

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“EVALUACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DE MODELOS  
HIDROLÓGICOS SEGÚN LA CONCEPTUALIZACIÓN DE SU  
DISCRETIZACIÓN”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRICOLA**

**GABRIEL ANTONIO CÁRDENAS BELLEZA**

**LIMA – PERÚ**

**2020**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA**

**“EVALUACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DE MODELOS  
HIDROLÓGICOS SEGÚN LA CONCEPTUALIZACIÓN DE SU  
DISCRETIZACIÓN”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TITULO DE:  
**INGENIERO AGRÍCOLA**

Presentado por:

**BACH. GABRIEL ANTONIO CÁRDENAS BELLEZA**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. ABSALÓN VÁSQUEZ VILLANUEVA  
Presidente

Dra. LÍA RAMOS FERNÁNDEZ  
Asesor

Mg. Sc. TORIBIO SEBASTIÁN SATAYANA VELA  
Miembro

Arq. TAÍCIA HELENA NEGRIN MARQUES  
Miembro

LIMA – PERU

2020

## ÍNDICE GENERAL

<b>I. Presentación .....</b>	<b>1</b>
1.1. Consultora ambiental INSIDEO .....	1
1.2. Instituto independiente de investigación aplicada Deltares .....	2
1.3. Consultora de proyectos de inversión HC & Asociados.....	3
<b>II. Introducción .....</b>	<b>4</b>
<b>III. Objetivos .....</b>	<b>6</b>
<b>IV. Desarrollo del trabajo .....</b>	<b>7</b>
4.1. Modelo agregado .....	8
4.1.1. Descripción del proyecto .....	8
4.1.2. Información base .....	8
4.1.3. Desarrollo del proyecto .....	11
4.1.4. Contribución .....	22
4.2. Modelo semidistribuido .....	23
4.2.1. Descripción del proyecto .....	23
4.2.2. Información base .....	23
4.2.3. Desarrollo del proyecto .....	27
4.2.4. Contribución .....	40
4.3. Modelo distribuido.....	42
4.3.1. Descripción del proyecto .....	42
4.3.2. Información base .....	43
4.3.3. Desarrollo del proyecto .....	48
4.3.4. Contribución .....	56
4.4. Discusión de ventajas y desventajas .....	56
4.4.1. Modelo agregado .....	56
4.4.2. Modelo semidistribuido.....	57
4.4.3. Modelo distribuido .....	59

<b>V. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>61</b>
5.1. Conclusiones .....	61
5.2. Recomendaciones .....	62
<b>VI. Referencias .....</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estaciones hidrométricas y meteorológicas consideradas para el análisis del sistema kárstico Milandre .....	9
Tabla 2: Índices de bondad de ajuste en simulaciones a escala horaria del sistema kárstico Milandre para el periodo de calibración (09/1992 - 12/1992) .....	19
Tabla 3: Parámetros calibrados con PEST para el modelo integrado del sistema Milandre. ....	20
Tabla 4: Índices de bondad de ajuste en simulaciones a escala horaria del sistema kárstico Milandre para el periodo total (09/1992 - 03/1995).....	22
Tabla 5: Unidades hidrográficas en evaluación para el proyecto Pinaya.....	25
Tabla 6: Estaciones meteorológicas y parámetros considerados para el proyecto Pinaya	25
Tabla 7: Parámetros geomorfológicos de las microcuencas del proyecto Pinaya.....	28
Tabla 8: Ubicación de puntos de evaluación hidrológica para el proyecto Pinaya.....	31
Tabla 9: Características principales de las microcuencas del proyecto Pinaya.....	33
Tabla 10: Índices de bondad de ajuste en simulaciones a escala mensual del proyecto Pinaya .....	35
Tabla 11: Parámetros del modelo de caudales promedio mensuales por microcuenca de interés en área del proyecto Pinaya.....	36
Tabla 12: Balance hídrico en condición actual en microcuencas CA-02 y CA-04 (hm <sup>3</sup> ) proyecto Pinaya.....	39
Tabla 13: Balance hídrico en condición futura en microcuencas CA-02 y CA-04 (hm <sup>3</sup> ) para el proyecto Pinaya .....	41
Tabla 14: Estación hidrométrica Rwambwa ubicada en la cuenca Nzoia.....	46
Tabla 15: Información utilizada para el modelamiento hidrológico de la cuenca Nzoia....	47
Tabla 16: Análisis de sensibilidad del modelo inicial a los sets de datos meteorológicos para la cuenca Nzoia .....	51
Tabla 17: Índices de bondad de ajuste a escala diaria para el modelo de la cuenca Nzoia para diferentes sets de datos.....	53
Tabla 18: Comparación de valores de parámetros calibrados para el modelo de la cuenca Nzoia por set de datos .....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Ubicación de sistema kárstico Milandre.....	9
Figura 2:	Comparación de hidrograma horario de caudal observado en el manantial Bâme y hietograma horario de precipitaciones (24/09/1992 – 27/03/1995).....	10
Figura 3:	Representación del sistema kárstico (panel izquierdo) y estratigrafía del sistema kárstico Milandre (panel derecho) .....	11
Figura 4:	Climograma horario en la estación Fahyp (24/09/1992 – 23/04/1995).....	12
Figura 5:	Modelo conceptual del sistema epikárstico Milandre .....	14
Figura 6:	Modelo conceptual de aguas subterráneas del sistema kárstico Milandre .....	15
Figura 7:	Modelo conceptual de agua subterránea en Milandre de una rama (izquierdo), de múltiples ramas (central) y discretización espacial en MODFLOW (derecho) 16	
Figura 8:	Esquema secuencial del cálculo, retroalimentación y calibración del modelo numérico integrado del sistema kárstico Milandre (panel izquierdo) y esquema gráfico del proceso de integración del modelo epikárstico con el modelo de aguas subterráneas (panel derecho) .....	18
Figura 9:	Hidrograma horario de caudal observado y simulado en el periodo de calibración del modelo integrado del sistema kárstico Milandre (09/1992 – 12/1992) .....	19
Figura 10:	Hidrograma horario de caudal observado y simulado en el periodo total del modelo integrado del sistema kárstico Milandre (09/1992 – 03/1995) .....	21
Figura 11:	Ubicación del proyecto Pinaya .....	24
Figura 12:	Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas en el área de estudio Pinaya... ..	26
Figura 13:	Hidrograma de caudales promedio mensuales en estaciones hidrométricas del proyecto Pinaya .....	27
Figura 14:	Esquema hidráulico del proyecto Pinaya y el área de estudio hidrológico .....	32
Figura 15:	Hidrograma diario del caudal simulado y observado en estación Lagunillas (1970 – 1984).....	34
Figura 16:	Hidrograma diario del caudal simulado y observado en estación Bamputañe (1970 – 1973).....	34

Figura 17: Hidrograma de caudales promedio mensuales en puntos de evaluación en el proyecto Pinaya (1970 – 2013).....	37
Figura 18: Balance hídrico en condición futura (hm <sup>3</sup> ) para la microcuenca CA-02 (panel superior) y para la microcuenca CA-04 (panel inferior) .....	40
Figura 19: Ubicación de la cuenca del río Nzoia .....	43
Figura 20: Hidrograma diario de caudal observado de la estación de aforo del río Rwambwa en cuenca Nzoia (2010-2016).....	46
Figura 21: Hidrograma diario del caudal observado y simulado por los modelos EF5 y AWBM para la cuenca Nzoia (01/11/2010 - 30/07/2012).....	49
Figura 22: Comparación de los valores mensuales de precipitaciones por set de datos para la cuenca Nzoia (2001 – 2014).....	49
Figura 23: Comparación de los valores de evapotranspiración de referencia por set de datos para la cuenca Nzoia (2002) .....	50
Figura 24: Hidrograma diario de caudal simulado y observado usando set de datos CHIRPS v.2.0 en la cuenca Nzoia (1995 – 2014) .....	53
Figura 25: Hidrograma diario de caudal simulado usando set de datos CHIRPS v.2.0 en la cuenca Nzoia (1985 – 2014).....	54

## I. PRESENTACIÓN

Consultor en recursos hídricos con un grado de maestría en *Groundwater and Global Change – Impacts and Adaptation*, habiendo cursado sus estudios de maestría en la Universidad Técnica de Lisboa (Portugal), IHE Delft *Institute for Water Education* (Países Bajos) y *Technische Universität Dresden* (Alemania).

Especializado en análisis de datos, así como en la evaluación y modelamiento de sistemas hídricos. Tiene experiencia en la evaluación de los recursos hídricos tanto en consultoría de proyectos mineros, hidro-energéticos y agrícolas, como en investigación relacionada principalmente a la evaluación de la integración de modelos de agua superficial y subterránea.

A continuación, se presentan las funciones específicas desempeñadas durante el desarrollo profesional en cada centro de labores, en orden cronológico. Además, se incluye la vinculación de dichas funciones con los campos temáticos de la carrera de ingeniería agrícola.

### 1.1. CONSULTORA AMBIENTAL INSIDEO

Se desempeñó como consultor ambiental durante el periodo enero 2015 y abril 2020.

**Vinculación con la carrera y funciones desempeñadas:** en el área de hidrología, se realizaron actividades de análisis y control de calidad de datos hidrometeorológicos de series de tiempo. Asimismo, se participó en la evaluación de eventos de precipitación extrema y el análisis de tormentas, el cálculo de curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF), así como de tormentas de diseño. Además, se desarrolló modelamiento hidrológico para la simulación de caudales para periodos promedio y de máximas avenidas. Se desarrollaron trabajos en campo como ensayos de infiltración, aforos de cauces, inspección de manantiales y filtraciones.

En el área de hidrogeología se realizó análisis de datos de cargas hidráulicas e información geoespacial para la conceptualización de los procesos, así como desarrollo de modelos

hidrogeológicos para evaluación de trayectoria de partículas y comportamiento de flujo subterráneo.

En el área de hidráulica, se desarrollaron modelos hidráulicos para definir la extensión de llanuras de inundación y delimitar fajas marginales.

En el área de ambiental, se trabajó en el análisis y descripción de características ambientales en líneas base meteorológica, hidrográfica, hidrológica e hidrogeológica, así como en el desarrollo de mediciones de calidad de agua, sedimentos, ruido y ondas electromagnéticas.

**Aspectos de la puesta en práctica:** durante este periodo de desarrollo profesional, las actividades estuvieron diversificadas en la evaluación de diferentes áreas temáticas de los recursos hídricos y su vinculación con el medio ambiente.

El currículo de cursos de la carrera, en su integridad, fue fundamental en la formación académica y profesional. Sin embargo, los cursos más importantes para las funciones desempeñadas fueron aguas subterráneas, hidrología, hidráulica e ingeniería del agua y medio ambiente. Cabe dar especial importancia a las sesiones desarrolladas en las parcelas demostrativas en cuanto estas ofrecieron las herramientas básicas de lo que finalmente se enfrenta durante un trabajo de campo de carácter profesional.

Un aspecto que demuestra la capacidad profesional se observa en la familiaridad para la construcción de modelos conceptuales en sistemas hídricos. Esta habilidad adquirida es el resultado de una formación académica que brindó los conocimientos básicos y la experiencia profesional de los diferentes proyectos en los que se estuvo envuelto.

## **1.2. INSTITUTO INDEPENDIENTE DE INVESTIGACIÓN APLICADA DELTARES**

Se desempeñó como pasante desde agosto a setiembre de 2018 y como investigador entre marzo y agosto de 2019.

**Vinculación con la carrera y funciones desempeñadas:** en el área de hidrogeología, se participó en la evaluación de conceptualizaciones de modelos hidrogeológicos para verificar influencia de componentes hidrológicos. En el área de hidráulica, se participó en la conceptualización y desarrollo de modelos hidráulicos para definición de cargas hidráulicas. En el área de hidrología, se realizó análisis de datos meteorológicos de imágenes satelitales de

modelos globales y continentales, De igual manera, se desarrollaron modelos hidrológicos para simular condiciones de flujos para manejo agrícola.

**Aspectos de la puesta en práctica:** durante este periodo la labor estuvo diversificada en la evaluación de diferentes áreas temáticas de los recursos hídricos. Sin embargo, el enfoque afrontado fue de carácter investigativo.

Los cursos que mayor impacto tuvieron en la formación académica de acuerdo a las labores desempeñadas fueron: aguas subterráneas, hidrología, hidráulica computacional y percepción remota y SIG. Cabe resaltar los conocimientos adquiridos en programación computacional en cuanto ellos fueron la base para la automatización de procesos que hoy son indispensable en el ámbito de la investigación.

La capacidad profesional se demostró en el desarrollo de actividades que no se limitaron a los conocimientos adquiridos en aulas. Se tuvo que aplicar lo aprendido en la evaluación de procesos relacionados al sistema hídrico desde un punto de vista holístico (integración de modelos superficiales y subterráneos).

### **1.3. CONSULTORA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN HC & ASOCIADOS**

Se desempeñó como asistente de ingeniería durante el periodo noviembre 2013 y febrero 2014.

**Vinculación con la carrera y funciones desempeñadas:** se construyeron modelos hidráulicos para simulación de operación de estructuras hidráulicas de captación y definición de dimensionamiento, conjuntamente con la cuantificación de flujos de máximas avenidas para determinar caudales de diseño. Esto se encuentra vinculado a las áreas de hidráulica e hidrología.

**Aspectos de la puesta en práctica:** esta primera experiencia profesional estuvo relacionada al diseño hidráulico de proyectos de irrigación. Los cursos que mejor representaron los conocimientos requeridos fueron estructuras hidráulicas e hidrología. Además, la capacidad profesional demostrada durante esta etapa recae en el uso conjunto de conocimientos de diferentes áreas temáticas (análisis hidrológico y modelamiento hidráulico) para lograr un objetivo: diseño de una bocatoma.

## II. INTRODUCCIÓN

El agua fresca es un recurso escaso, indispensable para el bienestar humano, que se encuentra bajo amenaza. Más del 40% de la población mundial está afectada por escasez de agua, lo que se ve agravado por una creciente presión demográfica y el aumento de prácticas de consumo de agua no sostenibles (UNESCO, 2020; Foglia *et al.*, 2018).

Este contexto evidencia la importancia de una gestión asertiva de los recursos hídricos que devenga en un proceso confiable de toma de decisiones. Sin embargo, la planificación, diseño y gestión de sistemas hídricos implican la predicción de los potenciales impactos asociados a estos, lo que además involucra su modelización (Loucks y van Beek, 2005). La evaluación de la problemática hídrica suele estar fundamentada en modelos físicos y/o estadísticos, conceptuales o numéricos, que buscan la mejor representatividad posible del medio. No obstante, dicha representatividad depende tanto de la calidad de los datos utilizados como de la conceptualización asumida.

Chow *et al.* (1988) clasifican los modelos hidrológicos sobre la base de, entre otros, la variación espacial de los procesos hídricos. De esta manera, mientras los modelos agregados consideran valores paramétricos que caracterizan en promedio una unidad hidrológica, los modelos distribuidos consideran unidades hidrológicas representadas por parámetros que varían espacialmente.

Es de común asociación que conceptualizaciones más complejas de modelos hidrológicos (como los distribuidos) producen resultados más precisos, desestimando modelos más simples como es el caso de los agregados. Debido a ello, es común que profesionales en hidrología se centren exclusivamente en modelizaciones de carácter distribuido aun cuando restricciones en la disponibilidad de datos puedan derivar en resultados sesgados y poco confiables.

La monografía presenta la importancia del uso de diferentes conceptualizaciones de la discretización de modelos hidrológicos. Para ello, se presentan tres casos de estudio en los que se usaron modelos agregados, semidistribuidos y distribuidos para distintos fines de análisis.

El primer caso presenta la integración de un modelo hidrológico agregado (de creación propia) que representa el sistema epikárstico y un modelo hidrogeológico (a través del *software* MODFLOW) de un sistema kárstico en la cuenca Milandre, Suiza. El acoplamiento de este sistema superficial mejoró la representación de los eventos de tormenta, permitiendo simular los picos de caudales a la salida del sistema subterráneo.

El segundo caso, enfocado en el uso de un modelo semidistribuido, muestra la evaluación hidrológica de una cuenca altoandina donde, posteriormente, se realizaron labores de exploración minera (Puno, Perú). Este modelo (construido en el *software* HEC-HMS), principalmente basado en mediciones *in situ*, permitió simular los flujos promedios en las áreas de estudio.

El tercer caso es la simulación hidrológica distribuida de una cuenca agrícola ubicada en Nzoia (Kenia). El objetivo final buscaba evaluar el riesgo de inundaciones por cambio climático en el área agrícola circundante. Se participó en la primera etapa del proyecto, que consistió en la construcción del modelo hidrológico (desarrollado en el *software* EF5/CREST). Éste fue realizado en su totalidad con datos de imágenes satelitales de precipitación, evapotranspiración de referencia y topografía, en cuanto la información *in situ* no estaba disponible. Los resultados demostraron un ajuste satisfactorio a los caudales observados (Moriassi *et al.*, 2007). Este modelo fue usado posteriormente por otros profesionales para las siguientes etapas del proyecto en donde se evaluaron eventos extremos en distintos escenarios de cambio climático.

A través de estos casos de estudio se buscó demostrar que la conceptualización de un modelo hidrológico es más importante que la naturaleza de su discretización, aunque dependerá de la información disponible.

### **III. OBJETIVOS**

Esta monografía tiene como objetivo general demostrar que diferentes conceptualizaciones de la discretización de modelos hidrológicos son igualmente útiles y funcionales.

Los objetivos específicos de esta monografía son los siguientes:

- Describir las características propias de los tres casos de estudio, destacando las condiciones de cada tipo de modelo hidrológico (agregado, semidistribuido, distribuido).
- Describir las ventajas y desventajas asociadas al uso de cada tipo de modelo hidrológico considerado y compararlas entre ellas.
- Relacionar los resultados obtenidos de los modelos hidrológicos con el objetivo particular de cada proyecto.

#### **IV. DESARROLLO DEL TRABAJO**

De acuerdo al objetivo general de la monografía, el uso de modelos hidrológicos con diferentes tipos de discretización debe ser considerado igualmente relevante. Por ello, a continuación, se presentan tres casos de estudio con aplicación de modelos agregados, semidistribuidos y distribuidos para distintos fines de análisis.

Este capítulo está dividido en cuatro secciones. Cada una de las tres primeras expone un caso de estudio específico. A su vez, cada sección está dividida en cuatro subsecciones.

La primera subsección presenta el contexto que motiva el desarrollo del proyecto, haciéndose énfasis en su problemática y los factores que lo enmarcan (*e.g.* normativa, políticas, etc.). La segunda subsección presenta la información de línea base que se usó para el desarrollo del estudio (*e.g.* meteorología, hidrometría, estudios previos, etc.).

La tercera subsección comprende el desarrollo del proyecto y presenta los resultados obtenidos, demostrando las capacidades aprendidas. Esta sección usa como base la información de la segunda subsección. La cuarta subsección: resume puntualmente la contribución profesional en el proyecto.

Finalmente, la cuarta sección de este capítulo incluye las discusiones generales en cuanto al uso de cada tipo de modelo hidrológico, resaltando su influencia en el contexto utilizado.

De esta manera, se buscó demostrar la capacidad profesional para enfrentar y dar solución a los problemas presentados en los proyectos. Asimismo, se pretende dejar en evidencia en qué medida el centro laboral se vio beneficiado por su contribución.

## **4.1. MODELO AGREGADO**

Proyecto “*Karst Modelling Challenge*”.

### **4.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

El proyecto se enmarca en la iniciativa *Karst Modelling Challenge* (KMC). Esta iniciativa estuvo destinada a comparar diversos enfoques, modelos e instrumentos que se pueden utilizar para el modelamiento de sistemas kársticos. Tuvo como eje la evaluación del esfuerzo, la eficiencia y la capacidad de reflejar el comportamiento del sistema.

El objetivo de este proyecto fue construir un modelo conceptual y numérico de flujo subterráneo para el sistema kárstico Milandre que pueda representar adecuadamente su comportamiento hidrológico e hidrogeológico. Para ello, se desarrolló un modelo conceptual que comprendió los principales procesos hídricos en el área de estudio y se optimizaron los resultados a través de un método de modelamiento inverso.

### **4.1.2. INFORMACIÓN BASE**

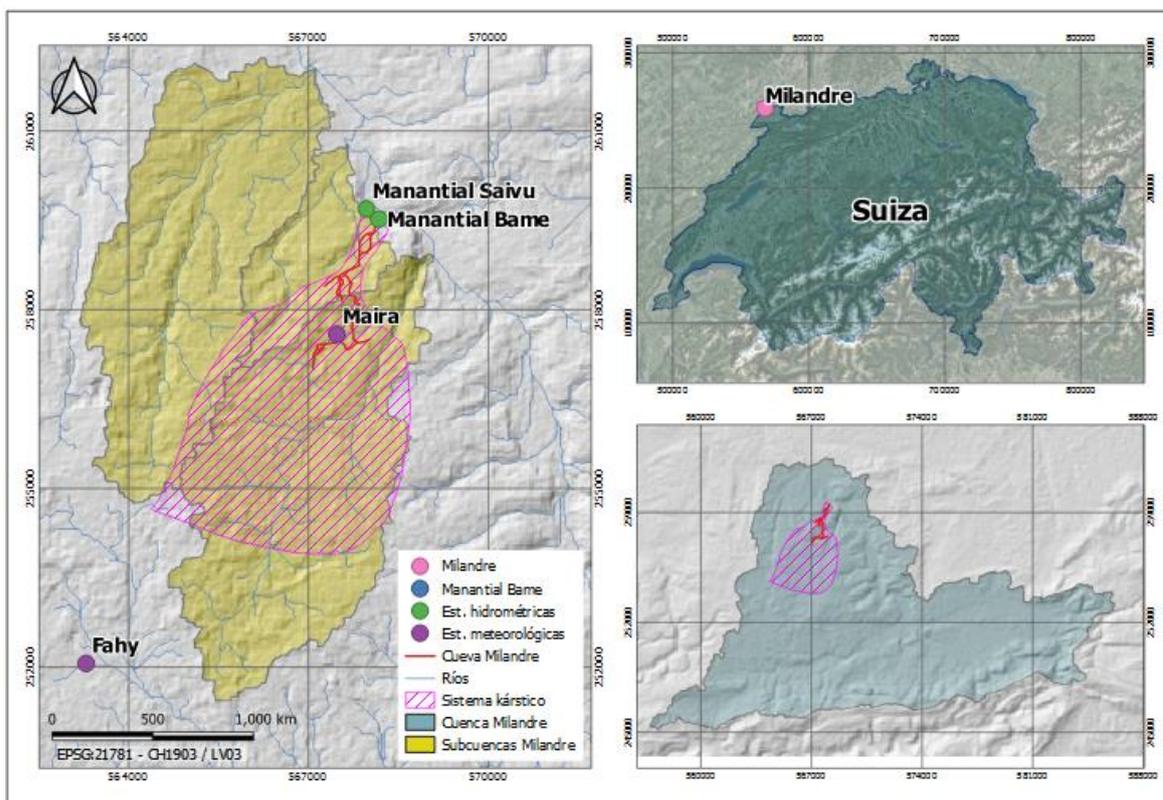
La Figura 1 muestra el sistema kárstico de Milandre (área de estudio). Está ubicado al noroeste de Suiza, cerca de la frontera francesa, en el borde oriental de las montañas del Jura (Pierre-Yves Jeannin *et al.*, 2016).

Se ha convertido en un sitio popular para estudios académicos debido a su extenso sistema de cuevas accesibles. Su cueva principal recorre hasta 5 km aguas arriba del manantial donde descarga el sistema: la Bâme. Además, tiene una longitud total de cuevas cartografiadas igual a 10,5 km, (Pierre-Yves Jeannin *et al.*, 2016). Asimismo, posee detallados registros meteorológicos, de cargas hidráulicas, aforos de manantial y numerosos ensayos de trazadores.

#### **a. CLIMA E HIDROLOGÍA**

La Tabla 1 muestra las estaciones con información hidrométrica y meteorológica disponible en el área de estudio. Se tuvieron registros horarios de caudales de dos manantiales ubicados dentro del área de estudio (Saivu y Bâme) así como información meteorológica horaria de dos estaciones, una dentro del área de estudio y otra fuera de esta, para el período 1992 - 1994. El caudal promedio a la salida del sistema (manantial Bâme) es alrededor de  $300 \text{ l s}^{-1}$ .

En la Figura 1 se presenta la ubicación de las estaciones consideradas para el análisis hidroclimático.



**Figura 1: Ubicación de sistema kárstico Milandre**

Nota: (Panel izquierdo) Ubicación de sistema kárstico Milandre, subcuencas y estaciones hidrometeorológicas. (Panel derecho superior) Ubicación sistema kárstico Milandre a nivel nacional. (Panel derecho inferior) Ubicación del área de estudio en cuenca hidrológica Milandre. Fuente: Adaptado de Perrin (2003), KMC (2018)

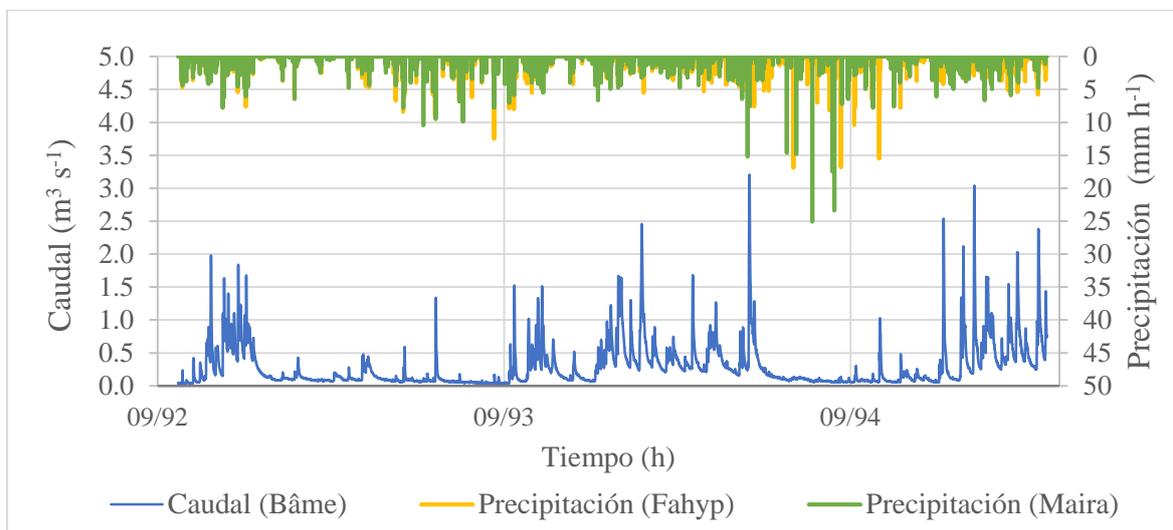
**Tabla 1: Estaciones hidrométricas y meteorológicas consideradas para el análisis del sistema kárstico Milandre**

Estación	Este <sup>1</sup> (m)	Norte <sup>1</sup> (m)	Altitud (m)	Tipo
Manantial Saivu	567970	259700	388	Hidrométrica
Manantial Bâme	568175	259530	407	Hidrométrica
Maira	567475	257600	516	Pluviométrica
Fahyp	563300	252050	571	Meteorológica

Nota: (1) Coordenadas UTM, CH1903/LV03. Fuente: Adaptado de KMC (2018)

La temperatura en el sistema Milandre varía de  $-14^{\circ}\text{C}$  a  $32^{\circ}\text{C}$ , con un promedio de  $9^{\circ}\text{C}$ . El régimen de precipitación es estacional, con un período seco de mayo a octubre y un período húmedo entre noviembre y abril.

Sin embargo, se observaron discrepancias entre la ocurrencia de precipitaciones y la descarga registrada. En la Figura 2 se muestra el hidrograma del manantial Bâme y el hietograma de la estación Fayeh, destacándose en agosto de 1994 la ocurrencia de una mayor precipitación sin verse esto reflejado en la oferta de agua. Ello fue uno de los motivos principales para el desarrollo del estudio.



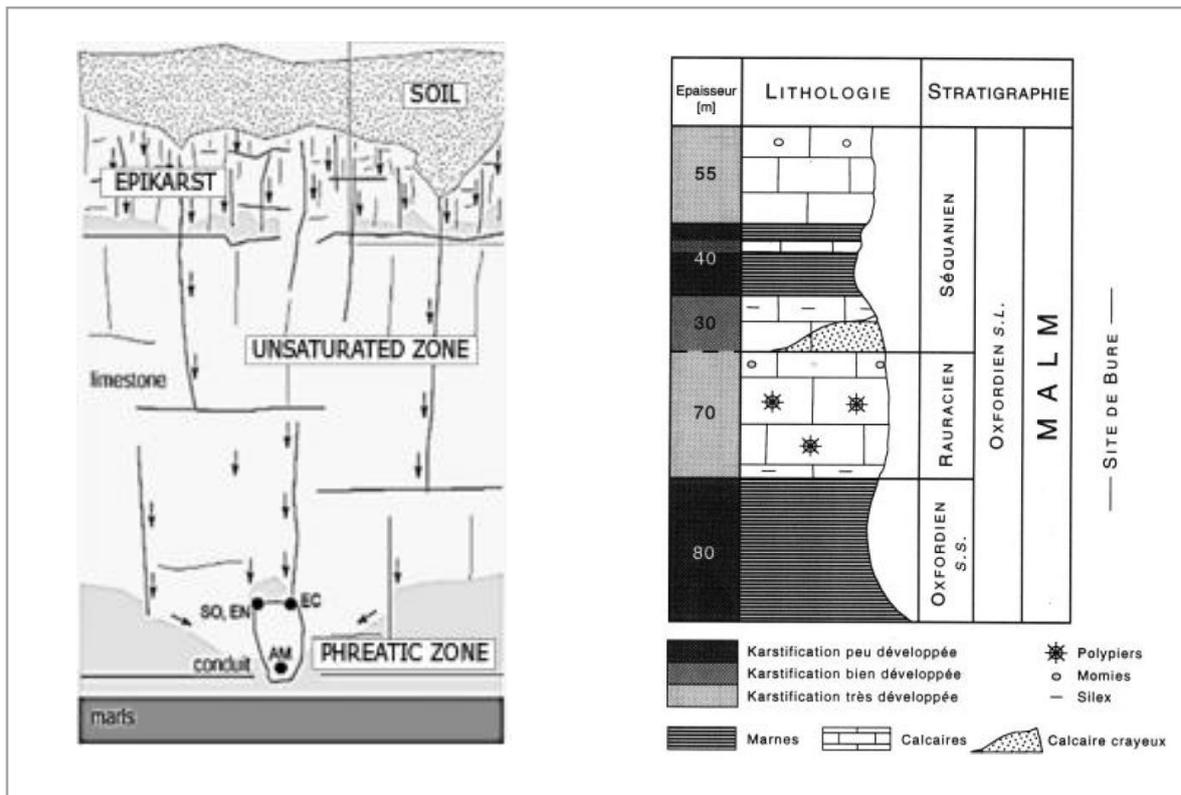
**Figura 2: Comparación de hidrograma horario de caudal observado en el manantial Bâme y hietograma horario de precipitaciones (24/09/1992 – 27/03/1995)**

Fuente: Adaptado de KMC (2018)

### a. Geología e hidrogeología

De acuerdo con Perrin (2003), la cuenca kárstica se delimitó mediante sucesivos ensayos de trazadores, permitiendo determinar que su área aproximada era de 13 km<sup>2</sup>. La principal formación geológica de este sistema kárstico es una caliza compacta llamada Rauracain, con abundantes corales y un espesor de entre 60 y 76 metros. Por encima de esta formación, hay un depósito cuaternario de margas limosa que tiene entre 0 y 20 metros de espesor, siendo esta unidad el principal acuífero del sistema. Esta se encuentra limitada por debajo por margas oxfordianas. La litología del sistema Milandre se representa en la Figura 3 panel derecho.

La recarga desde la cuenca superficial es principalmente de carácter difusa a través del suelo, sin evidencia de alguna conexión poco profunda que comunique el sistema kárstico con la superficie (Perrin, 2003). Se encontró que el área de estudio tiene cuatro capas sub horizontales principales: la capa superior de suelo, la zona epikárstica, la zona no saturada y la zona freática donde se encuentra el sistema de cuevas. Esta descripción se muestra en la Figura 3 panel izquierdo.



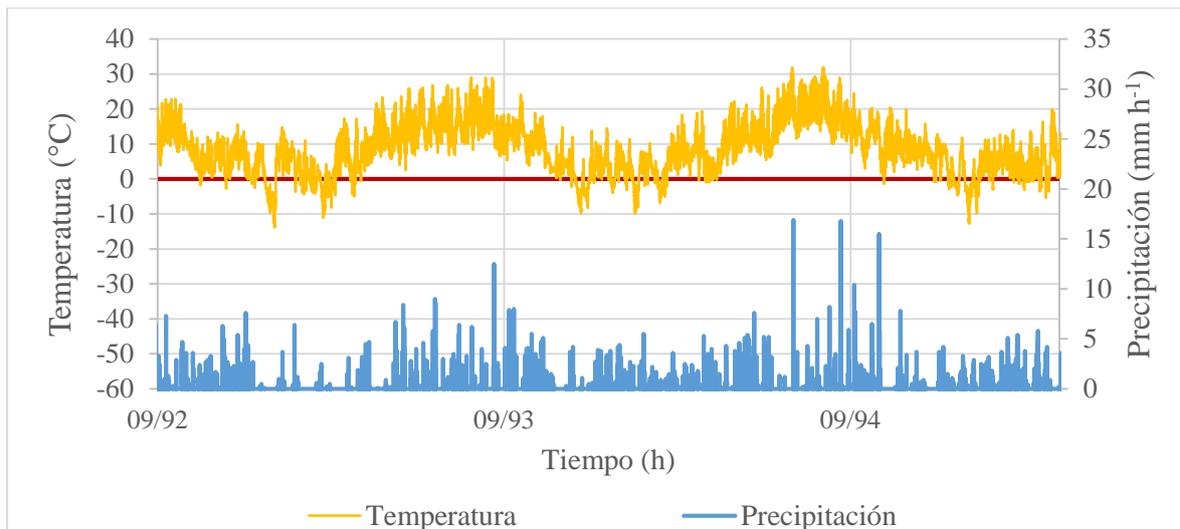
**Figura 3: Representación del sistema kárstico (panel izquierdo) y estratigrafía del sistema kárstico Milandre (panel derecho)**

Fuente: Adaptado de Perrin (2003)

#### 4.1.3. DESARROLLO DEL PROYECTO

##### a. Análisis de datos hidroclimáticos

A pesar de que la estación Maira está situada dentro del área de estudio, la estación Fahyp presentó una mayor extensión de registro de precipitación y temperatura horaria. De esta manera, sobre la base de ambos registros mencionados, se realizaron estimaciones de la evapotranspiración y la recarga. Cabe mencionar que, entre ambas estaciones, la diferencia de elevación no es notable (alrededor de 50 m) y la distancia es alrededor a 6 km. Además, en la Figura 2 se observa la ocurrencia de eventos de precipitación de similar magnitud. En la Figura 4 se muestra la relación entre los registros horarios de temperatura y precipitación de la estación Fahyp para el periodo de enero 1992 a diciembre 1995.



**Figura 4: Climograma horario en la estación Fahyp (24/09/1992 – 23/04/1995)**

Fuente: Adaptado de KMC (2018)

La recarga es la precipitación efectiva que contribuye al nivel de las aguas subterráneas. Este proceso se estimó utilizando el enfoque de Thornthwaite-Mather (Thornthwaite y Mather, 1955). Este método considera el efecto de: (i) la atmósfera, a través de la ocurrencia de eventos de precipitación y la evapotranspiración de referencia; y, (ii) un depósito subterráneo que cumple las funciones de almacenar, aportar y retrasar el efecto de la escorrentía superficial.

Sobre la base de Pierre-Yves Jeannin y Grasso (1995), se estimó que la tasa de recarga promedio anual, para el período 1992 - 1995 fue de  $550 \text{ mm año}^{-1}$ , asumiendo:

- Evapotranspiración de referencia: calculada por el método de Thornthwaite.
- Almacenamiento máximo en el suelo: 140 mm.
- Porcentaje de recarga por precipitación neta (precipitación - ETo).
- Evapotranspiración de referencia mínima diaria de 0 mm.

El área de estudio tiene dos manantiales como las principales salidas del sistema kárstico: Suivu y Bâme. El registro de este último fue considerado como la serie de tiempo observada en cuanto representa la contribución de la totalidad del área de simulación. La base de datos dispone de información para el período comprendido entre octubre de 1992 y marzo de 1995.

## b. CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA MILANDRE

En la conceptualización del sistema kárstico de Milandre se usó el enfoque multi-modelo, de manera que inicialmente se simularon varias conceptualizaciones para evaluar la respuesta del sistema. A partir de esta etapa se observó un efecto combinado de los sistemas de aguas subterráneas y superficiales:

- **Sistema epikárstico:** flujos máximos influenciados por el epikárst, que afecta a la curva de recesión de los eventos de precipitación.
- **Sistema de aguas subterráneas:** flujo base regulado por el flujo lateral a partir de las condiciones de borde de carga constante.

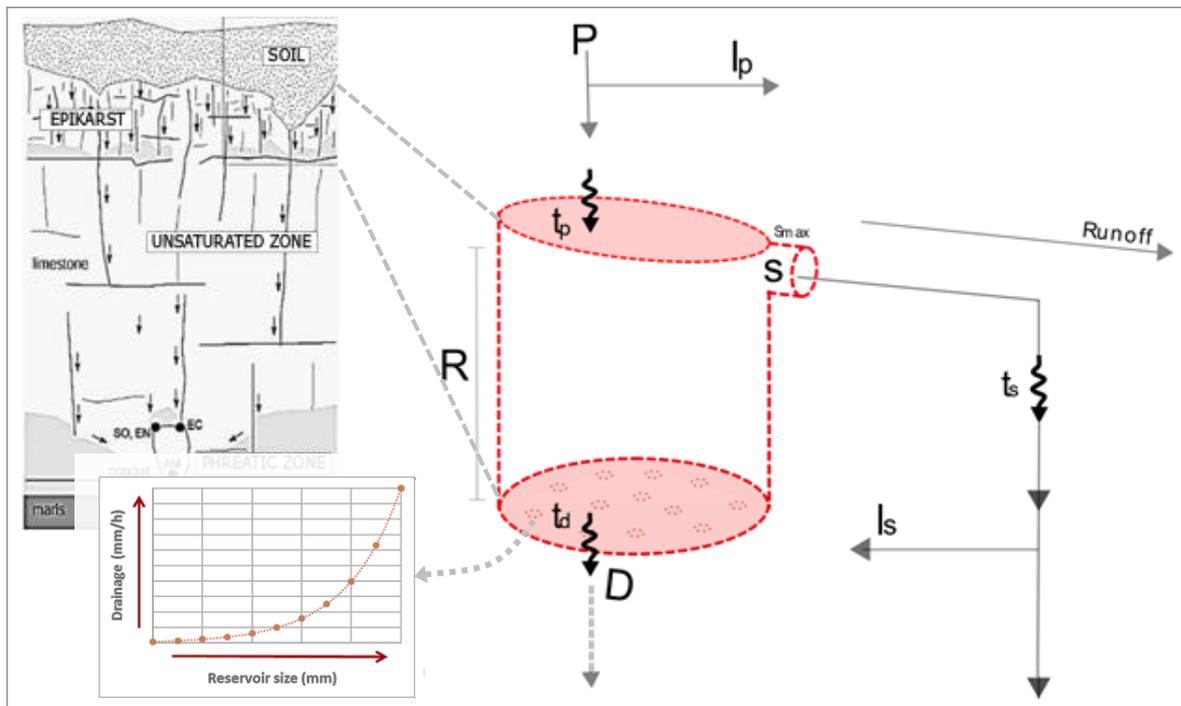
### SISTEMA EPIKÁRSTICO

El epikárst es la interfaz situada debajo del suelo y encima del sistema de aguas subterráneas (conductos kársticos). Este epikárst se caracteriza por una matriz fracturada que transporta el agua drenada de la precipitación. Según el ancho y la longitud de las grietas, el epikárst regula, a corto plazo, la contribución de las precipitaciones al flujo de los conductos. Debido a esto, el sistema epikárstico se conceptualizó como un reservorio horario, con una capacidad máxima de almacenamiento ( $R$ ), que controla la entrada de agua de drenaje a través de tres subsistemas:

- **Subsistema recarga:** proceso impulsado por los efectos de la hidrología superficial. En esta fase, la tasa de precipitación horaria ( $P$ ) se ve afectada por un coeficiente de pérdida ( $I_p$ ), que puede entenderse como escorrentía superficial, evapotranspiración y otras abstracciones de agua. Esto da lugar a una precipitación horaria neta que recarga el depósito epikárstico con un desfase entre el evento de la precipitación y la recarga efectiva ( $t_p$ ).
- **Subsistema drenaje:** proceso que representa la recarga directa del reservorio al sistema de aguas subterráneas (conductos epikársticos). Esta recarga se presenta como una tasa de drenaje ( $D$ ) por hora que sigue una función exponencial, de manera que cuanto más lleno esté el reservorio, mayor será el drenaje de agua. No obstante, el drenaje tiene una tasa máxima ( $D_{mx}$ ) y mínima ( $D_{mn}$ ) que define la curva de recesión de la función de descarga. El drenaje presentará un desfase entre la descarga del reservorio y la recarga efectiva del sistema de aguas subterráneas ( $t_d$ ).

- Subsistema aliviadero de demasías:** proceso que permite la recarga directa hacia el sistema de aguas subterráneas solo cuando el reservorio está lleno (*e.g.* durante tormentas). Se asumió una cantidad máxima de flujo que puede rebosar ( $S$ ), de manera que su exceso sale del sistema epikárstico como escorrentía superficial. Por ello, el agua excedente desde el reservorio se verá afectada por un coeficiente de pérdidas ( $S_{max}$ ) que engloba los procesos de mitigación del volumen total de agua disponible para el rebose (*e.g.* agua higroscópica, pérdidas laterales u otras abstracciones del agua). Por último, la excedencia neta recargará el sistema de aguas subterráneas considerando un desfase entre el aliviadero y la recarga efectiva del sistema de aguas subterráneas ( $t_s$ ).

En la Figura 5 se muestra la esquematización del modelo conceptual epikárstico con las variables consideradas, su relación y la función de descarga del reservorio.



**Figura 5: Modelo conceptual del sistema epikárstico Milandre**

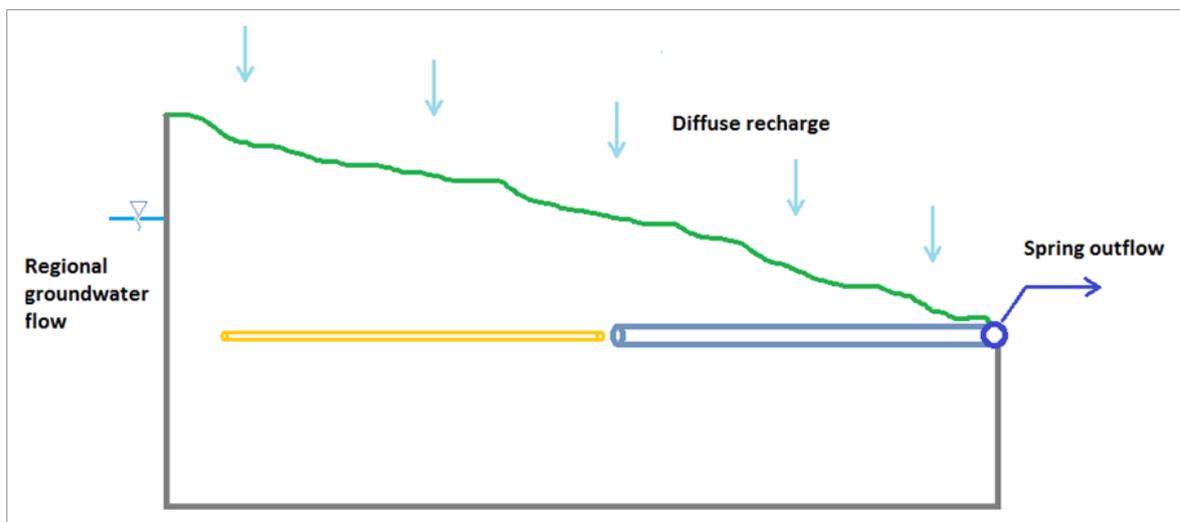
Nota:  $P$  = tasa de precipitación ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $p$  = porcentaje de pérdidas de precipitación (-),  $l_p$  = pérdidas de precipitación ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $t_p$  = tiempo entre el evento de la precipitación y la recarga efectiva (h),  $R$  = tamaño del reservorio (mm),  $D$  = tasa de drenaje del reservorio al sistema ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $t_d$  = tiempo desde el drenaje del reservorio hasta el conducto kárstico (h),  $S$  = derrame máximo antes de que se convierta en escurrimiento ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $s$  = porcentaje de pérdidas por derrame (-),  $l_s$  = pérdidas por la tasa de derrame ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $t_s$  = tiempo desde el derrame del depósito hasta el conducto kárstico (h)

Cabe resaltar que esta conceptualización es un **modelo agregado**, buscando así reducir el tiempo de cálculo. Por ello, el resultado del modelo es una descarga puntual al inicio del

conducto kárstico, por lo que se verá afectado por el tránsito a través de este. El proceso del sistema epikárstico fue programado en Python considerando una escala de tiempo horaria de entrada de datos y de resultados a fin de observar las variaciones a lo largo del día.

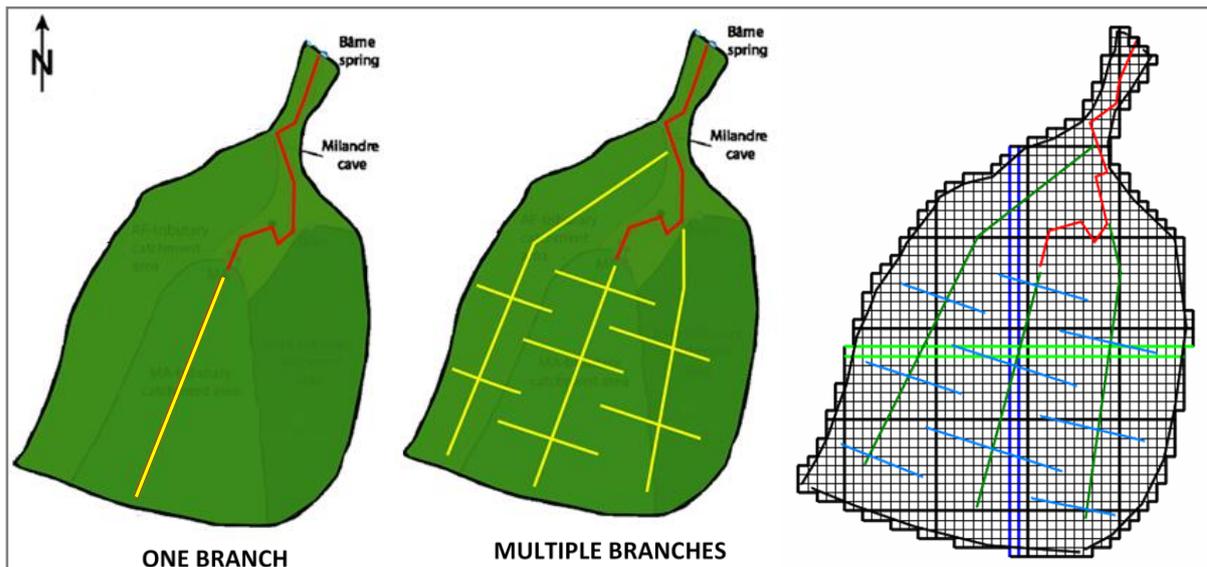
## SISTEMA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El modelo conceptual de aguas subterráneas se definió por la contribución del flujo lateral regional hacia los conductos a través de sus paredes permeables. Esto implica que la extensión, el diámetro de los conductos y la conductividad hidráulica de sus paredes definen la cantidad de agua que ingresa al sistema. La Figura 6 muestra el modelo conceptual general considerado.



**Figura 6: Modelo conceptual de aguas subterráneas del sistema kárstico Milandre**

De esta manera, se entiende que la ubicación y distribución de conductos influye en el modelamiento del sistema kárstico. Por lo tanto, el número de ramales condiciona la respuesta del sistema en caso de un evento de tormenta, retrasando o concentrando el flujo máximo. En consecuencia, se asumió que la disposición de los conductos desconocidos, más allá de la sección cartografiada de las cuevas, era el concepto más importante a evaluarse en la simulación del sistema Milandre. En la Figura 7 se presentan los dos enfoques modelados para analizar la respuesta hidrogeológica.



**Figura 7: Modelo conceptual de agua subterránea en Milandre de una rama (izquierdo), de múltiples ramas (central) y discretización espacial en MODFLOW (derecho)**

Fuente: Adaptado de Perrin (2003)

El modelo base de aguas subterráneas se construyó utilizando el *software* MODFLOW y el módulo *Conduit Fluid Process v.2*<sup>1</sup> (CFP v.2). Este módulo, desarrollado por el *United States Geological Service* (USGS) y mejorado por Reimann *et al.* (2014), acopla conductos discretos, que consideran el flujo laminar y el turbulento a un medio poroso (acuífero) (Shoemaker *et al.*, 2008).

El modelo desarrollado comprende el área de estudio del sistema kárstico Milandre, con un tamaño de la grilla de 100 x 100 m. Se considera una única capa de acuífero debido a la escasez de la información geológica.

La influencia del flujo regional se representó usando el paquete de carga constante (CHD) sobre la base de que el sistema kárstico de Milandre pertenece a un sistema hidrogeológico más extenso. A partir del enfoque multi-modelo, se obtuvieron los mejores resultados asumiendo una condición de CHD variable. Esta se ubica a 15 m de la superficie en la parte más alta, disminuyendo hasta una elevación 412 m en la salida del sistema. En el sistema de conductos se debe indicar la condición *Further Boundary Conditions* (FBC) en el módulo

---

<sup>1</sup> Link de descarga: <https://www.usgs.gov/software/conduit-flow-process-cfp-a-program-simulate-turbulent-or-laminar-groundwater-flow>

CFP v.2. Se añadieron valores de recarga difusa a lo largo de todo el dominio del modelo utilizando el módulo de recarga (RCH) sobre la base de los resultados del enfoque Thornthwaite-Mather.

Además, se consideraron dos conceptualizaciones de la distribución de los conductos (ver Figura 7). En ambos casos se añadieron conductos no cartografiados para representar la contribución de la cuenca superior. Mientras el primer enfoque (una rama) supone una entrada única en el conducto principal, el segundo (múltiples ramas) refleja una contribución diferenciada con procesos de enrutamiento particulares.

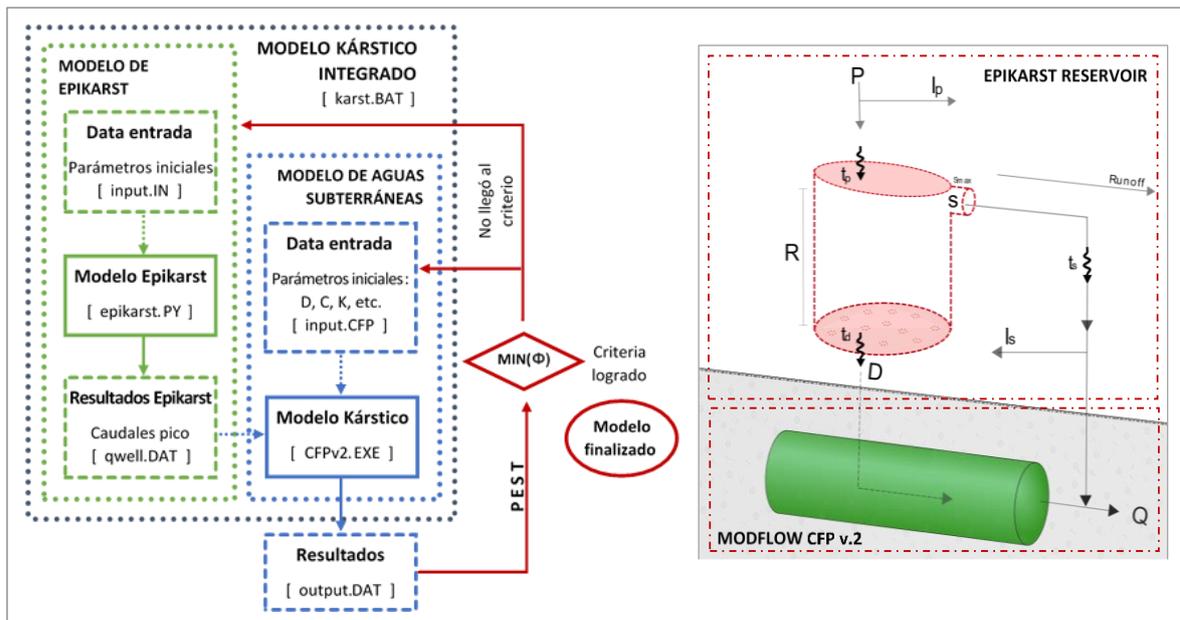
### **c. PROCESO DE SIMULACIÓN INTEGRADA Y CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS**

De acuerdo con la conceptualización del sistema Milandre (modelo de epikárst y modelo de aguas subterráneas), se construyó un modelo numérico integrado. En la Figura 8 se muestra el acoplamiento de ambos modelos y el enfoque del proceso de simulación.

El *Model-Independent Parameter Estimation* (PEST) es un código de modelamiento inverso que ayuda en la evaluación de parámetros, calibración, análisis de sensibilidad y análisis de incertidumbre. Esta herramienta permite que los valores generados por el modelo se ajusten lo más posible a los valores observados buscando reducir al mínimo las discrepancias entre estos en base a una función objetivo (Doherty, 2004).

El proceso de evaluación empieza con la simulación del modelo epikárstico, del cual se obtiene como resultado el flujo que aporta este sistema al sistema kárstico. Por lo tanto, sus resultados se utilizaron como datos de entrada para el modelo de aguas subterráneas. Luego, se simula el sistema de aguas subterráneas a través de MODFLOW y el paquete CFP v.2. En este paso se consideró la conceptualización de una y múltiples ramas.

Para el siguiente paso, los parámetros considerados más importantes fueron identificados a partir del enfoque multi-modelo. Los parámetros elegidos fueron optimizados mediante el algoritmo de optimización PEST a través de un proceso de modelamiento inverso. Este usó la información de caudales horarios observados en la estación La Bâme durante un periodo de calibración de tres meses. Finalmente, se simuló el registro completo de datos (tres años) con el modelo calibrado. A partir de las series de tiempo simuladas y las descargas observadas, se realizó un análisis estadístico para determinar la representatividad del modelo.

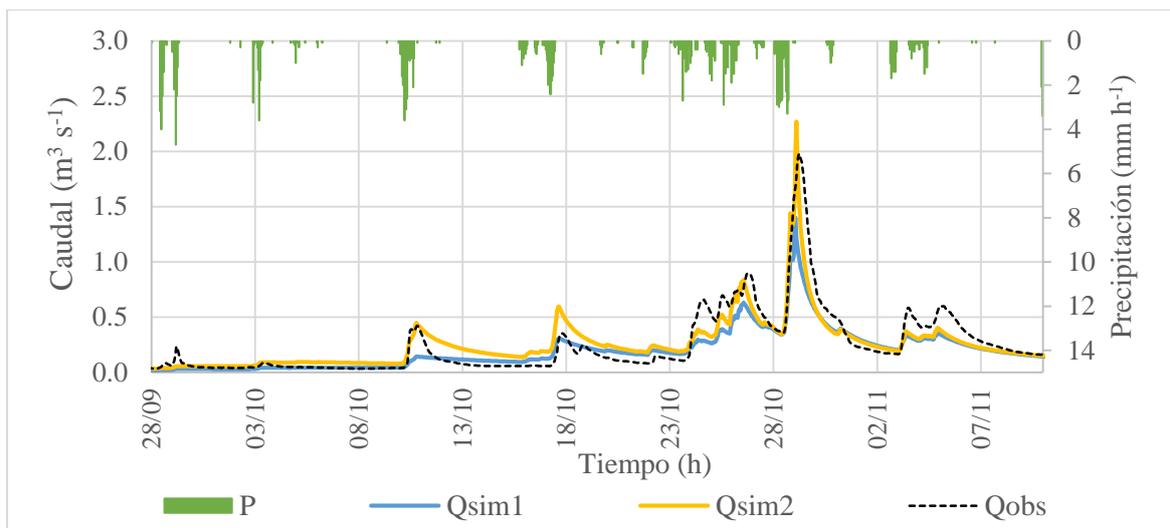


**Figura 8: Esquema secuencial del cálculo, retroalimentación y calibración del modelo numérico integrado del sistema kárstico Milandre (panel izquierdo) y esquema gráfico del proceso de integración del modelo epikárstico con el modelo de aguas subterráneas (panel derecho)**

A través del enfoque multi-modelo, el cual permitió identificar qué parámetros de cada modelo afectaban más los resultados de estos a través de un proceso de prueba y error, se definieron los parámetros para la calibración. En el caso del modelo epikárstico, los tres parámetros que influían en la magnitud de agua aportada al sistema fueron las dimensiones del reservorio, la tasa de aporte y la tasa de alivio máximo. Para el modelo de agua subterránea, estos fueron los parámetros que definen las condiciones del conducto: diámetro y conductancia hidráulica, variable en número dependiendo del tipo de conceptualización (una rama o múltiples ramas).

Se definieron rangos para cada parámetro que representaron valores característicos y aceptables del área de estudio. Se utilizó la serie de tiempo de caudales del manantial Bâme a la salida de la cuenca como punto de calibración. El período de calibración seleccionado (09/1992 – 12/1992) fue debido a la variedad de caudales presentados, incluyendo periodos de ausencia de lluvias y eventos de tormentas.

En la Figura 9 se comparan los caudales simulados y observados para el período de calibración utilizando los valores optimizados para ambas conceptualizaciones.



**Figura 9: Hidrograma horario de caudal observado y simulado en el periodo de calibración del modelo integrado del sistema kárstico Milandre (09/1992 – 12/1992)**

Nota:  $Q_{sim1}$  = caudal promedio diario simulado con conceptualización de una rama ( $m^3 s^{-1}$ ),  $Q_{sim2}$  = caudal promedio diario simulado con conceptualización de múltiples ramas ( $m^3 s^{-1}$ ),  $Q_{obs}$  = caudal promedio diario observado en manantial Bâme ( $m^3 s^{-1}$ ),  $P$  = precipitación total diaria en estación Fahyp ( $mm h^{-1}$ )

Los índices de bondad de ajuste calculados fueron Nash-Sutcliffe, Coeficiente de correlación (R Pearson) y Sesgo porcentual. En la Tabla 2 se muestran los índices de bondad de ajuste calculados para los caudales simulados en el periodo de calibración para ambas conceptualizaciones.

**Tabla 2: Índices de bondad de ajuste en simulaciones a escala horaria del sistema kárstico Milandre para el periodo de calibración (09/1992 - 12/1992)**

Conceptualizaciones	Nash-Sutcliffe	R Pearson	Sesgo (%)
Una rama	0,75	0,93	-19,73
Múltiples ramas	0,82	0,91	3,05

Los parámetros considerados para la calibración, así como los resultados del PEST se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3: Parámetros calibrados con PEST para el modelo integrado del sistema Milandre**

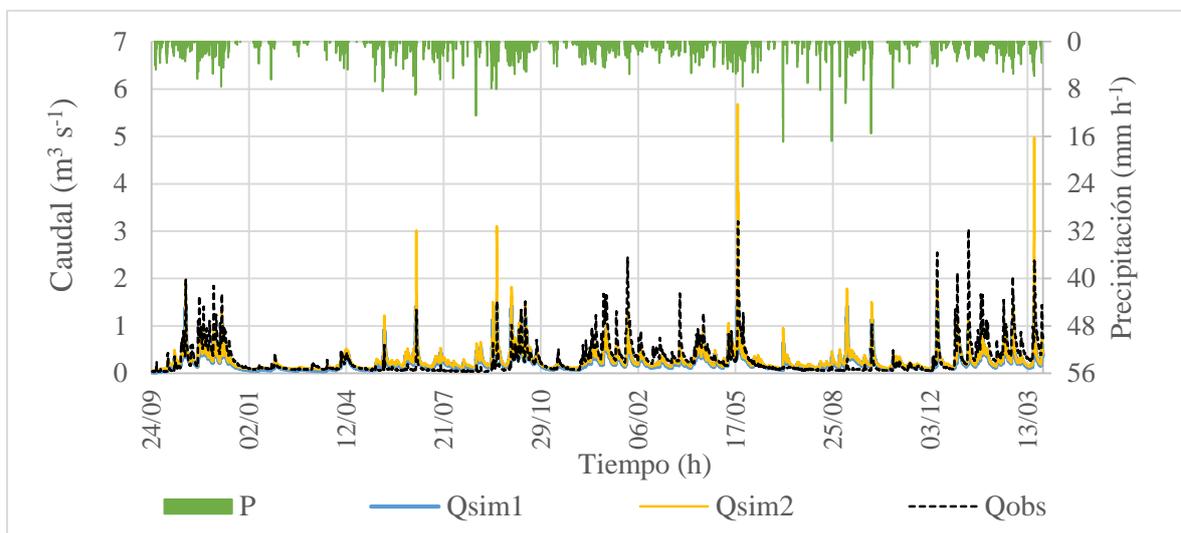
Parámetros	Descripción	Límites		Valores calibrados	
		Inferior	Superior	Una rama	Múltiples
1 reser	Dimensión del reservorio (mm)	10	150	84	83,55
2 smax	Derrame máximo antes de convertirse en escurrimiento (mm h <sup>-1</sup> )	0,1	20	0,11	1
3 dmx	Máxima tasa de drenaje del reservorio al sistema (mm h <sup>-1</sup> )	0,1	5	0,7	2,33
4 exch1	Conductancia de la pared del conducto 1 (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	1,00E-10	1000	2,20E-05	1,80E-05
5 exch2	Conductancia de la pared del conducto 2 (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	1,00E-10	1000	8,60E-06	5,90E-06
6 exch3	Conductancia de la pared del conducto 3 (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	1,00E-10	1000	-	9,20E-06
7 diam2	Diámetro del conducto 1 (m)	0,5	1	0,5	1
8 diam3	Diámetro del conducto 2 (m)	0,1	0,5	-	0,1
9 km1	Conductividad hidráulica de la matriz suelo (m s <sup>-1</sup> )	1,00E-08	1,00E-03	2,00E-06	7,80E-06

En ambas conceptualizaciones se logró una representatividad aceptable del sistema kárstico Milandre. Se consiguió simular el desarrollo de los picos de descarga en el manantial Bâme a partir del retraso en la incorporación del agua de lluvia al sistema. Ello implicó que el modelo epikárstico influyó en la simulación del sistema kárstico.

En cuanto a los índices de bondad de ajuste, en ambas conceptualizaciones se verificaron altos valores de coeficientes de correlación: cercanos a uno. En cuanto al coeficiente de Nash-Sutcliffe, sus valores por encima de 0,65 indicaron que se trataba de modelos con buena calibración (Moriassi *et al.*, 2007), implicando una acertada representación del medio. Cabe señalar que la escala sugerida por Moriassi *et al.* (2007) aplica para comparaciones a escala mensual, lo que significa que estos valores calculados resultan más representativos. Finalmente, el sesgo negativo reportado en la conceptualización de una rama muestra principalmente la subestimación de las descargas pico, mientras que, en el caso del modelo de múltiples ramas, esta condición fue mejor representada.

#### d. Simulación

El modelo se evaluó para el período de tiempo completo (24/09/1992 al 28/03/1995). En la Figura 10 se comparan los flujos simulados, observados y la precipitación.



**Figura 10: Hidrograma horario de caudal observado y simulado en el periodo total del modelo integrado del sistema kárstico Milandre (09/1992 – 03/1995)**

Nota:  $Q_{sim}$  = caudal promedio diario simulado ( $m^3 s^{-1}$ ),  $Q_{obs}$  = caudal promedio diario observado ( $m^3 s^{-1}$ ),  $P$  = precipitación total diaria en estación Fahyp ( $mm h^{-1}$ )

La Tabla 4 muestra los índices de ajuste para el registro total, verificando que la conceptualización de una sola rama muestra mejores resultados que la de múltiples ramas.

**Tabla 4: Índices de bondad de ajuste en simulaciones a escala horaria del sistema kárstico Milandre para el periodo total (09/1992 - 03/1995)**

Conceptualizaciones	Nash-Sutcliffe	R Pearson	Sesgo (%)
Una rama	0,52	0,77	-22,01
Múltiples ramas	0,54	0,74	-5,57

En ambas conceptualizaciones se verificaron valores de coeficientes de correlación superiores a 0,7, implicando un descenso de la representatividad del modelo. En cuanto al coeficiente de Nash-Sutcliffe, tomando en cuenta de manera referencial a Moriasi *et al.* (2007), sus valores dentro del rango 0,50 y 0,65 indican que aún se trata de modelos con calidad satisfactoria para representar el medio. Finalmente, se reforzó la idea de que la conceptualización de una rama subestima el cálculo las descargas pico dado su valor de sesgo porcentual. Sin embargo, en el caso del modelo de múltiples ramas, a pesar de representar de mejor manera las descargas pico, la precisión de los caudales simulados decreció. No obstante, ambas conceptualizaciones representaron de manera aceptable el sistema kárstico Milandre.

#### 4.1.4. CONTRIBUCIÓN

De acuerdo con el objetivo de este proyecto, el sistema kárstico Milandre se modeló con éxito mediante el uso de herramientas numéricas y conceptualizaciones que llegaron a representar aceptablemente el ciclo hídrico.

Se demostró competencia profesional al ser capaz de asimilar y sintetizar la información recogida en diversas campañas de monitoreo y traducirla en un modelo conceptual de flujo kárstico que fuese congruente. Asimismo, esta idea fue validada a través de modelamiento numérico. Por otro lado, se demostró capacidad técnica al construir nuevas herramientas de procesamiento (modelo epikárstico) en cuanto las disponibles no permitían representar acertadamente la conceptualización planteada. De esta manera, la mayor contribución al proyecto fue la conceptualización, programación e integración del proceso de recarga a través del sistema epikárstico.

Asimismo, se comprobó que las competencias académicas adquiridas durante la carrera de Ingeniería Agrícola fueron asimiladas y potenciadas con la experiencia profesional

conseguida. Los conceptos aprendidos durante los cursos de hidrología y aguas subterráneas ofrecieron las herramientas básicas sobre las que se fundamenta el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, el beneficio obtenido por la *Technische Universität Dresden* a partir de la elaboración del proyecto fue retomar el contacto entre el comité organizador del *Karst Modelling Challenge* a fin de continuar con las siguientes fases de la iniciativa. Además, este estudio pudo servir como antecedente para posteriores proyectos de aprovechamiento de agua (agrícola, poblacional, etc.).

## **4.2. MODELO SEMIDISTRIBUIDO**

Proyecto “Estudio Hidrológico - Acreditación de Disponibilidad Hídrica Superficial para el Proyecto de Exploración Pinaya”.

### **4.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

Este proyecto requirió el desarrollo de un estudio hidrológico para la acreditación de la disponibilidad hídrica superficial de las microcuencas de los ríos Ccello Huitula, Blanquillo e Ichocollo, ubicadas en las unidades hidrográficas Camaná y Coata, en Perú.

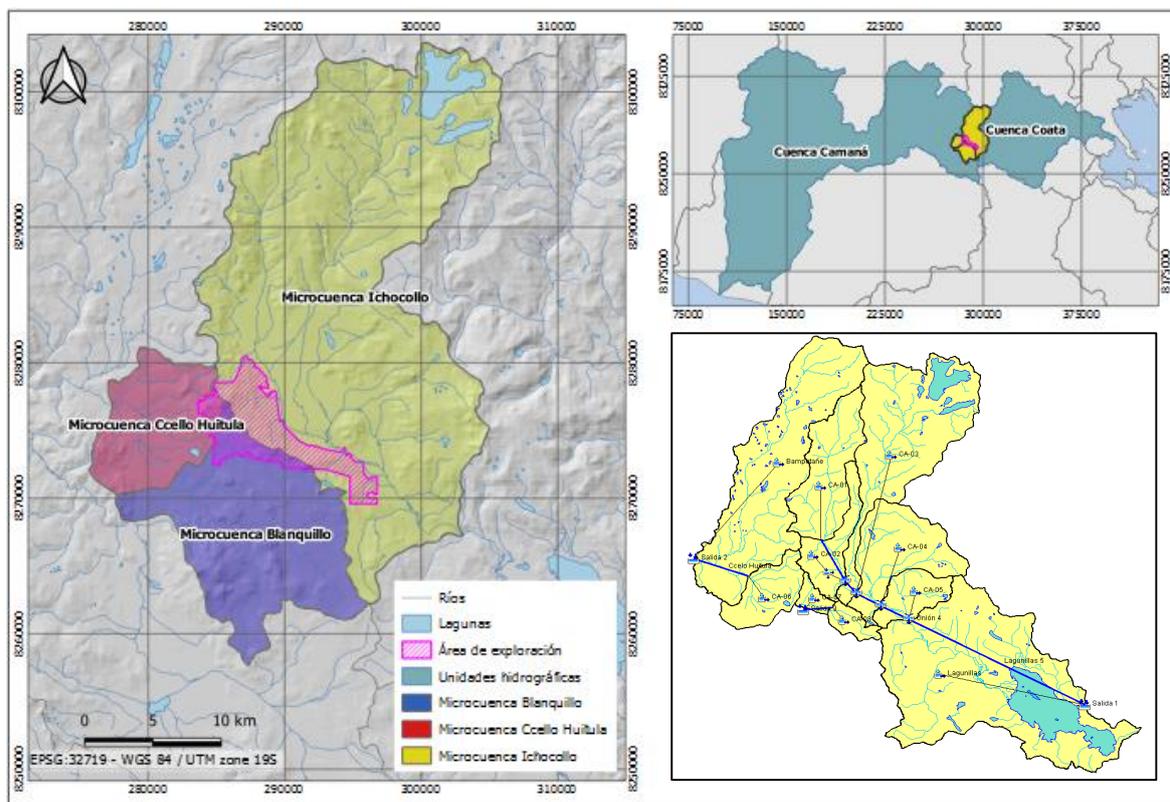
Esta evaluación se enmarcó en la elaboración de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) – Categoría I del Proyecto de Exploración Pinaya, perteneciente a la empresa Kaizen Discovery Peru S.A.C. (KDP). La empresa requiere del uso de 25229 m<sup>3</sup> de agua por año para el desarrollo de las labores del proyecto de exploración (*i.e.* perforación diamantina), teniendo en cuenta un consumo promedio de agua de 0,8 l s<sup>-1</sup>.

El alcance de este estudio estuvo definido por la normativa oficial a la fecha de elaboración: Acreditación de la disponibilidad hídrica superficial con la que se cumple la aprobación de estudios de aprovechamiento hídrico para obtención de licencia de uso de agua (Resolución Jefatural N° 090-2016-ANA).

### **4.2.2. INFORMACIÓN BASE**

El Proyecto de Exploración Pinaya se encuentra ubicado en los distritos de Callalli y San Antonio de Chuca, pertenecientes a la provincia de Caylloma, región Arequipa, así como al distrito de Santa Lucía, provincia de Lampa, región Puno.

El área de estudio del proyecto está definida por las unidades de respuesta hidrológica que comprenden el área efectiva de exploración. Hidrográficamente, éstas se localizan en la parte alta de las cuencas de los ríos Colca y Lagunillas. En la Figura 11 se muestra la ubicación del proyecto y de las unidades hidrográficas en mención.



**Figura 11: Ubicación del proyecto Pinaya**

Nota: (Panel izquierdo) Microcuencas evaluadas. (Panel derecho superior) Ubicación del proyecto Pinaya respecto a las unidades hidrográficas Camaná y Coata. (Panel derecho inferior) Conceptualización del modelo hidrológico desarrollado en sección 4.2.3. Fuente: Adaptado de MINEM<sup>2</sup>

Las tres microcuencas consideradas para la evaluación hidrológica, así como la administración hídrica a la que pertenecen, se presentan en la Tabla 5. La caracterización hidroclimática del área de estudio se realizó a partir de los registros mensuales disponibles de estaciones de medición administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología<sup>3</sup> (SENAMHI).

<sup>2</sup> Link de descarga: [http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/mapas/mapas\\_cuencas.htm](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/mapas/mapas_cuencas.htm)

<sup>3</sup> Link de descarga: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

**Tabla 5: Unidades hidrográficas en evaluación para el proyecto Pinaya**

Cuenca <sup>1</sup>	Subcuenca	Microcuenca	ALA <sup>2</sup>	AAA <sup>3</sup>
Camaná	Colca	Ccello Huitula	CSC <sup>4</sup>	Caplina - Ocoña
		Blanquillo	Chili	
Coata	Lagunillas	Ichocollo	Juliaca	Titicaca

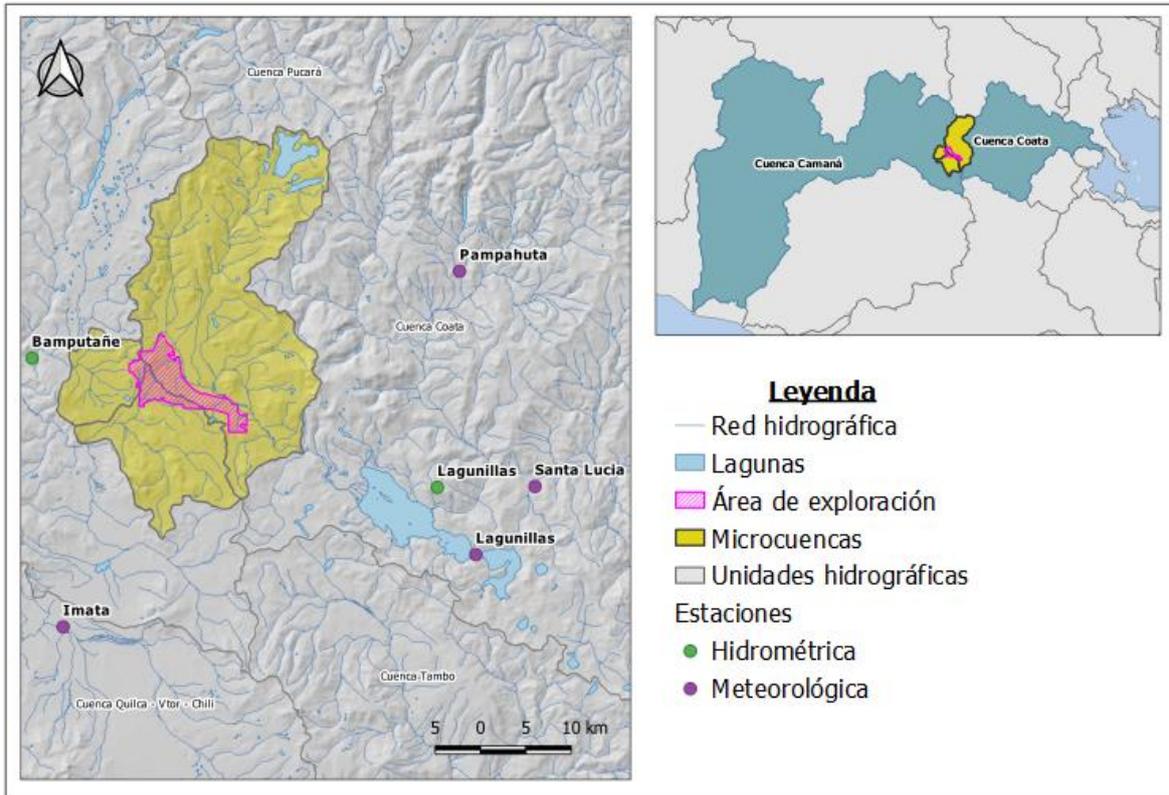
Nota: (1) Código Pfafstetter de la cuenca Camaná es 134 y de la cuenca Coata es 0176. (2) ALA = administración local del agua. (3) AAA = autoridad administrativa del agua. (4) CSC = Colca – Sihuas – Chivay.  
Fuente: Adaptado de Ministerio de energía y minas (MINEM)

En el caso de meteorología, se consideraron las estaciones ubicadas dentro de un radio de 75 km. Para la hidrometría, se utilizaron las estaciones ubicadas dentro de las subcuencas Colca y Lagunillas. En la Tabla 6 se muestran las estaciones hidrometeorológicas y los parámetros considerados para la evaluación. En la Figura 12 se muestra la ubicación de estas estaciones.

**Tabla 6: Estaciones meteorológicas y parámetros considerados para el proyecto Pinaya**

Estación	Parámetro <sup>1</sup>	Periodo	Este <sup>2</sup> (m)	Norte <sup>2</sup> (m)	Altitud (m)	Tipo
Santa Lucía	P	1970-2008				
	EP	1971-2008	328 512	8 263 569	4 034	
	T	2006-2013				
Lagunillas	P	1970-2007				
	EP	1992-2007	317 822	8 263 517	4 634	Meteoro- lógica
	T	1961-2007				
Pillones	P	1964-2010	264 530	8 233 507	4 455	
	T	2003-2010				
Imata	P	1998-2016	276 875	8 248 393	4 519	
El Frayle	P	1998-2009	266 529	8 213 234	4 121	
Pampahuta	P	1970-2010	320 230	8 287 490	4 400	
Bamputañe	Q	1951-1973	273 008	8 277 870	4 495	Hidro- métrica
Lagunillas	Q	1961-1984	320 274	8 258 490	4 184	

Nota: Otros parámetros como humedad relativa y velocidad de viento también fueron evaluados en el proyecto.  
(1) P = precipitación total mensual y precipitación máxima en 24 horas, T = temperatura promedio mensual, temperatura máxima mensual y temperatura mínima mensual, EP = evaporación potencial total mensual. Q = caudal promedio mensual. (2) Coordenadas UTM, Datum WGS 84 - zona 19S. Fuente: Adaptado de SENAMHI



**Figura 12: Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas en el área de estudio Pinaya**

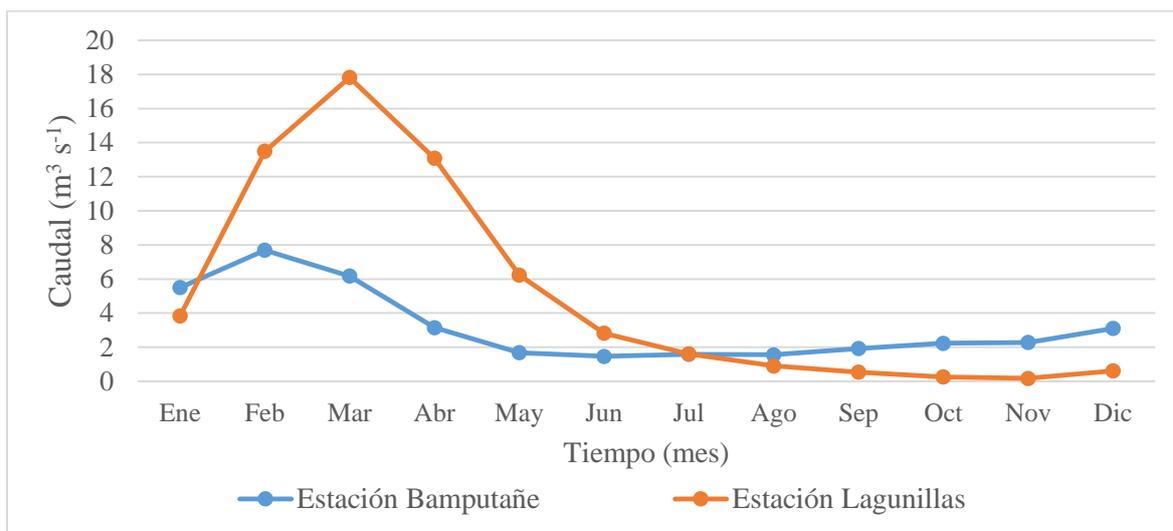
Nota: (Panel izquierdo) Ubicación de estaciones hidrometeorológicas respecto a microcuencas en evaluación. (Panel derecho) Ubicación del proyecto Pinaya respecto a las unidades hidrográficas Camaná y Coata. Fuente: Adaptado de SENAMHI

En cuanto a la precipitación, se realizó una breve inspección a los registros previos a ser procesados. Se pudo verificar que su variación temporal es consistente en las diferentes estaciones circundantes. De esta manera, se identificó una temporada seca comprendida entre mayo y setiembre, una temporada húmeda comprendida entre noviembre y marzo y dos meses de transición: abril y octubre

En cuanto a temperatura del aire, sobre la base de la información de sus valores promedio anuales en las estaciones disponibles, se identificó un gradiente térmico aproximado de  $0,41^{\circ}\text{C}$  por 100 m de diferencia de elevación en el área de estudio. En términos de estacionalidad, no es claramente identificable una variación de la distribución mensual de la temperatura. Los meses más fríos se producen entre mayo y agosto (temporada seca), mientras que de setiembre a abril se registran las temperaturas más altas.

La evaporación potencial registrada presenta comportamientos ligeramente diferentes en la cuenca Camaná y Coata. Mientras en la primera se observa un patrón similar a la variación temporal de la temperatura; en la segunda no se distingue claramente este.

La variación temporal del caudal promedio mensual es congruente con el comportamiento observado en la precipitación. Por ejemplo, en los meses de temporada seca (mayo a setiembre) se registran los menores caudales, como es esperado. En la estación Lagunillas se observa que en el último trimestre del año se producen caudales que aparentan ser una prolongación de la temporada seca, a pesar de registrarse lluvias en esa época del año. En la Figura 13 se presenta la variación de los caudales promedio mensuales, en las estaciones Bamputañe (1961-1973) y Lagunillas (1961-1984).



**Figura 13: Hidrograma de caudales promedio mensuales en estaciones hidrométricas del proyecto Pinaya**

Fuente: Adaptado de SENAMHI

Cabe señalar que, a la fecha de realizado el informe, no se identificaron usuarios con derechos de uso de agua en el área de estudio. Ello fue consecuente con la ausencia de estructuras de derivación o regulación para uso particular. No obstante, el canal Pañe-Sumbay, el cual permite derivar las aguas del río Colca hacia el río Chili, se desarrolla a través de las microcuencas Ccello Huitula y Blanquillo.

#### 4.2.3. DESARROLLO DEL PROYECTO

Sobre la base de la información presentada en la subsección 4.2.2, se continuó con el desarrollo progresivo de los cálculos que permitieron la construcción del modelo hidrológico.

## a. EVALUACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE CUENCAS

Se realizó la caracterización de la geomorfología de las microcuencas evaluadas a partir del cálculo de los parámetros e índices de forma, relieve topográfico y de red de drenaje, como se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7: Parámetros geomorfológicos de las microcuencas del proyecto Pinaya**

Parámetros	Microcuencas			
	Ccello Huitula	Blanquillo	Ichocollo	
De forma	Área (km <sup>2</sup> )	71,8	156,8	535,2
	Factor de forma, R <sub>f</sub>	0,8	0,3	0,2
	Coefficiente de compacidad, K <sub>c</sub>	1,2	1,6	1,6
	Razón de circularidad, R <sub>c</sub>	0,7	0,4	0,4
	Índice de alargamiento, R <sub>s</sub>	0,9	1,3	2,5
	Relación de elongación, R <sub>e</sub>	1,0	0,6	0,5
De relieve topográfico	Altitud de cuenca			
	Máxima (m)	4700	4850	5250
	Mínima (m)	4400	4400	4214
	Promedio (m)	4473	4523	4620
	Pendiente de cuenca (%)	6,3	8,1	12,0
De red de drenaje	Pendiente del cauce principal (%)	1,7	1,2	1,7
	Orden de cuenca	3	3	4
	Densidad de corriente, D <sub>c</sub> (cauces km <sup>-2</sup> )	0,31	0,24	0,32
	Densidad de drenaje, D <sub>d</sub> (km km <sup>-2</sup> )	0,74	0,56	0,61
	Tiempo de concentración (h) <sup>1</sup>	1,8	4,0	6,5

Nota: (1) Calculado por el método de Kirpich

La microcuenca del río Ccello Huitula se clasifica como una cuenca pequeña con una forma oval redonda, ensanchada y poco alargada, con pendiente de terreno medianamente accidentada y un nivel bajo de respuesta ante crecidas. Estas características corresponden a un sistema de drenaje que colecta el agua lentamente en la parte alta pero permiten un tránsito final rápido hacia la salida del sistema.

La microcuenca del río Blanquillo se clasifica como una cuenca pequeña con una forma oval oblonga, poco alargada y asimétrica, con una pendiente de terreno accidentada y un bajo nivel de respuesta ante crecidas. La microcuenca presenta una red de drenaje pobre y tiene una forma que caracteriza un tránsito moderado-lento del agua hacia la salida del sistema.

La microcuenca del río Ichocollo se clasifica como una cuenca de intermedia a pequeña con una forma oval oblonga, alargada y asimétrica, con un terreno con pendiente accidentada y un

bajo nivel de respuesta ante crecidas. Además, tiene una red de drenaje ligeramente densa, pero por su forma claramente alargada se espera un tránsito lento hacia la salida.

## **b. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN**

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2006), se puede realizar el cálculo de la evapotranspiración a partir de los registros de evaporación potencial medidos de un tanque evaporímetro con la siguiente relación:

$$ET_o = K_p \times E_{pan}$$

Donde  $ET_o$  = evapotranspiración de referencia ( $\text{mm d}^{-1}$ ),  $K_p$  = coeficiente del tanque evaporímetro,  $E_{pan}$  = evaporación del tanque evaporímetro ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

Así, se verificó un valor de coeficiente de tanque evaporímetro de 0,7 en el área de estudio considerando una humedad relativa mensual promedio comprendida entre 40% y 70% (media), una velocidad de viento comprendida entre 2 y 5  $\text{m s}^{-1}$  (moderado) y un radio de cobertura aproximado de 10 metros. De esta manera, se calculó el valor de evapotranspiración total mensual para las estaciones Santa Lucía y Lagunillas. Cada una fue considerada como característica de su respectiva cuenca.

Dado el limitado registro disponible, para la simulación hidrológica se consideraron los valores de evapotranspiración de referencia total mensual promedio multianual, asumiendo que esta se repetía a lo largo del tiempo.

## **c. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS DE PRECIPITACIÓN**

Se evaluaron los registros de precipitación de las seis estaciones meteorológicas consideradas a fin de comprobar la representatividad de estas. Para ello, primero se completaron los datos de precipitación total mensual faltantes en función de la información de años completos a través del método Racional Deductivo.

Posteriormente, se verificó la pertenencia de la información de las estaciones a una zona climática común a través el Método del Vector Regional (MVR), con ayuda del *software* Hydraccess (Espinoza *et al.*, 2005). Se consideró como rango de evaluación el periodo 1970 - 2013 en cuanto en dicho lapso existen pocos datos por completar. Se completaron los valores

de los años faltantes luego de discriminar valores puntuales de precipitación que se encontraron significativamente fuera de los límites sugeridos por la metodología de análisis.

El siguiente paso, fue realizar un análisis visual que permitió identificar un comportamiento similar de la precipitación en todas las estaciones evaluadas. Si bien no se registraron valores máximos de la misma magnitud, los valores muestran un comportamiento pseudo-proporcional. Seguido a ello, se efectuó el análisis de doble masa, donde los registros de precipitación se agruparon de acuerdo a la ubicación de las estaciones y su representatividad en cada cuenca. Aquí se observaron pequeños saltos poco significativos.

Finalmente, se verificó estadísticamente la información a partir de un análisis de consistencia a su media y su desviación estándar. Se consideraron los saltos identificados previamente para definir los periodos de evaluación. El registro de la estación Santa Lucía (1970 -1976) fue corregido dado que se evidenciaron picos desproporcionados.

#### **d. REGIONALIZACIÓN DE PRECIPITACIONES**

A fin de trabajar con registros representativos a las microcuencas en evaluación, se regionalizó la información pluviométrica. Se consideraron únicamente las estaciones Santa Lucía, Lagunillas, Pampahuta e Imata dado que estas permitieron el mejor ajuste estadístico al determinar el gradiente de precipitación. Se calcularon las ecuaciones de regionalización para las cuencas Coata y Camaná considerando factores de influencia altitudinal y geográfica.

$$P_{Coata_i} = P_{Santa\ Lucía_i} \times 0,82 \times 0,23 + P_{Lagunillas_i} \times 0,90 \times 0,24 + P_{Pampahuta_i} \times 0,75 \times 0,32 + P_{Imata_i} \times 1,21 \times 0,20$$

$$P_{Camaná_i} = P_{Santa\ Lucía_i} \times 0,79 \times 0,21 + P_{Lagunillas_i} \times 0,87 \times 0,22 + P_{Pampahuta_i} \times 0,73 \times 0,28 + P_{Imata_i} \times 1,17 \times 0,29$$

Se generaron los registros de precipitación total mensual para las cuencas Coata y Camaná para el periodo 1970 – 2013.

#### **e. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO DEL SISTEMA HÍDRICO**

Sobre la base de la ubicación de las labores proyectadas y la accesibilidad del recurso hídrico potencialmente aprovechable, se propusieron ocho puntos de evaluación de disponibilidad hídrica. Adicionalmente se consideraron las ubicaciones de las estaciones hidrométricas que

sirvieron como puntos de calibración. En la Tabla 8 se muestra la ubicación de los puntos de simulación modelados.

**Tabla 8: Ubicación de puntos de evaluación hidrológica para el proyecto Pinaya**

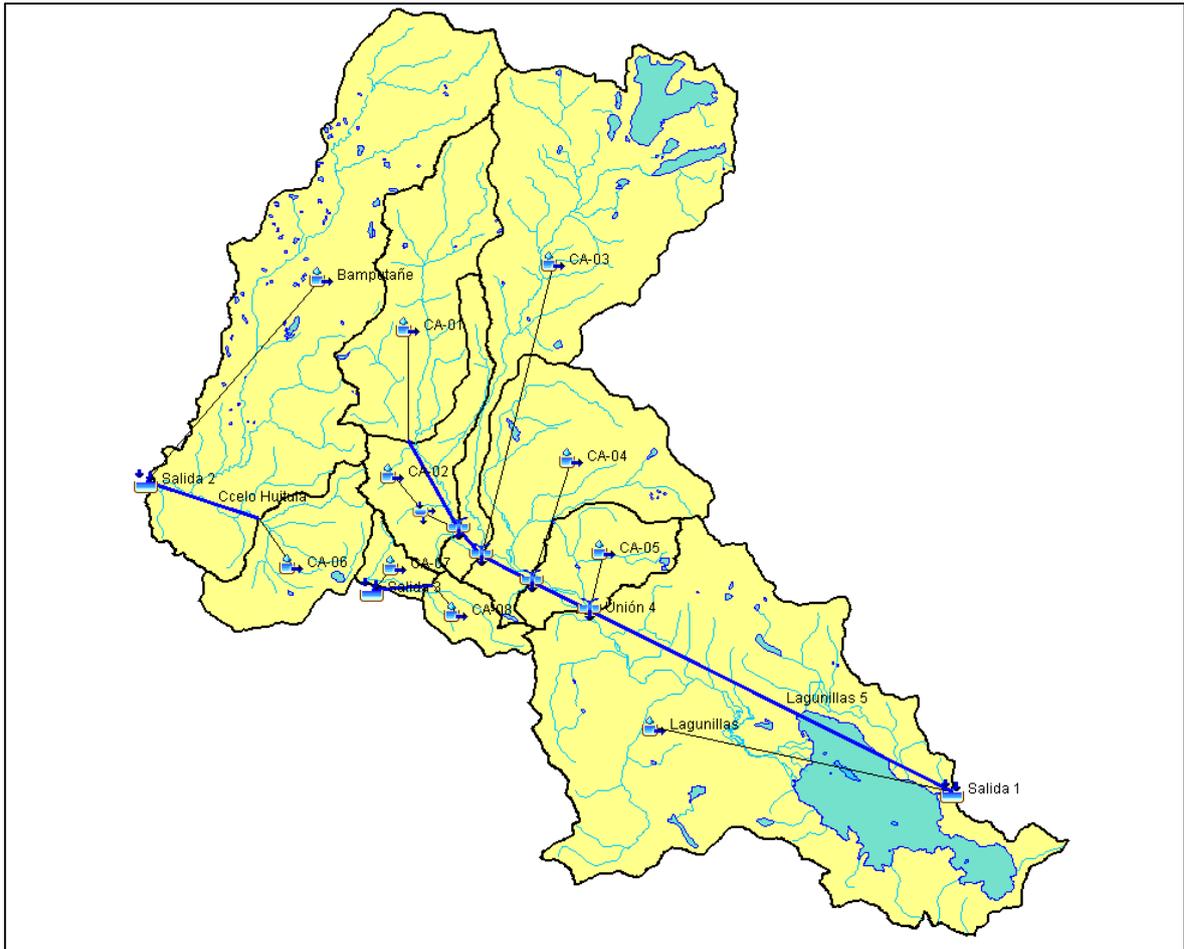
Punto de evaluación	Este (m) <sup>1</sup>	Norte (m) <sup>1</sup>	Altitud (m)
CA-01	287 818	8 280 992	4 325
CA-02	289 755	8 275 586	4 350
CA-03	291 653	8 274 844	4 326
CA-04	294 420	8 273 704	4 300
CA-05	297 535	8 271 356	4 300
CA-06	278 981	8 276 652	4 400
CA-07	288 325	8 272 603	4 498
CA-08	284 703	8 273 050	4 450
Bamputañe	273 008	8 277 870	4 495
Lagunillas	320 274	8 258 490	4 184

Nota: (1) Coordenadas UTM, Datum WGS 84 - zona 19S

La simulación se realizó en el *software* HEC-HMS, plataforma de simulación hidrológica tipo evento, lineal y, sobretodo, semidistribuida, desarrollada por el *Hydrologic Engineering Center* (HEC) del *United States Army Corps of Engineers*. En la Figura 14 se presenta el esquema conceptual del **modelo semidistribuido**. Lo más representativo de este recae en el refinamiento de la discretización de los parámetros característicos de la unidad de respuesta hidrológica en evaluación. Así, en la Tabla 9 se muestran las características hidrológicas de cada microcuenca simulada.

Dado que la simulación se realizó a paso de tiempo diario, los valores de precipitación total mensual fueron distribuidos uniformemente de acuerdo al número de días en el mes. Así, el modelo conceptual utilizado para la simulación de los caudales promedio diarios fue:

- 1) Pérdidas por interceptación de cobertura vegetal a través del modelo *Simple canopy*, el cual retiene precipitación.
- 2) Pérdidas en el suelo a través del modelo *Soil Moisture Accounting* (SMA), el cual simula el movimiento del agua y su almacenamiento en la superficie del suelo, su perfil y en dos reservorios de agua subterránea.
- 3) Pérdidas por flujo base, representado por el modelo *Linear reservoir*, el cual se simula el reingreso de agua al sistema una vez ha sido tomada esta por el modelo SMA.



**Figura 14: Esquema hidráulico del proyecto Pinaya y el área de estudio hidrológico**

Para realizar el proceso de calibración se tuvo en consideración el periodo en común del registro regionalizado de precipitación y el hidrométrico. Además, ya que ambos periodos no coincidían, se tuvo que calibrar el modelo en dos lapsos distintos: (i) periodo 1970-1984: CA-01, CA-02, CA-03, CA-04, CA-05, Lagunillas; y, (ii) periodo 1970-1973: CA-06, CA-07, CA-08, Bamputañe.

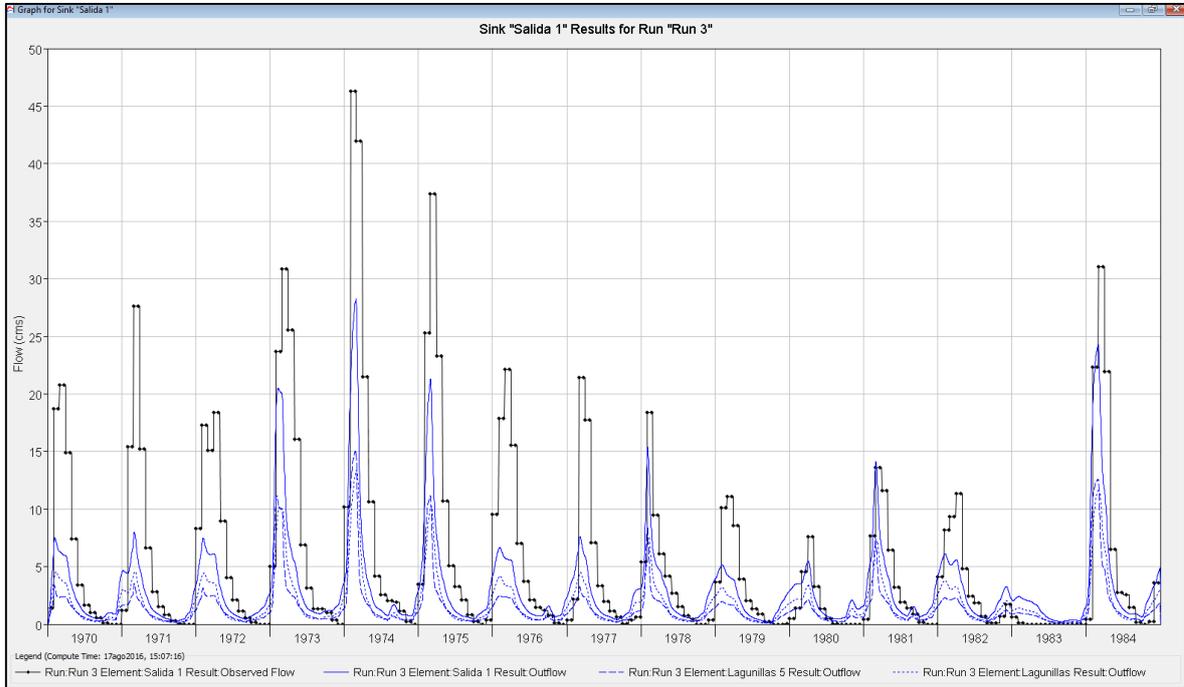
Para el proceso de calibración del modelo se dividió el registro hidrométrico en partes iguales: un periodo de calibración y uno de validación. No obstante, dada la limitada disponibilidad de datos observados, se realizó la calibración y validación del modelo con ambos periodos, de manera intercambiable. Cabe señalar que la calibración se realizó manualmente, refinando los resultados con la herramienta de autocalibración del HEC-HMS.

**Tabla 9: Características principales de las microcuencas del proyecto Pinaya**

Característica		CA-01	CA-02	CA-03	CA-04	CA-05	CA-06	CA-07	CA-08	Bamputañe	Lagunillas
De cuenca	Área <sup>1</sup> (km <sup>2</sup> )	91,5	45,7	195,3	99,7	38,8	50,4	15,9	10,8	242,4	361,7
	Altitud promedio (m)	4633	4457	4774	4530	4450	4478	4517	4508	4634	4387
	Pendiente promedio (%)	13,7	9,6	12,1	11,7	11,1	6,1	5,8	6,8	9,3	11,9
	Impermeable (%)	0,24	0,00	8,37	0,75	0,66	0,76	0,00	0,00	0,93	14,26
De cauce principal	Longitud (km)	18,4	14,6	34,1	20,0	9,0	7,7	7,3	4,2	43,8	38,6
	Pendiente (%)	3,53	2,36	2,17	2,07	3,87	2,11	0,38	1,83	1,87	0,97
	Tiempo de retardo (min)	80,9	79,2	157,3	106,1	45,1	50,4	93,7	33,4	202,1	235,6
De tránsito de avenidas	Longitud (km)	--	7154	2156	3371	4342	--	4198	--	8251	29797
	Pendiente (m m <sup>-1</sup> )	--	0,006	0,016	0,011	0,0001	--	0,018	--	0,006	0,005
	Ancho (m)	--	6,5	7,5	11,3	16,2	--	4,1	--	8,8	24,5

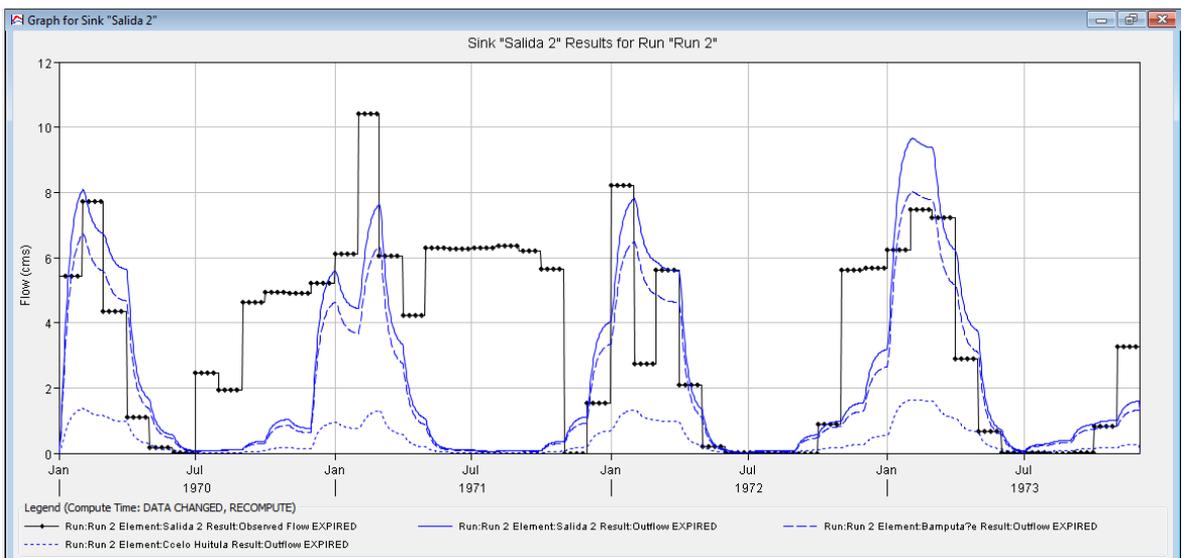
Nota: (1) Se considera la superficie particular de cada subcuenca, sin incluir las áreas superpuestas entre ellas

Se presenta la comparación entre hidrogramas de caudales promedio diarios simulados y observados en la estación Lagunillas para el periodo 1970 – 1984 (ver Figura 15) y en la estación Bamputañe para el periodo 1970 – 1973 (ver Figura 16).



**Figura 15: Hidrograma diario del caudal simulado y observado en estación Lagunillas (1970 – 1984)**

Nota: Línea negra sólida = caudal diario observado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ); Línea azul sólida = caudal diario simulado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )



**Figura 16: Hidrograma diario del caudal simulado y observado en estación Bamputañe (1970 – 1973)**

Nota: Línea negra sólida = caudal diario observado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ); Línea azul sólida = caudal diario simulado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )

Los índices de bondad de ajuste calculados para ambos puntos de calibración fueron Nash-Sutcliffe y el *Root Mean Squared Error* (RMSE) y se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10: Índices de bondad de ajuste en simulaciones a escala mensual del proyecto Pinaya**

Punto de calibración	Periodo	Nash-Sutcliffe	RMSE ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )
Lagunillas	1970 - 1984	0,535	3,7
Bamputañe	1970 - 1973	0,549	0,9

En ambos puntos de calibración se lograron representar principalmente los flujos bajos, de forma que los picos de descarga (en la estación Lagunillas) no fueron apropiadamente simulados.

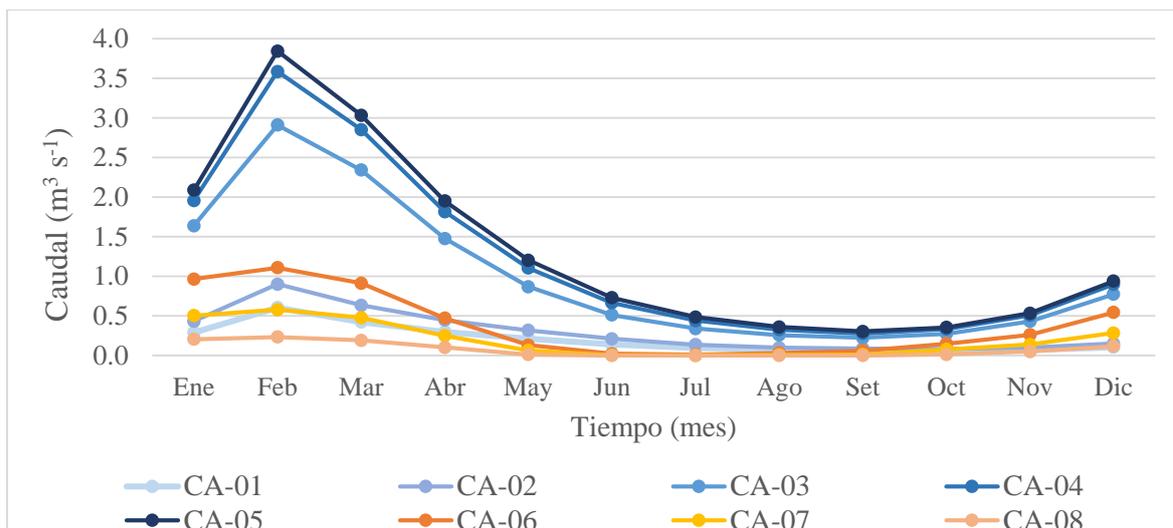
En cuanto a los índices de bondad de ajuste, para ambos puntos de calibración se verificó que el coeficiente de Nash-Sutcliffe alcanzó valores superiores a 0,5. De acuerdo a Moriasi *et al.* (2007), esto implica una representación satisfactoria del medio. Respecto al RMSE, el valor calculado para la estación Lagunillas reforzó la idea de que los caudales simulados no representan apropiadamente las descargas máximas registradas. Por otro lado, en el punto de calibración Bamputañe, el valor calculado de RMSE es menor a  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , lo que implica una menor diferencia entre valores simulados y observados. Ello no se observó en el periodo julio 1970 – julio 1971 en donde las diferencias son claramente mayores. No obstante, ya que no se registraron valores atribuibles de eventos que pudieron incrementar el caudal en la estación Bamputañe, se consideró que estos valores observados deben ser reconsiderados para futuras calibraciones.

En la Tabla 11 se presentan los valores de los parámetros de simulación calibrados a partir de la información hidrométrica disponible para cada periodo de evaluación.

## **f. SIMULACIÓN**

A partir de los parámetros calibrados, se realizó la simulación de los caudales promedio diarios para los puntos de evaluación presentados en la Tabla 8 para el periodo total de información disponible (1970 – 2013). La Figura 17 muestra los caudales promedio mensuales para los ocho puntos de evaluación.





**Figura 17: Hidrograma de caudales promedio mensuales en puntos de evaluación en el proyecto Pinaya (1970 – 2013)**

Se verifica que la distribución mensual de los caudales responde consecuentemente con la ocurrencia y temporalidad de la precipitación, identificando claramente una época húmeda (enero – mayo) y una época seca (julio – noviembre), con dos meses de transición (junio y diciembre). Además, se observa que las microcuencas ubicadas en la cuenca Coata son más productivas que las pertenecientes a la cuenca Camaná, ello considerando que los módulos de precipitación son similares en ambas unidades hidrológicas.

#### **g. BALANCE HÍDRICO**

Teniendo en cuenta la ubicación de las labores de exploración, para el análisis de balance hídrico se han considerado los puntos de evaluación CA-02 y CA-04. Este se calculó a paso mensual y en unidades volumétricas ( $\text{hm}^3$ ).

#### **OFERTA HÍDRICA**

Se definió como oferta hídrica con fines de aprovechamiento a los caudales promedio mensuales en un punto de evaluación para una persistencia del 75% en el periodo 1970 – 2013 en cuanto se trata de un uso consuntivo. Este valor de persistencia fue utilizado sobre la base de los requerimientos especificados en el Formato anexo A-1 para la acreditación de la disponibilidad hídrica superficial con la que se cumple la aprobación de estudios de aprovechamiento hídrico para obtención de licencia de uso de agua (Resolución Jefatural N° 090-2016-ANA).

## **DEMANDA HÍDRICA**

Por otro lado, las demandas de agua dentro del área del proyecto comprenden al caudal ecológico, el consumo pecuario y, posteriormente, el derecho de uso de agua de KDP. No se han encontrado usuarios con derecho de uso de agua otorgado por la ANA para ningún tipo de aprovechamiento, tanto aguas arriba de los puntos de captación como en áreas ubicadas aguas abajo de las microcuencas evaluadas.

El caudal ecológico fue calculado sobre la base de la R.J. N° 154-2016-ANA (Caudal Ecológico Específico para Proyectos con Declaración de Impacto Ambiental) y el Informe Técnico N° 023-2012-ANA-DCPRH-ERH-SUP/GPT (ANA, 2012; Resolución Jefatural N° 154-2016-ANA). De esta manera, para los caudales promedio mensuales menores a  $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (como es el caso de las fuentes de agua analizadas), el caudal ecológico fue igual al 10% del caudal promedio mensual para la época húmeda y 15% para la época seca.

Por otro lado, si bien no existen derechos de uso de agua otorgados en el área evaluada, se identificaron actividades de pastoreo ocasional de ganado bovino. Por ello, a fin de evitar una posible afectación de la actividad ganadera, se consideró de manera conservadora un caudal de consumo pecuario de  $10 \text{ l s}^{-1}$ , el que representa la demanda de alrededor de 8000 cabezas de ganado.

Cabe señalar que en esta área no se llevan a cabo actividades de agricultura debido a las bajas temperaturas que permiten principalmente el crecimiento de pastos naturales. Debido a ello, la principal actividad económica productiva local es la ganadería, aunque esta solo es de carácter estacional ya que no se identificaron asentamientos poblacionales en los alrededores.

## **BALANCE HÍDRICO SITUACIÓN ACTUAL**

En la Tabla 12 se presentan los resultados del balance hídrico en situación actual. Las condiciones que se tuvieron en cuenta fueron únicamente las descritas en las secciones oferta hídrica y demanda hídrica. En ambos casos (CA-02 y CA-04) se verifica una condición de superávit hídrico, evidenciando la disponibilidad de agua para ser aprovechada en la situación futura del proyecto.

**Tabla 12: Balance hídrico en condición actual en microcuencas CA-02 y CA-04 (hm<sup>3</sup>) proyecto Pinaya**

Mes	Microcuenca CA-02				Microcuenca CA-04			
	Oferta <sup>1</sup>	Demanda <sup>2</sup>		Balance hídrico	Oferta <sup>1</sup>	Demanda <sup>2</sup>		Balance hídrico
	Q75%	CE	CP		Q75%	CE	CP	
Ene	0,61	0,12	0,03	+ 0,47	3,61	0,52	0,03	+ 3,06
Feb	0,93	0,22	0,02	+ 0,69	4,57	0,87	0,02	+ 3,68
Mar	1,07	0,17	0,03	+ 0,87	5,08	0,76	0,03	+ 4,29
Abr	0,99	0,12	0,03	+ 0,85	3,95	0,47	0,03	+ 3,45
May	0,71	0,09	0,03	+ 0,59	2,39	0,30	0,03	+ 2,07
Jun	0,48	0,08	0,03	+ 0,37	1,42	0,26	0,03	+ 1,13
Jul	0,27	0,06	0,03	+ 0,19	1,01	0,18	0,03	+ 0,80
Ago	0,27	0,04	0,03	+ 0,20	0,68	0,13	0,03	+ 0,52
Set	0,26	0,03	0,03	+ 0,20	0,52	0,11	0,03	+ 0,38
Oct	0,27	0,03	0,03	+ 0,21	0,73	0,13	0,03	+ 0,57
Nov	0,26	0,04	0,03	+ 0,19	0,92	0,20	0,03	+ 0,69
Dic	0,31	0,04	0,03	+ 0,24	1,87	0,24	0,03	+ 1,60
Anual	6,43	1,03	0,32	+ 5,08	26,75	4,17	0,32	+ 22,26

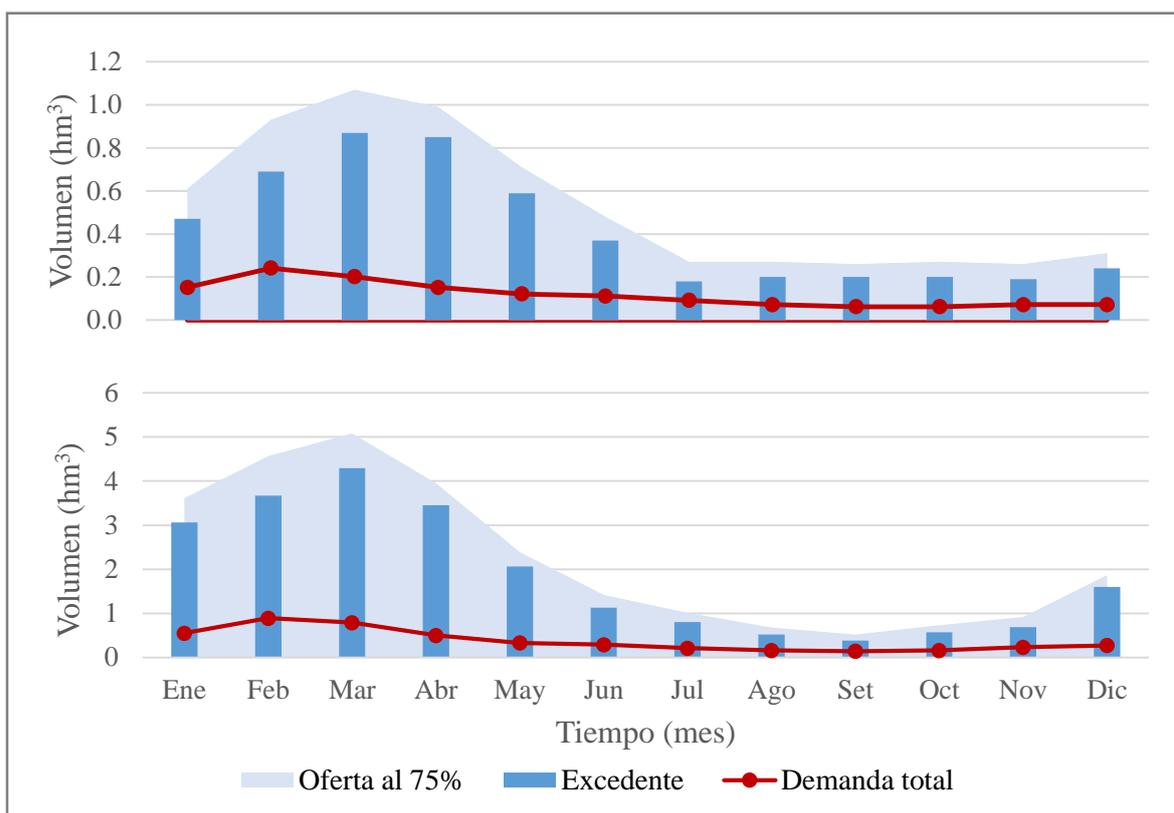
Nota: (1) Q75% = caudal para una persistencia al 75%. (2) CE = demanda por caudal ecológico, CP = demanda por consumo pecuario

## BALANCE HÍDRICO SITUACIÓN FUTURA

En el escenario del balance hídrico en condición futura, se consideró el efecto adicional de la captación de agua para fines industriales del proyecto de exploración, equivalente a 0,8 l s<sup>-1</sup>.

En la Figura 18 se comparan, gráficamente, los componentes del balance hídrico. Es fácilmente identificable que las demandas totales, incluidas las propias del proyecto Pinaya, son inferiores que la oferta de agua para una persistencia al 75%, de acuerdo a los requerimientos normativos (Resolución Jefatural N° 090-2016-ANA). Así, se verifica que en ambos puntos de análisis se conserva una condición de superávit hídrico aun con la extracción de agua para fines industriales.

En la Tabla 13 se presenta el detalle del cálculo del balance hídrico en condición futura para ambos escenarios proyectados (CA-02 y CA-04).



**Figura 18: Balance hídrico en condición futura (hm<sup>3</sup>) para la microcuenca CA-02 (panel superior) y para la microcuenca CA-04 (panel inferior)**

#### 4.2.4. CONTRIBUCIÓN

De acuerdo con el objetivo de este proyecto, se elaboró el estudio hidrológico que acredita la disponibilidad hídrica superficial de las microcuencas de los ríos Ccello Huitula, Blanquillo e Ichocollo, ubicadas en las unidades hidrográficas Camaná y Coata. Además, se respetaron los términos de referencia comunes del contenido hídrico que deberán cumplirse en la elaboración de los estudios ambientales.

Se demostró competencia profesional al entender, procesar, analizar y sintetizar la información hidroclimática disponible, así como manejar los casos en los que esta no estaba disponible pero sí era necesaria. Además, se aplicaron los conocimientos adquiridos para la conceptualización y construcción de un modelo hidrológico para la evaluación del área de estudio.

**Tabla 13: Balance hídrico en condición futura en microcuencas CA-02 y CA-04 (hm<sup>3</sup>) para el proyecto Pinaya**

Mes	Microcuenca CA-02					Microcuenca CA-04				
	Oferta <sup>1</sup> Q75%	Demanda <sup>1</sup>			Balance hídrico	Oferta <sup>1</sup> Q75%	Demanda <sup>1</sup>			Balance hídrico
		CE	CP	Pinaya			CE	CP	Pinaya	
Ene	0,61	0,12	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,47	3,61	0,52	0,03	<b>0,002</b>	+ 3,06
Feb	0,93	0,22	0,02	<b>0,002</b>	+ 0,69	4,57	0,87	0,02	<b>0,002</b>	+ 3,67
Mar	1,07	0,17	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,87	5,08	0,76	0,03	<b>0,002</b>	+ 4,29
Abr	0,99	0,12	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,85	3,95	0,47	0,03	<b>0,002</b>	+ 3,45
May	0,71	0,09	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,59	2,39	0,30	0,03	<b>0,002</b>	+ 2,06
Jun	0,48	0,08	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,37	1,42	0,26	0,03	<b>0,002</b>	+ 1,13
Jul	0,27	0,06	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,18	1,01	0,18	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,80
Ago	0,27	0,04	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,20	0,68	0,13	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,52
Set	0,26	0,03	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,20	0,52	0,11	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,38
Oct	0,27	0,03	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,20	0,73	0,13	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,57
Nov	0,26	0,04	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,19	0,92	0,20	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,69
Dic	0,31	0,04	0,03	<b>0,002</b>	+ 0,24	1,87	0,24	0,03	<b>0,002</b>	+ 1,60
Anual	6,43	1,03	0,32	<b>0,030</b>	+ 5,05	26,75	4,17	0,32	<b>0,030</b>	+ 22,24

Nota: (1) Q75% = caudal para una persistencia al 75%. (2) CE = demanda por caudal ecológico, CP = demanda por consumo pecuario, Pinaya = demanda por labores de exploración

Finalmente, se realizó la evaluación de la disponibilidad hídrica a partir de un balance de aguas basado en los cálculos previamente obtenidos a través del cálculo de caudales. Por otro lado, se demostró capacidad técnica al estar familiarizado con procedimientos estándar de procesamiento y análisis de sistemas hidrológicos. Esto, en particular, se evidenció en el análisis exploratorio de datos y el balance hídrico.

Además, se demostró que las competencias académicas adquiridas durante el desarrollo de la carrera de Ingeniería Agrícola fueron asimiladas y potenciadas con la experiencia profesional conseguida. Los conceptos aprendidos principalmente durante el curso de hidrología fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

De esta manera, el cliente se benefició del estudio hidrológico en cuanto el proyecto de acreditación hídrica fue aprobado junto con la DIA del Proyecto de Exploración Pinaya por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y con opinión vinculante positiva de la Autoridad Nacional del Agua. Ello implicó que la minera KDP estuvo facultada para continuar con el procedimiento para la toma de los  $0,8 \text{ l s}^{-1}$  de agua en los puntos analizados y solicitados.

### **4.3. MODELO DISTRIBUIDO**

Proyecto “*Climate Change Risk Assessment for Projects in Kenya and Nepal*”.

#### **4.3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

Este proyecto tuvo por objetivo principal evaluar cuantitativamente cómo el cambio climático podría afectar otros factores de riesgo en la parte baja de la cuenca del río Nzoia que no están relacionados al cambio climático (*e.g.* crisis política).

A través de este proyecto, el Banco Mundial quiso verificar si la inversión realizada en Kenya para la ejecución de dos proyectos de carácter hídrico, ya aprobados, realmente contribuirían con el desarrollo del valle Nzoia. Los proyectos incluían un plan de riego y mejora del sector agrícola; y un plan de protección contra las inundaciones.

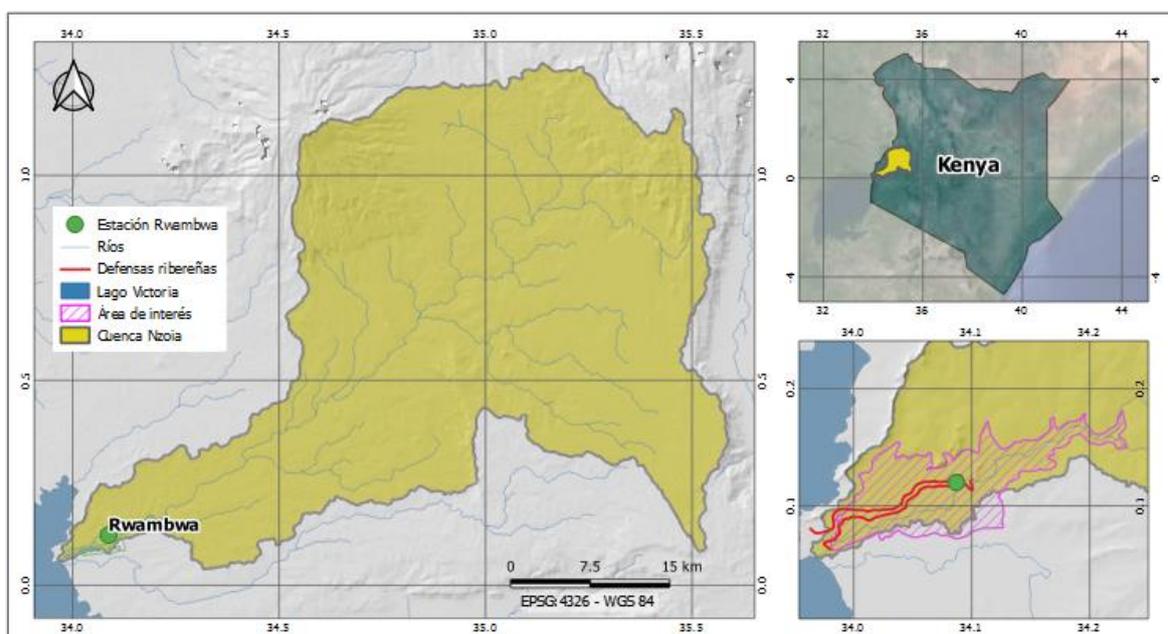
El enfoque propuesto para el desarrollo de la evaluación fue el *Decision Tree Framework* (Ray y Brown, 2015). Esta es una metodología que busca detectar si un sistema es vulnerable al cambio climático y qué tanto lo es. De esta manera, se puede llegar a identificar si el cambio climático es el verdadero problema o si existen otros riesgos más perjudiciales. El primer paso hacia la evaluación del riesgo por éste es una buena comprensión del sistema hídrico.

De acuerdo con lo expuesto, los objetivos específicos del estudio se centraron en el modelamiento hidrológico del río Nzoia sobre la base de modelos existentes y el análisis de la confiabilidad de la información disponible.

#### 4.3.2. INFORMACIÓN BASE

##### a. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Nzoia se localiza en la parte occidental de Kenia, África oriental. Su red de drenaje fluye en dirección suroeste, desde las colinas de Cherangani hasta el lago Victoria, donde finalmente descarga. El área de interés para este proyecto se ubica en la parte baja de la cuenca Nzoia, comprendiendo asentamientos urbanos y áreas agrícolas. En la Figura 19 se muestra la ubicación de la cuenca el río Nzoia y el área de estudio específico.



**Figura 19: Ubicación de la cuenca del río Nzoia**

Nota: (Panel izquierdo) Cuenca del río Nzoia. (Panel derecho superior) Ubicación de la cuenca Nzoia a nivel nacional. (Panel derecho inferior) Ubicación del área de interés del proyecto dentro de la cuenca Nzoia.

Su punto más elevado se encuentra alrededor de los 4300 m, en el Monte Elgon, y desciende hasta, aproximadamente, los 1400 m de altitud en su punto de descarga. El río principal, Nzoia, tiene una longitud alrededor de 334 km y tiene una cuenca tributaria de 12950 km<sup>2</sup>, aproximadamente, lo que lo convierte en el principal afluente keniano del Lago Victoria con una descarga promedio anual de 1777 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> (*Regional Centre for Mapping of Resources for Development [RCMRD], 2015*).

La cuenca Nzoia presenta una condición climática que varía espacialmente desde tropical húmeda en las montañas hasta las semiáridas en las partes bajas. No obstante, la variación temporal del rango de temperaturas a lo largo del año no es grande, lo que implica un gradiente de temperatura bajo (*Implementation Support Consultant's* [ISC], 2017).

En cuanto a la precipitación, el promedio anual de lluvia oscila, espacialmente, entre 600 y 1100 mm en toda la cuenca. Debido a la zona de convergencia intertropical, la cuenca Nzoia experimenta cuatro estaciones en un año:

- Dos temporadas de lluvias (cortas: octubre - diciembre, largas: marzo - mayo).
- Dos estaciones secas (enero - febrero, junio - setiembre).

La cuenca Nzoia abarca tres regiones fisiográficas: (i) las montañas, representadas por las colinas de Elgon y Cherangani; (ii) la meseta superior, que comprende Eldoret y Kitale; y, (iii) las tierras bajas, donde se encuentra el área de interés (ISC, 2017).

Además, el 74% del uso de suelo en la cuenca lo comprende la agricultura por secano, mientras que el 14% corresponde a zonas forestales (FutureWater, 2009).

Dentro del área de interés, las tierras de cultivo y los asentamientos urbanos situados a ambos lados del río Nzoia están protegidos por terraplenes. Sin embargo, las condiciones climáticas y la geodinámica natural de la cuenca (como tormentas, sequías y sedimentación a lo largo del río) exponen una vulnerabilidad económica, poblacional y de seguridad alimentaria de Nzoia.

Por otro lado, de acuerdo con el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) y el *Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5* (CMIP5), para el escenario de la *Representative Concentration Pathway 4.5* (RCP4.5) África oriental experimentará notorias variaciones climáticas para 2035.

En cuanto a precipitación anual, sus valores mínimos disminuirán en 5%, mientras que sus valores máximos aumentarán en 10%. Respecto a temperatura anual, sus valores mínimos aumentarán en 0,5°C y sus valores máximos aumentarán de 1,2°C.

De esta manera, se esperan períodos de sequía menos probables y olas de calor más frecuentes y/o prolongadas (IPCC, 2013).

## **b. ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS**

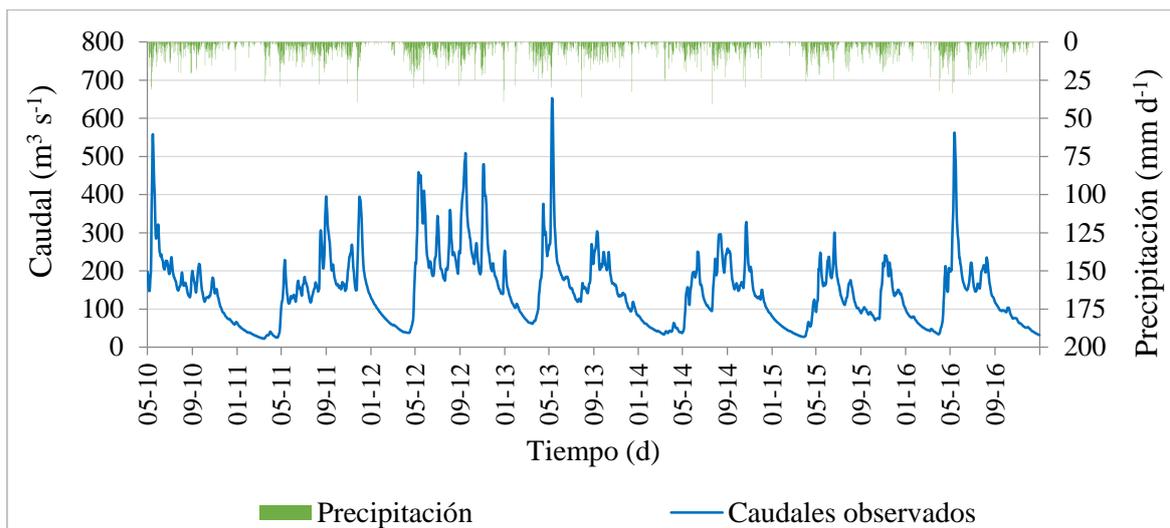
El *Coupled Routing and Excess Storage* (CREST) es un modelo hidrológico distribuido desarrollado por la Universidad de Oklahoma y NASA SERVIR (UO&NS). Este simula la variación espacial y temporal de las condiciones físicas y climáticas en la extensión de una cuenca a una resolución definida por el modelador. Adicionalmente, el *Ensemble Framework for Flash Flood Forecasting* (EF5) es un modelo hidrológico distribuido, también desarrollado por UO&NS, que basa su componente de balance hídrico en el modelo CREST y agrega el análisis espacial de llanuras de inundación.

Los recursos hídricos de la cuenca Nzoia han sido extensamente estudiados por diferentes instituciones. El RCMRD, junto a la Universidad de Oklahoma, simuló la hidrología de la cuenca con el modelo CREST. Se concluyó que este representaba adecuadamente la hidrología de la cuenca de Nzoia utilizando información satelital de libre acceso (Wang *et al.*, 2011; Khan *et al.*, 2011; Khan *et al.*, 2011).

Posteriormente, el RCMRD desarrolló un estudio enfocado en la delimitación de llanuras de inundación en la parte baja de la cuenca Nzoia. Se utilizó la información de precipitación y evapotranspiración de referencia de imágenes satelitales, así como el registro de la estación hidrométrica Rwambwa, operada por el *Water Resources Management Authority* (WRMA) (RCMRD, 2015).

En el 2017, ISC realizó el modelamiento hidrológico de Nzoia utilizando el *Australian Water Balance Model* (AWBM) en el marco del *Lower Nzoia Project* (LNP). En él se consideró la información de cinco estaciones de medición de precipitación y una hidrométrica. El modelo fue calibrado con la información del periodo 2001 – 2010.

Actualmente, RCMRD tiene un simulador online que utiliza el modelo EF5 para calcular los flujos en el río Nzoia a escala diaria. La información de entrada es la precipitación diaria del proyecto CHIRPS v.2.0 y la evapotranspiración de referencia promedio mensual PET del proyecto *EarlyWarning*. La Figura 20 presenta la comparación del hidrograma de flujos diarios simulados en el río Nzoia y el histograma de precipitación diaria para la ubicación de la estación Rwambwa.



**Figura 20: Hidrograma diario de caudal observado de la estación de aforo del río Rwambwa en cuenca Nzoia (2010-2016)**

Fuente: Adaptado de RCMRD

### c. INFORMACIÓN DISPONIBLE

Se dispone de la información de la estación hidrométrica Rwambwa, localizada en la parte baja del río Nzoia, aguas arriba del área de interés. Cabe señalar que no se contó con la información meteorológica de ninguna estación en la cuenca. La Tabla 14 muestra la ubicación de la estación hidrométrica.

**Tabla 14: Estación hidrométrica Rwambwa ubicada en la cuenca Nzoia**

Estación	Periodo	Longitud <sup>1</sup> (°)	Latitud <sup>1</sup> (°)	Altitud (m)
Rwambwa	1985 - 2016	34,09	0,12	1149

Nota: (1) Coordenadas WGS84

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron imágenes satelitales como fuente de información. Para la topografía, se contó con el *Digital Elevation model* (DEM) de RCMRD.

Para la precipitación, se contó con información de cinco fuentes: (1) *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*<sup>4</sup> (CHIRPS), desarrollado por la *University of California Santa Barbara* (UCSB); (2) *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation*

<sup>4</sup> Link de descarga: [ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/africa\\_daily/tifs/p05/](ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/africa_daily/tifs/p05/)

(MSWEP), descargado de la plataforma earth2Observe<sup>5</sup>; (3) *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF), descargado de la plataforma earth2Observe<sup>6</sup>; (4) *RainFall Estimate* (RFE), producto del proyecto *Early Warning*<sup>7</sup> desarrollado por el USGS; y, (5) *Tropical Rainfall Measuring Mission*<sup>8</sup> (TRMM), desarrollado por *National Aeronautics and Space Agency* (NASA).

En el caso de la evapotranspiración de referencia, se contó con información de dos fuentes: (1) *Daily Potential Evapotranspiration* (PET), producto del proyecto *Early Warning*<sup>9</sup> desarrollado por el USGS; y, (2) *Water Resources Reanalyses*<sup>10</sup> (WRR2), obtenido de la plataforma earth2Observe. En la Tabla 15 se resume la información de las imágenes satelitales disponibles y sus características más importantes.

**Tabla 15: Información utilizada para el modelamiento hidrológico de la cuenca Nzoia**

Parámetro	Tipo	Resolución	Paso	Periodo	Fuente
Topografía	DEM	2,2 km			RCMRD
Precipitación	CHIRPS v.2.0	5,5 km	Diario	1981 - 2017	UCSB
	MSWEP	27,8 km	Diario	1979 - 2014	earth2Observe
	ECMWF	111,3 km	Diario	1995 - 2014	earth2Observe
	RFE	11,1 km	Diario	2001 - 2017	USGS
	TRMM V7	27,8 km	3 horas	2000 - 2017	NASA
Evapotranspiración potencial	PET	27,8 km	Mensual <sup>1</sup>	-- <sup>1</sup>	USGS
	PET	27,8 km	Diario	2001 - 2004	USGS
	WRR2	27,8 km	Diario	1979 - 2014	earth2Observe

Nota: (1) Promedio mensual multianual continuo a lo largo del tiempo

<sup>5</sup> Link de descarga: <https://wci.earth2observe.eu/thredds/ncss/grid/jrc/mswep-rainf-daily-agg.nc/dataset.html>

<sup>6</sup> Link de descarga: [https://wci.earth2observe.eu/thredds/dodsC/ecmwf/met\\_forcing\\_v0/rainf\\_daily.nc.html](https://wci.earth2observe.eu/thredds/dodsC/ecmwf/met_forcing_v0/rainf_daily.nc.html)

<sup>7</sup> Link de descarga: <https://earlywarning.usgs.gov/fews/product/48>

<sup>8</sup> Link de descarga: <ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/merged/mergeIRMicro/>

<sup>9</sup> Link de descarga: <https://earlywarning.usgs.gov/fews/product/81>

<sup>10</sup> Link de descarga: <https://wci.earth2observe.eu/thredds/catalog-earth2observe-model.html?dataset=deltares-ref-et-penmanmonteith-wrr2-agg>

### **4.3.3. DESARROLLO DEL PROYECTO**

#### **a. EVALUACIÓN DEL MODELO EXISTENTE**

Se evaluaron diferentes aspectos del modelo CREST/EF5, construido por la RCMRD (modelo inicial) para definir la idoneidad de su uso para la simulación hidrológica de la cuenca Nzoia de acuerdo con los fines de este proyecto. Los parámetros definidos en el modelo inicial son agregados. El área de estudio presenta características espaciales variables, principalmente en términos de uso y tipo de suelo. No obstante, no resulta totalmente incongruente suponer una configuración homogénea en cuanto la mayor parte del territorio está dominada por una condición particular. Por ejemplo, más del 70% de la cuenca se utiliza para la agricultura (ISC, 2017) y casi la totalidad de la extensión de la cuenca tiene una profundidad de suelos arcillosos medianamente constante (FAO *et al.*, 2009). Cabe resaltar que los valores utilizados de los parámetros y su desempeño conjunto generaron muy buenos resultados en términos de caudales diarios simulados para el período 2010 - 2016: Nash-Sutcliffe = 0,75, Coeficiente de correlación (R Pearson) = 0,86 y Sesgo = 0,54%.

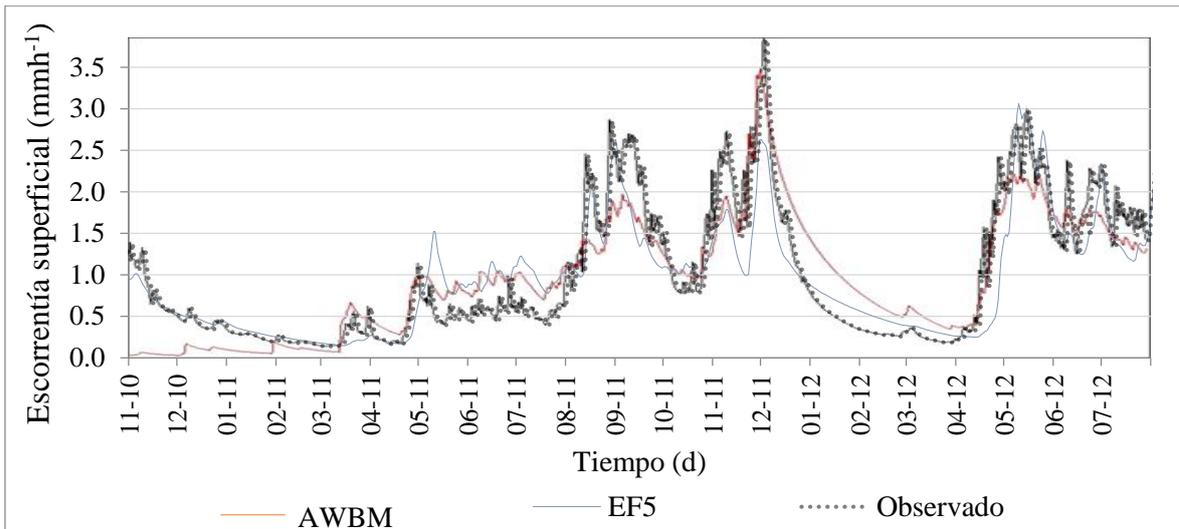
Sin embargo, aun cuando los valores calibrados están comprendidos en rangos que representan condiciones naturales posibles, éstos no se ajustan adecuadamente a la condición en Nzoia. Por ejemplo, los valores de capacidad máxima del suelo, relación de área impermeable, conductividad hidráulica saturada del suelo, son muy altos con base en los registros existentes.

Finalmente, se compararon los resultados del modelo inicial (EF5) y el realizado utilizando el modelo AWBM (ISC, 2017) para el período de validación (2010 – 2012), que se muestra en la Figura 21. Sobre la base de los índices de bondad de ajuste y en una inspección visual, el modelo EF5 presenta mejores resultados.

#### **b. COMPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA DE ENTRADA**

La falta de registros meteorológicos disponibles en el área de estudio limita el análisis de la representatividad de los datos satelitales considerados. Por ello, no se puede hacer un análisis de corrección del sesgo en cuanto no hay información base para el proceso de *downscaling*.

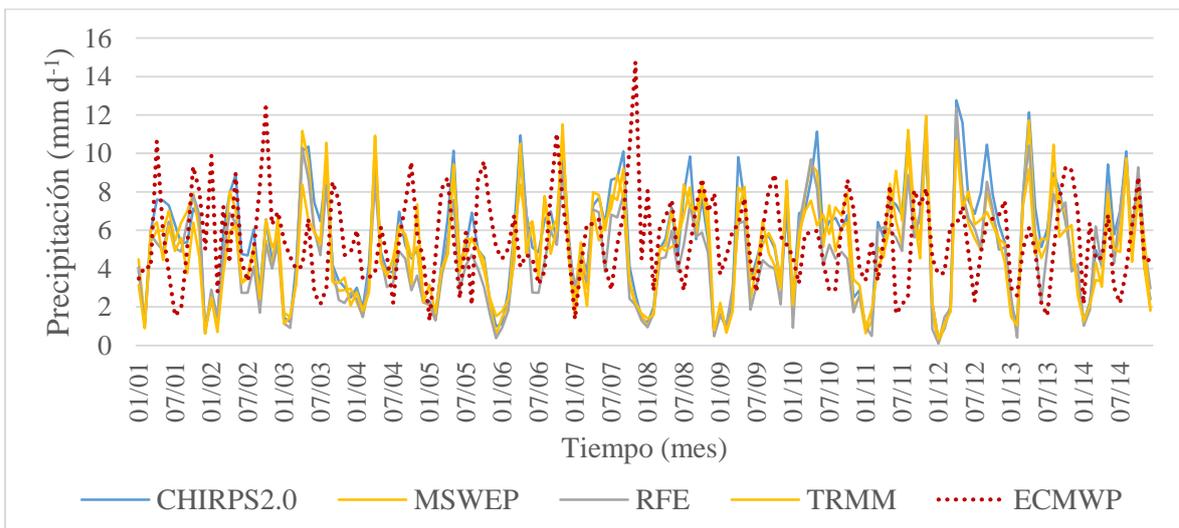
Dado que la información de datos satelitales sin procesar de los sets tuvo que ser utilizada, se realizó un análisis comparativo de las fuentes de información en la ubicación de la estación de aforo del río Rwambwa para identificar la discrepancia entre sus valores.



**Figura 21: Hidrograma diario del caudal observado y simulado por los modelos EF5 y AWBM para la cuenca Nzoia (01/11/2010 - 30/07/2012)**

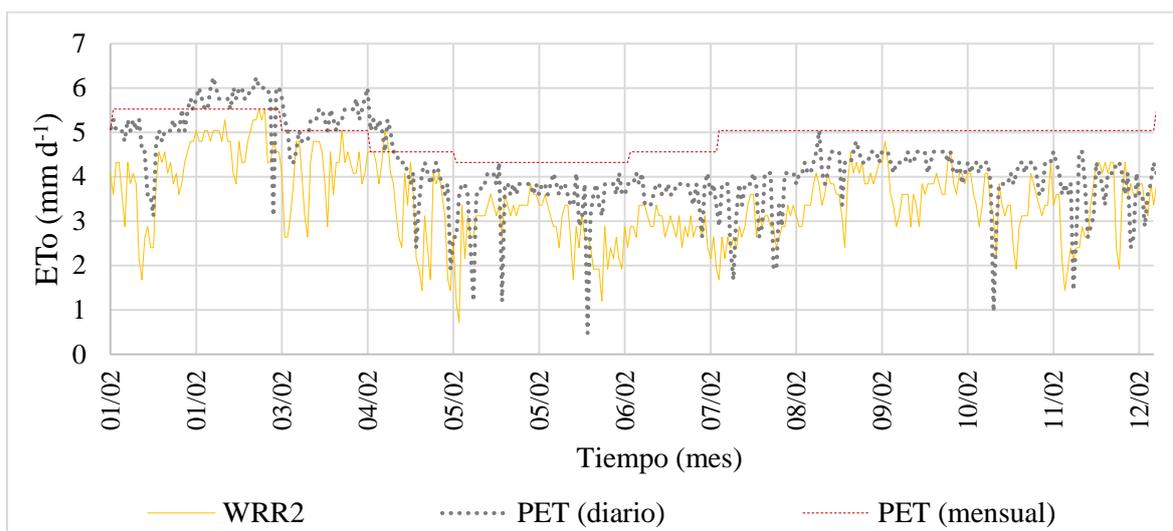
Nota: EF5 = escorrentía superficial simulada con *software* EF5 ( $\text{mm d}^{-1}$ ), AWBM = escorrentía superficial simulada con *software* AWBM ( $\text{mm d}^{-1}$ ), Observado = escorrentía superficial observada ( $\text{mm d}^{-1}$ )

La Figura 22 muestra las series de tiempo de los cinco sets de datos para el periodo 2001 - 2014 a escala mensual. La mayoría de las imágenes satelitales sigue un patrón similar, salvo ECMWF que es la única fuente que presenta la mayor discrepancia a lo largo del período de evaluación, por lo que fue descartado de análisis posteriores. Esto fue verificado a través de un análisis de doble masa.



**Figura 22: Comparación de los valores mensuales de precipitaciones por set de datos para la cuenca Nzoia (2001 – 2014)**

En cuanto a las imágenes satelitales de evapotranspiración de referencia, se observó que las fuentes discretizadas a paso de tiempo diario presentan un desarrollo similar. Sin embargo, el modelo WRR2 muestra un valor promedio menor y variaciones diarias más pronunciadas. No obstante, debido a la extensión del registro disponible, las imágenes satelitales del modelo WRR2 fueron consideradas para la simulación posterior. La Figura 23 muestra la comparación de la información de las distintas fuentes inicialmente consideradas.



**Figura 23: Comparación de los valores de evapotranspiración de referencia por set de datos para la cuenca Nzoia (2002)**

### c. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO INICIAL

Los sets de imágenes satelitales analizados en la sección previa fueron evaluados como datos de entrada para el modelo inicial a fin de evaluar la representatividad de su calibración.

La información considerada para el análisis fue la siguiente:

- Topografía: DEM
- Precipitación: CHIRPS v.2.0, MSWEP, TRMM V7 y RFE
- Evapotranspiración de referencia: PET (mensual) y WRR2
- Descargas observadas: estación hidrométrica Rwambwa (1995 – 2006, 2010 – 2016)

El modelo inicial fue calibrado con la información de la estación Rwambwa para el periodo 2010 - 2016, utilizando los valores de evapotranspiración de referencia promedio mensuales.

La simulación comprendió el mayor periodo posible de acuerdo a la disponibilidad de datos que se tuvo a la fecha.

En la Tabla 16 se presentan los índices de bondad de ajuste calculados sobre la base de los resultados simulados y la información de la estación Rwambwa.

**Tabla 16: Análisis de sensibilidad del modelo inicial a los sets de datos meteorológicos para la cuenca Nzoia**

Fuente	Periodo	Nash-Sutcliffe	R Pearson	Sesgo (%)
Evapotranspiración de referencia constante				
CHIRPS 2.0	1995 - 2014	0,483	0,742	-17,3
MSWEP	1995 - 2014	0,019	0,699	-46,0
TRMM	2000 - 2017	0,182	0,691	-37,8
RFE	2001 - 2017	0,086	0,594	-36,8
Evapotranspiración de referencia variable				
CHIRPS 2.0	1995 - 2014	-0,119	0,765	45,2
MSWEP	1995 - 2014	0,354	0,751	19,8
TRMM	2000 - 2017	0,344	0,722	20,2
RFE	2001 - 2017	0,300	0,700	12,0

Se observó que, a pesar que la calibración inicial se realizó utilizando un set de datos de evapotranspiración mensual constante, los mejores resultados se consiguieron con el set de datos variable en el tiempo.

No obstante, la representatividad del modelo disminuye claramente: Nash-Sutcliffe y el coeficiente de correlación (R Pearson) aproximadamente disminuyeron 0,56 y 0,15, respectivamente, mientras que el sesgo aumenta 5%.

#### **d. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO**

Posteriormente, se enfocó en el mejoramiento de la representatividad del modelo hidrológico a través de una calibración de los parámetros de simulación. Para ello, se valió del algoritmo de calibración automática *Differential Evolution Adaptive Metropolis* (DREAM) que es parte del modelo EF5.

Se restringieron los límites de los potenciales valores de calibración a partir de los datos verificados en la Sección 4.3.2. Existe un grupo de parámetros que puede medirse fácilmente en campo o inferirse de la literatura. No obstante, existe otro grupo que solo puede derivarse

de los resultados obtenidos, de forma que sus valores refuercen la caracterización general de la cuenca (exponente de la curva de infiltración de volumen, factor de conversión de evapotranspiración de referencia a real, etc.).

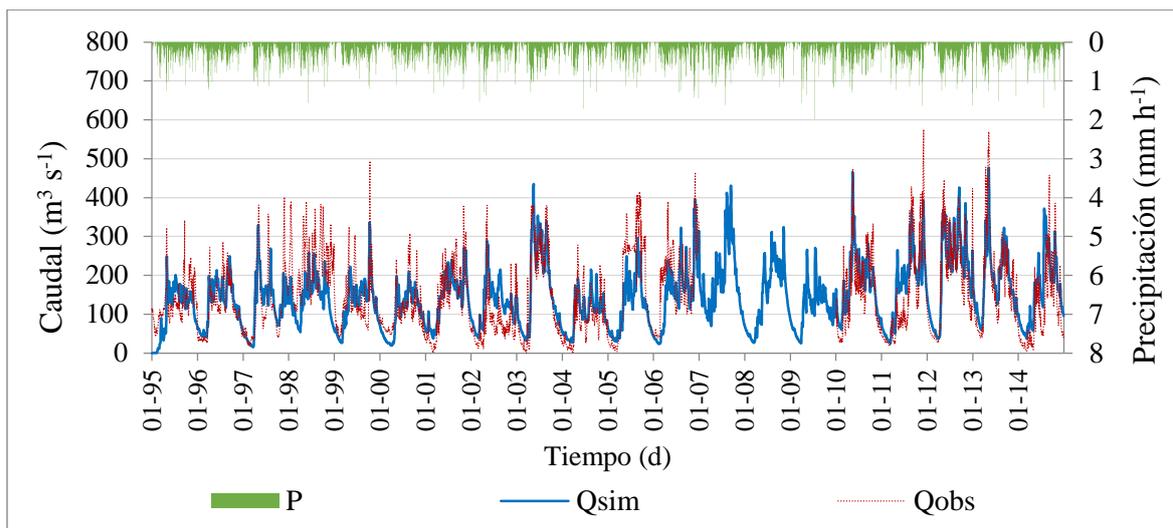
En cuanto a los parámetros que pueden ser limitados en su rango de evaluación se tuvieron:

- Capacidad máxima de agua del suelo ( $w_m$ ): FAO *et al.*, (2009) sugiere que los suelos de Nzoia tienen una profundidad máxima de 10 cm.
- Zona impermeable ( $i_m$ ): representado principalmente por asentamientos urbanos y formaciones geológicas. A partir de las imágenes de satélite, las superficies impermeables cubren menos del 1% de toda la cuenca.
- Conductividad hidráulica saturada del suelo ( $f_c$ ): FAO *et al.*, (2009) e ISC (2017) sugieren que la cuenca Nzoia está compuesta principalmente por suelos arcillosos, con bajas tasas de conductividad hidráulica saturada del suelo (máximo  $\sim 50 \text{ mm h}^{-1}$ ).
- Umbral del número de celdas de la grilla que contribuyen a un río ( $t_h$ ): relacionado con el área de captación tributaria a las corrientes. De acuerdo a la resolución del DEM utilizado para la modelización del EF5 ( $\sim 500 \text{ km}^2$  de superficie), como mínimo, 10 celdas contribuyen a la formación de un cauce.

Asimismo, se consideró un periodo de inicialización del modelo (*warm up period*) de seis meses en donde se asegura que la cantidad de agua en el suelo sea cero. Además, de esta manera se evita un error procedimental en el cálculo de los índices estadísticos. La información considerada para el proceso de calibración fue la siguiente:

- Topografía: DEM
- Precipitación: CHIRPS v.2.0, MSWEP, TRMM V7 y RFE
- Evapotranspiración de referencia: WRR2
- Descargas observadas: estación hidrométrica Rwambwa (1985 – 2006, 2010 – 2016)
- Calibración: periodo variable, función objetivo Nash-Sutcliffe

En la Figura 24 se presenta la comparación de los caudales simulados y observados para el periodo 1995 – 2014.



**Figura 24: Hidrograma diario de caudal simulado y observado usando set de datos CHIRPS v.2.0 en la cuenca Nzoia (1995 – 2014)**

Nota: P = precipitación total diaria ( $\text{mm h}^{-1}$ ). Qsim = caudal promedio diario simulado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ). Qobs = caudal promedio diario observado en la estación Rwambwa ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )

En la Tabla 17 se presenta la comparación de los índices de bondad de ajuste calculados para cada modelo calibrado.

**Tabla 17: Índices de bondad de ajuste a escala diaria para el modelo de la cuenca Nzoia para diferentes sets de datos**

Fuente	Calibración	Nash-Sutcliffe	R Pearson	Sesgo (%)
CHIRPS 2.0	1995 - 2014	0,603	0,777	-0,47%
MSWEP	1995 - 2014	0,501	0,774	-20,46%
TRMM V7	2000 - 2017	0,636	0,798	0,50%
RFE	2001 - 2017	0,593	0,772	-1,19%

Los valores de Nash-Sutcliffe calculados fueron superiores a 0,5 en todos los casos. Tomando como referencia a Moriasi *et al.*, (2007), estos resultados indicarían que los modelos representaron satisfactoriamente el medio. Además, los valores por encima de 0,77 del coeficiente de correlación (R Pearson) indican que los valores simulados guardan una relación de linealidad con los caudales observados. Finalmente, salvo con el set de datos MSWEP, los modelos presentaron un sesgo mínimo en los caudales simulados.

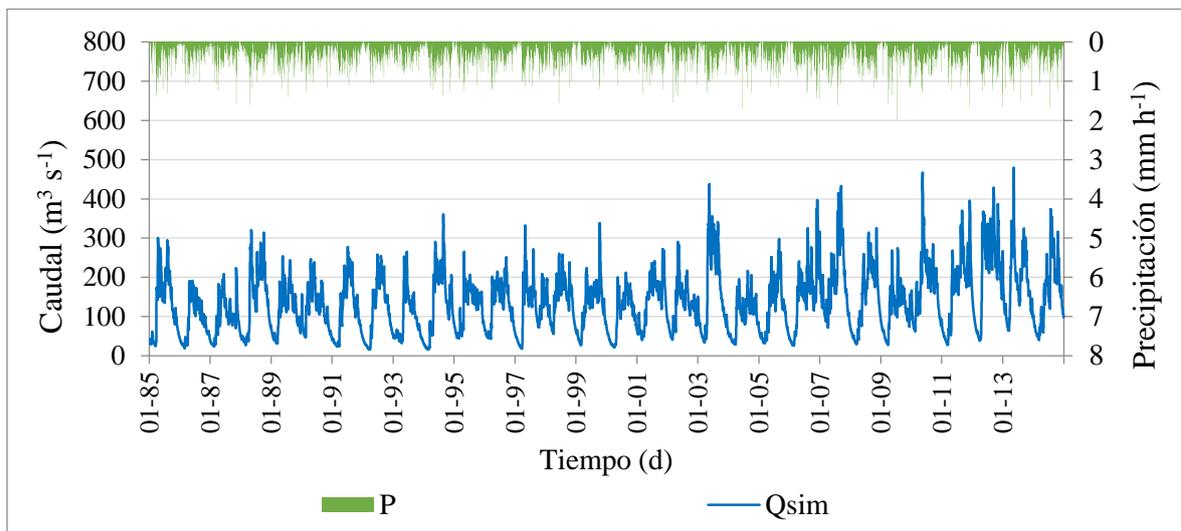
De esta manera, los sets de datos que produjeron mejores resultados corresponden a CHIRPS v.2.0 y TRMM V7. Cabe resaltar que ambos poseían los registros más extensos. Respecto a los valores de los parámetros calibrados, se verificó que estos son parecidos salvo en cuanto a las características de la conductividad hidráulica del suelo. Este parámetro está

mejor representado en la calibración de CHIRPS v.2.0 en cuanto una baja conductividad hidráulica es característica de suelos arcillosos como los identificados en la cuenca Nzoia.

Finalmente, se logró conseguir información de imágenes CHIRPS v.2.0 desde 1981 hasta 2017 a escala diaria. De acuerdo a ello, el set de datos escogido para representar hidrológicamente la cuenca Nzoia fue CHIRPS v.2.0. En la Tabla 18 se presentan la comparación de los valores de los parámetros calibrados.

### e. SIMULACIÓN

Finalmente, dado un nuevo set de datos disponibles de CHIRPS v.2.0 con registro más extensos que estuvieron disponibles al final del proyecto, se realizó una simulación para el periodo completo de análisis. En la Figura 25 se muestra la serie de tiempo de descargas simuladas en la estación hidrométrica Rwambwa.



**Figura 25: Hidrograma diario de caudal simulado usando set de datos CHIRPS v.2.0 en la cuenca Nzoia (1985 – 2014)**

Nota: P = precipitación total diaria ( $\text{mm h}^{-1}$ ), Qsim = caudal promedio diario simulado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )

Este modelo hidrológico fue el utilizado posteriormente para el cálculo de los escenarios de cambio climático y caudales de máximas avenidas.

**Tabla 18: Comparación de valores de parámetros calibrados para el modelo de la cuenca Nzoia por set de datos**

Parámetro	Descripción	Rango de calibración	Calibración inicial	Set de datos de precipitación				
				CHIRPS 2.0	MSWEP	TRMM V7	REF	
<b>CREST</b>								
1	wm	Capacidad máxima de agua en el suelo (mm)	5 - 250	199,26	87,30	73,62	73,16	83,73
2	b	Exponente de curva de volumen de infiltración	0,1 - 20	0,20	1,26	1,05	14,29	11,52
3	im	Razón de área impermeable	0,01 - 0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
4	ke	Factor de conversión: PET a AET <sup>1</sup>	0,001 - 1	0,89	0,87	0,88	0,82	0,72
5	fc	Conductividad hidráulica sat. del suelo (mm h <sup>-1</sup> )	0 - 50	137,05	1,27	1,36	34,45	33,20
6	iwu	Volumen inicial de agua (%)	24,999 - 25	25	25	25	25	25
<b>Onda cinemática</b>								
7	under	Multiplicador de velocidad de interflujo	0,0001 - 3	0,00015	0,00011	0,00011	0,00011	0,00010
8	leaki	Agua filtrada del interflujo al reservorio	0,01 - 1	0,014	0,017	0,017	0,032	0,024
9	th	Límite de celdas tributarias a río (km <sup>2</sup> )	1 - 100	9,35	65,57	62,51	47,07	48,34
10	isu	Valor inicial del reservorio	0 - 1x10 <sup>-7</sup>	0	0	0	0	0
11	alpha	Coeficiente en celdas de canales (a)	0,01 - 3	1,25	1,26	2,40	1,39	2,56
12	beta	Coeficiente en celdas de canales (b)	0,01 - 1	0,92	0,97	0,83	1,00	1,00
13	alpha0	Coeficiente en celdas de canales (A)	0,01 - 5	4,94	4,03	4,81	3,84	2,66

Nota: (1) PET = evapotranspiración de referencia, AET = evapotranspiración actual

#### **4.3.4. CONTRIBUCIÓN**

De acuerdo con el objetivo de este proyecto, se construyó un modelo confiable que representa las condiciones hidrológicas de la cuenca Nzoia sobre la base de información de imágenes satelitales y otros modelos existentes.

Se demostró competencia profesional al trabajar en conjunto con diferentes profesionales de distintos campos y realidades que contribuyeron a construir un modelo hidrológico. Además, se solucionó el problema derivado de la falta de información meteorológica de campo a través del uso de imágenes satelitales rigurosamente analizadas. También, se demostró suficiencia profesional al evaluar, segregar, probar y definir el tipo de modelo hidrológico a ser considerado. Por otro lado, se demostró capacidad técnica al recurrir a herramientas de programación para facilitar el procesamiento de extensos sets de datos de manera confiable y familiarizarse con distintas plataformas de simulación nuevas en un corto lapso.

Además, se demostró nuevamente que las competencias académicas adquiridas durante la carrera fueron asimiladas y potenciadas con la experiencia profesional conseguida. Los conceptos aprendidos durante los cursos de hidrología e hidráulica computacional otorgaron las herramientas básicas para el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, la empresa se benefició del modelo hidrológico construido, el cual se utilizó como base para la evaluación del riesgo por cambio climático en la cuenca Nzoia.

#### **4.4. DISCUSIÓN DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS**

##### **4.4.1. MODELO AGREGADO**

La conceptualización del sistema Milandre contempló: (i) un modelo epikárstico que representa la recarga superficial de excesos; y, (ii) un modelo de flujo de aguas subterráneas afectado principalmente por las cargas hidráulicas regionales. Se confirmó que el efecto del sistema epikárstico permite representar adecuadamente los caudales picos y el flujo de recesión.

El proceso epikárstico fue desarrollado a manera de un modelo hidrológico agregado cuyo único dato de entrada es la precipitación variable en el tiempo.

En términos fácticos, la configuración del modelo no resulta realista. Se asume que un único reservorio representa la suma de todas las grietas que componen el sistema epikárstico de Milandre. Además, al ser un modelo agregado, éste considera un único valor de precipitación que representa el área total modelada, lo que sugiere que esta condición no varía espacialmente. Finalmente, los resultados del modelo epikárstico son puntuales, lo que se aleja del concepto de una recarga difusa que resulta más representativa. Además, al ser puntual, no se tomaría en consideración el tránsito del flujo.

No obstante, estas libertades conceptuales se sustentan en que los modelos agregados son representaciones de áreas homogéneas. En este caso, el área de estudio no era extensa, en términos hidrológicos. Esto permite considerar condiciones medianamente homogéneas, como la invariabilidad espacial de la precipitación.

Asimismo, se debe tomar en cuenta la situación de insuficiencia de datos que generalmente enfrenta el profesional que trabaja en modelamiento de sistemas. Por ello, una conceptualización que considere condiciones agregadas de un sistema (*i.e.* un único reservorio) puede resultar acertada ante la incertidumbre de asumir datos sin mayor sustento. Además, en este caso particular, a pesar de generar resultados puntuales del sistema epikárstico, se asumió que la entrada de estos al modelo de aguas subterráneas sería al inicio de la tubería. Ello permite simular el tránsito de flujo en lugar de una descarga directa al sistema.

A través de este proyecto se demostró que el uso de un modelo hidrológico agregado puede representar aceptablemente procesos hídricos como ser conceptualmente robusto. Integrar un modelo agregado (epikárst) a uno distribuido (MODFLOW) permitió crear uno semidistribuido que representa adecuadamente la hidrología e hidrogeología del sistema Milandre.

#### **4.4.2. MODELO SEMIDISTRIBUIDO**

El modelo hidrológico construido para representar el sistema hídrico del proyecto Pinaya fue de tipo semidistribuido. Este consideró ocho unidades hidrográficas para la simulación de caudales promedio diarios. El modelo demostró una representatividad aceptable de las condiciones hidrológicas de las microcuencas sobre la base de caudales observados.

Utilizar un modelo semidistribuido implica que el área en evaluación está discretizada en unidades de respuesta hidrológica (URH), las cuales comparten características homogéneas en su extensión, y que están conectadas por enrutamientos que simulan el tránsito de flujo. Se puede observar que el concepto utilizado es el mismo que el desarrollado con el modelo epikárstico (modelo homogéneo con tránsito de flujo).

Cada URH permite representar de manera diferenciada factores que afectan particularmente una zona de la cuenca. Por ejemplo, en el modelo del sistema Pinaya, cada URH consideró un registro de precipitaciones diferente, con sus propias características del modelo de pérdidas en el suelo (SMA). Debido a ello, fue posible modelar y determinar que las microcuencas ubicadas en la cuenca Coata son más productivas que las que se encuentran en la cuenca Camaná.

No obstante, se debe contar con información medianamente detallada del área en evaluación a fin de explotar la capacidad de este tipo de modelos. En ese sentido, debido a que en la práctica profesional hidrológica se usa información de estaciones hidrometeorológicas, el procesamiento de esta resulta demandante en cuanto siempre es recomendable un proceso de regionalización de datos.

Cabe señalar que este tipo de modelos son los más utilizados en el medio profesional. Ello se debe a la facilidad de su uso y la extensa librería de procesos que pueden ser replicados. Por ejemplo, la simulación de operación de reservorios, presas y derivaciones es posible y se encuentra ampliamente documentado. Ello implica que, en muchos casos, estos no son flexibles a modificaciones en el código de modelación (a diferencia de MODFLOW, por ejemplo) en cuanto se espera que el procesamiento se haga dentro de la misma plataforma.

Además, al ser las URH en esencia modelos agregados, éstas se deben definir de manera concienzuda antes de la construcción del modelo. La modificación de los límites de la URH implica recalcular las condiciones y datos de entrada de la cuenca simulada.

A través de este proyecto se demostró que el uso de un modelo hidrológico semidistribuido puede representar aceptablemente procesos hídricos usando como base información medida en campo. La información necesaria para su construcción necesita cierto grado de detalle, al igual que ser procesada y analizada de manera rigurosa.

### 4.4.3. MODELO DISTRIBUIDO

La cuenca Nzoia fue simulada y evaluada utilizando un modelo hidrológico de tipo distribuido. La discretización del dominio del modelo fue utilizando celdas de 4 km<sup>2</sup> de área. Además, se usó información meteorológica proveniente de imágenes satelitales. El modelo demostró una representatividad clara de las condiciones hidrológicas de la cuenca Nzoia.

Un modelo distribuido es un conjunto discreto de URH dispuestas en forma de grilla, que consideran el tránsito de flujo de manera implícita. En otras palabras, el modelo infiere las características de la URH a partir de la información grillada ingresada, de forma que las propiedades del set de datos a utilizar definirán la precisión del modelo.

En ese sentido, la precisión del modelo es dominante en los resultados. La extensión de la cuenca, sus límites, la red de drenaje y demás dimensiones son calculadas internamente. Por ejemplo, trabajar con un DEM de baja resolución implica que los cursos de agua pueden estar erróneamente ubicados y sobredimensionados (riachuelos de 2 km de ancho). No obstante, utilizar un set de datos con mucha resolución incrementa significativamente el tiempo de cálculo (en el orden de días o semanas).

Además, contar con información detallada del área en evaluación es importante a fin de explotar la capacidad del modelo. No obstante, como se vio en la cuenca Nzoia, los parámetros de calibración fueron agregados. Al igual que en el caso del sistema Milandre, contar con información discreta, pero sin sustento, compromete la calidad de los resultados. En este caso, las suposiciones de condiciones homogéneas en el área, sobre la base de información de la FAO, permite además reducir el tiempo de simulación.

Una limitante en los modelos distribuidos recae en la suposición de que el área de estudio no se encuentra intervenida por estructuras hidráulicas de regulación. No obstante, la mayoría de estos modelos son de libre acceso, por lo que la reconfiguración de su código permite acoplar otros procesos a través de programación, por ejemplo, de operación de reservorios.

Además, al ser estos modelos distribuidos, el cálculo de los caudales se hace en cada celda en cuanto cada una de ellas se encuentra calibrada. Por lo tanto, es posible obtener un registro de caudales simulados de cualquier punto dentro del dominio del modelo.

Por otro lado, respecto a la información meteorológica, es necesario considerar que el procedimiento ideal considera la evaluación de la corrección del sesgo. Como se vio en la

cuenca Nzoia, diferentes sets de datos de precipitación modificaban la respuesta hidrológica de esta, por lo que sería recomendable proceder con un análisis exploratorio de estos datos.

Finalmente, a través de este proyecto se demostró que el uso de un modelo hidrológico distribuido puede representar destacablemente los procesos hídricos usando como base información satelital. A pesar de que es recomendable usar información detallada, simplificaciones de esta permiten resultados igualmente aceptables y con menor demanda computacional.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

1. Se describieron las características propias de los tres casos de estudio. El primer caso de estudio se valió de un modelo hidrológico agregado para representar el proceso de recarga epikárstica hacia el sistema Milandre. El segundo caso se enfocó en la acreditación de la disponibilidad hídrica para el proyecto de exploración Pinaya, para el cual se usó un modelo hidrológico semidistribuido para simular el sistema hídrico asociado. Finalmente, el tercer caso de estudio utilizó un modelo hidrológico distribuido y sets de imágenes satelitales meteorológicas para representar el sistema hídrico de la cuenca Nzoia.
2. Se destacaron las ventajas y desventajas asociadas al uso de cada tipo de modelo hidrológico. En el caso de los modelos agregados, estos asumen características espaciales homogéneas, facilitando el proceso de cálculo. Así, cualquier falta de representatividad puede ser soslayada a través de una conceptualización adecuada del proceso evaluado. Respecto a los modelos semidistribuidos, la información necesaria para su construcción necesita cierto grado de detalle, al igual que ser procesada y analizada de manera rigurosa. En cuanto a los modelos distribuidos, a pesar de ser recomendable el uso de información detallada, simplificaciones de esta permiten resultados igualmente plausibles y con menor demanda computacional. Finalmente, se puede afirmar que la conceptualización de un modelo hidrológico es agregada por definición, independientemente de su tipo, lo que varía es la dimensión del dominio de la URH.
3. Se relacionaron los resultados obtenidos de los modelos hidrológicos con el objetivo particular de cada proyecto. Así, en el primer caso de estudio, el sistema kárstico Milandre se conceptualizó y modeló con éxito mediante el uso de herramientas numéricas y conceptualizaciones. Respecto al segundo caso, se elaboró el estudio hidrológico que acredita la disponibilidad hídrica superficial del sistema hídrico Pinaya, respetando la normativa ambiental e hídrica vigente. Finalmente, en cuando al tercer caso de estudio, se

construyó un modelo confiable que representa las condiciones hidrológicas de la cuenca Nzoia sobre la base de información de imágenes satelitales y otros modelos existentes.

4. De esta manera, se pudo demostrar que cada tipo de modelo permitió resultados aceptables y satisfactorios de acuerdo a las características particulares del entorno y cumpliendo con los objetivos de cada proyecto. En general, es igualmente recomendable el uso de cualquiera de estos modelos siempre que se tenga en cuenta las características particulares que limitan su funcionalidad y la disponibilidad de datos.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Las siguientes recomendaciones se basan en los resultados obtenidos y en la búsqueda del mejoramiento de la representatividad de estos:

### ***Karst Modelling Challenge***

- Incluir en la modelación hidrológica el deshielo y una tasa de infiltración diferenciada impulsada por el uso de la tierra (zonas de cultivo y forestales).
- Discretizar el modelo epikárstico para que pueda ser utilizado como un modelo distribuido y así añadir procesos de enrutamiento.
- Evaluar otras condiciones de borde como la condición de carga constante en los límites del modelo.

### **Proyecto Pinaya**

- Incorporar la conceptualización del reservorio Lagunillas.
- Hacer un análisis de sensibilidad de los parámetros calibrados.

### **Cuenca Nzoia**

- Incorporar información de estaciones meteorológicas (las cuales no estuvieron disponibles durante el desarrollo del estudio) para corregir el sesgo de las imágenes satelitales de precipitación.
- Evaluar la influencia de la aleatorización (*randomization*) de valores de parámetros agregados como la conductividad hidráulica saturada del suelo.

## VI. REFERENCIAS

- Autoridad Nacional del Agua, ANA (2012). *Informe Técnico N° 023-2012-ANA-DCPRH-ERH-SUP-GTP. Definición del caudal ecológico.*
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, Inc.
- Doherty, J. (2004). *PEST Model-Independent Parameter Estimation*. Watermark Numerical Computing. <https://www.nrc.gov/docs/ML0923/ML092360221.pdf>
- Espinoza, J., Vauchel, P., & Ronchail, J. (2005). *El método del vector regional de índices pluviométricos: Utilización del método del Vector Regional con HYDRACCESS - SENAMHI.*
- Foglia, L., Neumann, J., Tolley, D. G., Orloff, S. B., Snyder, R. L., & Harter, T. (2018). Modeling guides groundwater management in a basin with river–aquifer interactions. *California Agriculture*, 72(1), 84–95. <https://doi.org/10.3733/ca.2018a0011>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA, International Soil Reference and Information Centre, ISRIC, Institute of Soil Science, ISS-CAS & JRC. (2009). *Harmonized World Soil Database (version 1.1)*. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria. <http://www.fao.org/3/a-aq361e.pdf>
- FutureWater (2009). *Impacts of Global Climate Change on the Water Resources of the Bunyala plains* (Report 88). [https://www.futurewater.nl/downloads/2009\\_Immerzeel\\_FW88.pdf](https://www.futurewater.nl/downloads/2009_Immerzeel_FW88.pdf)
- Implementation Support Consultant's, ISC (2017). *Implementation of Flood Mitigation Structures on Lower Nzoia River and Lower Nzoia Irrigation Project Phase 1: Final Design Report.*
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis – Summary for Policymakers, Technical Summary and*

*Frequently Asked Questions – Part of the Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf)

Karst Modelling Challenge, KMC (2018). *Analysis of results STEP 1, hydrological modelling* (Report).

Khan I, S., P., A., Y., H., Vergara, H., Polocelli, F., Irwin, D. (2011). Hydroclimatology of Lake Victoria region using hydrologic model and satellite remote sensing data. *Hydrology and Earth System Science*, 15, 107-117. <https://doi.org/10.5194/hess-15-107-2011>

Khan, S., Yang, H., Wang, J., Yilmaz, K., Gourley, J., Adler, R. (2011). Satellite Remote Sensing and Hydrologic Modeling for Flood Inundation Mapping in Lake Victoria Basin: Implications for Hydrologic Prediction in Ungauged Basins. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), 85-95. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2057513>

Loucks, D. P., & van Beek, E. (2005). *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L. (2007). Model Evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy of watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Organización Meteorológica Mundial, OMM (2011). *Guía de prácticas hidrológicas – Volumen II Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas (OMM-No 168)*. OMM. [https://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/guide/spanish/168\\_Vol\\_II\\_es.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/guide/spanish/168_Vol_II_es.pdf)

Perrin, J. (2003). *A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers* [PhD Thesis, University of Lausanne].

- Pierre-Yves Jeannin, A. M.-X., Malard, A., Hauselmann, P. & Meury, P.-X. (2016). Effect of Cave Ventilation on Karst Water Chemographs in P. Renard, C. Bertrand (Eds.), EuroKarst 2016, Neuchâtel, Advances in Karst Science (pp. 129-139). *Springer International Publishing Switzerland*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45465-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45465-8_14)
- Pierre-Yves Jeannin, A. M.-X., Grasso, D.A. (1995). Estimation des infiltrations efficaces journalières sur le bassin karstique de la Milandrine. *Bulletin d'Hydrogéologie*, 14, 83-94.
- Ray, P. A., & Brown, C. M. (2015). *Confronting Climate Uncertainty in Water Resources Planning and Project Design: The Decision Tree Framework*. Washinton, DC: World Bank. [https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0477-9\\_ch1](https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0477-9_ch1)
- Regional Centre for Mapping of Resources for Development, RCMRD (2015). *Flood assessment in Lower Nzoia River through hydrologic modelling, remote sensing and GIS techniques*. Regional Center for Mapping of Resources for Development (Report). Nairobi: Ministry of Environment, Water and Natural Resources.
- Reimann, T., Giese, M., Geyer, T., Liedl, R., Maréchal, J. C., & Shoemaker, W. B. (2014). Representation of water abstraction from a karst conduit with numerical discrete-continuum models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), 227–241. doi:10.5194/hess-18-227-2014
- Resolución Jefatural N° 090-2016-ANA de 2016 [Autoridad Nacional del Agua]. Términos de referencias comunes del contenido hídrico que deberán cumplirse en la elaboración de los estudios ambientales, Formato Anexo A-1 – Acreditación de la disponibilidad hídrica superficial con la que se cumple la aprobación de estudios de aprovechamiento hídrico para obtención de licencia de uso de agua. 7 de abril de 2016.
- Resolución Jefatural N° 154-2016-ANA de 2016 [Autoridad Nacional del Agua]. Metodología para determinar caudales ecológicos, Formato Anexo 2 – Caudal ecológico específico para proyectos con declaración de impacto ambiental. 15 de junio de 2016.
- Shoemaker, W. B., Kuniandy, E. L., Birk, S., Bauer, S., & Swain, E. D. (2008). Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, 6(A24), 50. <https://pubs.usgs.gov/tm/tm6a24/pdf/tm6-A24.pdf>

Thornthwaite, C., & Mather, J. (1955). *The water balance*. Laboratory of Climatology.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO (1 de marzo de 2020). *Clean water and sanitation*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation>

Wang, J., Yang, H., Gourley, J., Sadiq, I., Yilmaz, K., Adler, R. (2011). The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model. *Hydrological Sciences Journal*, 56(1), 84-98. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.543087>