

Universidad Nacional Costa Rica  
Sede Regional Chorotega  
Campus Liberia

Evaluación del potencial hidrológico para el abastecimiento de agua potable, ante la  
variabilidad climática: Caso de estudio río Destierro en Limón, Costa Rica

Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería  
Hidrológica

**Natalia Barahona Picado**  
**207530725**

Ciudad de Liberia, Guanacaste, Costa Rica

Febrero, 2021

## **Dedicatorias**

*A mis padres, Sonia Picado y Rodrigo Barahona, mis hermanos, María Fernanda y Alejandro, y a mi pareja, Anthony Leandro por su paciencia, comprensión y sobre todo por el apoyo brindado para impulsar concluir mis estudios.*

**Liberia, Guanacaste**

**Febrero, 2021**

**Integrantes del Tribunal Examinador**

---

**Dr. Rolando Madriz Vargas**

Tutor

---

**PhD. Christian Golcher Benavides**

Lector

---

**Dr. Jose Rodrigo Rojas Morales**

Lector

---

**M. Sc. Marlene Durán López**

Representante de Dirección Académica, Campus Liberia

---

**Dr. Fernando Gutiérrez Coto**

Representante de la Decanatura, Sede Regional Chorotega

## **Resumen Ejecutivo**

### **Tema**

Evaluación del potencial hidrológico para el abastecimiento de agua potable, ante variabilidad climática: Caso de estudio el río Destierro en Limón, Costa Rica

### **Problemática**

La ausencia de planificación hídrica atenta contra la disponibilidad futura del agua. Ante esta situación resulta fundamental comprender el comportamiento de los cuerpos de agua en futuros escenarios climáticos, de manera que las entidades encargadas del recurso hídrico tomen decisiones para la correcta gestión de este recurso.

### **Objetivo General**

Evaluar el potencial hidrológico para el abastecimiento de agua potable, ante la variabilidad climática: Caso de estudio el río Destierro en Limón, Costa Rica

### **Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos se resumen en: la estimación del caudal futuro del río Destierro de acuerdo con los escenarios climáticos, y la determinación de la capacidad de abastecimiento poblacional futuro.

### **Metodología**

Se cataloga como una investigación de tipo descriptiva, con un enfoque cuantitativo. Se utiliza fuentes primarias y secundarias para la recolección de la información.

En el capítulo I se contextualiza la problemática del proyecto, además se plantea el escenario de desarrollo de la investigación.

En el capítulo II se describe los aspectos generales de la zona de estudio, la identificación de las zonas de vida según Holdridge, y la ubicación de la red hídrica en estudio.

En el capítulo III se verifica que la perspectiva legal y la perspectiva socioambiental no afecten el desarrollo del actual proyecto.

En el capítulo IV se plantea la estrategia metodológica a seguir para cumplir con los objetivos planteados en el proyecto.

En el capítulo V se exponen los resultados de la investigación según se detalla en el capítulo IV, además se analizará los resultados obtenidos.

## **Conclusiones**

Se obtuvo cuatro posibles valores de oferta hídrica, dos de cada escenario de cambio climático, el mayor volumen ofertado de recurso hídrico es de 23 791 816.43 m<sup>3</sup>, del escenario 2050, en la ubicación actual del aforo.

## **Recomendaciones**

Los datos generados, por este modelo hidrológico, establecen una base para la preparación de acciones preventivas, se recomienda un plan de intervención para el manejo de la cuenca.

## **Agradecimientos**

A mi familia, por su apoyo.

A mi pareja, por estar presente y animarme.

A mis amigas, por sus palabras de aliento e inspiración.

A mis asesores, José Pablo Bonilla y María José Aguilar, por sus aportes en este trabajo.

Para el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, por brindarme los insumos para el desarrollo de esta investigación.

## Tabla de Contenidos

Dedicatorias .....	ii
Resumen Ejecutivo .....	iv
Agradecimientos .....	vi
Índice de Tabla.....	ix
Índice de Figuras.....	x
Lista de Abreviaturas .....	xii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Problemática .....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos .....	3
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES Y LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO .....	6
2.1. Antecedentes .....	6
2.2. Localización del proyecto .....	8
CAPÍTULO III. ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD .....	10
3.1. Perspectiva Legal .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.2. Perspectiva Socioambiental .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
CAPÍTULO 4. ASPECTOS METODOLÓGICOS .....	17
4.1. Diseño de la investigación .....	17
4.1.1. Paradigmas de investigación .....	17
4.1.2. Tipo de investigación .....	17
4.2. Metodología del proyecto .....	17

4.2.1. Análisis de sitio .....	20
4.2.2. Modelación hidrológica superficial.....	21
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	28
5.1. Análisis de sitio .....	28
5.2. Modelación hidrológica superficial .....	37
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ANEXOS.....	52
7.1. Referencias bibliográficas.....	52
7.2 Anexos .....	55



## Índice de Tabla

Tabla 1. Marco Legal de tratados internacionales de Costa Rica.....;	<b>Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 2. Marco Legal de leyes, decretos y reglamentos de Costa Rica;	<b>Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 3. Estructura de investigación del sistema sociocultural .....	20
Tabla 4. Escenarios de precipitación .....	26
Tabla 5. Uso de la tierra.....	29
Tabla 6. Estaciones ICE, IMN y AyA .....	37
Tabla 7. Registro histórico de estaciones meteorológicas cerca del área de estudio.....	38
Tabla 9. Modelaje año 2050 a partir de Thornthwaite – Mather modificado.....	44
Tabla 10. Proyección de la población en el distrito de Pocora.....	47
Tabla 10. Oferta y Demanda de la zona de estudio .....	48

## Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio en Limón, Costa Rica.....	8
Figura 2. Diagrama general de la metodología del proyecto.....	19
Figura 3. Fotografías del área de estudio.....	30
Figura 4. Mapa de uso de suelo .....	32
Figura 5. Ubicación de la propuesta para movilización de punto de aforo. ....	36
Figura 6. Temperatura media mensual desde 1994 hasta 2012 en la estación Hacienda El Carmen.....	39
Figura 7. Aforos del río Destierro .....	40
Figura 8. Calibración (%Percolación 0.65 – %Retención 0.95).....	41
Figura 9. Validación (% Percolación 0.65 - %Retención 0.95) .....	41
Figura 10. Caudal modelado para el año 2050 .....	43
Figura 11. Comparación del 2050 y 2080 .....	45
Figura 12. Comparación del área actual con el área propuesta en el escenario 2050 .....	46
Figura 13. Comparación del área actual con el área propuesta en el escenario 2080. ....	46

## Tabla de Anexos

Anexo 1. Cobertura urbana en el área de estudio .....	55
Anexo 2. Cobertura Forestal.....	56
Anexo 3. Fotografía de pastos en zona de estudio .....	57
Anexo 4. Calibración porcentaje de percolación 0.35 y porcentaje de retención 0.99 .....	58
Anexo 5. Calibración porcentaje de percolación 0.36 y porcentaje de retención 0.02 .....	59
Anexo 6. Calibración porcentaje de percolación 0.37 y porcentaje de retención 0.10 .....	60
Anexo 7. Calibración porcentaje de percolación 0.37 y porcentaje de retención 0.80 .....	61
Anexo 8. Calibración porcentaje de percolación 0.37 y porcentaje de retención 0.99 .....	62
Anexo 9. Calibración porcentaje de percolación 0.39 y porcentaje de retención 0.81 .....	63
Anexo 10. Calibración porcentaje de percolación 0.39 y porcentaje de retención 0.85 .....	64
Anexo 11. Calibración porcentaje de percolación 0.41 y porcentaje de retención 0.82 .....	65
Anexo 12. Calibración porcentaje de percolación 0.42 y porcentaje de retención 0.80 .....	66
Anexo 13. Calibración porcentaje de percolación 0.44 y porcentaje de retención 0.86 .....	67
Anexo 14. Calibración porcentaje de percolación 0.44 y porcentaje de retención 0.98 .....	68
Anexo 15. Calibración porcentaje de percolación 0.45 y porcentaje de retención 0.79 .....	69
Anexo 16. Calibración porcentaje de percolación 0.46 y porcentaje de retención 0.80 .....	70
Anexo 17. Calibración porcentaje de percolación 0.47 y porcentaje de retención 0.71 .....	71
Anexo 18. Modelaje del año 2080.....	72
Anexo 19. Modelaje del año 2050 con nueva área propuesta .....	73
Anexo 20. Modelaje del año 2080 con nueva área propuesta .....	74

## Lista de Abreviaturas

ACC	Área de Conservación Central
ASADA	Asociaciones Administradoras de Acueductos rurales en Costa Rica
AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
CCP	Centro Centroamericano de Población
CNE	Comisión Nacional de Emergencias
CNHM	Comité Nacional de Hidrología y Meteorología
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad y Telecomunicaciones
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
ONG	Organización No Gubernamental
SIG	Sistema de Información Geográfica
UNA	Universidad Nacional Costa Rica
USGS	Servicio Geológico de Estados Unidos

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

---

El presente capítulo consta de tres apartados, el primer es la problemática, el segundo son los objetivos del proyecto y el tercero, el alcance y las limitaciones del proyecto.

### **1.1. Problemática**

La disponibilidad hídrica ha disminuido por el alto crecimiento poblacional en todo el mundo, ante la ausencia de medidas para la regulación del recurso hídrico se incrementa y se agrava el déficit del recurso vital. Algunos factores como la sobreexplotación de acuíferos, el vertido de sustancias a cuerpos de agua, los cambios de uso de suelo, así tales como la deforestación, la agricultura y el descontrol de las zonas urbanas son algunos de los principales factores de presión (Ordoñez, 2012).

En los últimos 50 años, algunos caudales de los ríos han disminuido o agotado su existencia, provocando que estos se compongan de aguas residuales en su totalidad, que a su vez tienden a convertirse en focos de enfermedades (FAO, 2011).

Con respecto a Costa Rica y en relación con el decreto Zona Protectora Acuíferos de Guácimo y Pococí (1986), considera que las aguas potables del país han sido reiteradamente alteradas por acciones del hombre, además, que el desarrollo de las actividades económicas no permite la protección del recurso hídrico, y también, que actualmente existen zonas con abastecimientos poblacionales importantes que han sido contaminadas y alteradas por el mal uso.

La ausencia de planificación atenta contra la disponibilidad futura del agua para las actividades agropecuarias, ecosistemas y la biodiversidad, debido a fenómenos naturales y

antropogénicos como lo es la variabilidad climática (FAO, 2011). La Provincia de Limón, en Costa Rica, se ha visto afectada en la erosión y desgaste de suelos, desabastecimiento en época seca, contaminación de aguas superficiales y subterránea, y en la deforestación. Lo que afecta la actividad humana de la región, desde actividades personales hasta en el riego de los cultivos y ganadería.

Las instituciones están investigando fuentes alternativas de recurso hídrico en el área, donde pretenden conocer el comportamiento futuro de los cuerpos superficiales y así, prevenir la problemática principal que ha ocasionado los factores mencionados anteriormente.

Debido a la situación descrita, este estudio viene analizar el potencial hídrico del río Destierro, donde se tomarán en cuenta variables que permitan determinar el comportamiento del río.

## **1.2. Objetivos**

A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos del proyecto de investigación:

### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar el potencial hidrológico para el abastecimiento de agua potable ante la variabilidad climática usando como caso de estudio el río Destierro en Limón, Costa Rica

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Efectuar un análisis de sitio físico en el área de estudio.
- Establecer las características del área de estudio, en el río Destierro, considerando los datos meteorológicos e hidrométricos.
- Estimar la oferta hídrica superficial del río Destierro bajo escenarios preestablecidos.
- Determinar la capacidad de abastecimiento poblacional del río Destierro en los escenarios preestablecidos.

### **1.3. Alcance y Limitaciones**

A continuación, se presentarán los alcances y limitaciones del proyecto de investigación:

#### **1.3.1. Alcance**

- Desde el punto de vista geográfico, se analizó el área aledaña de la posible toma superficial del río Destierro y se identificaron los posibles riesgos en el abastecimiento (naturales y antropogénicos).
- Desde el punto de vista técnico, se seleccionó una nueva zona de aforo en el río Destierro para la posible toma futura superficial.
- Para cumplir con lo establecido en la técnica hidrológica, el modelo del balance hídrico superficial mensual se calibró y validó a partir del registro histórico de aforos en el río Destierro a una escala mensual.
- Con base en herramientas específicas, se modeló basado en las variantes de las variables de precipitación y temperatura que dicta los escenarios regionalizados del 2050 y 2080 del IMN y el MINAET.
- Se proyectó la población futura de Pocora a partir de los censos realizados por el INEC y se determinó el volumen de agua demandado.
- Con visión de prospectiva, se comparó el resultado del volumen modelado para los años 2050 y 2080 con los resultados de los volúmenes demandados del recurso hídrico.

#### **1.3.2. Limitaciones**

- El río Destierro no ha sido evaluado como fuente potencial hídrico anteriormente por lo que no cuenta con informes de calidad del agua.



- El registro histórico de aforos del río Destierro es discontinuo, los aforos son recolectados una vez al mes, de manera puntual y representa la esorrentía de todo el mes.
- Solo se cuenta con seis estaciones meteorológicas alrededor de la cuenca río Destierro con datos completos desde 1994 hasta 2012, sin embargo, solo la variable de temperatura tiene el período completo.
- El registro histórico de aforos cuenta solo con el dato de diciembre, y con mayor volumen de datos en abril y setiembre.
- El punto de aforo actual se encuentra en una propiedad privada.

## **CAPÍTULO II. ANTECEDENTES Y LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO**

---

El presente capítulo consta de dos apartados, el primero de ellos son los antecedentes y el segundo es la localización del proyecto.

### **2.1. Antecedentes**

El recurso hídrico es fundamental para la vida de los seres humanos, su administración adecuada permite garantizar su disponibilidad en cantidad y calidad suficientes para los distintos usos y, maximizar los beneficios de su aprovechamiento. En Costa Rica, el agua es un bien de dominio público por lo que, es necesario conocer las ofertas y las demandas de este recurso para permitir el abastecimiento equilibrado entre todos los usuarios en una gestión integrada del recurso hídrico (García, 2012).

El recurso hídrico está altamente afectado por la presión producida por la actividad humana, fundamentalmente por la sobreexplotación de acuíferos y fuentes de agua superficial, el vertido de sustancias contaminantes en los cuerpos de agua, los cambios en el uso del suelo como: la deforestación, las malas prácticas en la agricultura y el crecimiento de los asentamientos de humanos. Este último genera una presión en la disponibilidad hídrica. La persistencia de determinadas prácticas agrícolas produce contaminación en el agua y el crecimiento de plagas. Es necesario reconocer que los daños ambientales producidos afectan en particular a las poblaciones cercanas (Aguilar y Arroyo, 2014).

La protección de las reservas de agua es totalmente vital, se estima que en el mundo menos del 1% de los recursos de agua dulce están disponibles para el consumo. Sin embargo,

el 70% de la superficie del mundo está cubierta por agua, sólo el 2.5% es dulce y el 97.5% restante es salada (Lieberherr, 2019)

Unos de los principios rectores de la Política Hídrica Nacional de Costa Rica (2006) es el instrumento de balance hídrico para la asignación del agua en la gestión integral del recurso. El balance hídrico permite evaluar directa e indirectamente componentes hidrológicos fundamentales; por ejemplo, la precipitación, evapotranspiración, escorrentía y el almacenamiento de agua, en una cuenca hidrográfica. Las técnicas del balance hídrico permiten además solucionar importantes problemas hidrológicos teóricos y aplicados. A partir de estos estudios es posible hacer una evaluación y modificaciones de las actividades del ser humano.

En Costa Rica se elaboraron balances hídricos superficiales mensuales para las cuencas hidrográficas definidas por el Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE) y el Comité Nacional de Hidrología y Meteorología (CNHM), algunas de estas son de la vertiente del Caribe: río Reventazón, río Pacuare y el Tortuguero (UNESCO, 2007).

Las características económicas y sociales de la cuenca del río Reventazón son esencial para el desarrollo nacional, esta cuenca proporciona una de fuente de recurso hídrico a la población, además, tiene áreas de conservación y abastece a los cultivos de frutales y ornamentales (Ballestero *et al.*, 2017).

Este proyecto busca de investigación, busca mejorar la Gestión Integrada de Recurso Hídrico, para ello se propone un análisis del río Destierro desde la perspectiva de la respuesta a la variabilidad climática, aumento de la población y cambios en el uso del suelo. Esto surgió



En el sector de Pocora se han desarrollado poblaciones como Destierro y La Roca. Otros caseríos cercanos y de influencia son: La Argentina, Vuelta, Alegría, Portón, Iberia y Bajos de Bonilla, que tiene influencia del Área de Conservación Central.

Según el decreto Plan de ordenamiento territorial (2001) en los cantones de Guácimo y Siquirres se caracterizan por presentar terrenos escarpados, selvas vírgenes y una precipitación anual entre 3000 y 4000 mm. Una gran parte de esta zona se encuentra conformada por el ACC. En el decreto Plan de Ordenamiento Ambiental menciona que las zonas de vidas del sector estudiado son: bosque pluvial premontano, y bosque pluvial montano bajo, con temperaturas de 22 °C en altitudes de los 800 m. El río Destierro es parte del drenaje natural que forman la cuenca superior, donde él junto a ríos como río Toro Amarillo, Guácimo, Dos Novillos y Destierro desaguan hacia la vertiente Atlántica noreste. Por otra parte, los demás ríos desaguan hacia el río Reventazón.

El área de estudio se ubica en las coordenadas CRTM05 582350 m longitud oeste y 241 300 m Latitud Norte con una altitud media de 678 m sobre el nivel del mar. El río en estudio drena a una dirección Norte – Este, teniendo una forma alargada y angosta, desde el nacimiento hasta el punto de control del AyA (9-2-12). El río Destierro comprende una cuenca hasta los puntos descritos anteriormente de un área de 46 868 854.4 m<sup>2</sup>, ubicada a 120 msnm.

Los terrenos aledaños al río tienen múltiples usos, como tierras dedicadas a las plantaciones de banano y piña, algunas otras a menor cantidad como centros urbanos y terrenos descubiertos sin embargo también se encuentra zonas forestales (Castro, 2019)

## **CAPÍTULO III. ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD**















## **CAPÍTULO 4. ASPECTOS METODOLÓGICOS**

---

El presente capítulo consta de dos apartados, el primero de ellos es el diseño de la investigación. En este apartado incorpora los paradigmas de investigación y tipo de investigación. Y el segundo, la metodología del proyecto que se desarrollará a partir los objetivos específicos mencionados en el Capítulo 1.

### **4.1. Diseño de la investigación**

A continuación, se expondrá una breve explicación de las partes del diseño de esta investigación:

#### **4.1.1. Paradigmas de investigación**

Esta investigación es cuantitativa ya que se centra en cantidades numéricas como datos climáticos, meteorológicos e hídricos.

#### **4.1.2. Tipo de investigación**

Esta investigación es de tipo descriptiva ya que se especifica las propiedades lo más exacto posible, debido a esto se espera que los datos ya existentes modelen el comportamiento del caudal del río Destierro.

### **4.2. Metodología del proyecto**

En esta investigación, se buscó determinar la capacidad de abastecimiento poblacional del río Destierro, en los escenarios de cambio climático establecidos y así evaluar el potencial hidrológico para el abastecimiento de agua potable ante la variabilidad climática.

Se realizó una modelación hidrológica para determinar el comportamiento del río Destierro desde el año 1994 hasta 2012, a partir del resultado se modeló el caudal para los años 2050 y 2080 con los escenarios regionalizados realizados por el IMN y MINAET.

A continuación, se muestra el diagrama general de la metodología (Figura 2), asimismo más adelante se explica los apartados mencionados en el diagrama.

De acuerdo con lo observado en la Figura 2, el proyecto se dividió en dos principales etapas que son análisis del sitio y modelación.

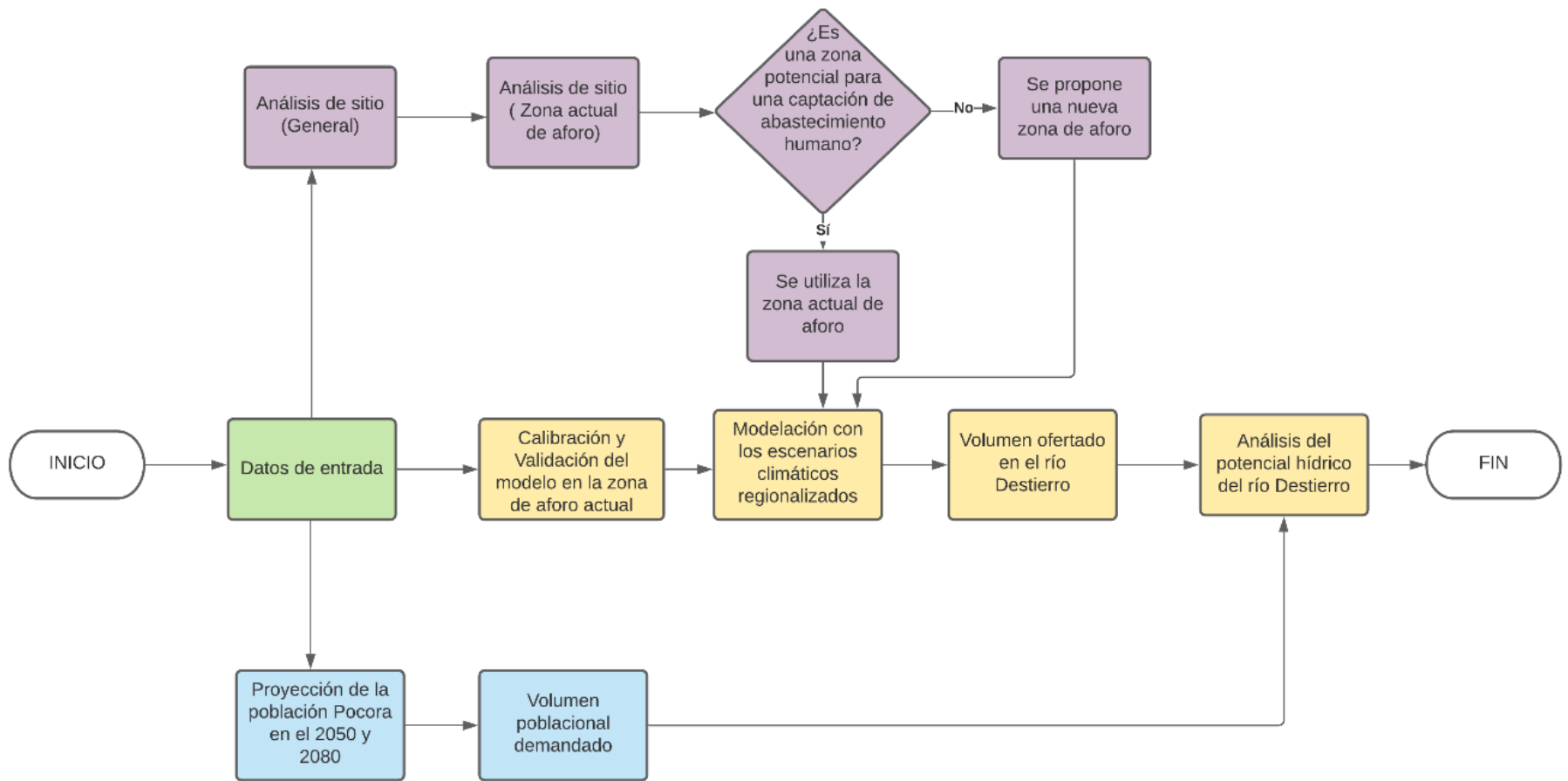


Figura 2. Diagrama general de la metodología del proyecto

#### 4.2.1. Análisis de sitio

El análisis del sitio se trabajó a partir de los sistemas el físico-biótico y sociocultural. Donde el sistema físico – biótico tiene variables como geología, hidrología y uso del suelo. Que se dividió en fallas y fracturas, vulcanismo, zonas inundables y uso de tierra.

Se tomó los datos a partir de una revisión de literatura sobre el área de estudio, además de la solicitud de información en las instituciones públicas, asimismo se utilizó los datos encontrados en los sitios web oficiales de las instituciones públicas como el IMN, el CNE, el INEC, AyA y ASADAS. Además, se usó datos de la USGS para realizar el uso de la tierra en el área de estudio.

Tabla 1. Estructura de investigación del sistema sociocultural

Localización del sitio	Infraestructura	Tenencia del suelo
Colindancias.	Agua potable Drenaje del alcantarillado	Asentamientos irregulares

En el sistema sociocultural (Tabla 3) se fraccionó en las variables de localización, infraestructura, tenencia del suelo, riesgos y vulnerabilidad. Cada uno de ellos se distribuyó en indicadores, donde cada uno de los atributos se ha desarrollado para tener un criterio en el análisis espacial del área de estudio.

Esta información recolectada se utilizó para evaluar el potencial del punto de aforo histórico como toma superficial para el abastecimiento de agua potable asumiendo que es el volumen suficiente para la población.



#### **4.2.2. Modelación hidrológica superficial**

Este apartado de la metodología del proyecto se dividió en la estimación de la oferta hídrica y en el potencial hídrico del río Destierro ejemplificando con la capacidad de abastecimiento poblacional que tuvo el río estudiado.

##### **4.2.2.1. Estimación de la oferta hídrica superficial del río Destierro**

La estimación de la oferta hídrica se realizó a partir del método de Thornthwaite – Mather modificado que se basa en el método de balance hídrico de Thornthwaite creado en 1955 y el método Thornthwaite – Mather publicado en 1957.

Para la realización del método Thornthwaite – Mather modificado (Dunne et al., 1978) es necesario obtener las variables climáticas (Precipitación (P), Precipitación efectiva (Pe), Temperatura(T) y Evapotranspiración potencial (ETP)), donde se utilizó una serie los datos climáticos del 1994 hasta el 2012.

Otras variables que son partes del método son la pérdida potencial acumulado(Acc Pot WL), Almacenamiento (ST), diferencia de almacenamiento ( $\Delta$ ST), evapotranspiración actual (AE), déficit (D), excedente de humedad (S), percolación, escorrentía directa, agua disponible, agua retenida, flujo base, escorrentía total, el porcentaje de Percolación y el porcentaje de retención.

- Precipitación

Esta variable se ha obtenido a partir de seis estaciones climáticas del AyA, IMN y ICE. Mediante el cálculo del promedio aritmético se interpoló la precipitación del área. Se utilizó el método de completación de datos por medio del software Hidroesta. Para una más amplia descripción esta la lectura del libro de Villón (2006).

- Precipitación Efectiva

Para estimar la precipitación efectiva es necesario realizar la Ecuación 2, esta fórmula está ampliamente descrita en la lectura del libro de Villón (2004). La precipitación mensual se obtiene de la precipitación anteriormente mencionada.

Ecuación 2. Precipitación efectiva

$$P_{EF} = P_{MES} * (125 - 0.2 * P_{MES}) / 125, \text{ para } P_{MES} \leq 250 \text{ mm}$$

$$P_{EF} = 125 + 0.1 * P_{MES}, \text{ para } P_{MES} > 250 \text{ mm}$$

Donde:

$P_{MES}$  = Precipitación mensual, mm

- Temperatura

La temperatura se ha obtenido a partir de la estación meteorológica: Hacienda El Carmen – 73091.

- Evapotranspiración potencial

Para estimar la evapotranspiración potencial se ha escogido el método Thornthwaite, por la limitación de datos de Temperatura. En el texto de Villón (2004) se amplía más la información sobre el método.

- Pérdida potencial acumulado (Acc Pot WL)

Para estimar Acc Pot WL se necesario revisar el texto Thornthwaite-Mather (1957), donde se explica que el resultado va a depender de la suma total de la diferencia de precipitación efectiva y evapotranspiración potencial.

- Almacenamiento (ST)

Este valor se estima a partir de las tablas de capacidad de retención del artículo de Thornthwaite-Mather (1957), donde se busca el valor de la diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial, y se obtiene el almacenamiento de humedad o la humedad retenida.

- Diferencia de almacenamiento ( $\Delta ST$ )

La diferencia de almacenamiento es el cambio de humedad del suelo de un mes a otro, cuando el valor de almacenamiento está por encima de la capacidad de retención se supone que no hay ningún cambio (Thornthwaite-Mather ,1957)

- Evapotranspiración actual (AE)

Cuando la precipitación es mayor que la evapotranspiración potencial, el valor de AE es igual a la evapotranspiración potencial, sin embargo, cuando la precipitación es menor a la evapotranspiración potencial entonces la evapotranspiración actual es precipitación más la diferencia de almacenamiento (Thornthwaite-Mather ,1957).

- Déficit (D)

Según Thornthwaite-Mather (1957) el déficit de humedad es la diferencia entre evapotranspiración potencial y evapotranspiración actual.

- Excedente de humedad (S)

Se estimó que el excedente es cualquier exceso de precipitación, cuando la diferencia de precipitación y evapotranspiración potencial es negativa no hay excedente (Thornthwaite-Mather ,1957).

- Porcentaje de Percolación

Es un valor estimado desde 0 hasta 1, para obtener el valor se iteró entre el rango mencionado anteriormente hasta calibrar y validar el modelo hidrológico superficial con los datos de aforo histórico del río Destierro.

- Porcentaje de Retención

Es un valor estimado desde 0 hasta 1, para obtener el valor se iteró entre el rango mencionado anteriormente hasta calibrar y validar el modelo hidrológico superficial con los datos de aforo histórico del río Destierro.

- Percolación

La percolación es el valor del excedente multiplicado por el porcentaje de retención (Dunne *et al.*, 1978)

- Escorrentía directa

Es la diferencia entre el excedente de humedad y la percolación (Dunne *et al.*, 1978)

- Agua disponible

Según (Dunne *et al.*, 1978), el agua disponible es el valor de la percolación del mes actual más el agua retenida del mes anterior

- Agua retenida

El agua retenida se estima a partir del agua disponible por el porcentaje retenido (Dunne *et al.*, 1978)

- Flujo base

El flujo base es el valor de agua disponible menos el agua retenida, se amplía en el texto de Dunne *et al.* 1978.

- Escorrentía total

Es la sumatoria de la escorrentía directa y el flujo base (Dunne *et al.*, 1978).

- Aforos históricos

El AyA mensualmente aforo un punto en el río Destierro, actualmente hay aforos históricos discontinuos.

Las variables detalladas anteriormente son parte del modelo hidrológico superficial. Ahora bien, se utilizaron los datos de temperatura y precipitación desde 1994 hasta 1999 para calibrar el modelo hidrológico con los datos de porcentaje de percolación y porcentaje de retención, y así poder establecer los escenarios climáticos del 2050 y 2080. La calibración, validación y modelaje, se realizó a partir del lenguaje programación Python.

- Escenarios climáticos

El PNUD, MINAE y IMN, establecieron posibles escenarios climáticos regionalizados para Costa Rica desarrollado a partir del documento del IPCC. Este proyecto se basó en esos posibles escenarios establecidos por las instituciones nacionales, específicamente los escenarios de los años 2050 y 2080 (Solano, *et al.*, 2012).

Los escenarios modifican las variables de precipitación y temperatura, y la precipitación es modificada por período seco y húmedo (Tabla 4); que sirven para representar la variabilidad climática de la zona según lo dicta PNUD, MINAE y IMN.

La temperatura media para el año 2050 se aumentó en 1.91 de manera constante, y para el año 2080 la temperatura aumentó 3.36.

Es importante aclarar que se trabajó con el promedio del período comprendido entre 1994 y 2012 para los datos de precipitación y temperatura. Y a partir de esos datos se realizaron las disminuciones y aumentos de cada variable.

**Tabla 2. Escenarios de precipitación**

2050		2080	
Época seca	Época lluviosa	Época seca	Época lluviosa
Disminución del 30% de precipitación	Aumento del 75% de la precipitación	Disminución del 50% de precipitación	Aumento del 100% de la precipitación

A partir de las variables obtenidas se obtiene el volumen mensual por cada año modelado.

#### **4.2.2.2. Potencial hídrico del río Destierro y la capacidad de abastecimiento poblacional de Pocora.**

Se estimó la población futura de los años 2050 y 2080 por métodos matemáticos (Lineal, Geométrico y Exponencial) basados en los datos históricos registrados de los censos (1973, 1984, 2000 y 2011).

Las proyecciones de crecimiento de fuentes oficiales (INEC y CCP) generadas para el área de estudio son hasta 2030 o 205a0 respectivamente, quedando cortas para el estudio que se extiende hasta el 2080.

Por medio de la población proyectada se ha determinado la cantidad de volumen de recurso hídrico demandado para abastecer la población de Pocora, de forma tal que se comparó con la oferta simulada.

Es importante aclarar que este proyecto no toma en cuenta variables de demanda como agricultura, ganadería, industria y caudal ambiental, ya que el fin del proyecto es determinar potencial hídrico del río Destierro en escenarios climáticos no con la intención disponer todo el recurso hídrico para la población, pero se da el ejemplo con la población ya que según la legislación (Ley de Aguas) de Costa Rica, la población tiene prioridad en situaciones extremas.

## **CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

---

En este capítulo se presentan los resultados del análisis del sitio y la modelación hidrológica del área de estudio, así como el análisis.

### **5.1. Análisis de sitio**

A continuación, se observarán los resultados obtenidos del análisis del sitio:

#### **5.1.1. Físico – biótico**

De acuerdo con la revisión de literatura se encontró la siguiente información:

##### **Fallas y fracturas - Zonas inundables**

A partir del mapa de Amenazas y Peligros Naturales del Cantón de Guácimo elaborado por el CNE *et al.* (2006) se observa una falla del cuaternario en el área de estudio, sin embargo, no se encuentra ninguna zona inundable dentro de la misma.

Las fallas sísmicas pueden generar eventos sísmicos de gran magnitud que puede llegar a causar grandes daños en consideración, un ejemplo de esto fue el terremoto de Limón donde causó daños en las carreteras, acueductos, tendido eléctrico, etc. (CNE et al., 2006)

##### **Vulcanismo**

Costa Rica por su ubicación geográfica y climática, está expuesta a una variedad de amenazas como el vulcanismo que ha estado presente en la historia geográfica. En una actividad volcánica puede suceder lo siguiente: rocas piroclásticas de caída, proyectiles balísticos, ondas de choque atmosféricas, coladas de lava, entre otras cosas (Vargas -Villalobos *et al.*, 2014.)



Pronosticar la erupción de un volcán constituye un gran reto científico por lo tanto es necesario estar preparado para un posible desastre. El volcán Turrialba en el caso de un reactivar eruptivo, se estima la afectación de 1.5 millones de personas alrededor del volcán. Además, es probable que perjudicase a los cauces cercanos al volcán ya que tienen un potencial peligro de lahares. (CNE *et al*, 2014).

### Uso de la tierra

Se identificaron cinco clases de usos mediante las imágenes Landsat 8 2019, los cuales son Forestal, cultivos (piña y banano), terrenos descubiertos, pasto y residencial. Los bosques no se clasificaron en detalle, por esta razón, durante el análisis el tamaño de la raíz del bosque no cambia.

**Tabla 3. Uso de la tierra**

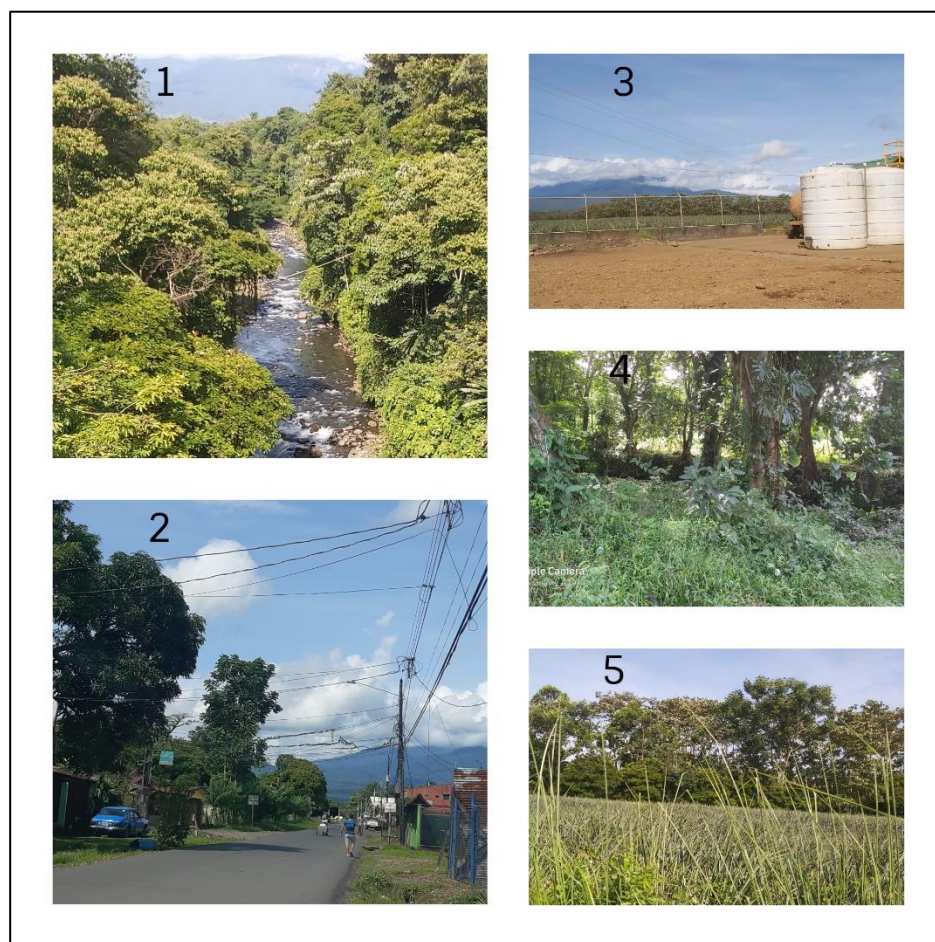
CLASES	ÁREA m2	ÁREA %
Forestal	29 855 776.5	63.71%
Cultivos	1 071 644.50	2.28 %
Terrenos descubiertos	1 140 764.29	2.43%
Pasto	14 731 432.05	31.43%
Residencial	59237.06	0.13%
Total	46 858 854.4	100.0

Como se aprecia en la Tabla 5, en la zona de estudio, predomina el área forestal, los cuales contabilizan más del 50% del área total, esto se debe a que la zona se ubica cerca del

volcán Turrialba y algunas reservas naturales. Los otros dominantes son los pastos (31.43%) y terrenos descubiertos (2.43%).

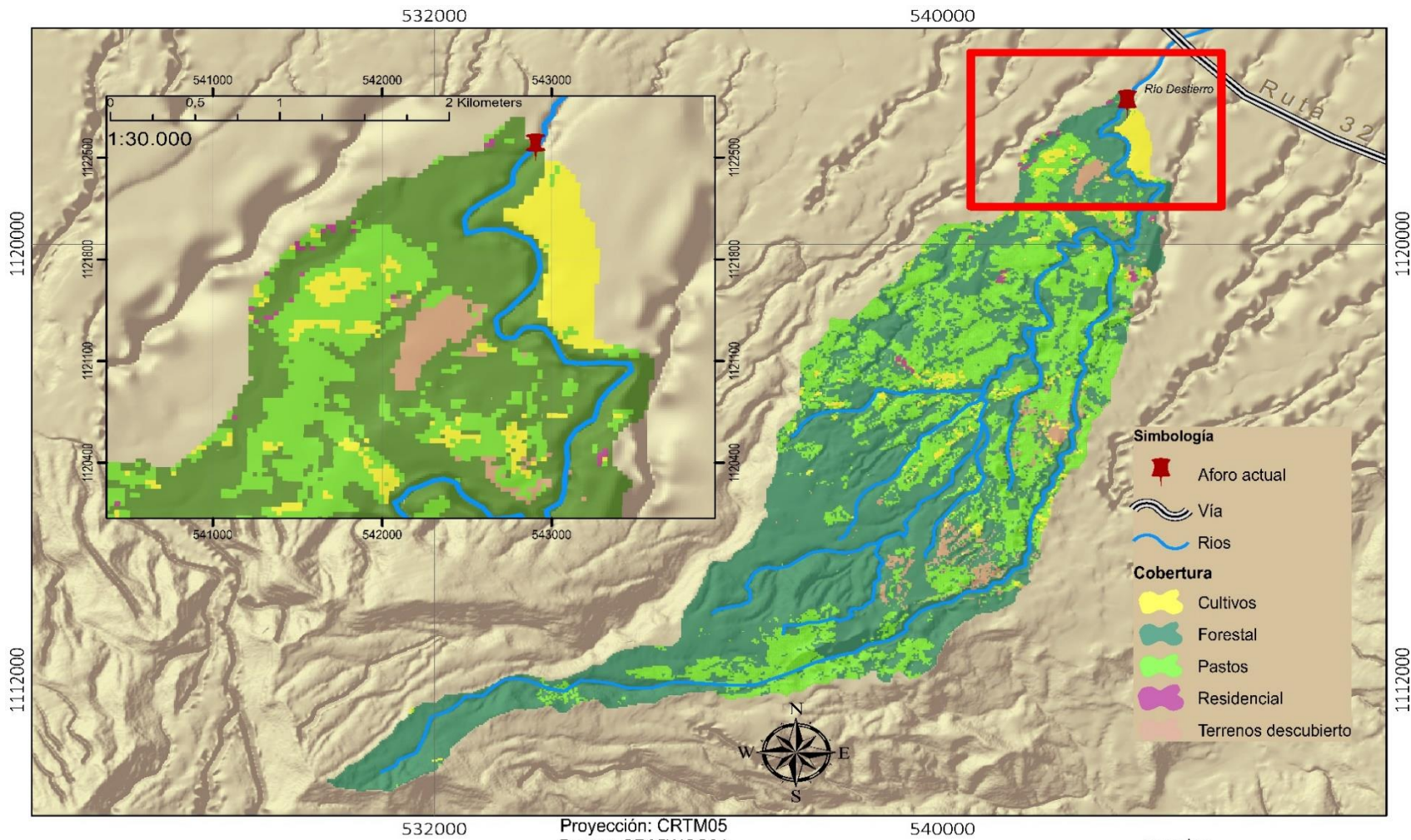
A pesar de la demarcación agrícola cercana a la zona de estudio, esta área tiene un porcentaje de cultivos menor en comparación de su área forestal. Es importante aclarar que el mapa de uso de la tierra se hizo a partir de una imagen de Landsat 2019.

Las siguientes fotografías fueron tomadas el día de la gira de campo realizada en Julio del 2020, se observa el cauce del río (Figura 3.1), algunos cultivos aledaños al río (Figura 3.3 y Figura 3.5) y también, una fotografía de las zonas residenciales del lugar (Figura 3.2).



**Figura 3. Fotografías del área de estudio.**

En la Figura 4, se observa los usos de la tierra, y más a detalle se visualiza las zonas aledañas al río en el punto de aforo histórico. En esta área se observa cultivos, zonas forestales y terrenos descubiertos.



Proyección: CRTM05  
 Datum: CR05WGS84  
 Fuente: USGS, 2019  
 Cartografía digital realizada por:  
 Natalia Barahona Picado  
 Diciembre, 2021

Escala:  
 0 0,5 1 2 3 4  
 Kilometers  
 1:80.000



Figura 4. Mapa de uso de suelo

### **5.1.2. Sociocultural**

De acuerdo con la revisión de literatura se encontró la siguiente información:

#### **Colindancias**

El punto aforo actual colinda al sur con la Finca Babilona Del Monte SA, empacadora de piña, al norte colinda con asentamiento humano sin embargo también existe zona forestal alrededor del aforo superficial.

#### **Infraestructura de agua potable y alcantarillado**

El recurso hídrico del área es administrado por la ASADA La Argentina, donde se encarga de brindar este recurso a las poblaciones de Argentina, Barrio Carmen, San Francisco y Río Perla.

La población de esta zona se caracteriza por tener viviendas distantes unas de las otras y sin ningún orden, esto limita el abastecimiento de agua mediante conexiones domiciliarias. Asimismo, limita la tenencia de alcantarillado en el área.

#### **Asentamientos irregulares**

En el área marcada en la Figura 4, no existen asentamientos irregulares o informales. Las propiedades de la zona son como se muestra en el Anexo 1.

Para este análisis del sitio se toma en cuenta todas las variables descritas anteriormente en la zona de estudio, ya que es necesario una evaluación si se desea colocar una toma futura de abastecimiento de agua en el área.



Con la descripción físico - biótico y sociocultural de la zona se identificó posibles puntos de riesgo para una posible captación. Los cuales serían:

- Posible riesgo de contaminación por agroquímicos

El posible movimiento de la ubicación de la zona de aforo permite evitar el riesgo de contaminación por agroquímicos. En la Figura 5, se observa la propuesta de cambio de la posible toma superficial, donde se traslada a una zona con menos actividad agrícola para evitar el riesgo de contaminación.

Sin embargo, en esta zona sugerida el volumen ofertado es menor ya que el área de escurrentía es también menor, a pesar de esta situación donde se reducirá el caudal debido al traslado de la posible toma superficial, se justifica el por qué se evitará proponer puntos de posibles contaminaciones antropogénicas que potenciaría la necesidad de realizar tratamientos adicionales, además, de un diseño de obra de captación con consideraciones especiales dando como resultado altos costos de mantenimiento o prevención de riesgos de contaminación.

- Amenaza de erupción

Las amenazas de erupción son un riesgo que amenazan a todas las cuencas del área por lo tanto es un dato importante que se debe analizar para que cuando se construyan los sistemas de captación se tenga en consideración las medidas de protección ante este desastre.

Es importante aclarar que la calidad del recurso hídrico es un factor sumamente importante en la evaluación de una posible captación superficial para abastecimiento

humano. No obstante, este proyecto se enfoca en la cantidad del recurso disponible en condiciones climáticas extremas.

Sin embargo, de lo anterior se analizó el sitio siguiendo las particularidades del lugar asumiendo que el agua solo necesita tratamiento básico efectuado en Costa Rica y si tuviera contaminación sería de manera antropogénica por las actividades socioeconómicas a su alrededor que serían analizadas.

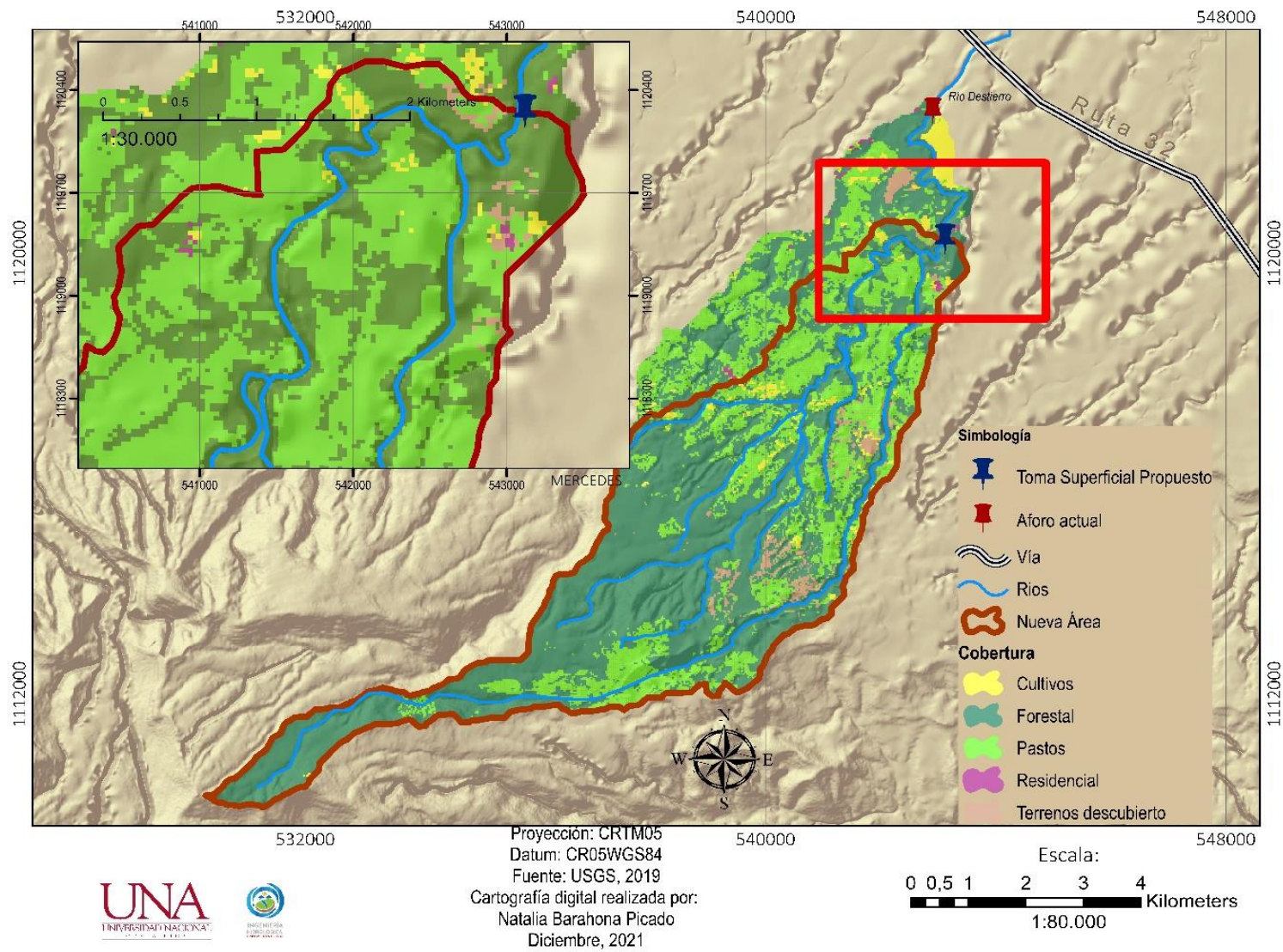


Figura 5. Ubicación de la propuesta para movilización de punto de aforo.



## 5.2. Modelación hidrológica superficial

A continuación, se expondrán los resultados y el análisis con respecto al modelo hidrológico.

### Estimación de la oferta hídrica superficial

El modelo Thornthwaite-Mather modificado requiere de precipitación (P), evapotranspiración potencial (Etp), pérdida potencial acumulada, la humedad del suelo disponible (ST), el cambio de humedad del suelo ( $\Delta ST$ ), la evapotranspiración actual (ETA) para determinar el volumen ofertado por el río.

La precipitación de la cuenca se obtiene a partir de la información mensual de las estaciones meteorológicas del IMN (Instituto Meteorológico Nacional) y del ICE (Instituto Costarricense de Electricidad

Tabla 4. Estaciones ICE, IMN y AyA

Código	Nombre	Código	Nombre
73055	La Amistad	73091	Hacienda El Carmen
73096	El Sauce	73098	Bonilla Abajo
73128	La Florida	73140	Alto Rubio
73140	Guayacán	75002	Siquirres
75022	Finca Mirador	-	-

La precipitación de la cuenca se obtiene a partir de la información mensual de las seis estaciones meteorológicas. Se descartaron otras estaciones del área ya que no coinciden con los datos de aforos del río Destierro.

La mayoría de las estas estaciones en el área tienen datos que no coinciden en el tiempo o lapsos sin información. En general se tienen registro desde 1980 hasta el año

2017, cuatro de estas estaciones no poseen datos del período del 1980 al 2001(Tabla 7). Debido a eso se seleccionan seis estaciones con un registro histórico de 1994 hasta el 2012. Esas seis estaciones son: Hacienda El Carmen – 73091, Quebrada González – 69626, Siquirres – 75002 y El Sauce – 73096, Chindama – 69638, Bonilla arriba – 73097.

Como se observa en la Tabla 7, las estaciones tienen datos incompletos, esto quiere decir que durante el año de registro no se obtuvo la precipitación de los doce meses como en el caso del 2010 en la estación El Sauce solo se tiene información de cinco meses.

Tabla 5. Registro histórico de estaciones meteorológicas cerca del área de estudio

Estaciones	1980-1989								1990-1999								2000-2009								2010-2018													
	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
69626- QUEBRADA GONZALEZ								5	12	12	12	10	7	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	10	10	12	12	12	12	12
69638- CHINDAMA													12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	11	11	12	12	12	8	12
73091- HACIENDA EL CARMEN	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	8				
73096 - EL SAUCE	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	10	12	10	12	12
73097 - BONILLA ARRIBA					11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	11	12	12	12	12	12	11	12	12
75002- SIQUIRRES	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	9	10	12	12	12	12	10	12	12

En la Tabla 7, se presenta el registro histórico de precipitación, en cada año se muestra la cantidad de meses que se encuentra registrado por estación, si un año tiene el número doce significa que tiene información de los doce meses y es de color verde, si tiene diez a once significa que tiene ese valor correspondientemente y es de color amarillo, pero si es menor a 10 será de color rojo, ya que tiene muy pocos meses de control. Los años que posean rojo se intentaran evitar para la investigación.

Como se mencionó anteriormente, los datos de temperatura de muchas de las estaciones meteorológicas se encuentran incompletas, por la tanto, se decidió tomar solo el dato de una estación meteorológica. Es importante aclarar que esta decisión modificó el resultado final del modelo.

En la Figura 6, se observa el promedio de temperatura de 18 años, la temperatura más baja en ese período fue en el año 2012. Se muestra que la temperatura media más alta se encuentra en el mes de setiembre.

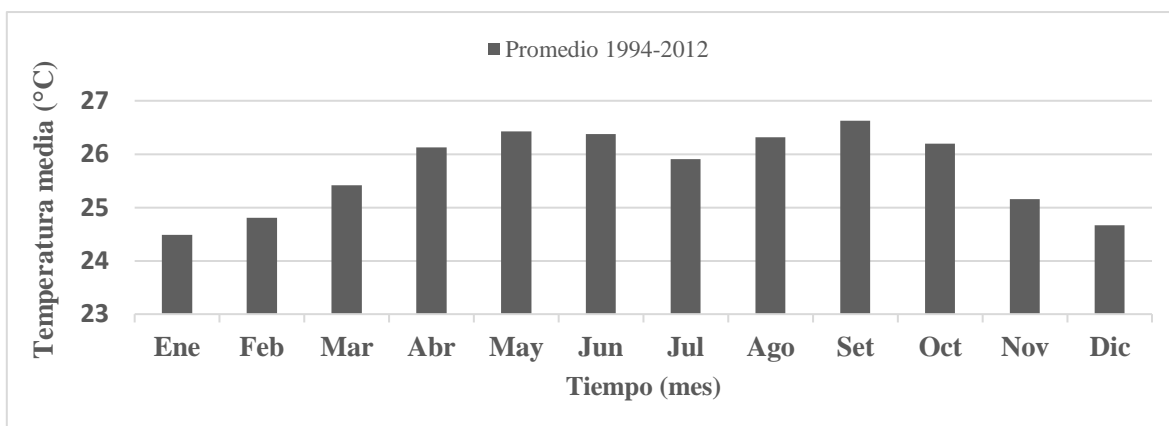
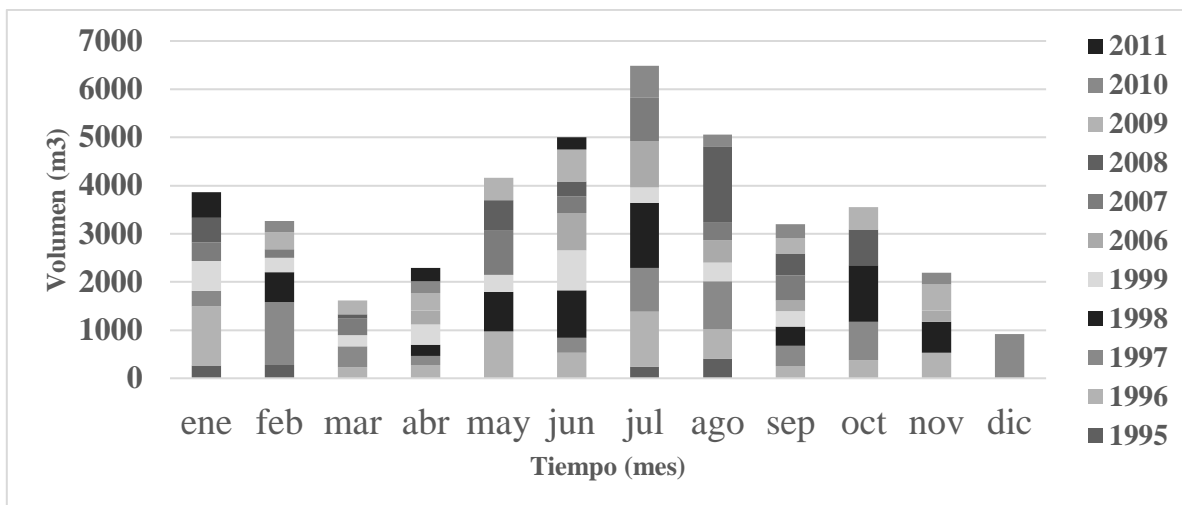


Figura 6. Temperatura media mensual desde 1994 hasta 2012 en la estación Hacienda El Carmen

A continuación, se observa la figura 7 donde se detalla la cantidad de aforos por mes en cada año. Por ejemplo, en el mes de diciembre, solo hubo aforos del año 1997, donde el año 1997 tiene gran cantidad de aforos. Lo ideal para la modelación hidrológica de un río, es tener valores diarios de caudal, que permitiría observar en mayor detalle el comportamiento de este. En cambio, se observa que por año no hay más de diez aforos donde un año tiene doce meses.



**Figura 7.** Aforos del río Destierro

Con base a los datos anteriormente mencionados, se realizaron 9801 calibraciones para simular el río (posibles combinaciones entre porcentajes de percolación y retención con valores entre 0 y 1, excluyendo los mismos y utilizando dos decimales). Es de esta manera que se generó la Figura 8, donde se observa el patrón corregido de lluvias - caudal aforado – caudal modelado, sin embargo, hay picos en el caudal aforado que responden a precipitaciones puntuales del día de aforo. A pesar de que la precipitación es un acumulado de 30 a 31 días y el aforo es puntual y no diario, se observa un comportamiento similar del caudal modelado y el caudal aforado. Se seleccionaron las 50 calibraciones más relevantes entre estas 9801 combinaciones, estas se encuentran en el apartado de

## Anexos.

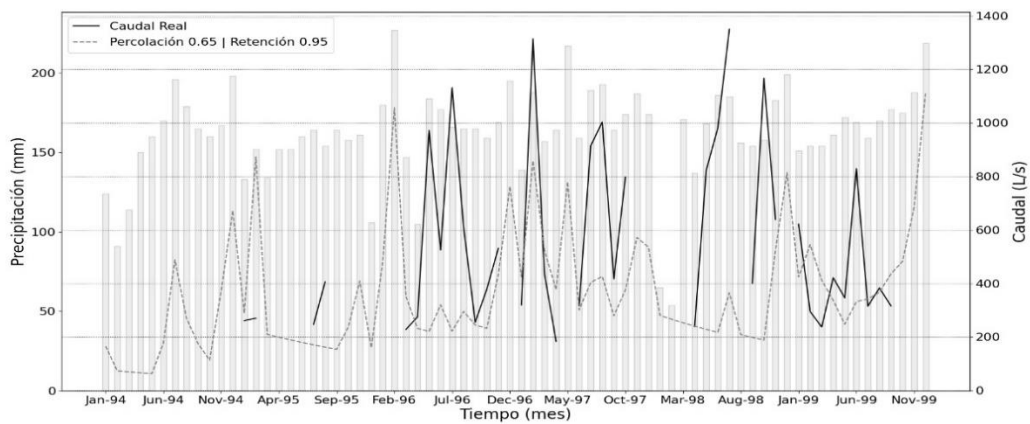


Figura 8. Calibración (% Percolación 0.65 – % Retención 0.95)

El resultado de la calibración se valida en el período 2006 hasta 2012, y se observa que con los valores el porcentaje de percolación y el porcentaje de retención, 0.65 y 0.95, respectivamente, da como resultado la siguiente Figura.

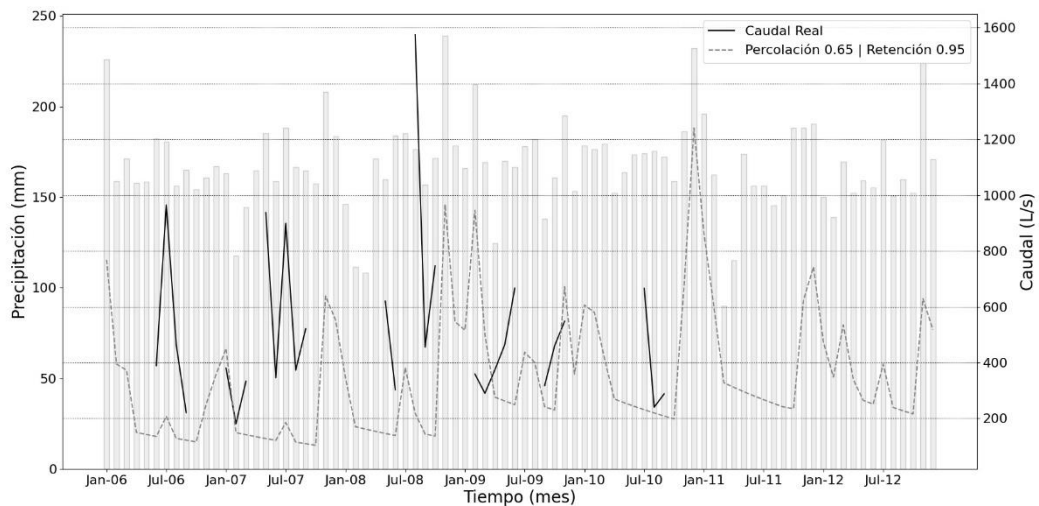


Figura 9. Validación (% Percolación 0.65 - % Retención 0.95)

El caudal modelado desde 2006 hasta el 2012 tiene un comportamiento muy similar al caudal aforado, donde el caudal modelado se comporta con respecto a la precipitación. Ahora bien, como el resultado de la calibración y validación simula correctamente ese punto del río Destierro se va a correr el modelo con los escenarios climáticos.

En la Tabla 9, se modela el año 2050 con disminución de precipitación en la época seca y un aumento de precipitación en la época lluviosa. Cuando los valores de P-ETPA dan negativos representa una posible deficiencia de agua. Normalmente cuando estos valores son negativos se establece el período seco (Thornthwaite y Mather, 1957).

En el caso del año 2050 el período seco se observa a partir de noviembre y se extiende hasta abril, además, se evidencia que entre los meses de mayo y octubre hay un excedente de agua.

Los aforos modelados mensuales superan los 400 L/s a lo largo del año en un área de 46 886 770 m<sup>2</sup>, como se observa en la Figura 10 el caudal modelado comporta de acuerdo con la precipitación.

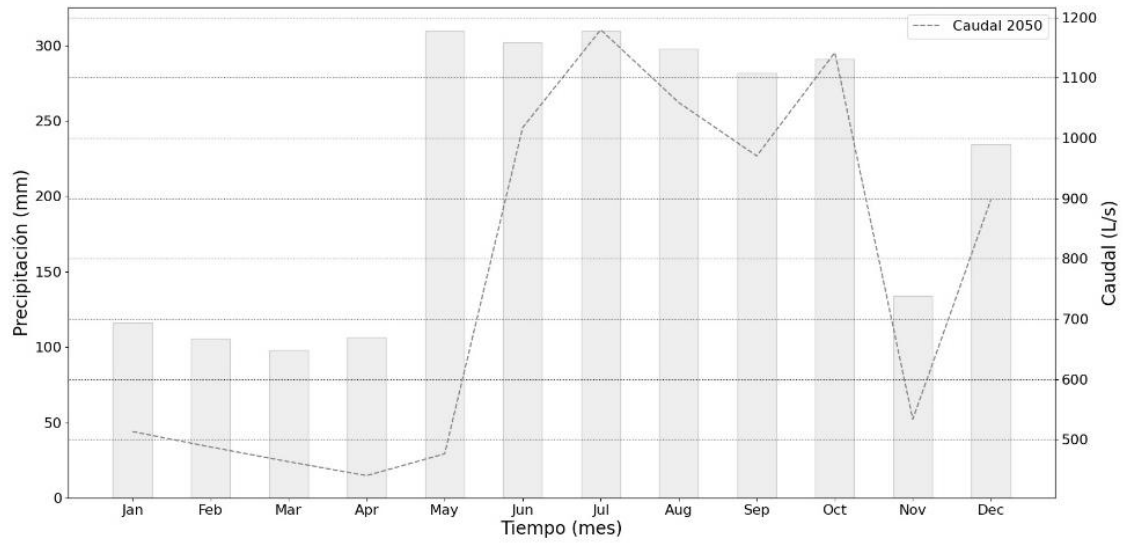


Figura 10. Caudal modelado para el año 2050

**Tabla 6. Modelaje año 2050 a partir de Thornthwaite – Mather modificado**

Mes/ Info	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
EtpA	144.869	141.906	177.642	198.817	218.331	212.884	201.300	212.779	212.887	199.184	161.942	150.917
P	116.079	105.621	97.877	106.472	309.750	301.881	309.488	297.895	281.723	290.815	133.792	234.367
P - ETPA	-28.791	-36.285	-79.764	-92.345	91.419	88.998	108.188	85.116	68.835	91.631	-28.151	83.450
Acc Pot WL	-28.791	-65.076	-144.840	-237.185	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-28.151	0.000
ST	372.000	366.000	327.000	317.000	400.000	400.000	400.000	400.000	400.000	400.000	373.000	400.000
ΔST	-28.000	-6.000	-39.000	-10.000	83.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-27.000	27.000
AE	88.079	99.621	58.877	96.472	218.331	212.884	201.300	212.779	212.887	199.184	106.792	150.917
D	56.791	42.285	118.764	102.345	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	55.151	0.000
S	0.000	0.000	0.000	0.000	8.419	88.998	108.188	85.116	68.835	91.631	0.000	56.450
Percolación	0.000	0.000	0.000	0.000	5.472	57.848	70.322	55.325	44.743	59.560	0.000	36.693
Escorrentía directa	0.000	0.000	0.000	0.000	2.947	31.149	37.866	29.791	24.092	32.071	0.000	19.758
Agua Disponible	567.614	539.233	512.271	486.658	467.797	502.256	547.465	575.417	591.389	621.380	590.311	597.488
Agua Retenida	539.233	512.271	486.658	462.325	444.407	477.143	520.092	546.646	561.820	590.311	560.796	567.614
Flujo Base	28.381	26.962	25.614	24.333	23.390	25.113	27.373	28.771	29.569	31.069	29.516	29.874
Escorrentía Total (mm)	28.381	26.962	25.614	24.333	26.336	56.262	65.239	58.561	53.662	63.140	29.516	49.632
ES (m)	0.028	0.027	0.026	0.024	0.026	0.056	0.065	0.059	0.054	0.063	0.030	0.050
Volumen (m3)	1330139.728	1263632.738	1200451.098	1140428.539	1234327.351	2636873.036	3057614.928	2744641.090	2515011.121	2959229.624	1383328.701	2326137.514
% Percolación	0.65											
% Retención	0.95											
Área m2	46 867 770											
Aforo Modelado	513.171	487.513	463.137	439.980	476.207	1017.312	1179.635	1058.889	970.298	1141.678	533.692	897.430



Los escenarios del 2080 son porcentajes menores en comparación a los escenarios del 2050, por lo tanto, se observa un cambio en el caudal del río. En la Figura 12, se muestra el aumento de caudal en el 2050 en el mes de octubre, a cambio en el año 2080, a partir de la época seca en el mismo, empieza a disminuir (Anexo 8).

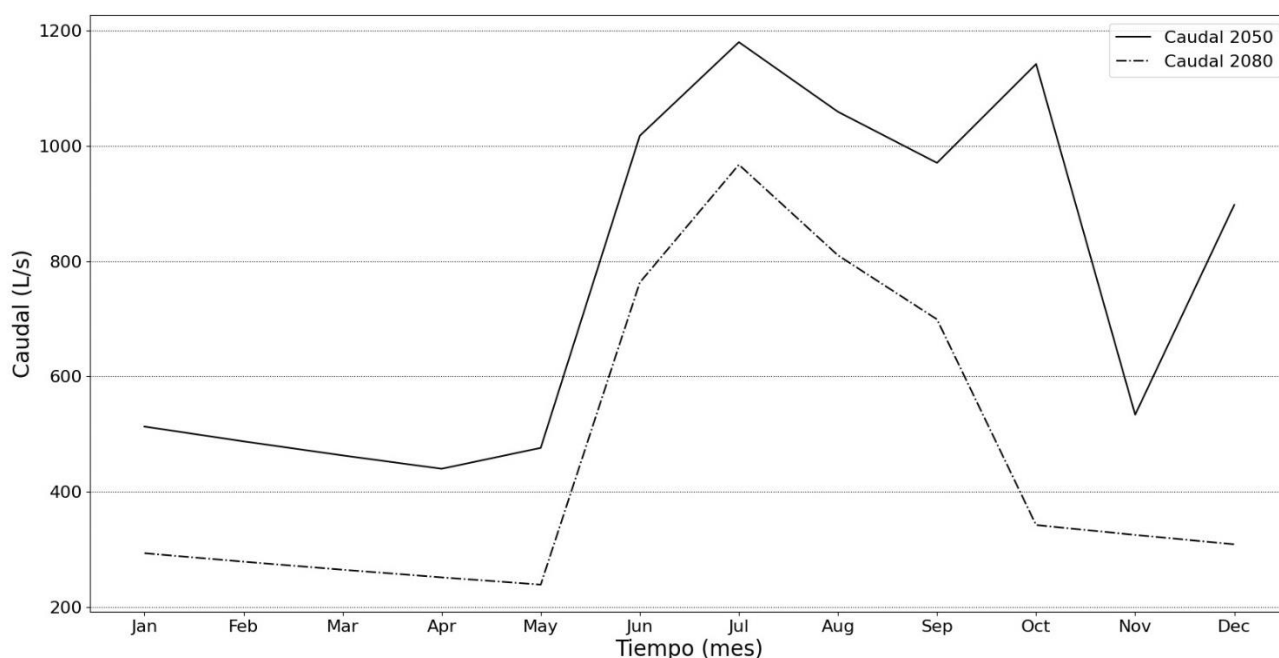


Figura 11. Comparación del 2050 y 2080

Los aforos modelados mensuales superan los 200 L/s a lo largo del año en un área de 46 886 770 m<sup>2</sup>, como se observa en la Figura 12 el caudal modelado comporta de acuerdo con la precipitación.

En el análisis de sitio se realizó una propuesta de traslado del punto de aforo, donde en esa nueva posición contempla un área de 37 301 683 m<sup>2</sup>. A continuación, se observa los escenarios en la toma superficial supuesta.

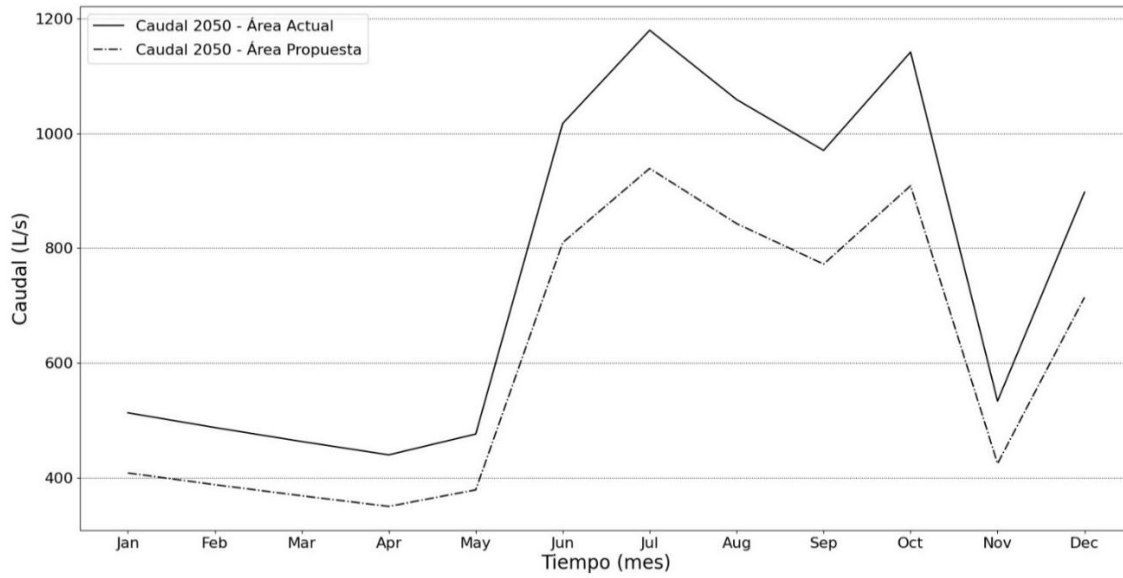


Figura 12. Comparación del área actual con el área propuesta en el escenario 2050

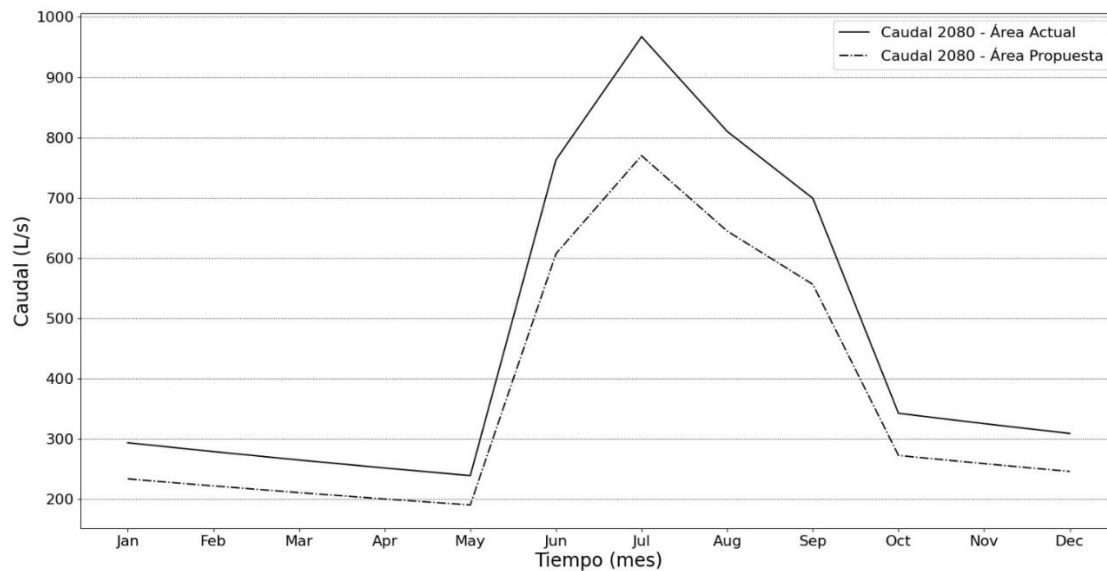


Figura 13. Comparación del área actual con el área propuesta en el escenario 2080.

En la Figura 13 y Figura 14, se observa que los caudales modelados en el área propuesta son más menores que en el área actual del proyecto. En el mes de julio de ambos

escenarios hay una disminución de más de 100 L/s. Mientras que los períodos entre enero y mayo, y también entre octubre y diciembre tienen una diferencia aproximada de 50 L/s.

### **Potencial hídrico del río Destierro ejemplificado con la capacidad de abastecimiento poblacional de Pocora**

Debido a que se desconoce el número de personas en la población futura, se estima basados en los datos históricos registrados en los censos. En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos del método matemático.

**Tabla 7. Proyección de la población en el distrito de Pocora**

<b>Año</b>	<b>Lineal</b>	<b>Geométrico</b>	<b>Exponencial</b>	<b>Promedio</b>
2011	6,432	6,432	6,432	6,432
2020	7,429	8,288	9,158	8,292
2025	7,983	9,592	11,144	9,573
2030	8,536	11,141	13,561	11,080
2035	9,090	12,985	16,502	12,859
2040	9,644	15,183	20,082	14,969
2045	10,197	17,806	24,437	17,480
2050	10,751	20,941	29,737	20,476
2080	14,073	58,210	96,561	56,281

La población demanda los caudales máximos horarios de 146.26 L/s, para el año 2050 y 402.01 L/s para el año 2080, basado en la proyección para la población del distrito de Pocora, con una dotación neta de 200 lpd.

En la Tabla 11, se observa la oferta creada a partir de los escenarios de cambio climático en diferentes ubicaciones basándose en la propuesta realizada y la ubicación actual del punto de aforo.

**Tabla 8. Oferta y Demanda de la zona de estudio**

Oferta				Demanda	
2050 - Ubicación actual (m <sup>3</sup> )	2050 - Ubicación propuesta(m <sup>3</sup> )	2080- Ubicación actual(m <sup>3</sup> )	2080 - Ubicación propuesta(m <sup>3</sup> )	Población 2050 (m <sup>3</sup> )	Población 2080 (m <sup>3</sup> )
23 791 816.43	18 935 716.29	14 370 184.48	11437114.86	4 612 365.257	12677687.19

En el 2050, en la ubicación actual, se tiene un volumen que cuatriplica el volumen demandado por la población de Pocora. En cambio, en el 2050, en la ubicación propuesta, se tiene al menos una diferencia de tres millones de metros cúbicos a favor de la ubicación actual en el escenario del 2050.

En el 2080, el aumento de la población es notable en la demanda del recurso hídrico. En la ubicación actual, en este escenario se disminuyó un 60 % la oferta hídrica en comparación del escenario del 2050, en la ubicación actual. Sin embargo, la oferta apenas abastece el volumen demandado poblacional para el año 2080.

En el escenario del 2080, con la ubicación propuesta no es suficiente para abastecer la demanda poblacional para el año 2080, se observa con una diferencia de 1 240 572.33 m<sup>3</sup>.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 7.1. Conclusiones

A continuación, se distribuirá las conclusiones mediante los objetivos específicos:

#### Objetivo 1

- Se logró cumplir con el objetivo, a partir de las variables propuestas, para esto fue necesario la revisión de literatura y la visita de campo para caracterizar la zona de estudio.
- Al realizar el análisis de sitio se determinó que de utilizarse como lugar de captación de agua potable la ubicación actual del punto de aforo, éste se encontraría en riesgo de contaminación antropogénica.

#### Objetivo 2

- Los años de registro de aforos utilizados para la calibración y validación de la modelación hidrológica superficial, cuentan con meses incompletos. Al realizar el análisis, estos meses incompletos dificultaron observar el comportamiento real del río Destierro, durante algunos meses se observan crecidas de caudal que se relacionan a un día del mes, provocando que se dificultara la simulación a causa de la falta de registros completos mensuales de aforos.

#### Objetivo 3

- Se obtuvo cuatro posibles valores de oferta hídrica, dos de cada escenario de cambio climático, el mayor volumen ofertado de recurso hídrico es de 23 791 816.43 m<sup>3</sup>, del escenario 2050, en la ubicación actual del aforo.

#### **Objetivo 4**

— En el 2050, el potencial hídrico del río Destierro en cualquier ubicación estudiada es suficiente para abastecer la demanda proyectada de la población Pocora, en cambio, para el 2080, hay déficit del recurso hídrico, ya que, en la ubicación actual se obtuvo un volumen ofertado que apenas alcanza para la demanda de la población, sin embargo, no quedaría recurso hídrico para otras actividades tanto socioeconómicas como para el ecosistema del río. La misma situación se agrava con el nuevo punto de aforo para el año 2080 donde ni siquiera alcanza la oferta hídrica para las necesidades básicas de la comunidad de Pocora.

## **7.1. Recomendaciones**

A continuación, se distribuirá las recomendaciones mediante los objetivos específicos:

### **Objetivo 1**

- Se recomienda valorar el cambio de ubicación del punto de aforo, ya que es necesario colocar una toma futura de abastecimiento de agua en el área.
- Es necesario la realización de estudios físico - químicos en el río Destierro periódicamente para garantizar la calidad del río.

### **Objetivo 2**

- Se debe continuar el registro de aforo, así como instalar estaciones que monitoreen el río Destierro.

### **Objetivo 3**

- Los datos generados por este modelo hidrológico establecen una base para la preparación de acciones preventivas, se recomienda la generación de acciones para el manejo de la cuenca.

### **Objetivo 4**

- Se debe realizar un análisis de todas las demandas de recurso hídrico de la zona, de manera que se pueda prever el consumo. Asimismo, es necesario el análisis de otras alternativas de abastecimiento.

## CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ANEXOS

---

### 7.1. Referencias bibliográficas

- Acuña, G., 2006. Producción de piña en caribe y pacífico sur de Costa Rica. *Revista Ambientico*, 158(2-3)
- Aguilar, D., Arroyo, R., 2014. El amargo sabor de la piña: Movimiento socioambiental en el Caribe costarricense. Universidad de Costa Rica, Ciudad Univeristaria Rodrigo Facio.
- Ballestero, M., & López Lee, T., 2017. El Nexo entre el agua, la energía y la alimentación en Costa Rica: el caso de la cuenca alta del río Reventazón.
- Castro, M., 2019 .Sistema de Agua Potable de Squirres. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Pavas.
- Dunne, T., & Leopold, L. B. (1978). *Water in environmental planning*. Macmillan.
- FAO, 2011. El cambio climático hará disminuir el agua disponible para la agricultura [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/news/story/es/item/79998/icode/>
- García, Y. de los A., 2012. ANÁLISIS DEL CAPITAL SOCIAL EN LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO Y SU INFLUENCIA EN LA COHESIÓN SOCIAL DE LA COMUNIDAD DE PEDERNAL DE PURISCAL. Universidad Nacional Costa Rica, Heredia.
- Lieberherr, M., 2019. Cambio climático y escasez de agua: Cuenta regresiva para los caudales del Sur de Chile [WWW Document]. URL <https://radiojgm.uchile.cl/cambio-climatico-y-escasez-de-agua-cuenta-regresiva-para-los-caudales-del-sur-de-chile/> (accessed 2.24.20).



- Llaguno, J. J., Solano, S. M., Espeleta, A. L. G., & Alfaro, P. B.ice, 2014. Políticas y conflictos socio ambientales: El caso de la Tenencia de la tierra y los monocultivos En el Caribe de Costa Rica (2006-2012).Revista de Ciencias Sociales (Cr),3(145), 81-98.
- Ordóñez Gálvez, J. J. ,2012. Cartilla técnica: Balance hídrico superficial. Sociedad Geográfica de Lima: Foro Peruano para el Agua.
- Quijandría, G., Berrocal, J., & Pratt, L.,1997. La Industria de la Piña en Costa Rica Análisis de Sostenibilidad.Centro Latinoamericano para la Competitividad y el Desarrollo Sostenible (CLADS). *Costa Rica, INCAE*.
- Quirós-Bustos, N., y Valverde-Cerdas, J., 2016. Funcionalización de nanotubos de carbono para la remoción de plaguicidas en agua de consumo humano: el caso del Bromacil.
- Roldán, C. ,2008. XIV Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Agricultura: Tendencias recientes e implicaciones ambientales. Un año de crisis climática y alimentaria (Informe final).
- Sapag Chain, N., Sapag Chain, R., & Sapag, J. M., 2014. *Preparación y evaluación de proyectos*. Mc Graw Hill educación.
- Solano, P., Alvarado, L. F., Jimenez, E., Contreras, W., y Alfaro, M. (2012). ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO REGIONALIZADOS PARA COSTA RICA.
- Thorntwaite, C. W., & Mather, J. R., 1957.Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Centerton.
- UNESCO, 2007. Balance hídrico superficial de Costa Rica. Período: 1970-2002. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°10.
- Vargas-Villalobos, A., Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, Alvarado Induni, G., Chaves Salas, I., Campos Sánchez, N. y Red

Sismológica Nacional, 2014.El riesgo derivado de la amenaza volcánica en Costa Rica. SAN JOSE, Costa Rica: Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias.

Béjar, M., 2006. Hidrología estadística.

Béjar, M., 2004. Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

## 7.2 Anexos

### Anexo 1. Cobertura urbana en el área de estudio





## Anexo 2. Cobertura Forestal

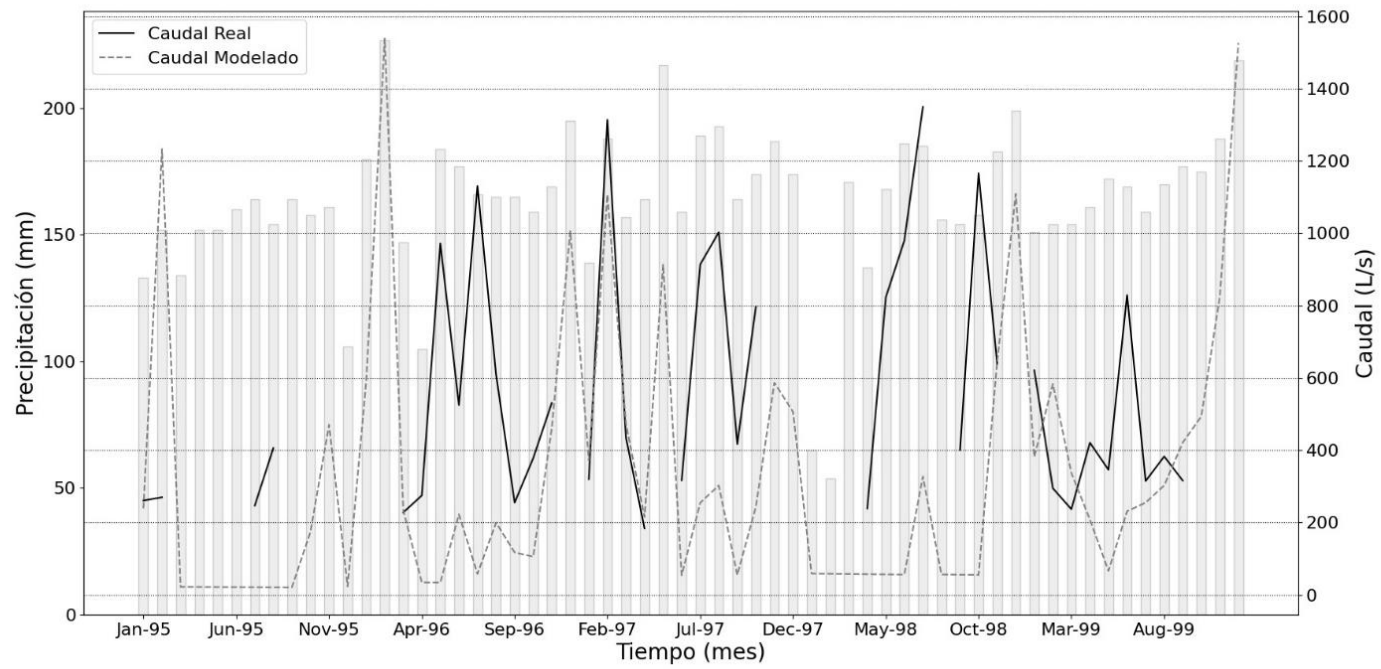




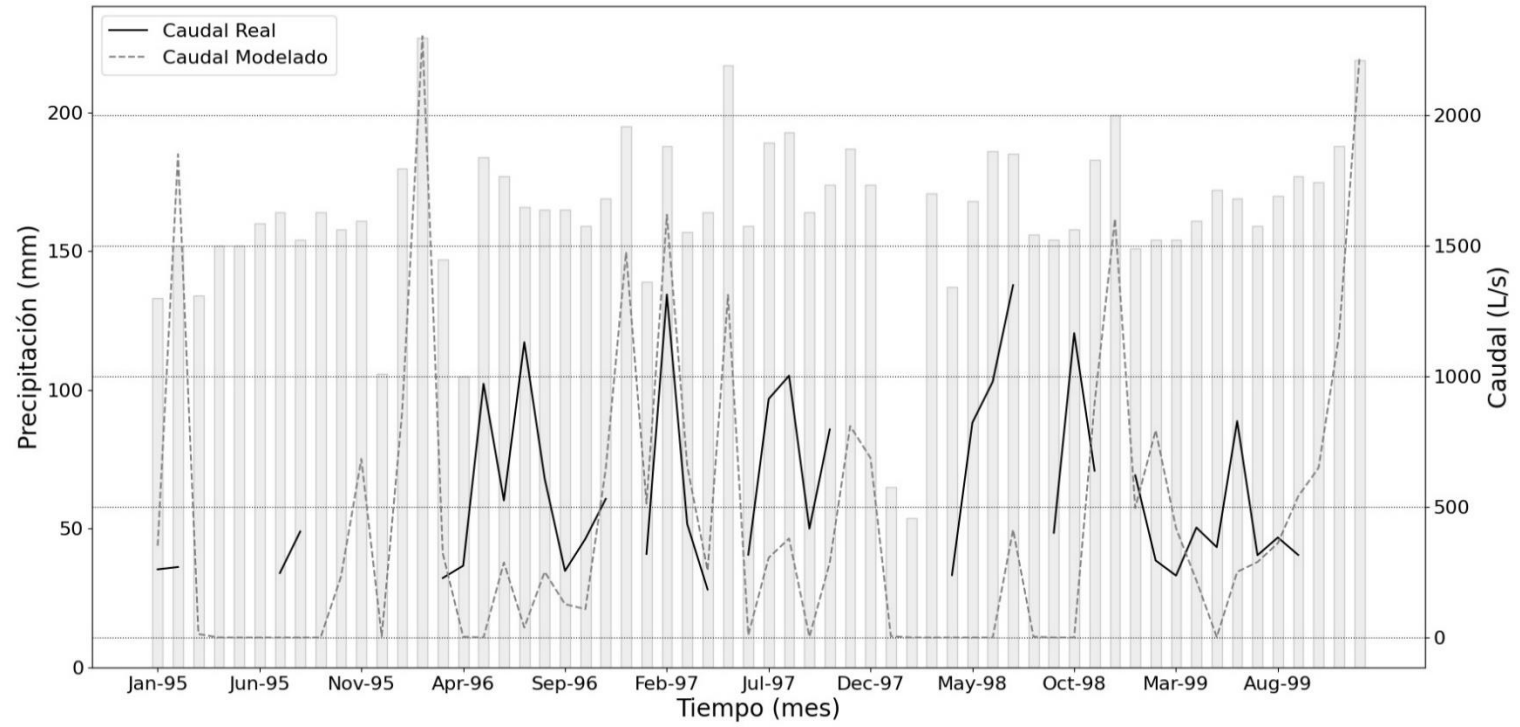
Anexo 3. Fotografía de pastos en zona de estudio



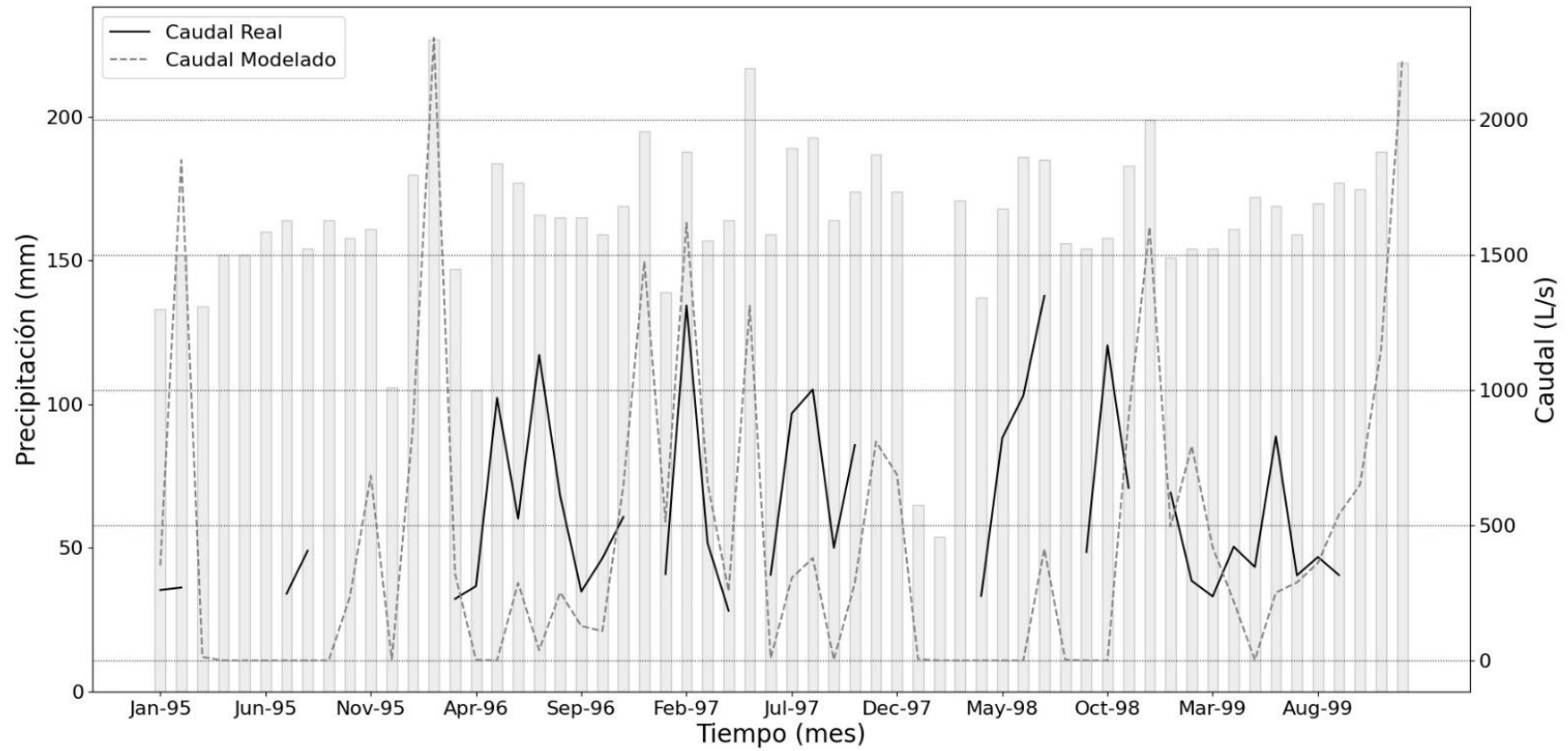
#### Anexo 4. Calibración porcentaje de percolación 0.35 y porcentaje de retención 0.99



### Anexo 5. Calibración porcentaje de percolación 0.36 y porcentaje de retención 0.02

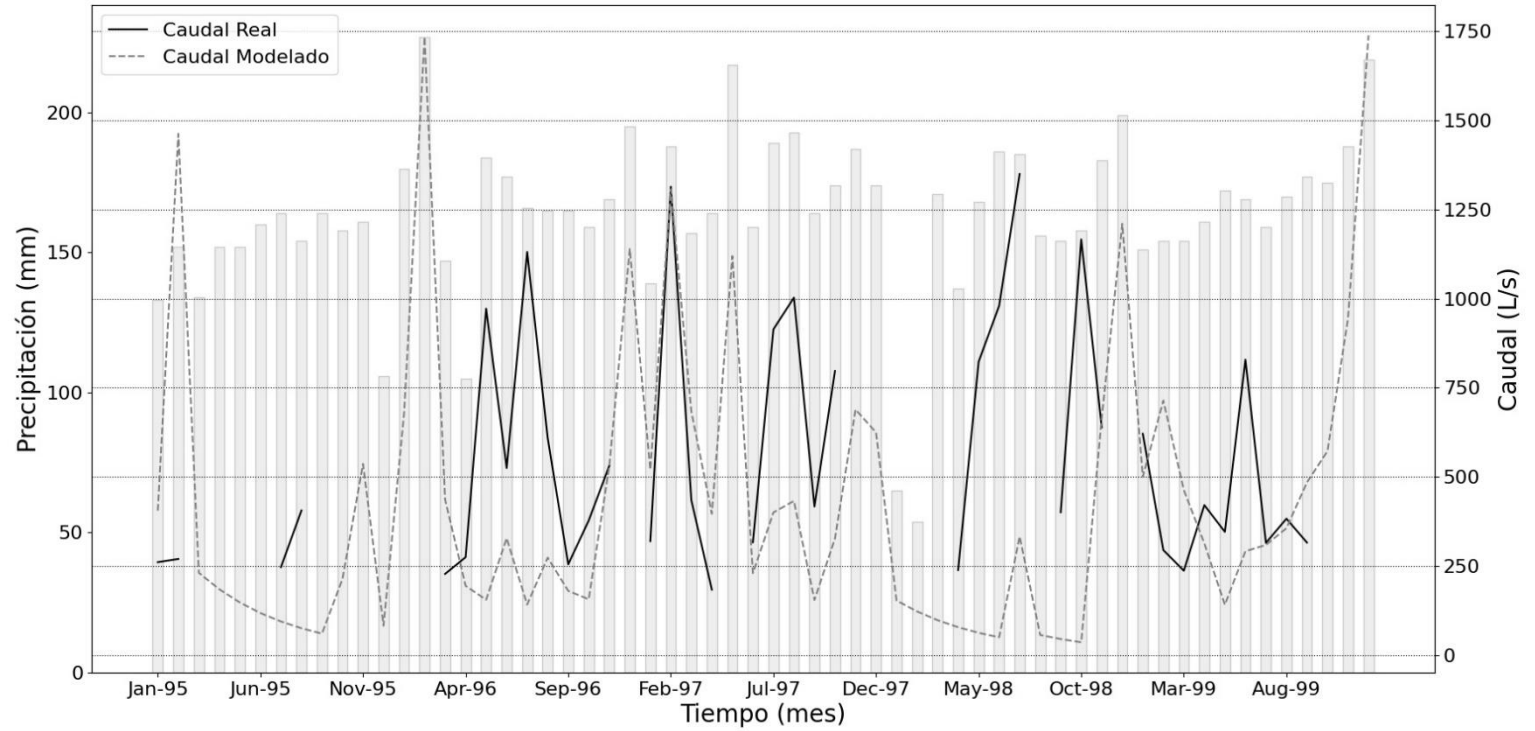


### Anexo 6. Calibración porcentaje de percolación 0.37 y porcentaje de retención 0.10

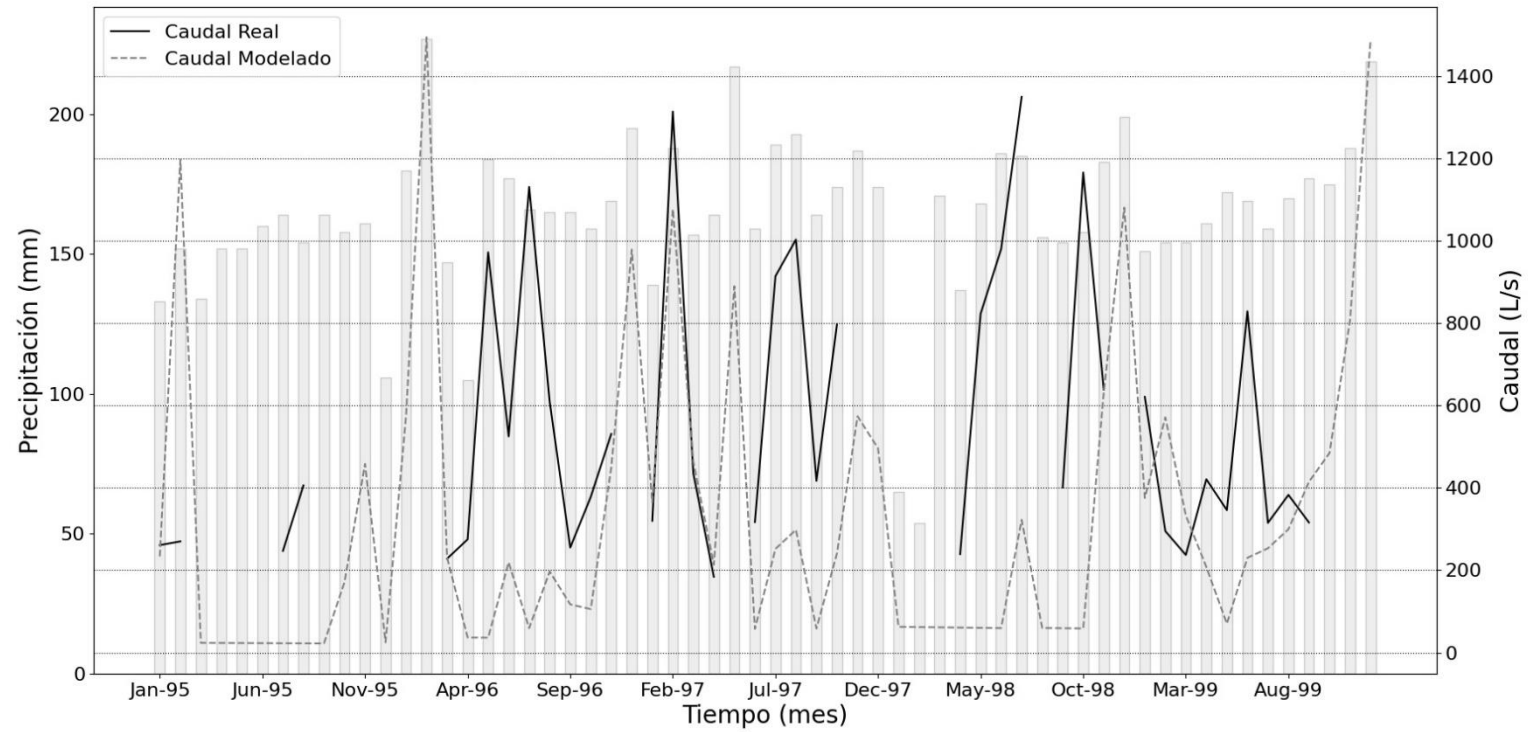




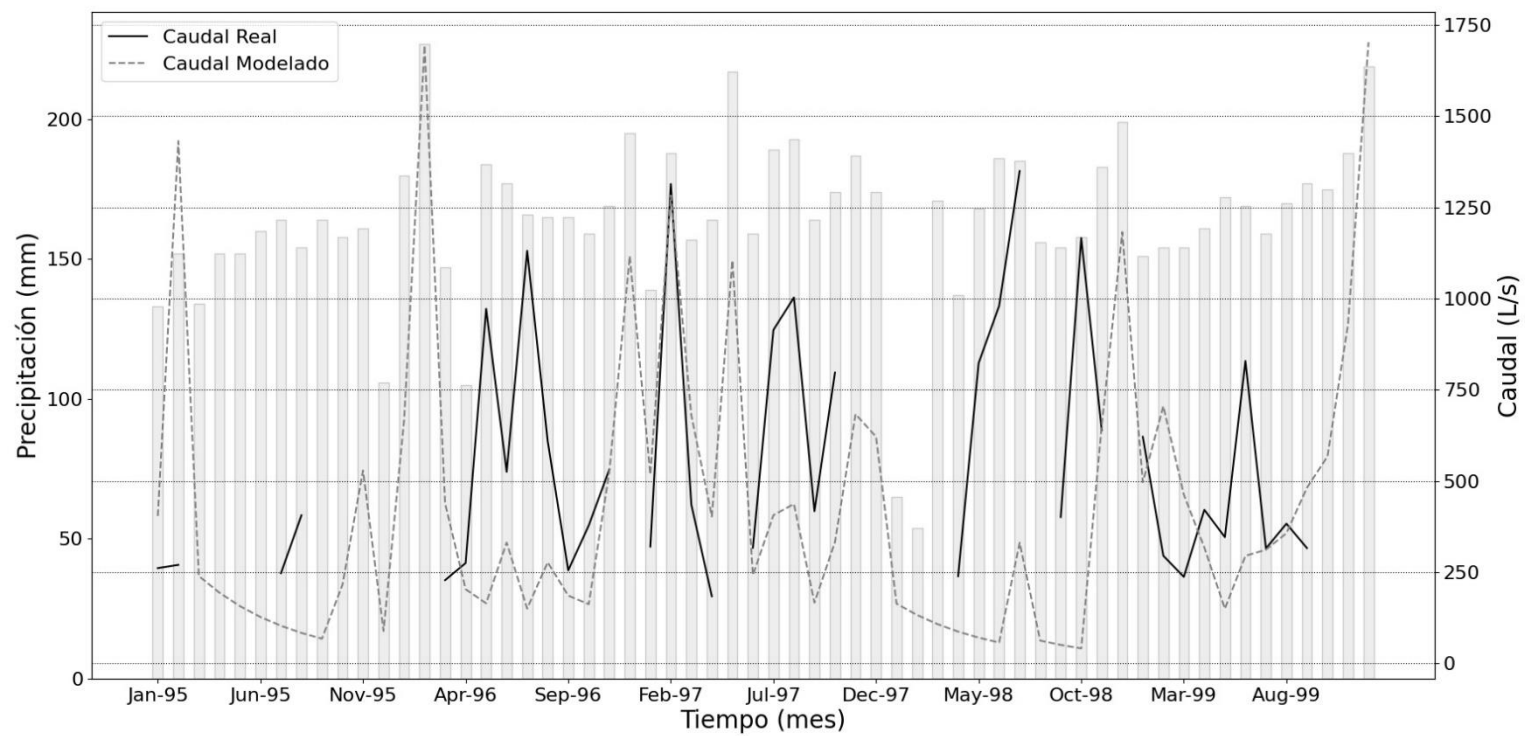
### Anexo 7. Calibración porcentaje de percolación 0.37 y porcentaje de retención 0.80



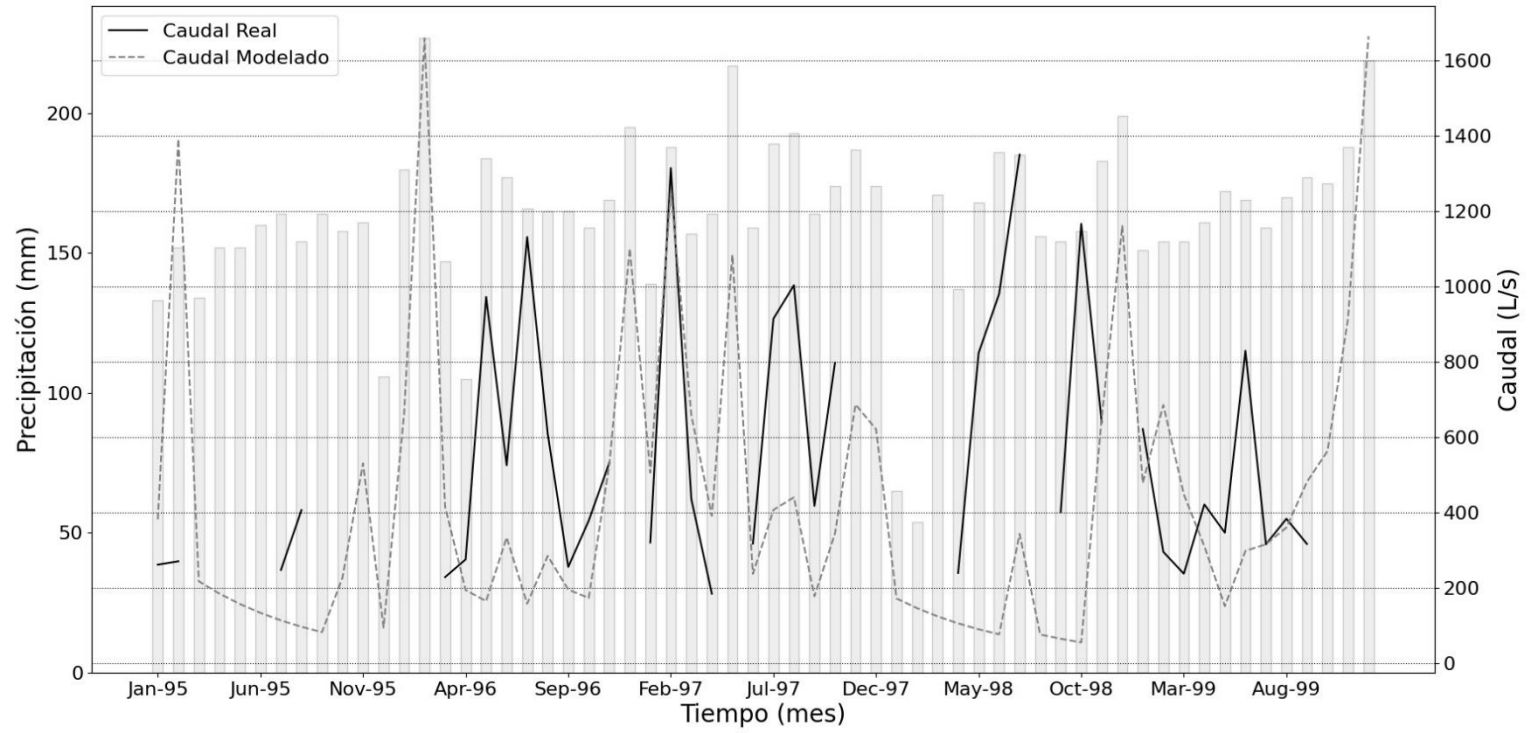
### Anexo 8. Calibración porcentaje de percolación 0.37 y porcentaje de retención 0.99



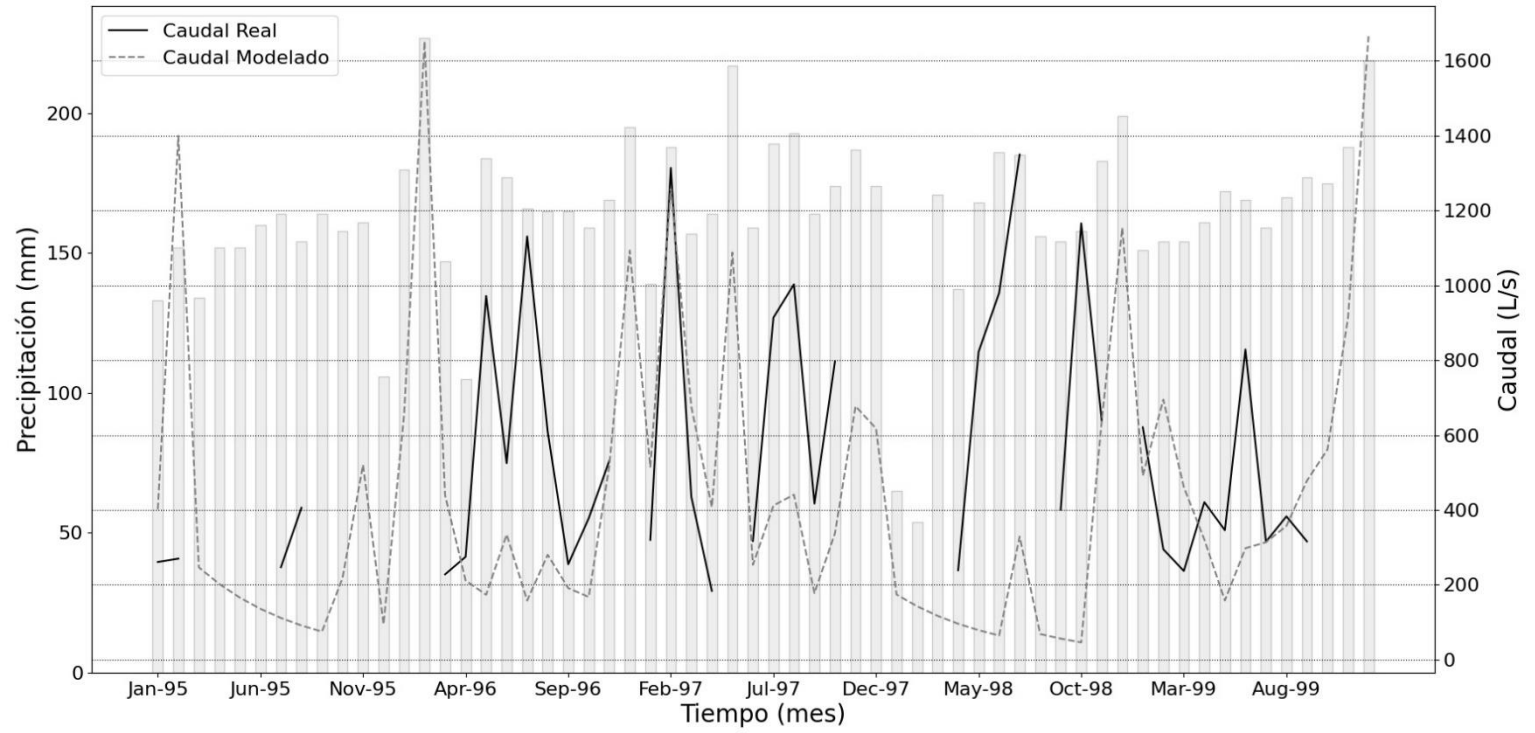
### Anexo 9. Calibración porcentaje de percolación 0.39 y porcentaje de retención 0.81



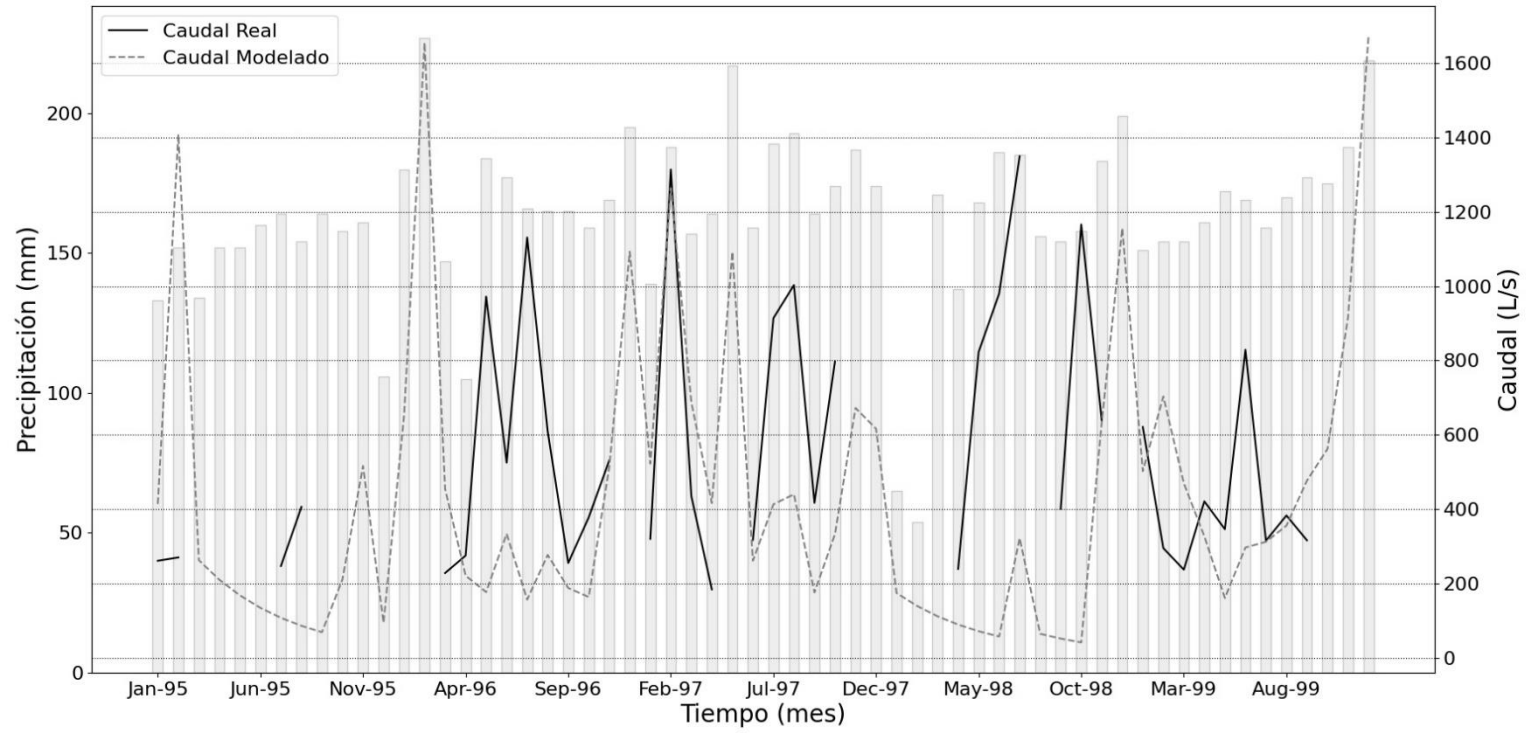
### Anexo 10. Calibración porcentaje de percolación 0.39 y porcentaje de retención 0.85



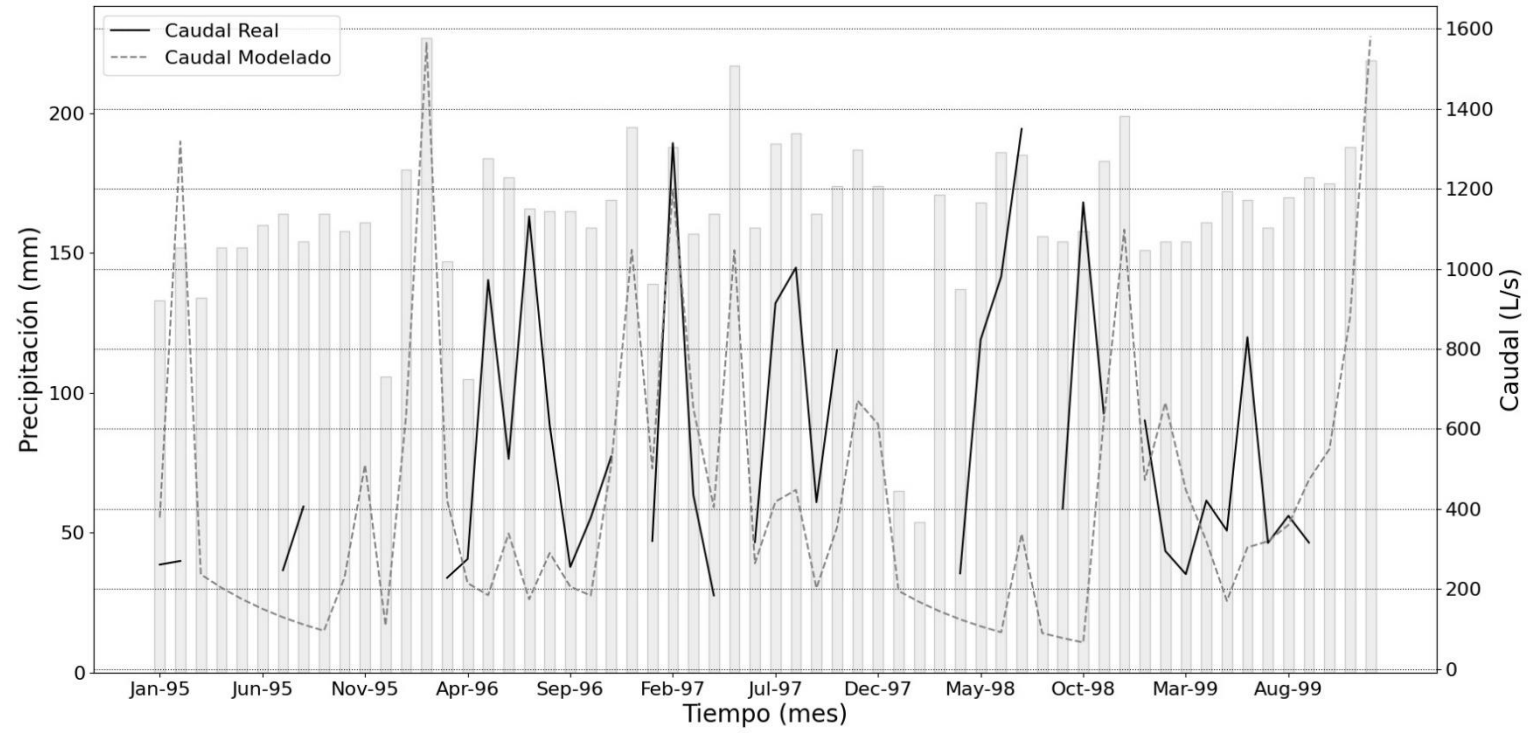
### Anexo 11. Calibración porcentaje de percolación 0.41 y porcentaje de retención 0.82



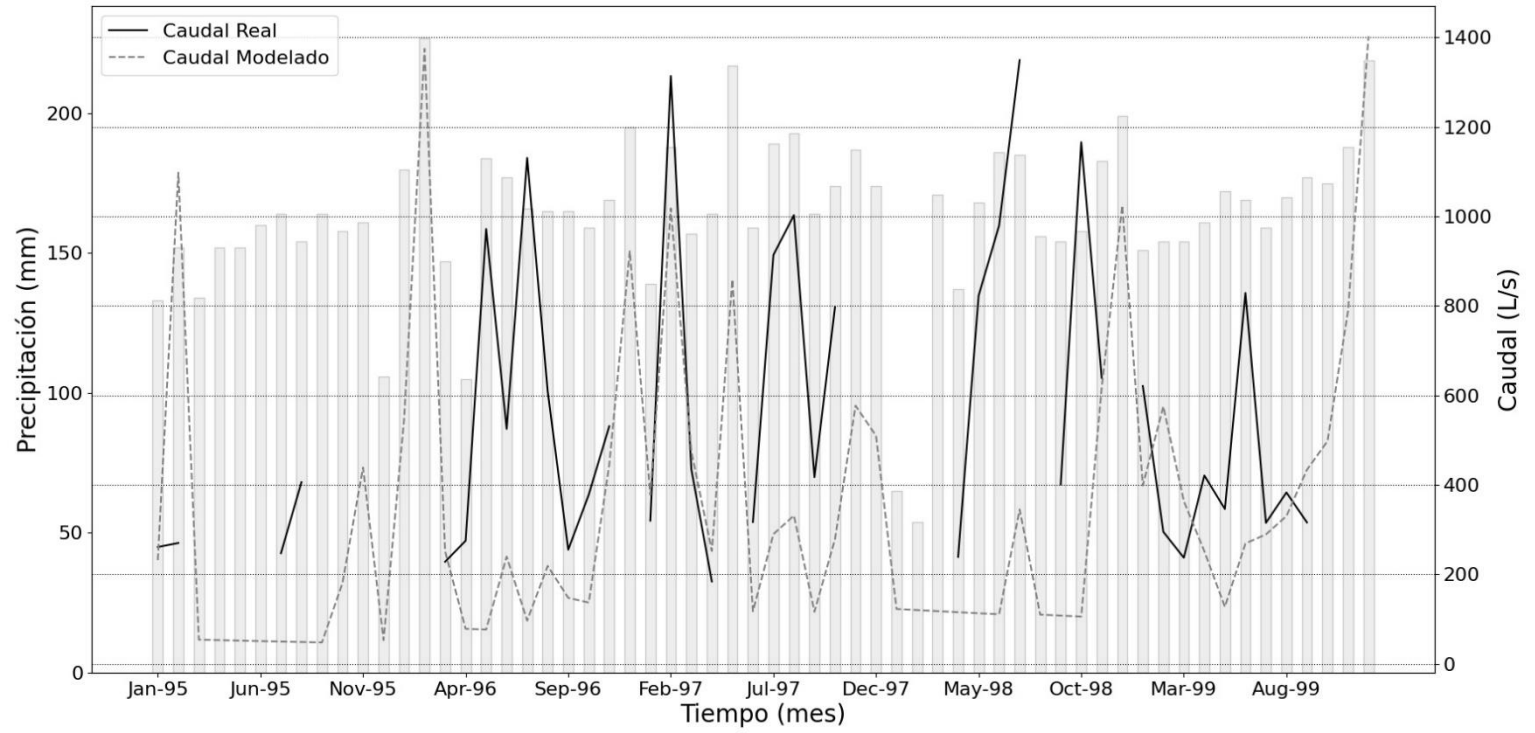
## Anexo 12. Calibración porcentaje de percolación 0.42 y porcentaje de retención 0.80



### Anexo 13. Calibración porcentaje de percolación 0.44 y porcentaje de retención 0.86

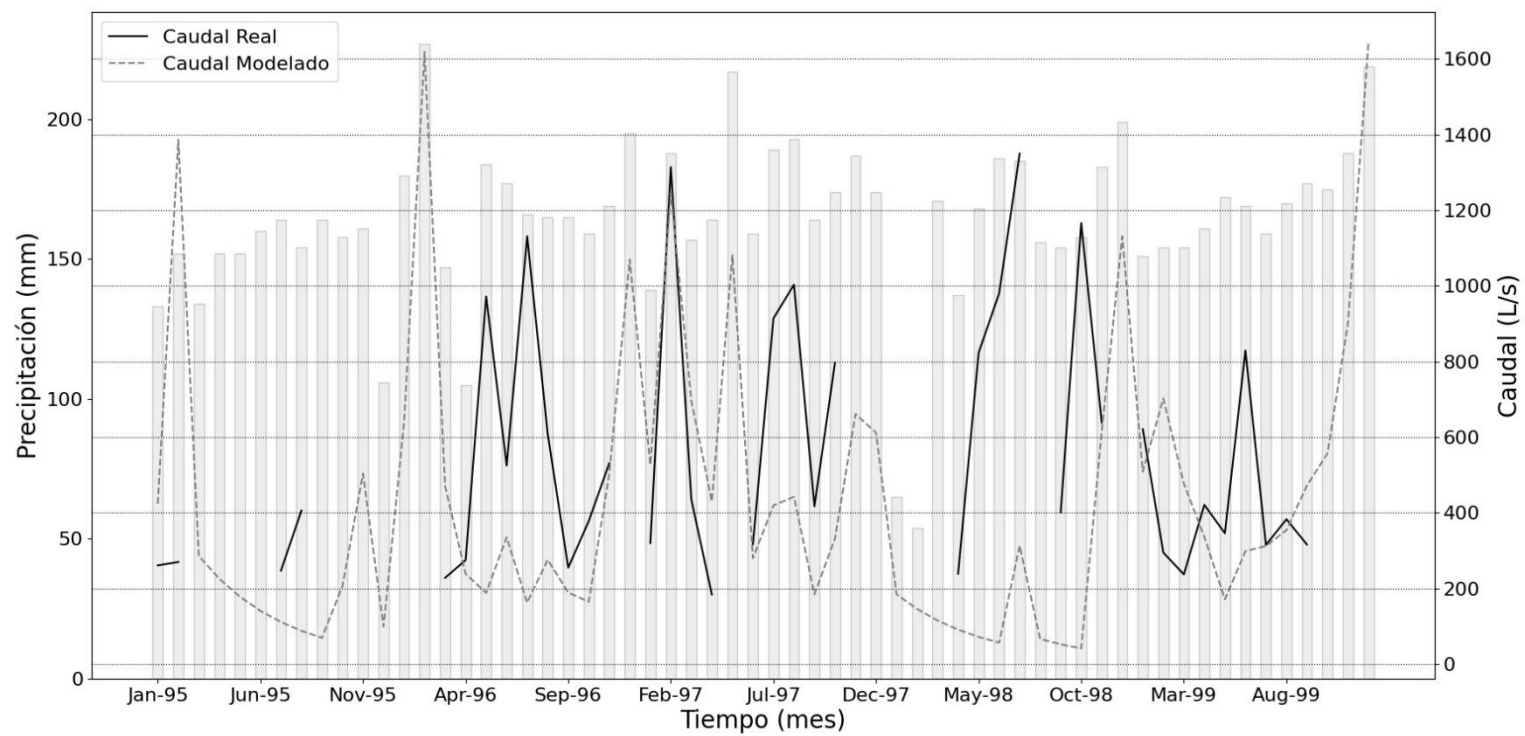


### Anexo 14. Calibración porcentaje de percolación 0.44 y porcentaje de retención 0.98

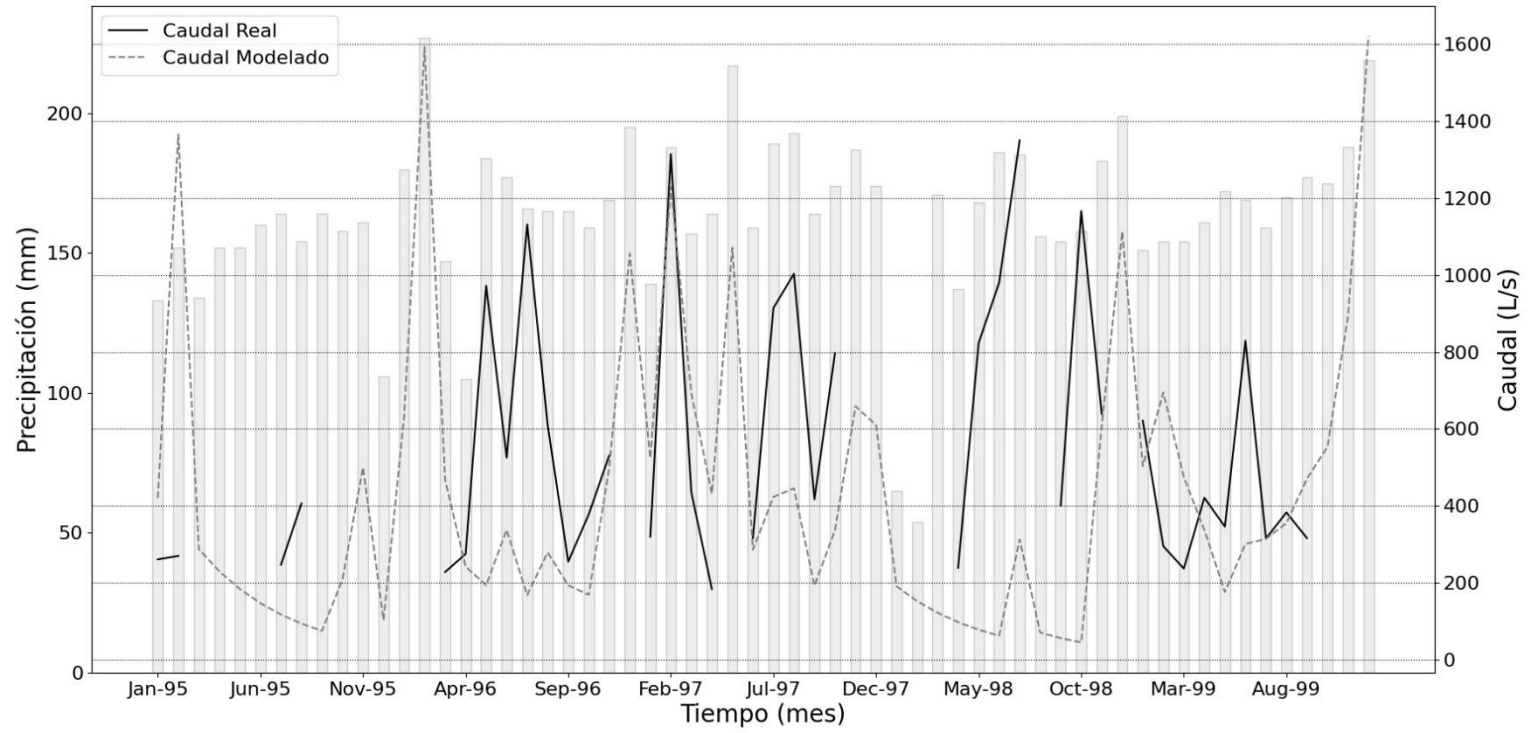




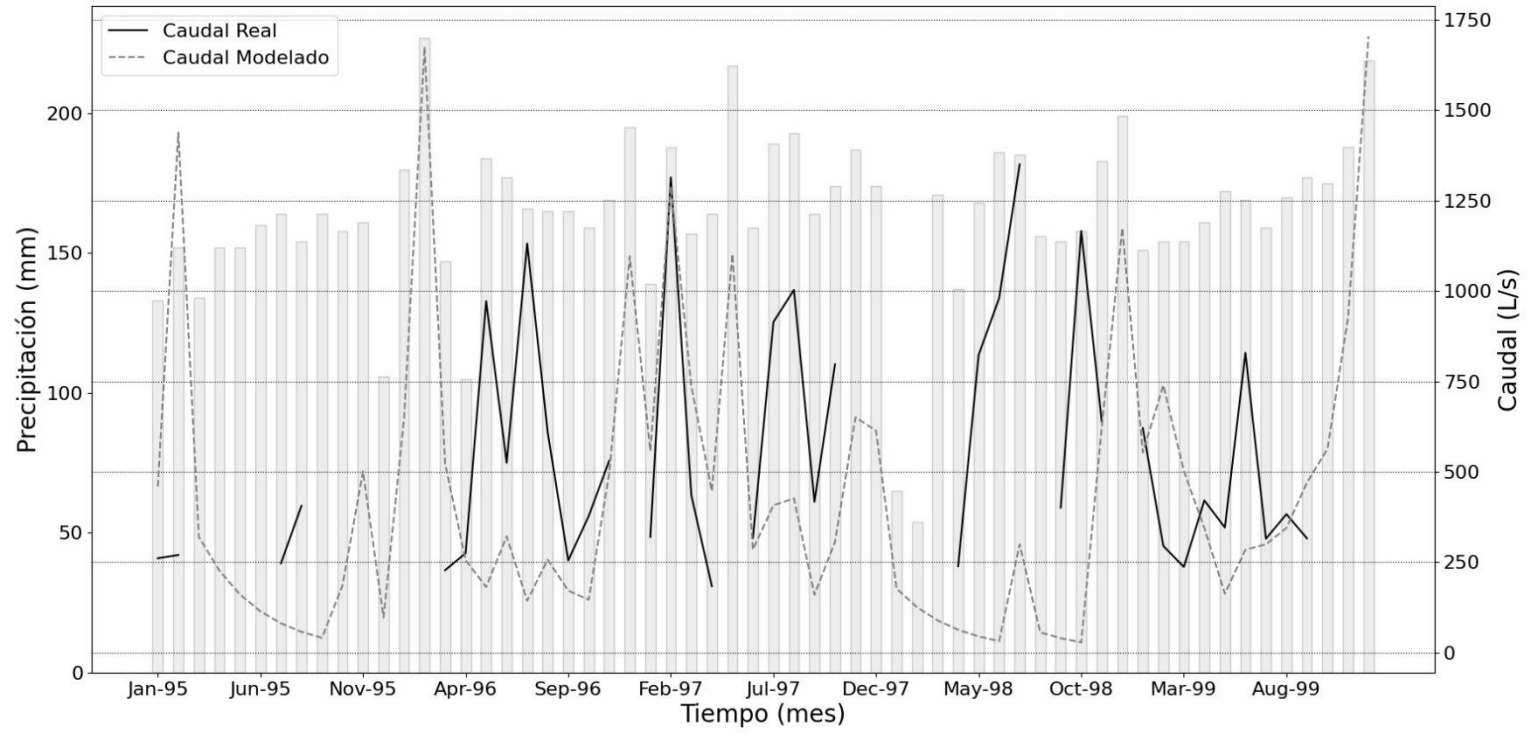
### Anexo 15. Calibración porcentaje de percolación 0.45 y porcentaje de retención 0.79



### Anexo 16. Calibración porcentaje de percolación 0.46 y porcentaje de retención 0.80



### Anexo 17. Calibración porcentaje de percolación 0.47 y porcentaje de retención 0.71



### Anexo 18. Modelaje del año 2080

Mes/ Info	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
EtpA	177	174	220	249	275	268	251	267	268	250	200	185
P	82.9132818	75.44376671	69.9124349	76.0514366	353.999529	345.007193	353.700891	340.451535	321.968935	332.360421	95.5653677	90.1410557
P - ETPA	-94	-99	-150	-173	79	77	102	73	53	-50	-104	-95
Acc Pot WL	-344	-443	-593	-766	0	0	0	0	0	-50	-154	-249
ST	168	131	90	58	400	400	400	400	400	353	271	214
DST	-46	-37	-41	-32	342	0	0	0	0	-47	-82	-57
AE	37	38	29	44	275	268	251	267	268	250	14	33
D	140	136	191	205	0	0	0	0	0	0	186	152
S	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	77.46029	102.38689	73.27172	53.49234	0.00000	0.00000	0.00000
Percolación	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	50.34919	66.55148	47.62662	34.77002	0.00000	0.00000	0.00000
Escorrentía directa	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	27.11110	35.83541	25.64510	18.72232	0.00000	0.00000	0.00000
Agua Disponible	324.72184	308.48575	293.06146	278.40838	264.48796	301.61275	353.08358	383.05602	398.67324	378.73958	359.80260	341.81247
Agua Retenida	308.48575	293.06146	278.40838	264.48796	251.26356	286.53211	335.42941	363.90322	378.73958	359.80260	341.81247	324.72184
Flujo Base	16.23609	15.42429	14.65307	13.92042	13.22440	15.08064	17.65418	19.15280	19.93366	18.93698	17.99013	17.09062
Escorrentía Total (mm)	16.23609	15.42429	14.65307	13.92042	13.22440	42.19174	53.48959	44.79790	38.65598	18.93698	17.99013	17.09062
ES (m)	0.01624	0.01542	0.01465	0.01392	0.01322	0.04219	0.05349	0.04480	0.03866	0.01894	0.01799	0.01709
Volumen (m3)	760949.43	722901.95	686756.85	652419.00	619798.05	1977432.64	2506937.77	2099577.75	1811719.66	887533.97	843157.27	800999.40
% Percolacion	0.65											
% Retencion	0.95											
Area m2	46867770.08											
Aforo Modelado	293.5761688	278.8973586	264.9524887	251.7048626	239.119618	762.8983942	967.1827829	810.022281	698.9659169	342.4127974	325.2921567	309.0275478

### Anexo 19. Modelaje del año 2050 con nueva área propuesta

Mes/ Info	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
<b>EtpA</b>	145	142	178	199	218	213	201	213	213	199	162	151
<b>P</b>	116	106	98	106	310	302	309	298	282	291	134	234
<b>P - ETPA</b>	-29	-36	-80	-92	91	89	108	85	69	92	-28	83
<b>Acc Pot WL</b>	-29	-65	-145	-237	0	0	0	0	0	0	-28	0
<b>ST</b>	372	366	327	317	400	400	400	400	400	400	373	400
<b>DST</b>	-28	-6	-39	-10	83	0	0	0	0	0	-27	27
<b>AE</b>	88	100	59	96	218	213	201	213	213	199	107	151
<b>D</b>	57	42	119	102	0	0	0	0	0	0	55	0
<b>S</b>	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	8.41864	88.99766	108.18832	85.11574	68.83536	91.63130	0.00000	56.45003
<b>Percolación</b>	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	3.03071	32.03916	38.94780	30.64167	24.78073	32.98727	0.00000	20.32201
<b>Escorrentía directa</b>	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	5.38793	56.95850	69.24053	54.47407	44.05463	58.64403	0.00000	36.12802
<b>Agua Disponible</b>	226.10812	210.28055	195.56091	181.87165	172.17134	192.15850	217.65520	233.06101	241.52747	257.60781	239.57526	243.12701
<b>Agua Retenida</b>	210.28055	195.56091	181.87165	169.14063	160.11935	178.70741	202.41934	216.74674	224.62054	239.57526	222.80500	226.10812
<b>Flujo Base</b>	15.82757	14.71964	13.68926	12.73102	12.05199	13.45110	15.23586	16.31427	16.90692	18.03255	16.77027	17.01889
<b>Escorrentía Total (mm)</b>	15.82757	14.71964	13.68926	12.73102	17.43992	70.40960	84.47639	70.78834	60.96155	76.67658	16.77027	53.14691
<b>ES (m)</b>	0.01583	0.01472	0.01369	0.01273	0.01744	0.07041	0.08448	0.07079	0.06096	0.07668	0.01677	0.05315
<b>Volumen (m3)</b>	590394.93	549067.28	510632.57	474888.29	650538.41	2626396.56	3151111.54	2640524.40	2273968.48	2860165.44	625559.24	1982469.13
<b>% percolación</b>	0.65											
<b>% retención</b>	0.95											
<b>Área m2</b>	37301683.11											
<b>Aforo Modelado</b>	228	212	197	183	251	1013.27028	1215.706612	1018.720834	877.3026538	1103.458889	241.3422995	764.8414861

### Anexo 20. Modelaje del año 2080 con nueva área propuesta

Mes/ Info	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
EtpA	177	174	220	249	275	268	251	267	268	250	200	185
P	82.91328184	75.44376671	69.91243492	76.05143661	353.9995293	345.007193	353.7008914	340.4515348	321.9689354	332.3604209	95.56536768	90.14105567
P - ETPA	-94	-99	-150	-173	79	77	102	73	53	-50	-104	-95
Acc Pot WL	-344	-443	-593	-766	0	0	0	0	0	-50	-154	-249
ST	168	131	90	58	400	400	400	400	400	353	271	214
DST	-46	-37	-41	-32	342	0	0	0	0	-47	-82	-57
AE	37	38	29	44	275	268	251	267	268	250	14	33
D	140	136	191	205	0	0	0	0	0	0	186	152
S	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	77.46029	102.38689	73.27172	53.49234	0.00000	0.00000	0.00000
Percolación	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	50.34919	66.55148	47.62662	34.77002	0.00000	0.00000	0.00000
escorrentía directa	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	27.11110	35.83541	25.64510	18.72232	0.00000	0.00000	0.00000
Agua Disponible	324.72185	308.48575	293.06146	278.40839	264.48797	301.61276	353.08359	383.05603	398.67325	378.73958	359.80260	341.81247
Agua Retenida	308.48575	293.06147	278.40839	264.48797	251.26357	286.53212	335.42941	363.90323	378.73958	359.80260	341.81247	324.72185
Flujo Base	16.23609	15.42429	14.65307	13.92042	13.22440	15.08064	17.65418	19.15280	19.93366	18.93698	17.99013	17.09062
Escorrentía Total (mm)	16.23609	15.42429	14.65307	13.92042	13.22440	42.19174	53.48959	44.79790	38.65598	18.93698	17.99013	17.09062
ES (m)	0.01624	0.01542	0.01465	0.01392	0.01322	0.04219	0.05349	0.04480	0.03866	0.01894	0.01799	0.01709
Volumen (m3)	605633.57	575351.89	546584.29	519255.08	493292.32	1573822.83	1995251.72	1671037.14	1441933.19	706381.19	671062.13	637509.02
% Percolación	0.65											
% retención	0.95											
Área m2	37301683.11											
Aforo Modelado	233.654927	221.9721801	210.8735706	200.3298916	190.3133963	607.1847322	769.7730418	644.6902555	556.3013836	272.5236088	258.8974276	245.9525555