



Estimación de la evapotranspiración para la gestión del riego de los cultivos de caucho natural en el municipio de Puerto López, departamento del Meta; a partir de estaciones meteorológicas e imágenes MODIS

Natalia Marín Gómez

11792317921

Universidad Antonio Nariño

Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

Estimación de la evapotranspiración de los cultivos de caucho natural en el municipio de Puerto López, departamento del Meta; a partir de estaciones meteorológicas e imágenes MODIS para la gestión del riego

Natalia Marín Gómez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Director (a):
M.SC. Raúl Echeverri B.

Línea de Investigación:
Geociencias.

Universidad Antonio Nariño

Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

Contenido

	Pág.
1. Resumen	1
2. Abstract	2
3. Introducción	3
4. Objetivos	5
4.1 Objetivo general	5
4.2 Objetivos específicos.....	5
5. Marco teórico y estado del arte	6
5.1 Cultivos de caucho natural	6
5.1.1 <i>Agronomía del cultivo de caucho natural</i>	6
5.1.2 <i>Condiciones edafoclimáticas para el establecimiento del cultivo de caucho natural</i>	7
5.1.3 <i>Sistema de riego de los cultivos de caucho natural</i>	10
5.1.3.1 <i>Efectos sobre el agua</i>	10
5.2 Evapotranspiración.....	11
5.2.1 <i>Evaporación y transpiración</i>	12
5.2.2 <i>Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)</i>	13
5.2.4 <i>Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c)</i>	16
5.2.5 <i>Coeficiente de cultivo</i>	17
5.3 Índices de vegetación	18
5.3.1 <i>NDVI – Índice de Vegetación Diferencial Normalizado</i>	19
5.3.2 <i>EVI – Índice de Vegetación Mejorado</i>	19
5.4 La teledetección, los sensores remotos y la evapotranspiración	20
5.4.1 <i>Teledetección y sensores remotos</i>	20
5.4.1.1 <i>Métodos de determinación de la evapotranspiración a partir de sensores remotos</i>	22
5.4.1.2 <i>Análisis del comportamiento de la evapotranspiración a partir del uso de sensores remotos</i>	24
5.4.1.2.1 <i>Landsat</i>	24
5.4.1.2.2 <i>MODIS</i>	25
5.4.1.2.2.1 <i>MODIS Evapotranspiración (MOD16)</i>	26
5.4.2 <i>Estado del arte</i>	28
6. Diseño metodológico	31

6.1	Área de estudio	31
6.2.1	<i>Insumos</i>	35
6.2.1.1	<i>Datos meteorológicos</i>	35
6.2.1.2	<i>Imágenes MODIS</i>	37
6.2.2	<i>Procesamiento</i>	38
6.2.2.1	<i>Estimación de la precipitación (PPP) acumulada mensual y de la ET_o a partir de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas</i>	38
6.2.2.2	<i>Estimación de la ET y la ET_p a partir de las imágenes MODIS descargadas</i>	40
6.2.2.3	<i>Estimación de la ET_c</i>	41
6.2.2.4	<i>Estimación de las necesidades de riego neto (NRn) de las plantaciones seleccionadas</i>	42
6.2.2.5	<i>Determinación de la calidad de riego para los cultivos de caucho natural del área de estudio</i>	44
7.	Resultados y análisis de resultados	46
7.1	Precipitación mensual para el año 2022 a partir de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas	46
7.2	Estimación de la ET_o, ET, ET_p y ET_c	50
7.2.1	<i>Estimación de la ET_o</i>	50
7.2.2	<i>Estimación de la ET y la ET_p</i>	54
7.2.3	<i>Estimación de la ET_c</i>	57
7.2.4	<i>Análisis comparativo del comportamiento de la ET_o, ET, ET_p y ET_c</i>	58
7.3	Necesidades de riego neto (NRn) de las plantaciones seleccionadas	66
7.4	Calidad de riego para los cultivos de caucho natural del área de estudio	69
8.	Conclusiones	71
9.	Anexos	73
10.	Referencias Bibliográficas	79

Lista de Figuras

	Pág
Figura 1. Esquema metodológico para la estimación de la evapotranspiración para la gestión del riego de los cultivos de caucho natural del área de estudio seleccionada	31
Figura 2. Localización del área de estudio	344
Figura 3. Localización de las estaciones meteorológicas con respecto a las plantaciones seleccionadas	366
Figura 4. Ventana de selección del subconjunto de datos	40
Figura 5. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, año 2022	466
Figura 6. Mapas de estimación de la precipitación acumulada obtenidos mensualmente para el área de estudio seleccionada, año 2022	488
Figura 7. Comportamiento de la estimación promedio de la precipitación acumulada mensual para el año 2022	499
Figura 8. Comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET_o) mensual para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, año 2022.....	51
Figura 9. Mapas de estimación de la ET_o obtenida mensualmente para el área de estudio seleccionada, año 2022.....	522
Figura 10. Comportamiento de la estimación promedio ET_o mensual para el año 2022... 	544
Figura 11. Comportamiento de la ET y la ET_p para el año 2022	555
Figura 12. Comparación del comportamiento de la ET y la ET_p mensual para el año 2022... ..	577
Figura 13. Comportamiento mensual de las variables climatológicas para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, año 2022.....	588
Figura 14. Comparación del comportamiento de la ET_o, ET, ET_p y ET_c mensual para el año 2022.....	60
Figura 15. Correlograma de las variables climatológicas y las evapotranspiraciones calculadas	611
Figura 16. Comparación del comportamiento de la precipitación efectiva y de la estimación promedio de la precipitación acumulada mensual para el año 2022	677
Figura 17. Necesidades de riego netas mensuales para el año 2022	688
Figura 18. Estimación de la calidad del riego mensual para el año 2022	69

Lista de Tablas

	Pág.
<i>Tabla 1. Taxonomía y clasificación del caucho natural</i>	7
<i>Tabla 2. Parámetros técnicos para la zonificación de áreas aptas para el cultivo de caucho natural en Colombia</i>	8
<i>Tabla 3. Factores de conservación para expresar la ET</i>	12
<i>Tabla 4. Capas del producto de datos MOD16A2</i>	26
<i>Tabla 5. Capas del producto de datos MOD16A3</i>	27
<i>Tabla 6. Información del municipio de Puerto López</i>	32
<i>Tabla 7. Estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio</i>	35
<i>Tabla 8. Imágenes MODIS descargadas.</i>	377

Lista de Ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1. Evapotranspiración de referencia. Fórmula del método Penman-Monteith FAO98	14
Ecuación 2. Evapotranspiración real.....	15
Ecuación 3. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de referencia o estándar	16
Ecuación 4.	16
Ecuación 5. Coeficiente del cultivo	17
Ecuación 6. NDVI – Índice de vegeración diferencial normalizado	19
Ecuación 7. EVI – Índice de vegetación mejorado.....	20
Ecuación 8. Método SEBAL.....	23
Ecuación 9. Método TSEB	23
Ecuación 10. Necesidades de riego neto.....	433
Ecuación 11. Precipitación efectiva con valores de precipitación mensual menores o iguales a 250 mm	433
Ecuación 12. Precipitación efectiva con valores de precipitación mensual mayores a 250 mm	444
Ecuación 13. Índice estacional de la calidad del riego	444

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Información climatológica reportada por cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas para el año 2022	73
Anexo B. Evapotranspiración de referencia (ET_0) mensual calculada para el año 2022.....	75
Anexo C. Evapotranspiración total (ET) y evapotranspiración potencial (ET_p) mensual calculada para el año 2022	76
Anexo D. Matriz de correlación.....	77
Anexo E. Código del gráfico de correlograma (Python)	78

Dedicatoria

A mis abuelos quienes siempre están acompañándome día y noche en mi cotidianidad, quienes me cuidan, se preocupan por mi bienestar y me han educado para ser la persona que soy.

A mi padre quien se ha sacrificado por ayudarme a alcanzar mis metas y ha estado pendiente de mi en todo momento.

A mi pareja quien me acompañó durante el desarrollo de esta especialización.

Agradecimientos

A la Universidad Antonio Nariño por hacer parte de una nueva etapa académica y de crecimiento profesional para mí, a los profesores que estuvieron durante el desarrollo de la especialización y que compartieron sus conocimientos y experiencias en la implementación de nuevas herramientas asociadas con los SIG. A la Confederación Cauchera Colombiana CCC y el Centro de Investigación en Caucho Cenicaucho, por ser las entidades que dieron pie al desarrollo de este trabajo.

1. Resumen

Este trabajo estima y analiza el comportamiento de la evapotranspiración de cultivos de caucho natural en plantaciones del municipio de Puerto López, Meta; con el fin de evaluar la gestión del riego (importante para preservar el recurso hídrico) que se efectúa sobre estos; debido a que son cultivos que ocupan una buena parte del territorio nacional, que tienen una etapa productiva (con buenas prácticas agrícolas) bastante larga y que, en algún momento de la historia colombiana, se contemplaron nuevas áreas de expansión de estos; sin embargo, poco se habla de esta especie.

Como insumos para la elaboración de este trabajo se utilizaron las imágenes MODIS, para estimar la evapotranspiración potencial (ET_p); y la información reportada por estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c). Posteriormente se estiman las necesidades de riego netas y la calidad de riego para evaluar la gestión de este. Con respecto a los resultados, se pudo evidenciar que el comportamiento de la evapotranspiración se ve influenciado por variables climatológicas y que el exceso de agua puede generar en los árboles de caucho natural un alto valor de estrés hídrico. Adicionalmente, es importante que los agricultores lleven un buen monitoreo de sus plantaciones, y se hace evidente que estos cultivos sean investigados a profundidad ya que su comportamiento en cuanto a necesidades y calidad de riego se trata, no se comportan igual que otro tipo de cultivos.

Palabras claves: Evapotranspiración, Precipitación, Evapotranspiración de referencia, Evapotranspiración potencial, Evapotranspiración del cultivo de referencia, Coeficiente del Cultivo, Riego, Necesidad y Calidad.

2. Abstract

This work estimates and analyzes the evapotranspiration behavior of natural rubber crops in plantations in the municipality of Puerto López, Meta; in order to evaluate the irrigation management (important to preserve the water resource) that is carried out on these crops; because they are crops that occupy a good part of the national territory, that have a quite long productive stage (with good agricultural practices) and that, at some point in Colombian history, new areas of expansion of these crops were contemplated; however, little is said about this species.

As inputs for the development of this work, MODIS images were used to estimate potential evapotranspiration (ET_p) and information reported by meteorological stations near the study area to calculate reference evapotranspiration (ET_o) and crop evapotranspiration under standard conditions (ET_c). Subsequently, net irrigation requirements and irrigation quality are estimated to evaluate irrigation management. With respect to the results, it was evidenced that evapotranspiration behavior is influenced by climatological variables and that excess water can generate a high-water stress value in natural rubber trees. Additionally, it is important that farmers maintain good monitoring of their plantations, and it is evident that these crops should be investigated in depth since their behavior in terms of irrigation needs and quality is different from that of other types of crops.

Key words: Evapotranspiration, Precipitation, Reference evapotranspiration, Potential evapotranspiration, Reference crop evapotranspiration, Crop coefficient, Irrigation, Need and Quality.

3. Introducción

Los árboles de caucho natural (*Hevea Brasiliensis*) empiezan su etapa productiva entre los 6 y 7 años después de ser plantados (sembrados y sostenidos técnicamente). Los árboles de caucho natural inicial, requieren en el inicio de su vida productiva un equipo de asistencia técnica y una serie de pasos (lo que se conoce como buenas prácticas) para garantizar que la plantación tenga una vida útil bastante larga, debido a que estos árboles pueden tener una vida productiva de entre 25 a 30 años; y una buena producción (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural & Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria, 1998).

El caucho natural era utilizado por los nativos del continente americano antes de la llegada de los Europeos, sin embargo, presentaba grandes limitantes debido a su alta sensibilidad a la temperatura y a la exposición a los rayos solares. Para el año de 1842, Goodyear descubre un procedimiento que le permite al caucho mantener sus propiedades de elasticidad e impermeabilidad al frío y al calor denominado vulcanización. Gracias a ello, las posibilidades de uso del caucho se multiplicaron y se comenzó a emplear para la fabricación de nuevos elementos (Espinal G. et al., 2005)

Para el año 2018 en Colombia las hectareas de caucho natural eran cercanas a las 523.223 (Sterling Cuellar & Rodríguez León, 2020). Para el año 2020, la productividad promedio de aproximadamente un área total proyectada de caucho natural de 70.000 hectáreas era de 1,5 ton/ha/año (García Romero et al., 2013)

Adicionalmente, el territorio nacional cuenta con las condiciones propicias para aumentar la producción de caucho debido a que cuenta con aproximadamente un rango de hectáreas de

263.000 hasta 900.000 con condiciones óptimas para la plantación de nuevos cultivos (Espinal G. et al., 2005).

De acuerdo con la ficha técnica del manejo ambiental en la producción de caucho natural elaborada por la Asociación de Reforestadores y Cultivadores de Caucho del Caquetá – ASOHECA (2009), el mayor consumo de agua se debe al riego de los cultivos debido a que, en la edad temprana de los mismos; requieren de altos volúmenes de agua para su óptimo desarrollo. Además, este recurso es altamente demandado por el consumo humano, utilizado tanto para fines de aseo y limpieza en establecimientos como en cantidades reducidas para llevar a cabo actividades como tratamientos fitosanitarios y la manipulación de semillas.

Teniendo en cuenta, que los cultivos de caucho natural son una alternativa para la ampliación de la frontera agrícola en el país pero que demandan gran cantidad de agua para su producción y aprovechamiento, y conociendo, que el agua es un recurso no renovable que requiere cuidado y conservación para garantizar una calidad de vida óptima sobre la tierra; se pretende realizar la estimación de la evapotranspiración para la gestión del riego de los cultivos de caucho natural en el municipio de Puerto López, departamento del Meta; a partir del uso de imágenes satelitales del sensor MODIS.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Analizar la estimación de la evapotranspiración de los cultivos de caucho natural en el municipio de Puerto López, departamento del Meta; a partir de estaciones meteorológicas e imágenes MODIS para la gestión del riego.

4.2 Objetivos específicos

- Identificar el comportamiento de la evapotranspiración en los cultivos de caucho natural de las plantaciones de la zona de estudio seleccionada.
- Analizar las necesidades de riego en los cultivos de caucho natural de las plantaciones encontradas en la zona de estudio seleccionada.
- Evaluar la gestión del riego en los cultivos de caucho natural de las plantaciones en la zona de estudio seleccionada.

5. Marco teórico y estado del arte

5.1 Cultivos de caucho natural

El caucho natural (*Hevea brasiliensis*) es una especie arbórea de origen suramericano, proveniente de las planicies de la Amazonía y Orinoquía, distribuidos ampliamente en países como Bolivia, Brasil, Colombia, Guyana Francesa, Perú, Surinam y Venezuela (Sterling Cuellar & Rodríguez León, 2011). Su importancia radica en que el látex proveniente del árbol de caucho es una fuente importante a nivel mundial para las diferentes industrias que lo demandan como la industria llantera (Sterling Cuellar & Rodríguez León, 2020).

Por lo anterior, en los últimos años, se ha venido impulsando la siembra de cultivos de caucho natural en Colombia (Fondo Nacional de Fomento Cauchero FEDECAUCHO & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006). Hoy en día, las hectáreas de caucho natural en Colombia se aproximan a las 53.223 y se encuentran distribuidas en 17 departamentos. Adicionalmente, los departamentos que cuentan con grandes áreas productivas de caucho natural son: Meta (25.000 has), Santander (9.000 has), Caquetá (6.700 has) y Antioquia (6.000 has) (Sterling Cuellar & Rodríguez León, 2020).

5.1.1 Agronomía del cultivo de caucho natural

El caucho natural es un árbol de tamaño mediano (10-20 m de altura con un diámetro promedio, en los primeros 5 años; de 30 cm), con ramas robustas. Las hojuelas son de tallos cortos y formas elíptica. Los frutos suelen ser grandes (3-6 cm de diámetro), de color café claro con algunos puntos o manchas irregulares (de tonalidades grises) y brillante (SENA et al., 2012). Adicionalmente, pertenece a la familia *Euphorbiaceae* y es conocido comúnmente como caucho

(en América Central, el Caribe y Colombia), árbol de caucho (Venezuela), jeve (Perú), hule, *hevea* (Brasil), mapalapa (Surinam) y sibi-sibi (Guyana) (Gil Restrepo & Correa Pinilla, 2022). En la **Tabla 1** se describe un poco más a detalle la taxonomía y clasificación del árbol de caucho natural.

Tabla 1.

Taxonomía y clasificación del caucho natural.

Orden	Euforbiales
Familia	Euphorbiaceae (Euforbiácea)
Género	Hevea
Especie	Hevea Brasiliensis Muell. Arg.
Nombre vulgar	Caucho, Árbol de caucho, Hule natural, Hevea, Mapalapa, Sibi-sibi.

SENA, Sociedad de Agricultores de Colombia SAC, & Confederación Cauchera Colombiana CCC. (2012). *Adopción de medidas para el manejo fitosanitario del cultivo del caucho natural* (Convenio No. 00095 de 2012).

5.1.2 Condiciones edafoclimáticas para el establecimiento del cultivo de caucho natural

El cultivo de caucho requiere ciertas condiciones para garantizar su óptimo desarrollo y adicionalmente para evitar gastos innecesarios (Fondo Nacional de Fomento Cauchero FEDECAUCHO & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006).

De acuerdo con Castañeda Torres (1997) para determinar dichas condiciones o parámetros técnicos ha sido necesaria la identificación de zonas o áreas aptas para el cultivo de caucho natural en Colombia. Las categorías finales de dicha zonificación son:

- Zonas marginales al cultivo de caucho natural: Corresponden a aquellas zonas donde el cultivo de caucho no puede desarrollarse debido a fuertes restricciones climáticas y edáficas.

Adicionalmente, son áreas susceptibles al ataque del mal suramericano, principal plaga que ataca los cultivos de caucho natural.

- Zonas potencialmente manejables: Son aquellas áreas en donde existe una alta posibilidad de ataque del mal suramericano por condiciones climáticas pero que cuenta con suelos apropiados para la siembra y aprovechamiento de cultivos de caucho natural.
- Zonas de escape con restricciones menores: Son aquellas zonas en donde por las condiciones climáticas la posibilidad de desarrollo del mal suramericano es mínima, siendo catalogadas como las mejores zonas para la siembra y puesta en producción de cultivos de caucho natural.
- Zonas de escape con restricciones mayores: Son aquellas zonas en donde por las condiciones climáticas la posibilidad de desarrollo del mal suramericano es baja, sin embargo, en épocas de humedad puede presentarse cierta susceptibilidad a la aparición de esta.

A partir del establecimiento de la zonificación anteriormente descrita se presenta la **Tabla 2**, en la cual se establecen los parámetros técnicos o condiciones óptimas para el establecimiento y desarrollo de cultivos de caucho en el país.

Tabla 2.

Parámetros técnicos para la zonificación de áreas aptas para el cultivo de caucho natural en Colombia

Parámetros	Zonas marginales para heveicultura	Zonas potencialmente manejables	Zonas de escape con restricciones menores	Zonas de escape con restricciones mayores
Temperatura (°C)	<20	25 - 35	25	23 – 20
Altitud (msnm)	>1300	<1300	<1300	<1300
Humedad relativa (%)	>80	65 - 80	Dos meses <65	Dos meses <65
Precipitación (mm/año)	>5000 o <1500	3000 - 5000	1500 - 3000	1500 - 3000

Brillo solar (horas/año)	<1000	>1000	>1500	>1500
Evapotranspiración (mm)	>300	<100	100 - 300	100 - 300
Meses secos (No.)	<2	2 - 4	4 PPP < EVP	4 PPP < EVP
Nivel freático (cm)	100 - 150	>150	>150	>150
Drenaje interno	Lento a Rápido	Moderado - Rápido	Moderado - Rápido	Moderado - Rápido
Profundidad (cm)	<100	>100	>100	>100 A/B
Textura	Arenosa/Arcillosa	Franco	Franco	Franco
Estructura	Laminar	Bloques Ang. Prismat.	Bloques Ang. Prismat.	Bloques Ang. Prismat.
Pendiente	>70	50 - 70	50	70
Materia orgánica (%)	<1	1 - 3	>3	>3
Acidez (pH)	>6,0	4,0 – 6,0	4,0 – 6,0	4,0 – 6,0
Pedregosidad	>39% Grava	<30% Grava	Sin grava	Hasta 30% Grava
Estabilidad del terreno	Bajo riesgo	Bajo riesgo	Muy estable	Bajo riesgo

Castañeda Torres, A. (1997). *Zonas Aptas para el Cultivo de Caucho en Colombia*.

En la cartilla promocional del cultivo de caucho natural (Fondo Nacional de Fomento Cauchero FEDECAUCHO & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006) se resalta que es importante tener en cuenta el color de los suelos, debido a que aquellos que tienen tonalidades gris parda representan suelos con mal drenaje y por consiguiente deben ser evitados.

Por otro lado, la profundidad es otro factor para tener en cuenta ya que los árboles de caucho requieren de una profundidad de 1,50 m con el fin de que no encuentre obstáculos para el desarrollo de su raíz y a su vez esta pueda anclarse firmemente.

Así mismo, requieren que a esta misma distancia no exista la presencia de agua con el fin de que las raíces no se pudran y frenen su desarrollo. Otro parámetro que es importante tener en

cuenta es la pendiente, ya que si esta es mayor a 50% puede ocasionar un incremento en los costos de establecimiento del cultivo (Fondo Nacional de Fomento Cauchero FEDECAUCHO & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006).

5.1.3 *Sistema de riego de los cultivos de caucho natural*

Aunque el riego en los cultivos de caucho se efectúa en el verano, es importante considerar la disponibilidad del agua y del sistema de riego a utilizar antes de realizar la siembra. La frecuencia de riego es variable y depende o de su eficiencia o de la textura del suelo, sin embargo, se ha establecido que el rango de frecuencia de riego puede variar de entre 7 a 4 días (Gremial de huleros de Guatemala, 2000) y por lo general, un aporte de entre 2.000 y 3.000 mm al año (Tapiero et al., 2018).

Existen diferentes formas de realizar el riego en los cultivos de caucho natural, el sistema más económico es el riego por gravedad o surcos en que el agua de una fuente superficial es derivada a través de una obra de captación, posteriormente es conducida a través de canales primarios o secundarios para subdividirse en canales terciarios o de servicios, con el fin de abastecer las parcelas individuales (Ortiz, 2006). Sin embargo, uno de los sistemas más efectivos es el riego por inundación que consiste en “*la aplicación de agua a una superficie nivelada rodeada por un dique* (Zapata Ruiz et al., 1998)” (Gremial de huleros de Guatemala, 2000).

5.1.3.1 *Efectos sobre el agua*

Los cultivos de caucho natural ayudan a la recuperación de cuencas y microcuencas debido a que generan un incremento en la materia orgánica del suelo a partir de su aporte continuo de biomasa (residuos vegetales – ramas, hojas y frutos), cumpliendo así una de retención y

almacenamiento de agua (Cristancho & Silva, 2011). Sin embargo, los impactos ambientales negativos que puede tener sobre el recurso hídrico son significativos si no se implementan medidas preventivas y de control, ya que durante la etapa de beneficio, la cual consiste en la transformación del látex (materia prima recolectado de los árboles de caucho natural) (Fondo Nacional de Fomento Cauchero FEDECAUCHO & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006)); se requieren grandes cantidades de agua limpia.

Durante los procesos de tratamiento del látex y de transformación del coagulo necesita de 10 a 30 m³ de agua por tonelada de caucho seco (dependiendo del tratamiento e intensidad de lavado) (Compagnon, 1998).

5.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) combina los procesos de evaporación y transpiración, dos procesos separados. *“El agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo”*. Adicionalmente, estos procesos (evaporación y transpiración) ocurren al mismo tiempo, por lo que no hay una manera fácil de diferenciar ambos procesos (G. Allen et al., 2006).

En las etapas iniciales de los cultivos, el agua se *“pierde principalmente por evaporación directa del suelo”*, pero durante los procesos de desarrollo y cubrimiento total del suelo por parte del cultivo, la transpiración se convierte en la protagonista. Durante el periodo de siembra, el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que, al completarse la totalidad de la cobertura vegetal, *“más del de 90% de la ET ocurre como transpiración”* (Castaño et al., 2012).

La evapotranspiración es un componente importante durante el ciclo del recurso hídrico, por ello, resulta necesario conocerla con antelación, con el fin de poder estimar las necesidades de agua de los cultivos y así efectuar una adecuada planeación del riego (Rocío et al., 2013).

La ET es expresada en milímetros (mm) por unidad de tiempo, debido a que con esta unidad “se puede expresar la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un completo período de cultivo o un año” (G. Allen et al., 2006).

Por lo anterior, en la **Tabla 3** se resume en un cuadro, las unidades usadas para expresar la evapotranspiración (ET) y los factores de conversión entre ellas.

Tabla 3.

Factores de conservación para expresar la ET.

	Altura de agua	Volumen por unidad de área		Energía por unidad de área*
	mm día ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ día ⁻¹	l s ⁻¹ ha ⁻¹	MJ m ⁻² día ⁻¹
1 mm día ⁻¹	1	10	0.116	2.45
1 m ³ ha ⁻¹ día ⁻¹	0.1	1	0.012	0.245
1 l s ⁻¹ ha ⁻¹	8.640	86.40	1	21.17
1 MJ m ⁻² día ⁻¹	0.408	4.082	0.047	1

Allen, R., S. Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Estudio riego y drenaje*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147846>

*Para el agua con una densidad de 1000 kg m⁻³ y a 20 °C

5.2.1 Evaporación y transpiración

La evaporación es un proceso físico en el cual se transforma el agua, pasando de un estado líquido a un estado gaseoso para posteriormente, ser transferido a la atmósfera. Adicionalmente,

puede verse afectado por factores climatológicos como la radiación, la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento, entre otros (Barco et al., 2000). El agua se evapora de diferentes superficies, sin embargo, cuando este proceso se está efectuando sobre la superficie del suelo, el proceso de evaporación se ve afectado por otros factores adicionales a los climatológicos; como lo son el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponible en dicha superficie del suelo (G. Allen et al., 2006).

La transpiración es la pérdida de agua a través de la vaporización, donde el agua es absorbida por las raíces y almacenada en los tejidos de la planta, posteriormente, se desplaza en estado gaseoso (vapor) hacia la atmosfera. De toda el agua que absorben las plantas del suelo, menos del 5% es retenida y utilizada para su crecimiento y almacenamiento (Sterling & Hernández-Rios, 2005).

Como en el caso de la evaporación varios factores climatológicos deben ser tenidos en cuenta para la determinación de la transpiración, adicionalmente, para el caso de evaluar este proceso en los cultivos, se debe tener en cuenta también el tipo de cultivo, su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo (G. Allen et al., 2006).

5.2.2 *Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)*

La evapotranspiración de referencia (ET_o) estandariza la cantidad de agua evaporada desde la superficie de terreno cubierta por un cultivo hipotético de 0,12 m de alto, con una resistencia superficial de $70 \left(\frac{s}{m}\right)$, un albedo de 0,23 y sin ningún tipo de restricciones de agua; este valor representa la evapotranspiración de una superficie de pasto (verde con altura uniforme) de gran tamaño que se encuentra en crecimiento y con un riego idóneo (Jaramillo R., 2007).

El estudio de la ET_o , contribuyó para representar la evapotranspiración de una superficie de referencia supuesta, con el fin de entender los cambios en el ciclo hidrológico y lo que esto genera sobre los recursos hídricos (López-Moreno et al., 2009). Adicionalmente, permite realizar una comparación de esta durante diferentes periodos de tiempo del año, entre diferentes zonas y cultivos (G. Allen et al., 2006).

Con la fórmula del método Penman-Monteith FAO98 se puede estimar la ET_o en función de los elementos meteorológicos asociados a la radiación solar neta, temperatura del aire, velocidad del viento y tensión de vapor del agua. Adicionalmente sus unidades están dadas por $\left(\frac{\text{mm}}{\text{día}}\right)$.

La ecuación de este método es (Díaz, 2006):

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: Δ corresponde a la pendiente de curva de tensión de vapor saturado, siendo igual a $\left(\frac{\text{kPa}}{^\circ\text{C}}\right) = \left(\frac{2503,6 e^{\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right)}}{(T + 237,3)^2}\right)$ en $\left(\frac{\text{kPa}}{^\circ\text{C}}\right)$ o $D = (0,00587 T + 0,6414)^7$ en $\left(\frac{\text{kPa}}{^\circ\text{C}}\right)$; R_n que corresponde a la radiación neta sobre la superficie del cultivo $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{ día}}\right)$; G que corresponde al flujo del calor del suelo $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{ día}}\right)$; γ que hace referencia a la constante psicométrica, la cual está dada por $\left(\frac{\text{kPa}}{^\circ\text{C}}\right) = 0,001628 \left(\frac{P}{1}\right)$ donde P en $\text{KPa} = 101,3 \left(\frac{(293 - 0,0065 z)^{5,26}}{293}\right)$; u_2 que corresponde a la velocidad del viento a 2 m de altura $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$, se estima mediante $u_2 = \frac{4,87 u_z}{\ln(67,8 Z - 5,42)}$; $(e_s - e_a)$ que representa el déficit de tensión en vapor (KPa); e_s y e_a

corresponden a la tensión de vapor saturado y tensión de vapor actual respectivamente; y T que representa la temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$), calculada por $T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$.

5.2.3 *Evapotranspiración potencial del cultivo (ET_p) y Evapotranspiración real del cultivo (ET_r)*

La evapotranspiración potencial (ET_p) se define como la tasa de evaporación y transpiración máxima presentada durante un intervalo de tiempo determinado, cuando el suelo presenta un cultivo vegetal uniforme de altura baja y sin restricciones en el suministro hídrico. Esta fue la primera definición de ET_p y fue presentada por Penman & Keen, (1997) y Thornthwaite (1948). Existen muchos métodos para calcular la evapotranspiración potencial, para mayor información sobre estos puede consultarlos en Cárdenas Gutiérrez et al., (2021).

La evapotranspiración real (ET_r) “*es aquella que ocurre en las condiciones reales del terreno*”. La ET_r es más compleja de estimar con respecto a la evapotranspiración anteriormente mencionada (la ET_p) ya que adicional a las condiciones climatológicas de la zona, intervienen los requerimientos específicos del cultivo o los cultivos presentes (Róvira, 1976). Para obtener la ET_r (**Ecuación 2**) se debe realizar una corrección de la ET_p con un factor o coeficiente de cultivo (k_c) que depende de las características de la planta y la humedad del suelo.

$$ET_r = ET_p \cdot k_c \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde: ET_p corresponde a la evapotranspiración potencial del cultivo ($\frac{\text{mm}}{\text{día}}$) y K_c que corresponde al coeficiente del cultivo (adimensional).

5.2.4 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de referencia o estándar (ET_c) corresponde a aquella evapotranspiración que se desarrolla con buena fertilización, libre de enfermedades y que crece en un área con condiciones óptimas de humedad del suelo y alcanza su producción total bajo determinadas condiciones climáticas, en el cultivo. La mayoría de las consecuencias generadas por la intervención de factores meteorológicos se encuentran dentro de la estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia, mientras que el coeficiente del cultivo varía con respecto de las características particulares de los mismos. Adicionalmente, permite que los valores estándares del k_c puedan ser transferidos entre diferentes áreas y climas por lo que se ha vuelto un método de gran utilidad (G. Allen et al., 2006). Su unidad de medida corresponde a $\left(\frac{\text{mm}}{\text{día}}\right)$.

La ecuación de la ET_c es la siguiente:

$$ET_c = ET_o k_c \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde: ET_o corresponde a la evapotranspiración del cultivo de referencia $\left(\frac{\text{mm}}{\text{día}}\right)$ y K_c que corresponde al coeficiente del cultivo (adimensional).

De acuerdo con Gardiazabal et al., (2003), otra forma de determinar la ET_c es:

$$ET_c = R + P - D - ES \pm \Delta H \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: R corresponde al riego; P corresponde a las precipitaciones pluviales; D corresponde al agua perdida por drenaje en profundidad; ES corresponde al escurrimiento superficial y ΔH hace referencia a la variación en el contenido de humedad volumétrico del suelo.

5.2.5 Coeficiente de cultivo

El coeficiente del cultivo (k_c) corresponde al cociente entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración del cultivo de referencia (**Ecuación 5**) (Gardiazabal et al., 2003).

$$k_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad \text{Ecuación 5}$$

Este coeficiente representa cuatro características principales que permiten diferenciar un cultivo determinado del cultivo de referencia, de acuerdo con G. Allen et al., (2006) dichas características son: Altura del cultivo, albedo (reflectancia) del suelo y la superficie del cultivo, resistencia del cultivo a la transferencia del vapor de agua, el cual se ve afectado por la cantidad de estomas, edad y condiciones de las hojas de la planta y evaporación ocurrida en el suelo.

Adicionalmente, en el libro de *Evapotranspiración del cultivo*, el autor G. Allen et al., (2006), propone la curva del coeficiente del cultivo, la cual representa los cambios del k_c a lo largo de la etapa de desarrollo del cultivo. Los valores del coeficiente del cultivo poco después de la aparición de las hojas ($k_{c \text{ ini}}$) son pequeños y su frecuencia suele ser menor a 0,4. Posteriormente, el valor del coeficiente aumenta hasta llegar al desarrollo máximo o cercano al mismo de la planta ($k_{c \text{ med}}$) y finalmente, cuando las hojas comienzan a envejecer, el coeficiente comienza a descender hasta llegar a un valor mínimo ($k_{c \text{ fin}}$).

5.3 Índices de vegetación

Un índice de vegetación (IV) se puede definir como un parámetro que se calcula a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda, con las que se busca obtener información asociada a la vegetación minimizando las perturbaciones provocadas por el suelo o por condiciones atmosféricas. Adicionalmente, los índices de vegetación tienen en común el uso de los valores de reflectividad en las zonas espectrales del rojo e infrarrojo cercano (Gilbert et al., 1997).

De acuerdo con Muñoz Aguayo (2013) los índices de vegetación también corresponden a un número resultante de la combinación de bandas espectrales que pueden estar relacionadas de alguna forma con la cantidad de vegetación presente en un píxel determinado. *“Estos índices, son utilizados para mejorar la discriminación entre el suelo y la vegetación, reduciendo el efecto del relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas”*. Usualmente, la baja o poca vigorosidad es representada por los valores bajos de los índices de vegetación, mientras que los valores altos, indican una alta vigorosidad.

Además, los índices de vegetación pueden estar basados en la pendiente o en la distancia. Sin embargo, para este trabajo nos centraremos en el NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado) y en el EVI (Índice de Vegetación Mejorado).

Tanto el NDVI como el EVI, se complementan entre sí cuando se trata de realizar estudios globales de vegetación y mejoran la detección de cambios sobre dicha cobertura. Cabe resaltar que mientras el NDVI *“es clorofila sensible”* el EVI tiene una mejor respuesta a las alteraciones

estructurales del dosel, incluyendo el Índice de Área Foliar (LAI), el tipo de copa y la fisonomía vegetal (Huete et al., 2002).

5.3.1 NDVI – Índice de Vegetación Diferencial Normalizado

Es el más utilizado para cualquier tipo de aplicaciones, esto se debe a su sencillez de cálculo y de la disposición de un rango fijo [-1,1] (Muñoz Aguayo, 2013).

Para el análisis de coberturas utilizando este índice se tiene que:

- Valores muy bajos (de orden 0.1) corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas.
- Valores entre 0.2 a 0.3, pueden estar asociados a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales.
- Valores superiores a 0.3 pueden corresponder a praderas, cultivos, forestaciones, entre otros; dependiendo al valor alcanzado.

De acuerdo con Ba et al., (2022) se define como:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho \text{ NIR} - \rho \text{ red}}{\rho \text{ NIR} + \rho \text{ red}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde: $\rho \text{ NIR}$ corresponde a la corrección atmosférica de la reflectancia en la banda espectral del infrarrojo cercano y $\rho \text{ red}$ corresponde a la corrección atmosférica de la reflectancia en la banda roja del espectro visible.

5.3.2 EVI – Índice de Vegetación Mejorado

Este índice fue desarrollado con el fin de optimizar la señal de la vegetación, mejorando su sensibilidad en regiones de alta biomasa para garantizar un monitoreo idóneo a partir del

desacoplamiento de la señal de fondo del dosel y reduciendo la influencia de la atmósfera (Huete et al., 2002).

Adicionalmente, este índice integra las bandas del espectro visible azul y roja y la banda del infrarrojo cercano (NIR) junto con los respectivos coeficientes de ajuste; mediante la diferencia entre las bandas azul y roja puede generar un valor estable pese a la existencia de un entorno variable. La ecuación de este índice es:

$$\text{EVI} = G \frac{\rho \text{ NIR} - \rho \text{ red}}{\rho \text{ NIR} + (C_1 \rho \text{ red}) - (C_2 \rho \text{ blue}) + L} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde: $\rho \text{ NIR}$ corresponde a la corrección atmosférica de la reflectancia en la banda espectral del infrarrojo cercano; $\rho \text{ red}$ corresponde a la corrección atmosférica de la reflectancia en la banda roja del espectro visible; $\rho \text{ blue}$ corresponde a la corrección atmosférica de la reflectancia en la banda azul del espectro visible; C_1 y C_2 que hace referencia a unos coeficientes iguales a 6 y 7,5 respectivamente; L que corresponde al factor de corrección del suelo igual a 1 y G que corresponde al factor de ganancia igual a 2,5. Este factor ajusta el rango dinámico del EVI a un rango comparable con el NDVI.

5.4 La teledetección, los sensores remotos y la evapotranspiración

5.4.1 Teledetección y sensores remotos

Definir la teledetección no es tarea sencilla, pues no existe una definición única que haya sido aceptada a nivel global, por esta razón, Sobrino (2001) la define como “*la adquisición de información sobre un objeto a distancia, esto es, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador*”. Adicionalmente, Pérez Gutiérrez & Muñoz Nieto (2006),

indican que la teledetección es la técnica que tiene como objetivo capturar, procesar y analizar imágenes satelitales.

Pese a la existencia de muchas definiciones, Chuvieco Salinero (1990) indica que un sistema de teledetección espacial, incluye los siguientes elementos:

- Fuente de energía: Supone el origen del flujo energético que es detectado por un sensor (principal fuente de energía es la energía solar). Dependiendo si es un foco externo al sensor o no, podemos hablar de teledetección pasiva o activa respectivamente.
- Cubierta terrestre: Formado por las diferentes coberturas de la tierra (vegetación, suelo, construcciones, entre otros) que reciben la señal proveniente de la fuente de energía y que la reflejan de acuerdo con sus características físicas.
- Sistema sensor: Capta la energía reflejada por las coberturas terrestres, la codifica y envía (o graba) directamente al sistema de recepción.
- Sistema de recepción – comercialización: Donde se recibe, se graba y se corrige la información enviada por la plataforma, para su posterior distribución a los intérpretes.
- Intérprete: Encargado de analizar la información que ya viene presentada en imágenes análogas o digitales.
- Usuario final: Encargado de analizar el resultado final de la interpretación.

Los primeros satélites de observación terrestre, y que dieron paso a la teledetección moderna; comenzaron a operar a principios de 1970 (Paruelo, 2008) con el desarrollo de las primeras misiones espaciales. Adicionalmente, la evolución de los mismos se ha visto influenciado por el constante avance de los sensores utilizados para obtener mejores resoluciones (Pérez Gutiérrez & Muñoz Nieto, 2006) y por consiguiente, el sistema científico-técnico ha podido poner

a disposición de la humanidad diferentes herramientas y modelos que permiten traducir los datos capturados por los sensores remotos, en conocimiento útil y aplicable para la toma de decisiones que mejoren la calidad de vida del ser humano (Paruelo, 2008).

Como se indicó en el punto 6.4.1 los sensores puede ser activos o pasivos, siendo los primeros aquellos sensores que generan su propia energía, mientras que los segundos dependen de la energía ambiental de una fuente externa (principalmente proveniente del sol para el caso de la tierra) (Parra-Henao, 2010).

A continuación, se hablará de algunos temas que relacionan los sensores remotos con la evapotranspiración, que es el tema de interés de este trabajo.

5.4.1.1 Métodos de determinación de la evapotranspiración a partir de sensores remotos

La medición directa de la evapotranspiración es un proceso complejo, tanto a nivel regional como global, debido a que diversos factores y diferentes variables (tanto en el tiempo como en el espacio) que intervienen en el proceso. Es por ello, que los datos de satélites facilitan la “*determinación de la variación espacial y temporal de los diferentes términos de la ecuación*” empleada para el calculo de la evapotranspiración; a escalas espaciales diferentes (Degano et al., 2023).

A continuación se presentan algunos de los principales métodos utilizados para la estimación de la evapotranspiración mediante el uso de imágenes satelitales. Estos métodos tienen en común la teoría del balance energetico y la hipotesis de similaridad de Monin-Obokhov (Guzmán-Alvarez, 2007).

5.4.1.1.1 *SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), TSEB (Two-Sources Energy Balance) y SEBS (Surface Energy Balance System)*

El método de SEBAL permite calcular la evapotranspiración de grandes áreas utilizando cualquier tipo de cobertura a partir de imágenes satelitales (Taïpe, 2014). Su ecuación es:

$$LE_{\text{PIXEL}} = \lambda ET_{\text{PIXEL}} = R_{n,\text{PIXEL}} - H_{n,\text{PIXEL}} - G_{n,\text{PIXEL}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde: LE_{PIXEL} corresponde al flujo de calor latente; ET_{PIXEL} hace referencia a la evapotranspiración; $R_{n,\text{PIXEL}}$ corresponde a la radiación neta; $H_{n,\text{PIXEL}}$ hace referencia al flujo de calor sensible y $G_{n,\text{PIXEL}}$ corresponde al flujo de calor del suelo; todo para cada píxel.

El método TSEB combina las características biofísicas de la vegetación con el balance energético del suelo. Sin embargo, este modelo presenta inconvenientes cuando se incluye la sensibilidad de las temperaturas de la superficie terrestre (Colaizzi, 2016). Su ecuación está dada por:

$$R_N - G_o = H + LE \quad \text{Ecuación 9}$$

**Nota: Todas las unidades corresponde a $W m^{-2}$*

Donde: R_N corresponde a la radiación neta; G_o corresponde al flujo de calor superficial del suelo; H corresponde al flujo de calor sensible; y LE corresponde al flujo de calor latente.

Por último el método SEBS consiste en una serie de procedimientos que a partir de la determinación de parámetros físicos de la superficie terrestre (emisividad, temperatura, tipo de cobertura vegetal desde la medición de reflectancia espectral y radiancia, entre otros), busca determinar la fracción de evaporación con respecto al balance energético (Su, 2002).

Adicionalmente, es un medio para determinar la evapotranspiración diaria, mensual o anual principalmente de zonas con condiciones climáticas semi-áridas y monitorear sequías (Su, 2002).

5.4.1.2 Análisis del comportamiento de la evapotranspiración a partir del uso de sensores remotos

A continuación, se presentarán dos sensores mediante los cuales, a partir de sus datos; se puede realizar el cálculo de la ET.

5.4.1.2.1 Landsat

El programa Landsat consiste en una serie de misiones de observación de la Tierra a través del uso de satélites, las cuales son gestionadas conjuntamente por la NASA y la USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos) (NASA, 2021). Landsat ha sido la misión con el registro satelital ambiental global más largo, abarcando aproximadamente cinco décadas desde su primer lanzamiento en julio de 1972 (Landsat-1) hasta septiembre de 2021 (Landsat-9). Actualmente, Landsat-8 y Landsat-9 proporcionan datos de la cobertura global multiespectral con una resolución de 30 metros (m) durante 8 días; dichos datos contribuyen al monitoreo, comprensión y gestión de los recursos de la Tierra (Wulder et al., 2022).

Este programa proporciona cuatro tipos de imágenes: Multiespectral Scanner (MSS) por Landsat 1,2 y 3; Thematic Mapper (TM) por Landsat 4 y 5; Enhanced Thematic Mappers (ETM+) por Landsat 7 y Observation Land Images (OLI) por Landsat 8. Las cuales, mediante diferentes métodos de clasificación han sido utilizadas para analizar la cobertura terrestre (Phiri & Morgenroth, 2017).

Con respecto al análisis de la evapotranspiración, los métodos de teledetección utilizados por Landsat (7 y 8) proporcionan una ET de alta resolución espacial (30 m) pero con baja resolución temporal (de 8 a 16 días) (Mbabazi et al., 2023).

5.4.1.2.2 MODIS

Debido a que la cobertura del planeta ha cambiado drásticamente y los cultivos y pastizales han presentado una expansión asociada al 40% de la cobertura mundial del suelo, los efectos del cambio climático (y del efecto invernadero) se han incrementado, siendo estos visibles en los cambios en los ciclos hidrológicos, la pérdida de biodiversidad, la erosión de los suelos y el aumento de gases (Mas, 2011). Como resultado de la preocupación de que los cambios climatológicos amenazarán la existencia del ser humano y la vida en la tierra, varios grupos especializados, gobiernos e instancias internacionales empezaron a esforzarse por abordar dicha problemática. Para ello se crearon diferentes proyectos de percepción remota, siendo uno de los más ambiciosos el Earth Observing System (EOS) de la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio), cuyo principal objetivo es la observación continua de los cambios globales, lo cual incluye el estudio integrado de la atmósfera, de los océanos y de la superficie terrestre (Mas, 2011).

Dentro de dicho proyecto (EOS) sobresale el sensor llamado “*espectroradiómetro para imágenes de resolución moderada (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS) a bordo de dos plataformas: Terra y Aqua*”, por sus características especiales y espectrales es considerado uno de los más importantes para realizar seguimiento a los cambios en la tierra. MODIS fue diseñado por un equipo de científicos (de diferentes disciplinas), alrededor de unos 10 años; que poseían un amplio conocimiento en sensores remotos. Los cuales definieron los

requisitos para la toma, calibración y procesamiento de los datos; adicionalmente, el equipo científico de MODLAND (MODIS Land) desarrollo (y continua desarrollando) los diferentes métodos y algoritmos que permiten generar productos sobre la superficie de la tierra (Mas, 2011).

5.4.1.2.2.1 MODIS Evapotranspiración (MOD16)

Este producto se puede utilizar para el cálculo del equilibrio hídrico y energético regional y adicionalmente para calcular el estado hídrico del suelo, por lo cual, se convierte en un producto importante para el uso y buen manejo de los recursos hídricos. A largo plazo los datos de evapotranspiración pueden ayudar a estimar los efectos del cambio climático, el uso de la tierra o las alteraciones de los ecosistemas entorno al agua (NASA, 2023). MOD16 se basa en la lógica de la ecuación de Penman-Monteith (S. Running et al., 2021) y a su vez, se divide en dos productos:

El primero es el producto MOD16A2 (**Tabla 4**) el cual reúne los datos de evapotranspiración Neta L4 Global de 500 m (de resolución) durante 8 días (NASA, 2023).

Tabla 4.

Capas del producto de datos MOD16A2

Nombre	Descripción	Unidades	Rango válido	Factor de escala
ET_500m	Evapotranspiración total	Kg/m ² /8día	-32767 a 32700	0.1
LE_500m	Flujo de calor latente promedio	J/m ² /día	-32767 a 32700	10000
PET_500m	Evapotranspiración potencial total	Kg/m ² /8día	-32767 a 32700	0.1
PLE_500m	Flujo de calor latente potencial promedio	J/m ² /día	-32767 a 32700	10000
ET_QC_500m	Banderas de control de calidad de la evapotranspiración	Campo de bits	0 a 254	N/A

Running, S., Mu, Q., & Zhao, M. (2017a). *MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006* [dataset]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006> y Running, S. W., Mu, Q., Zhao,

M., & Moreno, A. (2021). *User's Guide. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6.1). NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm.*

El segundo es MOD16A3 (**Tabla 5**) el cual saca el registro tomando como base los datos de la Evapotranspiración neta Anual L4 Global de 500 m (de resolución) (NASA, 2023).

Tabla 5.

Capas del producto de datos MOD16A3

Nombre	Descripción	Unidades	Rango válido	Factor de escala
ET_500m	Evapotranspiración total	Kg/m ² /año	0 a 65500	0.1
LE_500m	Flujo de calor latente promedio	J/m ² /día	0 a 32700	10000
PET_500m	Evapotranspiración potencial total	Kg/m ² /año	0 a 65500	0.1
PLE_500m	Flujo de calor latente potencial promedio	J/m ² /día	0 a 32700	10000
ET_QC_500m	Evaluación de la calidad de la evapotranspiración	Porcentaje	0 a 100	N/A

Running, S., Mu, Q., & Zhao, M. (2017b). *MOD16A3 MODIS/Terra Net Evapotranspiration Yearly L4 Global 500m SIN Grid V006* [dataset]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A3.006> y Running, S. W., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2021). *User's Guide. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6.1). NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm.*

5.4.2 *Estado del arte*

A continuación, se presentarán algunos casos de estudio en dónde se ha tenido como objetivo la estimación de la evapotranspiración (y su implementación) a partir del uso de imágenes satelitales, provenientes principalmente del sensor MODIS.

En la costa de Hermosillo, Sonora, México, Rodríguez et al. (2017) realizó un estudio cuyo objetivo era elaborar y validar un modelo a partir de la correlación lineal de los NDVI utilizando datos provenientes de las imágenes de PROBA-V; para la estimación de la evapotranspiración de un cultivo de sandía. Como resultado, se obtuvo que mediante este índice de vegetación es posible de realizar dicha estimación; adicionalmente, que, para los cultivos de sandía, los días de mayor evapotranspiración representan una sobre-estimación del 12%, mientras que los días de menor evapotranspiración alcanza el 57%. Por otro lado, los autores recomiendan realizar más medidas de evapotranspiración con más imágenes satelitales durante los ciclos del cultivo (primavera y verano) con el fin de poder determinar un uso más eficiente del agua.

Pérez Rodríguez (2007) realizó la estimación de la evapotranspiración a escala regional en un área de 100 has en Chile (sin considerar un radio de influencia de los datos entregados por la estación meteorológica), a partir de la utilización de tres modelos (fracción de evaporación (EF), índice de temperatura de cubierta vegetal (TVCI) y resistencia aerodinámica y de canopia (ϕ)), los datos provenían de imágenes del sensor MODIS. Adicionalmente, dicha evapotranspiración estimada se comparó con los valores obtenidos de la aplicación del modelo Penman – Monteith y Hargreaves. Como resultado se obtuvo que, al no considerarse en la temperatura ambiental estimada los efectos orográficos y geomorfológicos de la región; hay una sobreestimación en las zonas costeras de la región y una subestimación en el valle central, además, de los modelos

utilizados, el TVCI y el EF tienen la menor diferencia media cuadrática ya que el primero considera de mejor forma la vegetación existente en la imagen y el segundo solo considera el índice de vegetación y temperatura ambiental.

Para el norte de la Patagonia en Argentina, Cogliati & Finessi (2023), realizaron el análisis de variación temporal (periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 1 de enero de 2023) de la evapotranspiración a partir de la utilización del producto MYD16A2GF V6.1 (cuyas imágenes incluyen información de ET compuesta de 8 días, con una resolución de 500 m). Posteriormente, utilizaron la ecuación de Penman – Monteith para realizar dicha estimación y como resultado obtuvieron que el ciclo anual de la ET para esta área presenta una tendencia significativa creciente hacia el sur de la provincia y decreciente al este de la cordillera de los Andes, por otro lado, se obtuvo la onda anual media de ET del periodo y con el análisis de esta, se pudo establecer que dicha onda ocurrió antes de lo habitual considerando la serie de imágenes.

Venturini et al. (2007) proponen una nueva metodología para obtener mapas de la fracción evaporable (FE) y de evapotranspiración (ET) a partir del uso de productos provenientes del sensor MODIS, sin utilizar la calibración local. Los resultados obtenidos de ET fueron validados en la región Southern Great Plains (SGP) de los Estados Unidos para tres días con un porcentaje de nubosidad de 0% durante el periodo de marzo a abril de 2003, e indicaron que este nuevo modelo es sólido y válido para la generación de salidas gráficas (mapas) asociados con la temperatura de superficie y la temperatura de brillo. Por último, Olivera et al. (2013) estimaron la ET diaria para un paisaje de secano mediterráneo en la zona central de Chile; para ello utilizaron los datos meteorológicos del área de estudio, así como dos escenas provenientes de los sensores ASTER (del cual se utilizaron los contrastes espaciales de reflectancias y temperaturas superficiales para

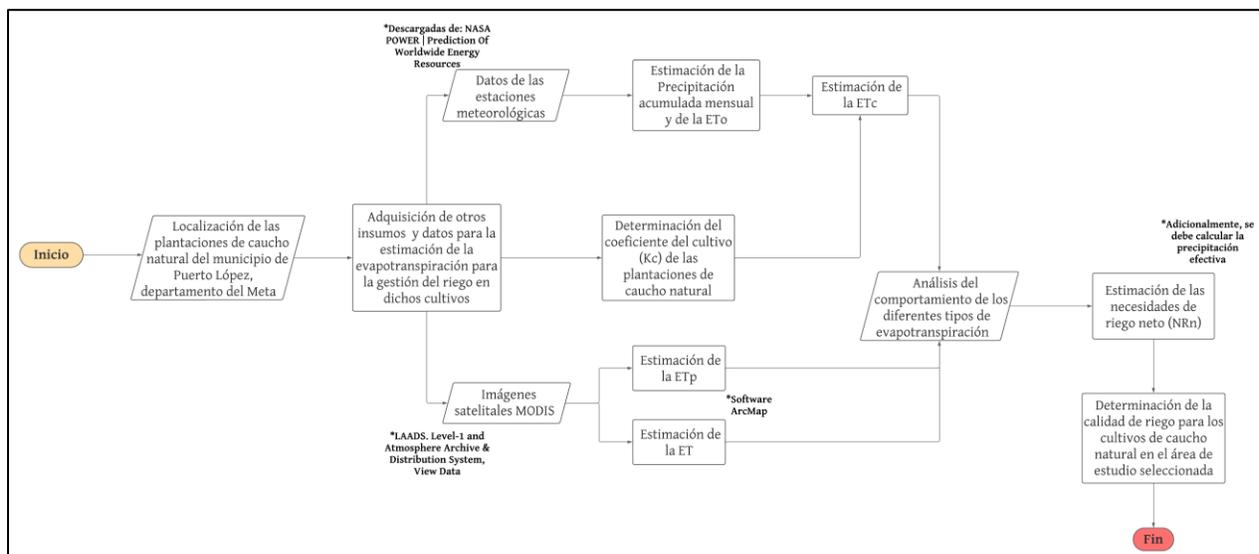
calibrar el modelo del balance de energía S-SEBI con el fin de estimar la fracción evaporativa) y MODIS (del cual se obtuvo los perfiles atmosféricos y las temperaturas del aire máximas y mínimas diarias de estaciones meteorológicas, con el fin de establecer la radiación neta, teniendo en cuenta la heterogeneidad del relieve). Como resultado, se obtuvo las tasas medias de ET desde $5,8 \pm 1,8 \frac{mm}{día}$ y $6,4 \pm 2,1 \frac{mm}{día}$ para ambas escenas, lo cual puso en evidencia la variedad de coberturas presentes en las mismas. Adicionalmente, al aplicar el modelo S-SEBI se pudo determinar también, que se realizó un eficiente procedimiento para la estimación de la ET_r , lo que se puede traducir en información valiosa para el cálculo de balance hídrico y consumo de agua, permitiendo así, una mejor planificación de los recursos hídricos.

6. Diseño metodológico

A continuación, en la **Figura 1**, se expone el esquema metodológico elaborado para la estimación de la evapotranspiración destinada a la gestión del riego en las plantaciones de caucho natural dentro del área de estudio seleccionada. Este esquema se presenta a través de un diagrama de flujo que detalla los insumos, los procedimientos y los programas informáticos empleados en el proceso.

Figura 1

Esquema metodológico para la estimación de la evapotranspiración para la gestión del riego de los cultivos de caucho natural del área de estudio seleccionada



Nota. El diagrama fue elaborado en el software Luchidchart.

6.1 Área de estudio

Las plantaciones de caucho natural, objeto de nuestro estudio, están ubicadas en la región noreste del municipio de Puerto López, en el departamento del Meta. A nivel nacional, Puerto López es reconocido como el "Ombligo de Colombia", dado que coincide con el centro geográfico

del territorio colombiano, de acuerdo con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (Alcaldía Municipal de Puerto López, s. f.-b).

A continuación, en la **Tabla 6** se muestra información relevante sobre el municipio presentada por la Alcaldía Municipal de Puerto López (s. f.-a) en su página oficial.

Tabla 6

Información del municipio de Puerto López

Categoría	Descripción
Límites	<p>Norte: Municipios de Cumaral, Cabuyaro y el departamento de Casanare.</p> <p>Sur: Municipio de San Martín.</p> <p>Oriente: Municipio de Puerto Gaitán.</p> <p>Occidente: Municipios de San Carlos De Guaroa y Villavicencio.</p>
Extensión	<p>Total: 6.740 km² hasta las márgenes de los ríos que sirven como límite y 6.898 km² si se incluyen los cuerpos de agua.</p> <p>Área rural: 6.730,5 km²</p> <p>Área urbana: 9,5 km²</p>
Población total	<p>33.440 habitantes</p> <p>Altura sobre el nivel del mar (msnm): 365</p>
Geografía	<p>Descripción física: Cuenta con una terraza agradacional nivel superior, conformada por arcillas aluviales con capas de gravas a diferentes profundidades, adicionalmente cuenta con superficies de relieve plano (pendientes entre 1 – 3%); taludes de terraza conformado por depósitos mixtos aluviales que tienden a estar sujetas a encharcamientos, su relieve es ligeramente quebrado (pendientes que varían entre 7 – 12%) y presentan una erosión ligera; vallecitos aluviales, que son zonas de inundaciones frecuentes, con pendientes entre el 0 – 1% y entre el 1 – 3%; y valle aluvial de los ríos Melua y Yucao, zonas en donde existen lagunas, meandros y cauces abandonados, cuya pendiente varía entre el 1 – 12%.</p> <p>Dentro de la red hidrológica que recorre el municipio, el río Meta es el de mayor importancia; adicionalmente, este recibe las aguas de los ríos Guayuriba, Guatiquia, Pajure y Humea.</p>
Hidrografía	<p>Por otro lado, el caño Banderas es un drenaje que define el perímetro urbano al sur del municipio y sirve como colector del 33% de las aguas negras y de lluvias del alcantarillado municipal y el caño la Venturosa, define el perímetro urbano</p>

en gran parte del área noroccidental del municipio, pese a que no presenta contaminación residual su problemática radica en la deforestación en los 30 m a lado y lado de ronda del río.

Precipitación: Las lluvias presentan un aumento en promedio de Sur a Norte con valores entre los 2.000 – 2.700 mm. Hacia la zona norte del municipio (en el área urbana) aumentan hasta valores próximos a los 2.600 mm año en 135 días. Hacia la zona central del municipio las lluvias promedian entre los 2.100 – 2.300 mm por año, distribuyéndose en 120 días.

Aspectos climáticos

Los meses de junio y julio son los más lluviosos, mientras que los meses de enero y febrero son los más secos.

Temperatura promedio: 26,5 °C. Siendo febrero y marzo los meses más cálidos (temperaturas entre los 27 – 28 °C); y junio y julio los meses más fríos (temperaturas de 24 °C).

Temperatura máxima: 38,5 °C.

Temperatura mínima: 14 °C.

Distancia de referencia

Bogotá: 206 km.

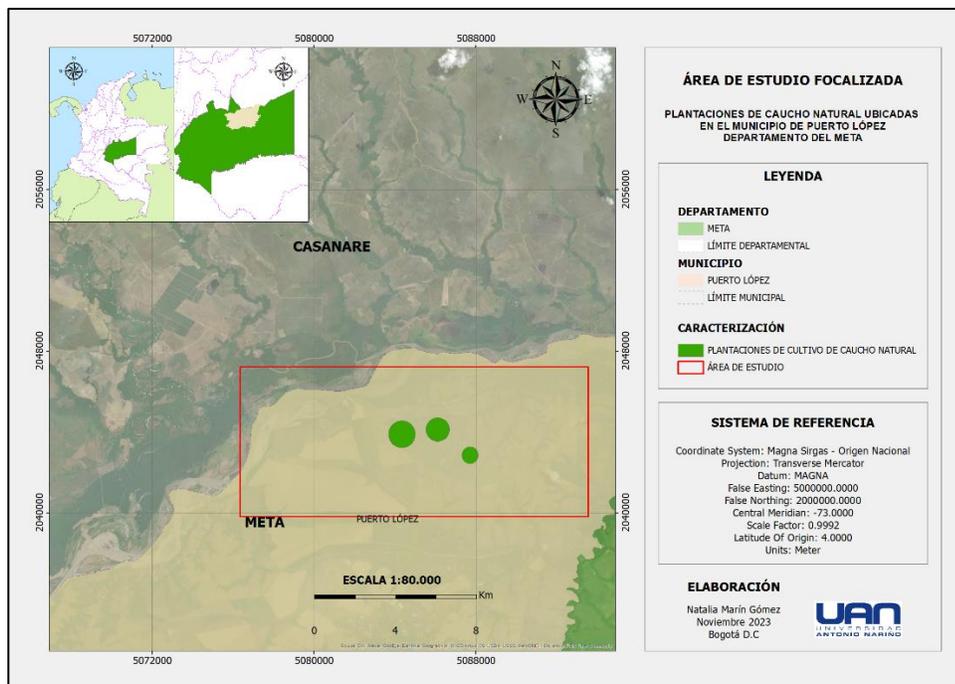
Villavicencio: 83 km.

Alcaldía Municipal de Puerto López. (s. f.-a). *Información del Municipio*. Recuperado 23 de octubre de 2023, de <https://www.puertolopez-meta.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>

Las plantaciones de caucho natural (*Heveas Brasiliensis*) escogidas para llevar a cabo este estudio abarcan una extensión de 426,38 hectáreas (has) cuyo periodo de siembra corresponde al año 2009. Por temas de confidencialidad del Centro de Investigación en Caucho CENICAUCHO y la Confederación Cauchera Colombiana CCC, en la **Figura 2** la ubicación de las plantaciones de caucho natural seleccionadas no es señalada con exactitud.

Adicionalmente, en el presente trabajo no se dará a conocer información del productor, cantidad de materia prima producida, entre otros datos que puedan ser considerados sensible por estas organizaciones.

Figura 2

Localización del área de estudio

Nota. La salida cartográfica fue elaborada con el software ArcMap. La información cartográfica fue obtenida de los datos abiertos del geoportal Colombia en Mapas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) 2023. La localización y área de las plantaciones de caucho natural fueron obtenidas de los datos del Centro de Investigación en Caucho CENICAUCHO y la Confederación Cauchera Colombiana CCC 2022.

6.2 Estimación de la evapotranspiración, las necesidades y calidad del riego de los cultivos de plantaciones de caucho natural.

A continuación, procederemos a detallar los insumos y el procesamiento de la información empleados en el cálculo de las necesidades y calidad de riego de los cultivos de las plantaciones de caucho natural en el municipio de Puerto López. Es relevante destacar que los datos (insumos)

utilizados para llevar a cabo los diversos cálculos y análisis en este estudio corresponden al periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 1 de enero de 2023.

6.2.1 Insumos

6.2.1.1 Datos meteorológicos

Para llevar a cabo el análisis de las necesidades de riego y determinar la evapotranspiración de referencia (ET_0) en las plantaciones de caucho natural, resulta indispensable contar con los datos meteorológicos mensuales correspondientes al año 2022. Estos datos se obtuvieron de las estaciones meteorológicas más cercanas al área seleccionada, las cuales están detalladas en la **Tabla 7**, junto con sus respectivas coordenadas en el sistema WGS84.

Tabla 7

Estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio

Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Departamento	Municipio
Campamento Yucao [35127020]	4.340556	-72.156361	147	Meta	Puerto López
Humapo [35117010]	4.33	-72.39	153	Meta	Puerto López
La Poyata [35187010]	4.441833	-72.152389	148	Casanare	Mani

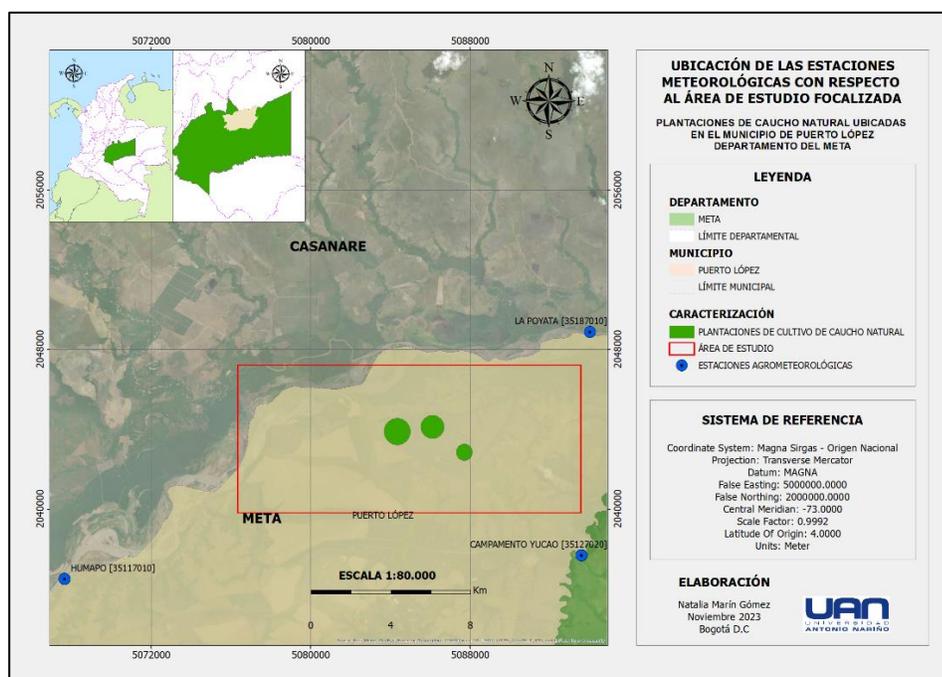
Nota. Breve descripción de algunos de los atributos asociados a las estaciones meteorológicas seleccionadas. *La localización de las estaciones fue obtenida de los datos abiertos del geoportail Colombia en Mapas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) 2023.*

La obtención de la información respectiva para cada estación, incluyendo la Temperatura máxima (TMAX), Temperatura mínima (TMIN), Temperatura media (TM) del aire a 2 m sobre la superficie terrestre, Humedad relativa a 2 m (HR), Velocidad del viento media (VVM) a 2 m de

altura, Radiación extraterrestre (RADEXT), Radiación solar (RADSOL) y Precipitación acumulada mensual (PPP_ACUM_MEN), se llevó a cabo mediante la consulta y descarga en la página de NASA POWER | *Prediction Of Worldwide Energy Resources* (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>). Además, en la **Figura 3** se presenta un mapa que ilustra la ubicación de las estaciones meteorológicas en relación con las plantaciones de cultivos de caucho natural seleccionadas, identificadas con una estrella, dentro del área de estudio.

Figura 3

Localización de las estaciones meteorológicas con respecto a las plantaciones seleccionadas.



Nota. La salida cartográfica fue elaborada con el programa ArcMap. La información cartográfica y localización de las estaciones meteorológicas fueron obtenidas de los datos abiertos del geoportel Colombia en Mapas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) 2023.

La localización y área de las plantaciones de caucho natural fueron obtenidas de los datos del Centro de Investigación en Caucho CENICAUCHO y la Confederación Cauchera Colombiana CCC 2022.

6.2.1.2 Imágenes MODIS

Con el propósito de analizar el comportamiento tanto de la evapotranspiración total como de la evapotranspiración potencial total en la previamente mencionada área de estudio, y así poder evaluar la gestión del riego en los cultivos de caucho natural, se emplearon las imágenes MOD16A2GF del sensor MODIS. Estas imágenes fueron adquiridas a través del satélite Terra, con una resolución de 500 metros y un intervalo de captura de datos de 8 días. Las imágenes fueron descargadas del sistema LAADS (Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System) en el enlace View Data (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search>).

Las imágenes seleccionadas (**Tabla 8**) para el desarrollo de este trabajo se encuentran comprendidas entre el periodo del 01 de enero de 2022 hasta el 01 de enero de 2023.

Tabla 8

Imágenes MODIS descargadas

Insumo	Nombre	Año
IMAGEN MODIS Enero	MOD16A2GF.A2022025.h10v08.061.2023021141032.hdf	2022
IMAGEN MODIS Febrero	MOD16A2GF.A2022057.h10v08.061.2023022030726.hdf	2022
IMAGEN MODIS Marzo	MOD16A2GF.A2022081.h10v08.061.2023022124653.hdf	2022
IMAGEN MODIS Abril	MOD16A2GF.A2022113.h10v08.061.2023023010535.hdf	2022
IMAGEN MODIS Mayo	MOD16A2GF.A2022145.h10v08.061.2023023153422.hdf	2022
IMAGEN MODIS Junio	MOD16A2GF.A2022177.h10v08.061.2023024061712.hdf	2022

IMAGEN MODIS Julio	MOD16A2GF.A2022201.h10v08.061.2023027052809.hdf	2022
IMAGEN MODIS Agosto	MOD16A2GF.A2022233.h10v08.061.2023027145748.hdf	2022
IMAGEN MODIS Septiembre	MOD16A2GF.A2022265.h10v08.061.2023028010710.hdf	2022
IMAGEN MODIS Octubre	MOD16A2GF.A2022297.h10v08.061.2023028100535.hdf	2022
IMAGEN MODIS Noviembre	MOD16A2GF.A2022329.h10v08.061.2023028182617.hdf	2022
IMAGEN MODIS Diciembre	MOD16A2GF.A2022353.h10v08.061.2023029010511.hdf	2022

Nota. Las imágenes fueron obtenidas de LAADS. Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System, View Data (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search>).

6.2.2 *Procesamiento*

6.2.2.1 *Estimación de la precipitación (PPP) acumulada mensual y de la ET_o a partir de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas*

Utilizando los datos descargados de las estaciones meteorológicas, detallados en los insumos, se procede al cálculo de la precipitación acumulada mensual y de la Evapotranspiración de referencia (ET_o).

Las estaciones meteorológicas proporcionan valores de precipitación acumulada para cada mes (PPP_ACUM_MEN). Sin embargo, dada la distancia significativa entre el área de estudio y cada estación, se lleva a cabo una interpolación utilizando los valores de precipitación de cada estación. Se optó por el método de interpolación IDW, con parámetros establecidos en cuatro (4) sectores y un mínimo y máximo de puntos de (3) tres, debido a la limitada cantidad de estaciones cercanas a los cultivos seleccionados y su distancia considerable con respecto a estos. Como resultado, se obtuvo el promedio de precipitación acumulada mensual en el área de estudio

seleccionada, información que se utilizará para evaluar las necesidades y la calidad del riego en las plantaciones de cultivos de caucho natural seleccionadas.

La Evapotranspiración de referencia (ET_o) se calculó para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas mediante el método Penman-Monteith FAO98 (Ecuación 1). Este método requirió la información de la Temperatura máxima (TMAX), Temperatura mínima (TMIN), Temperatura media (TM) del aire a 2 m sobre la superficie de la tierra, Humedad relativa a 2 m (HR), Velocidad del viento media (VVM) a 2 m de la superficie de la tierra y Radiación solar (RADSOL) proporcionada por cada estación.

Dado que el área de estudio presenta una distancia considerable con respecto a cada estación, se lleva a cabo una interpolación utilizando los valores resultantes de la evapotranspiración de referencia de cada estación. Se eligió el método de interpolación IDW, con parámetros establecidos en cuatro (4) sectores y un mínimo y máximo de puntos de (3) tres, debido a la limitada cantidad de estaciones cercanas a los cultivos seleccionados y su distancia significativa con respecto a estos.

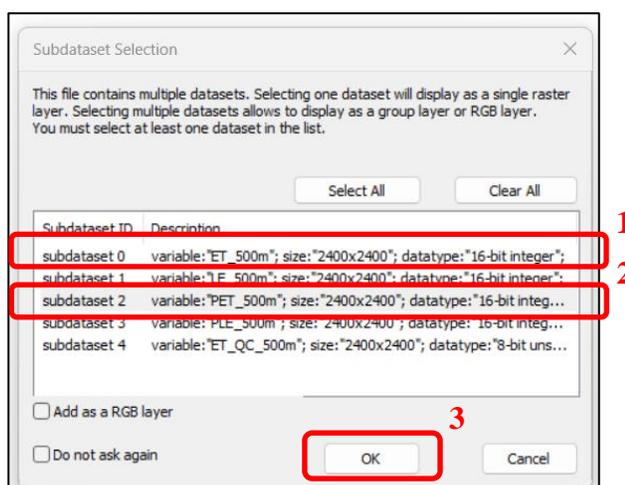
Este procedimiento se lleva a cabo con el propósito de analizar la dinámica de la evapotranspiración de referencia (*consultar la sección 8.2.1 Estimación de la ET_o*), permitiendo su comparación con los patrones de comportamiento de la ET y ET_p (obtenidos a partir de imágenes satelitales), así como con la ET_c (*consultar la sección 8.2.4 Análisis comparativo del comportamiento de la ET_o , ET, ET_p y ET_c*). Además, esta evaluación tiene como objetivo estimar las necesidades y la calidad del riego para las plantaciones de cultivos de caucho natural seleccionadas.

6.2.2.2 Estimación de la ET y la ET_p a partir de las imágenes MODIS descargadas

En una primera instancia, se procede a cargar cualquiera de las imágenes, comenzando con la obtenida para el mes de enero, en el software ArcMap. A continuación, se despliega un menú que presenta las diversas capas que conforman la imagen (ver **Figura 4**). En este paso, se seleccionan las variables con las que se llevará a cabo el análisis, específicamente la Evapotranspiración Total (ET) y la Evapotranspiración Potencial Total (ET_p).

Figura 4

Ventana de selección del subconjunto de datos



Nota. Este procedimiento debe realizarse con todas las imágenes que se cargarán en el software ArcMap.

Una vez concluido el paso previo, se procederá a recortar la imagen en relación con el área de estudio designada (plantaciones), posteriormente, se calculan los valores de la evapotranspiración total y potencial. Sin embargo, para calcular la ET y ET_p, primero se deben eliminar los valores atípicos, de acuerdo con S. W. Running et al. (2021) en las imágenes MOD16 A2 (o MOD16A2GF) hay 7 valores de relleno para píxeles sin vegetación (almacenados en el

rango de valores de 32761 a 32767). Adicionalmente, todos los conjuntos de datos de estas imágenes, a excepción del campo de datos de control de calidad (ET_QC_500m); tienen un rango válido que va desde -32767 a 32700. Una vez eliminados los valores atípicos, se multiplican los valores válidos de la imagen resultante por su respectivo factor de escala; detallado en la **Tabla 4**.

No obstante, las evapotranspiraciones obtenidas a partir de las imágenes presentan una resolución de 500 m durante un intervalo de 8 días, por lo que es necesario transformarlas a la escala mensual. Para lograr esto, se realiza el cálculo de la evapotranspiración total o potencial para un día específico. Esta operación implica dividir el valor de la evapotranspiración resultante de las imágenes entre la diferencia de días entre la fecha de la imagen correspondiente al mes siguiente y la fecha de la imagen que pertenece al mes en análisis.

Finalmente, se lleva a cabo el análisis de los resultados estadísticos de la Evapotranspiración (ET) y la Evapotranspiración Potencial (ET_p) correspondientes al año 2022 (consultar la sección 8.2.2 *Estimación de la ET y la ET_p*). Este análisis tiene como objetivo evaluar el comportamiento de estas variables a lo largo de un extenso periodo de tiempo, considerando que factores como la temperatura, la precipitación, el brillo solar, entre otras variables, experimentan variaciones a lo largo de los diferentes meses del año.

6.2.2.3 *Estimación de la ET_c*

La Evapotranspiración del Cultivo (ET_c) se calculó mediante la aplicación de la **Ecuación 3**. La Evapotranspiración de Referencia (ET_o) se determinó de acuerdo con las pautas establecidas en la sección 7.2.2.1, que trata sobre la *Estimación de la Precipitación acumulada mensual y la ET_o a partir de los datos recopilados de las estaciones meteorológicas*. Para el coeficiente de cultivo (kc) correspondiente al árbol de caucho natural, se adoptó el propuesto por G. Allen et al.

(2006) en su obra "Evapotranspiración del Cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". El valor de dicho coeficiente es 1, que corresponde al K_{med} (coeficiente del cultivo medio). Es crucial destacar que el coeficiente del cultivo puede experimentar variaciones según el desarrollo de la vegetación, la evolución de la cobertura del suelo y otros factores. No obstante, para este trabajo, se asumió un valor constante para el coeficiente del cultivo, específicamente el K_{med} (coeficiente del cultivo medio), aplicándolo de manera uniforme a lo largo de todos los meses. La elección de este valor se fundamenta en la edad de catorce (14) años de las plantaciones de cultivo de caucho natural seleccionadas, las cuales ya han iniciado su etapa productiva, según lo indicado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y el Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria en 1998. Esta etapa productiva comienza entre los 6 y 7 años después de la siembra y el soporte técnico. Los resultados de este procedimiento se presentarán en la *sección 8.2.3 Estimación de la ETC*.

6.2.2.4 Estimación de las necesidades de riego neto (NRn) de las plantaciones seleccionadas

Para lograr un uso eficiente del recurso hídrico en el riego, es fundamental considerar varios aspectos clave, tales como un diseño adecuado del sistema de riego, su gestión efectiva, la aplicación de riegos en condiciones meteorológicas propicias y, a su vez, garantizar que las cantidades aplicadas satisfagan las necesidades hídricas del cultivo a lo largo de su ciclo (Faci González, 2012).

Existe una metodología sencilla y accesible para la determinación de las necesidades de riego, la cual es propuesta por la FAO (*Ecuación 10*), basándose en el libro Evapotranspiración del Cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Sin

embargo, es importante señalar que mediante la aplicación de esta metodología no se está estimando la dosis o frecuencia adecuada de riego que permita optimizar y evitar posibles pérdidas de agua y nutrientes por drenaje (IVIA. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, s. f.).

Esta metodología consiste en el cálculo de la variable de ET_c , y la precipitación efectiva (P_e), variable que corresponde al porcentaje de lluvia que es realmente aprovechable por las plantas (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2019).

$$NR_n = ET_c - P_e \quad \text{Ecuación 10}$$

Adicionalmente, hay que tener en cuenta que existen diferentes métodos para el cálculo de la P_e , algunos de ellos son: El porcentaje fijo, AGLW-FAO y USDA (Villazón Gómez et al., 2021). Sin embargo, de acuerdo con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2021) el método más preciso para determinar dicha precipitación es a través de las observaciones en campo, pero debido a la complejidad de esto se propone el uso del método USDA, el cual relaciona la precipitación y la evapotranspiración potencial del cultivo. Este método consiste en que:

$$P_e = \frac{P_{\text{mensual}} * (125 - 0,2 * P_{\text{mensual}})}{125} \quad \text{Ecuación 11}$$

La ecuación mencionada se emplea cuando los valores de P_{mensual} (precipitación total mensual en mm), que en este estudio corresponden a los resultados obtenidos mediante la estimación del promedio de la precipitación mensual acumulada de las estaciones meteorológicas seleccionadas, son inferiores o iguales a 250 mm.

En caso de que sean mayores a 250 mm, se utilizará la siguiente ecuación:

$$P_e = 125 + 0,1 * P_{\text{mensual}}$$

Ecuación 12

6.2.2.5 Determinación de la calidad de riego para los cultivos de caucho natural del área de estudio

Existen diferentes métodos para determinar la calidad de riego de los cultivos, como por ejemplo el método de relación de adsorción de sodio (RAS), el cual determina la calidad del agua de riego a partir de la estimación de la concentración de cationes de sodio, calcio y magnesio en el agua (Carabalí Quinteros et al., 2019).

No obstante, dado que estamos llevando a cabo un análisis espacio-temporal y trabajando con datos de precipitación mensual, se emplea el Índice Estacional de la Calidad del Riego (SIPI, por sus siglas en inglés), tal como lo define Faci et al. (2000). Este índice se calcula como el porcentaje estacional de las necesidades de riego neto (NRn) (*Ecuación 10*), en relación con el volumen de agua de riego entregado a los cultivos (RI).

En este contexto, para nuestro trabajo, RI representa un valor promedio de 208,3 mm al mes en periodos normales de precipitación, según los datos de Tapiero et al. (2018), aplicables a las plantaciones de cultivos de caucho natural. Es relevante destacar que estos valores son teóricos, ya que, por razones de confidencialidad de los datos, no fue posible obtener mediciones de campo.

La *Ecuación 13* define el índice estacional de la calidad del riego utilizado para este trabajo.

$$SIPI = \frac{NR_n}{RI}$$

Ecuación 13

El SIPI puede ser superior al 100% ($\geq 100\%$), cuando esto ocurre, quiere decir que el cultivo puede sufrir estrés hídrico y, por consiguiente, el riego está siendo mayor con relación a las necesidades que presenta el cultivo; mientras que si este valor es inferior al 100% ($< 100\%$), indica que hay un déficit de riego, en ese caso el riego está siendo menor con respecto a las necesidades que presenta el cultivo.

7. Resultados y análisis de resultados

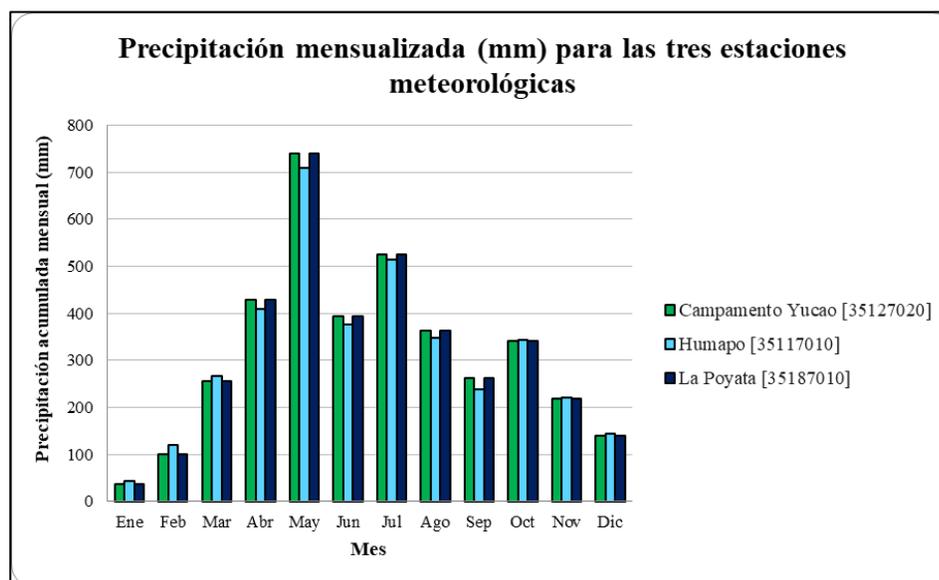
En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de la aplicación de los diferentes procedimientos descritos anteriormente.

7.1 Precipitación mensual para el año 2022 a partir de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas

La **Figura 5** presenta las condiciones meteorológicas de precipitación mensual (PPP) en milímetros (mm) durante el periodo de estudio seleccionado, registradas por cada una de las estaciones meteorológicas.

Figura 5

Comportamiento de la precipitación acumulada mensual para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, año 2022.



Nota. Gráfico obtenido a partir de los datos presentados en el *Anexo A, tabla de PPP acumulada mensual (mm)*.

De acuerdo con Bedoya Arenas & Ramírez Ramírez (2016) y Casanare (2000), la región de la Orinoquía, presenta un régimen de lluvias monomodal, presentando una época húmeda con altos niveles de lluvias entre los meses de abril a octubre, una época seca con mínimos de lluvia entre los meses de diciembre a febrero y un periodo de transición en los meses de marzo y noviembre.

A partir de la figura anterior se puede evidenciar que los datos reportados por las estaciones meteorológicas seleccionadas confirman ese comportamiento monomodal, debido a que en los meses de abril a octubre se presenta un periodo de lluvia, siendo mayo y julio los meses con los de mayor precipitación con valores de 709,02 mm a 739,29 mm y de 514,15 mm a 526,06 mm respectivamente. También se evidencia que en los meses de diciembre a febrero se presenta una época con mínimos niveles de lluvia, siendo enero y febrero los meses con los valores más bajos de precipitación de 36,36 mm a 44,27 mm y 99,87 mm a 119,55 mm respectivamente. Por otro lado, se puede observar que las estaciones Campamento Yucao [35127020] y La Poyata [35187010] presentan los mismos datos de precipitación (PPP) durante todo el año, mientras que con la estación de Humapo [35117010] los datos presentan una diferencia de reporte de 71,63 mm anual.

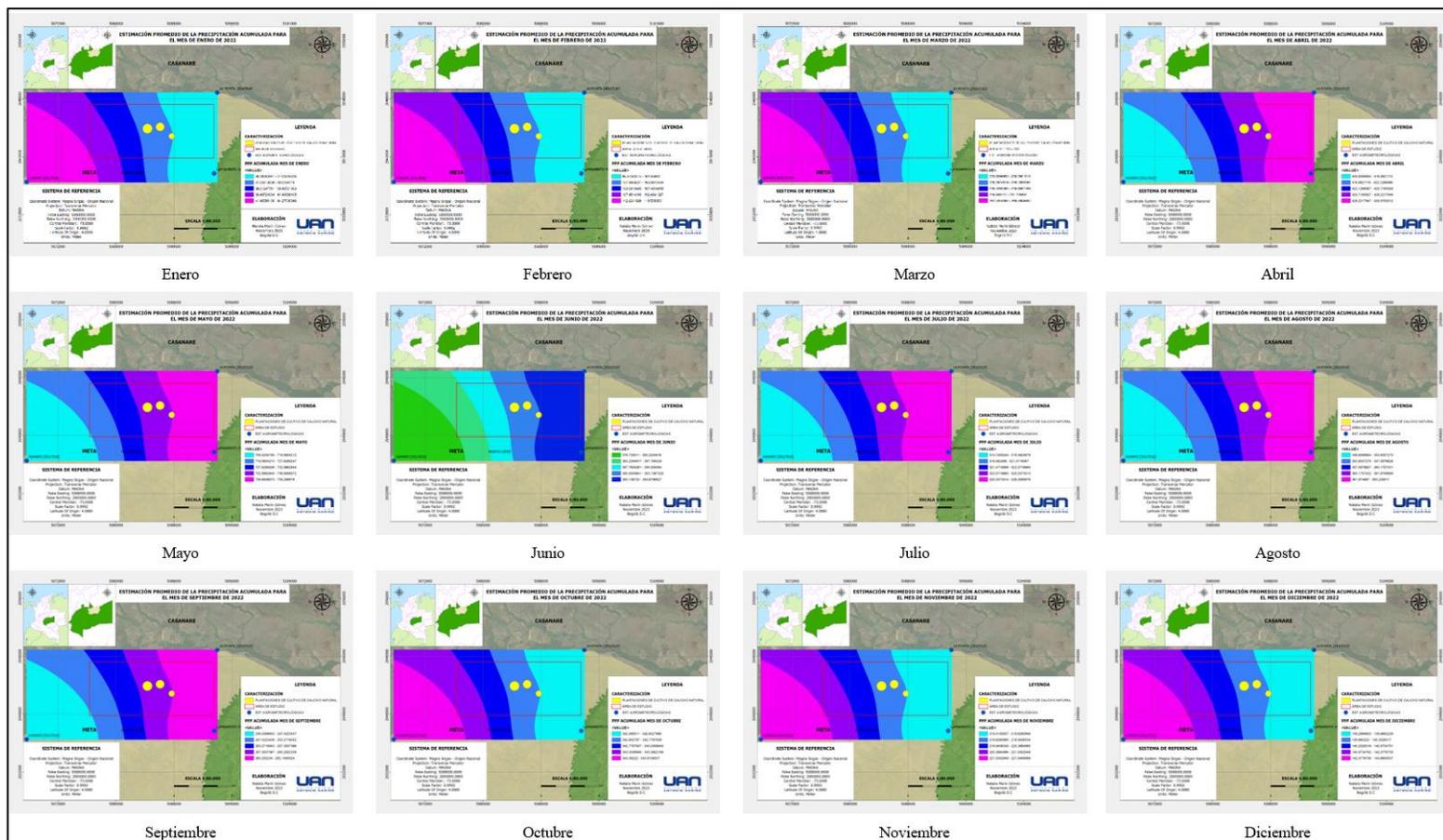
Como se explicó en la *sección 7.2.2.1* sobre la *Estimación de la Precipitación (PPP) acumulada mensual y de la Evapotranspiración de referencia (ETo) a partir de los datos recopilados de las estaciones meteorológicas*, se lleva a cabo una interpolación mediante el método IDW para obtener una estimación del promedio de la precipitación acumulada mensual en el área de estudio. Este resultado fue utilizado posteriormente en otros cálculos.

La **Figura 6** ilustra el patrón de precipitación durante el año 2022. Las tonalidades más claras (tonos azules) indican niveles de precipitación bajos a medios, mientras que las tonalidades más oscuras (tonos morados y rosados) representan niveles de precipitación moderadamente altos o muy altos.

Adicionalmente, la resolución de dichas interpolaciones es de 49,53 x 49,53 metros.

Figura 6

Mapas de estimación de la precipitación acumulada obtenidos mensualmente para el área de estudio seleccionada, año 2022.



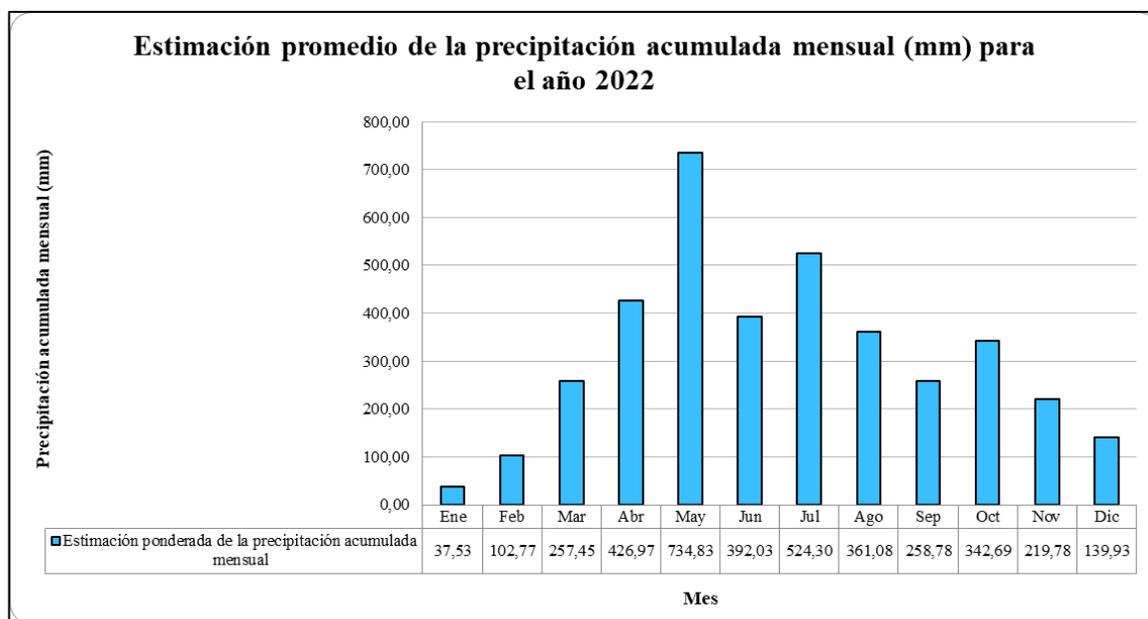
Nota. Los mapas se obtuvieron a partir de la aplicación del método de interpolación IDW en el área de estudio seleccionada, utilizando el software ArcMap. Los datos base (precipitación

acumulada mensual reportada por cada una de las estaciones meteorológicas) pueden ser visualizados en el *Anexo A, tabla de PPP acumulada mensual (mm)*.

A partir de los datos resultantes, descritos con anterioridad; se realiza la construcción de la **Figura 7**, la cual confirma el patrón de precipitación monomodal previamente descrito. Al realizar la sumatoria de las precipitaciones acumuladas mensuales detalladas en esta, se concluye que la precipitación acumulada anual asciende a 3.798,14 mm. Este valor es menor que el registrado por las estaciones Campamento Yucao [35127020] y La Poyata [35187010], pero supera la cifra reportada por la estación de Humapo [35117010].

Figura 7

Comportamiento de la estimación promedio de la precipitación acumulada mensual para el año 2022



Nota. Gráfico obtenido a partir de la información resultante de la aplicación del método de interpolación IDW en el área de estudio seleccionada, utilizando el software ArcMap. Los

datos base (precipitación acumulada mensual) para esta estimación *proviene de NASA POWER / Prediction Of Worldwide Energy Resources* (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

Los resultados sugieren la posibilidad de que el riego esté excediendo las necesidades de riego neto del cultivo; no obstante, esta conclusión no puede considerarse definitiva hasta que se lleven a cabo análisis adicionales de los datos.

7.2 Estimación de la ET_o , ET , ET_p y ET_c

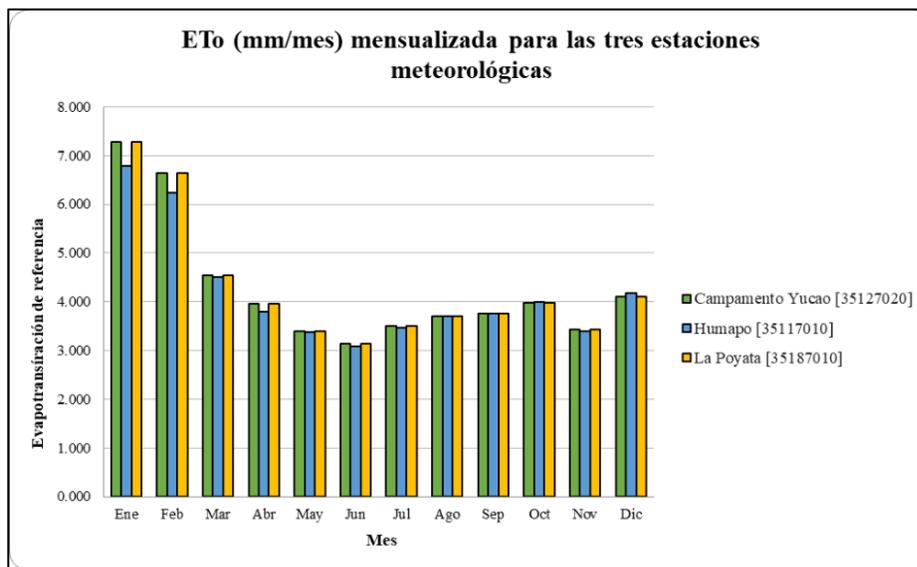
7.2.1 Estimación de la ET_o .

Utilizando los datos suministrados por cada estación meteorológica para el año 2022, se procedió al cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) (consultar **Anexo B**).

Los resultados, reflejados en la **Figura 8**, indican que los meses de enero y febrero presentan niveles más altos de ET_o . En estos meses, se observa una disminución en la retención de agua por parte de la cobertura vegetal, representada por las plantaciones de cultivos de caucho natural. Este fenómeno se tradujo en un proceso de evaporación, ya que las precipitaciones ocurridas llevaron el agua directamente a la atmósfera, sin ser absorbida por las plantas. Este comportamiento se atribuye a las elevadas temperaturas registradas en este período, siendo destacables los informes de Campamento Yucao [35127020] con una temperatura máxima de 38,41 °C en enero y 39 °C en febrero, Humapo [35117010] con una temperatura máxima de 38,94 °C en enero y 39,08 °C en febrero, y La Poyata [35187010] con una temperatura máxima de 38,41 °C en enero y 39 °C en febrero (consultar **Anexo A, tabla de Temperatura en °C**).

Figura 8

Comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET_o) mensual para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, año 2022.



Nota. Gráfico obtenido a partir de los datos presentados en el **Anexo B**.

El mes que registró el menor nivel de Evapotranspiración de Referencia (ET_o) fue junio, atribuible a que la temperatura máxima informada por cada estación meteorológica para este mes fue de 30,06 °C (Campamento Yucao [35127020]), 29,76 °C (Humapo [35117010]) y 30,06 °C (La Poyata [35187010]) (ver **Anexo A, tabla de Temperatura en °C**). Esto indica que durante junio se produjo una retención significativa de agua por parte de la cobertura vegetal, representada en este caso por las plantaciones de cultivos de caucho natural, y que el proceso de evaporación fue leve. Además, se pueden identificar otros meses en los que los valores de ET_o fueron bajos.

No obstante, como se explicó en la *sección 7.2.2.1 sobre la Estimación de la Precipitación (PPP) acumulada mensual y de la Evapotranspiración de Referencia (ET_o)* a partir de los datos recolectados de las estaciones meteorológicas, se lleva a cabo una interpolación mediante el

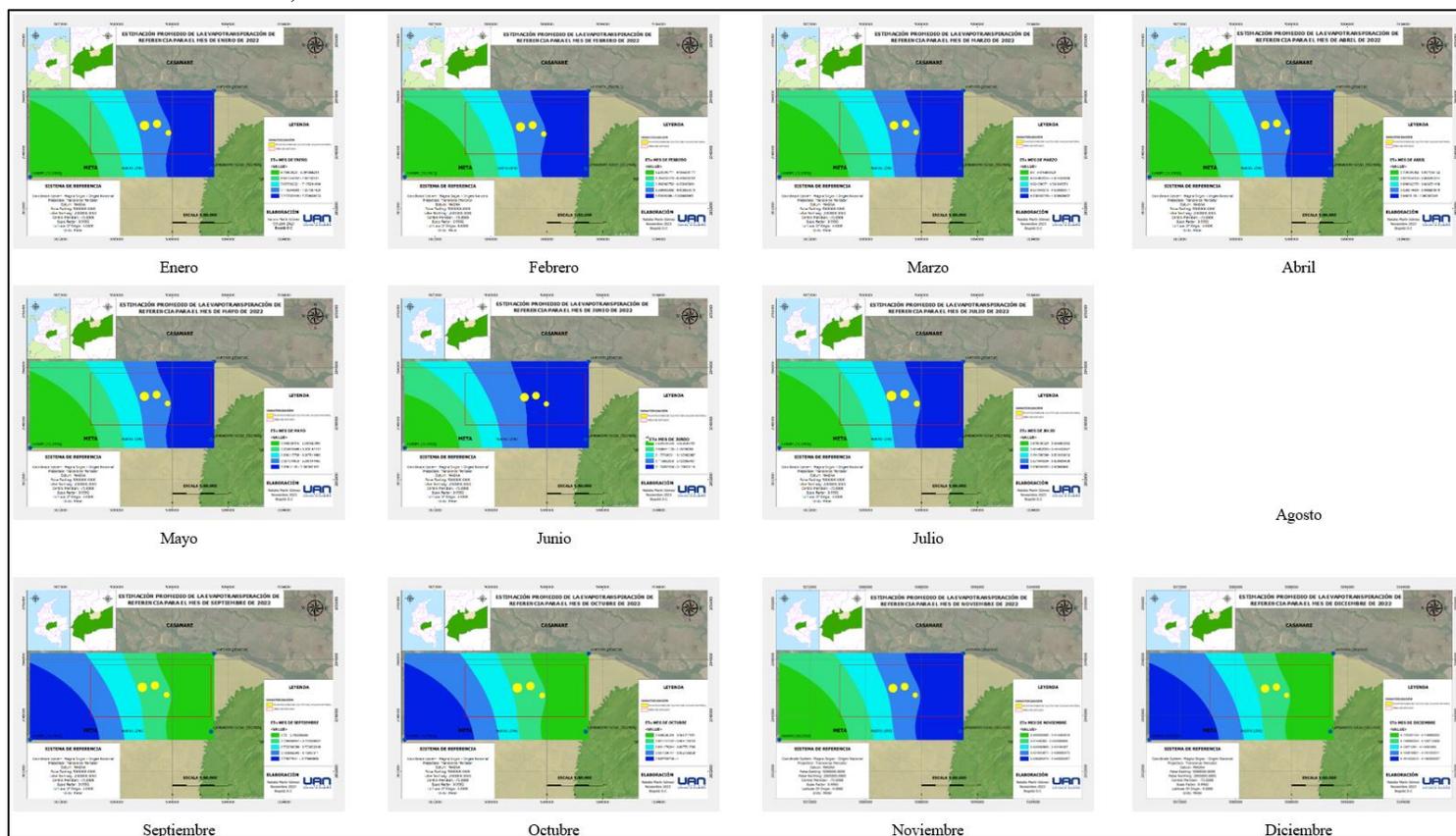
método IDW (consultar la **Figura 9**). El propósito es obtener una estimación del promedio de la ET_0 en el área de estudio.

En los mapas resultantes, se destaca la ubicación de los cultivos de caucho natural en las plantaciones seleccionadas con una estrella de color amarillo. Las tonalidades más oscuras (azules) indican valores de ET_0 superiores a la media, mientras que las tonalidades más claras (verdes) representan valores inferiores a la media de ET_0 para el mes correspondiente.

Cabe destacar que, para el mes de agosto, las tres estaciones proporcionaron valores de ET_0 prácticamente iguales, por lo que no fue necesario realizar la interpolación para este período.

Figura 9

Mapas de estimación de la ET_0 obtenida mensualmente para el área de estudio seleccionada, año 2022.



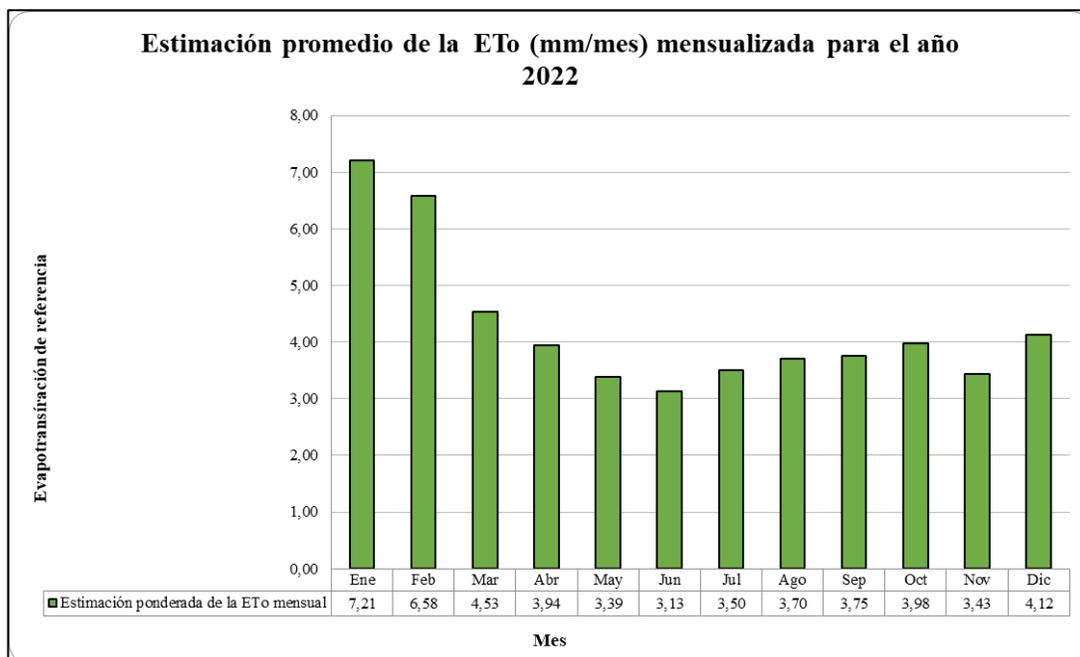
Nota. Los mapas se obtuvieron a partir de la aplicación del método de interpolación IDW en el área de estudio seleccionada, utilizando el software ArcMap. Los datos base (evapotranspiración de referencia calculada por cada una de las estaciones meteorológicas) pueden ser visualizados en el **Anexo B** y las variables utilizadas para estimar esta evapotranspiración pueden visualizarse en el **Anexo A**.

La figura anterior (**Figura 9**) tiene una resolución de 49,53 x 49,53 metros, y es a partir de esta que se realiza la construcción de la **Figura 10**. En esta se puede observar el patrón del promedio mensual de la evapotranspiración de referencia (ET_o) para el área de estudio seleccionada. Los meses que exhiben los valores más elevados de evapotranspiración de referencia son enero y febrero, con cifras de 7,21 mm/mes y 6,58 mm/mes, respectivamente. Por otro lado, junio continúa siendo el mes con el valor más bajo de ET_o , registrando 3,13 mm/mes. No obstante, meses como mayo, julio y noviembre también presentan valores bajos. Este comportamiento está vinculado a lo mencionado en el análisis de ET_o para cada una de las estaciones, donde se destacaba que estos valores eran principalmente atribuibles a las altas temperaturas registradas durante estos meses.

Además, se puede inferir que la evapotranspiración de referencia experimentó una tendencia descendente hasta el mes de junio durante el periodo de 2022. A partir de julio, se observa un cambio en la dirección, con un comportamiento ascendente hasta noviembre, para luego incrementarse nuevamente en diciembre. En última instancia, los resultados indican que el promedio anual de la evapotranspiración de referencia para este periodo es de 51,268 mm/año, superando las cifras reportadas por las tres estaciones meteorológicas seleccionadas.

Figura 10

Comportamiento de la estimación promedio ET_o mensual para el año 2022



Nota. Gráfico obtenido a partir de la información resultante de la aplicación del método de interpolación IDW en el área de estudio seleccionada, utilizando el software ArcMap. Los datos base (precipitación acumulada mensual) para esta estimación *proviene de NASA POWER / Prediction Of Worldwide Energy Resources (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>)*.

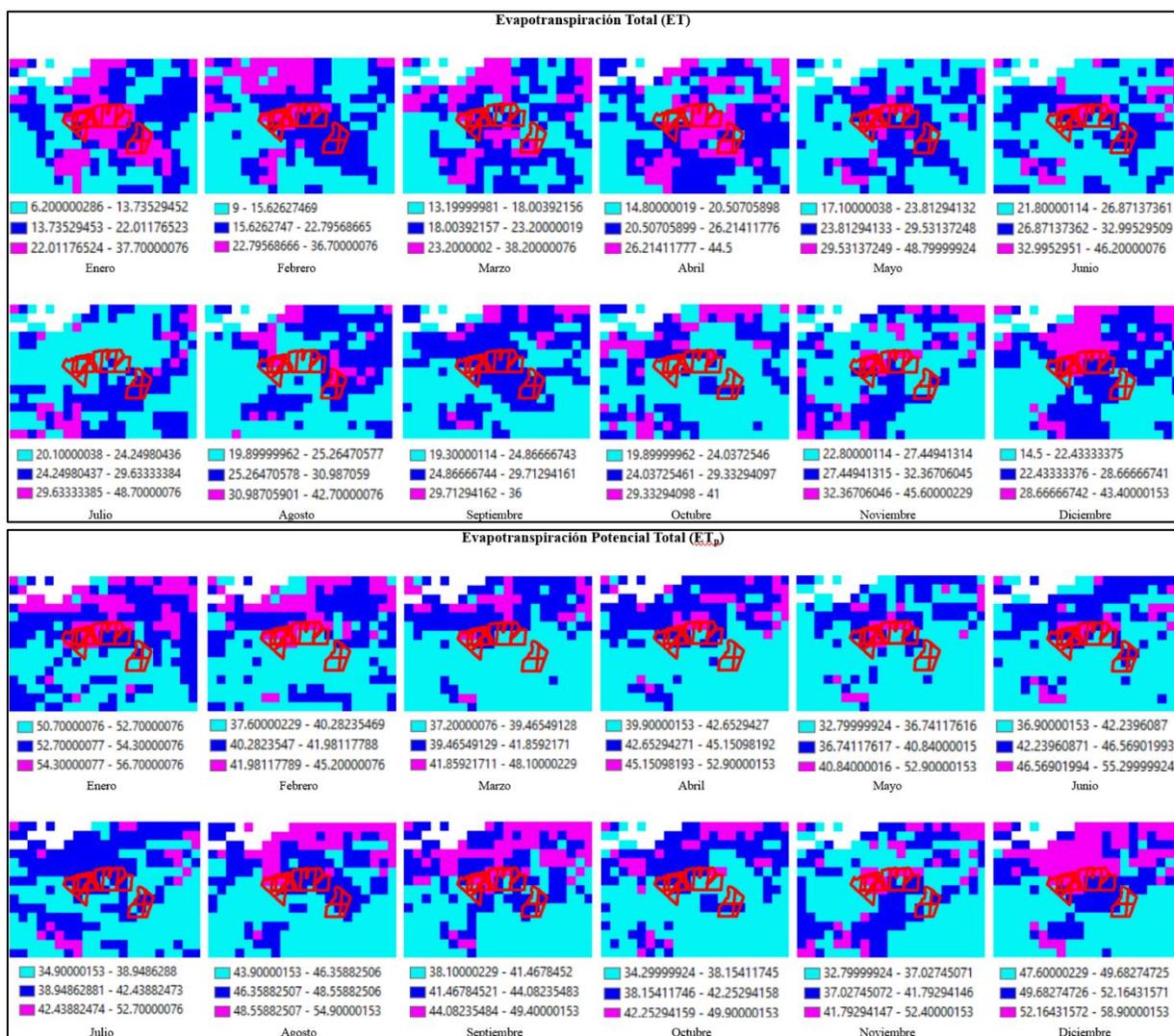
7.2.2 Estimación de la ET y la ET_p .

A partir del procesamiento de las imágenes MODIS descargadas, que incluye el recorte del área de estudio, la identificación de los cultivos de caucho natural (marcados en color rojo en la **Figura 11**) en las plantaciones seleccionadas, la eliminación de valores atípicos y la aplicación del factor de escala según lo establecido en la **Tabla 4**; se logró determinar el comportamiento de la evapotranspiración total y potencial para el año 2022.

Las imágenes, con una resolución de 500 m durante 8 días, presentan tonalidades que van desde el azul claro hasta el azul oscuro, representando valores de baja a media ET y ET_p en el mes. Por otro lado, las tonalidades en tonos rosados indican los valores más elevados de ET y ET_p en el mes (véase *Figura 11*).

Figura 11

Comportamiento de la ET y la ET_p para el año 2022



Nota. Gráficos resultantes del procesamiento de las imágenes MODIS *obtenidas de LAADS. Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System, View Data* (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search>).

Realizando la conversión de la evapotranspiración total (ET) y potencial (ET_p) de 8 días a valores mensuales (consultar el *Anexo C*) y observando la *Figura 12*, se destaca que la máxima evapotranspiración, tanto total como potencial, se registra en diciembre, alcanzando valores de 69,03 mm/mes (ET) y 126,98 mm/mes (ET_p) respectivamente. Este mes se caracteriza no solo por exhibir la mayor evapotranspiración total y potencial calculada en un día, sino también por requerir el menor tiempo de estimación (13 días) para concluir el periodo de estudio seleccionado, que finaliza el 1 de enero de 2023.

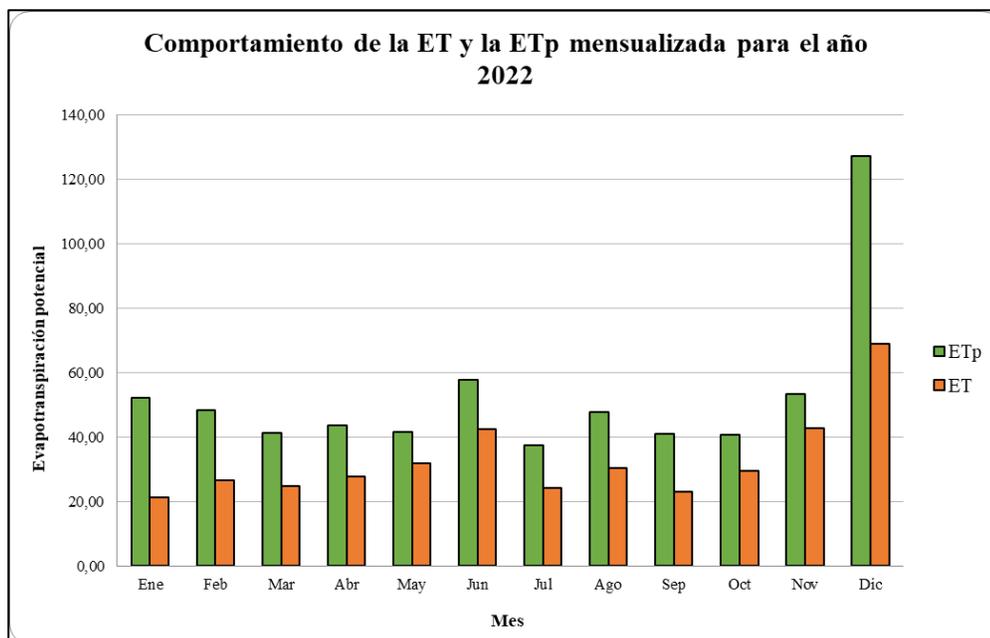
Otros meses, como enero, febrero, junio y noviembre, también exhiben valores elevados de Evapotranspiración Potencial (ET_p), mientras que meses como mayo, junio y noviembre presentan valores altos de Evapotranspiración Total (ET). Es relevante destacar que julio registra el menor valor de evapotranspiración potencial, alcanzando 37,46 mm/mes. No obstante, se observa que meses como septiembre y octubre también muestran valores relativamente bajos en este indicador. En cuanto a la evapotranspiración total, el mes que presenta el valor más bajo es enero, con 21,26 mm/mes.

El comportamiento de estas evapotranspiraciones puede verse afectado por diversos factores climatológicos, especialmente el brillo solar. Sin embargo, este análisis se evalúa con mayor detenimiento cuando se calcula el coeficiente de correlación entre cada una de las evapotranspiraciones y los factores climatológicos correspondientes.

Finalmente, se determina que la evapotranspiración potencial anual asciende a 631,623 mm/año, mientras que la evapotranspiración total anual alcanza los 393,706 mm/año, superando así la evapotranspiración de referencia anual.

Figura 12

Comparación del comportamiento de la ET y la ET_p mensual para el año 2022



Nota. Gráfico obtenido a partir de los datos presentados en el **Anexo C**.

7.2.3 Estimación de la ET_c.

La Evapotranspiración del Cultivo (ET_c) se calcula utilizando los resultados de la estimación promedio de la Evapotranspiración de Referencia (ET_o) y el coeficiente del cultivo establecido. Dado que el coeficiente para estas plantaciones de cultivos de caucho natural tiene un valor fijo de 1,00, los valores mensuales de ET_c serán idénticos a los presentados en la **Figura 10**.

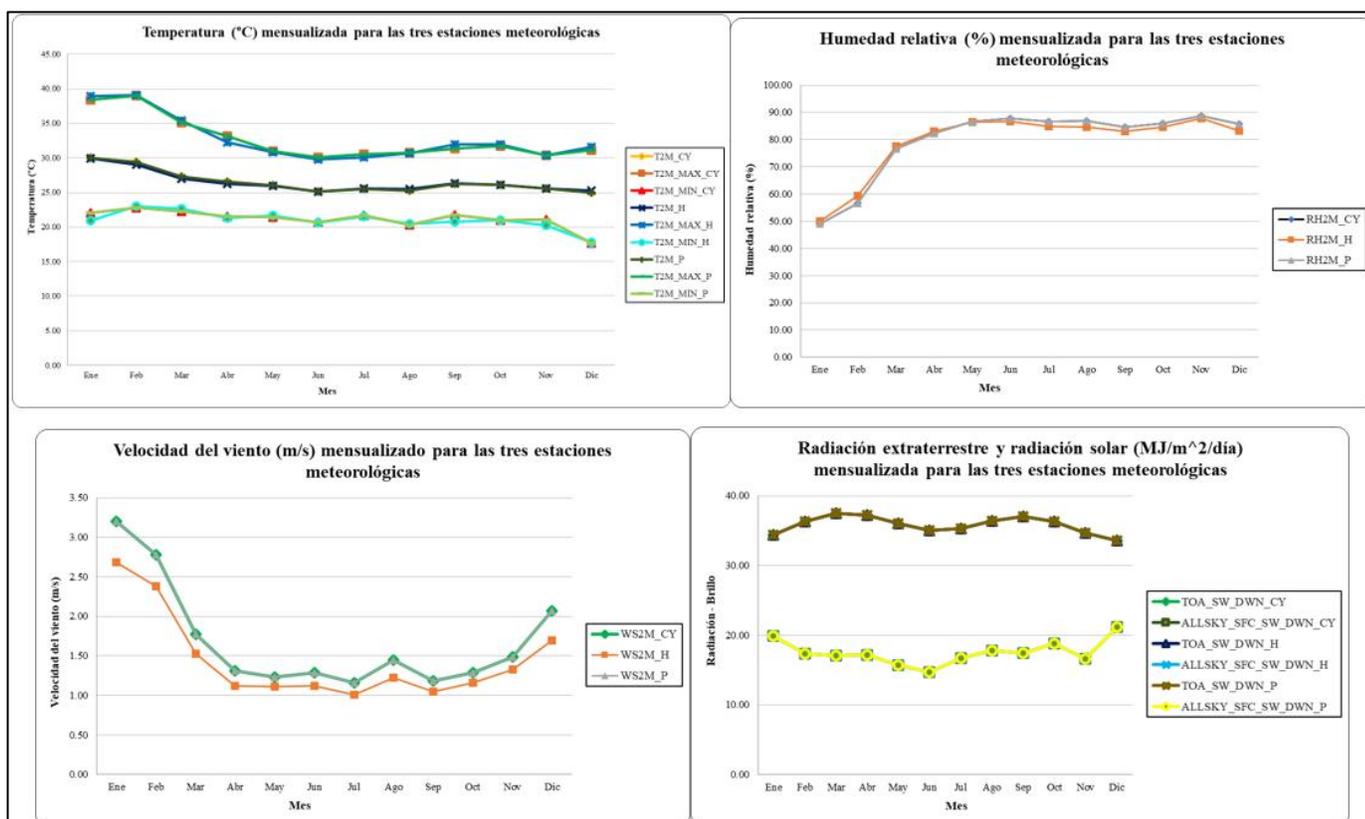
Por lo tanto, el comportamiento de la evapotranspiración del cultivo será equivalente al de la Evapotranspiración de Referencia (ET_o), como se describe en la sección 8.2.1 *Estimación de la ET_o*.

7.2.4 Análisis comparativo del comportamiento de la ET_o , ET , ET_p y ET_c

Antes de llevar a cabo el análisis comparativo y la correlación de las tres evapotranspiraciones calculadas, se procede a evaluar previamente el comportamiento de las variables climatológicas (**Figura 13**) reportadas por las estaciones seleccionadas. El objetivo es establecer si existe una correlación significativa entre estas variables y las tres evapotranspiraciones calculadas.

Figura 13

Comportamiento mensual de las variables climatológicas para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, año 2022.



Nota. Los resultados presentados se calcularon a partir de los datos reportados por cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas. La información utilizada como insumo fue

obtenido de NASA POWER / Prediction Of Worldwide Energy Resources (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

Analizando la **Figura 13**, se puede identificar que el área de estudio presenta un clima cálido – húmedo, con una temperatura promedio de 26,49 °C, alcanzando temperaturas promedio máximas de 32,72 °C y mínimas de 21,12 °C. Los meses que registran mayor temperatura corresponden a enero y febrero, mientras que diciembre presenta la temperatura más baja. La humedad relativa oscila entre 49 al 90%, siendo menor en los meses de enero y febrero (coincidiendo con los meses más calurosos) y mayor en los meses de mayo, junio y noviembre (que presentan bajas temperaturas y mayores niveles de precipitación). La velocidad del viento es mayor en los meses más calurosos y presenta un comportamiento descendente hasta el mes de julio, incrementándose nuevamente en agosto y diciembre. La radiación o brillo solar promedio equivale a 17,52 MJ/m²/día siendo mayor en el mes de diciembre y menor en el mes de junio (para mayor detalle de las variables climatológicas véase el **Anexo A**).

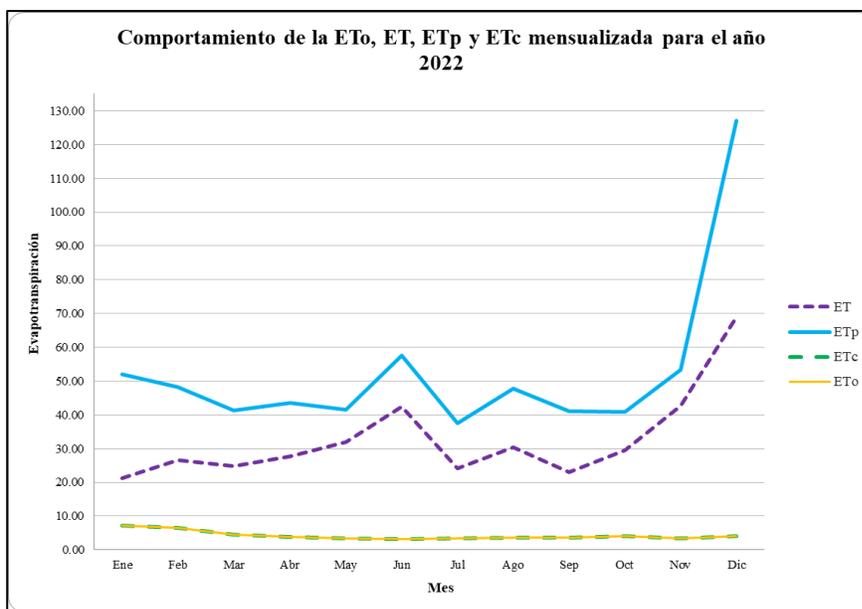
Comparando el comportamiento de las tres evapotranspiraciones calculadas para las plantaciones de cultivos de caucho natural en la zona de estudio seleccionada (**Figura 14**), se puede determinar que los valores de ET_o y ET_c presentan un comportamiento igual por las razones descritas con anterioridad al momento de su estimación, sin embargo, son valores demasiado bajos que oscilan entre 3,127 mm/mes a 7,206 mm/mes con respecto a los hallados para la ET que oscilan entre 21,26 mm/mes a 69,03 mm/mes; y la ET_p , los cuales oscilan entre 37,46 mm/mes a 126,98 mm/mes.

Los valores más altos de Evapotranspiración de Referencia (ET_o), calculada a partir de los datos reportados por las estaciones meteorológicas, y de Evapotranspiración del Cultivo (ET_c) se

observan en los meses de enero y febrero. Estos meses coinciden con las temperaturas más elevadas y los porcentajes más bajos de humedad relativa para el año 2022. Por otro lado, diciembre registra los mayores valores de Evapotranspiración Total (ET) y Evapotranspiración Potencial (ET_p), a pesar de presentar temperaturas menos elevadas, una humedad relativa que oscila entre el 82% y 86%, y un brillo solar promedio de 17,52 MJ/m²/día. Sin embargo, se lleva a cabo un análisis de correlación entre las diversas variables para determinar su impacto en los cálculos de las distintas evapotranspiraciones.

Figura 14

Comparación del comportamiento de la ET_o, ET, ET_p y ET_c mensual para el año 2022



Nota. Gráfico obtenido a partir de las evapotranspiraciones estimadas en las secciones anteriores.

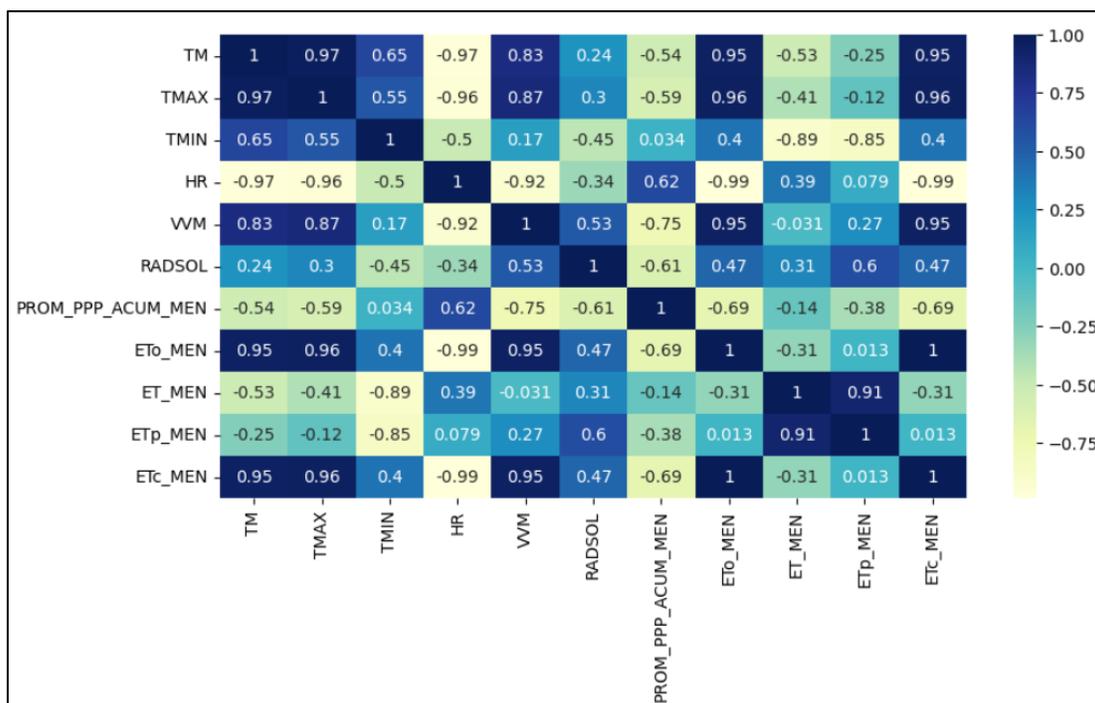
Por otro lado, la estimación anual de la evapotranspiración calculada a partir de datos meteorológicos (ET_o) es de 51,268 mm/año y la estimación anual de las evapotranspiraciones

obtenidas mediante las imágenes MODIS es 393,706 mm/año (ET) y de 631,623 mm/año (ET_p) respectivamente, como se había indicado en las secciones respectivos.

Finalmente, se determina la correlación de las variables climatológicas y de las evapotranspiraciones hallas para cada estación, a través del cálculo de la matriz de correlación; sin embargo, debido a que los datos de las variables climatológicas entre las estaciones son similares, las diferentes matrices de correlación presentaron los mismos resultados (véase *Anexo D*).

Figura 15

Correlograma de las variables climatológicas y las evapotranspiraciones calculadas



Nota. Gráfico obtenido a partir de la matriz de correlación establecida en el *Anexo D*; a través de la herramienta de Google Colaboratory. El código (lenguaje Python) de este correlograma se puede visualizar en el *Anexo E*.

Analizando la *Figura 15* se identifica que las variables que presentan una correlación positiva, es decir que si una variable aumenta la otra también lo hará; son aquellas que están

comprendidos entre el rango de mayores a 0 hasta 1 y están señaladas en la figura por tonos azules oscuros; mientras que aquellas variables que presentan una correlación negativa, es decir que si una variable aumenta la otra disminuye; presentan valores menores a cero (0) hasta -1 y están señaladas en la figura por tonos amarillos y verdes. Aquellas variables que no presentan ningún tipo de correlación son iguales a cero (0).

Las variables de temperatura máxima (TMAX) y media (TM) presenta una alta correlación positiva entre sí con un coeficiente de correlación de 0,97, así como con la variable de estimación promedio de la evapotranspiración de referencia mensual (ETo_MEN) y la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc_MEN) cuyos coeficientes de correlación oscilan entre 0,95 y 0,96, lo cual permite indicar que si estas variables de temperatura aumentan las evapotranspiraciones señaladas también aumentarán en la misma proporción. Otra variable con la que presentan una alta correlación positiva (con un coeficiente de correlación que oscila entre 0,83 y 0,87) es con la velocidad del viento (VVM). Por otro lado, estas variables (temperatura máxima y media) presentan una alta correlación negativa con las variables de humedad relativa (HR) con valores de correlación de -0,96 y -0,97, y en menor medida, con el promedio de la precipitación acumulada mensual (PROM_PPP_ACUM_MEN) cuyo coeficiente oscila entre -0,54 y -0,59 y evapotranspiración total (ET_MEN) con valores de correlación de -0,53 y -0,41; es decir que, si estas temperaturas aumentan la humedad relativa, la precipitación acumulada y la evapotranspiración total disminuirán. Sin embargo, las variables de temperatura presentan una correlación positiva no tal alta con el brillo o radiación solar (coeficiente de correlación de 0,24 y 0,3 respectivamente) y una correlación negativa moderada con la evapotranspiración potencial (coeficiente de correlación de -0,12 y -0,25 respectivamente), por lo cual, se puede identificar que cuando la temperatura máxima y media aumentan el brillo o radiación solar (RADSOL) aumentará

en una menor proporción que con respecto a la ET_o y a su vez, la ET_p presentará una disminución en menor proporción que con respecto a las variables que presentan una alta correlación negativa.

Se evidencia también que la temperatura mínima (TMIN) a diferencia de la temperatura máxima y media, no presentan una correlación positiva muy alta con la ET_o y la ET_c , (con un valor de correlación de 0,4) mientras que con la ET_p si presenta una alta correlación negativa (coeficiente de correlación igual a -0,85), al igual que con la ET (con un valor de correlación igual a -0,89). Con relación a la estimación del promedio de la PPP acumulada mensual se puede identificar que, al presentar valores de coeficiente de correlación cercanos a cero (0,034), estas variables no se encuentran asociadas y, por consiguiente, el comportamiento de una no afectara a la otra.

En el caso de la variable de humedad relativa (HR) presentan una alta correlación negativa con las variables de temperatura máxima y media (como ya se había mencionado), con la velocidad del viento (VVM) ya que su coeficiente de correlación es -0,92, con la ET_o y la ET_c (coeficiente de -0,99); y en menor medida con la radiación solar (RADSOL) con una correlación de -0,34 y la temperatura mínima (TMIN), con un coeficiente de correlación de -0,5. Mientras que con la PPP acumulada mensual presenta una correlación positiva moderada (coeficiente igual a 0,62). Con respecto a la ET_p se puede identificar que, estas variables no se encuentran asociadas, pues su valor de correlación corresponde a 0,079, por consiguiente, el comportamiento de una no afectará a la otra, mientras que con la ET presenta una correlación positiva (coeficiente igual a 0,39), por lo cual el aumento de la humedad afectará el comportamiento de la evapotranspiración total (ET).

Analizando el comportamiento de la velocidad del viento (VVM) se determina que, adicional a la correlación analizada de las variables presentadas con anterioridad; presenta una alta correlación positiva con ET_o y la ET_c (con un coeficiente de 0,95) y una alta correlación negativa

con la variable de estimación promedio de la PPP acumulada mensual (ya que la correlación es igual a $-0,75$). Sin embargo, la correlación presentada con respecto a las variables de radiación solar y la ET_p es positiva pero no tan alta, ya que los valores de los coeficientes de correlación corresponden a $0,53$ y $0,27$ respectivamente. El comportamiento de la Evapotranspiración total (ET) no se ve afectado por la velocidad del viento (VVM) ya que su coeficiente de correlación corresponde a $-0,031$.

La radiación solar (RADSOL) presenta una correlación negativa ($-0,61$) con respecto a la estimación promedio de la PPP acumulada mensual. Con relación a la estimación promedio de ET_o mensual y la ET_c presenta una correlación positiva moderada ($0,47$), sin embargo, la correlación con la variable de ET_p es positiva y relativamente alta (siendo igual a $0,6$), mientras que con la ET es positiva pero baja (siendo igual a $0,31$), por lo cual, esta variable afectaría el comportamiento de estas evapotranspiraciones.

El comportamiento de la estimación promedio de la precipitación acumulada mensual afecta de forma inversamente proporcional el comportamiento de las evapotranspiraciones ET_o y la ET_c , ya que el coeficiente de correlación es igual a $-0,69$; es decir que si los niveles de precipitación aumentan los valores de estas evapotranspiraciones disminuirán. Para el caso de la evapotranspiración potencial y evapotranspiración total, se comporta del mismo modo que en las evapotranspiraciones anteriores pero su coeficiente de correlación, pese a ser negativo; es bajo (con un valor de $-0,38$ y $-0,69$ respectivamente).

De acuerdo con Ortiz Diaz et al. (2018), la velocidad del viento y la humedad relativa tienen una relación inversa, es decir que, a medida que hay más viento, menor es la humedad y a su vez la temperatura ambiente incrementa al disminuir la humedad. Por otro lado, la temperatura

presenta un comportamiento directo con la radiación solar (la cual es afectada directamente por el brillo solar), lo que se traduce a que a mayor temperatura mayor radiación habrá sobre la superficie terrestre. Lo anterior, reafirma el comportamiento evidenciado en el correlograma, de las diferentes variables climatológicas.

De las correlaciones encontradas entre estas variables climatológicas y las evapotranspiraciones también se puede concluir que los análisis que se realizaron durante la estimación de estas son acertados, ya que para el caso de la ET_o y la ET_c los periodos de mayor evapotranspiración se presentan cuando hay altas temperaturas (media y máxima) y un alto valor de velocidad del viento, así como menores valores de estimación promedio de PPP acumulada mensual y de humedad relativa. Por otro lado, en el caso de la ET se evidencia que las principales variables que afectarán su comportamiento son la humedad relativa, la radiación solar y las temperaturas; mientras que para la ET_p las principales variables que afectarán su comportamiento son la radiación solar y las temperaturas mínimas.

Analizando el comportamiento de las evapotranspiraciones, se puede determinar que la ET_o y la ET_c presentan un comportamiento idéntico (una muy alta correlación con valores de 1), debido a que ambas evapotranspiraciones tienen los mismos valores (como se explicó en la sección 7.2.3 *Estimación de la Etc*). Al evaluar la correlación de estas con respecto a la ET, se puede determinar que su comportamiento es inversamente proporcional (ya que el coeficiente de correlación tiene un valor de -0,31), es decir que, si la evapotranspiración total (obtenida de las imágenes MODIS) aumenta, la ET_o y ET_c disminuirán, lo cual coincide con el comportamiento de las evapotranspiraciones presentado en la **Figura 14**, en donde por ejemplo en los meses con mayor

evapotranspiración de referencia (enero y febrero, por las razones explicadas durante su estimación) se presentan valores menores de evapotranspiración total.

Al evaluar la correlación de la evapotranspiración de referencia y del cultivo con respecto a la ET_p se puede establecer que no presentan correlación (porque el coeficiente de correlación es igual a 0,013, valor cercano a cero, tal como se muestra en la **Figura 15**) y, por consiguiente, el comportamiento de la ET_o o la ET_c no afectará el comportamiento de la ET_p . Por último, evaluando el comportamiento de la ET con respecto a la ET_p se presenta que ambas tienen una alta correlación positiva (con un coeficiente de correlación de 0,91), es decir que, si la evapotranspiración total aumenta, la potencial también aumentará.

7.3 Necesidades de riego neto (NRn) de las plantaciones seleccionadas

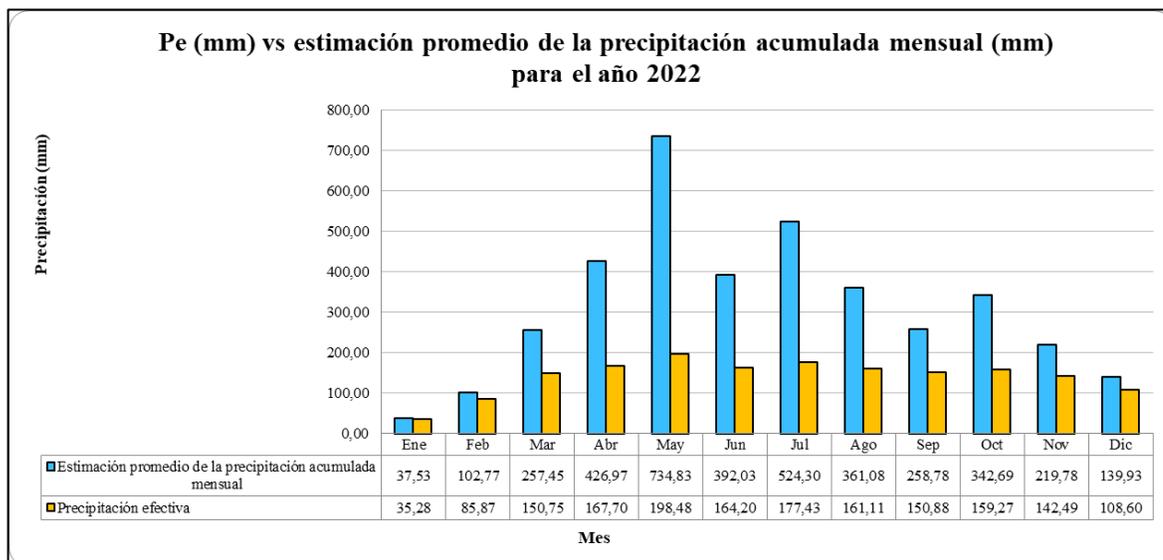
Como se mencionó en el 7.2.2.4 *Estimación de las necesidades de riego neto (NRn) de las plantaciones seleccionadas* para hallar las necesidades del riego neto de las plantaciones de cultivos de caucho natural no solo se requiere de la estimación de la variable ET_c , sino también de la variable precipitación efectiva (Pe), la cual se calcula a partir de las **Ecuaciones 11 y 12**.

Al realizar la comparación entre el resultado obtenido de calcular la precipitación efectiva y la estimación promedio de la precipitación acumulada mensual (**Figura 7**), se puede visualizar que continúan siendo los meses de mayo y julio los que presentan los valores de precipitación (mm), en ambos casos; y los meses de enero y febrero los valores más bajos de precipitación (mm), tal como se muestra en la **Figura 16**. Además, se puede establecer que la precipitación efectiva anual corresponde a 1.702,06 mm.

Con este resultado la suposición de que existe la posibilidad de que el riego esté siendo mayor con respecto a las necesidades (de riego) que presenta el cultivo (bajo condición de precipitación) es aún más evidente, ya que el valor de la Pe (la cantidad de agua que está siendo realmente aprovechable por el cultivo) es demasiado bajo con respecto al de la estimación promedio de la PPP acumulada mensual, por consiguiente, puede que estos árboles estén siendo sometidos a estrés hídrico. Por otro lado NOAA's Climate Prediction (s. f.) permite reafirmar lo anteriormente expuesto, ya que de acuerdo con su reporte del ONI (Índice del Niño Oceánico, por sus siglas en inglés, que en otras palabras se asocia con las fuertes precipitaciones) para el año 2022, este fenómeno presento un comportamiento por encima de lo normal (oscilando su rango entre -1,1 y -0,8).

Figura 16

Comparación del comportamiento de la precipitación efectiva y de la estimación promedio de la precipitación acumulada mensual para el año 2022

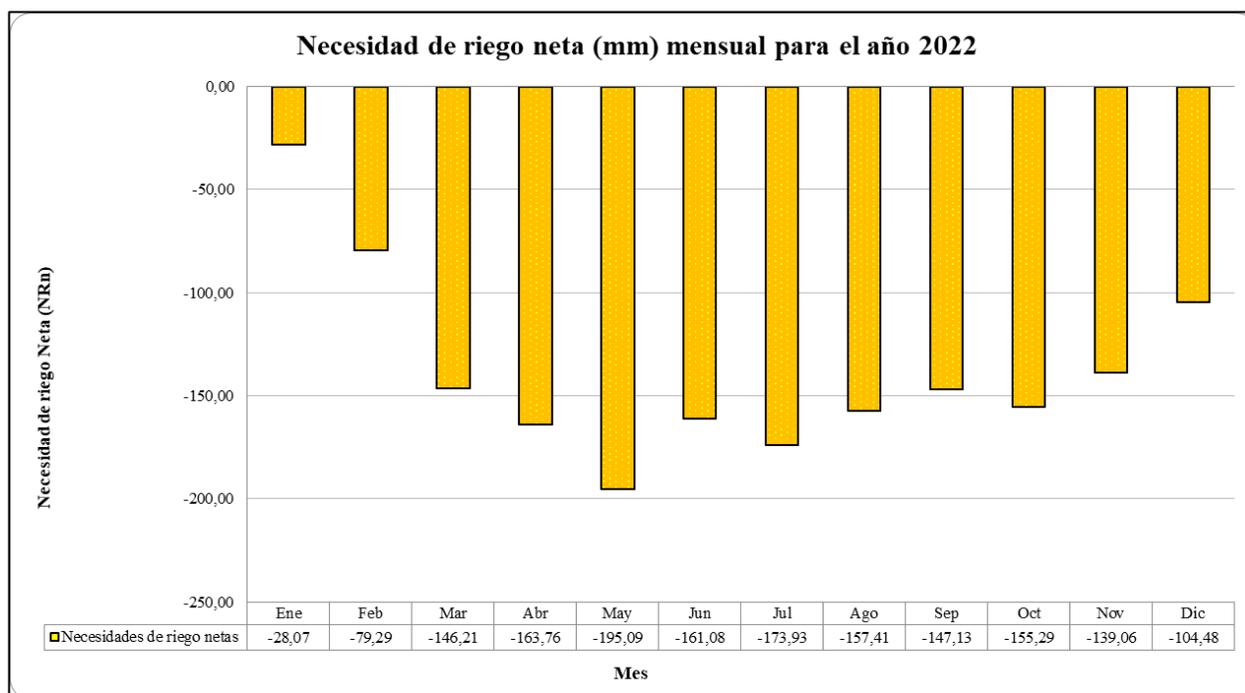


Nota. Los datos de precipitación efectiva fueron obtenidos a partir de aplicar, a los datos de estimación promedio de la precipitación acumulada mensual; las *Ecuaciones 11 y 12* respectivamente.

Calculada la P_e , se estiman las necesidades de riego neto, presentadas a lo largo del año 2022; de las plantaciones seleccionadas (véase los resultados en la *Figura 17*). Los cuales indican que los requerimientos de riego para las plantaciones de caucho natural son demasiado bajas y que, en este caso, no solo se suplieron las necesidades de riego neto de estas, sino que los cultivos fueron sometidos de cierta forma a estrés hídrico (principalmente en los meses de mayo y julio, que fueron aquellos de altas precipitaciones) debido a la gran cantidad de agua que recibieron de precipitaciones durante el año de estudio.

Figura 17

Necesidades de riego netas mensuales para el año 2022



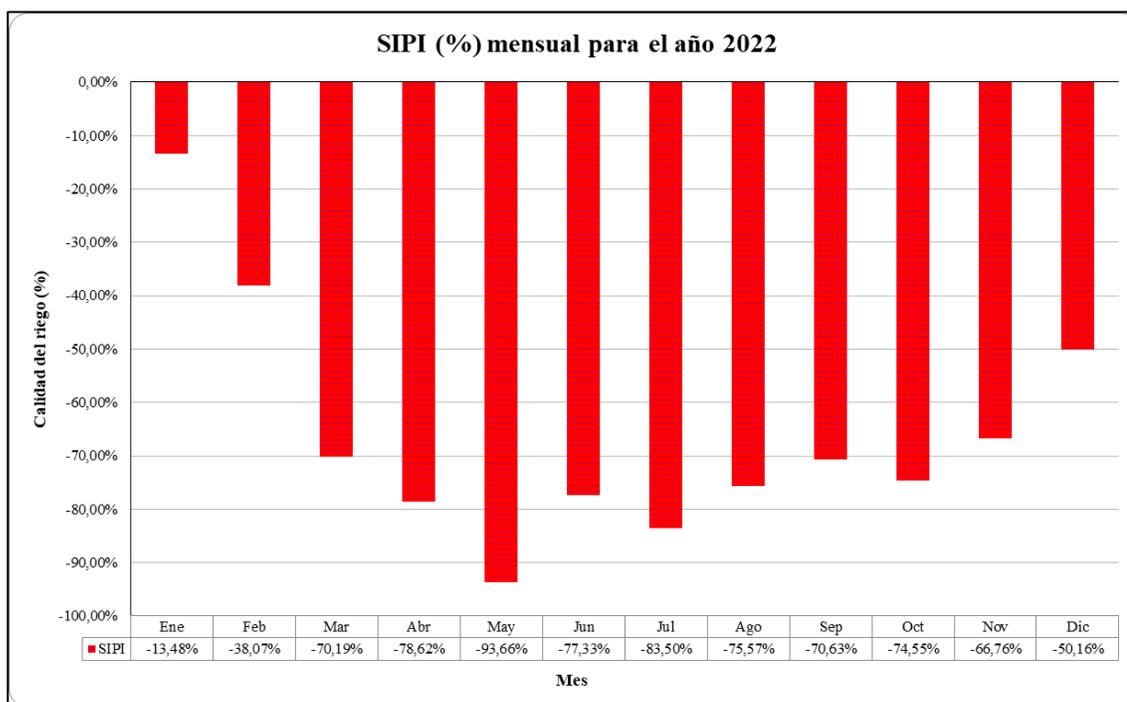
7.4 Calidad de riego para los cultivos de caucho natural del área de estudio

Aplicando la **Ecuación 13**, se calcula la calidad de riego sobre las plantaciones de cultivos de caucho natural, a partir de los valores obtenidos como necesidades de riego neto (NR_n) y el volumen de agua de riego entregada a los cultivos (RI), que para efectos de este trabajo corresponde a un valor promedio de 208,3 mm al mes en periodos normales de precipitación (Tapiero et al., 2018).

Los resultados se presentan en la **Figura 18**.

Figura 18

Estimación de la calidad del riego mensual para el año 2022



El valor del SIPI mensual es menor al 100%; por lo que se indicaría que hay un déficit de riego y, por consiguiente, el riego estaría siendo menor con respecto a las necesidades que presenta el cultivo, lo cual se traduciría en una calidad regular/mala de riego.

Sin embargo, debido al análisis efectuado de las necesidades de riego netas de las plantaciones, la evapotranspiración y la precipitación acumulada mensual, se afirma que la posibilidad contemplada en un principio de que el riego estaba siendo mayor a estas es cierta, por ende, se reafirma que los árboles están siendo sometidos a un alto nivel de estrés hídrico (por las grandes cantidades de agua que cayeron en la zona de estudio gracias a las precipitaciones ocurridas en la zona) y no se tiene una buena calidad de riego.

Los meses en donde las plantaciones sufrieron mayor estrés y presentaron una calidad de riego mala fue en aquellos donde las precipitaciones fueron más altas, es decir mayo y julio, mientras que en los periodos de sequía (enero y febrero) el estrés de los cultivos fue menor (véase la **Figura 18**) y, por consiguiente, la calidad de riego fue regular.

Adicionalmente, con este índice se establece que es necesario la creación de algún tipo de sistema de drenaje para mitigar esta problemática lo que puede resultar en un gasto elevado para el productor.

8. Conclusiones

De este trabajo se puede concluir que: La evapotranspiración de referencia (ET_o) y la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) presentan un comportamiento alto durante los dos primeros meses del año, en los cultivos de caucho natural de las plantaciones seleccionadas; debido a que las temperaturas registradas durante estos periodos de tiempo son altas y el nivel de lluvias es bajo (teniendo en cuenta que estas son las principales variables que influyen en el comportamiento de estas evapotranspiraciones de acuerdo al coeficiente de correlación estimado), adicionalmente comienzan a presentar un comportamiento descendente a medida que la temperatura disminuye y las precipitaciones aumentan (IDEAM, 2022a). Adicionalmente, estas evapotranspiraciones no se ven afectadas por el comportamiento obtenido de la evapotranspiración potencial (ET_p) a partir de las imágenes MODIS, mientras que con respecto a la evapotranspiración total (ET) presentan un comportamiento inversamente proporcional, aumentando cuando la ET disminuye.

Por otro lado, la ET (evapotranspiración total) y la ET_p (Evapotranspiración potencial) presenta un comportamiento relativamente bajo hasta los meses de junio y diciembre, en donde presenta los mayores picos de evapotranspiración total y potencial. También es en estos meses que se registran valores bajos de temperatura y valores altos de radiación solar y humedad relativa (principales variables que influyen en el comportamiento de esta evapotranspiración de acuerdo con el coeficiente de correlación estimado).

Lo anterior, acorde con el régimen de lluvias monomodal presentado para el municipio de Puerto López (Bedoya Arenas & Ramírez Ramírez (2016) y Casanare (2000)) en el boletín

climatológico del IDEAM donde se resalta que los meses de enero y febrero conforman el periodo de tiempo con menos lluvias y un comportamiento normal de temperatura (siendo altas pero no extremas) y los meses de mayo en adelante (hasta octubre) marcan el inicio de la temporada de lluvias y el comportamiento de la temperatura se da en niveles bajos pero dentro de un rango normal (IDEAM, 2022a) (IDEAM, 2022b).

En cuanto a las necesidades de riego de las plantaciones de caucho natural se puede concluir que efectivamente fueron suplidas, pero debido a los niveles de precipitación presenciados durante este periodo de estudio; los árboles de caucho fueron sometidos de cierta forma a estrés hídrico.

Finalmente, para este caso de estudio se determina que la gestión de riego de los cultivos de caucho natural de las plantaciones seleccionadas durante el periodo de 2022 no fue buena, debido a lo presentado anteriormente con las necesidades de riego netas y que, a su vez, es muy posible que se haya generado un desperdicio del recurso hídrico proveniente de la lluvia (si no se contaba con un sistema de recolección de aguas lluvia en las plantaciones, lo cual se desconoce). Por otro lado, el heveicultor presentará un aumento en sus costos de sostenimiento y producción, debido a que surge la necesidad de un sistema de drenaje y de recolección de agua para mitigar esta problemática.

9. Anexos

Anexo A. Información climatológica reportada por cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas para el año 2022

Estación	PPP acumulada mensual (mm)												Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Campamento													
Yucao [35127020]	36,36	99,87	255,87	429,97	739,29	394,68	526,06	363,23	262,19	342,48	219,41	139,29	3.808,72
Humapo [35117010]	44,27	119,55	266,59	409,61	709,02	376,73	514,15	348,61	239,04	343,91	221,95	143,66	3.737,09
La Poyata [35187010]	36,36	99,87	255,87	429,97	739,29	394,68	526,06	363,23	262,19	342,48	219,41	139,29	3.808,72

Estación	Variable	Temperatura (°C)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Campamento	T2M	30,01	29,41	27,3	26,55	25,99	25,1	25,5	25,28	26,23	26,08	25,58	24,99
Yucao [35127020]	T2M_MAX	38,41	39	35,07	33,16	30,98	30,06	30,49	30,77	31,33	31,73	30,37	31,15
	T2M_MIN	22,07	22,8	22,23	21,48	21,41	20,71	21,69	20,32	21,76	21	21,04	17,71
	T2M	29,91	28,99	26,98	26,27	25,93	25,15	25,54	25,48	26,3	26,08	25,59	25,27
Humapo [35117010]	T2M_MAX	38,94	39,08	35,38	32,24	30,78	29,73	30,07	30,65	31,92	31,97	30,36	31,59
	T2M_MIN	20,94	23,05	22,66	21,3	21,63	20,6	21,53	20,49	20,76	20,95	20,27	17,73
	T2M	30,01	29,41	27,3	26,55	25,99	25,1	25,5	25,28	26,23	26,08	25,58	24,99
La Poyata [35187010]	T2M_MAX	38,41	39	35,07	33,16	30,98	30,06	30,49	30,77	31,33	31,73	30,37	31,15
	T2M_MIN	22,07	22,8	22,23	21,48	21,41	20,71	21,69	20,32	21,76	21	21,04	17,71

Humedad relativa (%)													
Estación	Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Campamento Yucao [35127020]	RH2M	49	56,5	76,56	82,31	86,75	87,75	86,69	86,81	84,62	86	88,69	85,75
Humapo [35117010]	RH2M	49,94	59,44	77,56	82,94	86,5	86,75	84,81	84,69	83	84,69	87,75	83,25
La Poyata [35187010]	RH2M	49	56,5	76,56	82,31	86,75	87,75	86,69	86,81	84,62	86	88,69	85,75

Velocidad del viento (m/s)													
Estación	Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Campamento Yucao [35127020]	WS2M	3,2	2,78	1,77	1,31	1,23	1,29	1,16	1,45	1,18	1,29	1,49	2,07
Humapo [35117010]	WS2M	2,68	2,38	1,53	1,12	1,11	1,12	1,01	1,22	1,05	1,16	1,33	1,69
La Poyata [35187010]	WS2M	3,2	2,78	1,77	1,31	1,23	1,29	1,16	1,45	1,18	1,29	1,49	2,07

Humedad relativa (%)													
Estación	Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Campamento Yucao [35127020]	TOA_SW_DWN	34,42	36,27	37,5	37,26	36	35,07	35,35	36,42	37,03	36,32	34,67	33,62
	ALLSKY_SFC_SW_DWN	19,89	17,32	17,07	17,12	15,68	14,68	16,72	17,78	17,42	18,84	16,62	21,14
Humapo [35117010]	TOA_SW_DWN	34,42	36,27	37,5	37,26	36	35,07	35,35	36,42	37,03	36,32	34,67	33,62
	ALLSKY_SFC_SW_DWN	19,89	17,32	17,07	17,12	15,68	14,68	16,72	17,78	17,42	18,84	16,62	21,14

La Poyata [35187010]	TOA_SW_DWN	34,42	36,27	37,5	37,26	36	35,07	35,35	36,42	37,03	36,32	34,67	33,62
	ALLSKY_SFC_SW_DWN	19,89	17,32	17,07	17,12	15,68	14,68	16,72	17,78	17,42	18,84	16,62	21,14

Nota. Los datos presentados en las anteriores tablas corresponden al reporte efectuado por cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas. *La información de las diferentes variables climatológicas mensuales para las tres estaciones meteorológicas seleccionadas fue obtenida de NASA POWER / Prediction Of Worldwide Energy Resources (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).*

Anexo B. Evapotranspiración de referencia (ET_o) mensual calculada para el año 2022

Estación	ET _o mensual (mm/mes)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Campamento Yucao [35127020]	7,284	6,637	4,542	3,963	3,393	3,130	3,508	3,699	3,755	3,976	3,439	4,107
Humapo [35117010]	6,777	6,245	4,502	3,803	3,380	3,086	3,468	3,695	3,757	4,004	3,398	4,187
La Poyata [35187010]	7,282	6,636	4,541	3,963	3,393	3,130	3,509	3,699	3,755	3,976	3,438	4,105

Nota. Los resultados presentados se calcularon a partir de los datos reportados por cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas. *Las variables utilizadas para realizar dichos cálculos fueron obtenidas de NASA POWER / Prediction Of Worldwide Energy Resources (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).*

**Anexo C. Evapotranspiración total (ET) y evapotranspiración potencial (ET_p) mensual
calculada para el año 2022**

ET mensual												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Variable	25/01	26/02	22/03	23/04	25/05	26/06	20/07	21/08	22/09	24/10	25/11	19/12
ET (mm/8días)	21,95	22,85	25,70	29,65	32,95	34,00	24,87	31,30	24,51	30,45	34,20	28,95
ET (mm/día)	0,69	0,95	0,80	0,93	1,03	1,42	0,78	0,98	0,77	0,95	1,43	2,23
ET (mm/mes)	21,26	26,66	24,90	27,80	31,92	42,50	24,09	30,32	22,97	29,50	42,75	69,03
ET _p mensual												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Variable	25/01	26/02	22/03	23/04	25/05	26/06	20/07	21/08	22/09	24/10	25/11	19/12
ET _p (mm/8días)	53,70	41,40	42,65	46,40	42,85	46,10	38,67	49,40	43,75	42,10	42,60	53,25
ET _p (mm/día)	1,68	1,73	1,33	1,45	1,34	1,92	1,21	1,54	1,37	1,32	1,78	4,10
ET _p (mm/mes)	52,02	48,30	41,32	43,50	41,51	57,63	37,46	47,86	41,02	40,78	53,25	126,98

Nota. Los resultados presentados en las tablas fueron obtenidos a partir de la aplicación del factor de escala presentado en la **Tabla 4**, utilizando el software ArcMap. Adicionalmente, se realizó la conversión respectiva de las unidades de ET_p a mm/mes. Las imágenes fueron *obtenidas de LAADS. Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System, View Data* (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search>).

Anexo D. Matriz de correlación

Variable	TM	TMAX	TMIN	HR	VVM	RADSOL	PROM_PPP_ ACUM_MEN	ETo_ MEN	ET_ MEN	ETp_ MEN	ETc_ MEN
TM	1,00	0,97	0,65	-0,97	0,83	0,24	-0,54	0,95	-0,53	-0,25	0,95
TMAX	0,97	1,00	0,55	-0,96	0,87	0,30	-0,59	0,96	-0,41	-0,12	0,96
TMIN	0,65	0,55	1,00	-0,50	0,17	-0,45	0,03	0,40	-0,89	-0,85	0,40
HR	-0,97	-0,96	-0,50	1,00	-0,92	-0,34	0,62	-0,99	0,39	0,08	-0,99
VVM	0,83	0,87	0,17	-0,92	1,00	0,53	-0,75	0,95	-0,03	0,27	0,95
RADSOL	0,24	0,30	-0,45	-0,34	0,53	1,00	-0,61	0,47	0,31	0,60	0,47
PROM_PPP_ ACUM_MEN	-0,54	-0,59	0,03	0,62	-0,75	-0,61	1,00	-0,69	-0,14	-0,38	-0,69
ETo_MEN	0,95	0,96	0,40	-0,99	0,95	0,47	-0,69	1,00	-0,31	0,01	1,00
ET_MEN	-0,53	-0,41	-0,89	0,39	-0,03	0,31	-0,14	-0,31	1,00	0,91	-0,31
ETp_MEN	-0,25	-0,12	-0,85	0,08	0,27	0,60	-0,38	0,01	0,91	1,00	0,01
ETc_MEN	0,95	0,96	0,40	-0,99	0,95	0,47	-0,69	1,00	-0,31	0,01	1,00

Nota. Los resultados presentados en la tabla fueron obtenidos a partir de determinar la correlación de cada variable climatológica y de las evapotranspiraciones calculadas para las diferentes estaciones meteorológicas seleccionadas, determinando que los coeficientes de correlación son los mismos en los tres casos, por lo que aquí solo se presenta una matriz de correlación. *La información de las diferentes variables climatológicas mensuales para las tres estaciones meteorológicas seleccionadas fue obtenida de NASA POWER | Prediction Of Worldwide Energy Resources (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).*

Anexo E. Código del gráfico de correlograma (Python)

```
# Instalar las librerías requeridas para el EDA
import numpy as np
import pandas as pd
import seaborn as sns
import plotly.express as px
import plotly.graph_objects as go
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

# Ruta al archivo en Google Drive
file_path = '/content/drive/MyDrive/Proyecto de grado/mat_corr.csv'

df = pd.read_csv(file_path)
df.head()

# Correlograma
plt.figure(figsize=(10,5))
sns.heatmap(df.corr(), annot = True, cmap='YlGnBu')
plt.show()
```

Nota. Este código fue ejecutado en la herramienta de Google Colaboratory.

10. Referencias Bibliográficas

- Alcaldía Municipal de Puerto López. (s. f.-a). *Información del Municipio*. Recuperado 23 de octubre de 2023, de <https://www.puertolopez-meta.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- Alcaldía Municipal de Puerto López. (s. f.-b). *Presentación*. Recuperado 23 de octubre de 2023, de <https://www.puertolopez-meta.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Presentacion.aspx>
- ASOHECA. (2009). *FICHA TÉCNICA DEL MANEJO AMBIENTAL EN LA PRODUCCION DE CAUCHO NATURAL*.
<https://www.asoheca.org/imagenes/Fichastecnicas/FICHATECNICADELMANEJOAMBIENTAL.pdf>
- Ba, R., Song, W., Lovallo, M., Zhang, H., & Telesca, L. (2022). Informational analysis of MODIS NDVI and EVI time series of sites affected and unaffected by wildfires. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 604, 127911.
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127911>
- Barco, J., Cuartas, A., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J. I., Mantilla, R., Hoyos, C., Mejía, J. F., Botero, B., & Montoya, M. (2000). Estimación de la evaporación en Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 07, Article 07.
- Bedoya Arenas, L. S., & Ramírez Ramírez, A. F. (2016). *La gestión local del riesgo de desastre como proceso de planificación ambiental y territorial en la cabecera municipal de Puerto López, departamento del Meta*. <https://hdl.handle.net/11059/6844>
- Carabalí Quinteros, J. A., Gómez-García, J., Solano, M., Llumiquinga, G., Burgos, C., & Carrera-Villacrés, D. (2019). Evaluación de la calidad de agua para riego y

- aprovechamiento del recurso hídrico de la quebrada Togllahuayco. *Siembra*, 6(2), 046-057. <https://doi.org/10.29166/siembra.v6i2.1641>
- Cárdenas Gutiérrez, J. A., Jacome Carrascal, J. L., & Vergel Ortega, M. (2021). Determinación de la evapotranspiración potencial y real en cuenca hidrográfica, utilizando modelos matemáticos. *Boletín Redipe*, 10(3), 225-231.
- Casanare, A. M. de T. (2000). *Esquema de Ordenamiento Territorial Tauramena Casanare 2000 - 2010: EOT Tauramena Casanare 2000 - 2010*. <https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/123456789/9782>
- Castañeda Torres, A. (1997). *Zonas Aptas para el Cultivo de Caucho en Colombia*.
- Castaño, Á. M., Aristizábal, M., & González, H. (2012). Requerimientos hídricos del plátano dominico- hartón (Musa AAB Simmonds) en la región santágueda (Palestina, Caldas). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.31910/rudca.v15.n2.2012.831>
- Chuvieco Salinero, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial* (1a. ed.). Rialp,.
- Cogliati, M., & Finessi, F. (2023). *ANALISIS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN UTILIZANDO PRODUCTOS MODIS*.
- Colaizzi, P. (2016). Advances in a Two-Source Energy Balance Model: Partitioning of Evaporation and Transpiration for Cotton. *Trans. ASABE*, 59, 181-197. <https://doi.org/10.13031/trans.59.11215>
- Compagnon, P. (1998). *El Caucho Natural, biología, cultivo, producción*. Concejo Mexicano de hule México.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2019). *GU.0130.07 V02 20191007 Balance oferta-demanda de agua*.

- <https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2019-10/GU.0130.07+V02+20191007+Balance+oferta-demanda+de+agua.pdf>
- Cristancho, X. V., & Silva, J. C. (2011). *Manual ambiental para la producción de caucho natural* (Convenio 0086 de 2011). SENA, Sociedad de Agricultores de Colombia SAC, Confederación Cuachera Colombiana CCC.
- Degano, M. F., Rivas, R., & Bayala, M. (2023). Determinación de la evapotranspiración con datos satelitales y de reanálisis utilizando Google Earth Engine. *Tecnología y ciencias del agua*, 1-50. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-15-4-4>
- Díaz, J. M. G. (2006). La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Terra. Nueva Etapa*, XXII(31), 31-72.
- Espinal G., C. F., Martínez Covaleda, H. J., Salazar Soler, M., & Barrios Urrutia, C. A. (2005). *La cadena del caucho en Colombia: Una mirada global de su estructura y dinamica 1991-2005*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MINAGRICULTURA. <http://localhost:8080/handle/11348/6109>
- Faci González, J. M. (2012). *Determinación de las necesidades de riego de los cultivos*. <https://digital.csic.es/handle/10261/75100>
- Fondo Nacional de Fomento Cauchero FEDECAUCHO, & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2006). *Cartilla promocional del cultivo de caucho natural*.
- G. Allen, R., S. Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. *Estudio riego y drenaje*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147846>
- García Romero, I. A., Peraza Arias, A. R., Pinzón Gutiérrez, Y. A., Santacruz Saldaña, O. E., Martínez G., A., Tapiero, A., León, G., Arguello, O., Gutiérrez, A., García Rubio, F., & Castilla Campos, C. E. (2013). *Modelo productivo para el cultivo del árbol de caucho*

- natural en la Orinoquía: Zonas de escape y no escape al mal suramericano de las hojas del caucho.* Corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA.
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/36994>
- Gardiazabal, F., Mena Volker, F., & Wilhelmy, C. (2003). *DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO (KC) PARA PALTOS CV. HASS EN CHILE.*
- Gil Restrepo, J. P., & Correa Pinilla, D. E. (2022). *Descripción botánica, biología y fenología.* 33-40.
- Gilabert, M. A., Gonzalez-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección, ISSN 1133-0953, N.º. 8, 1997, 8.*
- Gremial de huleros de Guatemala. (2000). *Manual práctico 2000 del cultivo de hule* (Federación Nacional de Productores de Caucho Natural FEDECAUCHO).
- Guzmán-Alvarez, J. (2007). *Uso del Sensores Remotos en el estimación de evapotranspiración.*
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment, 83(1), 195-213.* [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- IDEAM. (2022a). *Boletín de predicción climática y recomendación sectorial. Mes de Enero de 2022.* <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/11qdLJTOLX5B2ijcW7c-WEEx6BNj0Z14bA>
- IDEAM. (2022b). *Boletín de predicción climática y recomendación sectorial. Mes de Mayo de 2022.* <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/11qdLJTOLX5B2ijcW7c-WEEx6BNj0Z14bA>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2021). *Balance Hídrico y sus Aplicaciones*.

<https://www.igac.gov.co/es/contenido/balance-hidrico-y-sus-aplicaciones>

IVIA. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. (s. f.). *Necesidades de riego*.

Recuperado 10 de octubre de 2023, de <http://riegos.ivia.es/necesidades-de-riego>

Jaramillo R., A. (2007). *Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia*.

<https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/232>

López-Moreno, J. I., Hess, T., & White, S. (2009). Estimation of reference evapotranspiration in a mountainous mediterranean site using the Penman-Monteith equation with limited meteorological data. *Pirineos : Revista de Ecología de Montaña*, 164.

<https://doi.org/10.3989/pirineos.2009.v164.27>

Mas, J. F. (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*.

<http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/215>

Mbabazi, D., Mohanty, B. P., & Gaur, N. (2023). High spatio-temporal resolution evapotranspiration estimates within large agricultural fields by fusing eddy covariance and Landsat based data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 333, 109417.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109417>

Muñoz Aguayo, P. (2013). *Apuntes de teledetección: Índices de vegetación*.

<https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26389>

NASA. (2021, noviembre 30). *Datos / Ciencia Landsat*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/data/>

NASA. (2023). *MODIS MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORAIOMETER*.

NOAA's Climate Prediction. (s. f.). *NOAA's Climate Prediction Center*. Recuperado 20 de noviembre de 2023, de

https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

- Olivera, L., Mattar, C., & Galleguillos Araya-Schübelin, M. X. (2013). Estimación de la evapotranspiración real en ecosistemas mediterráneos de Chile mediante datos ASTER y MODIS. *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 39, 46-56.
- Ortiz Diaz, H. A., Escobar Amado, C. D., & Sepulveda Mora, S. B. (2018). Análisis estadístico de variables climatológicas en la ciudad de Cúcuta. *Respuestas*, 23(1), 39-44.
- Ortiz, J. E. D. (2006). *Riego por gravedad*. Universidad del Valle.
- Parra-Henao, G. (2010). Sistemas de información geográfica y sensores remotos. Aplicaciones en enfermedades transmitidas por vectores. *CES Medicina*, 24(2), 75-89.
- Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos: *Ecosistemas*, 17(3), Article 3.
<https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/83>
- Penman, H. L., & Keen, B. A. (1997). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Pérez Gutiérrez, C., & Muñoz Nieto, Á. L. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*.
- Pérez Rodríguez, R. E. (2007). Estimación de evapotranspiración a escala regional a partir de imágenes Modis.
https://go.openathens.net/redirector/udec.cl?url=http://tesisencap.udec.cl/chillan/agricola/perez_r_r_e/index.html. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/8517>
- Phiri, D., & Morgenroth, J. (2017). Developments in Landsat Land Cover Classification Methods: A Review. *Remote Sensing*, 9(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/rs9090967>

Rocío, C.-O., Ramón, A.-R., Mario Alberto, V.-P., Waldo, O.-B., & Abel, Q.-N. (2013).

Modelos Hargreaves Priestley-Taylor y redes neuronales artificiales en la estimación de la evapotranspiración de referencia. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(2), 163-176. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(13\)72234-0](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72234-0)

Rodríguez, R. S., López, G. L. A., Rodríguez, J. C., Thorp, C. J. W., Rodríguez, J. A. S.,

Granillo, A. O., & Hernández, J. A. S. (2017). Estimación de evapotranspiración con imágenes de PROBA-V de un cultivo de sandía en la costa de Hermosillo, Sonora, México. *Terra Latinoamericana*, 35(4), 301-308.

Róvira, P. (1976). Selección de fórmula para estimar evapotranspiración potencial en Chillán, Chile. *Notas geográficas (7): 31-44, 1976.*

<https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/20204>

Running, S., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2021). *MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061* [dataset]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center.

<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.061>

Running, S. W., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2021). *User's Guide. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6.1)*. NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm.

SENA, Sociedad de Agricultores de Colombia SAC, & Confederación Cauchera Colombiana CCC. (2012). *Adopción de medidas para el manejo fitosanitario del cultivo del caucho natural* (Convenio No. 00095 de 2012).

Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección*. Universitat de València.

- Sterling Cuellar, A., & Rodríguez León, C. H. (2011). *Nuevos clones de caucho natural para la Amazonía Colombiana: Énfasis en la resistencia al mal suramericano de las hojas (Myrcocyclus ulei)*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - Sinchi.
- Sterling Cuellar, A., & Rodríguez León, C. H. (2020). *Valoración inicial del POTENCIAL PRODUCTIVO de Hevea Brasiliensis en la Amaonía Colombiana mediante la evaluación de nuevos clones promisorios para la región*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - Sinchi.
- Sterling, T., & Hernández-Rios, I. (2005). La Transpiración—Movimiento del Agua a Través de las Plantas. *Plant & Soil Sciences eLibrary*. <https://digitalcommons.unl.edu/passel/78>
- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), 85-100. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>
- Taipe, C. L. R. (2014). Metodología de cálculo de ETP aplicando teledetección caso Valle de Chinchá. *Anales Científicos*, 75(1), Article 1. <https://doi.org/10.21704/ac.v75i1.937>
- Tapiero, A., Garnica, A., León M., G., Arguello, J., Gutierrez, A., Castilla, C., Rojas Molina, J., Jaimes Jaimes, Y. Y., Garcia, F., Garcia Romero, I. A., Cruz, O., & Pinzon, Y. (2018). *Modelo productivo para el cultivo de caucho (Hevea brasiliensis) (Willd. Ex A. Juss.) Mull., Arg. En Colombia, con énfasis en la Orinoquia y el Magdalena Medio*.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 38(1), 55-94. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-288/13>
- Venturini, V., Rodríguez, L., & Islam, S. (2007). Metodología para la estimación de la fracción evaporable y la evapotranspiración con productos MODIS. *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 27, 44-52.

Villazón Gómez, J. A., Noris Noris, P., Martín Gutiérrez, G., Villazón Gómez, J. A., Noris

Noris, P., & Martín Gutiérrez, G. (2021). Determinación de la precipitación efectiva en áreas agropecuarias de la provincia de Holguín. *Idesia (Arica)*, 39(2), 85-90.

<https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000200085>

Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M.,

Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford,

C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Woodcock,

C. E., ... Cook, B. D. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing*

of Environment, 280, 113195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195>

Zapata Ruiz, N., Playán Jubillar, E., & Faci González, J. M. (1998). *Evaluación de un sistema de*

reuso del agua en el riego por inundación. <https://digital.csic.es/handle/10261/5706>