

**Decanatura de División de Educación Abierta y a Distancia  
Especialización en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas  
Hidrográficas**

**Análisis del comportamiento de la evapotranspiración y su relación con la cobertura  
vegetal para el periodo 2002 - 2017 en la subcuenca del río Guayabero (Meta)**

**Nombre de los estudiantes:**

**Maura Alejandra Varela Márquez**

**Código: 1018497911**

**Yina Fernanda Vargas Pedraza**

**Código: 1069852542**

**Universidad Santo Tomás  
Decanatura de División de Educación Abierta y a Distancia  
Especialización En Ordenamiento y Gestión Integral De Cuencas Hidrográficas**

**Bogotá**

**2020**

## Tabla de contenido

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Resumen.....                                                                                           | 4         |
| 1. Introducción.....                                                                                   | 6         |
| 2. Planteamiento del Problema .....                                                                    | 8         |
| 3. Justificación .....                                                                                 | 11        |
| 4. Objetivos.....                                                                                      | 14        |
| 2.1 Objetivo general.....                                                                              | 14        |
| 2.2 Objetivos específicos .....                                                                        | 14        |
| 5. Antecedentes.....                                                                                   | 15        |
| 6. Marco Conceptual.....                                                                               | 17        |
| 7. Marco Legal.....                                                                                    | 24        |
| 7.1 Derecho a un ambiente sano.....                                                                    | 24        |
| 7.2 El medio ambiente como patrimonio común .....                                                      | 24        |
| 7.3 Desarrollo Sostenible .....                                                                        | 25        |
| 8. Marco teórico.....                                                                                  | 28        |
| 9. Metodología.....                                                                                    | 31        |
| <i>Fase 1: Delimitación del área de estudio:.....</i>                                                  | <i>33</i> |
| <i>Fase 2: Obtención de variables hidroclimáticas (escorrentía, temperatura y precipitación): ....</i> | <i>35</i> |
| <i>Fase 3: Obtención de datos de deforestación y tipos de suelo. ....</i>                              | <i>37</i> |
| <i>Fase 4: Cálculo de evapotranspiración y construcción de series de tiempo .....</i>                  | <i>37</i> |
| <i>Fase 5: Análisis de información .....</i>                                                           | <i>38</i> |
| 10. Resultados .....                                                                                   | 40        |
| 11. Cronograma: .....                                                                                  | 51        |
| 12. Conclusiones:.....                                                                                 | 52        |
| 13. Anexos .....                                                                                       | 57        |

## Lista de Figuras

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figuras 1. Mapa de ubicación geográfica de la subcuenca del río Guayabero. ....                           | 32 |
| Figuras 2. DEM subcuenca del río Guayabero .....                                                          | 34 |
| Figuras 3. Código en el lenguaje de programación R de transformación de escala. ....                      | 35 |
| Figuras 4. Código en lenguaje de programación R de extracción de datos de formatos netcdf. ..             | 36 |
| Figuras 5. Código en lenguaje de programación en R de construcción de series de tiempo .....              | 37 |
| Figuras 6. Código en lenguaje de programación en R de obtención de promedios mensuales multianuales. .... | 38 |
| Figuras 7 Diagrama de procesos, diseño metodológico.....                                                  | 39 |
| Figuras 8. Imagen precipitación – escorrentía de subcuenca del río Guayabero.....                         | 40 |
| Figuras 9. Imagen relación precipitación – escorrentía de la subcuenca del río Guayabero .....            | 41 |
| Figuras 10. Promedio mensual precipitación – escorrentía de la subcuenca del río Guayabero ..             | 42 |
| Figuras 11. Mapa geopedológico de la subcuenca del río Guayabero tipos de suelo.....                      | 43 |
| Figuras 12. Evapotranspiración Real y Potencial de la subcuenca.....                                      | 44 |
| Figura 13. Área deforestada en la subcuenca del río Guayabero.....                                        | 45 |
| Figuras 14. Coeficiente de variación variable escorrentía .....                                           | 46 |
| Figuras 15. Coeficiente de variación variable precipitación.....                                          | 47 |
| Figuras 16. Variable temperatura a escala anual de la subcuenca del río Guayabero. ....                   | 47 |

## Lista de Tablas

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Métodos para calcular la evapotranspiración..... | 30 |
|-----------------------------------------------------------|----|

## Resumen

La fragmentación y defaunación de los ecosistemas se han convertido en una de las mayores consecuencias derivadas del aumento en las actividades extractivistas ilegales generadas por el posconflicto; estas dinámicas se evidencian en mayor medida en las zonas de conservación y áreas protegidas dentro del territorio Colombiano y en sus zonas de amortiguación, aumentando la degradación y deforestación en las zonas. No obstante, aun con el evidente aumento de pérdida de coberturas, especialmente la forestal, aún no se ha estudiado el efecto que este tiene sobre las variables hidroclimatológicas, factores importantes dentro de la dinámica hídrica.

En concordancia con lo anterior, el presente proyecto de investigación pretende evaluar los efectos generados en la evapotranspiración a causa de la pérdida de cobertura forestal, en el periodo de tiempo de 2002 – 2017 en la subcuenca del río Guayabero (Meta); lo anterior realizado a partir de información obtenida de herramientas de sensoramiento remoto, información de la red de monitoreo nacional del IDEAM e información secundaria. Como resultados se identificó un aumento de la esorrentía superficial de la subcuenca gracias a la reducción de área forestal y a un posible aporte de agua subterránea dentro del área de estudio, además se atribuye el aumento de área deforestada a actividades antropogénicas, como cultivos de uso lícito e ilícito, evidenciando así una correlación directa con la evapotranspiración real.

**Palabras clave:** evapotranspiración, cobertura vegetal, suelo, sensoramiento remoto, dinámica hídrica, variables hidroclimatológicas.

## **Abstract**

The fragmentation and defaunation of ecosystems have become one of the major consequences derived from the increase in illegal extractive activities generated by the post-conflict; These dynamics are more evident in the conservation zones and protected areas within the Colombian territory and in its buffer zones, increasing degradation and deforestation in the zones. However, even with the evident increase in the loss of coverage, especially forestry, the effect that this has on hydroclimatological variables, important factors within water dynamics, has not yet been studied.

In accordance with the above, this research project aims to evaluate the effects generated in evapotranspiration due to the loss of forest cover, in the period of time from 2002 to 2017 in the Guayabero river sub-basin (Meta); This was done from information obtained from remote sensing tools, information from the IDEAM national monitoring network and secondary information. As a result, an increase in surface runoff from the sub-basin was identified thanks to the reduction of forest area and a possible contribution of groundwater within the study area, in addition, the increase in deforested area is attributed to anthropogenic activities, such as crops for legal use. and illegal, thus evidencing a direct correlation with actual evapotranspiration.

**Key words:** evapotranspiration, vegetation cover, soil, remote sensing, hydric dynamics, hydroclimatological variables.

## **1. Introducción**

La presencia de las plantas en cualquier región del mundo es un punto clave para el ciclo hidrológico en aspectos como almacenamiento de agua, liberación durante la evapotranspiración y demás procesos en el medio. Irma Rosas- Gabriela Carranza (2006) describió la expansión de la frontera agrícola, la tala indiscriminada de árboles, la inercia del desarrollo y la suma de las diversas actividades humanas, como las causas de la deforestación de los bosques en un gran porcentaje y en consecuencia que el recurso hídrico a nivel nacional este siendo altamente afectado por la presión humana, agravando cada vez más su disponibilidad (cantidad y calidad). (pág. 125)

El río Guayabero está ubicado en el Departamento del Meta, siendo una subcuenca caracterizada por contar con diferentes áreas de conservación, las cuales son protegidas por las autoridades ambientales competentes y los campesinos de la región, quienes responsablemente sacan provecho del ecoturismo, especialmente en el sector de la Macarena, favoreciendo así el cuidado de los ecosistemas, además de privilegiar la economía comunitaria sostenible. Sin embargo, la guerra y la falta de conciencia ambiental han generado problemáticas en el sector de la subcuenca el Guayabero, especialmente por la presencia de cultivos de tipo ilícito, con antecedentes de presencia de grupos armados al margen de la ley y la deforestación la cual conlleva a la pérdida de la cobertura vegetal en el territorio

Así las cosas, la presente investigación se centra en realizar el análisis del comportamiento de la evapotranspiración, identificando los puntos en los que se muestre el efecto de la dinámica de la cobertura vegetal (área de zonas con densidad de hojas verdes) sobre las variables de estudio (temperatura, escorrentía y precipitación), en la subcuenca del río

guayabero, ubicada en el departamento del Meta. De esta manera se obtendrá un punto de partida para que las diferentes instituciones puedan efectuar más proyectos con el uso de estas nuevas herramientas de monitoreo, en temas de gestión hídrica y así permitir un mejor desarrollo, evaluando mejor la dinámica ambiental, además de establecer mejores estrategias y procesos de manera sostenible.

## **2. Planteamiento del Problema**

El cambio climático es una de las variables que más ha intervenido en la gestión y ordenamiento de cuencas hidrográficas. “En el territorio colombiano donde el monitoreo y control de recursos es bastante complejo, los cambios en el ciclo hidrológico han fomentado el desabastecimiento y el aumento de los impactos en los ecosistemas pertenecientes a la zona hidrográfica, alterando los patrones de precipitación, el nivel de escorrentía superficial y el cambio en la temperatura, además de acentuar la vulnerabilidad” (Qiu, 2020)

Estas alteraciones en la temperatura y la precipitación afectan principalmente a través de la evapotranspiración, “siendo esta una variable esencial que permite adquirir herramientas para el ordenamiento del territorio y para determinar las funciones ambientales de la cuenca en pro de la población (cuantifica el recurso hídrico de una zona)” (Cheng, 2017). Esta constante es un componente crítico para el equilibrio entre el agua y la energía de las interacciones clima, suelo y vegetación, por lo cual las alteraciones de las variables hidroclimatológicas (precipitación, escorrentía y temperatura) son influenciadas por estos cambios climáticos y por ende por el cambio en la evapotranspiración de la cuenca (Qiu, 2020).

Sin embargo, no solo el cambio climático es uno de los factores causantes de estos cambios, también se ha identificado que “las coberturas vegetales presentes en la zona aumenta o disminuye la capacidad en la evapotranspiración, esencialmente en las condiciones de la vegetación o en la ausencia de ésta” (Udding, 2018), por lo cual, el cálculo del área de cobertura vegetal, especialmente la cobertura boscosa, es uno de los componentes de evaluación del cálculo de la evapotranspiración.

Si se observa, a nivel mundial, el bosque tropical representa el 60% de la superficie terrestre y es la cobertura que presenta mayor dinamismo a causa de la deforestación y degradación de los mismos, convirtiéndose en las áreas con mayor relación a las problemáticas de contaminación, estrés hídrico y cambios de cobertura vegetal derivados del aumento de la frontera agrícola y pecuaria, perdiendo en promedio 2101 Km<sup>2</sup>/año de zonas tropicales aproximadamente, siendo los bosques de sur de América los de mayor impacto. (Victorino, 2011)

Colombia es responsable, junto con otros 13 países, del 80% de los bosques tropicales a nivel mundial, además de ser uno de los cuales ha perdido en promedio 15 millones de Ha de bosque para el periodo 1990 – 2016 y solo 550.000 Ha para el año 2017, influenciado principalmente por la minería, pastoreo y cultivos de uso ilícito “los cuales representan el desplazamiento de aproximadamente 500.000 Ha, 60.000 Ha y 37.000 Ha de bosque por año, respectivamente” (Victorino, 2011); asimismo, se identifican la agricultura, la minería, infraestructura hídrica y vial como los principales factores causantes del cambio de uso del suelo en el país, y la presencia de cultivos de uso ilícito como la causa principal de la deforestación, teniendo en cuenta el área de cultivo y los programas de erradicación, que han permitido el aumento de la dinámica de cambios de coberturas gracias al uso de las zonas erradicadas para la agricultura a pequeña escala. (Lanly, 2003)

Sin embargo, el cálculo de áreas por tipo de cobertura forestal es una de las variables más difíciles de establecer por la falta monitoreo en algunas zonas del país, dificultando la investigación y el seguimiento dentro de los planes de ordenamiento de cuencas del territorio Colombiano. Para esto “herramientas como el sensoramiento remoto facilitan el monitoreo sin

acceso al territorio físico de estudio, gracias a su practicidad para el análisis de las variables de interés como el uso y ocupación del suelo, factores hidroclimatológicos, entre otros” (Liu, 2019).

De acuerdo a lo anterior, el presente estudio se centra en el análisis del comportamiento de la evapotranspiración, identificando los puntos en los que se muestre el efecto de la dinámica de la cobertura vegetal (áreas deforestadas y áreas de cultivos de uso ilícito) sobre las variables de estudio (temperatura, escorrentía y precipitación), centrado en la subcuenca del río Guayabero, ubicada en el departamento del meta y parte del PNN La Macarena ya que es una zona de estudio de interés ecosistémico y con poca cobertura para el monitoreo y el análisis de variables; además, es una zona que se ve afectada por la deforestación, presencia de cultivos de tipo ilícito, con antecedentes de presencia de grupos armados al margen de la ley, entre otros, llevando a un deterioro ambiental considerable, el cual a pesar de los esfuerzos por su conservación, sigue siendo una situación alarmante para el territorio colombiano (Colombia, 2015)

Por lo anterior, se plantea la siguiente *pregunta de investigación*: ¿Cuál es la relación entre la cobertura vegetal y las variaciones en las variables hidroclimatológicas (Evapotranspiración) de la subcuenca del río Guayabero (Meta), en el periodo de tiempo 2002-2017?

**Palabras clave:** Hidroclimático, subcuenca hidrográfica, evapotranspiración, variación, deforestación, cobertura vegetal, serie de tiempo.

### **3. Justificación**

A través de los diversos problemas ambientales que se han presentado en el país y la escasez del recurso hídrico en diversas zonas, se ha hecho un esfuerzo por preservar, restaurar y gestionar de manera adecuada áreas de interés ecológico para el país conocidas como parques nacionales naturales y santuarios de fauna y flora, las cuales se manejan por la unidad administrativas especial Parques Nacionales Naturales de Colombia; en dichas áreas, se encuentran ecosistemas de gran importancia para la conservación de la biodiversidad del país y la preservación del recurso hídrico, especialmente en regulación y dinámica del recurso a través de las diferentes cuencas que los traslapan.

Para la preservación de estos diversos ecosistemas, es de gran importancia las condiciones hidroclimatológicas, pues la presencia del recurso hídrico es vital para la subsistencia de factores bióticos, su interacción y dinámica a lo largo del territorio Colombiano, determinando así la posibilidad de uso y accesibilidad de las poblaciones al recurso hídrico.

Al caracterizar una cuenca se conocen las condiciones ecosistémicas predominantes, su posición bajo efectos del modelo ocupacional del territorio y las repercusiones que este trae sobre la cuenca. De esta manera se hace importante resaltar un factor determinante en cuanto a las propiedades de los elementos ambientales y su correlación con aspectos como la cercanía a centros poblados o factores que determinen un cambio relevante que puedan modificar los regímenes de flujo de las fuentes hídricas. Adicionalmente es importante reconocer que factores

como una disminución de la cobertura modifica la recarga de los acuíferos, aumentando la escorrentía y la degradación de la corriente sobre los suelos. (ORDUZ, 2018)

Es por esto que dentro de la importancia de estas áreas se enmarca la necesidad de un constante monitoreo de diversos factores ambientales, con el fin de determinar la calidad y cantidad de los mismos, para la creación de estrategias y políticas que permitan prever y afrontar de forma adecuada situaciones de degradación ambiental y desabastecimiento de poblaciones, por lo que distintos métodos de monitoreo como la implementación de sensores remotos son de gran importancia para el avance en este objetivo. (Fernanda J. Gaspari, 2013)

Más allá de la garantía de suministro y la consideración de derecho básico que ofrece una perspectiva sintética donde el agua es mucho más que un recurso, se deben tener en cuenta los valores intrínsecos y patrimoniales. El desafío del cambio climático no hace más que reforzar esta prioridad de recuperación y mantenimiento del buen estado de las cuencas ante una ya evidente reducción de las precipitaciones y un incremento de las temperaturas y en respuesta un estrés hídrico en general. (Julia Carabias Lillo, 1997)

De esta manera la investigación permitirá desarrollar los procesos correspondientes, los cuales permitan la obtención de datos y demás información a fin de analizar el comportamiento de la evapotranspiración de la subcuenca del río guayabero durante cierto periodo, a partir de datos hidrometeorológicos obtenidos por los sensores remoto. Por ende, establecer un control y monitoreo a la cobertura del suelo y relacionarlo con el uso de éste, permite conocer de qué manera afecta dicha actividad al recurso hídrico, las condiciones hidroclimatológicas en el área, así como el grado de impacto en las mismas.

Así las cosas, será un punto de partida para que las diferentes instituciones puedan efectuar más proyectos con el uso de estas nuevas herramientas de monitoreo, en temas de gestión hídrica y así permitir un mejor desarrollo, evaluando mejor la dinámica ambiental, además de establecer mejores estrategias y procesos de manera sostenible.

## **4. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar los efectos generados en la evapotranspiración a causa de la pérdida de cobertura forestal, en el periodo de tiempo de 2002 – 2017 en la subcuenca del río Guayabero (Meta).

### **2.2 Objetivos específicos**

- Obtener datos hidrometeorológicos a través de herramientas de sensores remotos para el periodo 2002 - 2017, con el propósito de calcular y reconocer los índices de evapotranspiración de la subcuenca del río Guayabero.
- Determinar el área de pérdida de cobertura forestal y tipos de suelo existentes en la subcuenta del rio Guayabero (Meta).
- Analizar el comportamiento de la evapotranspiración en relación con la pérdida de cobertura forestal para el periodo 2002 - 2017 en la subcuenca del río Guayabero (Meta)

## **5. Antecedentes**

Las llanuras del río Meta están bien representadas, en las sabanas bajas de Casanare y Arauca, que incluyen ecosistemas diversos como los bosques inundables, los morichales, las sabanas eólicas y las sabanas húmedas o inundables. En estas últimas, el relieve plano con apenas pequeñas depresiones muestra numerosos y variados cuerpos de agua tales como los esteros, los bajos, las lagunas (naturales o artificiales), los caños y las madre viejas, antiguos cauces que han perdido la conexión con el río.

Actualmente los gobiernos locales han tomado diferentes medidas para salvaguardar los ecosistemas colindantes a los terrenos del río Meta, en este caso la subcuenca del río Guayabero, especialmente por los grandes cambios que la moldean constantemente (uso del suelo, cobertura vegetal, modelos de producción, entre otros) principalmente en términos del posconflicto, convirtiendo estas variaciones en componentes claves para el comportamiento de la evapotranspiración dentro de una cuenca. Sin embargo, hasta el momento no se han encontrado estudios o proyectos claros encaminados a resolver esta incógnita, menos en este sector de Colombia (Sierra, 2017)

Con lo anterior, nació la necesidad de conocer la magnitud de influencia de los impactos, impulsando a la generación de estudios para determinar el área afectada, enfrentando grandes adversidades por la presencia de grupos al margen de la ley, lo que promovió alternativas como la teledetección y el modelado como herramientas para el cálculo de las variables a analizar, los cuales han arrojado datos sobre el cambio en las coberturas y por ende en el uso del suelo, variables que están ligadas con el comportamiento de la evapotranspiración. (A. Rettberg, 2016)

En relación, se han realizado diferentes investigaciones de teledetección, a partir del análisis de imágenes satelitales como C.A. Murad y J. Pearse (2018), donde aplicaron un

tratamiento de información, especialmente en las zonas con sombra, nubes y error en los datos, para minimizar la cantidad de píxeles sin información evaluando la clasificación durante 1 año a cada lado de cada píxel de datos que falta. Si un píxel de datos faltante se clasificó como bosque tanto en el año anterior como en el siguiente, entonces el píxel se clasificó como bosque en el año analizado. De manera similar, si un píxel de datos faltante se clasificó como no forestal tanto en el año anterior como en el siguiente, se clasificó como no forestal en el año analizado

También, según P. J. Negret et al. (2019) para tratar la información, realizaron una clasificación con el algoritmo de máxima verosimilitud y se basó en el sistema de clasificación de cobertura y uso de la tierra de acuerdo con las características del suelo de la región, y se usó el compuesto IR de falso color, para la interpretación visual en el mapeo de bosques tropicales.

Es evidente la importancia de uso de estas herramientas de teledetección para realizar estudios más contextualizados y en profundidad, determinando las variables necesarias que den un panorama más exacto de la realidad de las cuencas hidrográficas en Colombia, que aporten en la resolución de los nuevos retos en cuanto planificación, gestión de la tierra, gobernanza de los recursos, las reformas políticas y la resiliencia de las comunidades locales, factores de importancia que ayudan en la lucha contra la desigualdad en Colombia garantizando la conservación del capital natural y los servicios ecosistémicos. (Zúñiga, 2019).

## 6. Marco Conceptual

El río Guayabero recorre los límites del departamentos del Meta, Vichada y Guaviare, bordea el casco urbano del municipio de La Macarena, siendo la vía principal para llegar a las zonas del Mirador, Caño Cristales y Caño cristalitos; el Guayabero nace por la unión del río Duda y el río Lozada en el cerro de Buenos Aires, sus aguas desembocan en ríos Cabre, Corrientoso, la Ceiba y Caño Yurumales, en el sur oriente de la Sierra de la Macarena se junta con el río Ariari formando el río Guaviare. Este río debe su nombre al pueblo indígena de los Guayaberos, de la familia lingüística Guahibo, quienes antiguamente habitaban las riberas del río. (META, 2020)

Según la cuenca objeto de estudio, es importante reconocer las siguientes características:

*Aspectos bióticos del sector:* La avifauna de la Reserva de La Macarena, de la cual hace parte la cuenca del río Guayabero, registrada hasta 1978 contiene 456 especies representadas en 65 familias, aproximadamente un 27% de toda la avifauna colombiana la cual es dominada por especies de las Guyanas, Amazonas y con menor representatividad de la región Andina. La mayoría de estas especies han sido reportadas en el área que actualmente abarca el Parque Nacional. (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2018, pág. 157)

Las zonas de vegetación sabanoide tienen una clara afinidad con los tepuyes y la biota de las zonas altas una estrecha afinidad con los Andes. En la porción meridional de la sierra, debido al afloramiento de areniscas que datan del Cretácico Superior hasta el Terciario Inferior, aparecen sabanas de tipo litoquersofíticas, que se podrían considerar oligocasmquersofíticas ya que crecen en suelos de profundidad mínima (en algunos casos no existe suelo como tal, sino una trama de raíces tan densa que forman un verdadero cespedón). La flora de este sector muestra una clarísima afinidad con la flora de los tepuyes de Venezuela y con los elementos de

algunas de las sabanas de tipo amazónico, así como con los llamados campos rupestres de Brasil, en Minas Gerais y Bahía. (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2018, pág. 33)

*Aspectos biofísicos:* En general los terrenos colindantes con la cuenca del río Guayabero pertenecen a la plataforma de los Llanos Orientales de edad Paleozoica, se encuentran ocupando la parte baja de la región, al este de la sierra. Está cubierta por sedimentos terciarios y cuaternarios lutíticos de los que emergen formas tabulares. Ciertos sectores corresponden a zonas aluviales recientes, compuestos por bacines, cauces y meandros abandonados. (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2018, pág. 145)

El río Guayabero cuenta con un área de 156.507, de los cuales 21.846 hacen parte del área de la cuenca del PNN. Estos terrenos corresponden a la zona más baja (200 msnm) de Parque Natural Sierra de la Macarena, específicamente en el sector comprendido entre nueva Colombia y la inspección de Puerto Ospina. El relieve general del sector, correspondiente a la parte del Distrito Ariari–Guayabero, es plano (250–275 msnm) a ondulado (275–325 msnm) poco disectado, hasta alomado (325–400 msnm) disectado. Las partes más elevadas se presentan como filos alargados, que corren de norte a sur, en los interfluvios de los ríos y quebradas principales. (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2018, pág. 149)

Terrenos colindantes con el río Guayabero han sufrido procesos de cambio creciente por procesos de deforestación y expansión de la frontera agrícola y ganadera, además de la presencia de cultivos ilícitos durante el periodo 2002 al 2012.

*Código, orden y clasificación de la cuenca del Río Guayabero de acuerdo al IDEAM:* pertenece a la zona hidrográfica del Guaviare, sub zona río Guayabero, código 3201 y con un área de 6.271 m<sup>2</sup>.

Para cumplir con el objetivo del presente proyecto, es necesario interpretar la importancia de diferentes términos con relación al objetivo planteado.

A partir de la Revolución Industrial se ha incrementado la emisión a la atmósfera de gases que producen el efecto invernadero, como consecuencia del uso y transformación de combustibles fósiles, principalmente. Esto ha originado un incremento en la temperatura media global de la Tierra, es decir; existe una correlación entre una mayor presencia de gases de invernadero y el incremento de la temperatura media global, que obedece a una razón física: a mayor cantidad de gases de invernadero mayor atrapamiento de energía, que a su vez origina mayor calentamiento. (IDEAM, 2007)

La vegetación y el ciclo del agua están intrínsecamente acoplados. Esta relación, denominada conectividad hidrológica, se define por la interacción entre determinados niveles y flujos en los ecosistemas. La importancia de este acoplamiento en los humedales se demuestra al examinar sus vínculos con las áreas aledañas al humedal o cuenca circundante, entendidas como unidades del paisaje individuales y a través de la función de dichas tierras adyacentes en la hidrología de los humedales. (Irma Rosas Perez)

El cambio climático tiene una clara incidencia en la oferta de agua, afectando a los ecosistemas y la agricultura. Con el transcurso del tiempo, se observarán cambios en la calidad del agua de los ríos y, con mayor intensidad, en los lagos, humedales y ecosistemas costeros. Siendo el agua el motor de la vida, es de esperarse que los cambios en el ciclo hidrológico produzcan a su vez alteraciones de consideración en los ecosistemas y en la salud del ser humano (AMBIENTE, 2018). El ciclo hidrológico está impulsado por la energía solar. El 86%

de la evaporación global ocurre en los océanos, que reduce su temperatura por la refrigeración evaporativa. Sin el efecto refrescante de la evaporación, el efecto invernadero conduciría a una temperatura superficial mucho más alta de 67°C, y un planeta más cálido (Ciclo hidrológico y cambio climático, 2020)

Es importante reconocer la razón de las variables hidrometeorológicas, las cuales intervienen en el ciclo hidrológico, con diferentes aspectos, los cuales deben ser analizados cuidadosamente para interpretar correctamente su influencia. Dentro de las principales variables hidrometeorológicas encontramos la evapotranspiración.

La *Evapotranspiración* (ET) es el término en que se combinan dos procesos; 1. Evaporación desde el suelo y desde la superficie cubierta por las plantas. 2. Transpiración desde las hojas de las plantas. Así las cosas, “el cálculo de la ET se usa para saber el agua que necesitan las plantas para su correcto desarrollo”. (Ramón, 2001)

Es así como el acoplamiento hidrológico entre las unidades del paisaje ejerce un control significativo sobre el movimiento del agua en las cuencas de drenaje y en la respuesta de los caudales a través de diversas relaciones recíprocas.

El manejo de cuencas hidrológicas proporciona el marco conceptual y espacial que permite elaborar e implementar normas y prácticas de conservación basadas en el entendimiento de procesos e interacciones ecológicas y sociales necesarias para asegurar la integridad ecológica de la cuenca y el suministro de productos para una población en aumento; así como evaluar el impacto de las actividades del hombre en los procesos hidrológicos. (Fernanda J. Gaspari, 2013)

La pérdida de agua desde la tierra hacia la atmósfera, por medio de la transpiración de la vegetación y de la evaporación directa, constituye una parte importante del problema del balance de agua. Sin embargo, la medición directa de esos factores resulta ser extremadamente dificultosa, y es precisamente esta dificultad la que ha llevado a desarrollar un número de fórmulas tendientes a estimar la pérdida de agua, directamente de los datos meteorológicos.

El conocimiento de la evaporación potencial de un lugar, del que se tienen registros de precipitación, permite establecer su balance hídrico anual. “De esta forma es posible conocer la cantidad de agua que realmente se evapora desde el suelo y transpiran las plantas en ese lugar, la cantidad de agua almacenada por el suelo y la que se pierde por derrame superficial y profundo” (Ciclo hidrológico y cambio climático, 2020). Como la evapotranspiración y la precipitación son dos elementos climáticos independientes, su marcha anual difícilmente coincide en un mismo punto de la tierra, por lo que en algunos lugares existen períodos en los cuales la necesidad de agua está ampliamente satisfecha por las lluvias y otros en los que se carece de las cantidades de agua requerida. De esta manera, habrá meses con agua suficiente y meses en que se registre exceso o deficiencia de agua en forma manifiesta. También pueden ocurrir casos extremos en que durante todo el año las precipitaciones sobrepasan las necesidades de agua o viceversa.

Por otro lado, es importante reconocer que los datos obtenidos por los satélites permiten determinar con precisión la cantidad de agua necesaria para regar un campo y fomentará la optimización de los recursos. Un software de código abierto permitirá a los usuarios generar mapas de evapotranspiración y demás información de gran utilidad para los profesionales en la materia.

Adicionalmente dentro del proceso de análisis fue importante reconocer términos como el coeficiente de variación, el cual corresponde a una medida aplicada en la ciencia de las estadísticas, que relaciona la desviación estándar y la media aritmética de un conjunto de datos definiendo la dispersión relativa de la muestra en estudio. Sumado a esto hay que reconocer que es la precipitación:

La *precipitación* es la caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. La precipitación forma parte del ciclo del agua que mantiene el equilibrio y sustento de todos los ecosistemas. La precipitación se genera por la condensación de agua, es decir, la acumulación de agua en la atmósfera creando nubes. El agua que se acumula en la atmósfera generalmente se encuentra en estado gaseoso. Cuando existe una cantidad considerable de agua gaseosa dentro de las nubes el agua pasa del estado gaseoso al líquido o al sólido.

*Precipitación media anual*: valor que se obtiene a partir del promedio de las lluvias registradas en los doce meses del año.

*Precipitación Máxima Probable. (PMP)*: se define como la mayor cantidad de precipitación meteorológicamente posible para una determinada duración, en un área afectada por un temporal y en una época del año determinada.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario reconocer que el sensoramiento remoto satelital es un proceso que ha alcanzado altos niveles de desarrollo tecnológico, esta técnica que permite realizar observaciones desde posiciones diferentes a las efectuadas al nivel de la tierra, sirve de apoyo a diversas ciencias de cara a un conocimiento más avanzado del espacio que nos circunda (CASTRO, 2007) Los sensores remotos ocupan un lugar notable en aplicaciones industriales, agrícolas, ambientales, catastrales, militares y de ordenamiento territorial, lo cual subraya el interés de este proceso para una amplia gama de disciplinas que pone de manifiesto

la necesidad de esta tecnología, donde también constituye un apoyo muy conveniente para reducir costos y realización de proyectos que de otra manera no se podrían llevar a cabo.

La comunidad mundial ha prestado atención en los últimos años a un nuevo rango de problemas ambientales globales más complejos y de difícil cuantificación de costos para lo cual la observación de nuestro planeta desde el espacio provee un medio de adquirir muchos de los datos necesarios para estudiar, monitorear y acudir en ayuda para resolverlos.

## **7. Marco Legal**

La Constitución Política de Colombia de 1991 elevó a norma constitucional la consideración, manejo y conservación de los recursos naturales y el medio ambiente, a través de los siguientes principios fundamentales:

### **7.1 Derecho a un ambiente sano**

En su Artículo 79, la Constitución Nacional (CN) consagra que: “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La Ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”. (Constitución Política de la República de Colombia, 1991)

Esta norma constitucional puede interpretarse de manera solidaria con el principio fundamental del derecho a la vida, ya que éste sólo se podría garantizar bajo condiciones en las cuales la vida pueda disfrutarse con calidad.

### **7.2 El medio ambiente como patrimonio común**

La CN incorpora este principio al imponer al Estado y a las personas la obligación de proteger las riquezas culturales y naturales (Art. 8), así como el deber de las personas y del ciudadano de proteger los recursos naturales y de velar por la conservación del ambiente (Art. 95). En desarrollo de este principio, en el Art. 58 consagra que: “la propiedad es una función social que implica obligaciones y, como tal, le es inherente una función ecológica”; continúa su desarrollo al determinar en el Art. 63 que: “Los bienes de uso público, los parques naturales,

las tierras comunales de grupos étnicos, las tierras de resguardo, el patrimonio arqueológico de la Nación y los demás bienes que determine la Ley, son inalienables, imprescriptibles e inembargables”. (Constitución Política de la República de Colombia, 1991)

### 7.3 Desarrollo Sostenible

Definido como el desarrollo que conduce al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de los recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades, la CN en desarrollo de este principio, consagró en su Art. 80 que: “ El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en zonas fronterizas “. Lo anterior implica asegurar que la satisfacción de las necesidades actuales se realice de una manera tal que no comprometa la capacidad y el derecho de las futuras generaciones para satisfacer las propias.

Por otro lado, entre la normatividad de resaltar y que se hace necesario tener en cuenta, se encuentra: **LEY 79 DE 1986** “Por la cual se provee a la conservación del agua y se dictan otras disposiciones”, la cual de manera general establece parámetros para la protección, conservación y preservación del agua y reservas forestales. **LEY 99 DE 1991** “Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones”, la cual tiene por objeto reglamentar

el desarrollo sostenible conduciendo al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de la vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades.

#### **7.4 Aprovechamiento, conservación y protección de los bosques:**

Dentro la normatividad a nivel Nacional frente al aprovechamiento, conservación y protección de los bosques del territorio, encontramos la siguiente:

- *Ley 2 de 1959 Nivel Nacional:* la economía forestal y protección de los suelos, las aguas y la vida silvestre, se establecen con carácter de "Zonas Forestales Protectoras" y "Bosques de Interés General", según la clasificación de que trata el Decreto legislativo número 2278 de 1953.
- *Decreto 2811 de 1974 Nivel Nacional:* Se denomina área de reserva forestal la zona de propiedad pública o privada reservada para destinarla exclusivamente al establecimiento o mantenimiento y utilización racional de áreas forestales productoras, protectoras o productoras-protectoras. Regula el manejo de los suelos forestales por su naturaleza y de los bosques que contienen, denominándose área de reserva forestal la zona de propiedad pública o privada reservada para destinarla exclusivamente al establecimiento o mantenimiento y utilización racional de áreas forestales productoras, protectoras o productoras-protectoras. Establece que los aprovechamientos forestales pueden ser persistentes, únicos o domésticos, y reglamenta lo referente al aprovechamiento forestal.
- *Decreto 1791 de 1996 Nivel Nacional:* Establece el régimen de aprovechamiento forestal

- *Resolución 222 de 2011 Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural:* Establece a la Dirección de Cadenas Productivas del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, como una Coordinación Central Forestal, indica las funciones de ésta, entre otros, para facilitar las relaciones de los particulares con la Administración Pública para la realización de las actividades de producción, transformación y comercialización de productos forestales obtenidos de plantaciones y sistemas agroforestales comerciales, y para el ejercicio de los derechos o cumplimiento de obligaciones.
- *Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015 Nivel Nacional:* Compila las disposiciones reglamentarias del Sector Ambiente. Regula las actividades de la administración pública y de los particulares respecto al uso, manejo, aprovechamiento y conservación de los bosques y la flora silvestre con el fin de lograr un desarrollo sostenible. Igualmente, establece las clases de aprovechamiento forestal, los requisitos y procedimiento para el trámite, los permisos, estudios, los fines, las empresas forestales, las plantaciones, (Artículos 2.2.1.1.2.1). Igualmente, señala las obligaciones de los propietarios para la protección y conservación de los bosques (Artículo 2.2.1.1.18.2).

## 8. Marco teórico

La evapotranspiración es la combinación de los fenómenos de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. La dificultad de la medición en forma separada de ambos fenómenos (el contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta) obliga a introducir el concepto de evapotranspiración como pérdida conjunta de un sistema determinado.

Thornthwaite (1948) introduce un nuevo concepto optimizando ambos, es la llamada evapotranspiración potencial o pérdidas por evapotranspiración, en el doble supuesto de un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanentemente completa. Este autor designa así a la altura de agua que sería efectivamente evaporada si los recursos de agua movilizables en la cuenca fueran en cada instante por lo menos iguales a los que pueden ser transformados en vapor por el juego de los factores hidrometeorológicos y la vegetación.

La cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración se conoce con el nombre de evapotranspiración real. Ésta es la suma de las cantidades de vapor de agua evaporada por el suelo y transpirada por las plantas durante un período determinado, bajo las condiciones meteorológicas y de humedad de suelo existentes. El principal factor que determina la evapotranspiración real es la humedad del suelo, el cual puede retener agua conforme con la capacidad de retención específica de cada tipo de terreno. La humedad del suelo es generalmente alimentada por la infiltración, y constituye una reserva de agua a ser consumida por la evaporación del suelo y las plantas.

Algunos de los *factores que influyen en la evaporación* son aquéllos que consideran la naturaleza y forma de la superficie evaporante. Una superficie de agua libre presenta el mínimo

de dificultades a la evaporación, cuya magnitud depende de la extensión y profundidad de la misma. Si ambas son pequeñas, los cambios atmosféricos y el terreno tendrán una gran influencia. En superficies extensas y profundas hay menor influencia del terreno adyacente. La radiación solar calienta las capas superiores de agua, pero no todo este calor se emplea en producir evaporación. Una parte calienta las capas más profundas y en ellas se produce un almacenaje de calor. Cuando cesa la radiación se enfrían las capas superiores, entonces, el calor fluye a ellas desde las capas inferiores más calientes, incrementándose así la evaporación superficial.

La evaporación de la humedad de un suelo sin vegetación se produce en la capa superficial. Al disminuir su humedad se produce un desequilibrio y hay una atracción de humedad subyacente que asciende por capilaridad a la superficie, prosiguiendo la evaporación hasta que esta agua capilar se agota. El agua higroscópica en equilibrio con la humedad atmosférica no se evapora. Cuando la subzona capilar alcanza la superficie del terreno, es decir, la superficie freática está muy próxima al suelo, la alimentación de agua capilar está asegurada. Sólo en este caso puede decirse que el agua subterránea propiamente dicha se evapora directamente. El fenómeno continuará mientras no haya un descenso del nivel freático y consiguientemente de la subzona capilar.

**Métodos para estimar la evapotranspiración en una cuenca:** La evapotranspiración en una cuenca es considerada como la evaporación procedente de la superficie del agua, el suelo, la nieve, el hielo, la vegetación y de otras superficies, más la transpiración. No es posible medir la evapotranspiración directamente de una región de dimensiones importantes en condiciones naturales. Por esta razón, la estimación de la evapotranspiración para períodos

largos de tiempo se calcula utilizando el método del balance hídrico y para valores a corto plazo mediante la utilización de relaciones empíricas.

*Método del balance hídrico:* Esta basado en el principio de conservación de la masa aplicado a una parte del ciclo hidrológico. Como la evaporación es la incógnita, deben conocerse los demás términos de la ecuación, lo cual no es fácil debido al desconocimiento de la mayoría de los componentes del ciclo hidrológico terrestre.

*Métodos basados en fórmulas empíricas:* La estimación de la evapotranspiración potencial utilizando formulaciones empíricas depende de la fuente de datos disponible y del ajuste del método a las condiciones locales. En general, las formulaciones se clasifican en: basadas en temperaturas y basadas en radiación. Dentro de las primeras se encuentran las ecuaciones de Thornthwaite y de Hargreaves como aquellas más utilizadas. La única justificación para utilizar estas fórmulas en el cálculo de la evapotranspiración es el requerimiento mínimo de datos y el paso de tiempo mínimo recomendado es un mes.

Otros métodos usados para calcular la evapotranspiración son los siguientes:

| Método       | Medidas necesarias                                  | Otros Datos                                        |
|--------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Thornthwaite | Temperatura                                         | Número teórico de hrs de sol                       |
| Hargreaves   | Temperatura, Radiación                              | Temp Max. y Min diarias                            |
| Turc         | Temperatura, horas reales de sol                    | Radiación solar                                    |
| Penman       | Temp., hrs reales del sol, velocidad del viento, HR | Por tablas se obtienen otros parámetros necesarios |

*Tabla 1. Métodos para calcular la evapotranspiración*

*Fuente: Elaborada por el grupo investigador*

## **9. Metodología**

### **Tipo de investigación:**

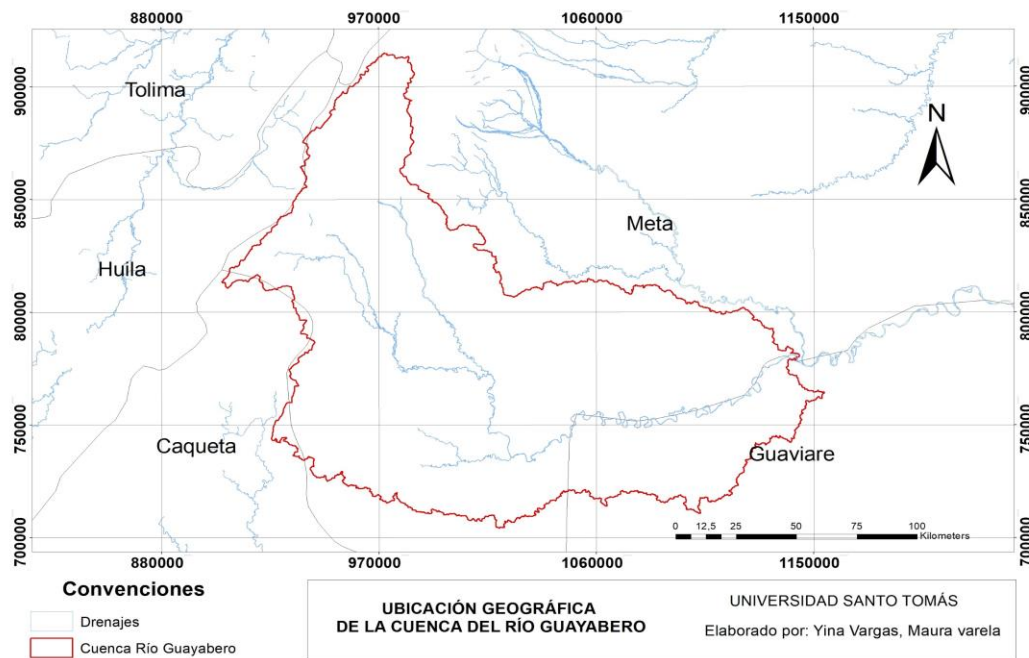
El presente proyecto trabajó una investigación cuantitativa con la cual se realizó una recolección, procesamiento y análisis de datos que permitió la descripción de la realidad y la explicación a la pregunta de investigación formulada anteriormente, asociando las variables que aportaron en la interpretación de los resultados; asimismo se trabajó un estudio de tipo explicativo-correlacional, que permitió la explicación de ciertos fenómenos presentados en la variable de la ETR provocados por las variables hidrológicas y la dinámica de las coberturas vegetales, específicamente por la pérdida de cobertura forestal y el aumento de cultivos de tipo ilícito para esta investigación, todo enfocado en la correlación de variables y el estudio del contexto en el que se desarrollaron estas particularidades.

### **Diseño de investigación:**

#### **Descripción del área de estudio**

El río Guayabero recorre los límites del departamentos del Meta, Vichada y Guaviare, bordea el casco urbano del municipio de La Macarena, siendo la vía principal para llegar a las zonas del Mirador, Caño Cristales y Caño cristalitos; el Guayabero nace por la unión del río Duda y el río Lozada en el cerro de Buenos Aires, sus aguas desembocan en ríos Cabre, Corrientoso, la Ceiba y Caño Yurumales, en el sur oriente de la Sierra de la Macarena se junta con el río Ariari formando el río Guaviare. Este río debe su nombre al pueblo indígena de los

Guayaberos, de la familia lingüística Guahibo, quienes antiguamente habitaban las riberas del río. (META, 2020)



*Figuras 1. Mapa de ubicación geográfica de la subcuenca del río Guayabero.*

*Fuente: Elaborado por el grupo investigador en la herramienta SIG ArcGis 10.5.*

Como se había mencionado, no solo el cambio climático es uno de los factores causantes de las diferencias y alteraciones en el ambiente natural. Para el caso de la problemática en cuestión, también se identificó que las coberturas vegetales presentes en la zona, aumentan o disminuyen la capacidad en la evapotranspiración, esencialmente en las condiciones de la vegetación o en la ausencia de ésta, ha llevado a determinar que el cálculo del área de cobertura vegetal es uno de los componentes de evaluación importantes para relacionar con las alteraciones en las variables hidroclimatológicas a través del cálculo de la evapotranspiración, y es uno de los más difíciles de establecer por la falta monitoreo en algunas zonas del país. Para

estas herramientas como el sensoramiento remoto facilitan el monitoreo sin acceso al territorio físico de estudio, gracias a su practicidad para el análisis de las variables de interés como el uso y ocupación del suelo, factores hidroclimatológicos, entre otros. (Liu, 2019)

Por tal razón, el estudio se centró en el análisis del comportamiento de la evapotranspiración, identificando los puntos en los que se muestre el efecto de la dinámica de la cobertura vegetal (área de zonas con densidad de hojas verdes) sobre las variables de estudio (temperatura, escorrentía y precipitación), centrado en la subcuenca del río guayabero, ubicada en el departamento del meta y parte del PNN La Macarena ya que es una zona de estudio de interés ecosistémico y con poca cobertura para el monitoreo y el análisis de variables; además, es una zona que se ve afectada por la deforestación, presencia de cultivos de tipo ilícito, con antecedentes de presencia de grupos armados al margen de la ley, entre otros, llevando a un deterioro ambiental considerable, el cual a pesar de los esfuerzos por su conservación, sigue siendo una situación alarmante para el territorio colombiano (Colombia, 2015)

Teniendo en cuenta lo anterior, el grupo investigador a continuación describe las etapas en las que se desarrolló el proceso:

### ***Fase 1: Delimitación del área de estudio:***

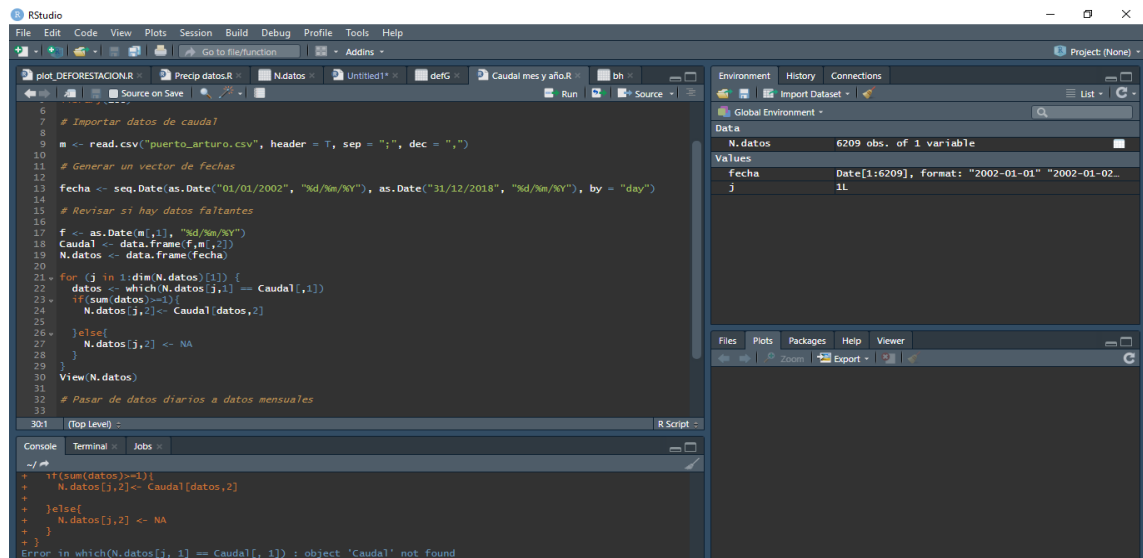
Para la delimitación se hizo uso del satélite ALOS PALSAR perteneciente a la United States Geological Survey (USGS), del cual se obtuvo el DEM (Modelo Digital de Elevación) a una resolución de 12,5 m. Luego con la herramienta ArcGIS, se realizó el llenado de datos con la opción FILL (rellenar), con el resultado obtenido se usó la opción de FLOW DIRECTION (dirección de flujo) para generar la dirección del flujo de agua, el cual se insertó en el FLOW ACCUMULATION (acumulación de flujo) que determinó la red hídrica con la que se

[illegible]

Fuente: Elaborado por el grupo investigador en la herramienta SIG ArcGis 10.5

## ***Fase 2: Obtención de variables hidroclimáticas (escorrentía, temperatura y precipitación):***

El periodo de estudio trabajado (2002 a 2017) se debió al límite de información disponible de la variable de temperatura en la base de datos del IDEAM ya que la información y dentro de las bases de datos y productos satelitales, los datos disponibles para el área de estudio solo cuentan con información hasta el año 2017. Se investigó en plataformas como la NASA, la USGS, Climatic Research Unit (CRU) y GIOVANNI (Zamora et. al, 2019). Una vez delimitada la subcuenca, se procedió a la búsqueda de las variables de estudio en el banco de datos del IDEAM (DHIME), los cuales corresponden a precipitación, temperatura media y escorrentía a escala mensual; los datos de escorrentía se generaron a partir de los datos de caudal medio diario de la estación RAUDAL DOS [32047010] ubicada en el cierre de subcuenca, los cuales se pasaron a unidades de escorrentía (mm/día), para luego con el paquete Hydro TSM en R convertir los datos a escala mensual y anual (Zamora, 2019).(Ver anexo 1) (Ver figura 3)



The screenshot shows the RStudio interface. The main editor displays R code for data transformation. The Environment pane on the right shows the data structure.

```
# Importar datos de caudal
8 m <- read.csv("puerto_arturo.csv", header = T, sep = ";", dec = ",")
9
10 # Generar un vector de fechas
11 fecha <- seq.Date(as.Date("01/01/2002", "%d/%m/%Y"), as.Date("31/12/2018", "%d/%m/%Y"), by = "day")
12
13 # Revisar si hay datos faltantes
14 f <- as.Date(m[,1], "%d/%m/%Y")
15 Caudal <- data.frame(f,m[,2])
16 N.datos <- data.frame(fecha)
17
21 for (j in 1:dim(N.datos)[1]) {
22   datos <- which(N.datos[j,1] == Caudal[,1])
23   if (sum(datos) == 1) {
24     N.datos[j,2] <- Caudal[datos,2]
25   } else {
26     N.datos[j,2] <- NA
27   }
28 }
29 View(N.datos)
30
31 # Pasar de datos diarios a datos mensuales
32
33
```

The Environment pane shows the following data structure:

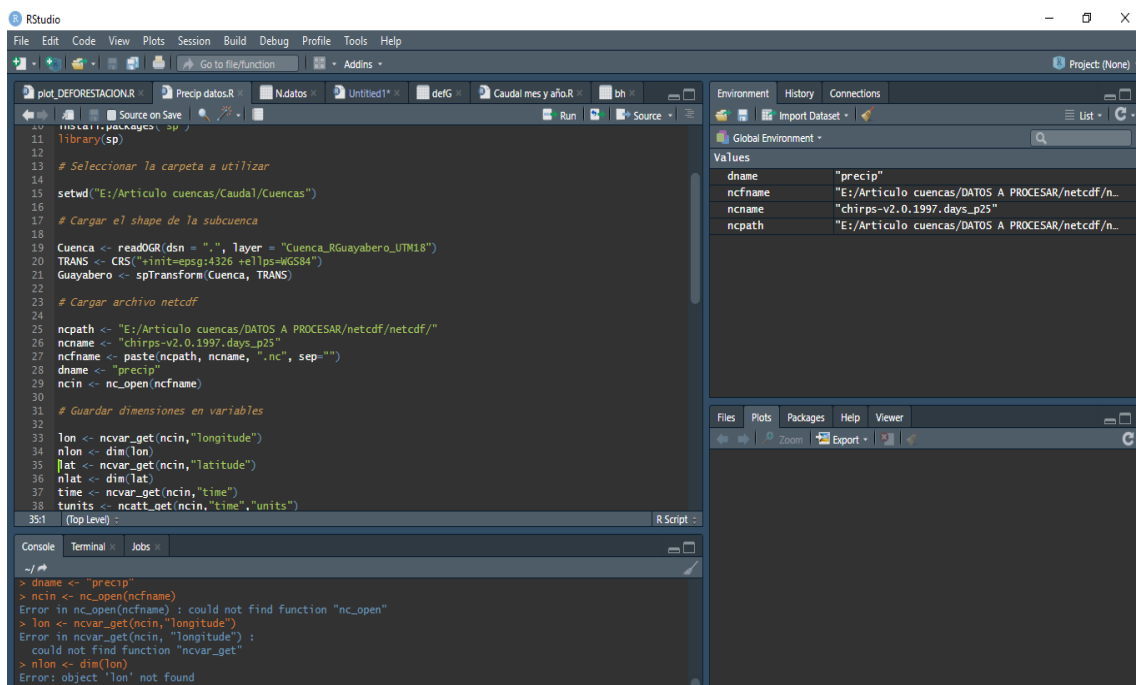
| Global Environment |                                                 |
|--------------------|-------------------------------------------------|
| N.datos            | 6209 obs. of 1 variable                         |
| fecha              | Date[1:6209], format: "2002-01-01" "2002-01-02" |
| j                  | 1L                                              |

The Console shows the execution of the code, with an error message at the bottom: "Error in which(N.datos[j, 1] == Caudal[, 1]) : object 'Caudal' not found".

***Figuras 3. Código en el lenguaje de programación R de transformación de escala.***

Para las variables de precipitación y temperatura no se encontraron datos, por lo cual se realizó lo siguiente:

Para la precipitación se obtuvieron los datos del Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS), un banco de datos de precipitación de más de 35 años, que incorpora climatología interna a partir de imágenes satelitales y datos de estaciones in situ, de allí se descargaron datos diarios del año 2002 al 2017 y para la temperatura y evapotranspiración potencial se usaron datos del Climatic Research Unit (CRU), un banco de datos usado en variedad de investigaciones climáticas, ambas variables se descargaron en formato netcdf (ver anexo 2, 3 y 4). Estos datos se trabajaron con la plataforma R para el tratamiento de datos, en donde se realizó el recorte de datos a la subcuenca delimitada (se construye un ráster) y con el producto obtenido se generaron los datos puntuales a escala diaria. Luego con el paquete Hydro TSM en R se pasaron los datos a escala mensual y anual (Zamora, 2019) (ver figura 4)



```
11 library(sp)
12
13 # Seleccionar la carpeta a utilizar
14 setwd("E:/Articulo cuencas/Caudal/Cuencas")
15
16 # Cargar el shape de la subcuenca
17
18 Cuenca <- readOGR(dsn = ".", layer = "Cuenca_RGuayabero_UTM18")
19 TRANS <- CRS("+init=epsg:4326 +ellps=WGS84")
20 Guayabero <- spTransform(Cuenca, TRANS)
21
22 # Cargar archivo netcdf
23
24 ncpath <- "E:/Articulo cuencas/DATOS A PROCESAR/netcdf/netcdf/"
25 ncname <- "chirps-v2.0.1997.days_p25"
26 ncfilename <- paste(ncpath, ncname, ".nc", sep="")
27 dname <- "precip"
28 ncin <- nc_open(ncfilename)
29
30 # Guardar dimensiones en variables
31
32 lon <- ncvar_get(ncin, "longitude")
33 nlon <- dim(lon)
34 lat <- ncvar_get(ncin, "latitude")
35 nlat <- dim(lat)
36 time <- ncvar_get(ncin, "time")
37 tunits <- ncatt_get(ncin, "time", "units")
38
39 > nlon <- dim(lon)
40 Error: object 'lon' not found
```

Environment

| Global Environment |                                                    |
|--------------------|----------------------------------------------------|
| dname              | "precip"                                           |
| ncfilename         | "E:/Articulo cuencas/DATOS A PROCESAR/netcdf/n..." |
| ncname             | "chirps-v2.0.1997.days_p25"                        |
| ncpath             | "E:/Articulo cuencas/DATOS A PROCESAR/netcdf/n..." |

Files Plots Packages Help Viewer

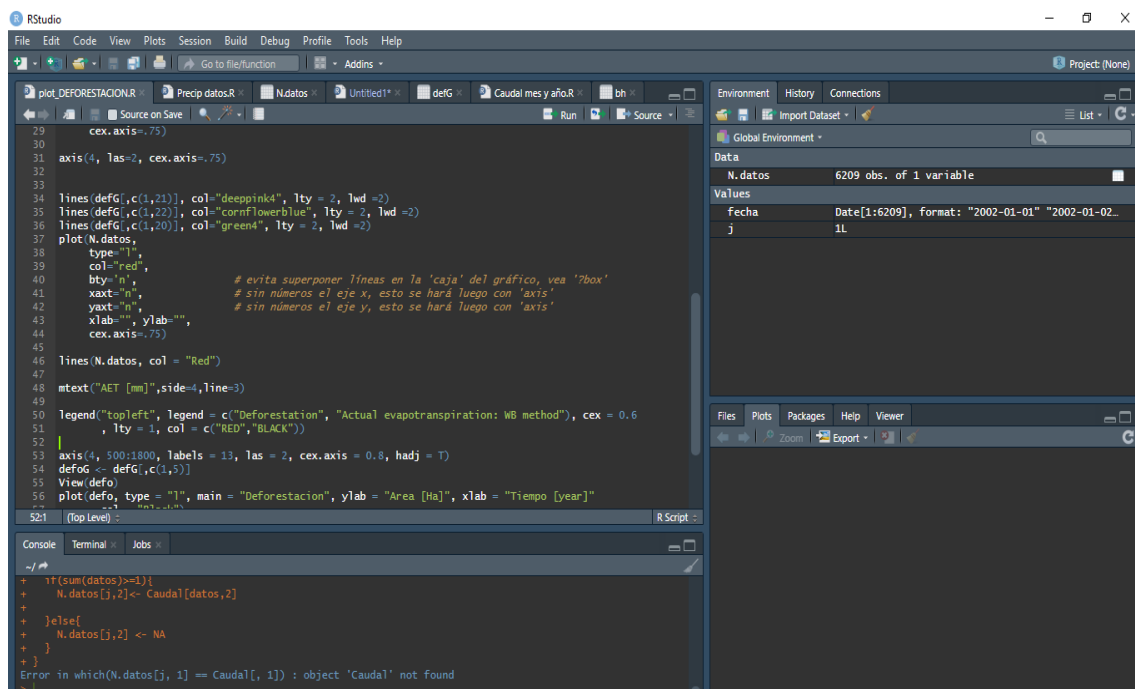
Zoom Export

Figuras 4. Código en lenguaje de programación R de extracción de datos de formatos netcdf.

### ***Fase 3: Obtención de datos de deforestación y tipos de suelo.***

La variable de deforestación se obtuvo a partir del proyecto satelital Global Forest Change, donde se cuantificó el cambio forestal a nivel global, a partir de datos satelitales para mapear la pérdida y ganancia de bosque de 2000 a 2018, a una resolución de 30 metros; dentro del trabajo se usaron los datos de pérdida anual de cobertura forestal, que se encuentra codificado como 0 los datos sin pérdidas y un valor de 1-18 que corresponden a la pérdida identificada de 2001-2018, respectivamente (Hansen, 2013). Además, se obtuvieron los tipos de suelo de la zona de estudio a partir de información secundaria proporcionada por el Instituto de investigación HUMBOLT (Geodatabase geopeología de la zona).

### ***Fase 4: Cálculo de evapotranspiración y construcción de series de tiempo***



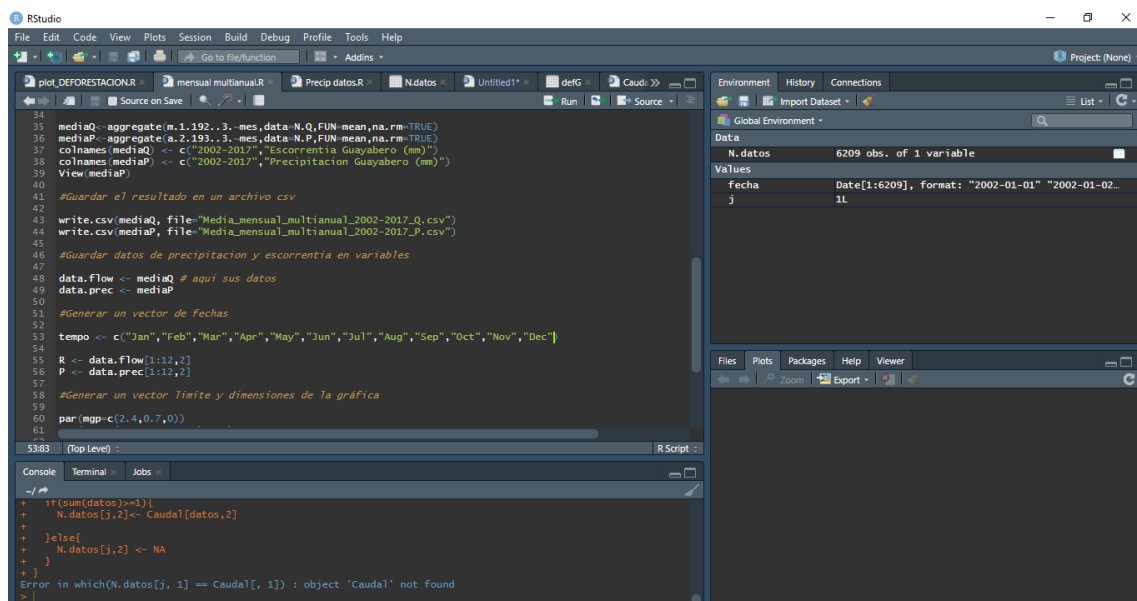
The screenshot shows the RStudio environment with a script editor, environment pane, and console. The script editor contains R code for plotting and data manipulation. The console shows an error message: "Error in which(N.datos[j, 1] == Caudal[, 1]) : object 'Caudal' not found".

```
29 cex.axis=-.75)
30
31 axis(4, las=2, cex.axis=-.75)
32
33
34 lines(defG[,c(1,21)], col="deeppink4", lty = 2, lwd =2)
35 lines(defG[,c(1,22)], col="cornflowerblue", lty = 2, lwd =2)
36 lines(defG[,c(1,20)], col="green4", lty = 2, lwd =2)
37 plot(N.datos,
38      type="l",
39      col="red",
40      bty="n",
41      xaxt="n",
42      yaxt="n",
43      xlab="", ylab="",
44      cex.axis=-.75)
45
46 lines(N.datos, col = "Red")
47
48 mtext("AET [mm]",side=4,line=3)
49
50 legend("topleft", legend = c("Deforestation", "Actual evapotranspiration: WB method"), cex = 0.6
51      , lty = 1, col = c("RED","BLACK"))
52
53 axis(4, 500:1800, labels = 13, las = 2, cex.axis = 0.8, hadj = T)
54 defOG <- defG[,c(1,5)]
55 View(defo)
56 plot(defo, type = "l", main = "Deforestacion", ylab = "Area [Ha]", xlab = "Tiempo [year]"
57      , yaxp = 100,1,1)
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
```

```
~/R
+ if(sum(datos)==1){
+   N.datos[j,2]<- Caudal[datos,2]
+ }
+ }else{
+   N.datos[j,2] <- NA
+ }
+ }
+ }
Error in which(N.datos[j, 1] == Caudal[, 1]) : object 'Caudal' not found
>
```

Figuras 5. Código en lenguaje de programación en R de construcción de series de tiempo

Para los valores de ETR se aplicó balance hídrico (P-R), donde se usaron las variables de escorrentía y precipitación que se obtuvieron en la fase 2, estos valores en unidades de mm/año, valores con los cuales se construyeron las series de tiempo a través del lenguaje de programación R, también se construyeron series de tiempo de precipitación, ETP, escorrentía y temperatura a escala mensual y anual (ver anexo 5, 6, 7, 8 y 9). Finalmente, se construyeron gráficas de coeficiente de variación y medias mensuales multianuales para las variables de precipitación y escorrentía (Zamora, 2019) (ver figura 5 y 6) (ver anexo 10 y 11).



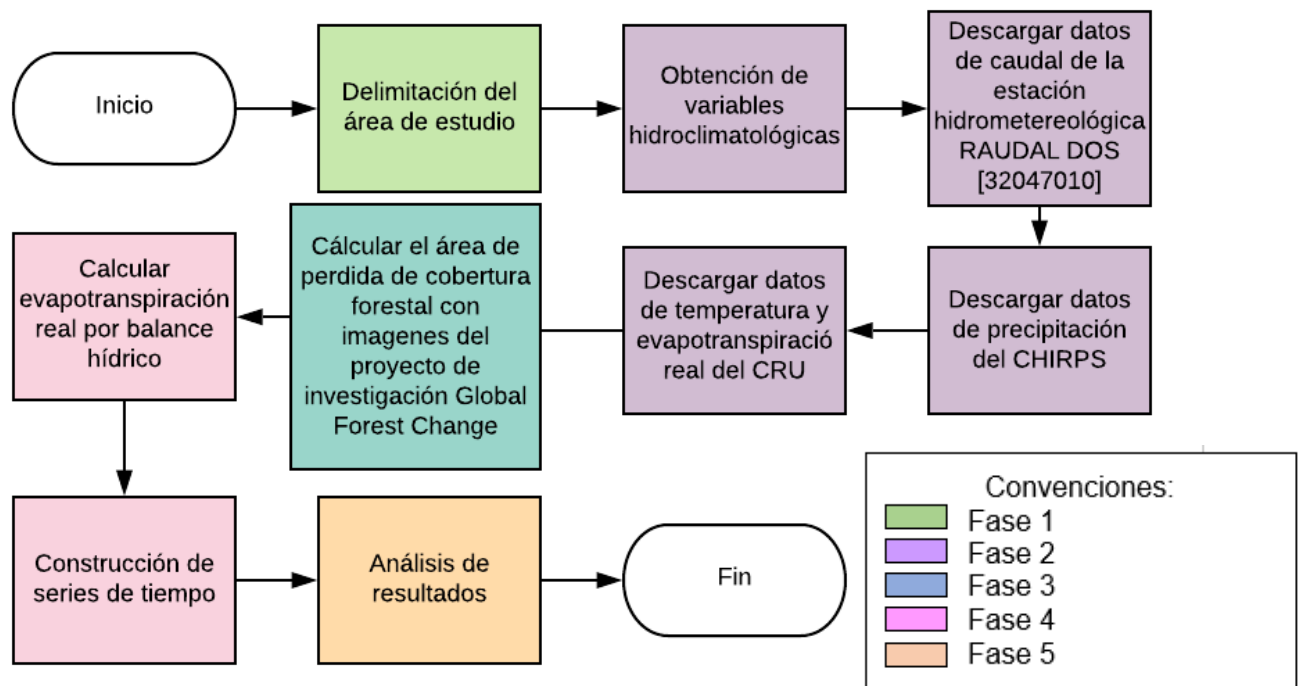
*Figuras 6. Código en lenguaje de programación en R de obtención de promedios mensuales multianuales.*

### ***Fase 5: Análisis de información***

Dentro del análisis se observó el comportamiento multitemporal de cada una de las variables trabajadas, comparando las series de tiempo de cobertura vegetal y ETR a escala anual, que puedan dar luz de la relación entre los aumentos y disminuciones de la variable de cobertura con respecto al comportamiento de la variable de ETR, además, se realiza una

revisión histórica de eventos sociales importantes que puedan dar explicaciones a las variaciones en los comportamientos de cobertura y ETR; también, se hizo un análisis entre ETP y ETR, identificando la dinámica de la evapotranspiración dentro del área de estudio. Para las variables de temperatura, esorrentía y precipitación se realizó el análisis de su comportamiento a escala mensual y anual, además del coeficiente de variación y la media mensual multianual, donde se reconocieron eventos relacionados a la dinámica de coberturas y eventos sociales que afectan su comportamiento especialmente a escala mensual. (Zamora, 2019)

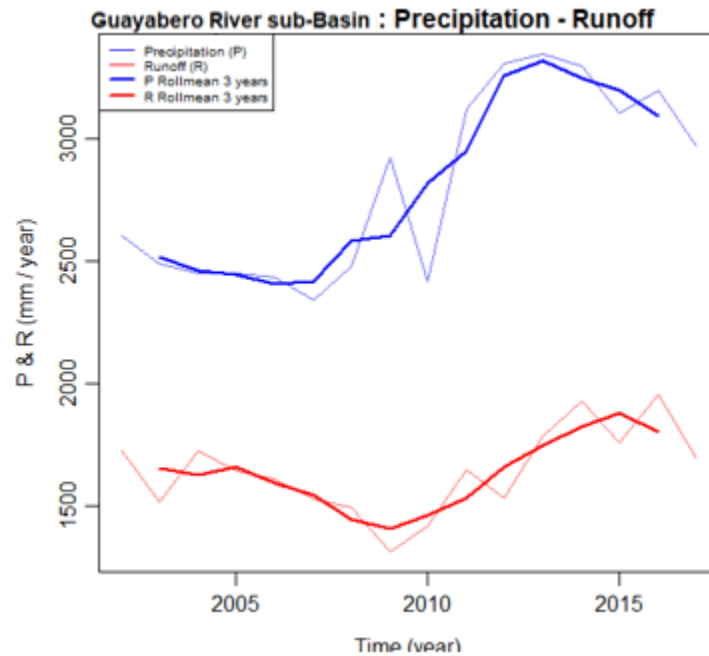
Los procesos planteados dentro de la metodología se resumen claramente en el siguiente flujograma:



*Figuras 7 Diagrama de procesos, diseño metodológico.*

*Fuente: Elaborado por los integrantes del trabajo.*

## 10. Resultados



Figuras 8. Imagen precipitación – escorrentía de subcuenca del río Guayabero

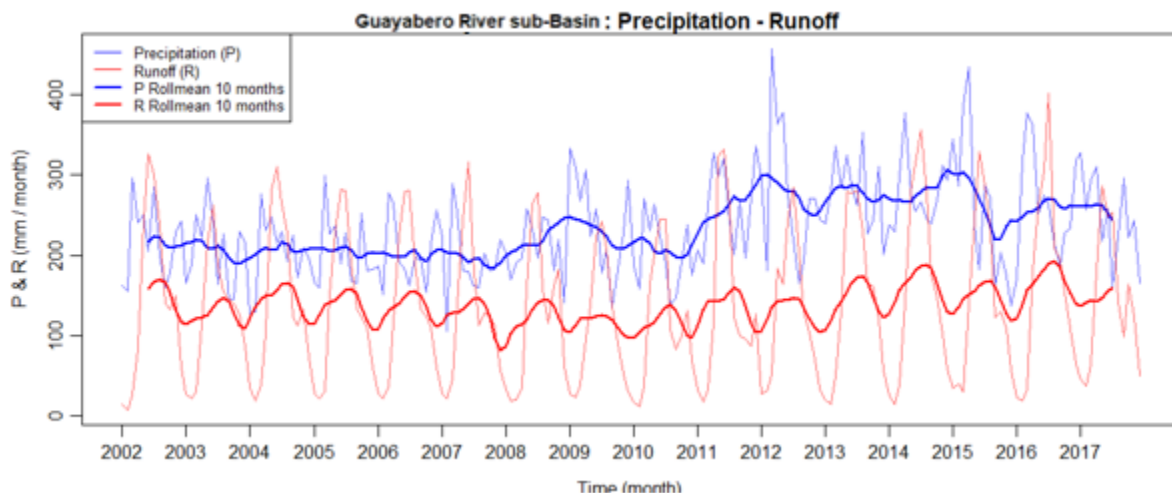
Fuente: Elaborado por el grupo investigador.

Del análisis hidroclimático a escala de subcuenca se observó un incremento de Precipitación (P) y Escorrentia (R). El comportamiento de escorrentía muestra una mayor variación, lo cual se le atribuye a la concentración de cultivos cerca de la ronda hídrica, siendo un factor influyente.

Es importante resaltar las actividades sociales que han repercutido fuertemente con las variables hidroclimatológicas, cambiando así la dinámica de uso del suelo a través de los años. Inicialmente se evidencia en los censos de cultivos de uso ilícito (SIMCI) la presencia de cultivos ilícitos en la ronda del río guayabero, especialmente en su parte baja y por otro lado el alto índice de deforestación, trayendo consigo la vulnerabilidad de la subcuenca por la pérdida

de la cobertura vegetal en sus alrededores, siendo acciones que contribuyeron con la erosión del suelo en ciertos tramos, además de contribuir con el cambio climático. Así las cosas, la escorrentía ha sido alterada de cierto modo por factores biológicos, como lo son la modificación en la superficie de la vegetación y las acciones humanas desarrolladas en el sector, en este caso la expansión de la frontera agrícola.

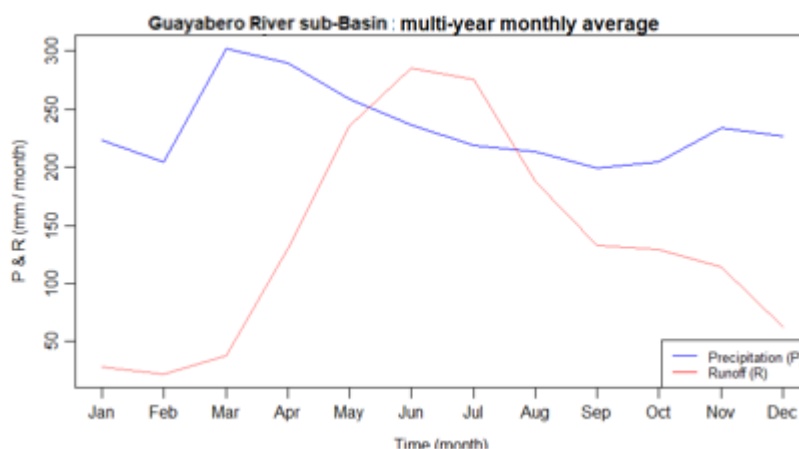
Por otro lado, también se logró reconocer mediante un análisis detallado, la relación directa entre la precipitación y la escorrentía, mostrando la influencia natural de P en R, como se especifica a continuación:



Figuras 9. Imagen relación precipitación – escorrentía de la subcuenca del río Guayabero

En escala mensual se aprecian valores de escorrentía mayores a los valores de precipitación, concretamente en los meses de mayo a agosto de cada vigencia como se socializa en la gráfica mensual multianual, indicando aporte de agua por parte de otras variables en la subcuenca del río Guayabero, como lo es la dinámica subsuperficial derivada del riego de cultivos, procesos de infiltración y la presencia de acuíferos en la zona. También es necesario tener en cuenta que la precipitación no es el único o más relevante aporte o parámetro que

influye en la esorrentía de una cuenca, sino que intervienen otras variables como la intercepción, que corresponde al factor climático el cual depende del tipo de vegetación presente en el terreno, entre otras características, por otro lado se encuentra la evaporación y transpiración, factores que se encuentran directamente influenciados por la temperatura, el viento, la radiación solar, la presión atmosférica, la humedad, la naturaleza y la forma del terreno donde ocurre el fenómeno y por ultimo las características físicas de la subcuenca.



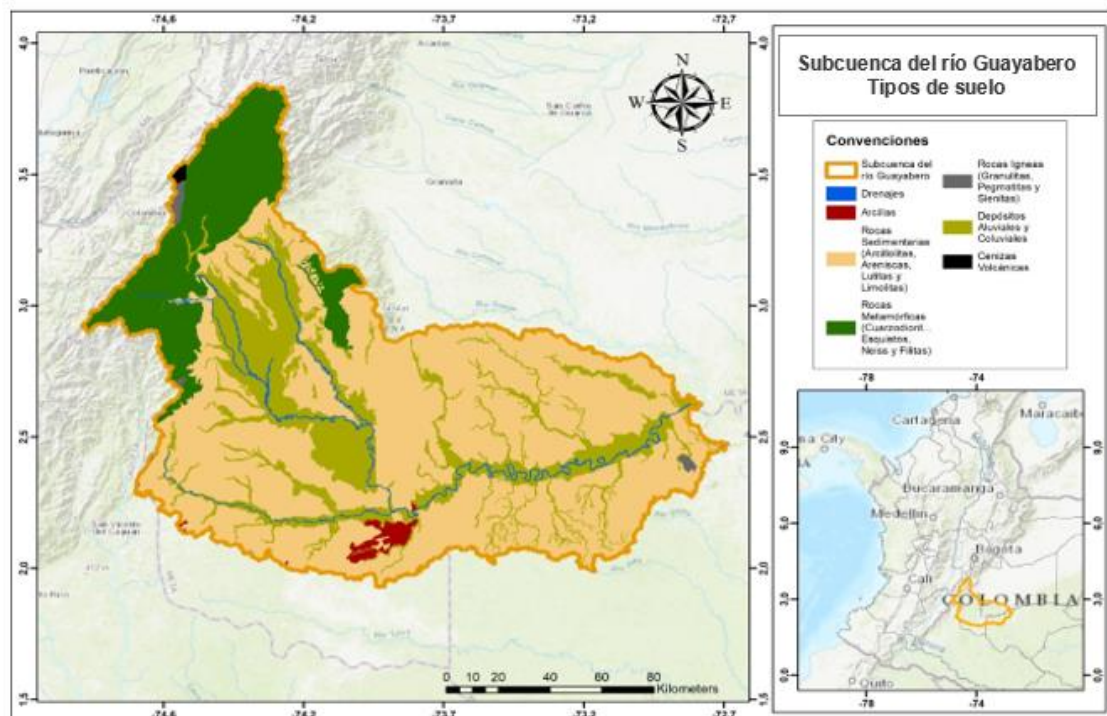
Figuras 10. Promedio mensual precipitación – esorrentía de la subcuenca del río Guayabero

Por otro lado, gracias al tipo de suelo se puede inferir que la actividad subsuperficial es una de las mayores fuentes que aportan a la esorrentía de la dinámica hídrica; dentro de los tipos de suelos presentes se encuentran en su mayoría las arcillas y arcillolitas tipos de suelo caracterizados por su buen almacenamiento de minerales pero con un bajo nivel de infiltración, muchas veces llamado suelo impermeable, por lo que al tener contacto con el agua, no permite la entrada del líquido en su superficie.

Adicionalmente, dentro de la subcuenca se encuentra la presencia de rocas sedimentarias de tipo areniscas, arcillolitas, limolitas y lutita, zonas características de buena humedad, con un

régimen húmedo de tipo acuico y údico que se mantienen saturados y con bajo oxígeno hasta por 90 días al año. Estos regímenes se encuentran generalmente en zonas con una buena distribución de precipitación en climas húmedos, evidenciándolo con el aumento de precipitación en la subcuenca a lo largo del periodo (Qiu, 2020)

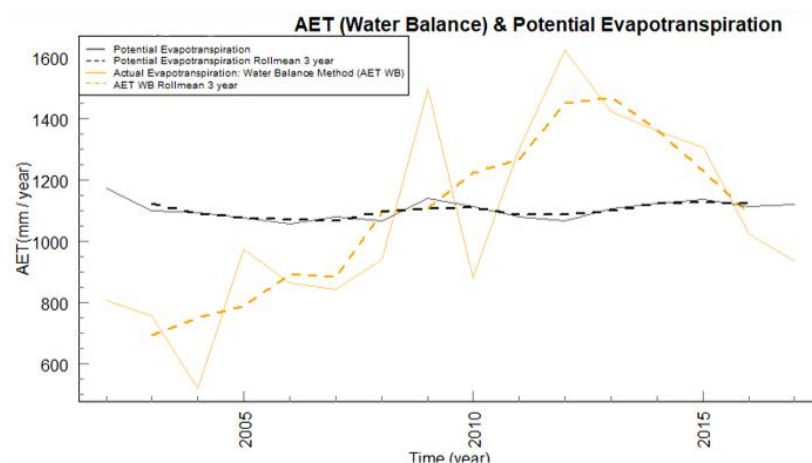
Por otro lado, estos tipos de suelos se convierten en un aumento a la escorrentía gracias a la lenta percolación por su baja porosidad, lo cual se apoya por la baja profundidad del suelo (AMBIENTE, 2018). No obstante, el área de estudio presenta zonas con rocas sedimentarias de tipo arenisca mostrando que existen procesos de infiltración, los cuales son un aporte al acuífero por procesos de recarga que se supone ocurre en los meses de febrero, marzo y abril, y una posterior descarga en los 3 meses siguientes donde se presenta una mayor escorrentía que precipitación (Zamora, 2019)



*Figuras 11. Mapa geopedológico de la subcuenca del río Guayabero tipos de suelo*

*Fuente: Geodatabase Instituto de investigación HUMBOLDT*

Estas particularidades en las variables de escorrentía y precipitación han determinado el comportamiento de la evapotranspiración real de la subcuenca, mostrando un aumento constante hasta el año 2013, concluyendo que a partir de la fecha el fenómeno es más pronunciado, sobrepasando incluso la evapotranspiración potencial de la zona; este comportamiento resulta de las áreas de suelo desnudo convirtiéndose en uno de los medios de mayor transpiración a parte de la transpiración de las plantas, esto se debe a que estas zonas muestran una mayor dinámica y transpiración en respuesta a infiltración en baja profundidad y una radiación directa (onda corta), todo esto producto de la deforestación generada a lo largo del periodo de estudio (ver figura 12).



*Figuras 12. Evapotranspiración Real y Potencial de la subcuenca*

*Fuente: Elaborado por el grupo investigador, en la herramienta R*

Dentro de la subcuenca del río guayabero se presenta una sobre explotación del suelo por la presencia de cultivos de tipo lícito tales como el caucho, arroz, maíz, plátano, yuca, cacao, entre otros, y cultivos de tipo ilícito de coca, siendo uno de los factores principales de la deforestación en la zona, especialmente en la ronda de amortiguación del PNN Sierra La Macarena. (COOAGROGUAVIARE, 2011)

Para la subcuenca se evidencia una disminución en la deforestación para el periodo 2008-2015, quizás relacionada con la reducción en la intensidad del conflicto entre municipios quienes buscan reafirmar los acuerdos de paz y que haya una tranquilidad tanto para sus familias como para la sociedad en general y por otro lado el deceso en la presencia incendios forestales, actividad la cual presento un alto índice en varios departamentos por esta temporada, incluido el Meta, que aunque no fue relevante a comparación de otros, presento acontecimientos.

Dichos comportamientos y cambios en la cobertura vegetal han provocado una variabilidad en la escorrentía, precipitación y temperatura, donde se destacan dos momentos importantes el inicio de los proyectos de aspersión de cultivos ilícitos (proyectos de reforestación) y el proceso de paz llevado a cabo desde el 2012, dos eventos que han influenciado gran parte de la disminución y aumento de la deforestación (CENSOS).

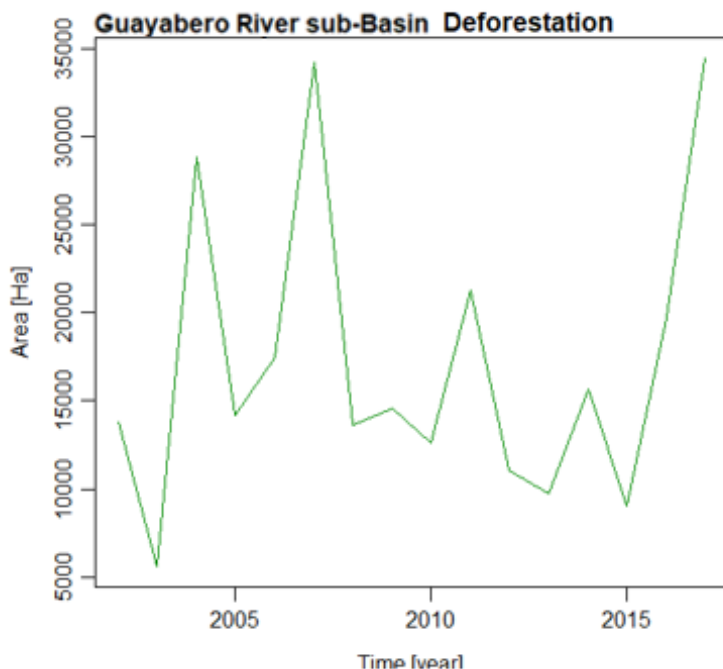
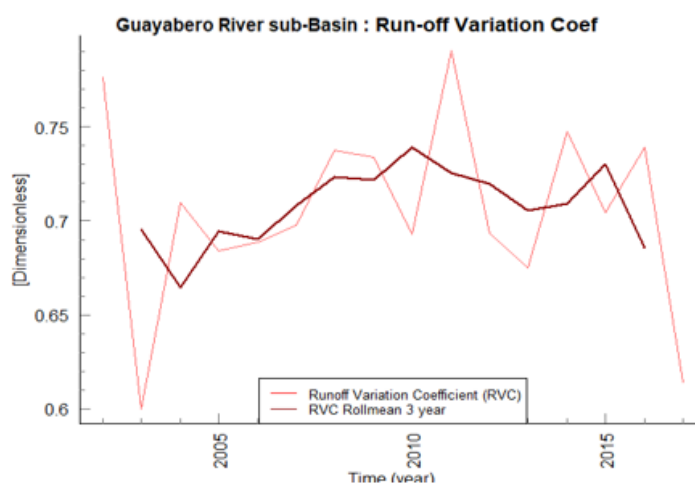


Figura 13. Área deforestada en la subcuenca del río Guayabero

Fuente: Elaborado por el grupo investigador, en la herramienta R

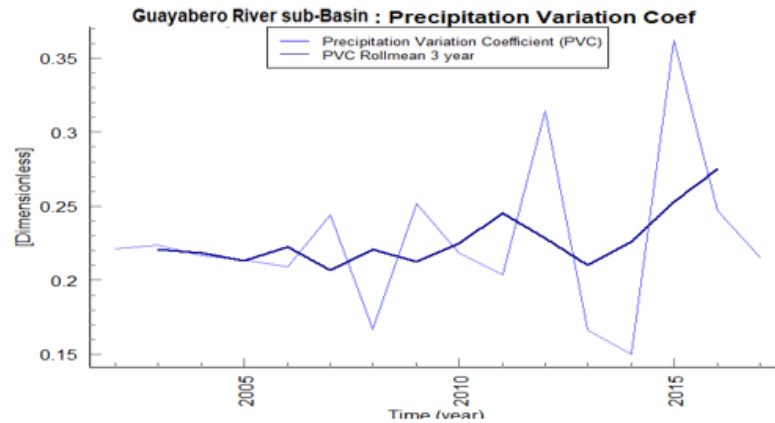
La variable de deforestación muestra una relación inversa con la ETR, revelando la influencia de la cobertura vegetal sobre la variable, gracias a su aporte de transpiración en la evapotranspiración, además de otras características importantes como el tipo de vegetación, la cantidad de área, apertura de estoma, cambios de cobertura (uso del suelo), entre otros (Zamora, 2019); sin embargo, se observan incrementos de escorrentía en periodos de alta producción de ETR, fenómeno contrario al esperado, el cual se atribuye a las áreas de suelo desnudo, expansión de frontera agrícola en zonas de conservación, cambios de cobertura y bajo interés en reforestación, como se ha explicado anteriormente.

Para el periodo 2009-2016 se desarrollaron las negociaciones con las FARC, en las cuales los territorios ocupados por este serían nuevamente entregados a la nación, dentro de los cuales el departamento del Meta poseía nueve de los frentes guerrilleros del país; este hecho ayudó a una disminución en la deforestación dentro de la subcuenca, así como en una mejor regulación gracias a la reducción del estrés hídrico dentro del área.



Figuras 14. Coeficiente de variación variable escorrentía

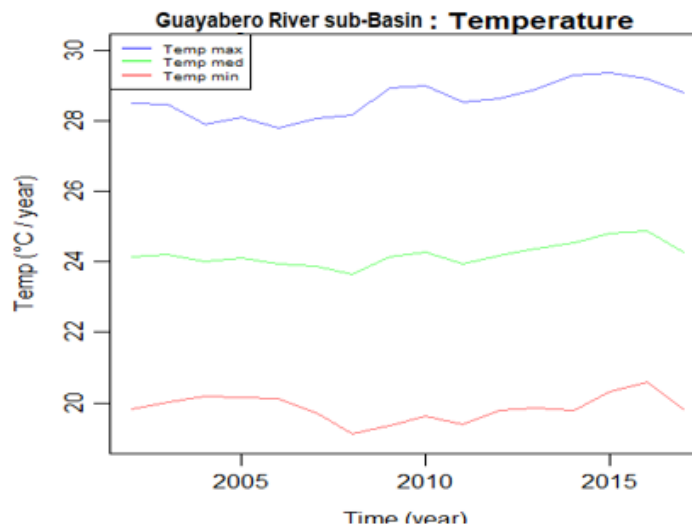
Fuente: Elaborado por el grupo investigador, en la herramienta R



Figuras 15. Coeficiente de variación variable precipitación

Fuente: Elaborado por el grupo investigador, en la herramienta R

A partir de lo anterior, se determinó el coeficiente de variación para las variables de escorrentía y precipitación, mostrando una importante fluctuación y valores altos de variación para la variable de escorrentía, confirmando la influencia de los cultivos (cambio de coberturas) sobre las variables hidroclimáticas, además del aumento de variación en la precipitación para los últimos años del periodo de estudio.



Figuras 16. Variable temperatura a escala anual de la subcuenca del río Guayabero.

Fuente: Elaborado por el grupo investigador, en la herramienta R

Así las cosas y para dar respuesta a la pregunta problema establecida *¿Cuál es la relación entre la cobertura vegetal y las variaciones en las variables hidroclimatológicas (evapotranspiración) del río Guayabero (Meta)?*, como grupo investigador se lograron identificar los siguientes aspectos:

En suelos cubiertos, separar evaporación y transpiración es muy difícil, de modo que ambos flujos se engloban en uno solo que Thornthwaite denominó evapotranspiración, definiéndose este término como la cantidad de agua necesaria para la transpiración de una cubierta vegetal en una zona con agua superficie. En los suelos cubiertos de vegetación, una fracción de la precipitación incidente queda retenida en la cubierta vegetal y no alcanza el suelo. La mayor o menor cantidad de esta fracción depende de parámetros estructurales de la propia vegetación, de parámetros atmosféricos (temperatura - viento) y de las características de los episodios (intensidad, volumen, temporalidad).

La subcuenca del río Guayabero ubicada en el Departamento del Meta, ha sido una fuente hídrica afectada por la deforestación y la expansión de la frontera agrícola tanto de cultivos lícitos como ilícitos, siendo estas determinantes para dar respuesta a la pregunta problema.

Inicialmente se logró identificar que durante el periodo de estudio ante la presencia de procesos como la precipitación y la escorrentía, hubo más picos de variabilidad constantes en la escorrentía, adicionalmente se determinó que en periodos de alta evapotranspiración hubo incrementos de escorrentía, fenómeno un atípico para el grupo investigador, atribuyéndose en respuesta al desnudo vegetal de diferentes áreas y el tipo de suelo con el que se cuenta en la mayor parte del área de la subcuenca.

La variable de la deforestación muestra una relación inversa con la evapotranspiración real, revelando la influencia de la cobertura vegetal sobre el comportamiento.

Adicionalmente es importante reconocer que dentro de los factores que influyen en la evapotranspiración se encuentran las variables climatológicas de la zona y para el caso del Departamento del Meta, este es un territorio donde su temperatura promedio en la actualidad está entre los 25 °C y 29 °C en temporadas normales, porque en las estaciones más fuertes de verano llega a los 32°C. Para la temporada 2002-2017 la temperatura media era inferior promediando entre los 23 °C y 27°C. Claramente al transcurrir de los años el Departamento del Meta y el país, hablando a nivel general, se han visto afectados por el cambio climático, especialmente por la emisión de gases efecto de invernadero.

Para concluir, el presente estudio es una herramienta importante que aporta a la comprensión de las dinámicas hídricas dentro de las unidades hidrográficas convirtiéndose en una fuente de información útil a la hora del ordenamiento de cuencas hidrográficas, teniendo en cuenta que las plantas son uno de los principales conductos para el retorno de agua terrestre a la atmósfera, a través de la evapotranspiración y mediante la interceptación del dosel, que es la proporción de agua lluvia retenida por las hojas y ramas y, que finalmente, se evapora desde sus superficies; en el caso específico del río Guayabero (Meta) para el periodo 2002 - 2017, la relación entre la cobertura vegetal (cobertura forestal específicamente) tiene una influencia significativa en las variaciones de evapotranspiración de la subcuenca, sin embargo, se debe evaluar el flujo de energía en forma de radiación como un factor incidente en la evapotranspiración, que limita o impulsa su producción, causando la aparición de escenarios con escasez o sobreoferta hídrica, índices importantes que se evalúan dentro del ordenamiento de cuencas. Sin embargo, aun con el estudio de las dinámicas de las variables estudiadas en este

proyecto, es importante resaltar que existen otros factores que deben estudiarse para un mejor entendimiento del amplio panorama de las dinámicas hídricas, específicamente en la evapotranspiración, factores como el aumento de áreas desnudas, tipos de suelo, geología del terreno, temperatura, tipos de coberturas vegetales, caracterización de los suelos, entre otros., que afectan la producción de evapotranspiración, influyendo en las variables hidroclimáticas.

## 11. Cronograma:

|                                                                                       |                                                                                                                  | 2020  |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------|----|----|----|-------|----|----|----|-------|----|----|----|------|----|----|----|-------|----|----|--|-------|--------|----|----|----|------------|----|----|----|---------|--|
| Fases                                                                                 | Descripción de la actividad                                                                                      | Enero | Febrero |    |    |    | Marzo |    |    |    | Abril |    |    |    | Mayo |    |    |    | Junio |    |    |  | Julio | Agosto |    |    |    | Septiembre |    |    |    | Octubre |  |
|                                                                                       |                                                                                                                  | S1    | S2      | S3 | S4 | S1 | S2    | S3 | S4 | S1 | S2    | S3 | S4 | S1 | S2   | S3 | S4 | S1 | S2    | S3 | S4 |  | S1    | S2     | S3 | S4 | S1 | S2         | S3 | S4 | S1 | S2      |  |
| Selección de área de estudio                                                          | Revisión inicial                                                                                                 |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
|                                                                                       | Cruce de capas y revisión de información característica                                                          |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
| Delimitación de la cuenca                                                             | Delimitación de la cuenca a partir del DEM obtenido del producto de mapeo ALOS PALSAR.                           |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
| Obtención de variables hidroclimatológicas (escorrentía, temperatura y precipitación) | Obtención de datos de precipitación del producto CHIRPS                                                          |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
|                                                                                       | Obtención de datos de temperatura del satélite AIRX3STM                                                          |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
|                                                                                       | Obtención de datos de escorrentía del IDEAM                                                                      |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
| Cálculo de evapotranspiración y construcción de series de tiempo                      | Procesamiento de imágenes satelitales MODIS13Q1                                                                  |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
|                                                                                       | Cálculo por el programa R con datos de precipitación, temperatura, escorrentía e imágenes satelitales MODIS13Q1. |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
| Obtención de área de cobertura vegetal (hojas verdes)                                 | Con la imagen satelital del MODIS13Q1 se calcula el área de cobertura vegetal                                    |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
| Análisis de la información                                                            | Construcción de series de tiempo con la variables hidroclimatológicas y ETR                                      |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
|                                                                                       | Análisis de series de tiempo                                                                                     |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |
| Redacción del artículo                                                                |                                                                                                                  |       |         |    |    |    |       |    |    |    |       |    |    |    |      |    |    |    |       |    |    |  |       |        |    |    |    |            |    |    |    |         |  |

## **12. Conclusiones:**

Las transformaciones en las coberturas al interior de la cuenca muestran una pérdida de coberturas boscosas condicionada por cambios de uso del suelo para el establecimiento de territorios agrícolas principalmente para pastos limpios. Los motores de deforestación identificados a nivel regional son principalmente la implementación de los acuerdos de paz, usurpación de baldíos, intereses especulativos sobre la tierra e incendios forestales para el establecimiento de pastos, cultivos ilícitos y ganadería extensiva (IDEAM, 2017)

La presencia de las FARC condicionó los derechos de las comunidades sobre el territorio, específicamente la ronda del río Guayabero, afectando de sobremanera la zona con presencia de cultivos ilícitos y limitando la producción agrícola de los campesinos.

A partir de los cambios de coberturas en los últimos 16 años se identificó que la cuenca del río Guayabero presenta transformaciones medianamente significativas en sus coberturas donde son frecuentes las dinámicas de deforestación para el establecimiento de áreas agrícolas. La remoción de las coberturas vegetales para el establecimiento de otros tipos de uso del suelo afecta procesos del balance hídrico tales como la interceptación, escurrimiento fustal e infiltración, aumentando la vulnerabilidad de los suelos ante la erosión y generando una alta fluctuación en el nivel de los caudales tanto en periodos secos como de lluvia

El estudio permitió identificar que los incendios forestales han transformado de manera significativa varios puntos al interior de la cuenca, donde las prácticas de tala y quema son cada vez más frecuentes para el establecimiento de áreas agrícolas; el gran aumento de las zonas

quemadas, zonas desnudas y degradadas como etapa de transición en los cambios de uso del suelo revelan los cambios acelerados que se dan al interior de la cuenca en cortos periodos de tiempo, donde son claras las dinámicas de expansión de la frontera agropecuaria (especialmente para actividades ganaderas) con la intervención y pérdida de los bosques. De igual manera, la reducción de coberturas como los mosaicos puede ser explicada por las dinámicas de expansión agropecuaria, ya que el aumento en unidad de área a lo largo de los años permite su reclasificación como una unidad propia (ya sea de pastos o de cultivos). (Mora, 2019).

La obtención de datos hidrometeorológicos a través de herramientas de sensores remotos resulta ser un instrumento útil que proporciona información para la planificación y gestión de cuencas hidrográficas, sin embargo, puede ser apoyado el proceso en coordinación con demás herramientas de monitoreo que permitan dar cumplimiento al objetivo señalado.

Por otro lado, el comportamiento de las variables hidroclimáticas a escala más detallada muestra una mayor generación de escorrentía que supera la precipitación, evidenciando que existen otros aportes de escorrentía en la cuenca y dicho exceso se asocia a la presencia de flujo subterráneo como aporte a la escorrentía. Asimismo, se identificó que el aumento de la deforestación dentro de la cuenca provocó cambios en el comportamiento de las variables hidroclimatológicas evidenciado en el aumento de evapotranspiración, gracias a las áreas desnudas, teniendo en cuenta que las características del suelo identificadas a partir de información secundaria como la porosidad, humedad, profundidad y tipo de suelo, permite inferir que la variable (ETR) aumentó gracias al aporte de la transpiración del suelo.

Finalmente, se debe incorporar información de otras variables como dinámica de cultivos, radiación, tipos de coberturas, estudios geológicos, biomasa, entre otros, que ayude a un mejor entendimiento del aumento de fluctuación en las variables hidroclimatológicas, ya que es un campo del cual aún no se cuenta con información robusta y tiene diversos campos por explorar.

## REFERENCIAS:

(3 de Febrero de 2020). *Ciclo hidrológico y cambio climático*.

A. Rettberg, J. F.-R. (2016). *Golden Opportunity, or a New Twist on the Resource–Conflict Relationship: Links Between the Drug Trade and Illegal Gold Mining in Colombia*. . World Development.

Agricultura, O. d. (2016). *EL ESTADO MUNDIAL DE LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN*.

AMBIENTE, M. D. (2018). *El cambio climático afecta los recursos hídricos*. Ecuador.

CASTRO, M. A. (2007). *SENSORAMIENTO REMOTO SATELITAL* . Cartagena de Indias: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR.

Cheng, C. Y. (2017). *Assessing climate change-induced flooding mitigation for adaptation in Boston's Charles River watershed*. USA: Landscape and Urban Planning.

Colombia, P. N. (2015). *Áreas Protegidas: Territorios para la vida y la paz. Tomo 1*.

(1991). *Constitución Política de la República de Colombia*. Bogotá D.C. Colombia .

COOAGROGUAVIARE, I. Y. (2011). *Plan de Desarrollo sostenible de la Zona de Reserva Campesina del Guaviare*.

Domingo, F. V. (2002). *¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución*. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente.

Fernanda J. Gaspari, A. M. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas* . Argentina : Universidad Nacional de la Plata.

IDEAM. (2007). *INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO*.

Irma Rosas Perez, G. C. (s.f.). *La perfección sobre la conservación de la cobertura vegetal*.

Julia Carabias Lillo, E. P. (1997). *ECONOMIA AMBIENTAL*. Mexico D.F.

Lanly, J. P. (2003). *LOS FACTORES DE LA DEFORESTACIÓN Y DE LA DEGRADACIÓN DE LOS BOSQUES*. Canada: XII congreso forestal mundial.

Liu, C. C. (2019). *Research advances of SAR remote sensing for agriculture applications: A review*. Journal of Integrative Agriculture.

META, G. D. (2020). *Cormacarena*. Meta.

Mora, A. M. (2019). *Dinámica de las coberturas de la tierra y comportamiento de caudales en la cuenca del Río Guayabero, departamento del Meta*. Bogotá D.C. .

- ORDUZ, D. A. (2018). *CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA Y ANÁLISIS DE AMENAZAS PARA LA CUENCA DEL RÍO MONQUIRÁ COMO INSUMO EN LA FASE DE DIAGNÓSTICO DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA)*. Bogotá D.C.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2018). *PARQUE NACIONAL NATURAL SIERRA DE LA MACARENA - PLAN DE MANEJO 2018 – 2023*.
- Qiu, J. S. (2020). *Impacts of climate change on watershed system and potential adaption through BMPs in a drinking water source area*. Journal of Hydrology.
- Ramón, J. S. (2001). *Evapotranspiración*. Departamento de Geología.
- Sierra, A. (2017). *Monitoring ecological change during rapid socio-economic and political transitions: Colombian ecosystems in the post-conflict era*. Environmental Science and Policy.
- TERRESTRE, A. E. (2017). *Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical*. Revista científica de ecología y medio ambiente.
- Udding, J. (2018). *Dominant effect of increasing forest biomass on evapotranspiration: interpretations of movement in Budyko space*. . Hydrology and Earth System Sciences.
- Victorino, A. (2011). *BOSQUES PARA LAS PERSONAS MEMORIAS DEL AÑO INTERNACIONAL DE LOS BOSQUES*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Zamora, D. G. (2019). *“Alteraciones hidroclimatológicas asociadas a los cultivos de uso ilícito y deforestación en la cuenca del río Guaviare”*. [material de artículo de investigación]. Bogotá D.C., Colombia.: Universidad Santo Tomás.
- Zúñiga, P. (2019). *Exploring social-ecological systems in the transition from war to peace: A scenario-based approach to forecasting the post-conflict landscape in a Colombian region*. Science of the Total Environment.

## 13. Anexos

### ANEXO 1: Conversión de escorrentía de escala anual a mensual

```
# Instalar paquetes

install.packages("hydroTSM","zoo")
library(hydroTSM)
library(zoo)

# Importar datos de caudal

m <- read.csv("puerto_arturo.csv", header = T, sep = ";", dec = ",")

# Generar un vector de fechas

fecha <- seq.Date(as.Date("01/01/2002", "%d/%m/%Y"), as.Date("31/12/2018", "%d/%m/%Y"), by = "day")

# Revisar si hay datos faltantes

f <- as.Date(m[,1], "%d/%m/%Y")
Caudal <- data.frame(f,m[,2])
N.datos <- data.frame(fecha)

for (j in 1:dim(N.datos)[1]) {
  datos <- which(N.datos[j,1] == Caudal[,1])
  if(sum(datos)>=1){
    N.datos[j,2]<- Caudal[datos,2]

  }else{
    N.datos[j,2] <- NA
  }
}
View(N.datos)

# Pasar de datos diarios a datos mensuales

tab02 <- zoo(N.datos[,2],fecha)
Q.mes<-daily2monthly(tab02,FUN=mean,na.rm=T)
View(Q.mes)

# Guardar en archivo .csv

write.csv(Q.mes, file="Caudal_mes_puertoarturo.csv")
```

### ANEXO 2: Extracción de datos de precipitación

```
# Descargar los paquetes a usar

install.packages("raster")
library(raster)
install.packages("ncdf4")
library(ncdf4)
install.packages("rgdal")
library(rgdal)
install.packages("sp")
library(sp)

# Seleccionar la carpeta a utilizar

setwd("E:/Articulo cuencas/Caudal/Cuencas")

# Cargar el shape de la subcuenca

Cuenca <- readOGR(dsn = ".", layer = "Cuenca_RGuayabero_UTM18")
TRANS <- CRS("+init=epsg:4326 +ellps=WGS84")
Guayabero <- spTransform(Cuenca, TRANS)

# Cargar archivo netcdf

ncpath <- "E:/Articulo cuencas/DATOS A PROCESAR/netcdf/netcdf/"
ncname <- "chirps-v2.0.1997.days_p25"
ncfname <- paste(ncpath, ncname, ".nc", sep="")
dname <- "precip"
ncin <- nc_open(ncfname)
```

```

# Guardar dimensiones en variables

lon <- ncvar_get(ncin,"longitude")
nlon <- dim(lon)
lat <- ncvar_get(ncin,"latitude")
nlat <- dim(lat)
time <- ncvar_get(ncin,"time")
tunits <- ncatt_get(ncin,"time","units")
nt <- dim(time)

# Obtener precipitation
pre_array <- ncvar_get(ncin,dname)
dlname <- ncatt_get(ncin,dname,"long_name")
dunits <- ncatt_get(ncin,dname,"units")
fillvalue <- ncatt_get(ncin,dname,"_FillValue")
dim(pre_array)

# Crear matriz para guardar los datos de precipitation

Matrix.pre <- matrix(NA, dim(pre_array)[3],1)
colnames(Matrix.pre) <- c("GUAYABERO")

# Generar datos puntuales de precipitación

for (m in 1:dim(pre_array)[3]) {
  pre_slice <- pre_array[,m]
  pre.month <- pre_slice
  raster1 <- raster(t(pre.month[,360:1]), xmn= fivenum(lon)[1], xmx= fivenum(lon)[5],
                    ymn=fivenum(lat)[1], ymx=fivenum(lat)[5], crs=CRS("+init=epsg:4326 +ellps=WGS84"))

  raster.disag <- disaggregate(raster1,10)

  r.m.Guayabero <- mask(raster.disag, Guayabero)
  Matrix.pre[m, 2] <- cellStats(r.m.Guayabero, stat = "mean")
  rm(r.m.Guayabero)
  print(paste("Dia: " , m, spe = ""))
}

# Guardar datos

fecha <- seq.Date(as.Date("2002/01/01"), as.Date("2002/12/31"), by = "day")
MATRIX.PRE.RS <- data.frame(fecha, Matrix.pre)
save(MATRIX.PRE.RS, file = "E:/Articulo cuencas/DATOS A PROCESAR/netcdf/netcdf/PRECIP_2002.RData")
View(MATRIX.PRE.RS)
write.csv(MATRIX.PRE.RS, file="PRECIP_2002.csv")

# Cerrar archivo netcdf
nc_close(ncin)

```

### ANEXO 3: Extracción de datos de temperatura.

```

# Descargar los paquetes a usar

install.packages("raster")
library(raster)
install.packages("ncdf4")
library(ncdf4)
install.packages("rgdal")
library(rgdal)
install.packages("sp")
library(sp)

# Seleccionar la carpeta a utilizar

setwd("E:/Articulo cuencas/Caudal/Cuencas")

# Cargar el shape de la subcuenca

Cuenca <- readOGR(dsn = ".", layer = "Cuenca_RGuayabero_UTM18")
TRANS <- CRS("+init=epsg:4326 +ellps=WGS84")
Guayabero <- spTransform(Cuenca, TRANS)

# Cargar archivo netcdf

ncpath <- "E:/Articulo cuencas/DATOS A PROCESAR/temp/"
ncname <- "cru_ts4.02.2011.2017.tmx.dat"
ncfname <- paste(ncpath, ncname, ".nc", sep="")
dname <- "tmx"
ncin <- nc_open(ncfname)

```

```

# Guardar dimensiones en variables

lon <- ncvar_get(ncin,"lon")
nlon <- dim(lon)
lat <- ncvar_get(ncin,"lat")
nlat <- dim(lat)
time <- ncvar_get(ncin,"time")
tunits <- ncatt_get(ncin,"time","units")
nt <- dim(time)

# Obtener Temperatura
pre_array <- ncvar_get(ncin,dname)
dname <- ncatt_get(ncin,dname,"long_name")
dunits <- ncatt_get(ncin,dname,"units")
fillvalue <- ncatt_get(ncin,dname,"_FillValue")
dim(pre_array)

# Crear matriz para guardar los datos de Temp

Matrix.pre <- matrix(NA, dim(pre_array)[3],2)
colnames(Matrix.pre) <- c("GUAYABERO", "GUAVIARE")

# Generar datos puntuales de Temp

for (m in 1:dim(pre_array)[3]) {
  pre_slice <- pre_array[,m]
  pre.month <- pre_slice
  raster1 <- raster(t(pre.month[,360:1]), xmn= fivenum(lon)[1], xmx= fivenum(lon)[5],
                    ymn=fivenum(lat)[1], ymx=fivenum(lat)[5], crs=CRS("+init=epsg:4326 +ellps=WGS84"))

  raster.disag <- disaggregate(raster1,10)

  r.m.Guayabero <- mask(raster.disag, Guayabero)
  Matrix.pre[m, 1] <- cellStats(r.m.Guayabero, stat = "mean")
  rm(r.m.Guayabero)

  r.m.Guaviare <- mask(raster.disag, Guaviare)
  Matrix.pre[m, 1] <- cellStats(r.m.Guaviare, stat = "mean")
  rm(r.m.Guaviare)

  print(paste("Dia: " , m, spe = ""))
}

# Guardar datos

fecha <- seq.Date(as.Date("2011/01/01"), as.Date("2017/12/31"), by = "month")
MATRIX.PRE.RS <- data.frame(fecha, Matrix.pre)

View(MATRIX.PRE.RS)
write.csv(MATRIX.PRE.RS, file="Temp_max_2011-2017.csv")

# Cerrar archivo netcdf
nc_close(ncin)

```

## ANEXO 4: Extracción de datos de evapotranspiración potencial.

```

# Descargar los paquetes a usar
install.packages("raster")
library(raster)
install.packages("ncdf4")
library(ncdf4)
install.packages("rgdal")
library(rgdal)
install.packages("sp")
library(sp)

# Seleccionar la carpeta a utilizar
setwd("E:/Artículo cuencas/Caudal/Cuencas")

# Cargar el shape de la subcuenca
Cuenca <- readOGR(dsn = ".", layer = "Cuenca_RGuayabero_UTM18")
TRANS <- CRS("+init=epsg:4326 +ellps=WGS84")
Guayabero <- spTransform(Cuenca, TRANS)

# Cargar archivo netcdf
ncpath <- "E:/Artículo cuencas/DATOS A PROCESAR/netcdf/ETP/"
ncname <- "CRU_ETP_2002"
ncfname <- paste(ncpath, ncname, ".nc", sep="")
dname <- "ETP"
ncin <- nc_open(ncfname)

```

```

# Guardar dimensiones en variables

lon <- ncvar_get(ncin,"longitude")
nlon <- dim(lon)
lat <- ncvar_get(ncin,"latitude")
nlat <- dim(lat)
time <- ncvar_get(ncin,"time")
tunits <- ncatt_get(ncin,"time","units")
nt <- dim(time)

# Obtener Temperatura
pre_array <- ncvar_get(ncin,dname)
dname <- ncatt_get(ncin,dname,"long_name")
dunits <- ncatt_get(ncin,dname,"units")
fillvalue <- ncatt_get(ncin,dname,"_FillValue")
dim(pre_array)

#Crear matriz para guardar los datos de Temp

Matrix.pre <- matrix(NA, dim(pre_array)[3],1)
colnames(Matrix.pre) <- c("GUAYABERO")

# Generar datos puntuales de Temp

for (m in 1:dim(pre_array)[3]) {
  pre_slice <- pre_array[,m]
  pre.month <- pre_slice
  raster1 <- raster(t(pre.month[,360:1]), xmn= fivenum(lon)[1],xmx= fivenum(lon)[5],
                    ymn=fivenum(lat)[1], ymx=fivenum(lat)[5], crs=CRS("+init=epsg:4326 +ellps=WGS84"))

  raster.disag <- disaggregate(raster1,10)

  r.m.Guayabero <- mask(raster.disag, Guayabero)
  Matrix.pre[m, 2] <- cellStats(r.m.Guayabero, stat = "mean")
  rm(r.m.Guayabero)
  print(paste("Dia: " , m, spe = ""))
}

# Guardar datos

fecha <- seq.Date(as.Date("2002/01/01"), as.Date("2002/12/31"), by = "day")
MATRIX.PRE.RS <- data.frame(fecha, Matrix.pre)
save(MATRIX.PRE.RS, file = "E:/Artículo cuencas/DATOS A PROCESAR/netcdf/ETP/ETP_2002.RData")
View(MATRIX.PRE.RS)
write.csv(MATRIX.PRE.RS, file="ETP_2002.csv")

# Cerrar archivo netcdf
nc_close(ncin)

```

## ANEXO 5: Serie de tiempo a escala anual de precipitación y escorrentía.

```

library(scales)
library(forecast)
library(magixaxis)
library(zoo)

#Seleccionar carpeta a usar e importar datos

setwd("C:/Users/SAMSUNG/Desktop/Proyecto_Macarena/Datos Variables Amb/Escorrentía")
Q_Anuual<-read.csv(file = "Caudal_year_Raudal_dos.csv", header=T, sep=";", dec=",")

setwd("C:/Users/SAMSUNG/Desktop/Proyecto_Macarena/Datos Variables Amb/Precipitacion")
P_Anuual<-read.csv(file = "yearGUAYABERO_pre.csv", header=F, sep=" ", dec=".")

#Guardar datos de precipitacion y escorrentia en variables

R_G<-Q_Anuual[1:16,3]
P_G<-P_Anuual[2:17,3]
tempo <- 2002:2017

#Generar un vector limite y las dimensiones de la gráfica

par(mgp=c(2.4,0.7,0))
par(mar=c(3,3.5,1.2,3.5)+0.1)
lim.y <- range(P_G,R_G, na.rm = T)

#Generar la grafica

plot(tempo,P_G, xlim = range(tempo), ylim = lim.y,main="Guayabero Basin: Precipitation - Runoff",
      ylab = "P & R (mm / year)", xlab = "Time (year)", font.main = 2, cex.main = 1.2,type = "n")
lines(tempo, P_G, lty = 1, col = alpha("blue", alpha = 0.6), lwd = 0.8)
lines(tempo, ma(P_G, order = 3), lty =1, col = "blue", lwd = 2)
lines(tempo, R_G, lty = 1, col = alpha("red", alpha = 0.6), lwd = 0.8)
lines(tempo, ma(R_G, order = 3), lty =1, col = "red", lwd = 2)

legend("topleft",legend = c("Precipitation (P)","Runoff (R)","P Rollmean 3 years","R Rollmean 3 years"),
      col=c("blue","red","blue","red"),lwd = c(0.6,0.6,2,2),cex = 0.6)

```

## ANEXO 6: Serie de tiempo a escala mensual de precipitación y escorrentía.

```
#Descargar paquetes a usar

library(scales)
library(forecast)
library(magicaxis)
library(zoo)

#Seleccionar carpeta a usar e importar datos

setwd("C:/Users/SAMSUNG/Desktop/Proyecto_Macarena/Datos Variables Amb/Escorrentía")
Q_Mensual<-read.csv(file = "Caudal_mes_Raudaldos.csv", header=T, sep=";", dec=",")

setwd("C:/Users/SAMSUNG/Desktop/Proyecto_Macarena/Datos Variables Amb/Precipitation")
P_Mensual<-read.csv(file = "mesGUAYABERO_pre.csv", header=F, sep=";", dec=".")

#Guardar datos de precipitacion y escorrentia en variables

data.flow <- Q_Mensual[1:192,3] # aqui sus datos
data.prec <- P_Mensual[2:193,3]

#Generar un vector de fechas

tempo <- seq.Date(as.Date("2002-01-01"),as.Date("2017-12-31"),by="month")

R <- data.flow
P <- data.prec

#Generar un vector limite y dimensiones de la gráfica

par(mgp=c(2.4,0.7,0))
par(mar=c(3,3.5,1.2,3.5)+0.1)
lim.y <- range(P,R, na.rm = T)

#Generar la grafica

plot(tempo,P, xlim = range(tempo), ylim = lim.y,main="Guayabero Basin: Precipitation - Runoff",
      ylab = "P & R (mm / month)", xlab = "Time (month)", font.main = 2, cex.main = 1.2,type = "n", xaxt="n")
axis.Date(1, at = seq(as.Date("1986-01-01"), as.Date("2018-12-31"), "years"))
lines(tempo, P, lty =1, col = alpha("blue", alpha = 0.6), type = "l", lwd = 0.8)
lines(tempo, ma(P, order = 10), lty =1, col = "blue", lwd = 2)
lines(tempo, R, lty = 1, col = alpha("red", alpha = 0.6), lwd = 0.8)
lines(tempo, ma(R, order = 10), lty =1, col = "red", lwd = 2)
legend("topleft",legend = c("Precipitation (P)","Runoff (R)","P Rollmean 10 months","R Rollmean 10 months"),
      col=c("blue","red","blue","red"),lwd = c(0.6,0.6,2,2),cex = 0.8)
```

## ANEXO 7: Serie de tiempo Temperatura.

```
#Descargar paquetes a usar

library(scales)
library(forecast)
library(magicaxis)
library(zoo)

#Seleccionar carpeta a usar e importar datos

setwd("C:/Users/SAMSUNG/Desktop/Proyecto_Macarena/Datos Variables Amb/Escorrentía")
Tmax<-read.csv(file = "Temp_max_year.csv", header=T, sep=";", dec=".")

setwd("C:/Users/SAMSUNG/Desktop/Proyecto_Macarena/Datos Variables Amb/Escorrentía")
Tmin<-read.csv(file = "Temp_min_year.csv", header=T, sep=";", dec=".")

setwd("C:/Users/SAMSUNG/Desktop/Proyecto_Macarena/Datos Variables Amb/Escorrentía")
Tmed<-read.csv(file = "Temp_med_year.csv", header=T, sep=";", dec=".")

#Guardar datos de precipitacion y escorrentia en variables

data.Tmax <- Tmax[,2]
data.Tmin <- Tmin[,2]
data.Tmed <- Tmed[,2]

#Generar un vector de fechas

tempo <- seq.Date(as.Date("2002-01-01"),as.Date("2017-12-31"),by="year")

max <- data.Tmax
min <- data.Tmin
med <- data.Tmed
```

```

#Generar un vector limite y dimensiones de la gráfica

par(mgp=c(2.4,0.7,0))
par(mar=c(3,3.5,1.2,3.5)+0.1)
lim.y <- range(max,min,med, na.rm = T)

#Generar la grafica

plot(tempo,max, xlim = range(tempo), ylim = c(19,30),main="Guayabero Basin: Temperature",
      ylab = "Temp ('C / year)", xlab = "Time (year)", font.main = 2, cex.main = 1.2,type = "n")
lines(tempo, max, lty = 1, col = alpha("blue", alpha = 0.6), lwd = 0.8)
lines(tempo, min, lty = 1, col = alpha("red", alpha = 0.6), lwd = 0.8)
lines(tempo, med, lty = 1, col = alpha("green", alpha = 0.6), lwd = 0.8)

legend("topleft",legend = c("Temp max","Temp med","Temp min"),
      col=c("blue","green","red"),lwd = c(0.6,0.6,0.6),cex = 0.6)

```

## ANEXO 8: Serie de tiempo ETR y ETP.

```

#Descargar paquetes a usar

library(scales)
library(forecast)
library(magaxis)

#Seleccionar carpeta a usar e importar datos

setwd("C:/Users/SAMSUNG/Desktop/Proyecto_Macarena/Datos Variables Amb/ETP")
ETP_Anual<-read.csv(file = "ETP.csv", header=T, sep=";", dec=".")

setwd("C:/Users/SAMSUNG/Desktop/Proyecto_Macarena/Datos Variables Amb/ETR")
ETR_Anual<-read.csv(file = "BH.csv", header=T, sep=";", dec=".")

#Guardar datos de ETP y ETR en variables

tempo <- 2002:2017

data.ETR_G <- ETR_Anual[17:32,3]
data.ETP_G <- ETP_Anual[17:32,3]

ETR_G <- data.ETR_G
ETP_G <- data.ETP_G

lim.y <- range(ETP_G,ETR_G, na.rm = T)

#Generar gráfica

par(mgp=c(2.4,0.7,0))
par(mar=c(3,3.5,1.2,3.5)+0.1)

plot(1, xlim = range(tempo), ylim = lim.y, type="n", yaxt = "n", xaxt = "n",
      main="Guayabero Basin: AET (Water Balance) & Potential Evapotranspiration",
      ylab = "AET(mm / year)", xlab = "Time (year)", bty = "n", font.main = 2, cex.main = 1.2)
lines(tempo, ETR_G, lty = 1, col = alpha("orange", alpha = 0.6), type = "l", lwd = 0.8)
lines(tempo, ma(ETR_G, order = 3), lty = 2, col = "orange", lwd = 2)
lines(tempo, ETP_G, lty = 1, col = alpha("black", alpha = 0.6), type = "l", lwd = 0.8)
lines(tempo, ma(ETP_G, order = 3), lty = 2, col = "black", lwd = 2)
magaxis(2, las=2, cex.axis=1, col.ticks = "gray45")
magaxis(1, las=2, cex.axis=1, col.ticks = "gray45")
legend("topleft",legend = c("Potential Evapotranspiration","Potential Evapotranspiration Rollmean 3 year",
      "Actual Evapotranspiration: Water Balance Method (AET WB)","AET WB Rollmean 3 year"),
      col=c("black","black","orange","orange"),lty = c(1,2,1,2),lwd=c(0.3,0.3,1.8),cex = 0.6)

```

## ANEXO 9: Serie de tiempo deforestación.

```
View(defG)
defG <- read.csv("GUAYABERO.csv", header = T, sep = ";", dec = ",")

View(defG)
time <- as.numeric(2002:2018)
coca<-data.frame(time,PNN2)

H
par(mfrow=c(1,2))
par(mar=c(2,3.9,3,3.9)+0.1)
plot(defG, type = "l", main = "Deforestación: Guayabero River sub-Basin
  & AET (Water Balance)", ylab = "Area [Ha]", xlab = "Time [year]",
  col = "green4", las = 1, cex.axis=.75)
```

## ANEXO 10: Coeficiente de variación.

```
#Descargar paquetes a usar
library(scales)
library(forecast)
library(magaxis)

#Seleccionar carpeta a usar e importar datos
setwd("C:/Users/SAMSUNG/Desktop/Proyecto_Macarena/Datos Variables Amb/Escoorrentía")
Q_Mensual<-read.csv(file = "Caudal_mes_Raudaldos.csv", header=T, sep=";", dec=",")

setwd("C:/Users/SAMSUNG/Desktop/Proyecto_Macarena/Datos Variables Amb/Precipitacion")
P_Mensual<-read.csv(file = "mesGUAYABERO_pre.csv", header=F, sep=" ", dec=".")

#Generar un vector de fechas y separar día, mes y año en columnas
fechas<-seq.Date(as.Date("2002-01-01"),as.Date("2017-12-31"),by="month")
mes<-strftime(fechas,"%m")
año<-strftime(fechas,"%Y")

##Precipitation----
P<-data.frame(año,mes,P_Mensual[2:193,3])
años<-2002:2017

#Calcular desviacion estandar y la media
sd_Guayabero_P<- aggregate(P_Mensual.2.193..3~año,data = P,FUN = sd, na.rm=T)
mean_Guayabero_P <- aggregate(P_Mensual.2.193..3~año,data = P,FUN = mean, na.rm=T)

#Calcular coef de variacion
P_CV <- cbind(años,sd_Guayabero_P[,2]/mean_Guayabero_P[,2])
colnames(P_CV)<-c("Año","Guayabero")

#Generar un vector limite y las dimensiones de la gráfica
par(mgp=c(2.4,0.7,0))
par(mar=c(3,3.5,1.2,3.5)+0.1)

lim.y <- range(P_CV[,2], na.rm = T)

#Generar la grafica
plot(1, xlim = range(años), ylim = lim.y, type="n", yaxt = "n", xaxt = "n",main="Guayabero Basin:
  Precipitation Variation Coef",
  ylab = "[Dimensionless]", xlab = "Time (year)", bty = "n", font.main = 2, cex.main = 1.2)
lines(años, P_CV[,2], lty =1, col = alpha("blue", alpha = 0.6), type = "l", lwd = 0.8)
lines(años, ma(P_CV[,2], order = 3), lty =1, col = "dark blue", lwd = 2)

magaxis(2, las=2, cex.axis=1, col.ticks = "gray45")
magaxis(1, las=2, cex.axis=1, col.ticks = "gray45")
legend("top",legend = c("Precipitation Variation Coefficient (PVC)","PVC Rollmean 3 year"),
  col=c("blue","dark blue"),lty = c(1,1),lwd=c(1,1.8),cex = 0.8)

##Escoorrentía----
Q<-data.frame(año,mes,Q_Mensual[1:192,3])
años<-2002:2017
```

```

#Calcular desviacion estandar y la media

sd_Guayabero_Q<- aggregate(Q_Mensual.1.192..3.~año,data = Q,FUN = sd, na.rm=T)
mean_Guayabero_Q <- aggregate(Q_Mensual.1.192..3.~año,data = Q,FUN = mean, na.rm=T)

#Calcular coef de variacion

Q_CV <- cbind(años,sd_Guayabero_Q[,2]/mean_Guayabero_Q[,2])
colnames(P_CV)<-c("Año","Guayabero")

#Generar un vector limite y las dimensiones de la gráfica

par(mgp=c(2.4,0.7,0))
par(mar=c(3,3.5,1.2,3.5)+0.1)

lim.y <- range(Q_CV[,2], na.rm = T)

#Generar la grafica

plot(1, xlim = range(años), ylim = lim.y, type="n", yaxt = "n", xaxt = "n",main="Guayabero Basin:
Run-off Variation Coef",
ylab = "[Dimensionless]", xlab = "Time (year)", bty = "n", font.main = 2, cex.main = 1.2)
lines(años, Q_CV[,2], lty =1, col = alpha("red", alpha = 0.6), type = "l", lwd = 0.8)
lines(años, ma(Q_CV[,2], order = 3), lty =1, col = "dark red", lwd = 2)
magaxis(2, las=2, cex.axis=1, col.ticks = "gray45")
magaxis(1, las=2, cex.axis=1, col.ticks = "gray45")
legend("bottom",legend = c("Runoff Variation Coefficient (RVC)","RVC Rollmean 3 year"),
col=c("red","dark red"),lty = c(1,1),lwd=c(1,1.8),cex = 0.8)

```

## ANEXO 11: Promedio mensual multianual de precipitación y escorrentía.

```

#Media mensual multianual

# Seleccionar carpeta a usar

setwd("E:/Artículo cuencas/Cuenca Guayabero/Precipitación")

#Imporatr datos

m<-read.csv(file = "Caudal_mes_Raudaldos.csv", header=T, sep=";", dec=",")

a<-read.csv(file = "mesGUAYABERO_pre.csv", header=F, sep=",", dec=".")

#Generar vector de fechas

fecha <- seq.Date(as.Date("2002/01/01", "%Y/%m/%d"), as.Date("2017/12/31", "%Y/%m/%d"), by = "month")

#Generar un dataframe entre el resultado del paso anterior y los datos

Caudal <- data.frame(m[1:192,3])
Precip <- data.frame(a[2:193,3])

#Separar en columnas de dia, mes y años el vector fechas

mes<-strftime(fecha,"%m")
yr<-strftime(fecha,"%Y")
dia <- strftime(fecha,"%d")

#Generar un dataframe entre las columnas del paso anterior y los datos

N.Q<-data.frame(dia,mes,yr,Caudal)
N.P <- data.frame(dia,mes,yr, Precip)

```

```

#Generar un dataframe entre las columnas del paso anterior y los datos

N.Q<-data.frame(dia,mes,yr,Caudal)
N.P <- data.frame(dia,mes,yr, Precip)

#Generar las media mensuales multianuales

mediaQ<-aggregate(m.1.192..3.~mes,data=N.Q,FUN=mean,na.rm=TRUE)
mediaP<-aggregate(a.2.193..3.~mes,data=N.P,FUN=mean,na.rm=TRUE)
colnames(mediaQ) <- c("2002-2017","Escorrentia Guayabero (mm)")
colnames(mediaP) <- c("2002-2017","Precipitacion Guayabero (mm)")
View(mediaP)

#Guardar el resultado en un archivo csv

write.csv(mediaQ, file="Media_mensual_multianual_2002-2017_Q.csv")
write.csv(mediaP, file="Media_mensual_multianual_2002-2017_P.csv")

#Guardar datos de precipitacion y escorrentia en variables

data.flow <- mediaQ # aqui sus datos
data.prec <- mediaP

#Generar un vector de fechas

tempo <- c("Jan","Feb","Mar","Apr","May","Jun","Jul","Aug","Sep","Oct","Nov","Dec")

R <- data.flow[1:12,2]
P <- data.prec[1:12,2]

#Generar un vector limite y dimensiones de la gráfica

par(mgp=c(2.4,0.7,0))
par(mar=c(3,3.5,1.2,3.5)+0.1)
lim.y <- range(P,R, na.rm = T)

#Generar la grafica

plot(P, ylim = lim.y,main="Guayabero Basin: multi-year monthly average",
      ylab = "P & R (mm / month)", xlab = "Time (month)", font.main = 2, cex.main = 1.2,type = "l", xaxt="n", col="blue")
axis(1,1:12,tempo)
lines(R, lty = 1, col = alpha("red", alpha = 0.6), lwd = 0.8)
legend("bottomright",legend = c("Precipitation (P)","Runoff (R)"),
      col=c("blue","red"),lwd = c(0.6,0.6),cex = 0.8)

```