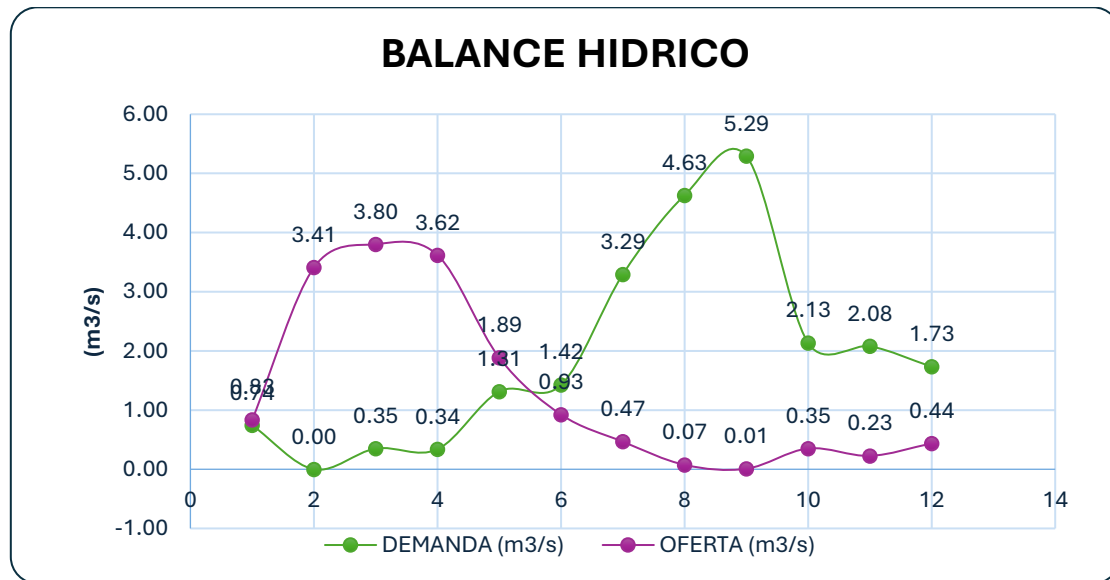
Los mayores excedentes hídricos se registraron durante **febrero (3.41 m³/s)**, **marzo (3.45 m³/s)** y **abril (3.28 m³/s)**, debido principalmente a una mayor disponibilidad de agua y una menor demanda de riego. Estos excedentes representan periodos potenciales para el almacenamiento y aprovechamiento del recurso hídrico.

Sin embargo, a partir del mes de junio el comportamiento cambia, presentándose déficits hídricos progresivos. El primer déficit ocurre en **junio con -0.50 m³/s**, aumentando gradualmente durante los meses siguientes hasta alcanzar el déficit máximo en **septiembre con -5.28 m³/s**.

Durante el periodo comprendido entre julio y diciembre, la oferta hídrica disponible resulta insuficiente para satisfacer la demanda agrícola requerida, debido a la disminución de los caudales disponibles y al incremento de las necesidades de riego. Esto evidencia una marcada dependencia estacional del recurso hídrico y demuestra que las condiciones naturales actuales no permiten garantizar un suministro continuo durante todo el año.

Asimismo, se observa que la oferta hídrica alcanza valores mínimos durante **septiembre (0.01 m³/s)** y **agosto (0.07 m³/s)**, coincidiendo con los meses de mayor demanda hídrica, lo que genera una condición crítica para el desarrollo de las actividades agrícolas.

**Figura 21.** Gráfico de relación entre Oferta y demanda Hídrica.



La **Figura 21.** se observa que durante los primeros meses del año (enero a mayo), la oferta hídrica presenta valores superiores a la demanda, alcanzando sus máximos entre febrero y abril con valores cercanos a **3.41 m³/s** y **3.80 m³/s**, mientras que la demanda se mantiene relativamente baja. Esto indica la existencia de una disponibilidad adecuada de recurso hídrico para satisfacer las necesidades de riego en este periodo.

Sin embargo, a partir del mes de junio se evidencia una disminución considerable de la oferta hídrica y un incremento progresivo de la demanda. Entre julio y septiembre se presenta el mayor déficit hídrico, debido a que la demanda alcanza valores máximos de hasta **5.29 m³/s** en septiembre, mientras que la oferta desciende hasta valores mínimos cercanos a **0.01 m³/s**. Esta situación refleja una insuficiencia de recurso hídrico para cubrir los requerimientos agrícolas durante la época seca.

Finalmente, entre octubre y diciembre la demanda disminuye gradualmente; sin embargo, la oferta hídrica continúa siendo limitada, manteniéndose aún condiciones de déficit hídrico. En general, el comportamiento del balance hídrico evidencia una marcada variabilidad estacional, con periodos de abundancia de agua en los primeros meses del año y escasez hídrica durante la segunda mitad del año.

Durante los meses de enero a mayo, el balance presenta valores positivos, alcanzando un máximo de **3.46 m<sup>3</sup>/s** en marzo, lo cual indica que la oferta hídrica disponible es suficiente para satisfacer la demanda agrícola requerida.

Sin embargo, a partir del mes de junio se observa un déficit hídrico progresivo, evidenciado por balances negativos que incrementan su magnitud hasta alcanzar el valor más crítico en septiembre (**-5.28 m<sup>3</sup>/s**). Este comportamiento ocurre debido a la disminución significativa de la oferta hídrica y al incremento de los requerimientos de riego.

Los meses de julio a diciembre muestran una insuficiencia marcada del recurso hídrico disponible, indicando que las condiciones naturales actuales no logran cubrir las necesidades agrícolas de la zona de estudio.

Estos resultados evidencian la necesidad de implementar un proyecto hidráulico o estrategias de almacenamiento y regulación hídrica que permitan garantizar la disponibilidad de agua durante los periodos críticos de déficit.

#### **4.2. DISCUSIONES**

La simulación hidrológica mediante el modelo SWAT permitió estimar la disponibilidad hídrica superficial en la quebrada Angostura, obteniendo resultados que evidencian la variabilidad temporal de los recursos hídricos durante el periodo de estudio. Los valores de esorrentía y caudal presentaron fluctuaciones asociadas principalmente a la distribución de las precipitaciones y a las características físicas de la cuenca, tales como cobertura vegetal, pendiente, tipo de suelo y uso de suelo.

Los resultados obtenidos muestran que durante los meses de mayor precipitación se incrementó la disponibilidad de agua superficial, generándose mayores valores de esorrentía; mientras que en los meses secos se observó una reducción significativa de los caudales disponibles. Este comportamiento es consistente con el ciclo hidrológico y con

investigaciones similares realizadas en cuencas hidrográficas de características semejantes.

Respecto a la demanda agrícola, los requerimientos hídricos estuvieron influenciados por el tipo de cultivo, el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), la evapotranspiración y las áreas sembradas. Los cultivos permanentes, debido a su presencia continua durante el año, generaron una demanda constante de agua, mientras que los cultivos estacionales presentaron requerimientos variables según su etapa fenológica.

El análisis del balance hídrico permitió identificar periodos de superávit y déficit hídrico. Durante los meses con mayores precipitaciones, la oferta hídrica fue suficiente para cubrir los requerimientos agrícolas; sin embargo, en los meses de menor disponibilidad se identificaron déficits que podrían afectar el desarrollo adecuado de los cultivos si no se implementan estrategias de gestión y aprovechamiento eficiente del recurso hídrico.

Los resultados obtenidos mediante el modelo SWAT demuestran la utilidad de las herramientas de modelamiento hidrológico para la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos, permitiendo evaluar escenarios de disponibilidad y apoyar la toma de decisiones para fines agrícolas.

Los resultados obtenidos mediante el modelo SWAT indican que la disponibilidad hídrica superficial en la subcuenca Angostura presenta un comportamiento estacional influenciado principalmente por la precipitación y las características físicas de la cuenca.

Los mayores caudales simulados se registraron durante la temporada húmeda, coincidiendo con estudios desarrollados en cuencas hidrográficas similares donde se evidencia una fuerte dependencia entre precipitación y generación de escorrentía superficial.

La predominancia de pendientes moderadas a elevadas y zonas con cobertura intervenida favorece una respuesta hidrológica relativamente

rápida, incrementando los procesos de escorrentía superficial y reduciendo la capacidad de almacenamiento temporal del agua dentro de la cuenca.

Respecto a la validación del modelo, aunque se observaron diferencias entre los valores simulados y los aforados, el comportamiento temporal mostró una tendencia similar, indicando que el modelo presenta una representación aceptable del sistema hidrológico bajo condiciones de limitada disponibilidad de información observada.

Dado que la cuenca no cuenta con una estación hidrométrica, la discusión se centra en contrastar los resultados del modelo con estudios realizados en la zona, del cual solo se tiene el correspondiente al Proyecto Especial de Irrigación Margen Derecha del Río Tumbes, por lo que se ha creído conveniente realizar aforos en la cuenca, con el fin de tener una información adicional de campo a fin de poder evaluar la representatividad temporal y espacial de discutir los resultados.

**Tabla 15.** Valores comparativos de Estudios realizados en la Subcuenca Angostura.

| CAUDALES<br>MEDIOS<br>MENSUALES |    | ENE  | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SET  | OCT  | NOV  | DIC  |
|---------------------------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| SWAT                            |    | 1.90 | 7.94 | 6.25 | 8.00 | 3.83 | 2.70 | 0.90 | 0.37 | 0.06 | 0.77 | 0.62 | 1.00 |
| ESTUDIO<br>MARGEN<br>DERECHA    | DE | 1.50 | 4.18 | 5.49 | 4.83 | 2.96 | 1.46 | 0.87 | 0.55 | 0.44 | 0.38 | 0.44 | 0.56 |
| AFORO                           |    |      |      | 1.13 | 1.32 |      |      |      |      |      |      |      |      |

Fuente: Elaboración propia.

La **Tabla 15.** presenta la comparación entre los caudales simulados mediante el modelo SWAT y los obtenidos mediante aforo en la subcuenca Angostura. Los resultados muestran una marcada variabilidad estacional, con mayores caudales durante los primeros meses del año y una disminución progresiva durante la época seca.

Los caudales simulados alcanzan sus valores más altos entre febrero y abril, registrando máximos de **7.94 m³/s**, **6.25 m³/s** y **8.00 m³/s**, respectivamente, mientras que el valor mínimo se presenta en septiembre con **0.06 m³/s**. Por

su parte, los datos de aforo muestran una tendencia similar, con mayores caudales durante la temporada lluviosa y menores registros durante los meses secos, aunque con valores inferiores a los simulados.

La similitud en el comportamiento estacional entre los caudales simulados y observados indica que el modelo SWAT representa de manera aceptable la dinámica hidrológica de la subcuenca. Asimismo, se evidencia que la disponibilidad hídrica superficial es mayor durante la temporada de lluvias y disminuye significativamente en la época seca, afectando directamente la disponibilidad de agua para riego.

En cuanto a la demanda agrícola, esta aumenta durante los periodos secos debido a la reducción de las precipitaciones y al incremento de la evapotranspiración. Como consecuencia, el balance hídrico presenta condiciones deficitarias durante la temporada seca, evidenciando la necesidad de implementar medidas de almacenamiento, regulación y gestión del recurso hídrico para garantizar el abastecimiento de agua en los meses críticos.

Los resultados obtenidos del cálculo de la demanda hídrica muestran que las necesidades de agua de los cultivos presentan una variación temporal asociada principalmente al comportamiento de la evapotranspiración y la precipitación efectiva. Se observó que la evapotranspiración del cultivo mantuvo valores relativamente constantes durante el año; sin embargo, la disminución de las precipitaciones durante determinados meses incrementó significativamente los requerimientos de riego.

Durante el mes de febrero se obtuvo una lámina neta negativa (**-0.31 mm/día**), lo cual evidencia que la precipitación efectiva fue suficiente para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos, reduciendo la necesidad de aplicar riego suplementario. Este comportamiento coincide con periodos de mayor disponibilidad hídrica y demuestra la influencia directa de las precipitaciones en la reducción de la demanda de agua para riego.

Asimismo, los mayores requerimientos hídricos se presentaron durante los meses de julio, agosto y septiembre, alcanzando un caudal máximo de **5.29 m<sup>3</sup>/s** en septiembre, considerado como el periodo crítico. Este incremento se encuentra asociado a la disminución progresiva de las precipitaciones y a una demanda hídrica agrícola elevada.

En relación con el balance hídrico sin proyecto, los resultados muestran que durante los primeros meses del año existe disponibilidad suficiente para satisfacer la demanda agrícola; sin embargo, a partir del mes de junio se presentan déficits hídricos que se incrementan gradualmente hasta alcanzar un valor crítico de **-5.28 m<sup>3</sup>/s** en septiembre. Esta situación evidencia una marcada insuficiencia de la oferta hídrica durante los periodos secos, afectando la disponibilidad de agua para las actividades agrícolas.

Los resultados obtenidos indican que, bajo las condiciones actuales de la quebrada Angostura, la disponibilidad natural del recurso hídrico no garantiza el abastecimiento continuo para fines de riego durante todo el año, justificando la necesidad de implementar sistemas de almacenamiento o infraestructura hidráulica que permitan regular y aprovechar los recursos disponibles.

## **V. CONCLUSIONES**

El modelo hidrológico SWAT permitió evaluar de manera satisfactoria la dinámica hidrológica y disponibilidad hídrica superficial en una cuenca con limitada información hidrométrica, validándose mediante campañas de aforo estratégico.

El balance hídrico evidenció que la oferta cubre la demanda agrícola únicamente de enero a mayo (con excedentes máximos de 3.45 m<sup>3</sup>/s en marzo); mientras que de junio a diciembre existen déficits, alcanzando su punto crítico en septiembre con -5.28 m<sup>3</sup>/s.

Debido a esta marcada variación estacional, la disponibilidad natural de la Quebrada Angostura no garantiza un abastecimiento continuo para el riego en época seca, lo que justifica técnicamente la implementación de obras de almacenamiento y regulación hídrica.

La subcuenca fue delimitada en 11 microcuencas internas y 93 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), lo que permitió capturar adecuadamente la variabilidad espacial del territorio.

La dinámica hidrológica, infiltración y escorrentía están condicionadas por el predominio de matorrales y cultivos con bosque, sumado a suelos con limitaciones severas y problemas de drenaje que favorecen la escorrentía ante lluvias intensas.

La oferta hídrica presenta un comportamiento fuertemente estacional, registrando los mayores caudales entre febrero y abril, y los menores caudales entre julio y septiembre (alcanzando un mínimo de 0.01m<sup>3</sup>/s en septiembre).

La demanda de agua para riego varía mensualmente en función de la evapotranspiración del cultivo (4.46 a 5.22 mm/día) y la precipitación efectiva.

El mayor requerimiento de agua coincide con el mes de septiembre, alcanzando un caudal pico de 5.29 m<sup>3</sup>/s, constituyendo el periodo más crítico para el abastecimiento de los cultivos en la subcuenca.

## **VI. RECOMENDACIONES**

Construir reservorios y estructuras de cosecha de agua para almacenar los excedentes hídricos del periodo húmedo y mitigar el déficit durante los meses críticos.

Promover e implementar sistemas de riego tecnificado para optimizar el aprovechamiento del agua, reducir pérdidas y mejorar la eficiencia en la distribución.

Instalar y mantener estaciones meteorológicas e hidrométricas permanentes, complementadas con campañas continuas de aforo, para disponer de datos de caudal confiables en tiempo real.

Actualizar periódicamente las variables de demanda y disponibilidad en el modelo SWAT, incorporando modelos hidrológicos complementarios para elevar la precisión de las estimaciones.

Desarrollar investigaciones y simulaciones prospectivas que permitan prever el impacto de escenarios climáticos futuros sobre la disponibilidad de agua y la demanda agrícola.

Implementar prácticas de conservación de suelos y protección de la cobertura vegetal en áreas de recarga hídrica para favorecer la infiltración y reducir la escorrentía superficial.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abawa, A., Berihune, Z., Teklemariam, A., & Wereta, E. (2024a). GIS and AHP-Based Assessment of Land Suitability and Water Availability for Surface Irrigation in Beles Sub-Basin, Ethiopia. *American Journal of Water Science and Engineering*, 10(4), 127-148.  
<https://doi.org/10.11648/j.ajwse.20241004.15>
- Abawa, A., Berihune, Z., Teklemariam, A., & Wereta, E. (2024b). GIS and AHP-Based Assessment of Land Suitability and Water Availability for Surface Irrigation in Beles Sub-Basin, Ethiopia. *American Journal of Water Science and Engineering*, 10(4), 127-148.  
<https://doi.org/10.11648/j.ajwse.20241004.15>
- ANA. (1978). *Estudio detallado de suelos de la cuenca piloto Quebrada de la Angostura*. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/1689>
- Arable. (2024). *Medición de la evapotranspiración y el coeficiente de cultivo: Una guía completa*. <https://www.arable.com/blog/medicion-de-la-evapotranspiracion-y-el-coeficiente-de-cultivo-una-guia-completa/>
- Arias, A. C. (2001). *Suelos Tropicales* (Euned). Universidad Estatal a Distancia.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/Suelos\\_Tropicales/L6TaVpWk8goC?hl=es&gbpv=1&dq=Propiedades+f%C3%ADsicas+del+suelo&pg=PA49&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/Suelos_Tropicales/L6TaVpWk8goC?hl=es&gbpv=1&dq=Propiedades+f%C3%ADsicas+del+suelo&pg=PA49&printsec=frontcover)
- Barranco, D., Fernandez, R., & Rallo, L. (2004). *El Cultivo del Olivo* (Mundi-Prensa). Consejería de Agricultura y Pesca.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/El\\_cultivo\\_del\\_olivo/OD6\\_8HdOsA8C?hl=es&gbpv=1&dq=EL+CULTIVO+DEL+OLIVO&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/El_cultivo_del_olivo/OD6_8HdOsA8C?hl=es&gbpv=1&dq=EL+CULTIVO+DEL+OLIVO&printsec=frontcover)
- Davila, T. (2010). *ONG y Estado: Participacion, rivalidad y cooperacion en la gestión ambiental* (Abya-Yala). Universidad Politécnica Salesiana.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/ONG\\_y\\_Estado/mjVGF6v0UwlC?hl=es&gbpv=1&dq=oferta+y+demandas+de+agua&pg=PA62&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/ONG_y_Estado/mjVGF6v0UwlC?hl=es&gbpv=1&dq=oferta+y+demandas+de+agua&pg=PA62&printsec=frontcover)
- De Santa-Olalla, F. M. (1994). *Desertificación en Castilla—La Mancha* (Universidad de Castilla-La Mancha).

- [https://www.google.com.pe/books/edition/Desertificaci%C3%B3n\\_en\\_Castilla\\_La\\_Mancha/X73m7HY3JugC?hl=es&gbpv=1](https://www.google.com.pe/books/edition/Desertificaci%C3%B3n_en_Castilla_La_Mancha/X73m7HY3JugC?hl=es&gbpv=1)
- Fenner, R. A. (2017). Water: An Essential Resource and a Critical Hazard. En J. Bishop (Ed.), *Building Sustainable Cities of the Future* (pp. 75-97). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-54458-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54458-8_5)
- Fuentes, J. L. (2003). *Técnicas de Riego* (Mundi-Prensa). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/T%C3%A9cnicas\\_de\\_riego/P-FBylgVfNoC?hl=es&gbpv=1&dq=riego&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/T%C3%A9cnicas_de_riego/P-FBylgVfNoC?hl=es&gbpv=1&dq=riego&printsec=frontcover)
- Jimenez, F., & Hernandez, R. (1990). *Estudio de la evapotranspiración Potencial en Honduras* (Secretaria de Recursos Naturales de Honduras, Dirección General de Recursos Hídricos). CATIE.  
[https://books.google.com.pe/books?id=69EOAQAIAAJ&newbks=0&printsec=frontcover&pg=PA3&dq=disponibilidad+h%C3%ADdrica+como+t%C3%A9rmico&hl=es&source=newbks\\_fb&redir\\_esc=y#v=onepage&q=disponibilidad%20h%C3%ADdrica%20como%20t%C3%A9rmico&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=69EOAQAIAAJ&newbks=0&printsec=frontcover&pg=PA3&dq=disponibilidad+h%C3%ADdrica+como+t%C3%A9rmico&hl=es&source=newbks_fb&redir_esc=y#v=onepage&q=disponibilidad%20h%C3%ADdrica%20como%20t%C3%A9rmico&f=false)
- Khadatare, M., Kadam, U., Mane, M., Mahale, D., Nandgude, S., Gharde, K., & Patil, S. (2024). Assessment of surface water availability in Arjuna river basin using ArcSWAT. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8(8), 385-390.  
<https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i8e.1813>
- kijne, J. W. (2003). *Descubrir el potencial del agua para la Agricultura* (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).  
[https://www.google.com.pe/books/edition/Descubrir\\_el\\_potencial\\_del\\_agua\\_para\\_la/Xcim4wML8gIC?hl=es&gbpv=0](https://www.google.com.pe/books/edition/Descubrir_el_potencial_del_agua_para_la/Xcim4wML8gIC?hl=es&gbpv=0)
- Lanza-Espino, G., Cáceres, C., Adame, S., & Hernandez, S. (1999). *Diccionario de Hidrología y Ciencias afines*. Plaza y Valdes Editores.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/Diccionario\\_de\\_hidrolog%C3%ADa\\_y\\_ciencias\\_af/My27250twg0C?hl=es&gbpv=1&dq=cuenca+hidrogr%C3%A1fica&pg=PA93&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/Diccionario_de_hidrolog%C3%ADa_y_ciencias_af/My27250twg0C?hl=es&gbpv=1&dq=cuenca+hidrogr%C3%A1fica&pg=PA93&printsec=frontcover)

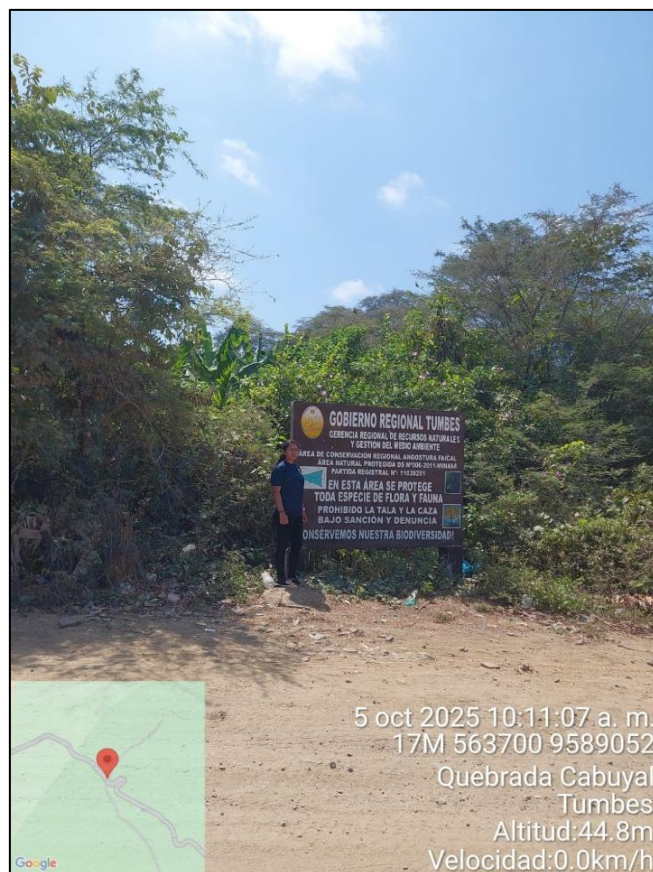
- Leandro, A. (2022). *Disponibilidad Hídrica en la Cuenca del Río Coata—Puno, para el periodo 1990 -2013, Usando el modelos Hidrológico GR4J* [Universidad Nacional Federico Villarreal]. chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgiclfndmkaj/https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/6776/UNFV\_FIGAE\_Leandro\_Pelaez\_Alexander\_Jonathan\_Titulo\_profesional\_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Leiton, J. S. (1985). *Riego y Drenaje* (Euned). Universidad Nacional Estatal a Distancia.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/Riego\\_Y\\_Drenaje/\\_yuPFwKJ6ywC?hl=es&gbpv=1](https://www.google.com.pe/books/edition/Riego_Y_Drenaje/_yuPFwKJ6ywC?hl=es&gbpv=1)
- Maderey, L. E. (with Jiménez, A.). (2005). *Principios de Hidrogeografía Estudio del Ciclo Hidrológico* (Unam, Vol. 1).  
[https://www.google.com.pe/books/edition/Principios\\_de\\_Hidrogeografia\\_Estudio\\_Del/0S3XDWsDzSAC?hl=es&gbpv=1&dq=infiltracion&pg=PA57&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/Principios_de_Hidrogeografia_Estudio_Del/0S3XDWsDzSAC?hl=es&gbpv=1&dq=infiltracion&pg=PA57&printsec=frontcover)
- Mamani, F. (2023). *Evaluación de la Disponibilidad Hídrica bajo las condiciones de cambio climático y propuesta de mejora hídrica en la microcuenca Huenque—Llave, 2021* [Universidad Nacional del Altiplano].  
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/19755>
- MIDAGRI. (2020, de Setiembre de). *Disponibilidad hídrica y el uso planificado del agua es importante para la agricultura*.  
<https://www.gob.pe/institucion/midagri/noticias/297559-minagri-disponibilidad-hidrica-y-el-uso-planificado-del-agua-es-importante-para-la-agricultura>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2008). *Plan Nacional de Regadío—Horizonte 2008* [Informativa].  
[https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/actuaciones-regadios/default\\_2.1.1.1.aspx](https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/actuaciones-regadios/default_2.1.1.1.aspx)
- Morales, D. (2022). *Disponibilidad Hídrica mediante sistemas de riego presurizado en épocas de estiaje en la localidad de Coema, distrito de San Francisco de Cayran, Huánuco 2021* [Informativo, Universidad

- Continental].  
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12282>
- Mwelwa, D., Tena, T. M., Nguvulu, A., Mwaanga, P., & Taye, G. (2025). Surface water availability in ungauged catchments of Sub-Saharan Africa: A case study from Luwombwa sub-catchment, Zambia. *Water Science*, 39(1), 42-57. <https://doi.org/10.1080/23570008.2024.2439586>
- Pernia LLera, J. M., & Fornes Azcoiti, J. M. (2008). *Cambio Climático y Agua Subterránea*.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/Cambio\\_Climatico\\_y\\_Agua\\_Subterranea/9HXcZLzgXr4C?hl=es&gbpv=1&dq=impacto+de+fen%C3%B3menos+clim%C3%A1ticos+en+la+disponibilidad+de+agua&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/Cambio_Climatico_y_Agua_Subterranea/9HXcZLzgXr4C?hl=es&gbpv=1&dq=impacto+de+fen%C3%B3menos+clim%C3%A1ticos+en+la+disponibilidad+de+agua&printsec=frontcover)
- Quispe, K., & Huanca, C. (2021). *Evaluación de la Disponibilidad Hídrica en la cuenca llave bajo escenarios del cambio climático* [Universidad Peruana Unión]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://repositorio.upeu.edu.pe/server/api/core/bitstreams/75fbf998-6d1d-47e1-a6ef-8d2db6c61b42/content>
- Rujel, B. (2022). *Plan de Manejo y Gestión de la Subcuenca de la Quebrada Angostura—Cabuyal—Distrito de Pampas de Hospital Tumbes 2021-2022* [Universidad Nacional de Tumbes].  
[https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/63901?utm\\_source=chatgpt.com](https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/63901?utm_source=chatgpt.com)
- Secretaría de Educación Pública. (1985). *Riego y Drenaje* (Trillas).  
[https://www.google.com.pe/books/edition/Riego\\_Y\\_Drenaje/Chy5vADO63AC?hl=es&gbpv=0](https://www.google.com.pe/books/edition/Riego_Y_Drenaje/Chy5vADO63AC?hl=es&gbpv=0)
- Sekaranom, A. B., Purnama, I. G. S., Cahyadi, A., Andika, N., Febriarta, E., Nurjani, E., Firmansyah, A. J., Maghfiroh, A., Larasati, C., & Septyo, N. D. (2022). Analysis of Surface Water Availability to Meet Agricultural Water Demands in Kediri Regency, Indonesia. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 39(3).  
<https://doi.org/10.29037/ajstd.871>

- Torres-Suárez, S. L., Bolaños-González, M. A., Ibáñez-Castillo, L. A., Quevedo-Nolasco, A., Arteaga-Ramírez, R., Rico-Sánchez, A. E., & Vaquera-Huerta, H. (2024). Spatial-temporal surface water availability in the Tulancingo river basin, Hidalgo, México. *Agrociencia*.  
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i4.2904>
- Valverde, J. C. (1985). *Riego y Drenaje*. Euned.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/Riego\\_Y\\_Drenaje/Chy5vADO63AC?hl=es&gbpv=0](https://www.google.com.pe/books/edition/Riego_Y_Drenaje/Chy5vADO63AC?hl=es&gbpv=0)
- Pernia LLera, J. M., & Fornes Azcoiti, J. M. (2008). *Cambio Climático y Agua Subterránea*.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/Cambio\\_Climatico\\_y\\_Agua\\_Subterranea/9HXcZLzgXr4C?hl=es&gbpv=1&dq=impacto+de+fen%C3%B3menos+clim%C3%A1ticos+en+la+disponibilidad+de+agua&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/Cambio_Climatico_y_Agua_Subterranea/9HXcZLzgXr4C?hl=es&gbpv=1&dq=impacto+de+fen%C3%B3menos+clim%C3%A1ticos+en+la+disponibilidad+de+agua&printsec=frontcover)
- MIDAGRI. (2020, de Setiembre de). *Disponibilidad hídrica y el uso planificado del agua es importante para la agricultura*.  
<https://www.gob.pe/institucion/midagri/noticias/297559-minagri-disponibilidad-hidrica-y-el-uso-planificado-del-agua-es-importante-para-la-agricultura>

## ANEXOS

**Anexo 1.** Exploración del área de estudio y áreas agrícolas.



**Anexo 2.** Vista de las parcelas agrícolas con los cultivos predominantes.



**Anexo 3.** Exploración de parcelas con dron para la inspección de los cultivos predominantes.



**Anexo 4.** Preparando el equipo para realizar el aforo en la Quebrada Cabuyal con apoyo profesional técnico del ANA.



**Anexo 5.** Participación y sugerencias del personal Técnico del ANA.



**Anexo 6.** Realizando las mediciones del fondo del Cauce de la Quebrada.



**Anexo 7.** Midiendo el ancho del cauce de la Quebrada para posteriormente realizar los cálculos correspondientes.



**Anexo 8.** Conversatorio con personas del Sector y representantes de juntas de usuarios.

