

Universidad Nacional, Costa Rica
Sede Regional Chorotega
Campus Liberia

“Estudio hidrológico de las subcuencas del río Sábalo y río Guachipelín para optimizar la planificación de riego por goteo en el cultivo de naranja (*Citrus sinensis*) en la empresa Del Oro, Guanacaste, Costa Rica.”

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

Sustentante:

Katiana Bustamante Guevara
402370407

Equipo asesor:

Ing. David Álvarez Baltodano
Del Oro, La Cruz, Guanacaste, Costa Rica

Dr. Ronald Sánchez Brenes
Universidad Nacional, Costa Rica

Dr. Rolando Madriz Vargas
Universidad Nacional, Costa Rica

M.Sc. William Gómez Solís
Universidad Nacional, Costa Rica

Liberia, Guanacaste, Costa Rica.
Noviembre de 2023

Acta de Tribunal

Liberia, Guanacaste

Integrantes Tribunal Examinador

Representante de Decanatura, Campus Liberia

Representante de dirección académica, Campus Liberia

Dr. Ronald Sánchez Brenes

Tutor

Dr. Rolando Madriz Vargas

Asesor

M.Sc. William Gómez Solís

Asesor

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme concluir mi carrera universitaria tras los obstáculos y dificultades en el camino.

Agradezco a mi familia por el apoyo incondicional, por su amor, paciencia, comprensión, a mi madre Seidy, mi hermana Marianela, mi esposo Antonio y mi hijo Alex.

A la Universidad Nacional, sus funcionarios y profesores por hacer posible mi sueño de ser una profesional, por haberme brindado la beca Luis Felipe durante 6 años desde el inicio de carrera, el apoyo durante mi embarazo y hasta la ayuda económica por el cuidado de mi hijo. A mi equipo asesor de proyecto Dr. Rolando Madriz Vargas, Dr. Ronald Sánchez Brenes, M.Sc. William Gómez Solís y el Ing. David Álvarez Baltodano, que con su apoyo y consejos me permitieron llevar más fácil este proceso.

A mis compañeros y amigos que me dejó la universidad.

Y finalmente agradezco a la empresa Del Oro por darme la oportunidad de realizar mi proyecto final de graduación con ellos, al departamento de Agronomía, Hugo, David, Blanca, Katherine, Loli y todos los compañeros que de manera muy amable me abrieron las puertas y me compartieron su conocimiento, aportando su granito de arena en mi crecimiento profesional a través de este proyecto, el cual fue de gran aprendizaje.

Dedicatoria

A mi querido hijo Alex,

Este logro no es solo mío, sino también tuyo. Has sido mi mayor inspiración a lo largo de este viaje académico. Gracias por ser la luz que ilumina mi camino y por ser mi motivación constante para alcanzar nuevas alturas. Este proyecto final de graduación está dedicado a ti, con todo mi amor y gratitud.

Con cariño, Mamá.

Ing. Katiana Bustamante Guevara.

Tabla de contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Declaración del problema	1
1.3 Justificación	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos específicos del proyecto	4
1.5 Alcance y limitaciones	4
1.5.1 Alcances	4
1.5.2 Limitaciones	5
Capítulo 2. Antecedentes	6
2.1 Localización geográfica del área de estudio	6
2.2 Generalidades del área de estudio	7
2.2.2 Situación del Recurso Hídrico	8
2.2.3 Condiciones meteorológicas	9
2.3 Generalidades de la empresa	9
2.3.1 Proyecto de riego por goteo de la empresa Del Oro	10
2.4 Estudios de referencia	11
2.5 Conclusión	12
Capítulo 3. Marco teórico.....	13
3.1 Hidrología	13
3.1.1 Cuenca hidrográfica	13
3.1.2 Factores climáticos y análisis estadísticos	17
3.2 Balance Hídrico	20
3.3 Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia	22
3.4 Cultivo de Naranja Valencia y recurso hídrico	23
3.4.1 Generalidad de la planta Naranja Valencia	23

3.4.2 Riego por goteo.....	23
3.6 Estrategia de acciones de mejora para la optimización de riego por goteo.....	24
3.7 Conclusión	24
Capítulo 4. Estudios de Prefactibilidad.....	25
4.1 Estudio de prefactibilidad técnica	25
4.2 Estudio de prefactibilidad Financiero	27
4.3 Estudio de prefactibilidad organizacional.....	28
4.4 Estudio de prefactibilidad legal.....	29
4.5 Estudio de prefactibilidad ambiental.....	30
4.6 Conclusión	31
Capítulo 5. Metodología	32
5.1 Descripción general de la metodología.....	32
5.2 Población y muestra.....	34
5.2.1 Población.....	34
5.2.2 Muestra	34
5.3.1 Recopilación de información base	34
5.3.2 Procesamiento de datos	35
5.3.3 Validación de datos.....	37
5.4 Procedimientos metodológicos	38
5.4.1 Determinación de las características morfológicas de las subcuencas.....	38
5.4.2 Determinación del Balance hídrico mensual.....	40
5.4.3 Generación de Curvas Intensidad Duración Frecuencia	44
5.4.4 Acciones de mejora del uso de agua para riego por goteo.....	46
5.4 Cronograma de actividades y presupuesto.....	47
5.6 Conclusión	48
Capítulo 6. Resultados y discusión de resultados.....	49
6.1 Resultados del proyecto	49
6.1.1 Información recopilada	49
6.1.2 Resultados según objetivos	50

6.2	Discusión de resultados.....	68
6.2.1	Respecto a principales hallazgos.....	68
6.2.2	Respecto a los objetivos.....	71
6.2.3	Resultados respecto a la metodología utilizada	71
Capítulo 7.	Conclusiones y Recomendaciones	73
7.1	Conclusiones.....	73
7.2	Recomendaciones	74
Bibliografía	75
Anexos	80

Lista de Figuras

Figura 1.1 Representación del problema en diagrama de Ishikawa.....	3
Figura 2.1 (A) Mapa de ubicación del área de estudio en Costa Rica y (B) de las subcuencas en estudio. 7	7
Figura 2.2 Mapa de hidrografía de las subcuencas en estudio.....	8
Figura 2.3 Cultivo de naranja en finca Yafa con actividad de riego por goteo.....	11
Figura 3.1 Delimitación de una cuenca.....	14
Figura 3.2 Pluviómetro (A), estación meteorológica (B) en fincas de Del Oro.....	18
Figura 3.3 Representación esquemática de los componentes del balance hídrico adaptado para el cultivo de la planta Naranja Valencia.	21
Figura 5.1 Diagrama de flujo de la metodología a utilizar.	33
Figura 6.1 Mapa de polígonos de Thiessen de las subcuencas del río Guachipelín y Sábalo.....	52
Figura 6.2 Isoyetas de las subcuencas en estudio (A) subcuenca río Guachipelín, (B) subcuenca río Sábalo.....	53
Figura 6.3 Hidrogramas de las subcuencas en estudio.....	54
Figura 6.4 Temperatura media mensual de las subcuencas en estudio.	56
Figura 6.5 Comparación de evapotranspiración del cultivo y precipitación de las subcuencas para el período de estudio 2013-2022.....	57
Figura 6.6 Balance hídrico mensual de la subcuenca del río Sábalo construido a partir de los promedios de precipitación, evapotranspiración del cultivo, déficit y exceso hídrico para el período de estudio 2013-2022.	59
Figura 6.7 Balance hídrico mensual de la subcuenca del río Guachipelín construido a partir de los promedios de precipitación, evapotranspiración del cultivo, déficit y exceso hídrico para el período de estudio 2013-2022.....	60
Figura 6.8 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia registro pluviométrico de 12-7K, método analítico. 62	62
Figura 6.9 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia registro pluviométrico de Yafa 19, método analítico.	63
Figura 6.10 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia registro pluviométrico de 12-7K, metodología Frederich Bell.....	65
Figura 6.11 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia registro pluviométrico de Yafa 19, metodología Frederich Bell.....	66

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Clasificación de las cuencas según la pendiente.	15
Tabla 3.2 Formas de la cuenca según el coeficiente de compacidad.	15
Tabla 3.3 Rangos aproximados del factor de forma.....	16
Tabla 4.1 Insumos necesarios para el estudio de prefactibilidad técnica.	26
Tabla 4.2 Presupuesto global del proyecto.	27
Tabla 4.3 Jerarquía administrativa involucrada en el desarrollo del proyecto.	29
Tabla 4.4 Marco legal referente al proyecto.	30
Tabla 5.1 Cronograma de proyecto.....	48
Tabla 6.1 Detalle de los Modelo Digital de Elevación.	49
Tabla 6.2 Estaciones meteorológicas obtenidas del IMN y empresa Del Oro.	49
Tabla 6.3 Pluviómetros de la empresa Del Oro.	50
Tabla 6.4 Tipo de textura de suelo y vegetación predominante en las subcuencas del río Sábalo y Guachipelín.	50
Tabla 6.5 Caracterización morfológica de la subcuenca del río Sábalo y río Guachipelín.....	51
Tabla 6.6 Precipitación media mensual y anual a partir del método de polígonos de Thiessen de las subcuencas en estudio, período 2013-2022.....	53
Tabla 6.7 Precipitación media mensual y anual a partir del método de isoyetas de las subcuencas en estudio, período 2013-2022.	54
Tabla 6.8 Precipitación media mensual y anual a partir del método de promedio aritmético de las subcuencas en estudio.	55
Tabla 6.9 Resultados de la precipitación media anual de las subcuencas en estudio.....	55
Tabla 6.10 Cálculo de la evapotranspiración potencial 2013-2022 empleando el método Thornthwaite.	56
Tabla 6.11 Cálculo de la evapotranspiración del cultivo a partir del coeficiente de cultivo Kc propuesto por la FAO (2006).....	57
Tabla 6.12 Balance hídrico de la subcuenca del río Sábalo.	58
Tabla 6.13 Balance hídrico de la subcuenca del río Guachipelín.	59
Tabla 6.14 Registros pluviométricos 12-7K y Yafa 19 de precipitación máxima (mm/h) promedio anual.	60
Tabla 6.15 Cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables mediante Gumbel.	61
Tabla 6.16 Cálculo de parámetros k y m por regresión potencial mediante Gumbel.	61
Tabla 6.17 Modelos ajustados por registro pluviométrico.	61

Tabla 6.18 Intensidades de precipitación máxima (mm) por duración y período de retorno, del registro pluviométrico de 12-7K, método analítico.	62
Tabla 6.19 Intensidades de precipitación máxima (mm) por duración y período de retorno, del registro pluviométrico de Yafa 19, método analítico.	63
Tabla 6.20 Resultados de distribución Gumbel y aplicación del método Frederich Bell.	64
Tabla 6.21 Intensidades máximas (mm) por duración y período de retorno del registro pluviométrico de 12-7K, metodología Frederich Bell.	64
Tabla 6.22 Intensidades máximas (mm) por duración y período de retorno del registro pluviométrico de Yafa 19, metodología Frederich Bell.	65

Lista de Anexos

Anexo 1 Mapa de suelos predominantes de las subcuencas en estudio.....	80
Anexo 2 Mapa de usos de suelo predominantes de las subcuencas en estudio.....	80
Anexo 3 Concesiones de agua otorgadas dentro de las subcuencas en estudio.	81
Anexo 4 Factor de corrección f, por duración media de las horas de sol expresada en unidades de 30 días con 12 horas de sol cada una.	81
Anexo 5 Requerimientos de agua de los árboles cítricos, coeficiente de cultivo por mes.....	81
Anexo 6 Valores típicos de Kc para diferentes cultivos completamente desarrollados.	82
Anexo 7 Coeficientes de cultivos para las diferentes fases fenológicas del cultivo.	82
Anexo 8 Información geoespacial del área de estudio.	83
Anexo 9 Estaciones meteorológicas y pluviómetros disponibles.	83
Anexo 10 Información de estaciones meteorológicas y pluviómetros disponibles.	84
Anexo 11 Guía de acciones de mejora como propuesta de implementación a proyectos de riego por goteo de la empresa Del Oro.	84
Anexo 12 Resumen de propuesta de plan de acciones de mejora.....	85
Anexo 13 Toma de agua superficial del río Sábalo, primera toma del río Sábalo.....	85
Anexo 14 Finca con cultivos de naranja.....	86
Anexo 15 Naranjas bajo diferentes condiciones hídricas.	86

Abreviaturas

AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
CFIA	Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica.
DA	Dirección de Aguas.
Curvas IDF	Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia.
IMN	Instituto Meteorológico Nacional.
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía.
UNA	Universidad Nacional, Costa Rica.
SENARA	Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento.
SETENA	Secretaría Técnica Nacional Ambiental.
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
TEC	Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Resumen

El presente estudio se realizó con la finalidad de conocer el comportamiento hidrológico de las subcuencas del Río Sábalo y Guachipelín, donde se encuentran las fincas de la empresa Del Oro con cultivos de naranja permanentes, ubicadas en La Garita de La Cruz, Guanacaste, Costa Rica, para tener una línea base de referencia para la toma de decisiones y futuros estudios sobre la optimización del agua en los sistemas de riego por goteo a estos cultivos. Para ello se realizó un estudio morfológico haciendo uso del Sistema de Información Geográfica (SIG) y métodos estadísticos que, reveló la morfología de las subcuencas Sábalo con un área de 65,97 km² hasta su punto de aforo donde se une la toma de agua superficial del río Sábalo y la de agua de pozo cercano a este, ambas concesionadas para el riego por goteo, y de la subcuenca Guachipelín con un área de 19,65 km² hasta su punto de aforo donde se da la toma de agua superficial del río Guachipelín para el riego por goteo.

Los resultados hidrológicos obtenidos se fundamentan en el balance hídrico superficial por el método de Thornthwaite – Mather modificado y adaptado al cultivo de naranja de la variedad Valencia, utilizando información de variables climáticas de temperatura y precipitación para el periodo comprendido entre los años 2013-2022 para ambas subcuencas. Se observó un déficit hídrico en el mes de abril, lo cual determinó que la demanda hídrica de los cultivos de naranja y la oferta hídrica disponible en ambas subcuencas durante ese mes es crítica y debe ser asistida por la actividad de riego por goteo.

Como parte del estudio hidrológico y para comprender el comportamiento hidrológico de las subcuencas del río Sábalo y Guachipelín, se desarrollaron las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para los periodos de retorno correspondiente 2, 5, 10, 20, 25 y 50 años. Esto como herramienta extra para el desarrollo de nuevos proyectos dentro de las subcuencas en estudio y el respaldo de la planificación del riego por goteo al cultivo de naranja.

Este estudio evidenció la situación hídrica actual de estas subcuencas e identificó los aspectos por mejorar para optimizar la planificación del riego por goteo. Se generó información hidrológica base que sirvió para la toma de decisiones a futuro en la empresa. Y se propuso como guía un plan estratégico de acciones de mejora para el aprovechamiento óptimo del agua en los proyectos de riego por goteo en los cultivos de naranja.

Abstract

The present study was carried out with the purpose of knowing the hydrological behavior of the Sábalo and Guachipelín Rivers subbasins, where the farms of the company Del Oro with permanent orange crops are located, these located in La Garita de La Cruz, Guanacaste, Costa Rica, to have a baseline for decision making and future studies on water optimization in drip irrigation systems for these crops. To this end, a morphological study was made using the Geographic Information System (GIS) and statistical methods, which revealed the morphology of the Sábalo subbasins with an area of 65.97 km² up to its gauging point where the surface water intake of the Sábalo river and the well water intake near it meet, and the Guachipelín subbasin with an area of 19.65 km² up to its gauging point where the surface water intake of the Guachipelín river is located for drip irrigation.

The hydrological results obtained are based on the Thornthwaite - Mather surface water balance, method modified and adapted to the Valencia variety orange crop, using information on climatic variables of temperature and precipitation for the period 2013-2022 for both subbasins. A water deficit was observed in the month of April, which determined that the water demand of orange crops and the available water supply in both sub-basins during that month is critical and must be assisted by drip irrigation activity.

As part of the hydrological study and to understand the hydrological behavior of the Sábalo and Guachipelín rivers subbasins, intensity, duration, and frequency (IDF) curves for the return periods corresponding to 2, 5, 10, 20, 25 and 50 years. This is an extra tool for the development of new projects within the sub-basins studied and to support the planning of drip irrigation for the orange crop.

This study showed the current water situation of these subbasins and identified the aspects to be improved to optimize the planning of drip irrigation. Hydrological information was generated as a basis for future decision making in the company. A strategic plan of improvement actions was proposed as a guide for the optimal use of water in drip irrigation projects for orange crops.

Capítulo 1. Introducción

Este capítulo contiene información introductoria para el desarrollo del proyecto. Se exponen la declaración del problema, justificación, objetivos del proyecto y los alcances y limitaciones.

1.1 Introducción

El presente estudio se realizó delimitando un área de estudio que comprende fincas pertenecientes a la empresa Del Oro S.A utilizadas para el cultivo y cosecha de naranja de la variedad Valencia donde en temporadas de sequía se irriga por medio de riego por goteo, parte de ellas se encuentran a las laderas del Volcán Orosí donde nace el río Sábalo siendo este la principal fuente de captación de agua y el río Guachipelín como fuente secundaria para el mismo fin. Es por ello la importancia del manejo óptimo y aprovechamiento del agua que ya ha sido concesionada y regulada por Dirección de Aguas, para una cuantificación y distribución del agua disponible que sea eficaz para todos los lotes con cultivos de naranja que necesitan del riego por goteo.

La variabilidad climática que se está presentando desde hace unos años en el país, ha afectado las programaciones de riego por goteo en las fincas producto de las desviaciones típicas del clima entre precipitaciones y sequías que, a través de los años pueden afectar la disponibilidad de agua superficial y subterránea que alimenta estos cultivos de naranja cuando se requiere. El clima es un factor que regula e impacta en el medio ambiente y con ello se define el desarrollo de labores, al conocer el comportamiento de elementos como la precipitación y temperatura se determina los procesos del cultivo y cosecha de la naranja y su necesidad de riego por goteo el cual se da por medio de ciclos.

La técnica del balance hídrico en este estudio se propone como herramienta para resolver estos problemas hídricos que, de manera teórica y práctica sea aplicable en la actividad de riego por goteo en los cultivos de naranja de la empresa. Esta técnica permite evaluar en forma cuantitativa el recurso hídrico, tanto a nivel temporal como espacial (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, [UNESCO], 2007). Al observar los datos de precipitación de estaciones en el área de estudio se pretende generar curvas Intensidad-Duración-Frecuencia que permiten visualizar a futuro el comportamiento de las precipitaciones y temporada de sequías, creando información importante que aporte en la toma de decisiones en la empresa sobre el uso del agua para riego por goteo.

1.2 Declaración del problema

La empresa Del Oro es una de las principales fuentes de empleo en el cantón de La Cruz, ofreciendo empleo a aproximadamente 450 personas fijas y en período de cosecha de naranja incrementa a unas 1 100 personas,

esta organización se compone por las compañías: Inversiones Guanaraja S.A, CIGASA, Personna de Costa Rica y Del Oro S.A dentro de las cuales se encuentran distribuidas las fincas, planta y todo el personal. En el presente estudio el sector de interés se encuentra en finca Yafa con 2224 hectáreas y Finca Oros con 1580 hectáreas donde se implementa el uso de agua para riego en cultivos de naranja (Del Oro, 2017).

Del Oro S.A contabiliza un período de riego por goteo en el cultivo de naranja al año, que se extiende de marzo a junio aproximadamente y el período de inicio y fin varía de acuerdo con la medición del estrés de la planta que se determina por la cantidad de agua que se observa por precipitación a través de pluviómetros y tensiómetros dentro de los sectores de interés. Por la variabilidad climática, la programación de riego por goteo se ha modificado a ciclos de irrigación en el año, determinados por los parámetros según los requerimientos de agua del cultivo de naranja.

La empresa tiene otorgadas por la DA, concesiones de agua superficial y pozos destinados para el uso en riego. Estas concesiones están en las fincas, distribuidas en las subcuencas del río Sábalo y río Guachipelín, donde desde aquí se delimita el área de estudio para el proyecto. El área de estudio está conformada por un relieve variado como pendientes altas partiendo desde la parte alta de la subcuenca del río Sábalo donde nace el principal río Sábalo siendo uno de los principales recursos de agua para la empresa y en las laderas del Volcán Orosí donde se ubican algunos lotes de cultivos de naranjas de finca Oros. Además, hay una densa red hidrográfica con concesiones activas aprovechadas por diferentes representantes en la parte alta del río Sábalo y en la subcuenca del río Guachipelín.

Este estudio pretende analizar el comportamiento hidrológico de ambas unidades hidrográficas nombradas subcuencas ante estas actividades y la variabilidad climática hoy y a futuro considerando que no existe ningún estudio hidrológico previo para el sector. Y recopilar información hidrológica que contribuya en la toma de decisiones de la empresa sobre el uso del agua para riego por goteo (Figura 1.1).

En el análisis del comportamiento hidrológico se caracterizan variables hidrometeorológicas, biofísicas y morfológicas de las subcuencas, que permiten identificar la capacidad hídrica de las subcuencas. Así como el aporte de información hidrológica que puede usarse para determinar si de la cantidad de agua concesionada dentro del área de estudio es la apropiada para el óptimo aprovechamiento del agua con fines de riego actual y a futuro del cultivo de naranja de la empresa Del Oro.

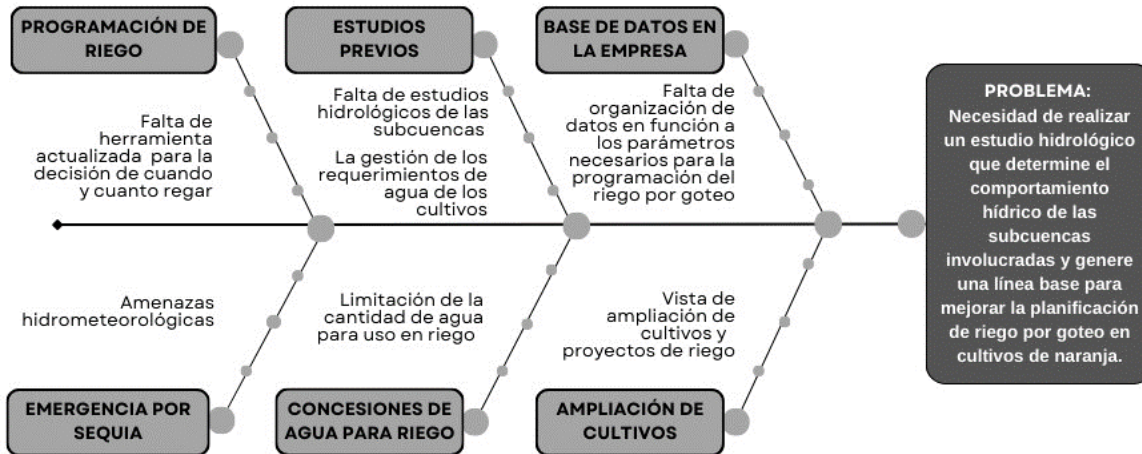


Figura 1.1 Representación del problema en diagrama de Ishikawa.
Fuente: Elaboración propia, 2023.

1.3 Justificación

Este estudio se realizó para una empresa exportadora de fruta, donde se cultiva y cosecha la naranja de diferentes variedades y patrones, pero en su mayoría naranja Valencia, los cultivos están en diferentes fincas divididas por lotes, y están en La Garita de La Cruz, Guanacaste, el cultivo de naranja se mantiene naturalmente en temporada lluviosa, pero por la variabilidad climática que enmarca una temporada de sequía en la zona, se induce la irrigación artificial al cultivo mediante un sistema de riego por goteo que capta agua proveniente de ríos y pozos. Dentro de las fincas se cuenta con dos estaciones meteorológicas, y con pluviómetros, que definen junto con tensiómetros la fecha de inicio de la temporada de riego por goteo.

El estudio propuesto permite conocer las características hidrológicas del sector, evaluando y analizando la documentación de datos cartográficos y pluviométricos con registros históricos en el área de estudio. Recopilando información hidrológica que favorece a la empresa tomar decisiones en cuanto a la cantidad y tiempo del uso de agua para riego por goteo.

Es importante conocer el comportamiento hidrológico y las características morfológicas de las subcuencas en las que se ubican las fincas de cultivo y cosecha de naranja ya que no se cuenta con estudios que muestren un panorama de la actividad a futuro. Ante esta problemática se propuso hacer un balance hídrico en las zonas de riego por goteo para optimizar el uso de agua disponible, mediante el manejo integrado del recurso hídrico. De esta manera, se estimó la cantidad de agua necesaria para riego por lote/proyecto/finca a partir del agua disponible en el campo tanto superficial como subterránea. Además, permitió conocer la situación actual del manejo del riego por goteo que optimizará la planificación de los tiempos de aplicación y cantidad de riego para que el agua disponible sea maximizada en el desarrollo de los cultivos.

Para este estudio hidrológico se propuso también la generación de curvas IDF donde se obtuvo como línea base, la actualización de este tipo de información y la obtención de períodos de retorno y caudales críticos. Esta información es importante para realizar estimaciones de índole hídrica, favoreciendo la planificación del proceso de riego analizando la oferta hídrica actual y la oferta hídrica a futuro de la unidad hidrográfica ante la conocida variabilidad climática.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Elaborar un estudio hidrológico de las subcuencas del Río Sábalo y Río Guachipelín en La Cruz, Guanacaste para mejorar la planificación del riego por goteo en cultivos de naranja en los lotes de finca Yafa, 7K, La Olla y Oros.

1.4.2 Objetivos específicos del proyecto

- Analizar las características hídricas y morfológicas de las subcuencas mediante un balance hídrico superficial y el uso de Sistemas de Información Geográfica, como aporte a la programación de la actividad agrícola de riego por goteo.
- Interpretar los valores de precipitación de las subcuencas del Río Sábalo y Río Guachipelín, mediante curvas de Intensidad Duración Frecuencia para comprender la distribución de precipitaciones y registrar su comportamiento en las zonas involucradas con la toma de agua superficial.
- Implementar acciones de mejora que funcionen como una guía para un aprovechamiento óptimo del agua en los proyectos de riego por goteo, que refuerce el conocimiento dirigido al personal de la empresa Del Oro.

1.5 Alcance y limitaciones

1.5.1 Alcances

- Generar información hidrológica primaria para el área implicada en el uso de agua superficial y subterránea para riego por goteo.
- Generar cartografía de las principales fases del ciclo hidrológico en las subcuencas de estudio.
- Dar a conocer la importancia de realizar balances hídricos y los resultados positivos que permite obtener un estudio como estos en el uso de tierra para cosecha de naranja y riego por goteo.
- Aportar en la optimización del uso de agua para riego por goteo mediante el análisis del comportamiento de las precipitaciones y el balance hídrico.

1.5.2 Limitaciones

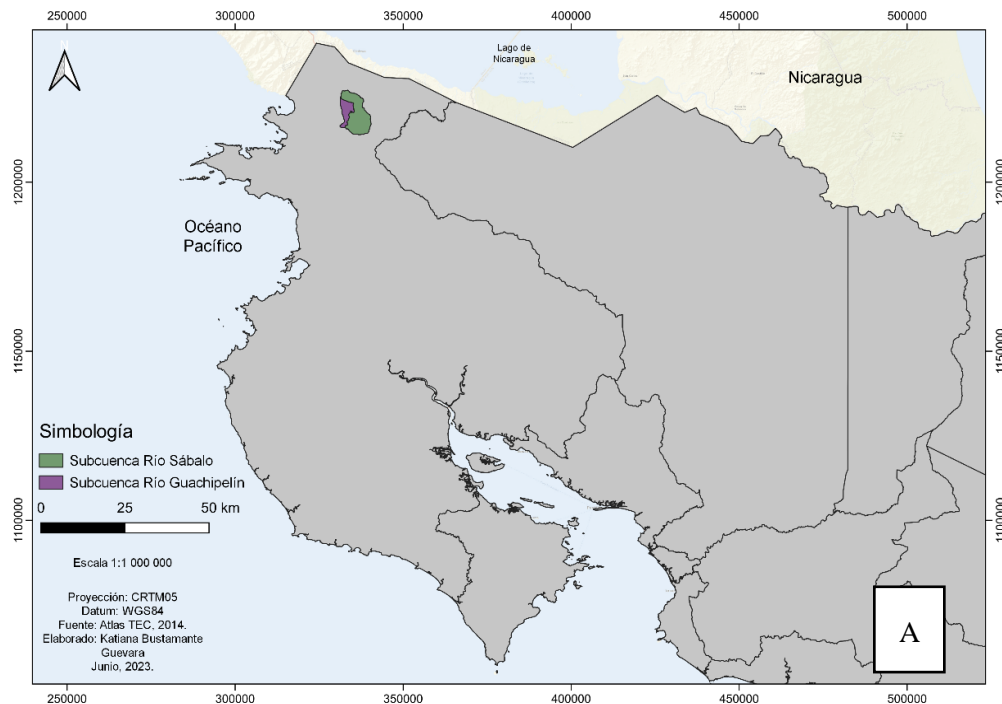
- Falta de estudios previos sobre la aplicación de balance hídricos para el riego por goteo en la siembra y cosecha de naranja valencia como tema de investigación.
- Es necesaria la información hidrometeorológica, la cual una parte debe ser suministrada por instituciones gubernamentales y esto a veces conlleva más tiempo, por lo cual retrasa el proceso del proyecto.
- La escasez de estaciones meteorológicas dentro del área de estudio y su corto registro histórico de datos.
- Los datos de temperatura de las estaciones meteorológicas disponibles se encuentran incompletas.

Capítulo 2. Antecedentes

En este capítulo se proporciona la descripción del área de estudio en cuanto a aspectos geográficos, demográficos, hidrográficos y antecedentes de la empresa Del Oro como objeto de estudio. Se realiza una sección sobre estudios previos ya existentes con relación al presente estudio y se citan conceptos necesarios para comprender la investigación.

2.1 Localización geográfica del área de estudio

El área de estudio se ubica geográficamente al norte de la cordillera central de Costa Rica, justo en las faldas del volcán Orosí en el cantón de La Cruz y distrito La Garita, en la provincia de Guanacaste. Comprende un área de influencia con respecto a cuatro fincas pertenecientes a la empresa Del Oro donde se sitúan cultivos de naranja (cultivo permanente) y se implementa el uso de agua para riego por goteo, las fincas denominadas Yafa, 7K, La Olla y Oros se encuentran dentro de la subcuenca del Río Sábalo y la subcuenca del Río Guachipelín, pertenecientes al distrito de La Garita, La Cruz, Guanacaste. El área de estudio delimitado abarca un área de 65.97 km² la subcuenca del Río Sábalo y pertenece a la cuenca denominada Cuenca del Río Sábalo el área de la subcuenca del Río Guachipelín 19.50 km² y pertenece a la cuenca del Río Sapoá, según Atlas del Tecnológico de Costa Rica (2014) (Figura 2.1).



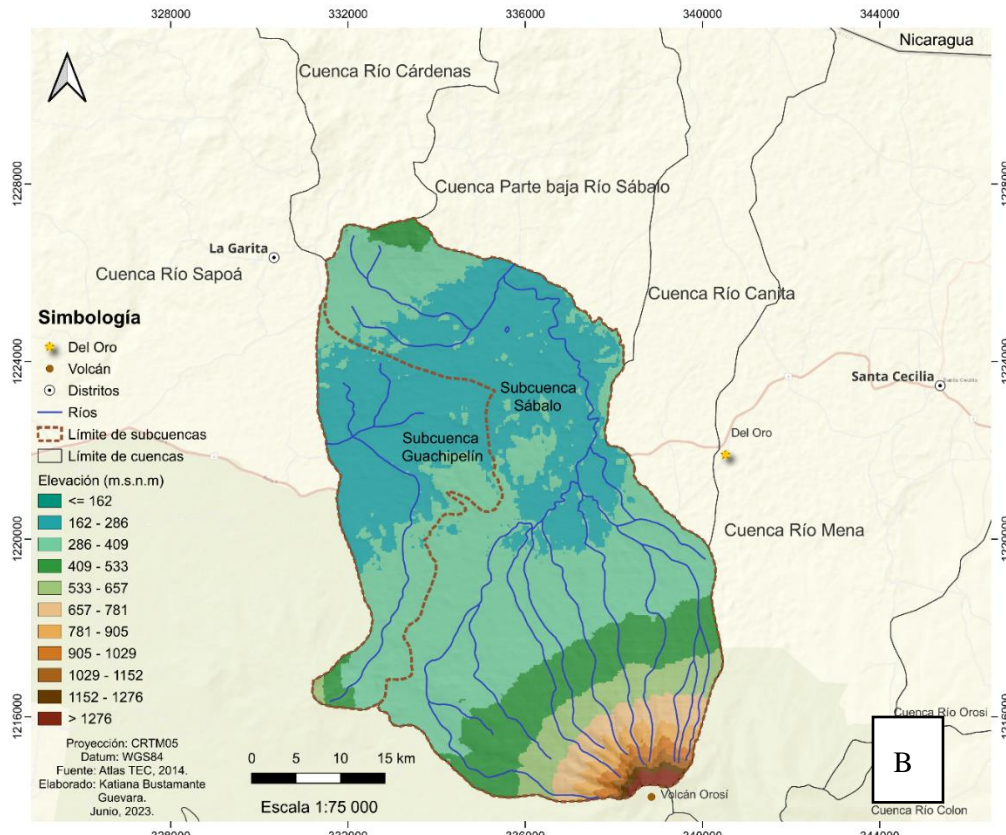


Figura 2.1 (A) Mapa de ubicación del área de estudio en Costa Rica y (B) de las subcuencas en estudio.
Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.2 Generalidades del área de estudio

En este apartado se describen características importantes que son de interés para comprender la situación actual del área de estudio.

La red hidrográfica de la subcuenca del río Sábalo y Guachipelín nacen en las faldas del volcán Orosí, el río principal de la parte alta y media de la subcuenca del río Sábalo tiene una longitud de 25.48 km y la longitud del río principal del río Guachipelín de la subcuenca bajo el mismo nombre es de 2.38 km hasta el punto de aforo respectivamente.

El río Sábalo recoge aguas de las quebradas seca, café, tribal, raíz y romero en la parte alta de la cuenca y recoge agua de quebrada Gloria en la parte media de la cuenca hasta el punto de aforo. El río Guachipelín nace de la parte alta de la cuenca y no presenta aportes de otros afluentes al río principal en estudio (Figura 2.2).

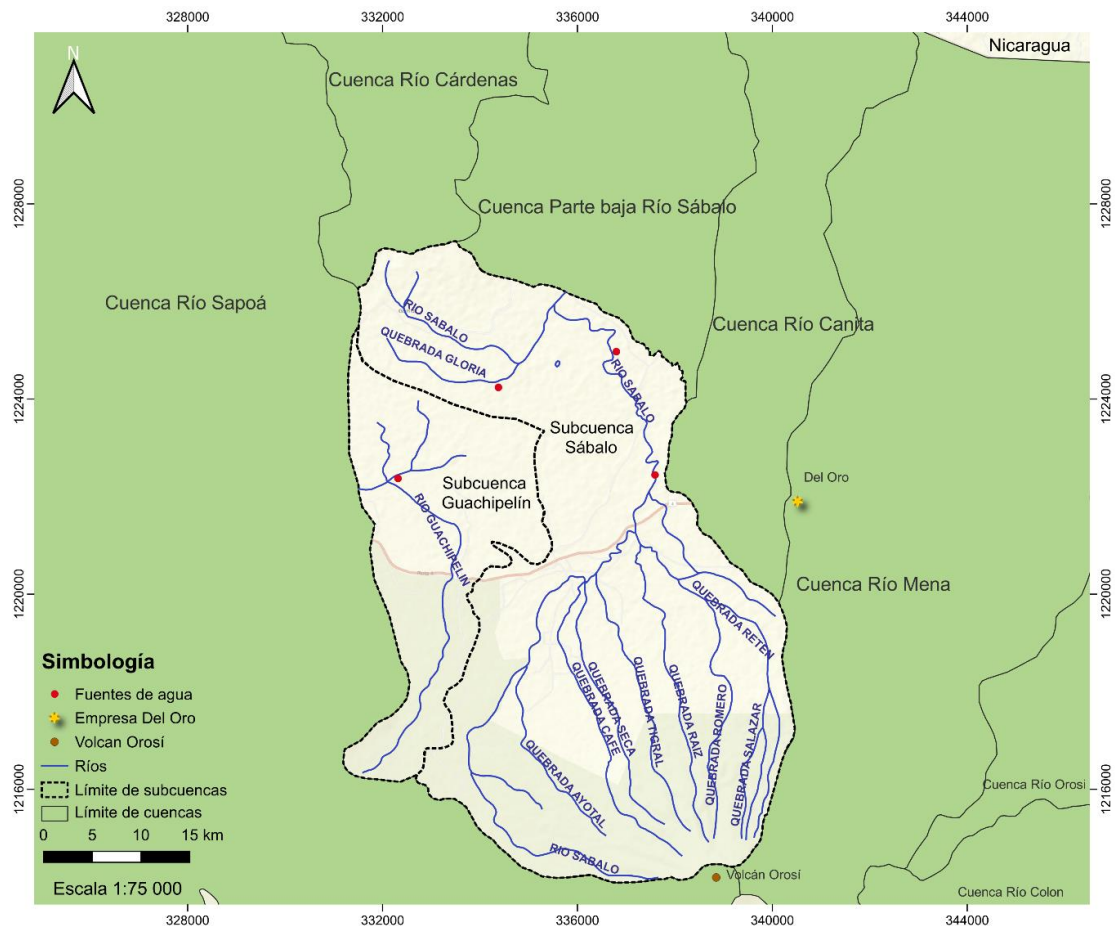


Figura 2.2 Mapa de hidrografía de las subcuencas en estudio.
Fuente: Elaboración propia, 2023.

El tipo de suelos de las subcuencas en estudio basado en el Atlas de Costa Rica (2014), es de los órdenes 50% andisoles, 21% entisoles, 26% inceptisoles y 1% ultisoles, caracterizados por ser suelos de textura Franco, Franco Arenoso, Franco Arcillo Arenoso, Arcillo Arenoso, Arcilloso y Franco Arcilloso. El uso actual del suelo en estudio corresponde a cultivos permanentes de árboles de naranja, pasto y se puede encontrar bosque natural protegido por el Área de Conservación Guanacaste (Anexos 1 y 2).

2.2.2 Situación del Recurso Hídrico

En Costa Rica, el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) ejerce la rectoría de gestión del recurso hídrico, que mediante la DA, se ejecutan acciones orientadas a gestionar y protegerlo, como: otorgar concesiones de aprovechamiento de agua y de fuerza hidráulica, permisos de vertidos, dictámenes de cuerpos de agua, permisos para realizar obras en cauce y descarga de aguas de drenaje agrícola (Dirección de Agua [DA], 2023). Se analiza la situación de demanda hídrica actual mediante información georreferenciada de acceso público de la página de la DA, correspondiente con las concesiones, los

dictámenes sobre cuerpos de agua y los vertidos a cuerpos de agua del dominio público; todo ello, con cobertura correspondiente al territorio nacional (Anexo 3).

2.2.3 Condiciones meteorológicas

Las subcuencas en estudio se localizan en la región Pacífico Norte, subregión. Dicha subregión presenta un tipo de clima lluvioso con influencia monzónica, el resumen sinóptico-climático de la Subregión Pacífico Norte 3 (PN3), por subregión indica una precipitación media anual de 2462 mm, temperatura máxima media anual de 25°C, temperatura media anual de 17°C y temperatura mínima media anual de 17°C, un promedio de días con lluvia de 173 días y una duración del período seco de 3 meses (Solano y Villalobos, 2000).

Así mismo, el Instituto Meteorológico Nacional señala que, la región climática del Pacífico Norte o Pacífico Seco se encuentra al noroeste del país, limitado por el Océano Pacífico y la Cordillera de Guanacaste tiene una temperatura promedio anual de 27°C y recibe anualmente 2000 mm de lluvia en promedio (Ramírez, n.d.).

2.3 Generalidades de la empresa

La empresa Del Oro está establecida en la zona fronteriza entre Nicaragua y Costa Rica, ubicada en La Cruz de Guanacaste, Costa Rica, en una extensa área de terreno plantadas de árboles de naranja, trayendo un gran crecimiento y muchas oportunidades económicas a esta región, convirtiéndose en la principal fuente de empleo de la zona (Piñeiro, 2021). Para contextualizar acerca de la empresa del Oro se toma como referencia el estudio realizado por Piñeiro; (2021), el cual relata que, la empresa tiene como nombre Del Oro S.A. que, es la compañía que dirige es la que se encarga del procesamiento de las materias primas, con lo cual es la que coordina las labores de la planta de producción. Y dentro de esta empresa existen otras compañías que forman parte del proceso agrícola, llamadas Inversiones Guanaraja S.A. (IGSA) y Personna de Costa Rica.

La empresa Del Oro S.A se ubica geográficamente al norte de la cordillera volcánica de Costa Rica, justo en las faldas del volcán Orosí en el cantón de La Cruz y distrito La Garita, en la provincia de Guanacaste. La producción agrícola de la empresa se divide en fincas nombradas Finca Yafa, finca La Olla, finca Yafa y finca Oros destinadas para el cultivo de naranja (cultivo permanente) y donde eventualmente se implementa la actividad de riego por goteo de las cuales se toman como sujeto de estudio para este proyecto (Figura 2.3).

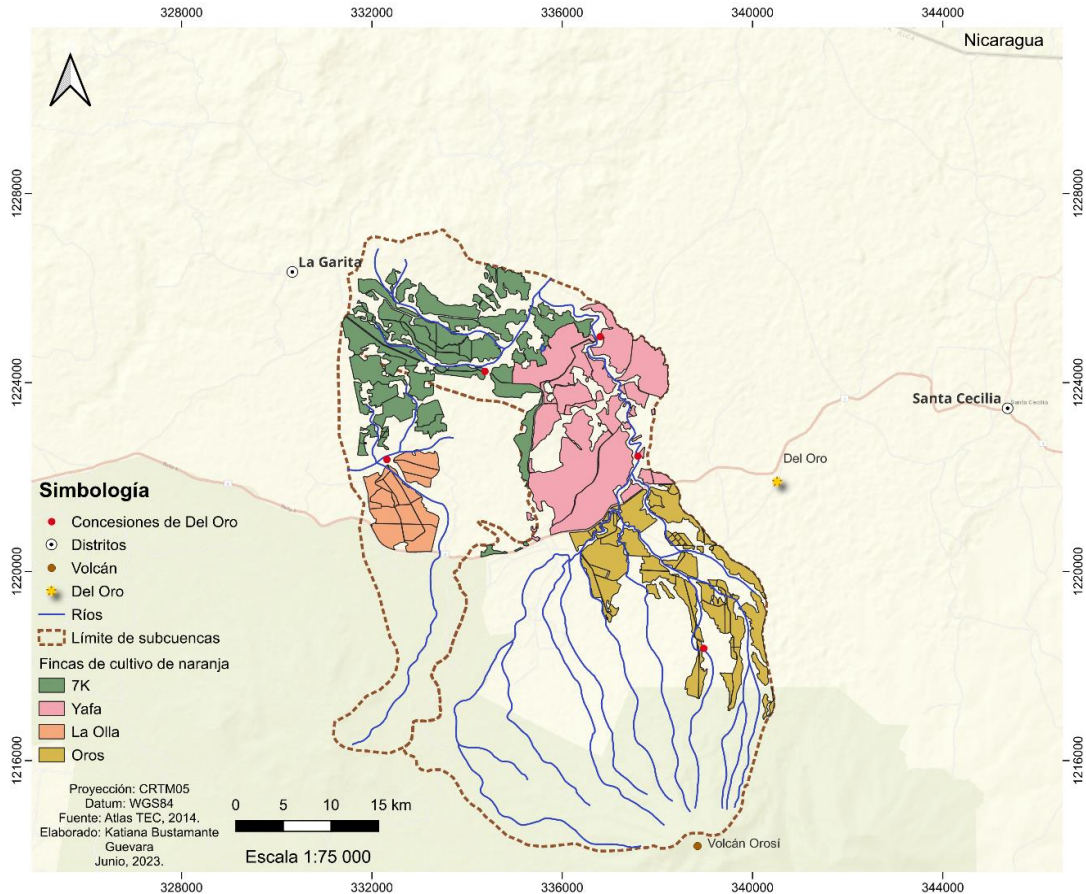


Figura 2.3 Localización de las fincas/lotes de cultivo de naranjas de la empresa Del Oro y fuentes de agua para uso en riego por goteo.

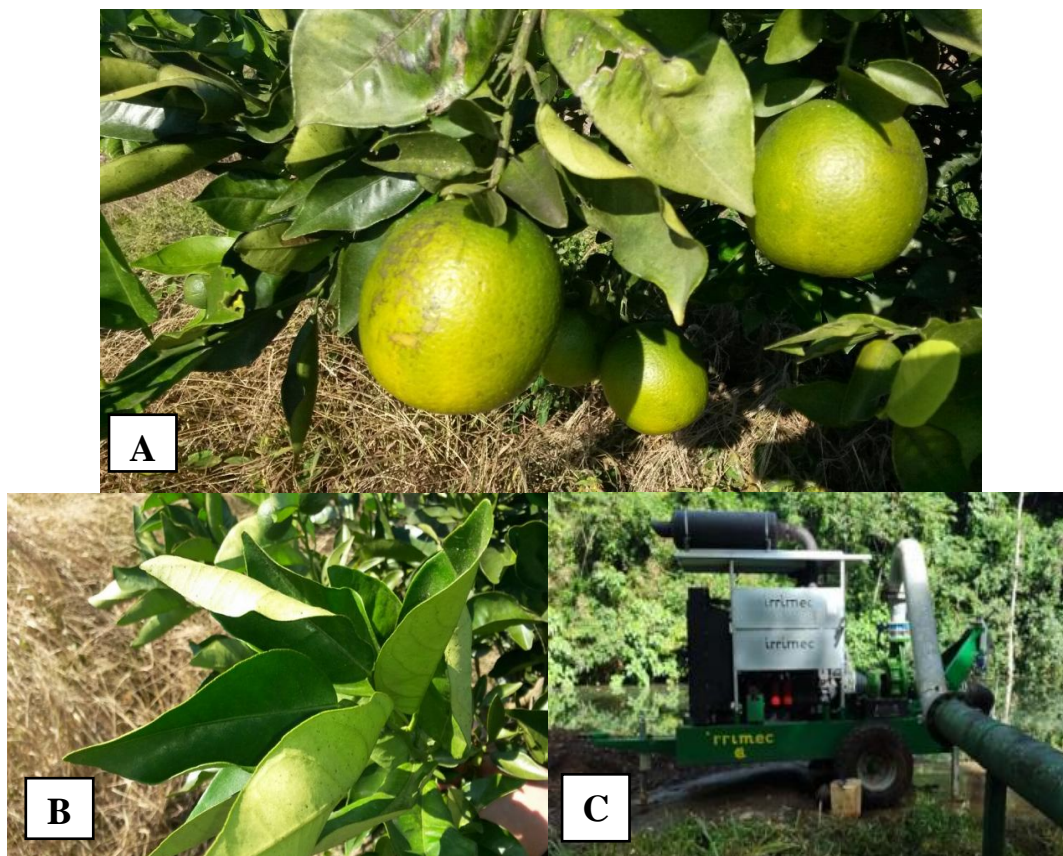
Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.3.1 Proyecto de riego por goteo de la empresa Del Oro

El cambio climático afecta a la producción agrícola del cultivo de naranja (cultivo permanente), no solo de la empresa Del Oro y, en general, ya que está exacerbando la mayoría de estos factores de estrés del cultivo, haciéndolos más extremos y frecuentes. Uno de los factores abióticos más afectados es la distribución e intensidad de la lluvia. Los cultivos de campo están expuestos a estos cambios ambientales, donde la mayoría de las prácticas de manejo se establecen según los patrones de lluvia. El riego por goteo para eventos de sequía se aplica para mejorar la cosecha de naranja en la empresa.

Estas zonas de riego por goteo se han implementado por las condiciones climáticas donde se encuentran las fincas de cultivo de naranja. Tal y como nos dice Castillo, *et. al.* (2019), la fenología del cultivo de naranja está estrictamente relacionado con el requerimiento de agua de la planta.

Para cumplir con las necesidades hídricas del cultivo, fue necesario contar con un sistema de riego por lo cual se implementó el riego por goteo en estas fincas (Figura 2.4).



Nota: (A) Fruto (B) Follaje (C) Riego por goteo.

Figura 2.4 Cultivo de naranja en finca Yafa con actividad de riego por goteo.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.4 Estudios de referencia

Entre los estudios que fueron de relevancia para este proyecto se citan los siguientes:

- Determinación del potencial hídrico con fines de agua potable y riego de la cuenca del río Pachacayo (Llallico, 2020). El cual contempla pasos metodológicos de identificación y clasificación de una cuenca.
- Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar (Centro de Investigación de la caña de azúcar de Colombia, 2004). Este estudio tomo de referencia el procedimiento metodológico para balances hídricos y sus parámetros involucrados.
- Elaboración de Balances Hídricos por Cuencas Hidrográficas y Propuesta de Modernización de las Redes de Medición en Costa Rica (MINAE, 2008). Este documento proporciono información teórica de los balances hídricos permitiendo una mejor comprensión del proceso.
- Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Allen, *et al*, 2006). Documento importante para comprender la determinación del requerimiento de agua de cultivos y su aplicación.

- Curvas de Intensidad Duración Frecuencia de algunas estaciones meteorológicas automáticas. Departamento de climatología e investigaciones aplicadas MINAET-IMN (Rojas, 2011). Este documento contempla a detalle las fórmulas empleadas para la generación de curvas IDF.
- Modelación hidrológica de la subcuenca del río Balsar en el distrito de Ciudad Cortés (Ortiz, 2021). Documento de gran relevancia que permitió mejor comprensión de la generación de curvas IDF.
- Generación de curvas de Intensidad Duración Frecuencia del período de 1999-2019, para la zona de influencia del proyecto de abastecimiento de agua para la cuenca media del río Tempisque y comunidades costeras (PAACUME) (Baltodano, 2020). Documento de gran relevancia que permitió mejor comprensión de la generación de curvas IDF.

2.5 Conclusión

El capítulo contextualizó la relevancia para la zona de estudio donde se conocieron las condiciones de la empresa y generar una idea del entorno de la zona. En este capítulo se desarrolló la descripción de la zona, mediante características geográficas, demográficas, así como la situación hidrográfica de la zona en estudio.

Capítulo 3. Marco teórico

En esta sección se presentan definiciones de palabras claves conceptos hidrológicos relacionados con los parámetros morfométricos de la cuenca, conceptos de interés como riego por goteo. Estos son factores que influyen en un balance hídrico agrícola, características del cultivo e información del software para el procesamiento de datos que son importantes para la comprensión e integración del propósito de este proyecto.

3.1 Hidrología

La hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos (Aparicio, 1992). A través del estudio en la hidrología se proveen elementos para desarrollar estrategias para el uso racional y protección de los recursos hídricos, de los sistemas hidrológicos y de las condiciones ambientales asociadas (Meléndez, 2021).

3.1.1 Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido.

La delimitación de una cuenca se hace sobre un plano o mapa a curvas de nivel, siguiendo las líneas del *divortium acuarum* (parteaguas), la cual es una línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación, que, en cada sistema de corriente, fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parteaguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida, llamado estación de aforo (Villón, 2004) (Figura 3.1).

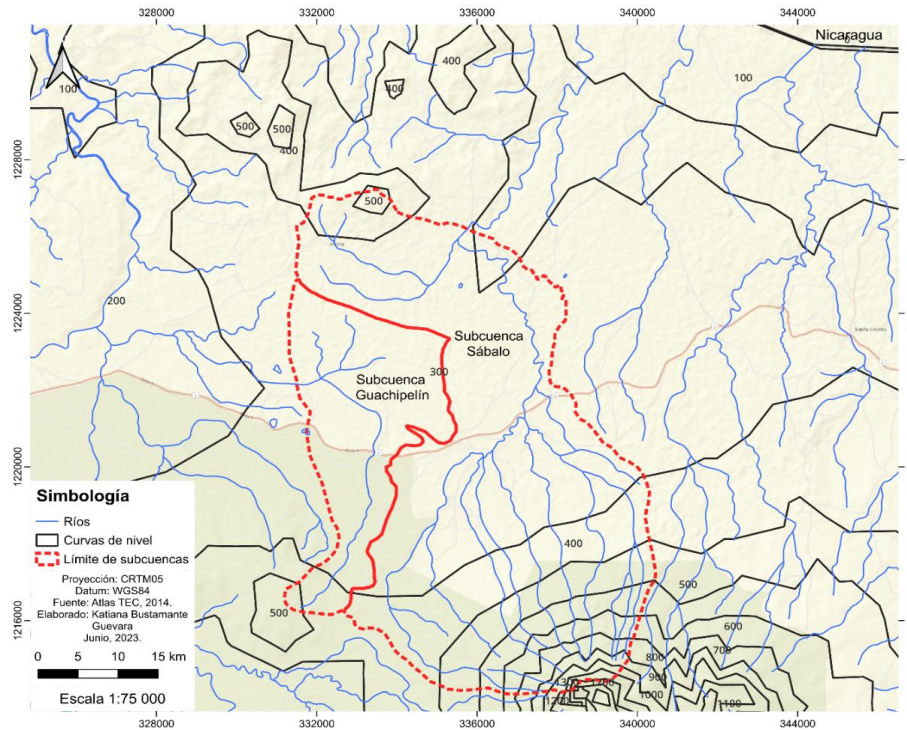


Figura 3.1 Delimitación de una cuenca.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

- **Características físicas de la cuenca hidrográfica**

Perímetro: es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre la divisoria de aguas medido en unidades de longitud y se expresa en metros o kilómetros (Cardona, 2012). Este dato normalmente se expresa en metros o kilómetros

Área: está definida como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido-directa o indirectamente a un mismo cauce natural. Corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio; este parámetro se expresa normalmente en km^2 (Cardona, 2012). Este parámetro se expresa normalmente en km^2 .

Longitud de la cuenca: es la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca (punto de desfogue) hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca (Cardona, 2012). Este parámetro se expresa normalmente en metros o kilómetros.

Elevación media: es la variación altitudinal de la cuenca hidrográfica que incide directamente sobre el clima y, por tanto, sobre el régimen hidrológico, además de brindar una base para caracterizar zonas climáticas y ecológicas diferentes dentro de una misma cuenca. Una forma conveniente y objetiva de describir la relación entre la propiedad altimétrica de la cuenca en un plano y su elevación, es a través de la función hipsométrica (Ministerio de Ambiente, 2018).

Curva hipsométrica: es la representación gráfica de la variación de la elevación de una cuenca, en la cual puede observarse la distribución de las zonas altas, medias y bajas. En términos simples, la curva hipsométrica indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada (Ministerio de Ambiente, 2018).

Pendiente media: es la variación de la inclinación de una cuenca; importante para definir el comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de las capas del suelo (erosión o sedimentación), puesto que, en zonas de alta pendientes, se presentan con mayor frecuencia los problemas de erosión mientras que en regiones planas aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación. La pendiente influye en el comportamiento de la cuenca afectando directamente el escurrimiento de las aguas lluvias; esto es, en magnitud y en el tiempo de formación de una creciente en el cauce principal (Ministerio de Ambiente, 2018) (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Clasificación de las cuencas según la pendiente.

Pendiente media (%)	Tipo de relieve
0-3	Plano
3-7	Suave
7-12	Medianamente accidentado
12-20	Accidentado
20-35	Fuertemente accidentado
35-50	Muy fuertemente accidentado
50-75	Escarpado
>75	Muy escarpado

Fuente: Ministerio de Ambiente, 2018.

- **Características que influyen en la forma de la cuenca**

Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (Kc): se define como la razón entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia de área equivalente a la superficie de la cuenca correspondiente. Este coeficiente adimensional, tiene por definición un valor de uno para cuencas imaginarias de forma exactamente circular, nunca los valores serán inferiores a uno. El grado de aproximación de este índice a uno, indicará la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuanto más cercano a uno sea, es decir mayor concentración de agua (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Formas de la cuenca según el coeficiente de compacidad.

Clase	Rango	Descripción
Kc1	1 a 1.25	Forma casi oval – redonda
Kc2	1.25 a 1.5	Forma oval – oblonga
Kc3	> 1.5	Forma oval – oblonga a rectangular - oblonga

Fuente: Ministerio de Ambiente, 2018.

Factor de forma (Kf): es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca, este parámetro explica la elongación de una cuenca. Si la forma de la cuenca es aproximadamente circular,

entonces el valor de Kf se acercará a uno. Mientras que, las cuencas más alargadas, tendrán un Kf menor. Una cuenca con un factor de forma bajo está menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma. Un valor de Kf superior a la unidad proporciona el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas (Cardona, 2012) (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Rangos aproximados del factor de forma.

Factor de forma (valores aproximados)	Forma de la cuenca
< 0.22	Muy alargada
0.22 a 0.30	Alargada
0.30 a 0.37	Ligeramente alargada
0.37 a 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 a 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 a 0.80	Ensanchada
0.80 a 1.20	Muy ensanchada
> 1.20	Rodeando el desagüe

Fuente: Pérez, 1979.

- **Sistema de drenaje**

El sistema de drenaje de una cuenca está constituido por un cauce principal y sus cauces tributarios. Las cuencas hidrográficas se clasifican según su sistema de drenaje en arréicas, criptorréicas, endorreicas, y exorreicas (Vision, 2014).

Cauce principal: es el cauce medido desde el punto de concentración o nacimiento en la parte alta de la cuenca hasta su desembocadura o punto de salida de la cuenca (Ministerio Ambiente, 2018). El cauce principal es el río que posee la mayor longitud y/o conduce el mayor caudal tanto en el tramo superior, medio e inferior.

Orden de las corrientes: el orden de las corrientes es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca. Se consideran corrientes de primer orden, aquellas corrientes fuertes, portadoras de aguas de nacimientos y que no tienen afluentes. Cuando dos corrientes de orden uno se unen, resulta una corriente de orden dos. De manera general, cuando dos corrientes de orden i se unen, resulta una corriente de orden $i+1$. Cuando una corriente se une con otra de orden mayor, resulta una corriente que conserva el mayor orden (Cardona, 2012).

Longitud de drenaje: es la suma de la distancia total recorrida por los diferentes cursos de agua que forman parte de la red hidrográfica de la cuenca. La distancia recorrida por un curso de agua se mide desde su origen hasta su desembocadura en el cuerpo receptor (Ordóñez, 2011).

Densidad de drenaje: refleja la dinámica de la cuenca, la estabilidad de la red hidrográfica y el tipo de escorrentía de superficie, así como de la respuesta de la cuenca a una precipitación. Se define como la relación entre la longitud total de los cursos de agua y su área total (Ordóñez, 2011).

Tiempo de concentración: el tiempo de concentración consiste en la duración necesaria para que una gota de agua que cae en el punto más alejado de la cuenca llegue al punto de salida o desembocadura (Córdova, 2016). La fórmula recomendada para calcular el tiempo de concentración es la de Kirpich.

3.1.2 Factores climáticos y análisis estadísticos

Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua (Aparicio, 1992). Los factores climáticos más importantes en el régimen hidrológico de una región son la precipitación, la evaporación, la temperatura, la humedad del aire y los vientos; estos últimos tres en la medida en que ejercen influencia sobre la precipitación y la evaporación (Monsalve, 1999). Para mejores resultados es necesario conocer la manera en que se mide la precipitación y revisar diversos criterios para el análisis, síntesis, corrección y tratamiento de datos de precipitación (Aparicio, 1992).

- **Medición de la precipitación**

Pluviómetro: está formado por un recipiente cilíndrico graduado de área transversal que capta el agua de lluvia. En la empresa Del Oro se suele leer diariamente a las 8 de la mañana.

Estación meteorológica: instalación que mide y/o registra diferentes fenómenos y elementos meteorológicos. En esta se encuentran todos los instrumentos necesarios, convenientemente distribuidos (IDEAM, 2019).

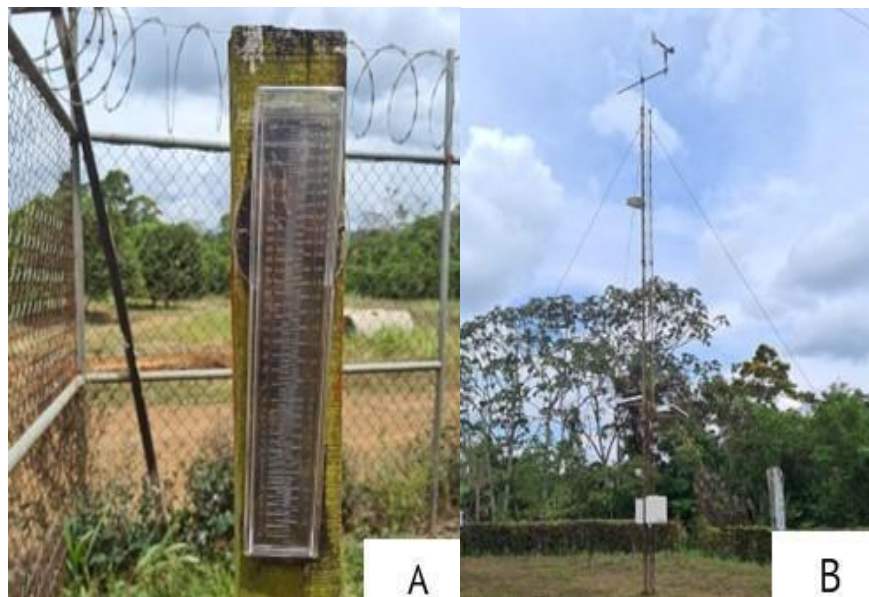


Figura 3.2 Pluviómetro (A), estación meteorológica (B) en fincas de Del Oro.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

- **Completación de información pluviométrica**

Son los datos de los aportes fundamentales para los estudios hidrológicos, basados en su tratamiento e interpretación. Es frecuente que en los registros se presente un faltante en los datos, como los datos de precipitaciones, en los que esto puede surgir por fallas en la estación meteorológica o porque el operador no tomó los datos ese día (Aparicio, 1992).

Método de promedios: se lleva a cabo la completación de datos mensuales faltantes tomando en cuenta criterios hidrológicos, según Aliaga, (1983, p.89) los cuales son:

- I. Tipificar el comportamiento hidrológico de los años en que faltasen los datos; húmedo normal o seco.
- II. Tener en cuenta el período de ubicación del dato faltante, si la información no es anual.
- III. Completar con el promedio de los años o meses tipificados: Ejemplo si el año faltante es seco, entonces determinar el promedio de todos los años secos con información, y este servirá para completar; lo mismo se procederá en los demás casos.
- IV. En otros casos es recomendable completar con el promedio del año posterior y anterior al dato o también del mes anterior y posterior al faltante, si la información es anual o mensual, respectivamente.
- V. Si la información es mensual, determinar el promedio de los años típicos y completar con éste.
- VI. Estos criterios pueden ser válidos sólo en el caso de completación de algunos datos faltantes, no así en el caso extendido de periodos más largos.

- **Validación de datos**

Método de regresión lineal simple: para aplicar este método es necesario seleccionar una serie de datos que tengan un comportamiento similar, esto es, dentro de la misma área de influencia topo climática (referencia), a la serie que tiene los datos faltantes (estudio). La serie de datos de la referencia debe contener el registro de datos completos en los períodos para los cuales faltan datos en la serie de estudio. Los valores de la serie de referencia se denotan como X_i , y los de la serie de estudio, cuyos datos no están completos, se denotan como Y_i . Para caracterizar los registros de las series, se toman aquellos períodos en los cuales los datos en ambas series están presentes, obteniéndose la media y desviación estándar para cada serie (Villón, 2006).

- **Cálculo de precipitación media**

Partiendo de los datos de estaciones pluviométricas, es posible realizar los cálculos de la precipitación media en una cuenca hidrográfica. La precipitación media se puede calcular mediante los métodos de polígono de Thiessen, las Isoyetas y el aritmético, los más usados en hidrología.

Polígono de Thiessen: el método consiste en colocar en el mapa de la cuenca las estaciones pluviométricas, luego se forman triángulos con las estaciones más próximas y luego se trazan las mediatrices perpendiculares a cada uno de los lados de los triángulos formados, definiéndose unos polígonos alrededor de cada estación pluviométrica (Bernabé, *et al.* 2010). Dentro de lo posible las estaciones deben estar distribuidas uniformemente dentro de la cuenca hidrográfica.

Isoyetas: esta consta de la creación de líneas o isovalores, en las que se establece la altura de la lluvia en el área de pertinencia. Posteriormente se calcula el área entre cada dos isoyetas para así lograr el cálculo de la precipitación media de la cuenca (Bateman, 2007).

Promedio Aritmético: consiste en obtener el promedio aritmético, de las alturas de precipitaciones registradas, de las estaciones localizadas dentro de la zona o cuenca, Es el método más sencillo, pero sólo da buenos resultados cuando el número de pluviómetros es grande (Villón, 2004).

- **Análisis de consistencia**

Un análisis de consistencia de la información disponible mediante criterios físicos y métodos estadísticos permite identificar, evaluar y eliminar los posibles errores sistemáticos. En este análisis se lleva a cabo un proceso de identificación o detección, descripción y remoción de la no homogeneidad e inconsistencia de una serie de tiempo hidrológico (Villón, 2006). Por lo tanto, tal y como nos dice Villón, (2006, p.312) “Se lleva a cabo el análisis de consistencia utilizando los análisis estadísticos”.

3.2 Balance Hídrico

El balance hídrico se basa, en la ecuación de la continuidad, separando las variables en dos grupos, los aportes a la cuenca se clasifican como oferta potencial, mientras que la demanda corresponde a los volúmenes extraídos en la cuenca (Godínez, 2018). El balance hídrico es similar a una contabilidad del agua en el suelo, donde se comparan las ganancias y las pérdidas de humedad. El suelo aumenta su contenido de humedad cuando ocurre un evento de precipitación (P) o cuando se le aplica agua artificialmente por medio del riego (R). Las pérdidas de humedad del suelo se deben al agua que transpira la planta, la cual se pierde por evaporación desde la superficie del suelo (Torres, 1996).

La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo se define como necesidades de agua del cultivo. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración. La necesidad de riego básicamente representa la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación (Allen *et al*, 1998).

El balance hídrico se calculó mediante el método de Thornthwaite y Mather modificado. Esta metodología presenta dos ventajas: 1) Los datos necesarios para realizar los cálculos, precipitación y temperatura, son de obtención relativamente sencilla. 2) Utiliza valores exclusivamente climáticos con el objeto de expresar el valor relativo de la precipitación (Thornthwaite, 1957) (Figura 3.3).

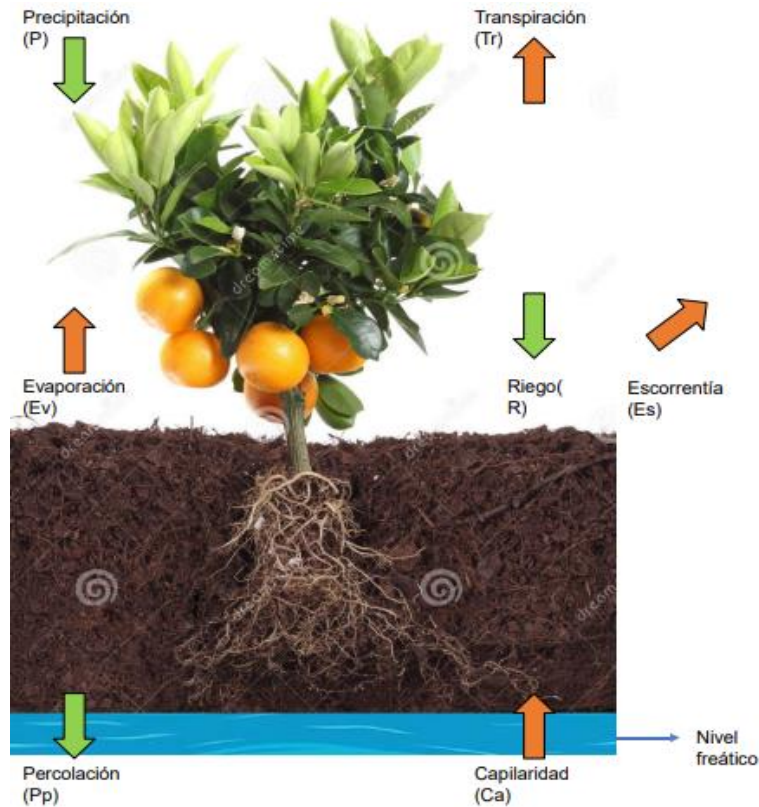


Figura 3.3 Representación esquemática de los componentes del balance hídrico adaptado para el cultivo de la planta Naranja Valencia.

Fuente: Elaboración propia modificado a partir de Torres, 1996.

- **Factores que influyen en un balance hídrico superficial agrícola**

El cambio de la humedad en el suelo está determinado por el comportamiento de la precipitación, la aplicación del riego, en algunos casos por el aporte capilar (componentes de entrada al sistema o ganancias); evaporación, transpiración, percolación y escorrentía (componentes de salida del sistema o pérdidas). En la aplicación del agua para riego no debe de existir percolación y escorrentía, en estas condiciones el modelo del balance hídrico se simplifica para la aplicación en dos situaciones: Con aporte capilar y sin aporte capilar (Torres, 1996).

Precipitación (P): la precipitación es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre (Sánchez, n.d.).

Evapotranspiración (Et): es el consumo diario de agua de una planta y corresponde al proceso combinado del agua perdida por evaporación directa desde la superficie del suelo y la absorbida por las raíces de la planta, que posteriormente se pierde casi en su totalidad por la transpiración a través de la superficie de las hojas. La evapotranspiración es afectada por factores del suelo, planta y clima.

Evapotranspiración por el método Thornthwaite: este considera la precipitación como entrada de agua al sistema y la evapotranspiración y la escorrentía como salidas; así, el diferencial entre la precipitación y la evapotranspiración resulta ser la disponibilidad hídrica, equiparada con el escurrimiento natural superficial y subsuperficial de la cuenca. El modelo también considera los cambios en la humedad del suelo a través del tiempo en función de la evapotranspiración (Martín, *et al.* 2015).

Evapotranspiración del cultivo (ETC): para determinar la evapotranspiración del cultivo (ETC) se multiplica la evapotranspiración potencial por el coeficiente de cultivo (Allen, *et al.* 2006). La ETC obtenida representa el límite máximo de ET del cultivo cuando no existen obstáculos al crecimiento de este debido a limitaciones de agua (Comisión Nacional de Riego [CNR], 2016).

Coeficiente de cultivo (Kc): el objetivo del uso del Kc es la determinación de la ETC que se basa en la información meteorológica medida a nivel local, es decir, en el área cercana y representativa de la zona de cultivo. La ETC obtenida representa el límite máximo de evapotranspiración del cultivo cuando no existen obstáculos al crecimiento de este debido a limitaciones de agua (CNR, 2016).

Capacidad de campo (CC): se refiere al contenido de humedad que retiene el suelo bien drenado entre uno o dos días después del riego. Durante el proceso de humedecimiento del suelo, teniendo como fuente de agua la precipitación o el riego, ocurre un desplazamiento de aire y el suelo, humedeciéndolo a medida que los poros se llenan de agua. Cuando todos los poros del suelo están llenos de agua se dice que el suelo está “saturado” y las fuerzas de retención son nulas. Después de un riego o lluvia viene el proceso de redistribución, obligando la salida de agua de los macroporos; en ese momento se tiene un valor de humedad conocido como capacidad de campo (CC). El valor de la capacidad de campo es considerado como el límite superior de la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo (Torres, 1996).

3.3 Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia

La curva Intensidad – Duración – Frecuencia (Curvas IDF) es una curva formada por la combinación de puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, todos los cuales corresponden a la misma frecuencia o período de retorno (Plúa, 2021). Las curvas IDF representan las características relevantes de las tormentas que ocurren en la zona (Aparicio, 1997).

- **Información representada en las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia**

Intensidad: la intensidad se define como la cantidad de lluvia que cae en un punto, por unidad de tiempo y está inversamente proporcional a la duración de la tormenta. La intensidad es la tasa temporal de la precipitación, es decir, la cantidad de agua que precipitó medida en milímetros por unidad de tiempo, esta intensidad puede ser instantánea o promedio, sobre la duración de la lluvia (Plúa, 2021).

Duración: la duración de una tormenta se refiere al tiempo transcurrido desde el inicio de la lluvia hasta el final. La duración de la lluvia diseñada se considera igual al tiempo de concentración del área de estudio, ya que al final de este tiempo, la escorrentía alcanza su valor máximo porque toda el área contribuye a promover el flujo de salida (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2015)

Frecuencia: El número de años cuya intensidad promedio es igual o menor que este evento se denomina periodo de retorno, y el intervalo de repetición o frecuencia para abreviar. al diseñar ingeniería hidráulica para apoyar carreteras, el periodo de retorno es un parámetro importante (INAMHI, 2015)

3.4 Cultivo de naranja Valencia y recurso hídrico

El cultivo de naranja se cataloga como agricultura permanente el cual se caracterizan por el hecho de que no están incluidos en rotaciones de cultivo. Una vez plantados, permanecen en el terreno al menos cinco años durante los que van proporcionando rendimientos (Fundación Global Nature, n.d.).

El estrés hídrico seguido de la rehidratación de los árboles induce la floración de los árboles cítricos en el trópico, pero el estrés no controlado puede superar los umbrales que causan la defoliación y la muerte de los árboles. Es por ello la importancia de evaluar las relaciones hídricas, la pérdida de follaje, la fotosíntesis (AN) y la fenología de los árboles para mejorar el rendimiento y la calidad de los frutos de árboles, en este caso de la empresa Del Oro en estudio, la naranja “Valencia” (Castillo, *et al.* 2019).

El cultivo de plantas cítricas donde no se obtenga un abasto adecuado de agua, ya sea por lluvia o irrigación. Cuando solo se obtiene cantidad escasa de agua, los árboles no hacen su crecimiento normal, las hojas se enroscan y sueltan, la fruta nueva se cae, y la que llega a su madurez es deficiente de jugo e inferior calidad (Harold, 1929).

3.4.1 Generalidad de la planta naranja Valencia

Este grupo de fruta cítrica conocido como naranja dulce o naranja Valencia es una variedad de la especie *Citrus sinensis*, llamada así por Osbeck. Esta fruta es de forma redondeada o algo ovalada; de tamaño mediano a grande, color naranja fuerte, de abundante jugo, coloreado; la acidez y el dulzor bien mezclados; la pulpa derretida de sabor rico, vivo, vinoso y categorizada de calidad excelente (Harold, 1929).

3.4.2 Riego por goteo

Para cumplir con las necesidades hídricas del cultivo, es necesario contar con al menos un sistema de riego, como lo es en el presente estudio el riego por goteo que, consiste en utilizar tuberías de polietileno con goteros para transportar agua y fertilizantes, tiene como ventajas la reducción de aparición de malezas y enfermedades, el mantener la humedad del suelo de forma continua y con caudales menores a los sistemas

de riego antes mencionados, aumentando la eficiencia en el riego. Sus desventajas son la obstrucción de los goteros en caso de no filtrar bien el agua, así como el alto costo de inversión inicial (Rodríguez, 2022).

Son sistemas que aplican un riego no mayor a 16 L/h por gotero o metro lineal de manguera de goteo, humedeciendo únicamente el área deseada y optimizando el agua disponible. A estos sistemas también se les denomina de alta frecuencia, permitiendo regar desde una a dos veces por día, dependiendo del tipo de suelo y las necesidades del cultivo. La posibilidad de efectuar riegos de forma frecuente permite reducir el peligro de estrés hídrico en la planta, ya que es posible mantener la humedad del suelo a niveles óptimos durante todo el periodo de cultivo, mejorando las condiciones para su desarrollo (Rodríguez, 2022).

Planificación del riego: se requiere del riego cuando la cantidad de lluvia sea insuficiente para compensar las pérdidas de agua por evapotranspiración. El objetivo principal del riego es la aplicación del agua en el momento preciso y con la cantidad precisa de agua (Allen, *et al.* 2006).

3.6 Estrategia de acciones de mejora para la optimización de riego por goteo

Para cumplir con el tercer objetivo del proyecto se proponen acciones de mejora mediante la presentación de los principales hallazgos obtenidos de los resultados de esta investigación dirigido al personal de Del Oro involucrado en la toma de decisiones de la programación de riego por goteo. Se plantea además la entrega de un plan estratégico de acciones de mejora como propuesta de guía para la implementación a proyectos de riego por goteo.

- **Plan de acciones de mejoras**

La mejora se produce cuando dicha organización aprende de sí misma, y de otras, es decir, cuando planifica su futuro teniendo en cuenta el entorno cambiante que la envuelve y el conjunto de fortalezas y debilidades que la determinan. El plan para la implementación de mejoras integra la decisión estratégica sobre cuáles son los cambios que deben incorporarse a los diferentes procesos de la organización, para que sean traducidos en la percepción de un mejor servicio. El plan, además de servir de base para detectar aspectos a mejorar, debe permitir el control y seguimiento de las acciones a desarrollar, y la incorporación de acciones correctoras ante posibles contingencias no previstas (Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación, 2021).

3.7 Conclusión

Como conclusión se determina que conocer los términos, parámetros y ecuaciones anteriores es fundamental para poder comprender el comportamiento hidrológico de una cuenca que sirve como información base para la toma de decisiones en el uso del recurso hídrico. Es información importante que la empresa Del Oro puede utilizar en futuras decisiones de planificación.

Capítulo 4. Estudios de Prefactibilidad

En este capítulo se evalúa la viabilidad del proyecto con base a la metodología de Sapag *et al.* (2014) en la que se proponen nueve estudios para la evaluación de proyectos. Estos son: comercial, técnico, organizacional, legal, ambiental, financiera, vial, ética y social, pero, para efectos del presente proyecto únicamente se van a considerar los siguientes: técnico, financiero, organizacional, legal y ambiental. Esta elección de estudios se basó en la naturaleza del proyecto y en los objetivos planteados, con base a la actividad de riego por goteo a cultivos de naranja que se realiza actualmente en la empresa Del Oro y que cumple con todos los permisos necesarios para llevarse a cabo.

4.1 Estudio de prefactibilidad técnica

La importancia de realizar un estudio técnico previo a la ejecución del proyecto radica en que este determina los equipos requeridos, lo que permite cuantificar los costos de inversión y operación (Sapag *et al.* 2014). Para aplicar este estudio técnico al proyecto se divide en dos requerimientos, que permitirán hacer una dimensión de las necesidades para la ejecución del estudio. Estos requerimientos son equipos y herramienta de procesamiento de datos e insumos necesarios para el desarrollo del proyecto.

- **Datos, equipos y herramientas de procesamiento de datos**

Para poder llevar a cabo el presente proyecto se requiere la utilización de datos, equipos y herramientas especializadas en procesamientos de datos, dentro de estas tenemos:

Datos: los datos que serán procesados corresponden a datos meteorológicos, imágenes satelitales y archivos SHP, los cuales son de interés del proyecto. Los datos meteorológicos serán brindados por estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y pluviómetros y estaciones meteorológicas pertenecientes a la empresa Del Oro, estos datos son de carácter público y se debe realizar la debida solicitud para la utilización de estos y no poseen ningún costo. Las que las imágenes satelitales se encuentran en internet son de carácter público, mientras que algunos archivos shapes son adquiridos en internet y otros brindados por la empresa Del Oro, estos últimos tampoco poseen ningún costo.

Equipos: Para desarrollar el procesamiento de datos se debe contar con una computadora, la cual brindó la empresa Del Oro. Para georreferenciar puntos de interés se utilizó el teléfono celular personal el cual se considera como un equipo asumido por el desarrollador del proyecto.

Herramientas especializadas en procesamiento de datos: para realizar el procesamiento de datos necesarios para llevar a cabo los objetivos del proyecto, se utilizaron las siguientes herramientas:

- a) Aplicación móvil GeoPosicion: es una aplicación móvil de uso libre, que se utilizó para obtener las coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas y pluviómetros de la empresa por medio de la ubicación en tiempo real y posicionamiento personal con el teléfono celular.
- b) Programas Microsoft Office: se utilizaron los programas computacionales Microsoft Word para redactar el trabajo escrito del proyecto, Excel para funciones estadísticas y aritméticas avanzadas para analizar información y generar gráficos para representar los resultados y PowerPoint para la creación de las diapositivas que sintetizan el trabajo y expresar claramente las ideas. Estos requieren código de licencia para la cual se utiliza la licencia de estudiante otorgada por la Universidad Nacional para la obtención de la licencia y derechos de uso para estos programas.
- c) Software (SIG) QGIS 3.30.0: Su uso es gratuito, para el uso de este software se cuenta con la capacidad técnica profesional que permite desarrollar los estudios necesarios mediante este software durante el desarrollo del proyecto.
- d) Software Hidroesta: su uso para cálculos hidrológicos y estadísticos, la obtención del software como estudiante se encuentra en la biblioteca virtual del TEC, de Costa Rica, para ello se cuenta con la capacidad técnica y profesional que permite desarrollar los análisis necesarios mediante el uso de este software.

- **Insumos necesarios para el desarrollo del proyecto**

Para el desarrollo los estudios necesarios del proyecto se requiere la utilización de insumos. La mayoría fueron utilizados a lo largo de la ejecución del proyecto (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Insumos necesarios para el estudio de prefactibilidad técnica.

Insumos	Cantidad	Observaciones
-Giras de campo -Gorra -Botas -Bloqueador -Bebida -Hidratante	-15 giras (3 giras semanales desde el inicio del proyecto en enero hasta 30 junio de 2023).	En las giras se realizaron diferentes actividades como: visualización y explicación de las actividades de captación de agua y riego en compañía de profesionales en el tema, georreferenciación de puntos de interés, charlas, etc.
-Transporte -Kilometraje -Bus de la empresa	-15 giras (El kilometraje se utilizó en las giras de campo. 80) -El bus de la empresa se utiliza para trasladarse de lunes a jueves a la empresa. Desde el inicio del proyecto en enero hasta 30 junio de 2023	El trabajo escrito y práctico del proyecto fue realizado en la empresa Del Oro.
-Alimentación -Almuerzo	-Desde el inicio del proyecto en febrero hasta noviembre de 2023	La empresa brindó el servicio de alimentación durante las visitas a la empresa.
-Medicamentos	-1 unidad	La empresa brindó el servicio de medicamentos.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

A partir de este estudio técnico se concluye que, los insumos y materiales como datos, equipos y herramientas de procesamiento de datos que se necesitan para el desarrollo de este proyecto, se pueden adquirir en el mercado local y fuentes de acceso libre y de compra. Además, se cuenta con la capacidad técnica para la utilización de los insumos, datos, equipos y herramientas de procesamiento de datos, por lo que el estudio de prefactibilidad técnica determina el proyecto como viable desde la perspectiva técnica.

4.2 Estudio de prefactibilidad Financiero

El análisis de los requerimientos para desarrollar el proyecto realizado en el estudio de prefactibilidad técnica permite cuantificar las necesidades de mano de obra por especialización, asignarles un nivel de remuneración de mercado para calcular los costos de operación y realizar el estudio de prefactibilidad financiero, en el que se involucra una organización y sistematización de la información financiera suministrada preliminarmente, que es de utilidad para analizar esta y lograr determinar su viabilidad en términos financieros (Sapag *et al.* 2014).

Para analizar la prefactibilidad financiera del proyecto, se describen a continuación los posibles costos directos e indirectos y estimar así cuánto es el costo de inversión que implica cada actividad desarrollada para cumplir con los objetivos del proyecto, con el fin de determinar la viabilidad del proyecto en cuestión (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Presupuesto global del proyecto.

Descripción	Cantidad (unidad)	Precio unitario	Precio total	Observaciones	Financista
Costos directos					
<i>Datos climáticos</i>					
Datos meteorológicos IMN	336	-	-	Se solicitaron datos de 4 estaciones meteorológicas con datos mensuales desde enero 2016 hasta febrero 2023. Al ser para fines académicos no se generaron costos.	Del Oro & Autora
Datos meteorológicos Del Oro	1875	-	-	Se solicitaron datos de 15 pluviómetros con datos mensuales desde enero 2013 hasta mayo 2023.	Del Oro
<i>Equipo de trabajo</i>					
Computadora	1	€350 000	€350 000	Computadora de trabajo	Del Oro
Teléfono celular	1	€350 000	€350 000	Georreferenciación de puntos de interés	Autora
Subtotal			€700 000		
Costos indirectos					
<i>Giras de campo</i>					
Alimentación	10 meses	€2.500	€400 000	La empresa brindó servicio de alimentación durante las visitas a esta, sin embargo, para efectos del estudio financiero se elige el costo que implica.	Del Oro
Seguro básico de accidentes INS	2	€7 500	€15 000	Se compró dos pólizas de seguro al INS para de seis meses de vigencia cada una	Autora
Kilometraje	15	€583	€87 450	Alrededor de 10 km por gira.	Del Oro

Gorra	1	€8 000	€8 000		
Botas	1	€9 000	€9 000		
Bloqueador	1	€8 000	€8 000		
Subtotal			€527 450		
Otros					
Papelería e impresión	1	€80 000	€80 000	Al finalizar el proyecto, se deberá de imprimir por completo y entregar una copia a la empresa y a la Universidad Nacional.	Autora
Medicamentos	1	€350	€350	Se requirió el uso de acetaminofén	Del Oro
Insumos de oficina	1	€3 000	€3 000	Libreta, lapicero.	
Honorarios profesionales	10 meses	€548 475	€5 484 750	Salario mínimo como ingeniero universitario de tiempo completo según CFIA.	
Subtotal			€5 865 100		
Suma de costos directos e indirectos			€7 092 550		
Imprevistos (10%)			€709 255		
IVA (13%)			€922 031.5		
Inversión total			€8 723 836.5		

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El costo del kilometraje fue obtenido de acuerdo con los precios publicados en La Gaceta No.100, del 06 de junio del 2023. Cambio en Combustibles en Estaciones de Servicio y Terminales de Venta: Rige a partir del 07 de junio del 2023.

Se brindó al autor beneficio económico mensual por parte de la empresa para solventar los gastos generados durante el desarrollo del proyecto desde enero hasta noviembre 2023. Se estima un valor de 10% del proyecto para cubrir gastos de imprevistos durante el desarrollo del proyecto, este valor se calcula mediante la suma de los costos directos más los indirectos. Por último, se agrega a la inversión total, el impuesto sobre el valor agregado equivalente a un 13% según el Ministerio de Hacienda República de Costa Rica.

Según lo anterior, dado que la empresa responde al financiamiento de las mayores actividades realizadas durante el desarrollo de este proyecto y específicamente el teléfono celular, desayunos y la papelería e impresión están al alcance de la autora, sustentado por el beneficio económico de la empresa, concluye que el proyecto tiene viabilidad financiera. Se procede a realizar el estudio de prefactibilidad organizacional del proyecto en cuestión.

4.3 Estudio de prefactibilidad organizacional

Según Sapag *et al.* (2014), el estudio organizacional pretende presentar un acercamiento a la aceptación y apoyo, por parte de la organización en cuestión, al proyecto que se pretenda desarrollar. La organización que respaldan el presente proyecto es la empresa Del Oro, donde se involucran procesos administrativos para su formalización y ejecución, durante el desarrollo del proyecto estos procesos han sido importante para resguardar la confiabilidad de los resultados. Los procesos administrativos involucrados en el proyecto son:

- **Jerarquía administrativa**

Para el desarrollo del proyecto se necesita el apoyo y validación por parte del personal de la empresa para el cual se realiza el estudio de la jerarquía administrativa involucrada (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Jerarquía administrativa involucrada en el desarrollo del proyecto.

Colaborador de la empresa	Cargo en el proyecto
Ingeniero agrónomo con énfasis en riego y drenaje	Supervisor encargado de velar por el cumplimiento de los objetivos junto al autor del proyecto.
Recursos humanos	Encargado de otorgar permisos para el desarrollo del proyecto
Proveeduría	Encargado de realizar el beneficio económico al autor para el desarrollo del proyecto
Departamento de agronomía	Espacio otorgado al autor para desarrollar el proyecto con el acompañamiento de los profesionales dentro del departamento.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En términos de perspectiva del proyecto David Álvarez Baltodano es el ingeniero agrónomo encargado de fincas y con experiencia en riego y drenaje de la empresa. Durante el desarrollo del proyecto mencionó que, para la empresa, el desarrollo es importante porque generará información hidrológica que ayudará a establecer una solución a largo plazo de la escasez de agua en temporadas secas y les permitirá operar las dosis y programación del riego por goteo con mayor confiabilidad (Álvarez, 2023).

- **Reglamentación de la ejecución del proyecto**

Para iniciar el proyecto, se presentó como parte de la reglamentación de la empresa, una copia de la entrega final del documento del proyecto en cuestión. Se cuenta con confidencialidad de datos compartidos por la empresa a la autora del proyecto, que utilizará únicamente para el desarrollo de este (Del Oro, 2023).

- **Estrategias del proceso del proyecto en la empresa**

Al ser bachiller en ingeniería hidrológica, la autora encargada del proyecto se complementa con la aprobación del supervisor y la jerarquía administrativa para abarcar las actividades en la empresa que pretenden cumplir los objetivos propuestos.

De acuerdo con la información organizacional de la empresa y los acuerdos de reglamentación y estrategias del proceso de actividades tomados con la autora desarrolladora del proyecto, el estudio posee viabilidad organizacional. Se procede a realizar el estudio de prefactibilidad legal del proyecto en cuestión.

4.4 Estudio de prefactibilidad legal

Un estudio legal está relacionado con todo el marco de gobernanza legal que definan si las actividades de un proyecto se puedan llevar a cabo o no (Sapag *et al.* 2014). La revisión de documentación jurídica legal

de Costa Rica para demostrar la factibilidad legal para el desarrollo del presente proyecto se realizó tomando como referencia la pirámide de Hans Kelsen (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Marco legal referente al proyecto.

Marco legal	Descripción y relación con el proyecto
Constitución Política de Costa Rica. Artículo 50.	Establece que toda persona tiene derecho a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado. En relación con el estudio se debe asegurar la disponibilidad de agua a futuro en cantidad y calidad para sustentar una buena calidad de vida.
Ley Orgánica del Ambiente N° 7554.	Esta ley vela por la protección de los recursos naturales con el fin de proporcionar un ambiente sano y ecológicamente equilibrado. En relación con el estudio destaca que para mantener el equilibrio del recurso hídrico hay que proteger cada componente de las cuencas hidrográficas.
Ley de aguas N° 276	Esta ley busca gestionar el recurso hídrico en el país, garantizando así el derecho humano de acceso al agua potable en cantidad y calidad para las presentes y futuras generaciones. En relación con el proyecto se destacan la regulación de concesiones para el aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas.
Ley de uso y conservación de suelos N° 7779	Tiene como fin proteger, conservar y mejorar los suelos en gestión integrada y sostenible con los demás recursos naturales, mediante el fomento y la planificación ambiental adecuada. En relación con el proyecto esta ley planifica y aplica el uso racional del riego como medida de manejo, conservación de los suelos, así como incluir la obligación en las concesiones para el aprovechamiento de aguas el aplicar las técnicas adecuadas de manejo de agua.
Ley de creación del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) N° 6877	SENARA en conjunto con otras instituciones tiene el compromiso de proteger el recurso hídrico superficial y subterráneo, así como velar porque se formule una política racional y democrática en el otorgamiento de concesiones relativas a la utilización de aguas para riego.
Decretos Ejecutivos N° 38642-MP-MAG, N° 41944-MP-MAG y N° 41852-MP-MAG.	Se declara estado de emergencia la situación generada por el déficit hídrico del país, consecuencia del comportamiento anormal de las precipitaciones afectando entre ellos el cantón de La Cruz, poniendo en riesgo la disponibilidad del recurso para personas de la zona y el aumento de la vulnerabilidad de la zona ante eventos hidrometeorológicos extremos.
Resolución 2373-2016-SETENA	Por ser un proyecto de bajo impacto ambiental, no requiere de una Evaluación de Impacto Ambiental.
Plan Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos.	Fundamenta que los estudios de oferta-demanda son instrumentos básicos para la asignación de agua en la gestión integrada del recurso hídrico.
Código de Ética Profesional del CFIA	E el artículo 5, se establece que los ingenieros deberán procurar el uso adecuado de los recursos naturales, evitando su desperdicio o uso abusivo por lo que se debe elaborar los estudios técnicos requeridos para garantizarlo.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Según el marco regulatorio recopilado referente al tema de interés este proyecto no cuenta con ningún impedimento legal. Por lo que se puede decir que es legalmente viable su realización

4.5 Estudio de prefactibilidad ambiental

La importancia ambiental es cada vez más relevante de un proyecto. Un enfoque de la gestión ambiental sugiere introducir en la evaluación de proyectos las normas ISO 14000, consisten en una serie de

procedimientos asociados para dar un estándar internacional de gestión ambiental, con el propósito de lograr un equilibrio entre la rentabilidad de un proyecto y la reducción de sus impactos en el ambiente, relacionado lo anterior con los menores costos futuros de una eventual reparación de los daños causados sobre el medio ambiente (Sapag, *et al.* 2014).

En el presente estudio, para realizar una revisión de prefactibilidad ambiental se realiza un estudio de impacto ambiental de acuerdo con la Resolución 2373-2016-SETENA que establece el procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental de acuerdo con en el artículo 4°

“Se refiere a las actividades humanas que, cumpliendo lo dispuesto en este acuerdo, no provocan destrucción o alteración de significancia negativa del ambiente, ni generan residuos o materiales tóxicos o peligrosos y no representan una desmejora significativa de la calidad ambiental del entorno en general o alguno de sus componentes en particular” (SETENA, 2016, p3).

Con las condiciones del acuerdo anterior, este proyecto está en la categoría de proyecto de bajo impacto ambiental, ya que no provoca cambios ambientales significativos, por lo que el proyecto no debe cumplir con los trámites para obtener Viabilidad Licencia Ambiental (VLA). Como los objetivos del proyecto se encuentran aprobados dentro de la legislación ambiental de Costa Rica, se logra determinar como un proyecto con viabilidad ambiental.

4.6 Conclusión

A partir de la información recopilada en el capítulo 4, se concluye que el proyecto es viable para las cinco áreas de estudio, por lo tanto, el proyecto continúa en su ejecución y se procederá a desarrollar la metodología donde se cumpla con los objetivos planteados en la investigación.

Capítulo 5. Metodología

El presente capítulo plantea la metodología a utilizar durante el proyecto, por lo tanto, en esta sección se abordan los elementos enfocados en las distintas características necesarias para el cumplimiento de los objetivos planteados.

5.1 Descripción general de la metodología

Según el enfoque del proyecto y siguiendo la información base a obtener, se determina la metodología correspondiente a un enfoque de investigación mixto, un enfoque cuantitativo explicado por la información recopilada de documentación de la empresa, datos climáticos, meteorológicos, hídricos y morfológicos, sucesos a partir del cálculo de balance hídrico y generación de curvas IDF mediante métodos matemáticos y estadísticos. Así como un enfoque cualitativo que involucra un análisis del entorno de la situación hidrológica de la población en estudio basados en trabajo de campo, del que se obtiene la información necesaria para cumplir los objetivos del proyecto (Figura 5.1).

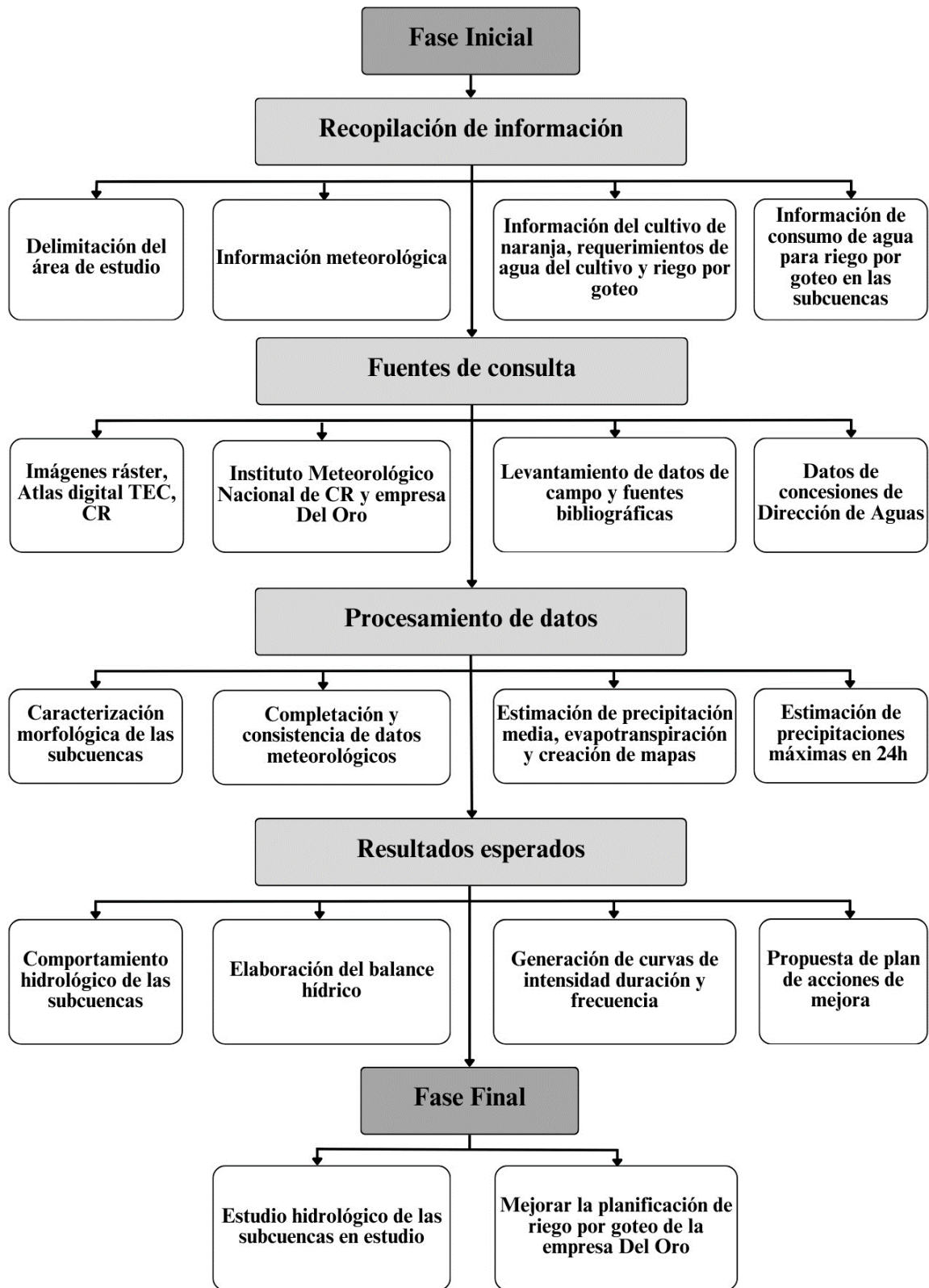


Figura 5.1 Diagrama de flujo de la metodología a utilizar.
Fuente: Elaboración propia, 2023.

5.2 Población y muestra

La población con la que se realizó este estudio está compuesta por todos los elementos que participan del fenómeno que fue definido y delimitado en el análisis del problema de investigación. La muestra es una parte de la población que puede ser definida como un subgrupo de esa población (Toledo, n.d).

5.2.1 Población

Para este proyecto la población sujeta de estudio son las subcuencas donde están las fincas de cultivo de naranja bajo riego de la empresa Del Oro. Para dicha investigación se tomó el total de dos subcuencas hidrográficas denominadas subcuenca del río Sábalo con un área de 65.97 km² y la subcuenca del río Guachipelín con un área de 19.65 km².

5.2.2 Muestra

Se definió un muestreo por conveniencia en el uso del agua para riego por goteo a cultivo de naranjas en la empresa Del Oro. Esta metodología se puede aplicar en otras fincas de la empresa con sus respectivos datos.

5.3.1 Recopilación de información base

El desarrollo del proyecto se inició con la recopilación de una serie de datos predeterminados como información base para la aplicación de los métodos a utilizar. Estos datos fueron, la información cartográfica del área de estudio, información meteorológica del área de estudio y revisiones bibliográficas.

- **Información cartográfica**

El modelo de elevación digital (DEM) se obtuvo a través de información geoespacial disponible en la red USGS EarthExplorer. Se descargaron dos Modelos Digitales de elevación (DEM), que se analizaron con el software QGIS.

- **Información meteorológica**

La información meteorológica se obtuvo mediante la solicitud por escrito al Instituto Meteorológico Nacional de datos meteorológicos disponibles dentro y cercano al área de estudio. También se realizó la solicitud de datos meteorológicos disponibles de las estaciones meteorológicas y pluviómetros de la empresa Del Oro.

- **Revisiones bibliográficas**

Se recopiló información bibliográfica de importancia para la obtención de datos como el coeficiente de cultivo, respecto al tipo de cultivo involucrado en el presente estudio, métodos del balance hídrico y métodos estadísticos para la elaboración de las curvas IDF. La información que se utilizó para

determinar el coeficiente de cultivo se obtuvo principalmente de la lectura de Allen, *et al.* (2006), denominado Guías para el requerimiento de agua de los cultivos y la lectura de Castillo, *et al.* (2019) publicado por la revista de investigación LIFE Research Innovation Development. científica, denominado efecto del punto de liberación del estrés hídrico sobre la fenología, la fisiología, el rendimiento y calidad de la naranja dulce (*Citrus sinensis* Osb. Var. Valencia) injertada sobre dos patrones contrastantes en el trópico húmedo.

Tras la recopilación de datos base para el desarrollo del proyecto, se inició con el procesamiento de datos para desarrollar el estudio hidrológico de las subcuencas. La recopilación de información documental permitió analizar y comparar la información que se llegó a obtener.

5.3.2 Procesamiento de datos

Para cumplir con los objetivos propuestos de este proyecto la información meteorológica obtenida se sometió a procesamientos estadísticos, en el que se analizaron y validaron los datos para mayor confiabilidad de estos. Se realizaron los debidos cálculos para la obtención de precipitaciones y temperaturas medias del área de estudio y se generaron mapas que facilitaron el análisis de dichos datos. Esta información se utilizó en la determinación del balance hídrico y la generación de curvas IDF.

- **Completación de datos hidrometeorológicos**

La completación de datos hidrometeorológicos se llevó a cabo por medio del método de promedios detallado en el capítulo 3 del presente documento. Según Calvo (1996), requiere de la utilización de la información de al menos tres estaciones vecinas de comprobada consistencia mediante la ecuación 5.1.

$$Px = \frac{1}{3} \left(\left(\frac{Nx}{Na} \right) * Pa + \left(\frac{Nx}{Nb} \right) * Pb + \left(\frac{Nx}{Nc} \right) * Pc \right)$$

Ecuación 5.1

Px = Precipitación estimada de la estación.

Nx, Na, Nb y Nc = Precipitación promedio de las estaciones.

Pa, Pb y Pc = Precipitación en las estaciones a, b y c correspondientes al período faltante de la estación x

Así cuando estaciones que tienen una ubicación estratégica en la cuenca no cuentan con el período completo. Se puede realizar la estimación de los períodos faltantes, con la siguiente ecuación 5.2.

$$EPF = \left(\frac{Ppe}{Ppc} \right) * Ppt$$

EPF = Estimación de períodos faltantes.

Ppe = Promedio mensual del período con que cuenta la estación.

Ppc = Promedio mensual del período (equivalente a la estación en estudio) de todas las estaciones pertenecientes a la misma cuenca.

Ppt = Promedio mensual de todo el período, en todas las estaciones pertenecientes a la misma cuenca

● **Precipitación media de las cuencas**

Para el cálculo de la precipitación media de las subcuencas existen distintas metodologías, en este trabajo esto se llevó a cabo por el método de la media aritmética, isoyetas y polígonos de Thiessen. Se utilizó el Sistema de Información Geográfica QGIS 3.30.3 para la aplicación de las metodologías de polígonos de Thiessen e isoyetas, esta última se llevó a cabo por medio de la interpolación Distancia Inversa Ponderada y para el cálculo de la precipitación media por el método de promedio aritmético se utilizó el programa Hidroesta 2 de Máximo Villón.

Polígono de Thiessen: este método se obtiene según Villón (2004), mediante la ecuación 5.3.

$$P_{med} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i P_i$$

Ecuación 5.3

P_{med} = Precipitación media

A_T = Área total de la cuenca

A_i = Área de influencia parcial del polígono de Thiessen correspondiente a la estación i

P_i = Precipitación de la estación i

n = Número de estaciones tomadas en cuenta

Isoyetas: este método se obtiene mediante la ecuación 5.4, según Villón (2004).

$$P_{med} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n \frac{P_{i-1} + P_i}{2} A_i$$

Ecuación 5.4

P_{med} = Precipitación media

A_T = Área total de la cuenca

P_i = Altura de precipitación de las isoyetas i

A_i = Área parcial comprendida entre las isoyetas $P_{i-1} + P_i$

n = Número de áreas parciales

Promedio aritmético: este método se obtiene mediante la ecuación 5.5, según Villón (2004).

$$P_{med} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

Ecuación 5.5

P_{med} = Precipitación media de la cuenca

P_i = Precipitación de la estación i

n = Número de estaciones dentro de la zona

- **Generación de mapas de precipitación**

Para crear mapas de precipitación se utilizaron diferentes métodos de procesamiento de esta información interpolando datos de precipitación mediante SIG con el software QGIS 3.30.0 a partir de las metodologías de polígonos de Thiessen e isoyetas. Se crearon mapas mensuales en ambas metodologías que fueron analizados y comparados.

- **Temperatura media de las subcuencas**

Para el cálculo de la temperatura media mensual de las subcuencas se obtiene calculando el valor medio de los datos diarios de temperatura máxima y mínima. Utilizando las estaciones meteorológicas de nombre 7K y Oros con un registro histórico del año 2013 al año 2022 se obtuvo la precipitación media de las subcuencas.

5.3.3 Validación de datos

Para la validación de datos se aplica el método de regresión lineal simple, se puede estimar el grado de correlación lineal (R) que existe entre los métodos, en que el valor debe oscilar entre -1 y 1, donde el valor 0 indica una correlación nula, en tanto los valores 1 y -1, denotan una correlación total. En términos hidrológicos, para que se considere aceptable debe encontrarse entre $-0.8 \leq R \leq 0.8$ y cuanto más cerca se encuentren las estaciones mejor será este coeficiente (Aravena *et al.* 2009), el resultado se obtiene mediante la ecuación 5.6.

$$y = ax + bx$$

Ecuación 5.6

y = Precipitación estimada

x = Precipitación de la estación completa

a y b = Constantes de regresión lineal.

Para la elaboración del balance hídrico mensual, se recopiló la información base requerida para su estimación por el método de Thornthwaite-Mather modificado y adaptado al cultivo de naranja. Se utilizó como referencia el conocimiento de campo del personal de agronomía de la empresa involucrado en este proyecto y referencias bibliográficas recopiladas.

Para este proyecto el procesamiento y análisis de los datos se aplicó el programa Excel para almacenar y procesar datos climáticos de la zona de estudio, para obtener gráficos de relación 1:1, con la generación de ecuaciones de regresión lineal, la determinación de R. Además, se aplicó para el cálculo de la evapotranspiración potencial y evapotranspiración del cultivo por métodos mencionados en el proceso de elaboración del balance hídrico.

5.4 Procedimientos metodológicos

5.4.1 Determinación de las características morfológicas de las subcuencas

Para caracterizar las subcuencas del Río Sábalo y Río Guachipelín, se realizó la descarga del modelo de elevación digital (MED). A partir del programa Sistema de Información Geográfica Cuántico (QGIS) 3.30.3 se delimitó las subcuencas en estudio en donde se obtuvieron diferentes parámetros que caracterizan las cuencas tales como forma, relieve y red hidráulica, esto con la finalidad de analizar las características que posee las subcuencas, características, indispensables para realizar el estudio hidrológico. Algunos de estos parámetros requieren la aplicación de ecuaciones que determinan finalmente su caracterización, estas se muestran a continuación. El perímetro, área, longitud de la cuenca, elevación y la pendiente media fueron calculados por el software QGIS a partir del modelo de elevación digital.

- **Pendiente media**

Se determinó a partir de la ecuación 5.7, mencionada por Ordoñez (2011).

$$S\% = \frac{H_M - H_m}{1000 * L} * 100$$

Ecuación 5.7

$S\%$ = Pendiente media

H_M = Altitud mayor en metros

H_m = Altitud menor en metros

L = Longitud del cauce principal en kilómetros

- **Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (Kc)**

Se determinó a partir de la ecuación 5.8, mencionada por Cardona (2012).

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Ecuación 5.8.

Kc = Coeficiente de compacidad

P = Perímetro de la cuenca en km

A = Área de la cuenca en km².

- **Factor de forma**

Se determinó a partir de la ecuación 5.9, mencionada por Córdova (2016).

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

Ecuación 5.9.

Kf = Factor forma

A = Área de la cuenca en km²

L^2 = Longitud de la cuenca en km²

- **Densidad de drenaje**

Se determinó a partir de la ecuación 5.10, mencionada por Ordóñez (2011).

$$D = \frac{Ld}{A}$$

Ecuación 5.10.

D = Densidad de drenaje

Ld = Longitud de drenaje

A = Área de la cuenca en km²

- **Tiempo de concentración**

Se determinó a partir de la ecuación 5.11, definida por la ecuación de Kirpich mencionada por Min. Ambiente (2018).

$$tc = 0.066\left(\frac{L}{S_o}\right)^{0.77}$$

Ecuación 5.11.

tc = Tiempo de concentración

L = Longitud del cauce principal en metros

S_o = Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la cuenca dividida por L en m/m

5.4.2 Determinación del balance hídrico mensual

El balance hídrico mensual por el método de Thornthwaite y Mather consiste en calcular $PE - ETP$, es decir, la diferencia mensual entre la precipitación efectiva (Pe) y la evapotranspiración potencial (ETP). En el presente estudio se aplicó el método de Thornthwaite y Mather modificado (adaptado al cultivo de naranja) a partir de la precipitación media mensual (P) y la evapotranspiración del cultivo (ETC) a partir de la evapotranspiración potencial corregida y el coeficiente del cultivo de naranja para el caso de estudio. Se realizó el análisis tal y como dice Sibaja (2013) “si al calcular esta fórmula los valores son positivos, la precipitación excede a la evapotranspiración potencial, por lo que esta última es totalmente cubierta; si los valores son negativos, la precipitación no satisface las necesidades meteorológicas”.

El balance hídrico mensual simplificado se calculó a partir de la ecuación 5.12.

$$BH = P - ETC$$

Ecuación 5.12

P = Precipitación (más riego, si se suministra).

ETC = Evapotranspiración del cultivo.

- **Precipitación**

Esta variable se ha obtenido a partir de diez estaciones pluviométricas de la empresa Del Oro y del IMN. Sus cálculos se describen en el apartado 5.3.2 de este documento.

- **Temperatura**

La temperatura se ha obtenido a partir de las estaciones meteorológicas: 7K y Oros de la empresa Del Oro. Sus cálculos se describen en el apartado 5.3.2 de este documento.

- **Evapotranspiración**

El cálculo para la determinación de evapotranspiración del cultivo se llevó a cabo basándose en el método de Thornthwaite.

Método de Thornthwaite: según Villón (2004), este método se puede aplicar con relativa confianza en regiones húmedas como Costa Rica. Para su cálculo se requieren datos de temperaturas medias mensuales. La fórmula se define por las ecuaciones:

$$ETP = 16 * \left(10 \frac{t}{I}\right)^a$$

Ecuación 5.13

Donde:

ETP = Evapotranspiración mensual en mm por mes de 30 días y 12 horas de duración.

I = Índice térmico mensual. = $\sum i$

i = índice térmico mensual. = $\left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$

a = Exponente que varía con el índice anual de calor de la localidad.

Ecuación 5.14

$$a = 0.6751x10^{-6} * I^3 - 0.771x10^{-4} * I^2 + 0.01792 - I + 0.49239$$

Ecuación 5.15

Como Costa Rica se encuentra a 10° latitud norte (Anexo 4), se corrige el valor ETP de acuerdo con el número teórico de horas sol del mes considerado, el factor de corrección para el mes de enero es 0.98, febrero 0.91 y así sucesivamente. Esta corrección se calculó a partir de la ecuación 5.16.

$$ETP_c = f * ETP$$

Ecuación 5.16

Donde:

ETP_c = Evapotranspiración mensual corregida, en mm.

f = factor de corrección.

ETP = Evapotranspiración mensual sin corregir, en mm

- **Necesidades de agua del cultivo de naranja valencia**

Las necesidades de agua de los árboles cítricos son de hoja perenne y, por lo tanto, transpiran durante todo el año. Los requisitos de agua para una alta producción varían según el clima, la cobertura del suelo, el cultivo limpio o sin control de malezas, las especies y los portainjertos. En general las necesidades totales de agua varían entre 900 y 1200 mm por año (Doorenbos y Kassam, 1979). Para determinar el coeficiente de cultivo (K_c) se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva, así como conocimiento del terreno donde se encuentra el cultivo de naranja valencia de la empresa.

Los coeficientes de cultivo (k_c) que relacionan la ETC máxima de los árboles cítricos o cultivo de naranja con la evapotranspiración potencial (ETP) por mes recomendados por Doorenbos y Kassam, (1979) se muestran en el anexo 5 para árboles grandes maduros que proporcionan un 70% de cobertura del suelo, cultivados limpiamente, para zonas subtropicales. Los coeficientes de cultivos (k_c) para las diferentes fases fenológicas del cultivo propuestos por (FAO, 2014), para el cultivo de cítrico se muestra en los anexos 6 y 7.

- **Evapotranspiración del cultivo**

La evapotranspiración del cultivo ETC se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ETP y el coeficiente del cultivo K_c .

$$ETC = ETP * Kc$$

Ecuación 5.17

Donde:

ETC = Evapotranspiración del cultivo en mm por unidad de tiempo.

ETP = Evapotranspiración de referencia en mm por unidad de tiempo.

K_c = Coeficiente del cultivo (adimensional).

- **Capacidad de campo**

Este valor se estima a partir de las características del cultivo y del suelo. Tomando en cuenta la precipitación como única entrada de agua y la evapotranspiración del cultivo como la salida de agua, se define la capacidad de campo a partir de los valores promediados de la capacidad de retención del agua y los de profundidad radicular, según los tipos y texturas del suelo predominante, y el tipo de vegetación determinada en las subcuencas en estudio.

Para determinar la profundidad radicular de los cultivos de naranja valencia, se entrevistó a David Álvarez, supervisor del proyecto y la empresa Del Oro. Mediante esta entrevista, Álvarez definió un

valor medio de la profundidad de las raíces según su experiencia, conocimiento y años de trabajo en el tema en la empresa.

La determinación de la capacidad de campo se obtiene a partir de la ecuación 5.18 y los valores promediados de la capacidad de retención del agua y los de profundidad radicular. Esta información bibliográfica fue recopilada del informe de La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015), según los tipos y texturas del suelo predominante, y el tipo de vegetación determinada en las subcuencas en estudio.

La capacidad de campo se obtuvo aplicando la ecuación 5.18.

$$CC = CR * PR$$

Ecuación 5.18

Donde:

CC = Capacidad de campo.

CR = Capacidad de retención del agua.

PR = Profundidad radicular.

- **Evapotranspiración real**

La evapotranspiración real, actual o efectiva indica la lámina de agua que en realidad ha sido evaporada. Se obtuvo a partir de los siguientes criterios según la lectura de Villón (2004).

- Cuando $P < ETC$, y hay reserva de agua disponible en el suelo y satisface toda la evapotranspiración, $ETR = ETC$.
- Cuando $P < ETC$, y hay reserva de agua disponible en el suelo, pero no para satisfacer toda la evapotranspiración, $ETR = P + \text{variación de } R$
- Cuando $P < ETC$, y no hay reserva de agua disponible en el suelo $ETR = P$

- **Reservas de agua**

Para efectos del cálculo, se suele suponer que después del periodo seco la reserva de agua es nula, por consiguiente, en base a las desigualdades $P - ETC < 0$, y $P - ETC > 0$ a los resultados de la diferencia entre los parámetros de precipitación y evapotranspiración potencial, se identifican en la primera desigualdad los meses secos, y en la segunda los meses húmedos. Definida la entrada y la salida de agua en la cuenca, y los supuestos, se determinaron los diferentes parámetros para cada mes (Santillán, et. al, 2013).

- **Excedente**

Se obtuvo como resultado de la diferencia de humedad en el suelo de un mes a otro, si los resultados son positivos existe una recarga del recurso hídrico. Representa el agua que habiendo caído por precipitación queda como un sobrante, luego de haber proporcionado la cantidad de agua para la evapotranspiración del cultivo y para completar la reserva en el suelo (Villón, 2004).

- **Déficit hídrico**

Se determinó el déficit hídrico a partir de los datos obtenidos del balance hídrico. Al igual que las ganancias, se obtiene como resultado de la diferencia de humedad en el suelo de un mes a otro, si los resultados son negativos existe un déficit del recurso hídrico. El déficit indica la cantidad de agua en mm de altura que faltó para satisfacer la evapotranspiración, por un agotamiento de las reservas en el suelo, en ausencia de precipitaciones. Para efectos de riego esto nos indica lo que debemos derivar para satisfacer las necesidades de los cultivos (Villón, 2004).

Una vez definidas todas las variables necesarias para realizar el balance hídrico, se introdujeron los datos en hoja de Excel para realizar el balance hídrico propuesto.

Es importante aclarar que este proyecto no toma en cuenta variables de demanda como población, ganadería, industria y caudal ambiental, ya que el fin del proyecto es determinar el comportamiento hídrico de las subcuencas para la optimización del riego por goteo para naranja valencia.

5.4.3 Generación de curvas intensidad duración frecuencia

Según Chow *et al.* (1994) el primer paso que debe realizarse en proyectos de diseño hidrológico es la identificación de los eventos de lluvia que se usarán. Es común usar una tormenta de diseño que tiene relacionado la intensidad de lluvia, la duración y el periodo de retorno apropiados para el sitio y la futura obra. En muchos casos existen curvas de intensidad-duración-frecuencia obtenidas para el sitio, en ese caso no es necesario llevar el análisis de tormenta.

Las curvas intensidad–duración–frecuencia se realizan con el fin de conocer el comportamiento de las precipitaciones en el área de estudio. Se selecciona el modelo probabilístico que representa en forma satisfactoria el comportamiento de la variable. Se calculan sus parámetros y se realiza la prueba de bondad de ajuste para proceder a determinar la probabilidad de ocurrencia de la magnitud de un fenómeno hidrometeorológico (Villón, 2006).

Utilizando la herramienta Excel y organizando los registros de las precipitaciones acumuladas diarias expresadas en mm, emitidos en los registros pluviométricos de nombre 12-7K y Yafa 19, se procedió a

realizar la distribución teórica de Gumbel siendo la que mejor se ajusta a los datos climáticos, para posteriormente calcular la precipitación máxima en 24 horas para las diferentes duraciones de eventos.

- **Distribución teórica de Gumbel**

La ley de Gumbel se generalmente se utiliza para ajustar a una expresión matemática las distribuciones empíricas de frecuencia de precipitaciones máximas anuales, caudales máximos anuales, etc., y se puede leer detalladamente su procedimiento en la lectura Hidrología Estadística de Villón, (2006).

La función de distribución acumulada de la distribución Gumbel tiene la forma:

$$F_{(x)} = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}}$$

Ecuación 5.20

Donde:

$0 < \alpha < \infty$ = es el parámetro de escala

$-\infty < \mu < \infty$ = es el parámetro de posición, llamado también moda.

Una vez obtenidos estos valores se convierten los datos a intensidad de lluvia en mm/hr, y se representan por medio de las curvas IDF. Esto se realizó a partir del método analítico y el modelo de Fredrich Bell.

- **Método analítico**

La representación matemática para el cálculo de las curvas IDF se define con la ecuación 5.21 aplicando el método analítico desarrollado por Aparicio (1997).

$$I = \frac{kT^m}{(c + d)^n}$$

Ecuación 5.21

i = intensidad máxima (mm/h)

d = Duración de la lluvia (min)

T = Periodo de retorno

k, m, n = constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple.

Si los datos se agrupan lo suficiente en torno a líneas rectas, el valor de c puede tomarse como cero.

- **Metodología de Frederich Bell**

Según Baltodano (2020), esta metodología permite calcular la intensidad analizando las precipitaciones máximas en 24 horas. Esto se logra calculando la lluvia máxima con relación al período de retorno, la duración en minutos de lluvia y la precipitación mayor en una hora considerando un periodo de retorno de 10 años (Ecuación 5.22).

$$P_D^T = (0.21\ln(T) + 0.52)(0.54D^{0.25} - 0.50)P_{60}^{10}$$

Ecuación 5.22

P_D^T = Precipitación de duración en t minutos y un período de retorno en T años, en milímetros.

P_{60}^{10} = Precipitación con una duración de 60 minutos y un período de retorno de 10 años, en milímetros.

Este análisis se realizó utilizando el software Hidroesta 2 en donde el programa aplica la ecuación 5.22 tomando los datos que se ingresan al mes correspondiente. Así mismo el programa realizó el cálculo de la ecuación de intensidad máxima por medio de la metodología de Frederich Bell y posteriormente los diferentes períodos de retorno.

5.4.4 Acciones de mejora del uso de agua para riego por goteo.

Para la implementación de acciones de mejora se presentó a la empresa una propuesta de un plan estratégico de acciones de mejora como guía para un aprovechamiento óptimo del agua en los proyectos de riego por goteo este se detalla a continuación. Cabe destacar que el presente proyecto no realizó dosificaciones o programaciones nuevas del riego por goteo ni captaciones de agua nuevas, sin embargo, se presentaron nuevas recomendaciones basadas en los resultados obtenidos que sirven como una línea base para la toma de decisiones a futuro en la empresa.

- **Planificación de la presentación de los resultados del proyecto**

Para poder planificar la presentación al personal involucrado se estableció como objetivo la propuesta de acciones de mejora para el uso y aprovechamiento óptimo del agua en los proyectos de riego por goteo de la empresa Del Oro, y así planificar la ruta hacia la línea de meta propuesta se definió que esta información está dirigido al personal involucrado en la actividad de riego por goteo, en el cual se les presentan los principales hallazgos del presente proyecto con el fin de demostrar la importancia de conocer los temas abordados en este estudio en cuanto al comportamiento hidrológico de las subcuencas en relación con el cultivo de naranja y el riego por goteo. Además, fomenta las ventajas de elaborar un balance hídrico para la programación de del riego por goteo y que además se podrá aplicar la metodología a otras áreas bajo similares condiciones.

Así mismo, la presentación se realizó para reforzar el conocimiento que permitió comprender las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera que son de aporte para tomar decisiones del manejo de agua en las subcuencas de interés. La presentación se realizó en una sesión mediante proyección de pantalla de la presentación en las instalaciones de Del Oro, pero su contenido se generó a lo largo del desarrollo del presente proyecto. Desde esta presentación se planteó el intercambio de información entre la autora del proyecto que fue la persona encargada de la presentación, y el personal experto en riego por goteo de la empresa Del Oro.

- **Elaboración de un plan de acciones de mejora como guía para un aprovechamiento óptimo del agua en los proyectos de riego por goteo**

Como parte del plan estratégico se plantearon los siguientes elementos que lo conforman:

Visión: importancia de conocer los temas abordados en este estudio en cuanto al comportamiento hidrológico de las subcuencas en relación con el cultivo de naranja y el riego por goteo.

Misión: fomentar las ventajas de elaborar un balance hídrico para la programación de del riego por goteo y que además se podrá aplicar la metodología a otras áreas bajo similares condiciones.

Objetivos: implementación de acciones de mejora mediante un plan estratégico de acciones de mejora como guía para un aprovechamiento óptimo del agua en los proyectos de riego por goteo.

Estrategias: plan de acción, ejecutar periódicamente este plan.

Se generó un informe, la entrega de esta guía y presentación del proyecto basado en la valoración de las condiciones hidrológicas actuales del área de estudio para concesiones y obras hidráulicas futuras. Este informe fue entregado a los empleados involucrados en el riego por goteo de la empresa Del Oro para generar una concientización sobre los recursos hídricos que se explotan en los cauces del Río Sábalo y Río Guachipelín.

5.4 Cronograma de actividades y presupuesto

Se creó un cronograma en el cual se contempla el proceso del proyecto (Tabla 5.2).

Tabla 5.1 Cronograma de proyecto.

Desarrollo de PFG	Tiempo de redacción y desarrollo de actividades										
	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	
Mes											
Realización de Anteproyecto											
Entrega de Reporte de Anteproyecto											
Parte IV. Resultados y Síntesis											
Recopilación de información y bibliografía											
SIG para caracterizar área de interés											
Levantamiento de datos de campo											
Completación, tratamiento y validación de datos											
Mapas y cálculos de datos											
Balance Hídrico											
Curvas IDF											
Plan de acciones de mejora											
Elaboración del informe final											

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El presupuesto del proyecto se conformó de costos indirectos y directos, sumando un total de ¢8 723 836.5, donde el 30% que fueron llevados a cabo en el anteproyecto y se detalla en la tabla 4.2 del capítulo 4. Mientras que el 70% del presupuesto se ejecutó en el segundo semestre del año universitario.

5.6 Conclusión

En el capítulo 5 se exponen los métodos y herramientas metodológicas a seguir durante el proyecto para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos. El siguiente capítulo abordará los resultados obtenidos de esta investigación

Capítulo 6. Resultados y discusión de resultados

En este capítulo se presentan los resultados del proyecto y la discusión de los resultados.

6.1 Resultados del proyecto

Los resultados del estudio se presentan en dos categorías, según la información recopilada y según objetivos específicos planteados.

6.1.1 Información recopilada

A continuación, se detalla la información cartográfica obtenida (tabla 6.1).

Tabla 6.1 Detalle de los Modelo Digital de Elevación.

Identificación	Fecha	Resolución	Coordenadas
SRTM1N10W086V3	23/09/2014	1-ARC	10, -86
SRTM1N11W086V3	23/09/2014	1-ARC	11, -86

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Las estaciones meteorológicas y pluviómetros consideradas para el desarrollo del proyecto presentan una altura promedio de 366 msnm, ubicando la estación más alta a los 555 msnm de nombre La Maritza y se encuentra fuera de las subcuencas, pero muestra influencia en ellas, mientras que la estación más baja se encuentra a 302 msnm de nombre 7K y se encuentra dentro del área de estudio (Tabla 6.2). Las estaciones meteorológicas incluyeron datos de precipitación mensual (mm), temperatura promedio mensual (°C), humedad promedio mensual (%), viento mensual (m/s) y radiación solar promedio mensual (MJ/m²).

Tabla 6.2 Estaciones meteorológicas obtenidas del IMN y empresa Del Oro.

N°	Estación Nombre	Altitud (msnm)	Coordenadas geográficas		Registro histórico	Observaciones
			Latitud Norte	Longitud Oeste		
69711	Copalchí, Peñas Blancas	57	11.1982	-85.6182	7	Se descartó por sus diferencias características y lejanía.
69735	Hacienda Verdum, Santa Cecilia	300	11.0753	-85.4531	8	Se tomó en cuenta.
72191	La Cruz, Guanacaste	241	11.0537	-85.6332	6	Se descartó por su lejanía.
74071	La Maritza, Volcán Orosí	555	10.9588	-85.4958	7	Se tomó en cuenta por su influencia en las subcuencas.
1	Finca 7K	302	11,0803	-85,53935	4	Se tomó en cuenta por su influencia en las subcuencas.
2	Finca Oros	310	11,0333	-85,47281	4	Se tomó en cuenta por su influencia en las subcuencas.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Todos los pluviómetros se encuentran dentro del área de estudio, por lo tanto, todos fueron tomados en cuenta en este estudio (Tabla 6.3). En el análisis de consistencia de la precipitación se obtuvo el coeficiente de correlación, con un coeficiente de regresión significativo y aceptable.

Tabla 6.3 Pluviómetros de la empresa Del Oro.

Pluviómetro			Coordenadas geográficas		Registro histórico (años)
Finca	Nombre	Altitud (msnm)	Latitud	Longitud	
Yafa	Yafa 19	281	11,05419	-85,50594	10
	Yafa 20	274	11,05569	-85,49181	10
	Yafa 21.3	280	11,03894	-85,50105	10
	12-7K	295	11,07861	-85,53794	10
	18-7K	281	11,08437	-85,50940	10
	19-7K	277	11,07570	-85,50316	10
	21-7K	274	11,06783	-85,51731	10
	22-7K	319	11,08189	-85,52628	10
30-7K	282	11,06155	-85,53565	10	
La Olla	Olla 4	272	11,03948	-85,53199	10

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Para la elaboración del balance hídrico, adaptado al cultivo de naranja valencia en la empresa Del Oro, la información recopilada para la determinación de la capacidad de campo se muestra en la tabla 6.4. Con la cual se determinó una capacidad de campo de 140 mm para ambas subcuencas.

Tabla 6.4 Tipo de textura de suelo y vegetación predominante en las subcuencas del río Sábalo y Guachipelín.

Textura del suelo	Tipo de vegetación de las subcuencas en estudio	Capacidad de retención (mm) según FAO (2015)	Profundidad radicular de la vegetación (m) según datos reales (2023)
Franco arenosa	Cultivos de naranja y pastos	150	0.60
Franco arcillosa	Bosque y cultivos de naranja	250	0.60
Arcillosa	Bosque y cultivos de naranja	300	0.60

Fuente: Elaboración propia, 2023 a partir de La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015) y Álvarez (2023).

En cuanto al coeficiente de cultivo a utilizar se toma en consideración lo propuesto en la metodología en la sección 5.4.2 para las necesidades de agua del cultivo. A partir de este análisis se consideró el coeficiente de cultivo medio de 0.65 para la fase fenológica de 70% de cobertura del cultivo de cítrico, con una edad mayor a 3 años, una altura del cultivo de 4 metros aproximadamente, que se utiliza en la elaboración del balance hídrico y sin cobertura activa del suelo.

6.1.2 Resultados según objetivos

A continuación, se detallan los resultados según los objetivos específicos planteados.

Revisitando el objetivo específico 1: “Analizar las características hídricas y morfológicas de las subcuencas mediante un balance hídrico superficial y el uso de SIG, para la dosificación y programación de la actividad agrícola de riego por goteo”.

- **Caracterización morfológica de las subcuencas**

La zona en estudio fue caracterizada morfológicamente para conocer algunos parámetros importantes que evidencien su comportamiento tanto a nivel de topografía como a nivel de cauce. Estas características juegan un papel importante para el entendimiento de los procesos hidrológicos y sus variaciones en tiempo y espacio (tabla 6.5).

El estudio se realizó en la parte alta de la cuenca del río Sábalo el cual se tomó como nombre la subcuenca del río Sábalo, se le determinó un área de 65.97 km² y un perímetro de 44.37 km hasta su punto de aforo donde se unen la quebrada Gloria y el río principal Sábalo, la subcuenca se clasifica como una cuenca pequeña. En cuanto a la subcuenca del río Guachipelín se determinó que tiene un área de 19.65 km² y se clasifica también como una cuenca pequeña según Campos, (1992).

El factor de forma es inferior a 1 por lo que corresponde a una subcuenca extensa en el sentido de la corriente del cauce, está presentará una menor probabilidad de recibir precipitaciones intensas y simultáneas en toda la cuenca El coeficiente de compacidad indica que la subcuenca es oval redonda a oval-oblonga, se asimilará con ello considerables afectaciones por avenidas (Villón, 2004).

Tabla 6.5 Caracterización morfológica de la subcuenca del río Sábalo y río Guachipelín.

Subcuencas		Sábalo	Guachipelín	
Propiedades Morfológicas de la cuenca	Área	[km ²]	65.97	19.645
	Perímetro	[km]	44.37	26.935
	Longitud de la cuenca	[km]	12.12	5.836
	Ancho de la cuenca	[km]	5.44	3.366
	Pendiente media	[%]	12.02	6.871
	Altitud máxima	[msnm]	1416	589
	Altitud mínima	[msnm]	237	249
Propiedades del cauce	Elevación media de la cuenca	[msnm]	396.4	294.92
	Longitud del cauce principal	[km]	25.48	8.266
	Cota máxima (del río)	[msnm]	922	502
	Cota mínima	[msnm]	237	268
Propiedades red de drenaje	Pendiente de cauce	[%]	0.0268	2.831
	Longitud de drenaje	[km]	83.86	13.073
	Densidad de drenaje	[km/km ²]	1.271	0.6655
Índice de forma	Tiempo de concentración	[horas]	4.4395	2.1929
	Coeficiente de compacidad	[Adimensional]	1.3657	1.7016
	Factor de forma	[Adimensional]	0.4374	0.5768

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Lo anterior procede a detallarse en la sección 6.2.1 de la discusión de hallazgos del proyecto.

- **Precipitación media de las subcuencas**

El cálculo de precipitaciones medias permitió mejorar las estimaciones del balance hídrico del área de estudio conformado por las dos subcuencas, con el fin de obtener una base de datos hidrológica confiable y así, valorar el recurso en función de las características meteorológicas y hacer proyecciones para la planificación del uso del recurso para riego por goteo en cultivos de naranja valencia. Las

precipitaciones medias mensuales y anuales con un registro histórico del año 2013 al 2022 se obtuvieron a partir de los tres métodos mencionados a continuación.

Cálculo de precipitación media por el método de Polígonos de Thiessen

Se empleó la metodología de polígonos de Thiessen y se estableció así la influencia de las estaciones y pluviómetros en las subcuencas en estudio (Figura 6.1). Se obtuvo 1 estación meteorológica y 9 pluviómetros que representan un área de influencia aproximado en las subcuencas y de esta manera se descartaron las estaciones con nula influencia en la zona de estudio.

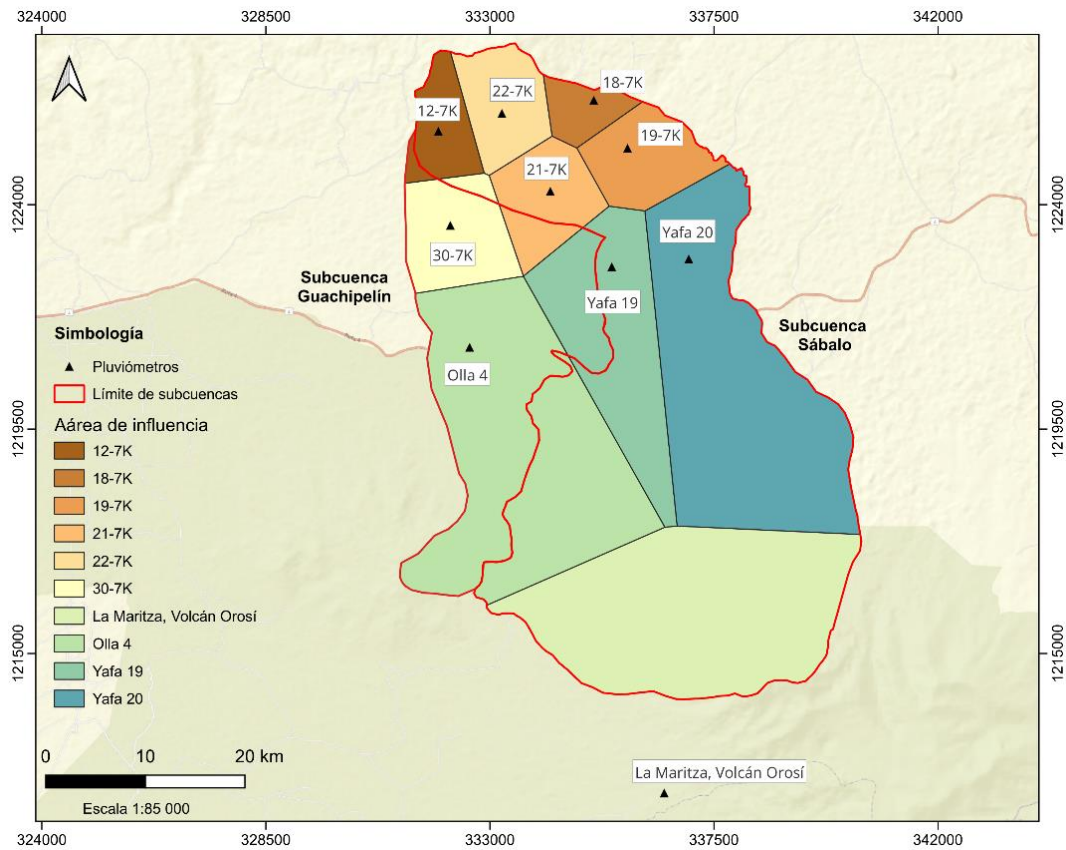


Figura 6.1 Mapa de polígonos de Thiessen de las subcuencas del río Guachipelín y Sábalo.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Los resultados obtenidos de la precipitación media anual para el período de estudio del 2013 al 2022 a partir del método de polígonos de Thiessen de la subcuenca del Río Sábalo de 2673.155 mm y de la subcuenca del Río Guachipelín es de 2387.30 mm. Estos datos demuestran que el mes más seco es el mes de abril y el más lluvioso el mes de octubre para ambas subcuencas (Tabla 6.6).

Tabla 6.6 Precipitación media mensual y anual a partir del método de polígonos de Thiessen de las subcuencas en estudio, período 2013-2022.

Mes	Precipitación media en mm	
	Subcuenca Sábalo	Subcuenca Guachipelín
Enero	115.505	66.506
Febrero	54.478	24.253
Marzo	52.898	22.972
Abril	33.135	20.609
Mayo	237.662	217.681
Junio	335.908	308.954
Julio	332.352	314.447
Agosto	340.022	81.886
Septiembre	345.311	330.989
Octubre	357.050	365.358
Noviembre	331.364	316.599
Diciembre	133.629	100.308
Anual	2673.155	2387.3

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Cálculo de precipitación media por el método de Isoyetas

Se obtuvo la precipitación media anual areal en las subcuencas en estudio (Figura 6.2). La subcuenca del Río Guachipelín presenta una precipitación media anual de 2298.767 mm y la subcuenca del Río Sábalo de 2156.055 mm.

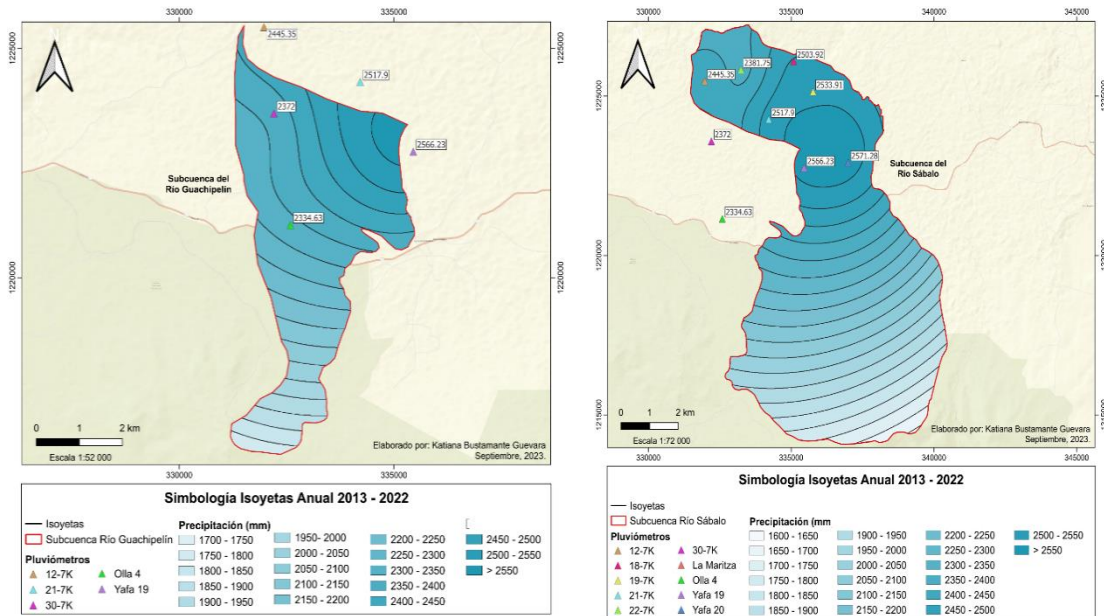


Figura 6.2 Isoyetas de las subcuencas en estudio (A) subcuenca río Guachipelín, (B) subcuenca río Sábalo.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La estimación de la precipitación media mensual período 2013 – 2022 según Isoyetas del estudio realizado en las Subcuencas del río Sábalo y Guachipelín, demostró que el mes más seco es el mes de abril y el más lluvioso el mes de octubre para ambas subcuencas. El color celeste más intenso equivale a precipitaciones mientras que el color celeste más claro a menores precipitaciones. (Tabla 6.7).

Tabla 6.7 Precipitación media mensual y anual a partir del método de isoyetas de las subcuencas en estudio, período 2013-2022.

Mes	Precipitación media en mm	
	Subcuenca Sábalo	Subcuenca Guachipelín
Enero	65.291	64.435
Febrero	26.247	23.723
Marzo	22.940	22.339
Abril	21.929	19.946
Mayo	201.367	209.096
Junio	307.115	298.151
Julio	292.285	303.063
Agosto	291.981	311.427
Septiembre	293.865	318.229
Octubre	311.488	353.713
Noviembre	289.086	304.636
Diciembre	88.381	96.644
Anual	2156.055	2298.767

Fuente: Elaboración propia, 2023.

A partir de esta metodología se puede apreciar los hidrogramas de las subcuencas generados con el registro histórico de precipitaciones del año 2013 – 2022 (Figura 6.3).

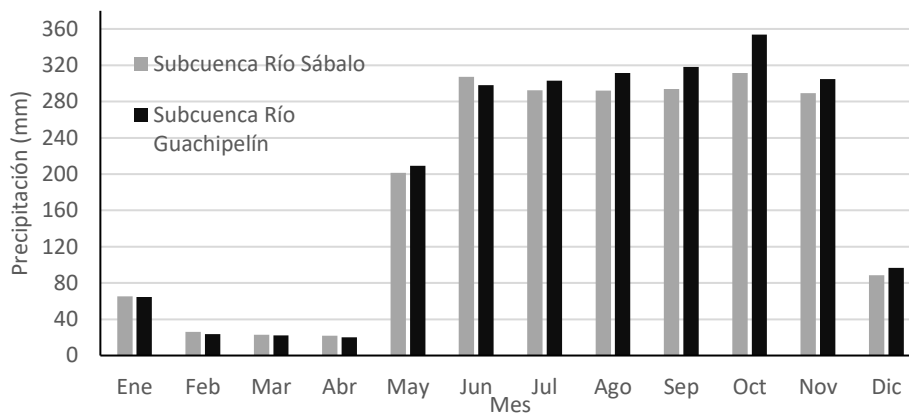


Figura 6.3 Hidrogramas de las subcuencas en estudio.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Cálculo de precipitación media por el método de promedio aritmético

A partir de la interpolación realizada por el software Hidroesta 2, se obtuvo el promedio aritmético de la precipitación media mensual y anual del período en estudio del año 2013 al año 2022. Esta metodología mostró que el mes más seco es el mes de marzo y el más lluvioso el mes de octubre para ambas subcuencas (Tabla 6.8). En la sección 6.2.1 se discuten los principales hallazgos encontrados de este resultado.

Tabla 6.8 Precipitación media mensual y anual a partir del método de promedio aritmético de las subcuencas en estudio.

Mes	Precipitación media en mm	
	Subcuenca Sábalo	Subcuenca Guachipelín
Enero	73.646	70.696
Febrero	29.107	27.072
Marzo	26.556	24.626
Abril	28.361	25.300
Mayo	222.771	221.858
Junio	338.999	325.760
Julio	326.049	324.882
Agosto	318.691	321.734
Septiembre	319.477	327.606
Octubre	356.474	358.606
Noviembre	321.631	320.758
Diciembre	107.176	105.544
Anual	2469.663	2447.222

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Los resultados de la precipitación media anual de las subcuencas empleando las metodologías de polígonos de Thiessen, Isoyetas y promedio aritmético período 2013-2022 (Tabla 6.9), mostraron una diferencia considerable.

Tabla 6.9 Resultados de la precipitación media anual de las subcuencas en estudio.

Metodología	Precipitación media anual (mm) período 2013-2022	
	Subcuenca Sábalo	Subcuenca Guachipelín
Polígonos de Thiessen	2673.155	2387.30
Isoyetas	2156.055	2298.767
Promedio Aritmético	2469.663	2447.222

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Para efectos de este estudio se toma en cuenta los resultados obtenidos de la metodología de isoyetas, la razón de esto se presenta en el apartado 6.2.1 de discusión de los principales hallazgos.

- **Temperatura media de las subcuencas**

Los datos de temperatura de las estaciones meteorológicas disponibles que influyen en el área de estudio son las estaciones meteorológicas de 7K y Oros. El promedio de temperatura de 10 años mostró que la temperatura media más alta se encuentra en el mes de abril (Figura 6.4).

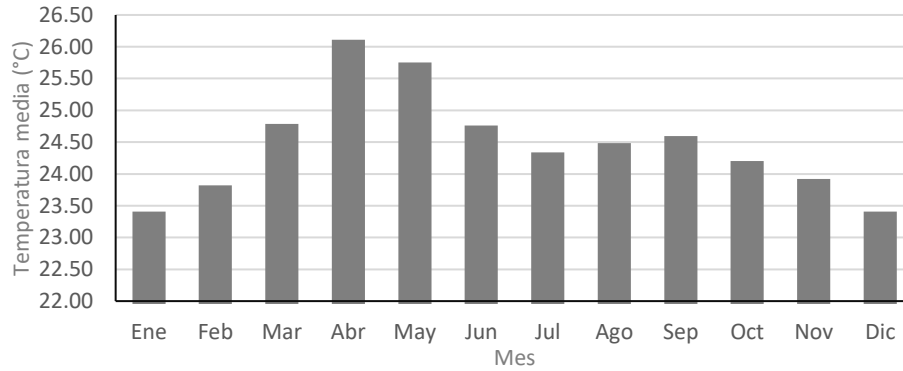


Figura 6.4 Temperatura media mensual de las subcuencas en estudio.
Fuente: Elaboración propia, 2023.

- **Evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite**

Para agilizar el cálculo y obtener una base de datos confiables para la empresa Del Oro, se elaboró en Excel una hoja de cálculo en la que se automatiza el procedimiento de cálculo de la ETP. Se puede observar en la tabla anterior los valores de evapotranspiración potencial mensuales y diarias obtenidas, presentando los valores más altos de evapotranspiración en los meses de abril y mayo, con valores promedios diarios para esos meses alrededor de los 4 a 4.4 mm/día (Tabla 6.10).

Tabla 6.10 Cálculo de la evapotranspiración potencial 2013-2022 empleando el método Thornthwaite.

Mes	Días	Temperatura media (°C)	Índice de calor mensual	ETP (mm)	Corrección f	ETP _c (mm/mes)	ETP (mm/día)
Ene	31	23.3	10.288	91.553	0.98	89.722	2.89
Feb	28	23.7	10.564	96.605	0.91	87.911	3.14
Mar	31	24.7	11.222	109.200	1.03	112.476	3.63
Abr	30	26.0	12.146	128.198	1.03	132.044	4.40
May	31	25.7	11.894	122.864	1.08	132.694	4.28
Jun	30	24.7	11.205	108.864	1.06	115.395	3.85
Jul	31	24.2	10.916	103.239	1.08	111.498	3.60
Agos	31	24.4	11.013	105.102	1.07	112.460	3.63
Sept	30	24.5	11.092	106.646	1.02	108.779	3.63
Oct	31	24.1	10.825	101.502	1.02	103.532	3.34
Nov	30	23.8	10.631	97.857	0.98	95.900	3.20
Dic	31	23.3	10.287	91.537	0.99	90.621	2.92
			(I) = \sum índice térmico anual	α exponente			
			132.085	3.0699			

Nota: ETP_c: Evapotranspiración corregida.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

- **Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar**

Para la elaboración del balance hídrico adaptado al cultivo de naranja valencia, se examina la evapotranspiración del cultivo permanente ya que es la vegetación que predomina en el área de estudio. Para determinar ETC se multiplica ETP por el coeficiente del cultivo (Tabla 6.11).

Tabla 6.11 Cálculo de la evapotranspiración del cultivo a partir del coeficiente de cultivo Kc propuesto por la FAO (2006).

Mes	ETP (mm/mes)	ETP (mm/día)	Kc med	ETCultivo (mm/mes)	ETCultivo (mm/día)
Enero	89.72	2.89	0.65	58.32	1.88
Febrero	87.91	3.14	0.65	57.14	2.04
Marzo	112.48	3.63	0.65	73.11	2.36
Abril	132.04	4.40	0.65	85.83	2.86
Mayo	132.69	4.28	0.65	86.25	2.78
Junio	115.40	3.85	0.65	75.01	2.50
Julio	111.50	3.60	0.65	72.47	2.34
Agosto	112.46	3.63	0.65	73.10	2.36
Septiembre	108.78	3.63	0.65	70.71	2.36
Octubre	103.53	3.34	0.65	67.30	2.17
Noviembre	95.90	3.20	0.65	62.33	2.08
Diciembre	90.62	2.92	0.65	58.90	1.90

Fuente: Elaboración propia, (2023), adaptado de Allen, et, al, (2006).

La mayor evapotranspiración del cultivo se presenta en el mes de abril y mayo, que concuerda con el mes de abril el más seco y el mes de mayo el inicio de la época lluviosa.

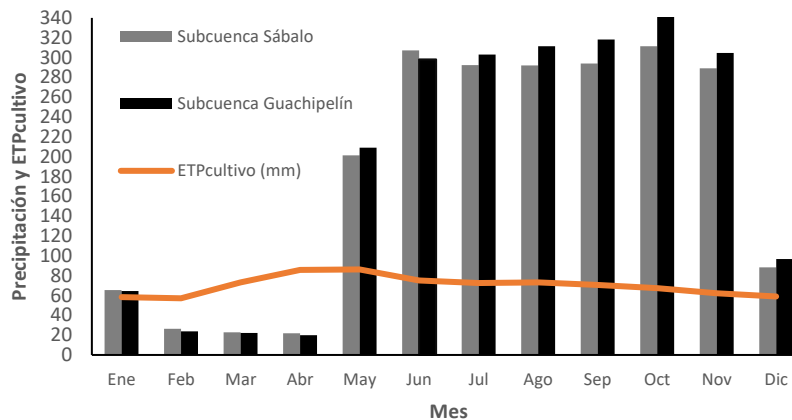


Figura 6.5 Comparación de evapotranspiración del cultivo y precipitación de las subcuencas para el período de estudio 2013-2022.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

A partir de la determinación de estos factores climáticos se procedió a realizar el cálculo del balance hídrico mensual propuesto.

- **Determinación del balance hídrico**

En base a las desigualdades $PE-ETC < 0$ y $PE-ETC > 0$, se identifican en la primera desigualdad los meses secos, y en la segunda los meses húmedos. Con base a ello, se podría definir que el mes de abril tiene una reserva nula, para así iniciar con los cálculos en el mes de mayo (inicio de los meses húmedos). Como el suelo es un depósito de capacidad limitada, cuando ya está saturado (140 mm), no hay variación de reserva de humedad, esto ocurre en los meses de julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, que la capacidad del suelo está llena, o cuando ya no hay agua disponible, esto ocurre en el mes de abril (Tabla 6.12 y 6.13).

En los meses de julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre el suelo se encuentra saturado (más de 140 mm), por lo que la diferencia entre la reserva del mes anterior menos su capacidad de almacenamiento se toma como excedente. En el mes de abril la reserva del mes anterior más la diferencia de precipitación y evapotranspiración es negativa por lo que indica que ya no hay reserva en el suelo.

Balance hídrico de la subcuenca del río Sábalo

La elaboración del balance hídrico para la subcuenca del río Sábalo (Tabla 6.12) muestra que en el mes de abril las reservas de agua en el suelo se agotan generando un déficit hídrico de 63.90 mm que podría afectar la producción de naranja. Caso contrario en los meses de junio a diciembre que se presenta un exceso hídrico entre 30 mm y 200 mm que, aunque los meses de enero a marzo sean temporada seca, se mantienen reservas de agua en el suelo que junto a las pocas precipitaciones que se presenten pueden satisfacer las necesidades de agua del cultivo de naranja.

Tabla 6.12 Balance hídrico de la subcuenca del río Sábalo.

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ETP Diaria (mm)	2.89	3.14	3.63	4.40	4.28	3.85	3.60	3.63	3.63	3.34	3.20	2.92
ETP Corregida (mm)	89.72	87.91	112.48	132.04	132.69	115.40	111.50	112.46	108.78	103.53	95.90	90.62
Kc med	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
ETCultivo	58.32	57.14	73.11	85.83	86.25	75.01	72.47	73.10	70.71	67.30	62.33	58.90
P (mm)	65.29	26.25	22.94	21.93	201.37	307.12	292.29	291.98	293.87	311.49	289.09	88.38
P - ETPc	6.97	-30.89	-50.17	-63.90	115.12	232.11	219.81	218.88	223.16	244.19	226.75	29.48
R	140.00	109.11	58.94	0.00	115.12	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00
VR	0.00	-30.89	-50.17	-58.94	115.12	24.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETR	58.32	57.14	73.53	21.93	86.25	75.01	72.47	73.10	70.71	67.30	62.33	58.90
D			-0.42	63.90								
Exc	6.97					207.22	219.81	218.88	223.16	244.19	226.75	29.48
SH				-63.90		207.22	219.81	218.88	223.16	244.19	226.75	29.48
Exc 1/2	3.49					103.61	109.91	109.44	111.58	122.10	113.38	14.74
Esc del mes antes	63.90	33.69	16.85	8.42	4.21		51.81	80.86	95.15	103.36	112.73	113.05
Esc total	67.38	33.69	16.85	8.42	4.21	103.61	161.71	190.30	206.73	225.46	226.11	127.79

Nota: P: Precipitación, ETP: Evapotranspiración potencial, Kc: Coeficiente de cultivo, ETC: Evapotranspiración del cultivo, R: Reserva de agua disponible, VR: Variación de la reserva de humedad en el suelo, ETR: Evapotranspiración real, Exc: Excedente, D: Déficit, SH: Situación hídrica, Esc: Escorrentía.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Se observa una evapotranspiración del cultivo mayor a las precipitaciones estimadas para los meses de febrero, marzo y abril. Estos datos demostraron que existe un déficit hídrico en el mes de abril y un exceso hídrico que contribuye en la escorrentía superficial desde el mes de junio hasta el mes de enero (Figura 6.6).

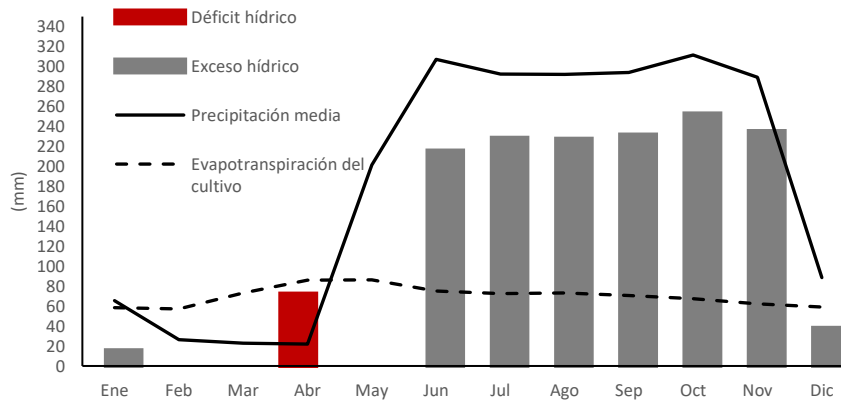


Figura 6.6 Balance hídrico mensual de la subcuenca del río Sábalo construido a partir de los promedios de precipitación, evapotranspiración del cultivo, déficit y exceso hídrico para el período de estudio 2013-2022.
Fuente: Elaboración propia, 2023.

A continuación, se muestran los resultados del balance hídrico del río Guachipelín.

Balance hídrico de la subcuenca del río Guachipelín.

Para la subcuenca del río Guachipelín también se muestra que en el mes de abril las reservas de agua en el suelo se agotan generando un déficit hídrico de 65.88 mm que podría afectar la producción de naranja. Así mismo en esta subcuenca, en los meses de junio a diciembre se presenta un exceso hídrico entre 37 mm y 286 mm que, aunque los meses de enero a marzo sean temporada seca, se mantienen reservas de agua en el suelo que junto a las precipitaciones que se presenten pueden satisfacer las necesidades de agua del cultivo de naranja.

Tabla 6.13 Balance hídrico de la subcuenca del río Guachipelín.

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ETP Diaria (mm)	2.89	3.14	3.63	4.40	4.28	3.85	3.60	3.63	3.63	3.34	3.20	2.92
ETP Corregida (mm)	89.72	87.91	112.48	132.04	132.69	115.40	111.50	112.46	108.78	103.53	95.90	90.62
Kc med	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
ETC	58.32	57.14	73.11	85.83	86.25	75.01	72.47	73.10	70.71	67.30	62.33	58.90
P (mm)	64.44	23.72	22.34	19.95	209.10	298.15	303.06	311.43	318.23	353.71	304.64	96.64
P - ETP	6.12	-33.42	-50.77	-65.88	122.85	223.14	230.59	238.33	247.52	286.42	242.30	37.74
R	140.00	112.70	61.93	0.00	122.85	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00
Variación	0.00	-27.30	-50.77	-61.93	122.85	17.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETR	58.32	57.14	73.54	19.95	86.25	75.01	72.47	73.10	70.71	67.30	62.33	58.90
Exc	6.12					205.99	230.59	238.33	247.52	286.42	242.30	37.74
D				65.88								
SH				-65.88		205.99	230.59	238.33	247.52	286.42	242.30	37.74
Excedente 1/2	3.06					102.99	115.29	119.16	123.76	143.21	121.15	18.87
Esc mes antes	71.69	37.37	18.69	9.34	4.67		51.50	83.40	101.28	112.52	127.86	124.51
Esc total	74.75	37.37	18.69	9.34	4.67	102.99	166.79	202.56	225.04	255.73	249.02	143.38

Nota: P: Precipitación, ETP: Evapotranspiración potencial, Kc: Coeficiente de cultivo, ETC: Evapotranspiración del cultivo, R: Reserva de agua disponible, VR: Variación de la reserva de humedad en el suelo, ETR: Evapotranspiración real, Exc: Excedente, D: Déficit, SH: Situación hídrica, Esc: Escorrenfía.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Al igual que en la subcuenca del río Sábalo, en la subcuenca del río Guachipelín se observa una evapotranspiración del cultivo mayor a las precipitaciones estimadas para los meses de febrero, marzo y abril. Demostrando que existe un déficit hídrico en el mes de abril y un exceso hídrico que contribuye en la escorrentía superficial desde el mes de junio hasta el mes de enero (Figura 6.7).

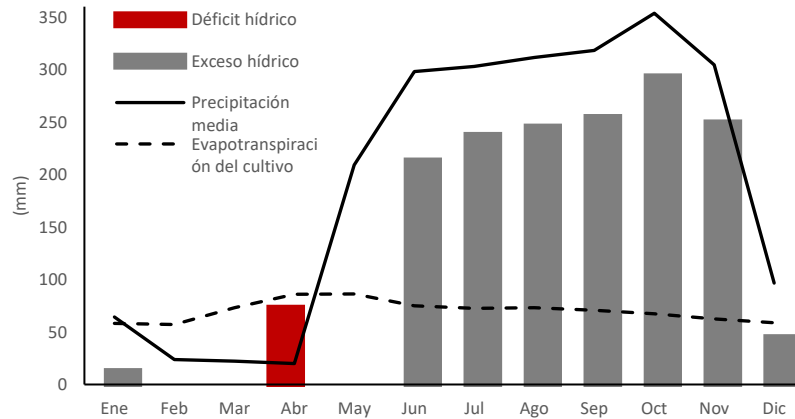


Figura 6.7 Balance hídrico mensual de la subcuenca del río Guachipelín construido a partir de los promedios de precipitación, evapotranspiración del cultivo, déficit y exceso hídrico para el período de estudio 2013-2022.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Todo lo anterior comprendía al objetivo 1, los resultados del objetivo 2 se presentan a continuación.

Revisitando el objetivo específico 2: “Interpretar los valores de precipitación de las subcuencas del Río Sábalo y Río Guachipelín, mediante curvas de Intensidad Duración Frecuencia (Curvas IDF) para comprender la distribución de precipitaciones y registrar su comportamiento en las zonas involucradas con la toma de agua superficial”

- **Precipitaciones máximas mensuales en 24 horas.**

Las precipitaciones máximas mensuales en 24 horas, desde el año de 2013 hasta el 2022 (Tabla 6.14).

Tabla 6.14 Registros pluviométricos 12-7K y Yafa 19 de precipitación máxima (mm/h) promedio anual.

Precipitación máxima promedio anual en 24 horas (mm)		
Año	12-7K	Yafa 19
2013	112.00	150
2014	75.00	70
2015	75.00	95
2016	150.00	150
2017	150.00	150
2018	130.00	130
2019	120.00	85
2020	116.00	140
2021	83.00	100
2022	146.00	122
Máximo	150	150

Fuente: Elaboración propia, 2023.

- **Curvas de Intensidad Duración Frecuencia por el Método Analítico**

Ajuste de los datos a la función de distribución de Gumbel

Mediante este análisis se obtuvo el cálculo de la precipitación máxima en 24h para un período de retorno de 10 años y para obtener la precipitación índice de 60 min de duración y un período de retorno de 10 años. Para ello se utilizaron los datos de los pluviómetros 12-7K y Yafa 19 que se encuentran ubicadas en puntos medios para ambas subcuencas (Tabla 6.15).

Tabla 6.15 Cálculo de las precipitaciones diarias máximas probables mediante Gumbel.

Registro Pluviométrico	Período de retorno	Precipitación para 24h Máxima Probable
12-7K	10 años	154.3265
Yafa 19	10 años	157.9670

Fuente: Elaboración propia, 2023.

A continuación, se muestran los valores de los parámetros k, m y n para la ecuación (5.20) calculados empleando el procedimiento de correlación lineal múltiple descrito por Villón (20016), el cual da cuenta de la relación entre la intensidad horaria y la intensidad de precipitación en 24 horas para cada período de retorno. Estas relaciones permiten la extrapolación a zonas o estaciones que carezcan de registros pluviométricos y serán utilizados en el método analítico.

Tabla 6.16 Cálculo de parámetros k y m por regresión potencial mediante Gumbel.

Parámetros promediados por regresión potencial			
Registro Pluviométrico	K	m	n
12-7K	460.3611	0.141164	-0.61638608809
Yafa 19	474.5771	0.138581	-0.61638608809

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Ecuaciones ajustadas a las curvas IDF reales propuestas para cada uno de los registros pluviométricos estudiados.

Tabla 6.17 Modelos ajustados por registro pluviométrico.

Registro Pluviométrico	Modelo	Años de registro	R ²
12-7K	$I = \frac{460.3611 * T^{0.141164}}{d^{0.61639}}$	10	0.9759
Yafa 19	$I = \frac{474.5771 * T^{0.138581}}{d^{0.61639}}$	10	0.9765

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Según las ecuaciones calculadas se lograron determinar las curvas IDF para distintos períodos de retorno y duraciones por estación. Las intensidades máximas por período de retorno calculadas a partir del registro pluviométrico de 12-7K y (Tabla 6.18).

Tabla 6.18 Intensidades de precipitación máxima (mm/hr) por duración y período de retorno, del registro pluviométrico de 12-7K, método analítico.

Registro pluviométrico de 12-7K (mm/hr)					
Duración en min	Período de retorno (años)				
	T2	T5	T10	T25	T50
5	188.26	214.26	236.28	268.91	296.55
10	122.80	139.76	154.13	175.41	193.44
15	95.65	108.85	120.04	136.62	150.66
20	80.10	91.17	100.54	114.42	126.18
25	69.81	79.45	87.62	99.72	109.97
30	62.39	71.01	78.30	89.12	98.28
35	56.74	64.57	71.21	81.04	89.37
40	52.25	59.47	65.58	74.64	82.31
45	48.59	55.30	60.99	69.41	76.54
50	45.54	51.83	57.15	65.05	71.73
55	42.94	48.87	53.89	61.33	67.64
60	40.70	46.32	51.08	58.13	64.11

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la figura 6.8 se pueden observar las curvas IDF del registro pluviométrico de 12-K obtenidas por el método analítico, registrando su comportamiento en los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. Al construir las curvas IDF fue notorio que las precipitaciones de intensidades bajas y duraciones largas son más frecuentes que las precipitaciones fuertes y de duraciones cortas.

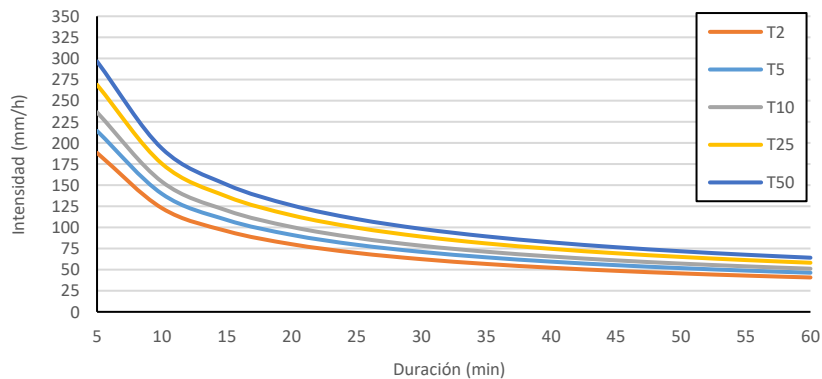


Figura 6.8 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia registro pluviométrico de 12-7K, método analítico.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Las intensidades máximas por período de retorno calculadas a partir del registro pluviométrico de Yafa 19 (Tabla 6.19).

Tabla 6.19 Intensidades de precipitación máxima (mm/hr) por duración y período de retorno, del registro pluviométrico de Yafa 19, método analítico.

Registro pluviométrico de Yafa 19 (mm/hr)					
Duración en min	Período de retorno (años)				
	T2	T5	T10	T25	T50
5	193.73	219.96	242.13	274.92	302.63
10	126.37	143.48	157.94	179.33	197.41
15	98.42	111.75	123.02	139.67	153.75
20	82.43	93.59	103.03	116.98	128.77
25	71.84	81.56	89.79	101.94	112.22
30	64.20	72.89	80.24	91.11	100.29
35	58.38	66.29	72.97	82.85	91.20
40	53.77	61.05	67.20	76.30	84.00
45	50.00	56.77	62.50	70.96	78.12
50	46.86	53.20	58.57	66.50	73.20
55	44.19	50.17	55.23	62.70	69.03
60	41.88	47.55	52.34	59.43	65.42

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la figura 6.9 se pueden observar las curvas IDF del registro pluviométrico de Yafa 19 obtenidas por el método analítico, registrando su comportamiento en los distintos períodos de retorno. Al construir las curvas IDF fue notorio que las precipitaciones de intensidades bajas y duraciones largas son más frecuentes que las precipitaciones fuertes y de duraciones cortas.

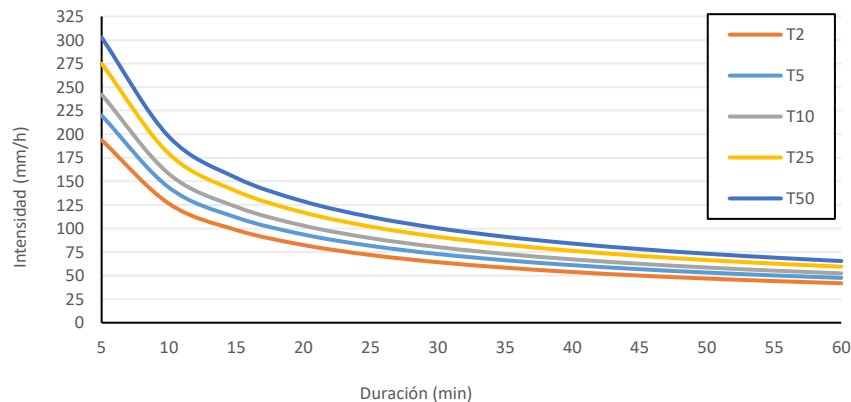


Figura 6.9 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia registro pluviométrico de Yafa 19, método analítico.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Los resultados obtenidos de la precipitación máxima en 24 horas para un período de 10 años a partir de la distribución Gumbel, dan paso para completar los datos necesarios para aplicar la metodología de Frederich Bell a continuación:

- **Curvas de Intensidad Duración Frecuencia por la Metodología Frederich Bell**

A partir del análisis de frecuencia según la distribución Gumbel, se calculó la precipitación máxima en 24h para un período de retorno de 10 años logrando así obtener la precipitación índice de 60 min de duración y un período de retorno de 10 años, fundamental para el cálculo de las ecuaciones y curvas

IDF. Este análisis se realizó utilizando el software Hidroesta 2, al igual que el cálculo de la ecuación de intensidad máxima por medio de la metodología de Frederich Bell (Tabla 6.20).

Tabla 6.20 Resultados de distribución Gumbel y aplicación del método Frederich Bell.

Registro pluviométrico	Precipitación d=60 min T=10 años	Ecuación de Intensidad Metodología Frederich Bell	R ²
12-7K	154.3265	$I = \frac{405.1470 * T^{0.2040}}{d^{0.5535}}$	0.9930
Yafa 19	157.9670	$I = \frac{414.7037.* T^{0.2040}}{d^{0.5535}}$	0.9930

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Por medio de las ecuaciones calculadas utilizando el software Hidroesta 2, se lograron establecer las curvas IDF para distintos períodos de retorno y duraciones por pluviómetro. A continuación, se muestran las intensidades máximas por período de retorno del registro pluviométrico 12-7K que fueron calculadas con las ecuaciones generadas con el modelo de Frederich Bell (Tabla 6.21).

Tabla 6.21 Intensidades máximas (mm/hr) por duración y período de retorno del registro pluviométrico de 12-7K, metodología Frederich Bell.

Registro pluviométrico de 12-7K (mm/hr)				
Duración (min)	Período de retorno (años)			
	T5	T10	T20	T50
10	157.28	181.17	208.68	251.57
20	107.17	123.44	142.19	171.41
30	85.62	98.63	113.61	136.95
40	73.02	84.11	96.88	116.79
50	64.54	74.34	85.63	103.22
60	58.34	67.2	77.41	93.31
70	53.57	61.7	71.08	85.68
80	49.75	57.31	66.01	79.58
90	46.61	53.69	61.85	74.56
100	43.97	50.65	58.34	70.33
110	41.71	48.05	55.34	66.72
120	39.75	45.79	52.74	63.58

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La información respectiva de la tabla anterior genera las curvas IDF para el registro pluviométrico de 12-7K, registrando su comportamiento para los períodos de retorno de 5, 10, 20 y 50 años (Figura 6.10) Donde se estima que para un período de retorno de 5 años se da una precipitación con una intensidad de 157.28 mm/hora en una duración de 10 minutos, para un período de retorno de 10 años se da una precipitación con una intensidad de 181.17 mm/hora en una duración de 10 minutos, para un período de retorno de 20 años se da una precipitación con una intensidad de 208.68 mm/hora en una duración de 10 minutos y para un período de retorno de 50 años se da una precipitación con una intensidad de 251.57 mm/hora en una duración de 10 minutos. Al construir las curvas IDF al igual

que con el método analítico, fue notorio que las precipitaciones de intensidades bajas y duraciones largas son más frecuentes que las precipitaciones fuertes y de duraciones cortas.

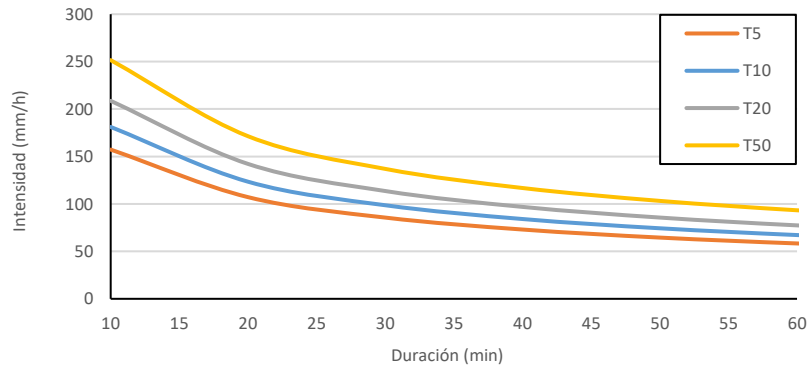


Figura 6.10 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia registro pluviométrico de 12-7K, metodología Frederich Bell.
Fuente: Elaboración propia, 2023.

A continuación, se muestran las intensidades máximas por período de retorno del registro pluviométrico Yafa 19 que fueron calculadas con las ecuaciones generadas con el modelo de Frederich Bell (Tabla 6.22).

Tabla 6.22 Intensidades máximas (mm/hr) por duración y período de retorno del registro pluviométrico de Yafa 19, metodología Frederich Bell.

Registro pluviométrico de Yafa 19 (mm/hr)				
Duración en min	Período de retorno (años)			
	T5	T10	T20	T50
10	160.99	185.44	213.61	257.51
20	109.69	126.35	145.54	175.45
30	87.64	100.95	116.29	140.18
40	74.74	86.09	99.17	119.55
50	66.06	76.09	87.65	105.66
60	59.72	68.79	79.23	95.52
70	54.83	63.16	72.75	87.7
80	50.93	58.66	67.57	81.46
90	47.71	54.96	63.3	76.31
100	45.01	51.84	59.72	71.99
110	42.7	49.18	56.65	68.29
120	40.69	46.87	53.99	65.08

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La información respectiva de la tabla anterior genera las curvas IDF para el registro pluviométrico de Yafa 19, registrando su comportamiento en los diferentes períodos de retorno. Al construir las curvas IDF al igual que con el método analítico, fue notorio que las precipitaciones de intensidades bajas y duraciones largas son más frecuentes que las precipitaciones fuertes y de duraciones cortas (Figura 6.11).

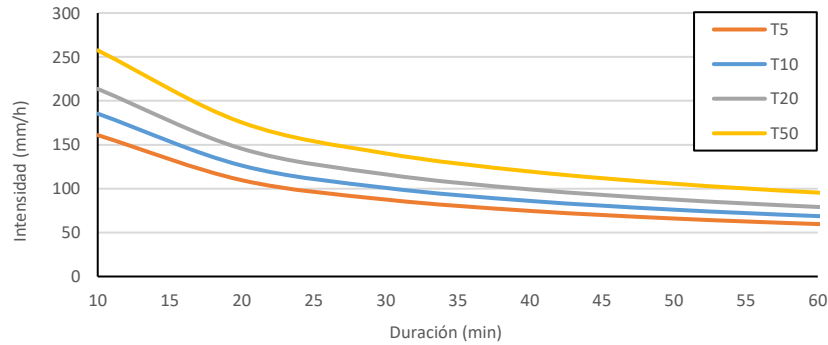


Figura 6.11 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia registro pluviométrico de Yafa 19, metodología Frederich Bell.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El comportamiento de las intensidades a través de la duración de la tormenta modifica en forma apreciable la respuesta de la cuenca tanto en tiempo como en volumen de agua escurrida. Es importante notar que existe diferencia en los valores de intensidad estimados para en los pluviómetros estudiados, mostrando así uniformidad espacial de las intensidades dentro del área de estudio.

Todo lo anterior correspondía a los resultados de acuerdo con el objetivo 2, a continuación, se muestran los resultados del objetivo 3.

Revisitando el objetivo específico 3: “Implementar acciones de mejora que funcionen como una guía para un aprovechamiento óptimo del agua en los proyectos de riego por goteo, que refuerce el conocimiento dirigido al personal de la empresa Del Oro”

Es importante que el personal de la empresa involucrado en la actividad agrícola y el riego por goteo conozcan la situación hidrológica y las necesidades de agua a la que se enfrentan. Es por ello, que se propone presentar este proyecto de estudio hidrológico, donde no solo se estudia la necesidad de agua mensual, sino que también se entrega un análisis de intensidades de precipitaciones máximas probables a determinados años que servirán como línea base para futuros proyectos en la empresa.

Algunas de las razones por las que se desea mostrar el análisis de los resultados del proyecto al personal de la empresa son:

- **La importancia de conocer los temas abordados en este estudio en cuanto al comportamiento hidrológico de las subcuencas en relación con el cultivo de naranja y el riego por goteo.**

En las circunstancias actuales, la necesidad de riego y la disponibilidad del agua son cada vez más críticas, de ahí la importancia de identificar, validar y transferir técnicas y métodos de riego que contribuyan a su conservación, máxime que como factor de producción es vital para la seguridad de los cultivos. Esta información hidrológica generada, se registra y tabula a través del tiempo, generando la información histórica de la zona, para utilizarla al final de un mes, de una cosecha de naranjas, un año

agrícola, según se requiera, promediando y ponderando los resultados, con los cuales se puede proceder y aportar en el cálculo de las eficiencias del riego, cuando éste se necesite.

Los dos factores básicos en el desarrollo del riego son el suelo y los recursos hídricos. Al llevar a cabo la determinación de los requerimientos unitarios de agua en un sistema de riego, encontramos los siguientes escenarios: cuando la superficie de la tierra es el factor limitante, la demanda del agua determinarán la cantidad aprovechable y; si el recurso hídrico es el factor limitante, los requerimientos unitarios determinan el tamaño del área a regar.

- **Fomentar las ventajas de elaborar un balance hídrico para la programación de del riego por goteo y que además se podrá aplicar la metodología a otras áreas bajo similares condiciones.**

El uso del recurso hídrico se ve limitado por tres aspectos fundamentales: la contaminación, la sobreexplotación y la alteración del ciclo hidrológico. Dada esta situación, han surgido una serie de acciones tendientes a buscar la forma de hacerle frente a esa amenaza, entre ellas una muy importante es el uso racional que se le pueda dar al agua en sistemas agro-productivos.

- **Elaboración de un plan de acciones de mejora como guía para un aprovechamiento óptimo del agua en los proyectos de riego por goteo (ver Anexo 11).**

1. Revisar la base de información de los factores meteorológicos, generada del período de estudio (2013 - 2022) ya que permite tomar las decisiones asociadas a la gestión del recurso.
2. Determinar el estado actual del comportamiento hidrológico de área en las que se encuentran los cultivos de naranja (Reforzar cada cierto tiempo).
3. Realizar un balance hídrico del mes de abril para contabilizar el agua antes de iniciar el riego por goteo.
4. Tomar en cuenta las curvas IDF del estudio hidrológico si se desea implementar cualquier obra hidráulica dentro del área de estudio (como la implementación de obras de calibración en la toma de agua para riego por goteo).

Al presentar los resultados de este proyecto al personal de la empresa, se pretendió crear conciencia sobre la naturaleza y la fragilidad del agua y como a través de los años se ésta se ve afectada.

Todo lo anterior corresponde a la presentación de los resultados obtenidos de acuerdo con los objetivos específicos planteados, a continuación, se muestran los análisis correspondientes a la discusión de los resultados con respecto a los principales hallazgos, a los objetivos específicos y a la metodología empleada.

6.2 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos, se analizaron y discutieron a través de las teorías de diversos autores y trabajos de investigación de relevancia científica. Todos estos referidos los temas investigados en este proyecto.

6.2.1 Respecto a principales hallazgos

En esta sección, se detallará y discutirá, mediante subsecciones, los principales hallazgos referidos en la sección de resultados.

Adicionalmente a los resultados correspondientes a los objetivos específicos planteados, se logra identificar, durante las visitas de campo, la revisión bibliográfica, una serie de hallazgos, los cuales se encuentran relacionados a:

- **Estudio morfológico de las subcuencas**

Al realizar el análisis de delimitación del área de estudio se encontró que la información geoespacial y la información hidrogeológica es compleja y no concuerda al momento de ajustarse en un solo perímetro. Esta situación puede conllevar a posibles errores en los análisis de datos que se generaran en este proyecto, por lo que se procedió a dividir los análisis en subcuencas en las que se encuentran las fincas en estudio (Anexo 8).

El tipo de suelos de las subcuencas en estudio basado en el Atlas de Costa Rica (2014), y análisis de laboratorios realizados por la empresa, son caracterizados por ser suelos de textura franco arenoso, franco arcilloso y arcilloso. El uso actual del suelo de la zona en estudio corresponde en su mayoría a cultivo permanente de los árboles de naranja, pasto y se puede encontrar bosque natural protegido por el Área de Conservación Guanacaste (Anexos 1 y 2).

Ambas subcuencas presentaron condiciones de pocas pendientes, zonas bajas y planas que influyen en la velocidad de escorrentía, es decir el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer la totalidad del agua superficial y subterránea. Este análisis morfológico dio paso a la necesidad de generar información más detallada del comportamiento hidrológico de las subcuencas para darle un óptimo aprovechamiento del recurso hídrico en el riego por goteo de los cultivos de naranja valencia.

- **Precipitación media**

Las estaciones meteorológicas existentes cercanas al área de estudio son pocas y con escasa información, los pluviómetros de la empresa tenían meses o años vacíos por lo que se hizo completación y validación de datos. Se descartaron estaciones meteorológicas que por su lejanía, diferencias características o falta de datos no se logra tomar en cuenta (Anexo 8 y 9).

Mediante la organización del registro de precipitaciones, se obtuvo que la precipitación media más alta se dio en el mes de octubre y fue el día 04 de octubre de 139 mm/día, mientras que la precipitación media más baja se dio en el mes de abril marcando 0 mm/día, esta estimación está dada para ambas subcuencas. Esta organización de datos formó parte de la generación de información registrada para la carpeta de archivos entregable a la empresa.

Los resultados de la precipitación media mensual aplicando la metodología de promedio aritmético mostraron que el mes más seco es el mes de marzo, sin embargo, las otras dos metodologías mostraron el mes de abril como el más seco. Basándose en el estudio de Manzo, et, al (2015) y el estudio de Solano y Villalobos, (2000) los meses más secos son febrero, marzo y abril por lo que el resultado es aceptable.

Los resultados de la aplicación de las tres metodologías para el cálculo de la precipitación media anual se encuentran en el rango de región y subregión del sinóptico-climático del IMN, en sus estudios realizados por Solano y Villalobos, (2000) y Ramírez, (n.d.), en sus estudios Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica y el Estudio sobre veranillos en Costa Rica, respectivamente. Ellos mencionan que la precipitación media anual que recibe esta región y subregión va desde los 2000 mm y 2462 mm, los resultados de la metodología de isoyetas se encuentran en este rango por lo que se procedió a utilizar las precipitaciones medias calculadas a partir de la metodología de isoyetas para los diferentes cálculos de este proyecto.

- **Temperatura media mensual**

Las temperaturas medias mensuales obtenidas concuerdan con el estudio realizado por el IMN (n.d) del Clima del Pacífico Norte en un período de estudio 1961-1990, en el cual se presentaron el mes de abril con las temperaturas más elevadas y determina que el 79% de los eventos extremos secos están asociados con El Niño, mientras que la fase fría La Niña, tienen 60% de probabilidad de producir escenario lluvioso. Un evento El Niño puede causar sequías en el Pacífico Norte, con reducción promedio de lluvia anual de un 26% afectando principalmente el segundo período lluvioso. La temperatura durante estos eventos puede aumentar más de 1°C.

- **Evapotranspiración del cultivo**

Mediante de las temperaturas medias estimadas se determinó la evapotranspiración potencial y a partir del coeficiente de cultivo medio de 0.65 propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2006). Para ello se tomó en consideración la fase fenológica de 70% de cobertura del cultivo cítrico, con una edad mayor a 3 años con una altura de 4 metros aproximadamente y sin cobertura activa del suelo. Finalmente se determinó la evapotranspiración del cultivo y se obtuvo que en los meses en que los cultivos experimentan una mayor evapotranspiración son los meses de abril

y mayo, esto se presenta ya que en el mes de abril las reservas de agua en el suelo llegan a 0 mm, por lo que en el mes de mayo se ve afectada la evapotranspiración del cultivo aunque se presenten precipitaciones, lo que indica que existe un déficit que es la cantidad de agua que necesita el cultivo respecto al ETC que se recomienda que sea aplicado en forma de riego. Estas condiciones se dan en ambas subcuencas.

- **Balance hídrico**

El balance hídrico se realizó a nivel de cuenca por lo que su capacidad de campo se analizó a partir de las texturas de suelo y vegetación predominantes en ella, ante esto, el valor propuesto es de 140 mm el cual es alto y se muestra como modelo para su aplicación a zonas específicas como son los lotes de las fincas donde se tiene textura de suelo y vegetación únicas en cada uno de ellos.

Partiendo en el análisis de precipitación y evapotranspiración de las subcuencas se define una localidad húmeda, tal y como se establece en el documento de Solano y Villalobos, (2000). Las precipitaciones mensuales estimadas indican una disminución desde el mes de enero hasta el mes de abril, siendo el mes de abril el más seco e indicador del final de la época seca. Las precipitaciones incrementan desde el mes de mayo hasta el mes de diciembre, siendo el mes de octubre el más lluvioso. Estas condiciones se presentan en ambas subcuencas.

En el mes de abril se presenta una escasez hídrica donde la precipitación natural no es suficiente para cubrir los requerimientos hídricos del cultivo de naranja. A demás se observa que en los datos de la última década se han presentado períodos secos en meses tradicionalmente húmedos por lo que el presente estudio se presenta como una línea base y un balance hídrico como garantía para contrarrestar aquellos períodos secos que pueden afectar la producción y la rentabilidad del cultivo.

El déficit hídrico mensual obtenido en el mes de abril es de 63.90 en la subcuenca del río Sábalo y de 65.88 en la subcuenca del río Guachipelín. Este valor muestra un panorama de la situación hídrica a la que se enfrentan las subcuencas ante la variabilidad climática hasta el momento, la cual va creciendo y puede generar mayor déficit hídrico a través de los años por lo que se promueve la importancia y necesidad de contabilizar el agua de manera constante.

- **Curvas IDF**

Para este tipo de análisis de precipitaciones se recomienda trabajar con una serie de datos mayor a los 25 años para una mejor confiabilidad de los resultados. En este caso se dispone de datos de precipitación diarios, con un registro histórico de 10 años, se utilizan los registros de dos pluviómetros para comparar la distribución de las precipitaciones y se obtiene una buena distribución en ambas subcuencas. Al

construir las curvas IDF mediante el método analítico y el método de Frederick Bell fue notorio que las precipitaciones de intensidades bajas y duraciones largas son más frecuentes que las precipitaciones fuertes y de duraciones cortas

Se generó un Excel automatizado con la distribución de Gumbel y regresiones por período de retorno y diferentes parámetros para realizar los análisis de las curvas IDF a partir de las ecuaciones de intensidad generadas para cada caso. Una estación representa aproximadamente 25 km² por lo que el presente estudio propone el estudio de dos estaciones o pluviómetros.

Se obtuvo la magnitud de diferentes tormentas y su frecuencia o período de retorno en proyecciones de 2, 5, 10, 20, 25 y 50 años siendo este un coeficiente de seguridad que se da en cualquier obra o años de vida probable. A partir de estos valores se pueden utilizar estas curvas IDF como valores de diseño para poder determinar franjas de inundación.

6.2.2 Respecto a los objetivos

Al concluir con el proyecto, se logró cumplir con la totalidad de los objetivos planteados. La síntesis de los resultados en función de los objetivos se desglosa a continuación:

- **Objetivo 1:** La elaboración del balance hídrico mensual y el análisis de las características hídricas y morfológicas aporta a la empresa una línea base para la dosificación y programación de la actividad agrícola de riego por goteo; de esta manera se cumple el objetivo 1.
- **Objetivo 2:** El registro del comportamiento de las precipitaciones mediante las curvas de Intensidad Duración Frecuencia, aporta valores de diseño para poder determinar diferentes interpretaciones no solo en las tomas de agua superficial, sino también en futuras obras hidráulicas dentro del área de estudio; cumpliéndose así el objetivo 2.
- **Objetivo 3:** Se generó un plan estratégico acciones de mejora que funciona como guía propuesta de implementación para el aprovechamiento óptimo del agua en los proyectos de riego por goteo, como parte del reforzamiento de los resultados de este objetivo se realizó la presentación de los principales hallazgos reforzando el conocimiento de la parte hidrológica de la agronomía al personal de la empresa Del Oro; que define el cierre de la metodología.

6.2.3 Resultados respecto a la metodología utilizada

La metodología expuesta en el capítulo 5 del proyecto fue funcional para el cumplimiento de los objetivos planteados. Aun así, se identificó una oportunidad de mejora, en relación con el balance hídrico mensual y se modificó el factor climático de la evapotranspiración real o actual por la evapotranspiración del cultivo.

- **Método para elaborar el balance hídrico**

La elección de los métodos para el cálculo de los factores que influyen en la determinación del balance hídrico superficial. Así como la elección del método de balance hídrico superficial adaptado a las necesidades del proyecto, se seleccionaron según los datos disponibles y se realizaron ajustes de acuerdo con el cultivo de naranja y los suelos del área de estudio. El método para calcular los balances hídricos basado en el modelo de Thornthwaite y Mather junto con la estimación de la evapotranspiración potencial mediante la ecuación de Thornthwaite y la estimación de la evapotranspiración del cultivo, a su vez esta última determinada con los coeficientes Kc propuestos por Allen *et. al.* (2006), para cada fase fenológica del cultivo, proporcionó una estimación confiable de la distribución hídrica de las subcuencas Sábalo y Guachipelín, brindando información útil para el establecimiento de acciones primarias del manejo de riego por goteo, así como para la caracterización de la seguridad hídrica de la zona.

- **Métodos para elaboración de curvas de intensidad duración frecuencia.**

La metodología empleada fue con base a los conocimientos de la autora con respecto a la utilización de Excel e Hidroesta donde se emplearon diferentes cálculos estadísticos de distribuciones, regresiones y factores para las ecuaciones de intensidad de cada caso de estudio. Las curvas IDF generadas mostraron la presencia de altas intensidades de precipitación en ambos pluviómetros y aplicando las dos metodologías, con valores de más de 150 mm/hr en 10 minutos en los diferentes períodos de retorno.

Finalmente se puede observar que las curvas IDF generadas mediante el método analítico presenta intensidades máximas más elevadas en comparación a las resultantes de la metodología de Frederich Bell que son más bajas. Aunque estos modelos incrementen los resultados de las intensidades, estas obtienen un resultado más cercano a la realidad.

- **Metodología para la propuesta de acciones de mejora**

La elaboración un plan de acciones de mejora como guía para un aprovechamiento óptimo del agua en los proyectos de riego por goteo, además de la presentación de los resultados al supervisor de la empresa Del Oro para la aprobación y el intercambio de ideas fue un aporte importante que dejó huella en la empresa, ya que se puede utilizar esta información en futuras planificaciones de diferente índole como ampliación de cultivos, aplicación de metodología de este proyecto en el estudio hidrológico de otras fincas y aplicar la información como aporte a más proyectos. Al finalizar con esta metodología, dio paso a la redacción y análisis de las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones

A continuación, se presentan las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas del presente proyecto de investigación.

7.1 Conclusiones

1. Se organizó una base de datos con información del comportamiento hidrológico en relación con los requerimientos hídricos de los cultivos de naranja.
2. Se generó información hidrológica sobre la disponibilidad de agua, procesos de evaporación y los patrones de precipitación de las subcuencas que contribuyen a la empresa a diseñar estrategias más eficientes y sostenibles para el uso del recurso hídrico para riego por goteo a los cultivos de naranja y evitar la sobreexplotación de los recursos hídricos.
3. Se generó información complementaria como cartografía actualizada, identificación de las propiedades físicas de los suelos, delimitaciones de áreas de interés, que aportan en la planificación futura del uso de suelo en las fincas donde se realizan las actividades agrícolas.
4. El estudio permitió comprender el comportamiento hidrológico de los últimos 10 años, lo que es esencial para la planificación de riego por goteo, ofreciendo una mayor resiliencia frente a condiciones climáticas extremas, contribuyendo a una gestión más efectiva del recurso hídrico incluso en periodos de sequía o lluvias intensas.
5. Mediante la guía propuesta de acciones de mejora se contribuye al desarrollo y fortalecimiento del conocimiento del comportamiento hidrológico y se sugieren pasos a seguir para el aprovechamiento óptimo del agua para riego por goteo en el área de estudio y que se podrá aplicar en otros lugares.

En conjunto, este estudio proporciona una base sólida para la toma de decisiones en la planificación de riego por goteo en cultivos de naranja, en las subcuencas del río Sábalo y río Guachipelín, contribuyendo al desarrollo de la empresa Del Oro y al aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos.

7.2 Recomendaciones

1. Implementar análisis de sequías meteorológicas en las subcuencas, así como también realizar proyecciones para identificar eventos moderados, severos y extremos.
2. Implementar protocolos de monitoreo continuo como evaluar niveles de precipitación, evaluar la calidad del agua y la disponibilidad de agua en las subcuencas de las cuales se abastece la empresa.
3. Desarrollar estrategias efectivas de almacenamiento de agua que aprovechen los periodos de lluvia intensa para crear reservas estratégicas. Esto puede incluir embalses o sistemas de captación de aguas de lluvia que ayuden a mitigar los impactos de sequías estacionales.
4. Implementar programas de educación y capacitación dirigidos a tanto al personal involucrado en los proyectos de riego de la empresa, como a comunidades locales y agricultores del área sobre la importancia del riego eficiente, la conservación del agua y las prácticas agrícolas sostenibles para que en conjunto contribuyan en la conservación de los recursos hídricos de las cuencas ya que el principal uso de suelo en la zona es la agricultura.
5. Se recomienda la continuación de investigaciones para monitorear los cambios en los patrones de precipitación y condiciones hidrológicas a lo largo del tiempo, la actualización constante de datos respaldará la toma de decisiones basada en evidencia y permitirá ajustes a las estrategias de planificación del riego por goteo y el conocimiento de las necesidades hídricas del cultivo de naranja.

Bibliografía

- Allen, R. y Pruitt, W. (1991). FAO-24 Factores de evapotranspiración de referencia. Revista de Ingeniería de Riego y Drenaje, v. 117, n. 5, p. 758-773
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (1998). Evapotranspiración de cultivos - Directrices para calcular las necesidades de agua de los cultivos. Documento de riego y drenaje de la FAO 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. [consulta: 11 octubre, 2023].
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos del cultivo. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. [consulta: 12 junio, 2023].
- Álvarez, D. (2023). Estudio hidrológico de las subcuencas del río Sábalo y río Guachipelín para optimizar la planificación de riego por goteo en el cultivo de naranja (*Citrus sinensis*) en la empresa Del Oro, Guanacaste, Costa Rica. [comunicación personal] 10 junio 2023.
- Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (2021). Guía Para la elaboración de un plan de mejoras. V.1.0 - Febrero. Madrid, España. [en línea] disponible en <https://www.unirioja.es/servicios/opp/acr/doc/GPlanMejoraD-v1.0-2021-02.pdf>
- Aparicio, M. (1992). Fundamentos de hidrología superficial. 1992, Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- Aravena, D., Ausensi, P., Pizarro, R., Sangüesa, C., León, L., y Balocchi, F. (2009). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región del Maule, Chile. 1.
- Baltodano, F. (2020). Generación de curvas de intensidad-duración-frecuencia del período de 1999-2019, para la zona de influencia del proyecto abastecimiento de agua para la cuenca media del río Tempisque y comunidades costeras (PAACUME). Informe de práctica profesional supervisada para optar por el grado de bachillerato en Ingeniería Hidrológica. Universidad Nacional de Costa Rica. Liberia, Guanacaste, Costa Rica.
- Bateman, A. (2007). Hidrología básica y aplicada. [en línea] disponible en <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia> [consulta: 6 abril, 2023]
- Bernabé, M., Pineda, W., Alanoca, B. y Collantes, N. (2010). Estudio Hidrológico y Ubicación de la Red de Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Río Rímac. Lima, Perú. [en línea] disponible en <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/3030> [consulta: 6 abril, 2023]
- Calvo, J. (1996). Principios de Hidrología Forestal Tropical. Manual del Curso. ITCR. Escuela de Ing. Forestal. Cartago, Costa Rica. 136 p.

- Campos, A. (1992). Procesos del Ciclo Hidrológico. San Luis de Potosí: Editorial Universitaria Potosina.
- Cardona, B. (2012). Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas [en línea] disponible en <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf> [consulta: 6 abril, 2023].
- Castillo, A., Delgado, J. Blanco, E. (2019). Efecto del punto de liberación del estrés hídrico sobre la fenología, la fisiología, el rendimiento y la calidad de naranja dulce (*Citrus sinensis* Osb. Var. Valencia) injertada sobre dos patrones contrastantes en el trópico húmedo. [en línea] disponible en <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglefndmkaj/https://www.life-rid.com/wp-content/uploads/2020/07/Efecto-del-punto-de-liberacio%CC%81n-del-estre%CC%81s-hi%CC%81drico-sobre-la-fenologi%CC%81a-la-fisiologi%CC%81a-el-rendimiento-y-calidad-de-la-naranja-dulce...pdf> [consulta: 28 mayo, 2023].
- Chow, V., Maidment, D., Mays, L., y Saldarriaga, J. (1994). Hidrología aplicada (No. 551.48 C4H5).
- Córdova, M. (2016) Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas [en línea] disponible en https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26 [consulta: 6 abril, 2023].
- Dirección de Aguas (2023). Funciones. [en línea] disponible en <https://da.go.cr/funciones/> [consulta: 31 mayo, 2023].
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. (1977). Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio de Riego y Drenaje de la FAO No. 24 (FAO-24). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.
- Doorenbos, J. y Kassam, A. (1979). Yield response to water. Estudio de Riego y Drenaje de la FAO No. 33 (FAO-33). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.
- Fundación Global Nature (n. d). Cultivos permanentes. Ficha técnica de biodiversidad. España. [en línea] disponible en https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/olives_wine.pdf [consulta: 23 mayo, 2023].
- Godinez, J. (2018). Disponibilidad del recurso hídrico en la subcuenca del río Corredores para establecer un mecanismo de control en el aprovechamiento del caudal disponible, mediante un balance hídrico superficial e integrado. [en línea] disponible en <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9885> [consulta: 30 mayo, 2023].
- Harold, H. (1929). El cultivo de las plantas cítricas. [en línea] disponible en <https://ufdc.ufl.edu/AA00083627/00001> [consulta: 6 abril, 2023].
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. disponible en

<https://www.inamhi.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/ESTUDIO_DE_INTENSIDADES_V_FIN_AL.pdf> [consulta: 31 mayo, 2023].

Instituto Meteorológico Nacional (n.d). Regiones climáticas de Costa Rica. Región pacífico norte período 1961 -1990. Costa Rica. En línea. Disponible en <<https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/PacificoNorte.pdf/4a0e8960-8c51-4390-8a8d-73d9d825d59b>>

La Gaceta (2023). Cambio en combustibles en estaciones de servicio y terminales de venta: Rige a partir del 07 de junio del 2023. La Gaceta No.100, del 06 de junio del 2023. [en línea] disponible en <<https://www.recope.go.cr/productos/precios-nacionales/tabla-precios/>>

Martín, R., Sosa, J., Maass, M., Luna, J., Meráz, A. y Flores, E. (2015). Comparación de métodos para estimar disponibilidad hídrica en cuencas forestales. Terra Latinoamericana, vol. 33, núm. 1, enero-marzo, 2015, pp. 17-26 Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.

Meléndez, F. (2021). “Hidrología: definición, clasificación y variables”, Advance, 17 de septiembre. Disponible en <<https://somosadvance.com/expertise/hidrologia/#:~:text=Hidrolog%C3%ADa%20agr%C3%ADcola,de%20regiones%20%C3%A1ridas%20y%20semi%C3%A1ridas.>> [consulta: 6 abril 2023].

Ministerio de Ambiente (2018). Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del río La Vieja. [en línea] disponible en <https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/La%20Vieja%20-%20POMCA%20en%20Ajuste/Fase%20Diagnostico/7_CapituloI_Diagnostico_Morfometria.pdf> [consulta: 6 abril 2023].

Ministerio de Hacienda (2022). Impuesto sobre el valor agregado. [en línea] disponible en <https://www.hacienda.go.cr/>

Monsalve, G. (1999). Ingeniería en la hidrología. Escuela Colombiana de Ingeniería. 59.p.

Muñoz, J, y Zamudio, E. (2018). Regionalización de ecuaciones para el cálculo de curvas de intensidad, duración y frecuencia mediante mapas de isolíneas en el departamento de Boyacá. Tecnura, 22(58), 53-64.

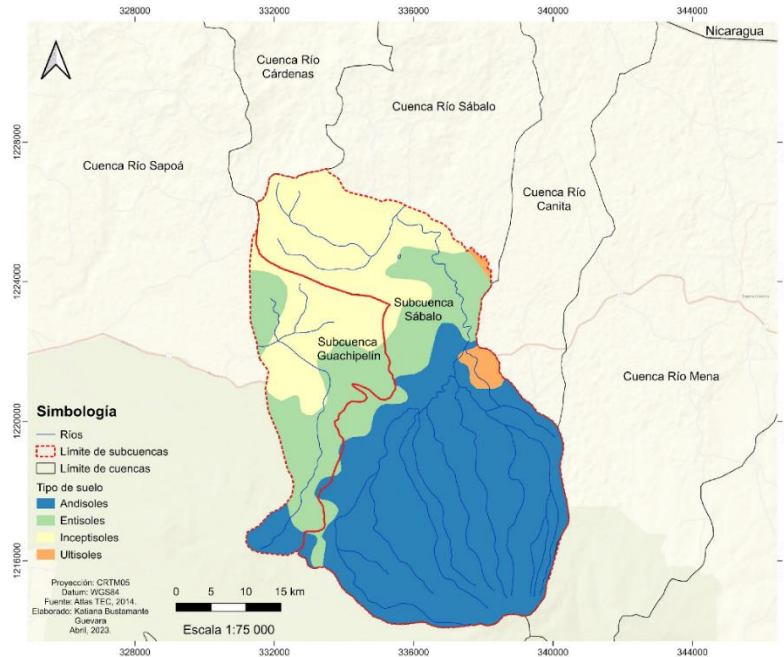
Ordóñez, J. (2011). ¿Qué es cuenca hidrológica? Sociedad Geológica de Lima. PP 24.p. [en línea] disponible en <https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015). Permeabilidad del suelo. [en línea] disponible en: http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.ht

- Ortiz, J. (2021). Modelación hidrológica de la subcuenca del río Balsar en el distrito de Ciudad Cortés. Cartago, Costa Rica. [en línea] disponible en <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12362/TFG_Joselyn_Susana_Ortiz_Tencio_Modelaci%C3%B3n....pdf?sequence=1&isAllowed=y> [consulta: 30 mayo, 2023].
- Pérez, J. (1979). Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas, Venezuela. 38.p.
- Piñeiro, S. (2021). Propuesta de control de accidentabilidad para los períodos de cosecha de naranja en finca Oros de la empresa Del Oro S.A, basada en aspectos de la norma INTE/ISO 45001:2018. Proyecto de graduación para optar al grado de licenciatura en Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Plúa, J. (2021). Curvas IDF mediante el método de Pearson para la cuenca hidrográfica MA-01 del Sur de Manabí, caso Subcuenca del río Jipijapa. Manabí, Ecuador. [en línea] disponible en <<http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2921?mode=full>> [consulta: 6 abril 2023].
- Comisión Nacional de Riego (2016). Boletín informativo Coeficiente de cultivo (Kc). Santiago, Chile: Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agro climatología. [en línea] disponible en <http://www.sepor.cl/informacion_boletines/S106_Boletin_Coeficiente_de_cultivo.pdf> [5 abril, 2023].
- Ramirez, P. (n.d.) Estudio sobre veranillos en Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería e Instituto Meteorológico Nacional. Costa Rica. Nota de investigación N° 5.
- Rodriguez, A. (2022). Sistema de riego por goteo y fertirriego automatizados con sensores de humedad y telemetría para maíz (zea mays) Jicaral, Puntarenas. [en línea] disponible en <<https://repositorio.utn.ac.cr/bitstream/handle/20.500.13077/745/SISTEMA%20DE%20RIEGO%20OPOR%20GOTEO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> [consulta: 31 mayo, 2023].
- Rojas, N. (2011). Curvas de Intensidad Duración Frecuencia de algunas estaciones meteorológicas automáticas. Departamento de climatología e investigaciones aplicadas MINAET-IMN.
- Sánchez, J. (n.d.) Precipitaciones. Dpto. Geología. Universidad de Salamanca, España. [en línea] disponible en <<http://hidrologia.usal.es>. > [consulta: 31 mayo, 2023].
- Santillán, E., Davila, G., de Anda, J. y de Jesús, J. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonas, Veracruz, México Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, vol. 8, núm. 3, pp. 104-117 Universidad de Taubaté, Brasil
- Sapag, N., Sapag, R. y Sapag, J. (2014). Preparación y evaluación de proyectos. (6ª. ed.). México: McGRAW-HILL/Interamericana Editores. [en línea] disponible en: <https://n9.cl/sxwab> [consulta: 05-06-2023].

- Secretaría Técnica Nacional Ambiental (2016). Resolución comisión plenaria proyectos de muy bajo impacto, N° 2373-2016-SETENA. [en línea] disponible en: <https://www.setena.go.cr/Downloads/documentos/Normativa/RES-2373-2016.pdf> [consulta: 06-06-2023].
- Sibaja, M. (2013). El crecimiento urbano y la producción hídrica en la cuenca del río Porrosatí, Provincia de Heredia, Costa Rica. Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Geografía. Universidad Nacional.
- Solano, J. y Villalobos, R. (2000). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. San José: Instituto Meteorológico Nacional. Instituto Meteorológico Nacional. [en línea] disponible en: <www.imn.ac.cr. > [consulta: 31 mayo, 2023]
- Toledo, N. (n.d). Población y Muestra. Universidad Autónoma del Estado de México. [en línea] disponible en: <<https://core.ac.uk/download/pdf/80531608.pdf> > [consulta: 06 junio, 2023].
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- Torres, J., Cruz, R. y Villegas, F. (1996). Avances técnicos para la programación y manejo del riego en caña de azúcar. Colombia, CENICANA. [en línea] disponible en <https://www.cenicana.org/pdf_privado/serie_tecnica/st_33/st_33.pdf> [consulta: 01 junio, 2023].
- Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. (2018). Manual de hidroesta. Facultad de Ingeniería Civil. Lambayeque, Perú. 1.p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2007). Balance hídrico superficial de Costa Rica. 1970-2002. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°10
- Villón, M. (2004). Hidrología. Primera edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Villón, M. (2006). Hidrología Estadística. Primera edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Villón, M. (2005). HidroEsta, software para cálculos hidrológicos. *Revista Tecnología En Marcha*, 18(2), pág. 67. Recuperado a partir de https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/211
- Vision, W. (2004). Manual de manejo de cuencas. San Salvador: World Vision. Disponible en https://www.uv.mx/oabcc/files/2018/11/MANUAL-DE-MANEJO-DE-CUENCAS_COMPLETO.pdf

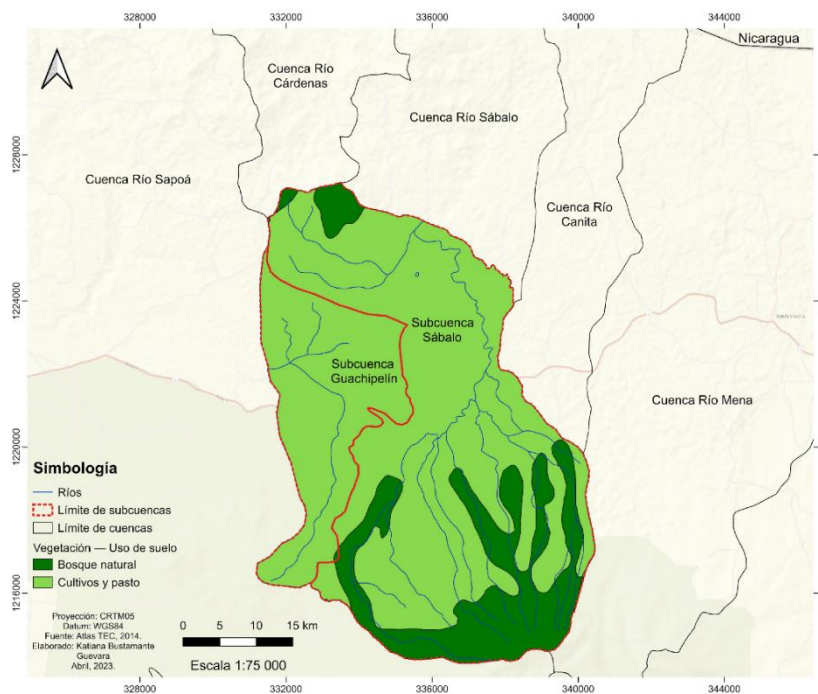
Anexo 1



Anexo 1 Mapa de suelos predominantes de las subcuencas en estudio.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

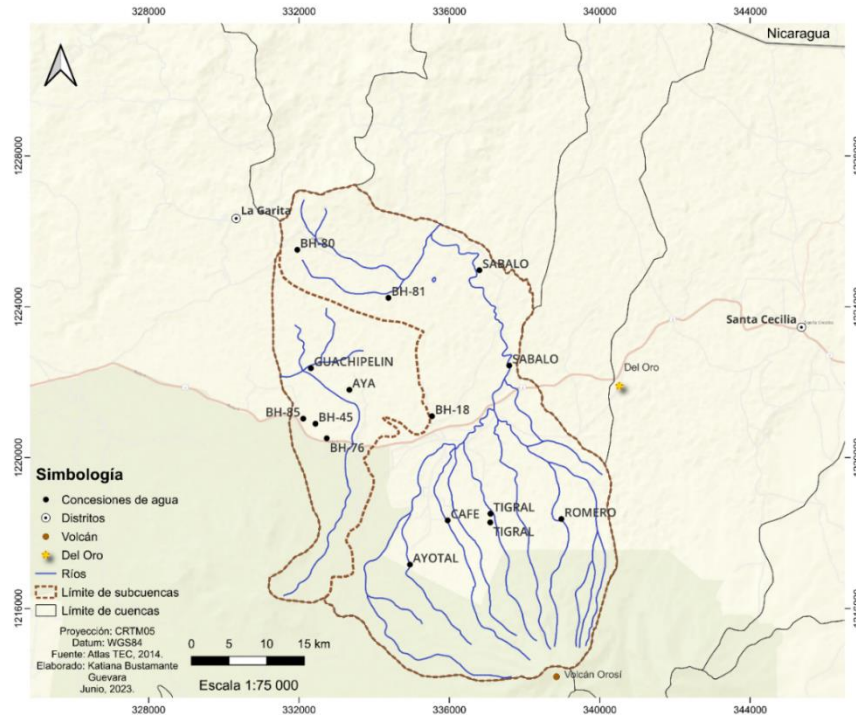
Anexo 2



Anexo 2 Mapa de usos de suelo predominantes de las subcuencas en estudio.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Anexo 3



Anexo 3 Concesiones de agua otorgadas dentro de las subcuencas en estudio.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Anexo 4

Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Norte	50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70
	45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
	40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
	35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
	30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
	25	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.71	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
	20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
	15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
	10	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
	5	1.00	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
0	1.02	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	

Anexo 4 Factor de corrección f, por duración media de las horas de sol expresada en unidades de 30 días con 12 horas de sol cada una.

Fuente: Villón, 2004.

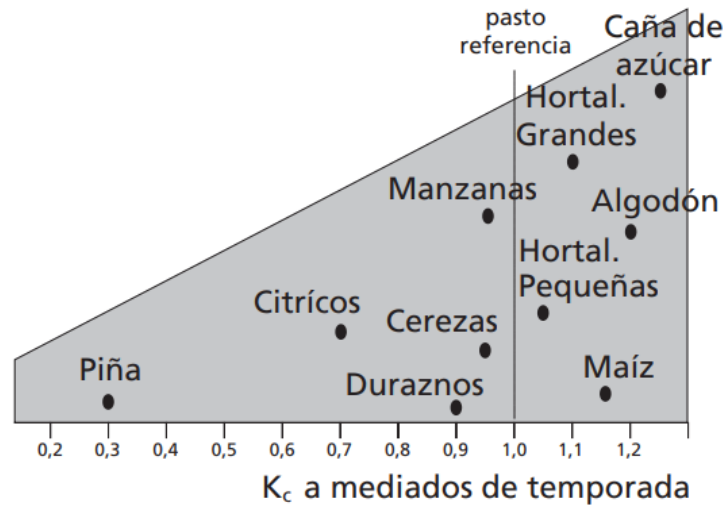
Anexo 5

Características	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Árboles grandes y maduros que proporcionan un 70% de cobertura de árbol en suelo, cultivados limpiamente	0.75	0.75	0.70	0.70	0.70	0.65	0.65	0.65	0.65	0.70	0.70	0.70
Sin control de malezas	0.9	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85

Anexo 5 Requerimientos de agua de los árboles cítricos, coeficiente de cultivo por mes.

Fuente: Doorenbos y Kassam, 1979. p.84

Anexo 6



Anexo 6 Valores típicos de Kc para diferentes cultivos completamente desarrollados.

Fuente: Allen, *et al.* 2006. p. 92.

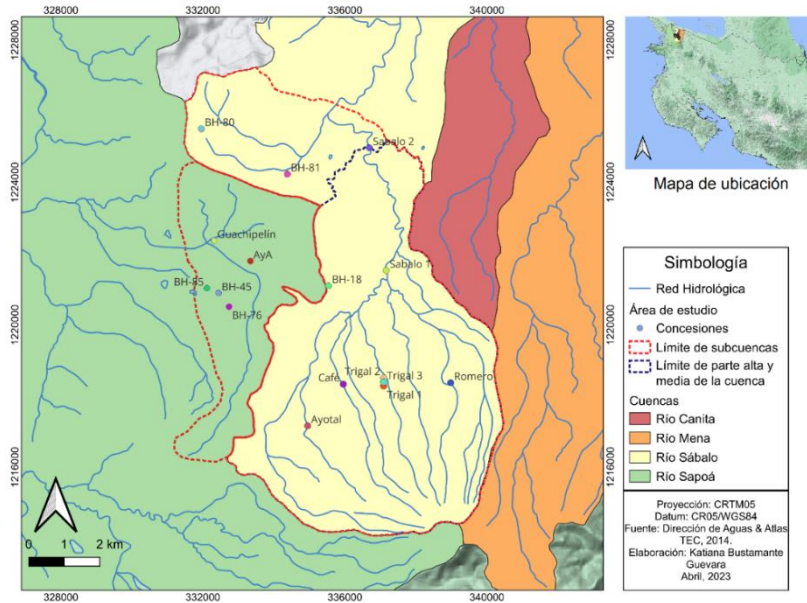
Anexo 7

Cultivo	kc ini	kc med	kc final	altura de planta
Cítricos, sin cobertura del suelo				
70% cubierta vegetativa	0.7	0.65	0.7	4
50% cubierta vegetativa	0.65	0.6	0.65	3
20% cubierta vegetativa	0.5	0.45	0.55	2
Cítricos, con cobertura activa del suelo o malezas				
70% cubierta vegetativa	0.75	0.7	0.7	4
50% cubierta vegetativa	0.8	0.75	0.8	3
20% cubierta vegetativa	0.85	0.85	0.85	2

Anexo 7 Coeficientes de cultivos para las diferentes fases fenológicas del cultivo.

Fuente: FAO, 2014.

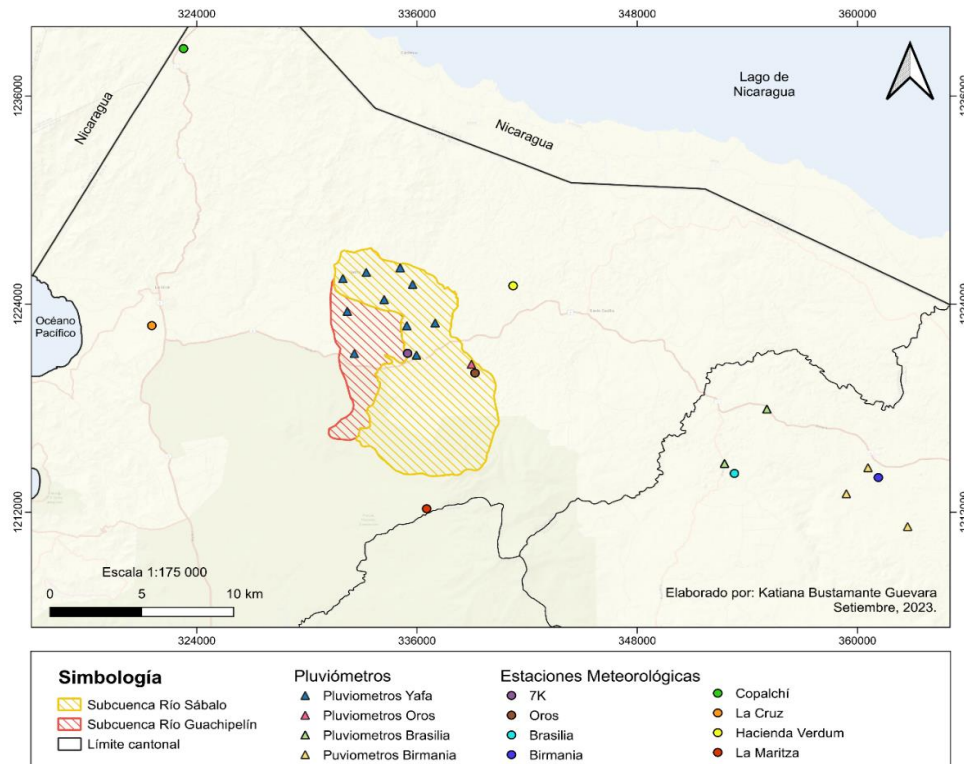
Anexo 8



Anexo 8 Información geoespacial del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Anexo 9



Anexo 9 Estaciones meteorológicas y pluviómetros disponibles.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Anexo 10

Estación meteorológica	Registro histórico	Factores climáticos mensuales disponibles
7K	2011-2022	Precipitación-Temperatura
Oros	2019-2022	Precipitación-Temperatura-Humedad
Hacienda Verdum	2015-2022	Precipitación-Temperatura-Humedad
La Maritza	2016-2022	Precipitación-Temperatura-Humedad-Viento

Anexo 10 Información de estaciones meteorológicas y pluviómetros disponibles.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Anexo 11

PROPUESTA DE GUIA DE ACCIONES DE MEJORA

Objetivo: Implementar de acciones de mejora mediante un plan estratégico como guía para un aprovechamiento óptimo del agua en los proyectos de riego por goteo.

Generalidades:

Antes de comenzar esta guía se recomienda revisar y actualizar la base de información de los factores meteorológicos, generada del período de estudio (2013 - 2022) ya que permite tomar las decisiones asociadas a la gestión del recurso, revisar el estado actual del comportamiento hidrológico de las subcuencas en las que se encuentran los cultivos de naranja generado en el proyecto de la Ing. Katiana Bustamante Guevara. Además, tomar en cuenta y actualizar las curvas IDF del estudio hidrológico si se desea implementar cualquier obra hidráulica dentro del área de estudio (como la implementación de obras de calibración en la toma de agua para riego por goteo).

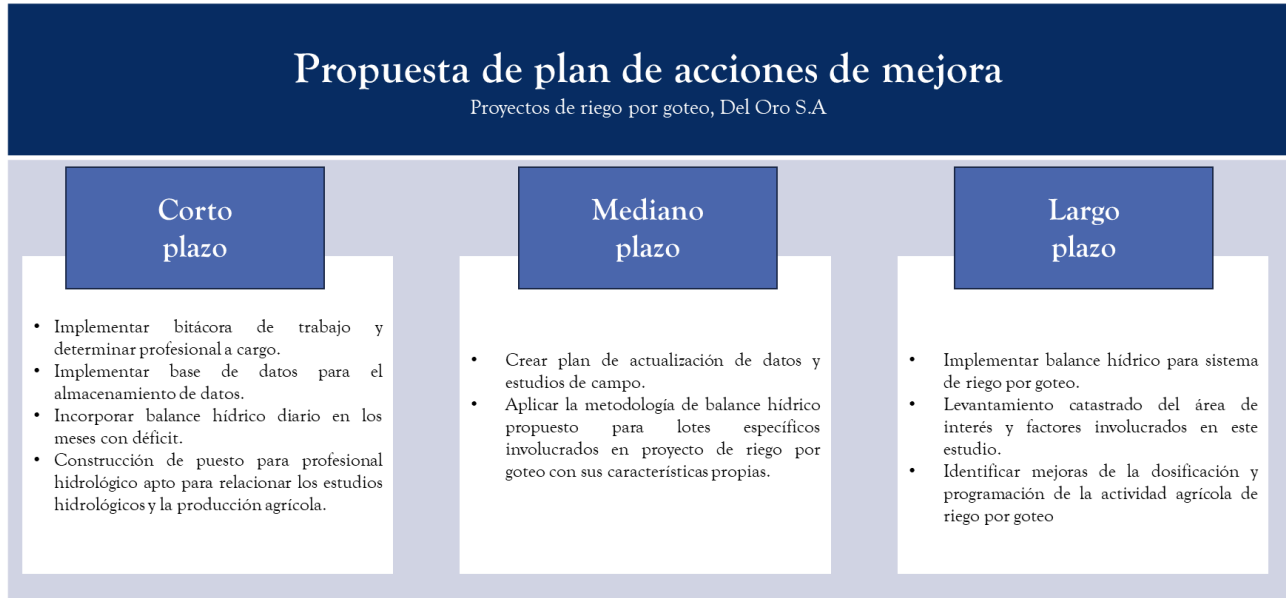
Se verán a continuación los principales pasos que se deberán tomar en cuenta como acciones de mejora para el aprovechamiento óptimo del agua para riego por goteo.

1. Delimitar el área de estudio por lote.
2. Determinar la morfología, textura del suelo, vegetación del suelo, temperatura y precipitación del lote de interés. (tomar en cuenta la humedad del suelo de los tensiómetros existentes).
3. Identificar demandas de agua, requerimientos de agua, diagnosticar zonas de déficit y analizar la disponibilidad de agua.
4. Realizar balance hídrico propuesto en este estudio para el lote al iniciar el período seco que se da antes de iniciar el riego por goteo tomando en cuenta las variables antes mencionadas.
5. Realizar el balance hídrico propuesto después del riego por goteo.
6. Analizar el comportamiento hídrico en el suelo en distintos sitios y profundidades del lote, los cuales se promedian y se obtiene un número aproximado, pero muy representativo del comportamiento hídrico en el lote con cultivos de naranja antes y después del riego por goteo.
7. Tomar en cuenta y actualizar las curvas IDF del estudio hidrológico si se desea implementar cualquier obra hidráulica dentro del área de estudio (como la implementación de obras de calibración en la toma de agua para riego por goteo).

Anexo 11 Guía de acciones de mejora como propuesta de implementación a proyectos de riego por goteo de la empresa Del Oro.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Anexo 12



Anexo 12 Resumen de propuesta de plan de acciones de mejora.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Anexo 13



Anexo 13 Toma de agua superficial del río Sábalo, primera toma del río Sábalo.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Anexo 14



Anexo 14 Finca con cultivos de naranja.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Anexo 15



Anexo 15 Naranjas bajo diferentes condiciones hídricas.

Fuente: Elaboración propia, 2023.