



**Evaluación de la Incidencia de la Construcción de la Represa de Hidrosogamoso
en el Comportamiento de la Evapotranspiración**

Laura Fernanda Romero Fernández

Código: 11792119937

Zamir Esteban Cajamarca López

Código: 11792117681

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá D.C., Colombia

2022

**Evaluación de la Incidencia de la Construcción de la Represa de Hidrosogamoso
en el Comportamiento de la Evapotranspiración**

Laura Fernanda Romero Fernández

Zamir Esteban Cajamarca López

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Director:

Andrés Felipe Carvajal Vanegas, Dr.

Línea de Investigación:

Análisis de procesos de cambio global.

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá D.C., Colombia

2022

Contenido

	Pág.
Contenido.....	2
Lista de Figuras.....	4
Lista de Tablas	6
Introducción	8
1. Objetivos.....	9
1.1 Objetivo general.....	9
1.2 Objetivos específicos:	9
2. Marco Teórico y Estado del Conocimiento	11
2.1 Evapotranspiración.....	11
2.2 Incidencia del cambio de cobertura en la ET	12
2.3 Método de Penman Monteith	13
2.4 MODIS	13
2.5 MODIS Evapotranspiración (MOD16)	14
2.6 Estudios previos	15
3. Metodología.....	17
3.1 Área de Estudio	17
3.2 Insumos y procesamiento de información.....	18
3.3 Análisis en el cambio de coberturas	22
3.4 Análisis de ET por estadísticas zonales.....	23
3.5 Análisis de ET por cambio de coberturas.....	23
4. Resultados y discusión.....	27
4.1 Análisis en el cambio de coberturas	27
4.2 Análisis de ET por estadísticas zonales.....	28
4.3 Análisis de ET por cambio de cobertura	36
Conclusiones	45

Recomendaciones46

Bibliografía47

Lista de Figuras

Figura 1. Localización general.....	17
Figura 2. Área de estudio.....	19
Figura 3. Comparación de coberturas en el área de estudio.	20
Figura 4. Comparación de las coberturas vegetales en el nivel 1 de la clasificación Corine Land Cover (CLC).....	22
Figura 5. Ubicación de los puntos de control con base en las capas de cobertura de la tierra del IDEAM.....	24
Figura 6. Cambio de coberturas de coberturas.....	28
Figura 7. Gráfico de la evapotranspiración media anual, para los años comprendidos entre el 2005 al 2018.....	29
Figura 8. Comparación de evapotranspiración en la zona de la represa de Hidrosogamoso entre los años 2005 al 2018.....	31
Figura 9. Imágenes de control de calidad para el producto evapotranspiración anual de MODIS en los años 2005 al 2018.	32
Figura 10. Gráfico de la evapotranspiración media anual, para los años comprendidos entre el 2005 al 2018, sin datos atípicos.	34
Figura 11. Comparación de evapotranspiración en la zona de la represa de Hidrosogamoso entre los años 2005 al 2018, sin datos atípicos.	35
Figura 12. Comparación de ET desde el año 2005 hasta el 2018 mediante el producto MOD16A3GF.	38

Figura 13. Aparición y distribución de píxeles atípicos en las imágenes del MOD16A3GF.	39
Figura 14. Comparación de ET desde el año 2005 hasta el 2018 mediante el producto MOD16A3GF, excluyendo el 5% de los datos.....	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Componentes de MOD16A3.	15
Tabla 2. Insumos utilizados.	21
Tabla 3. Puntos de control.	25
Tabla 4. Resumen de áreas de las coberturas vegetales en los 2 periodos de tiempo.....	27
Tabla 5. Estadísticas zonales de Evapotranspiración para los años 2005 al 2018	28
Tabla 6. Estadísticas zonales de evapotranspiración para los años 2005 al 2018 sin datos atípicos.	32
Tabla 7. Valores de ET anual para cada uno de los puntos de control, desde el año 2005 hasta el 2018.	37

Agradecimientos

Zamir Cajamarca: Agradezco a Dios primeramente por la oportunidad de permitirme alcanzar este nuevo logro, a mi esposa por brindarme su apoyo durante el proceso sin el cual no hubiera sido posible culminar este proyecto, a los profesores de la Especialización por su dedicación y su disposición para compartir conocimiento, especialmente al profesor Andrés Carvajal por guiarnos académicamente durante el desarrollo. También agradezco a Laura por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de grado.

“La paciencia y perseverancia tienen un efecto mágico ante el que las dificultades desaparecen y los obstáculos se desvanecen”

John Quincy Adams

Laura Romero: Agradezco a Dios por fortalecerme para alcanzar esta meta, a los profesores de la especialización y compañeros por compartir sus conocimientos, en especial al profesor Andrés y Zamir por su ayuda, compromiso y dedicación con la realización de este trabajo.

Introducción

En la actualidad se observa una preocupación general sobre el cambio climático y la repercusión que tiene la explotación de recursos naturales, sobre este tema. En Colombia el 68% de la oferta energética lo generan las plantas hidroeléctricas (Montes, 2019), para la construcción de éstas es necesario el aprovechamiento de masas de agua en movimiento, generando alteraciones en los ecosistemas terrestres y acuáticos, en ese sentido la ejecución y puesta en marcha de hidroeléctricas se asocia al cambio y disminución de servicios ecosistémicos, deforestación, alteraciones de ciclo hidrológico, entre otros factores (Osorio Rosado, 2021).

Debido a que, la evapotranspiración ET es la suma del agua que transpiran las plantas y el agua que se evapora desde superficies como el suelo y cuerpos de agua (Shuttleworth, 2007), en este trabajo se evalúa el cambio que produce la construcción de una represa, en la producción de evapotranspiración en la zona. Basándose en el producto MOD16 del sensor MODIS de la NASA, este producto se fundamenta en la lógica de la ecuación de Penman-Monteith, que incluye entradas de datos de análisis meteorológicos diarios junto con productos de datos de detección remota del espectro radiómetro de imágenes MODIS, como la dinámica de las propiedades de la vegetación (Running, Steve et al., 2017).

1. Objetivos.

1.1 Objetivo general.

- Evaluar la incidencia de la construcción de la represa Hidrosogamoso en el comportamiento de la evapotranspiración en el área geográfica ocupada por el espejo de agua en el año 2018 y en un radio de 1km alrededor del mismo.

1.2 Objetivos específicos:

- Identificar los cambios en las coberturas de la tierra debido a la construcción de la represa de Hidrosogamoso entre los años 2005 y 2018.
- Analizar el comportamiento de la evapotranspiración antes y después de la construcción de la represa Hidrosogamoso.

2. Marco Teórico y Estado del Conocimiento

2.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es la suma del agua que transpiran las plantas y el agua que se evapora desde superficies como el suelo y los cuerpos de agua (Shuttleworth, 2007). La evapotranspiración juega un papel muy importante en el ciclo del agua, consume cerca de dos tercios de la lluvia terrestre alrededor del mundo (Brutsaert, 1982; Mc Donald, 1961) a su vez es el principal componente en el intercambio de energía entre suelo, vegetación y atmósfera afectando la redistribución de radiación en la superficie terrestre y la precipitación (Rivas & Caselles, 2004).

La importancia de la ET es tal que, aproximadamente el 57% de la precipitación anual global es aportada por la ET, en zonas áridas y desérticas alcanza porcentajes entre 90% y 100% (Domingo & Villagarcía, 2003).

El cálculo de ET está basado en la conservación de la energía o la masa, o ambos. Para llegar al cálculo de la ET primero se deben superar dos obstáculos: El primero consiste en estimar de la conductancia estomática que surge por la transpiración de coberturas vegetales; en segundo lugar estimar la evaporación de la superficie terrestre (Running, Steve et al., 2017).

En resumen, la ET es la suma de: los flujos de vapor de agua provenientes del suelo, la evaporación proveniente de los doseles y la transpiración de las plantas. Gracias a los sensores remotos estos datos han podido ser capturados y analizados, especialmente desde aquellos sensores de órbita polar, los cuales ofrecen información constante acerca de las superficies vegetales y otras variables físicas que afectan la ET. A continuación, se detalla

la lógica de las ecuaciones embebidas dentro del algoritmo utilizado por MOD16 para obtener la ET (Running et al., 2019b).

2.2 Incidencia del cambio de cobertura en la ET

Como ya es sabido, la vegetación juega un papel muy importante en su interacción con la regulación hídrica del medio ambiente, la transformación sobre las coberturas de la tierra altera propiedades físicas del ambiente local tales como la temperatura o la humedad y por consiguiente el ciclo del agua (Li et al., 2021). El cambio en las coberturas terrestres tiene incidencia directa sobre el vapor de agua proveniente de la transpiración de las plantas, el hecho de sustituir coberturas vegetales por suelo desnudo o cuerpos de agua conlleva a una pérdida general de humedad por causa del aumento en la evaporación y consecuentemente un desbalance hídrico a nivel local (González Córdoba, 2021).

En cuanto a la interacción entre coberturas vegetales y ET, se ha encontrado que los valores más altos de ET se encuentran en los bosques (áreas con grandes cantidades de vegetación), seguido de pastos, luego áreas de mosaico de cultivos, por último los valores más bajos de ET corresponden a áreas húmedas, cuerpos de agua, áreas urbanas y suelo desnudo (Li et al., 2021).

Los incrementos en la evaporación del agua producido por nuevas coberturas de suelo desnudo y cuerpos de agua conllevan a la reducción en la transpiración de las plantas. Estos cambios no son significativos en temporadas húmedas, sin embargo, a largo plazo se comienzan a ver los efectos de estas afectaciones ambientales, principalmente en las transiciones entre temporadas húmedas y secas, la humedad y la evapotranspiración

comenzarían a reducirse y en última instancia el comportamiento general termina en un alargamiento e intensidad de la época seca (González Córdoba, 2021).

2.3 Método de Penman Monteith

Hay muchos métodos y modelos para estimar la evapotranspiración, uno de estos corresponde a la lógica de Penman Monteith, basado en micro meteorología para explorar la evapotranspiración potencial (Adhikari et al., 2019).

La lógica en la partición de la energía sobre la superficie terrestre que utiliza este método está embebida en la siguiente ecuación (Padredin & Baquero Montoya, 2018):

$$A' = R_{net} - \Delta S - G = H + \lambda E \quad (1)$$

Donde H , λE , y A' son flujos de calor sensible.

R_{net} : Radiación neta.

ΔS : Flujo de almacenamiento de calor.

G : Flujo de calor proveniente del suelo.

Para obtener más detalles de los algoritmos y ecuaciones por favor remitirse al documento de (Padredin & Baquero Montoya, 2018; Running et al., 2019b).

2.4 MODIS

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), es una herramienta científica a bordo de dos satélites Terra y Aqua. Terra está programado para que pase de norte a sur por el ecuador en la mañana, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador en la tarde. Los satélites se encuentran en una órbita de 705 km. Sus bandas espectrales captan longitudes de onda desde 0.4 μm hasta 14.4 μm . Estos dos satélites logran

cubrir la superficie terrestre entre 1 y 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales. Los datos obtenidos por esta herramienta ayudan a entender mejor las dinámicas globales y los procesos que ocurren en la tierra, en los océanos y en la parte inferior de la atmósfera (NASA, 2021).

Los productos de MODIS capturan la información en resoluciones espaciales de 250m, 500m y 1km. Los productos globales de MODIS cubren un área de 109.3 millones de kilómetros cuadrados de áreas cubiertas por vegetación. MODIS comenzó a funcionar desde el año 2000 y aún se encuentra disponible. Los datos están almacenados en la NASA DAAC (Distributed Active Archive Center) (Running et al., 2019b).

Hay muchos productos de MODIS que los científicos están usando actualmente para estudiar el cambio climático global. Estos productos han sido usados por científicos desde una variedad de disciplinas, incluyendo la oceanografía, biología y la ciencia atmosférica (NASA, 2021).

2.5 MODIS Evapotranspiración (MOD16)

Este producto se divide en dos subproductos: Evapotranspiración Neta Global de 500m Durante 8 días (MOD16A2) y Evaporación Neta Global de 500m Anual (MOD16A3) que tal como indican sus nombres, el primero reúne la ET durante 8 días mientras que el segundo estima la ET de manera anual, ambos subproductos tienen una resolución espacial de 500m (NASA, 2021).

Este Sensor mide la ET en $kg \cdot m^{-2} \cdot tiempo^{-1}$, es decir, la cantidad de agua que se evapora por kilómetro cuadrado en un tiempo determinado (NASA, 2021) (Tabla 1).

Tabla 1. Componentes de MOD16A3.

Nombre	Descripción	Unidades	Factor de escala
<i>ET_500m</i>	Evapotranspiración total	kg/m ² /año	0.1
<i>LE_500m</i>	Flujo de Calor Latente Promedio	J/m ² /día	10000
<i>PET_500m</i>	Evapotranspiración Potencial Total	kg/m ² /año	0.1
<i>PLE_500m</i>	Flujo de Calor Latente Potencial Promedio	J/m ² /día	10000
<i>ET_QC_500m</i>	Evaluación de Calidad de la Evapotranspiración	Porcentaje	N/A

Fuente:(Running, Steve et al., 2017).

2.6 Estudios previos

En la cuenca del río Haihe en China se analizaron las características espaciales y temporales de la evapotranspiración para esta región, basándose en imágenes del sensor MODIS, tomando como insumos adicionales el Modelo Digital de elevación y se evaluó la ET para los diferentes usos del suelo y se encontró que para las coberturas de bosque, tierras de cultivo, ríos y lagos, es más fuerte, en cambio, para las zonas de desierto y rocas desnudas es débil, otro resultado es que para la época del año donde se tiene una estación fría la ET es baja y aumenta gradualmente para la época más calurosa del año en la zona de estudio (Wu & Meng, 2016).

Por otro lado, se analizó el trabajo realizado por Wei Zhao, Ainong Li y Wei Deng del año 2013, el cual, se basa en la comparación de datos MODIS / Terra y datos de observación de sitios de campo para estimar la validación de la ET real, dando como conclusión que la ET de 8 días derivada es capaz de capturar variación espacial y temporal en todo el sur de Asia y que los errores están relacionados principalmente con la

interpolación de los datos de observación del sitio (Zhao et al., 2013), aunque en el documento se aclara, que se debe seguir trabajando para sacar la precisión en la estimación.

Por otro lado, en el año 2017 (Alvarado Barrientos & Orozco Medina, 2017) Susana Alvarado Barrientos e Ismael Orozco Medina, realizaron la comparación de la evapotranspiración potencial del satélite MOD16A3 con mediciones in situ en una zona del este de la Península de Yucatán entre los años 2000 al 2012, para ver la variación en los datos tomados por el satélite y que tan confiables son para estudios de monitoreo regional. Luego de realizar varios análisis estadísticos de comparación entre datos in situ y los obtenidos de los píxeles de las imágenes MOD16, tanto en el análisis espacial como en el análisis temporal, concluyen que el producto MOD16 tal como está, no parece ser completamente de aplicación directa a la región de la Península de Yucatán. Por lo tanto, para desarrollar estudios regionales se requieren datos de la ET real (Alvarado Barrientos & Orozco Medina, 2017).

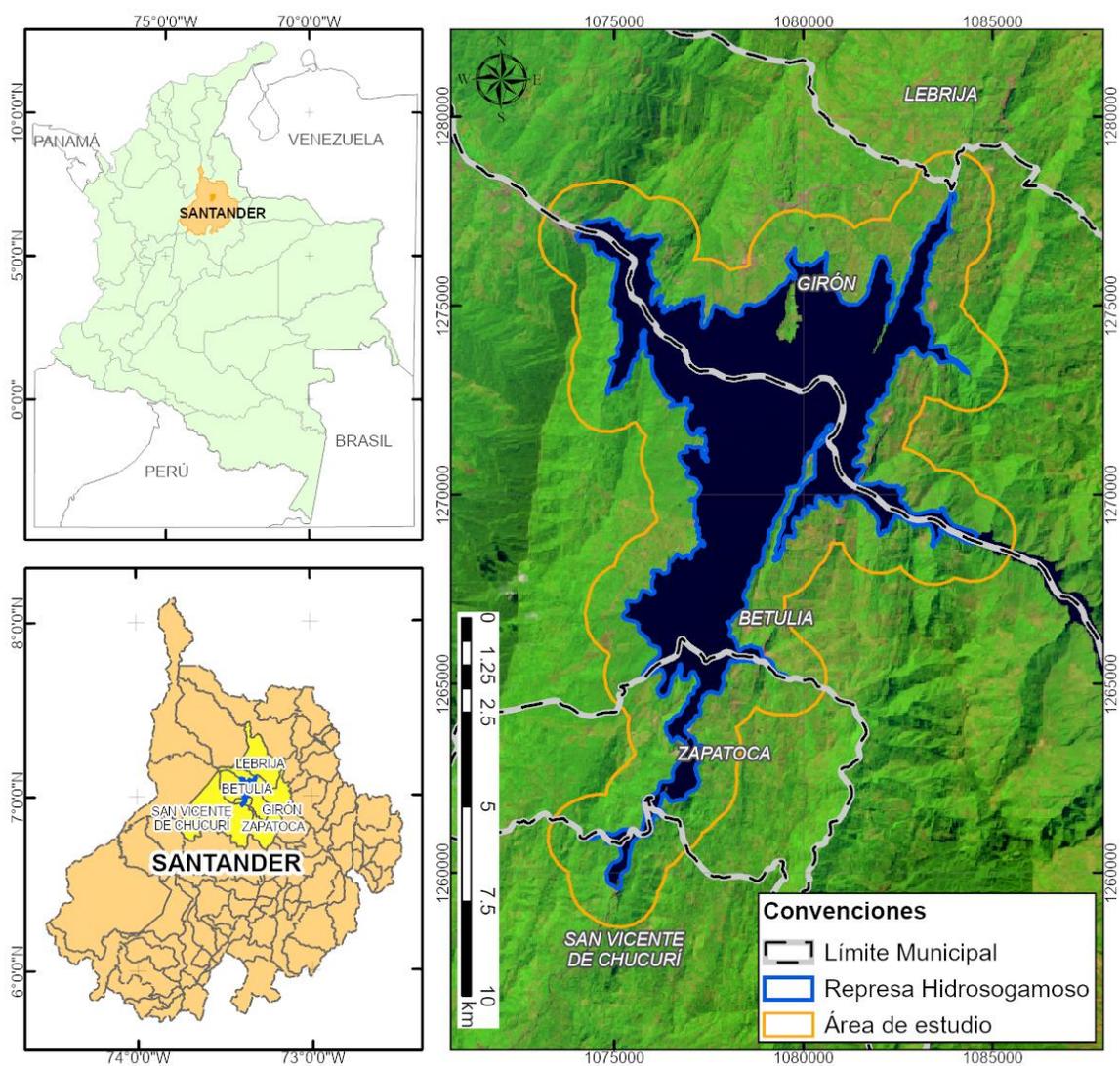
En el año 2017, Degano et al. 2019 evaluaron el producto MOD16_A2, para la región Pampeana Argentina entre los años 2012 y 2014, realizando comparación con las mediciones in situ de 24 estaciones, los resultados de los análisis estadísticos para estos datos reforzó los hallazgos de estudios previos como el de Alvarado Barrientos y Orozco Medina, que destacan las discrepancias en los datos del MODIS en comparación con las medidas locales, para este en particular se determinó una sobre estimación por producto MOD16_A2 mayor al 50%.

3. Metodología

3.1 Área de Estudio

El área de estudio corresponde con la ubicación en la cual está la represa de Hidrosogamoso ($7^{\circ} 3' 42''$ N y $73^{\circ} 21' 44''$ O), cubre parte de los municipios Betulia, Girón, Lebrija, San Vicente de Chucuri y Zapatoca en el Departamento de Santander (Figura 1).

Figura 1. Localización general.



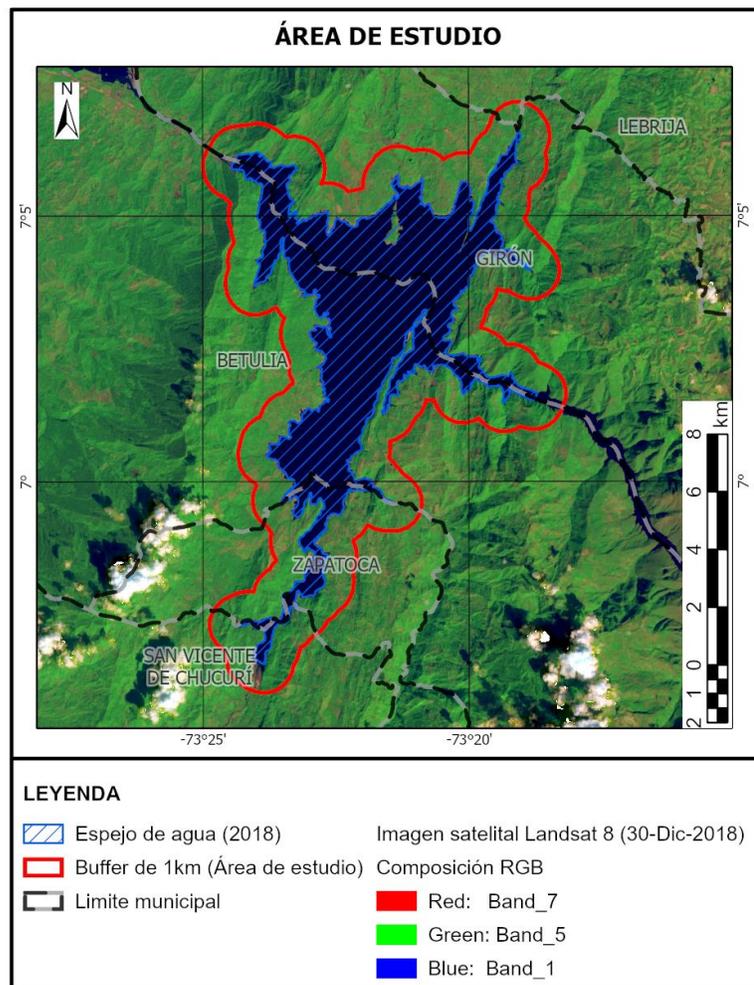
En ella se construyó el embalse de Topocoro, con 6934 ha, que es el segundo más grande de Colombia y el que almacena mayor volumen de agua con 4800 m³ (Tavera Amado, 2018). Para el caso de estudio donde se pretende visualizar la diferencia de ET antes y después de la construcción del embalse, se toma como referencia el año 2014 donde se inicia el llenado del embalse que tomó aproximadamente seis meses (Tavera Amado, 2018).

Antes de la construcción de la represa, en la zona de la cuenca del río Sogamoso se encontraban cultivos y vegetación nativa, lo que produjo un cambio en la cobertura del suelo (Roa Avendaño, 2016).

3.2 Insumos y procesamiento de información

En primera instancia, para definir claramente el área de estudio, se descargó la imagen satelital de Landsat 8 LC08_L2SP_008055_20181230_20200829_02_T1, cuya fecha de captura fue el 12 de diciembre de 2018, dicha imagen fue obtenida a través de la página web Earth Explorer (USGS, 2021), luego se digitalizó el espejo de agua de la represa y se generó un buffer de 1 km con el software ArcGIS Pro, el área de estudio resultante es de 136.09 km²(Figura 2).

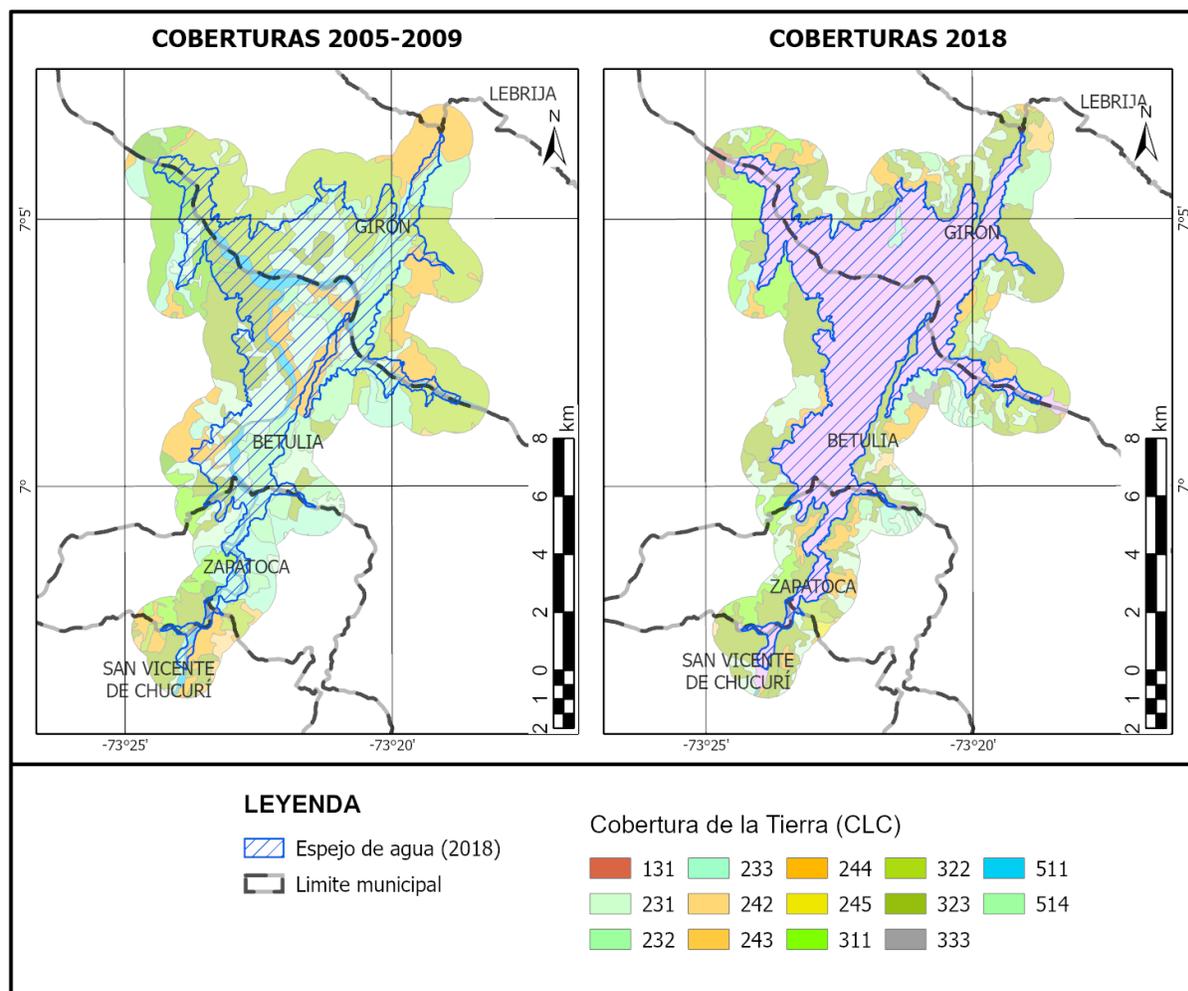
Figura 2. Área de estudio.



Fuente: Elaboración propia con imagen satelital Landsat 8 de la USGS.

Para evaluar el cambio de coberturas sobre el área de estudio, se utilizaron las capas geográficas de cobertura vegetal generadas por el IDEAM para los años 2005-2009 y 2018 a escala 1:100.000, esta información se obtuvo a través del portal de datos abiertos del IDEAM (<http://www.ideam.gov.co/capas-geo>)(IDEAM, 2021)(Figura 3).

Figura 3. Comparación de coberturas en el área de estudio.



Fuente: Elaboración propia con información base del IDEAM.

Con el objetivo de analizar el comportamiento de la ET se utilizaron las imágenes contenidas en el MOD16A3GF desde el año 2005 hasta el año 2019 (Tabla 2). Las imágenes satelitales de MODIS se descargaron mediante la herramienta AppEARS (<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears/>)(USGS & Earth Explorer, 2021).

El producto que se utiliza en este proyecto de grado es el MOD16A3GF, es un subproducto del MOD16A3, al igual que su referente se encuentra en una resolución espacial de 500m, mide la ET acumulada durante un año. Este subproducto tiene un

mejoramiento respecto al MOD16A3, el cual consiste en tomar valores del producto de control de calidad (QC), allí se revisan las áreas en las cuales la calidad de la imagen es pobre debido a nubosidad, luego se realizan interpolaciones a partir de valores anuales del índice de área foliar y fracción de radiación fotosintéticamente activa (LAI/FPAR: Leaf Area Index and Fraction of Photosynthetically Active Radiation), sin embargo este producto no se encuentra disponible en tiempo real, el mismo es generado a final de cada año (Running et al., 2019a).

Tabla 2. Insumos utilizados.

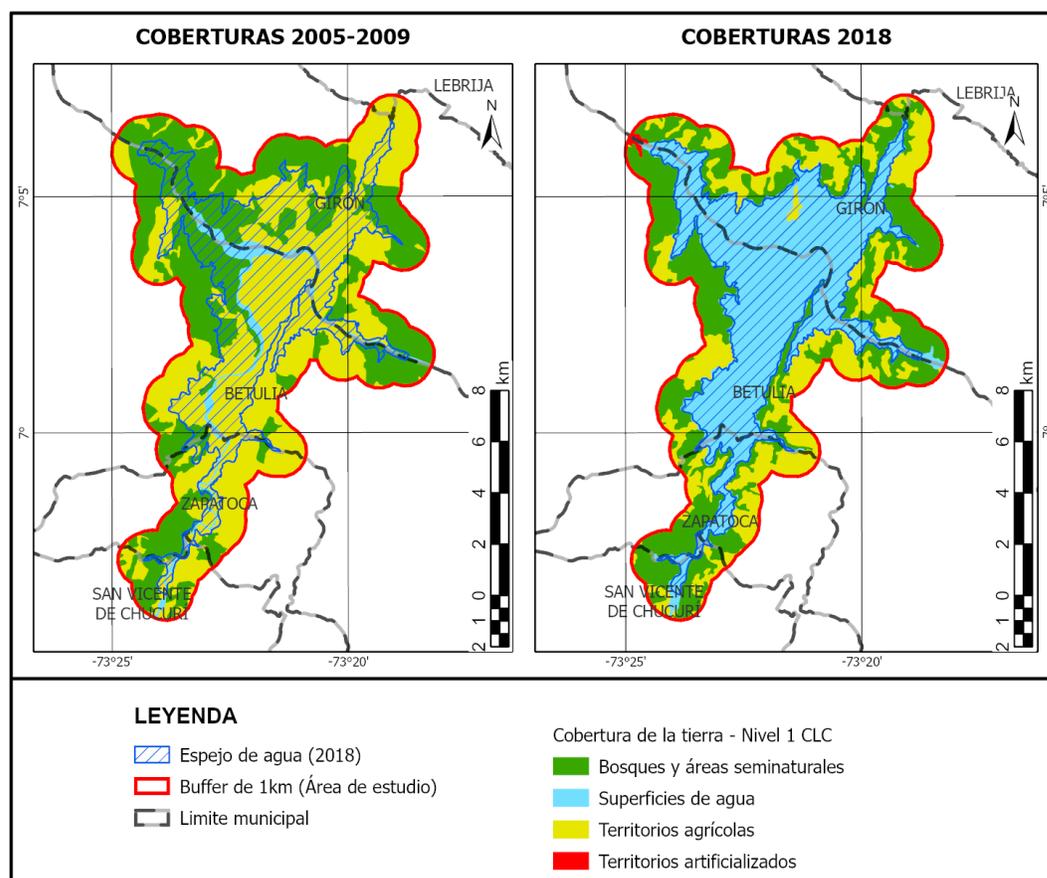
Insumo	Nombre del producto	Fuente
<i>Imagen Satelital Landsat 8 2018</i>	LC08_L2SP_008055_20181230_20200829_02_T1	USGS Earth Explorer
<i>Imagen MODIS 2005</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2005001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2006</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2006001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2007</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2007001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2008</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2008001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2009</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2009001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2010</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2010001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2011</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2011001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2012</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2012001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2013</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2013001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2014</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2014001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2015</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2015001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2016</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2016001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2017</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2017001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Imagen MODIS 2018</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2018001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars

<i>Imagen MODIS 2019</i>	MOD16A3GF.006_ET_500m_doy2019001_aid0001.tif	LP DAAC AppEEars
<i>Cobertura de la tierra 2005-2009</i>	Cobertura de la Tierra 100K Periodo 2005-2009.shp	IDEAM
<i>Cobertura de la tierra 2018</i>	Cobertura de la Tierra 100K Periodo 2018	IDEAM

3.3 Análisis en el cambio de coberturas

A partir de los mapas de cobertura vegetal del IDEAM, se extrajeron las coberturas para los periodos 2005-2009 y 2018 en el área definida a partir del buffer de 1km del espejo de agua de 2018, luego se generalizaron las coberturas hasta el nivel 1 según la clasificación Corine Land Cover (Figura 4).

Figura 4. Comparación de las coberturas vegetales en el nivel 1 de la clasificación Corine Land Cover (CLC).



Fuente: Elaboración propia con información base del IDEAM.

Por otro lado, para evaluar el comportamiento de la ET desde el año 2005 hasta el año 2018, se determinaron dos maneras:

3.4 Análisis de ET por estadísticas zonales

En el área de estudio definida (buffer de 1 km al espejo de agua de la represa en 2018) se analizaron las estadísticas zonales de la ET desde el año 2005 hasta el año 2018.

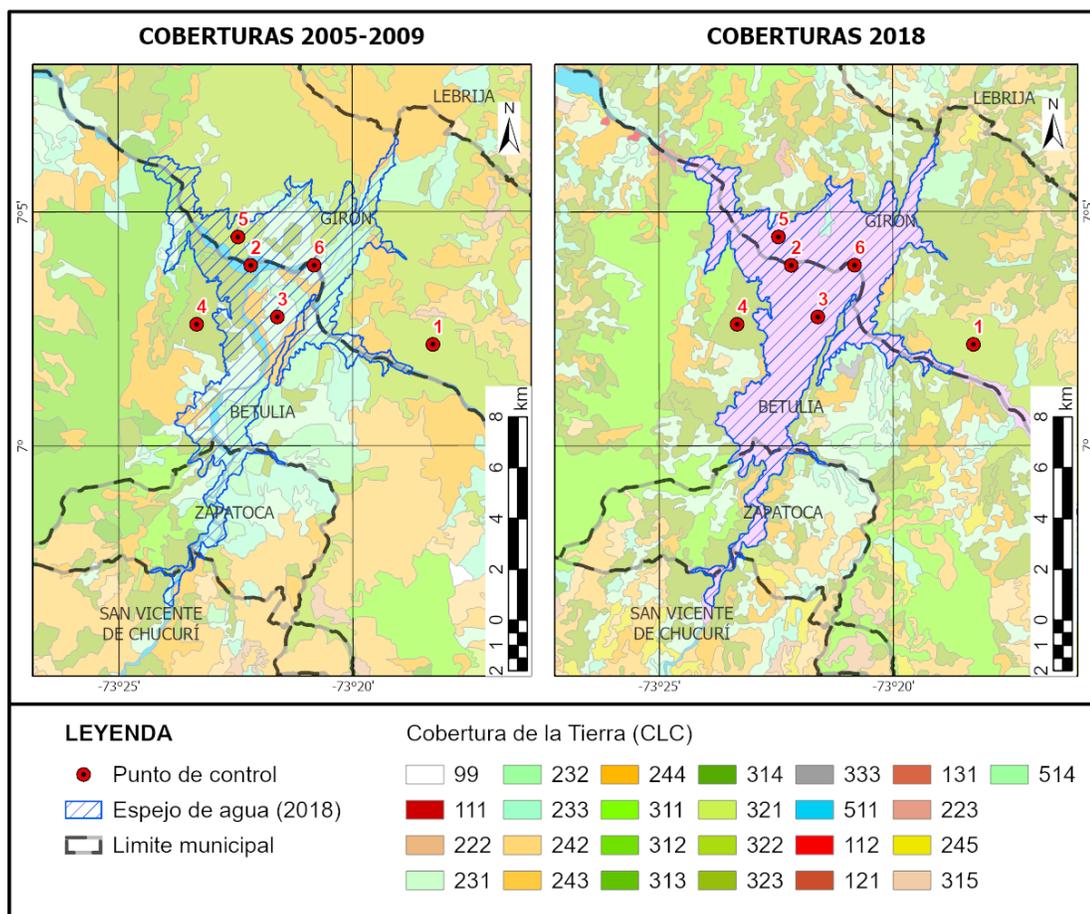
Este análisis se realizó para determinar el efecto que tuvo la construcción de la represa y el cambio de coberturas sobre el comportamiento de la ET.

3.5 Análisis de ET por cambio de coberturas

Con el mapa de coberturas de la tierra del IDEAM de los años 2005-2009 y 2018 (IDEAM, 2021) se dispusieron 6 puntos de control (Figura 5), los puntos de control se dispusieron en sitios estratégicos de las coberturas para revisar el comportamiento de la en cada una de ellas a lo largo del tiempo (

Tabla 3).

Figura 5. Ubicación de los puntos de control con base en las capas de cobertura de la tierra del IDEAM.



Fuente: Elaboración propia con información base del IDEAM.

Tabla 3. Puntos de control.

Punto	Latitud	Longitud	Cobertura de la tierra	Cobertura de la tierra	Cobertura de la tierra Nivel 1	Cambio registrado
			2005 - 2009	2018	2005-2009 / 2018	
1	7.036015	-73.304681	3221 arbustal denso	3221 arbustal denso	Bosques y áreas seminaturales / Bosques y áreas seminaturales	La cobertura terrestre se mantiene
2	7.064272	-73.369511	511 Ríos	5141 embalses	Superficies de agua / Superficies de agua	La cobertura acuática se mantiene
3	7.045872	-73.360083	231 pastos Limpios	5141 embalses	Territorios agrícolas / Superficies de agua	La cobertura cambia de terrestre a acuática
4	7.043299	-73.388818	323 vegetación secundaria o en transición	323 vegetación secundaria o en transición	Bosques y áreas seminaturales / Bosques y áreas seminaturales	La cobertura terrestre se mantiene
5	7.07438	-73.374078	3222 arbustal abierto	5141 embalses	Bosques y áreas seminaturales / Superficies de agua	La cobertura cambia de terrestre a acuática
6	7.064303	-73.346972	511 Ríos	5141 embalses	Superficies de agua / Superficies de agua	La cobertura acuática se mantiene

Sobre dichos puntos de control se extrajo el valor de ET anual desde el año 2005 hasta el 2018, de esta manera se logró evaluar el comportamiento de la ET con base en los cambios de la cobertura terrestre.

4. Resultados y discusión

4.1 Análisis en el cambio de coberturas

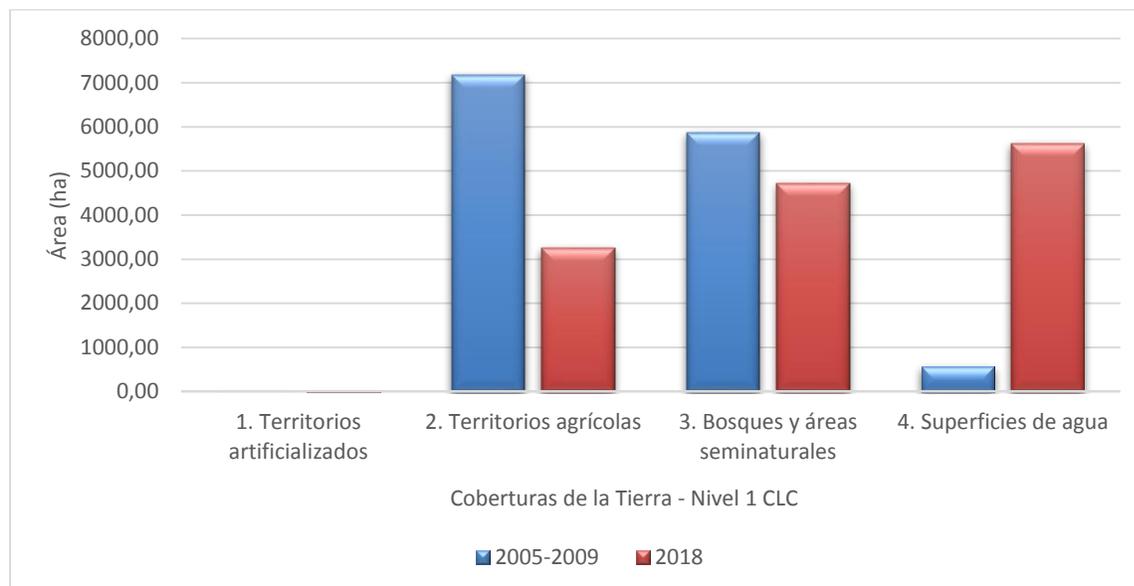
La cobertura que tuvo mayor pérdida fue la de territorios agrícolas, los bosques y áreas seminaturales disminuyeron en un 8.52%, por otra parte, el área de coberturas acuáticas pasó de 554.7 ha hasta 5622.07 ha, representando un aumento del 37.24% (**¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**).

Tabla 4. Resumen de áreas de las coberturas vegetales en los 2 periodos de tiempo.

COBERTURA DE LA TIERRA NIVEL 1	ÁREA (ha)		Ganancia o pérdida (ha)	Porcentaje de cambio
	2005-2009	2018		
Territorios artificializados	0	26.865029	26.87	0.20%
Territorios agrícolas	7180.390566	3245.99256	-3934.40	-28.92%
Bosques y áreas seminaturales	5871.451605	4711.616945	-1159.83	-8.52%
Superficies de agua	554.701156	5622.068793	5067.37	37.24%
Área total	13606.54333	13606.54333		

Fuente: Elaboración propia con información base del IDEAM.

Las áreas que sufrieron mayor cambio fueron los territorios agrícolas y las superficies de agua, las primeras por pérdida y las segundas por incremento (Figura 6). De las áreas terrestres las que más aportaron en la transición hacia superficies de agua, fueron las de territorios agrícolas, los bosques y áreas seminaturales también ofrecieron parte de su territorio al incremento de las superficies de agua, pero no lo hicieron en la misma magnitud que los territorios agrícolas. Por otra parte, el aumento de territorios artificializados se dio en 26.87 ha, un cambio casi imperceptible comparado con las proporciones de las demás coberturas analizadas.

Figura 6. Cambio de coberturas de coberturas.

4.2 Análisis de ET por estadísticas zonales.

Al realizar las estadísticas zonales se puede observar cómo desde el año 2014 el promedio de la evapotranspiración en la zona de la represa tiene una disminución de casi 100 kg/m^2 con respecto a los años anteriores, tal como se observa en la Tabla 5, se puede inferir que esta disminución en la ET se debe a la construcción del embalse.

Tabla 5. Estadísticas zonales de Evapotranspiración para los años 2005 al 2018

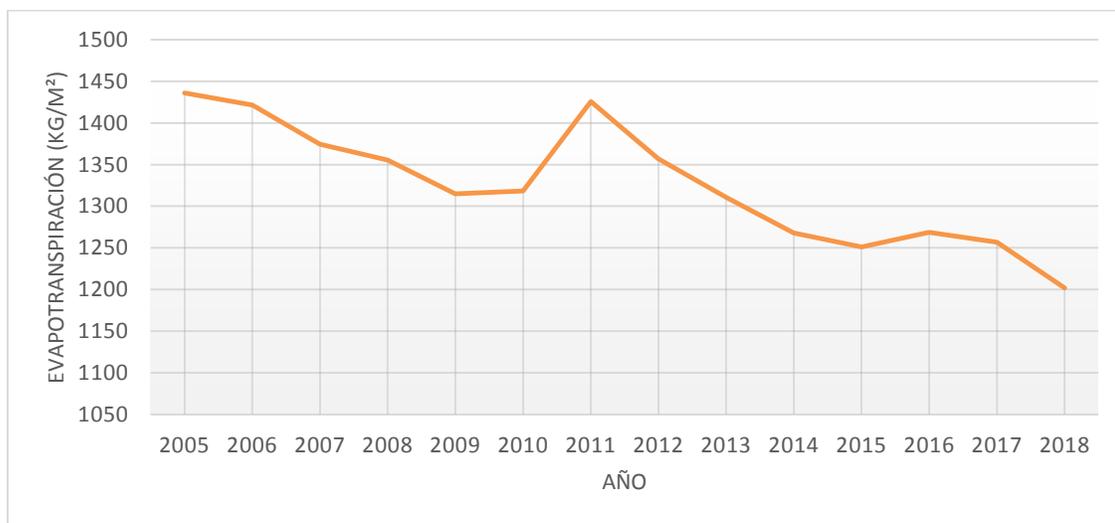
Año	No. Píxeles	Mínimo (kg/m^2)	Máximo (kg/m^2)	Media (kg/m^2)
2005	746	962.1	2128.7	1436.05255
2006	746	945.6	1949.9	1421.57225
2007	746	876.7	1874.5	1374.56126
2008	746	912.1	1919.5	1355.41555
2009	746	782.6	1993.3	1314.89062
2010	746	800.3	2046.2	1318.20724

2011	746	879.4	2062.1	1425.77869
2012	746	806.6	2095.6	1356.81836
2013	746	878.6	1882.1	1310.83727
2014	746	773.3	2859.8	1267.77198
2015	746	804.7	2852.4	1250.9193
2016	746	862.1	2823.6	1268.5118
2017	746	828.4	2814.2	1256.95121
2018	746	710.5	2774.6	1201.86743

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AppEEARS (USGS & Earth Explorer, 2021).

Para visualizar mejor los datos, se grafica la evapotranspiración media en cada año para área de estudio.

Figura 7. Gráfico de la evapotranspiración media anual, para los años comprendidos entre el 2005 al 2018.



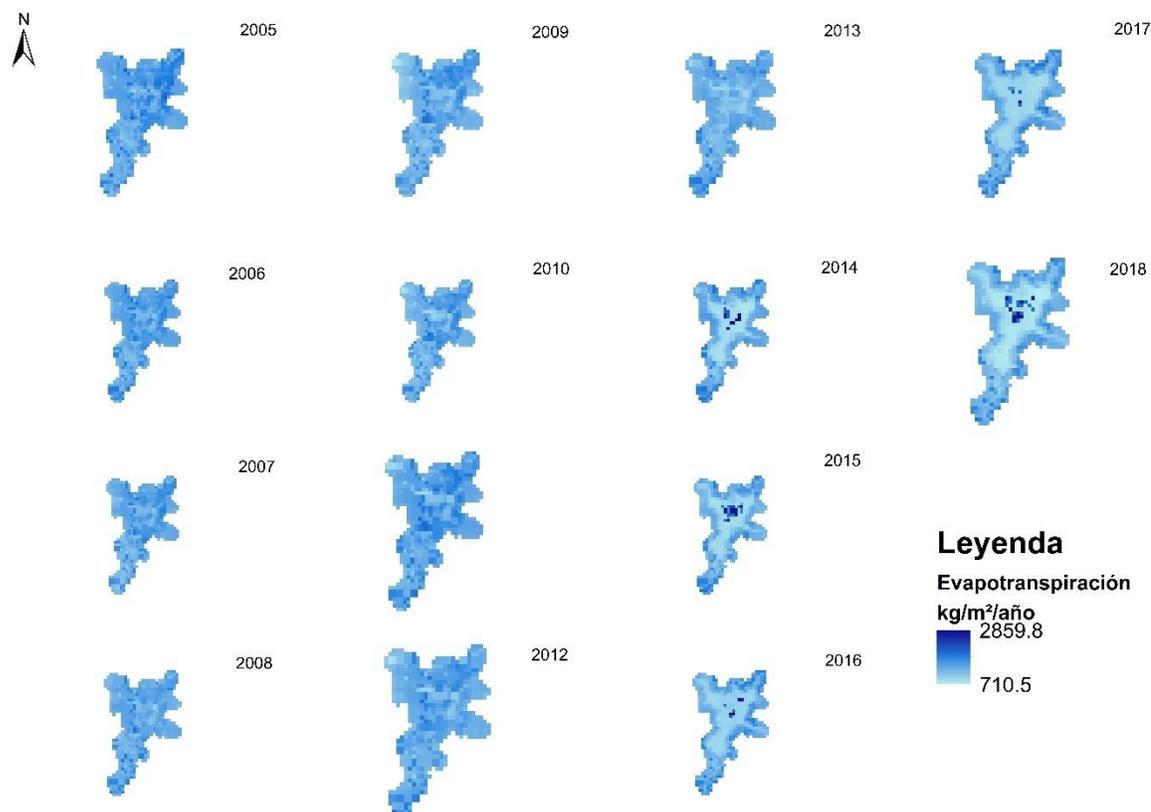
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos desde la Herramienta AppEEARS (USGS & Earth Explorer, 2021).

Desde el año 2012 se ve una reducción en la evapotranspiración de la zona, a pesar de que el llenado del embalse comenzó en el año 2014, llegando al año 2018 a una evapotranspiración media de 1201.86 kg/m² por año.

Para tener un mejor panorama de la evapotranspiración en la zona de estudio se realiza una comparación de imágenes desde el 2005 hasta el 2018.

Se identificó una reducción de la evapotranspiración en la zona a partir del 2012, no obstante, en el año 2014 cuando se comienza con el llenado del embalse, en el área del espejo de agua resultante, si se nota una notable reducción en la evapotranspiración y la marcada diferencia con el área que no cubre el embalse, por lo que se podría inferir que probablemente el cambio en la cobertura influye en la evapotranspiración de la zona (Figura 8).

Figura 8. Comparación de evapotranspiración en la zona de la represa de Hidrosogamoso entre los años 2005 al 2018.



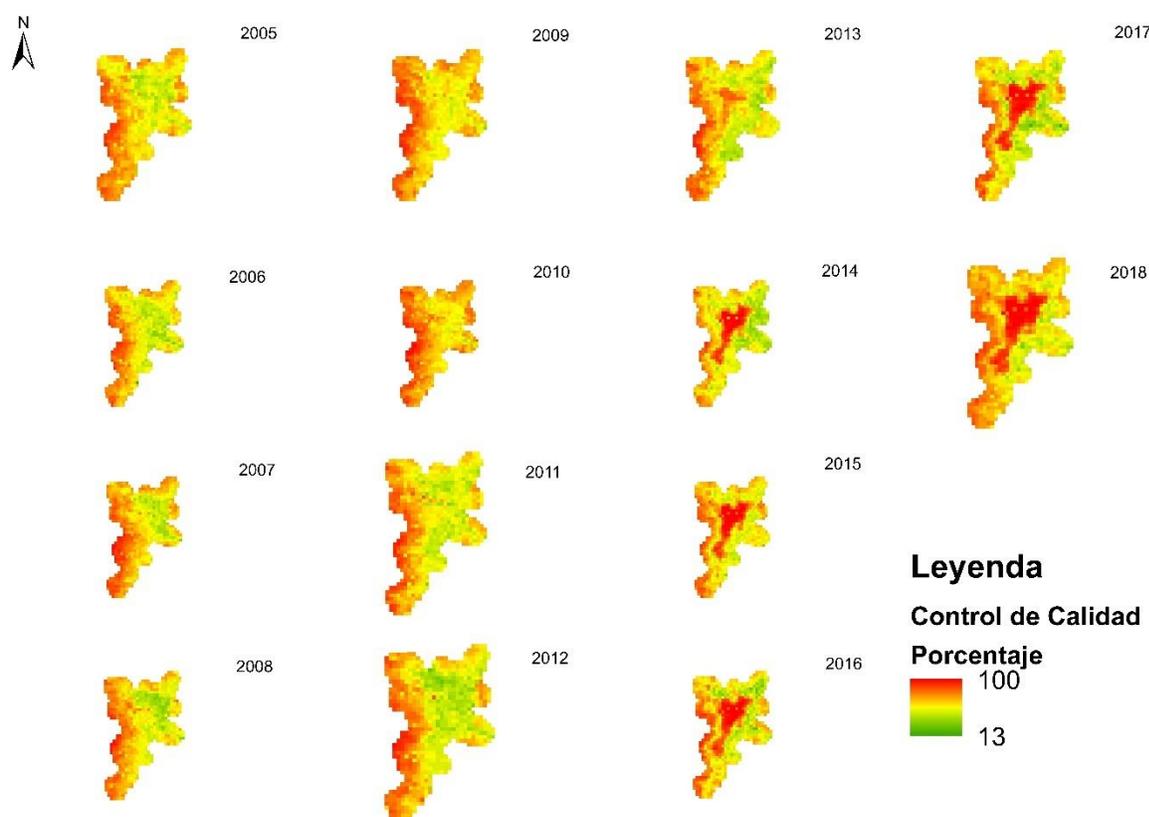
Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos en la herramienta AppEEARS (USGS & Earth Explorer, 2021).

Por otro lado, en el centro del cuerpo de agua se encuentran pixeles con valores superiores a 2000 kg/m^2 por cada año, por tal razón se hace un análisis de las imágenes de control de calidad (QC) las cuales son obtenidas de la herramienta AppEEARS (USGS & Earth Explorer, 2021).

Como lo expresa (Running et al., 2019b) en las imágenes de control de calidad (QC) se observa una evaluación para los valores compuestos anuales, entre mayor sea el valor del pixel, es porque hicieron más correcciones a los datos tomados en el año en diferentes tomas, lo anterior por las condiciones atmosféricas (Running et al., 2019b).

Debido a lo anterior, se hace necesario omitir los valores que tienden a 100 para evapotranspiración encontrados desde el año 2014 al 2018 sobre la represa, para esto se toman solo 95% de los valores cercanos a la media en estos años, para realizar las estadísticas zonales, ya que, los demás datos son considerados atípicos.

Figura 9. Imágenes de control de calidad para el producto evapotranspiración anual de MODIS en los años 2005 al 2018.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos en la herramienta AppEARS (USGS & Earth Explorer, 2021).

Tabla 6. Estadísticas zonales de evapotranspiración para los años 2005 al 2018 sin datos atípicos.

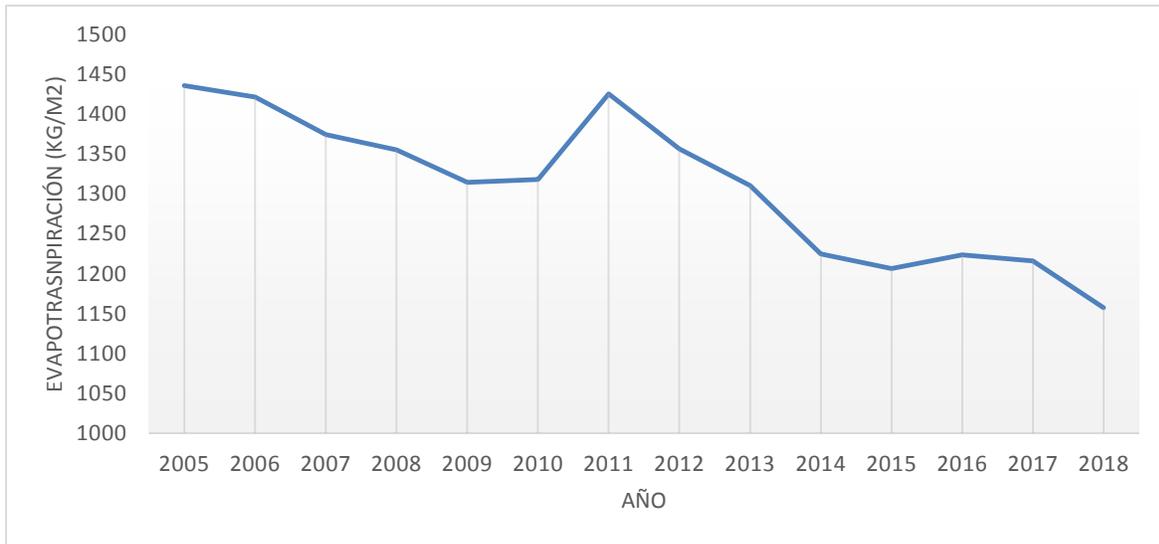
		Mínimo	Máximo	Media
Año	No. Píxeles	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)
2004	746	869.4	1997.7	1371.93861

2005	746	962.1	2128.7	1436.05255
2006	746	945.6	1949.9	1421.57225
2007	746	876.7	1874.5	1374.56126
2008	746	912.1	1919.5	1355.41555
2009	746	782.6	1993.3	1314.89062
2010	746	800.3	2046.2	1318.20724
2011	746	879.4	2062.1	1425.77869
2012	746	806.6	2095.6	1356.81836
2013	746	878.6	1882.1	1310.83727
2014	708	773.3	1786	1224.71963
2015	710	804.7	1757.6	1206.3738
2016	696	862.1	1721.4	1223.75014
2017	696	828.4	1694	1216.16006
2018	710	710.5	1728.2	1157.55197

Fuente: Elaboración propia con datos de la herramienta AppEEARS (USGS & Earth Explorer, 2021).

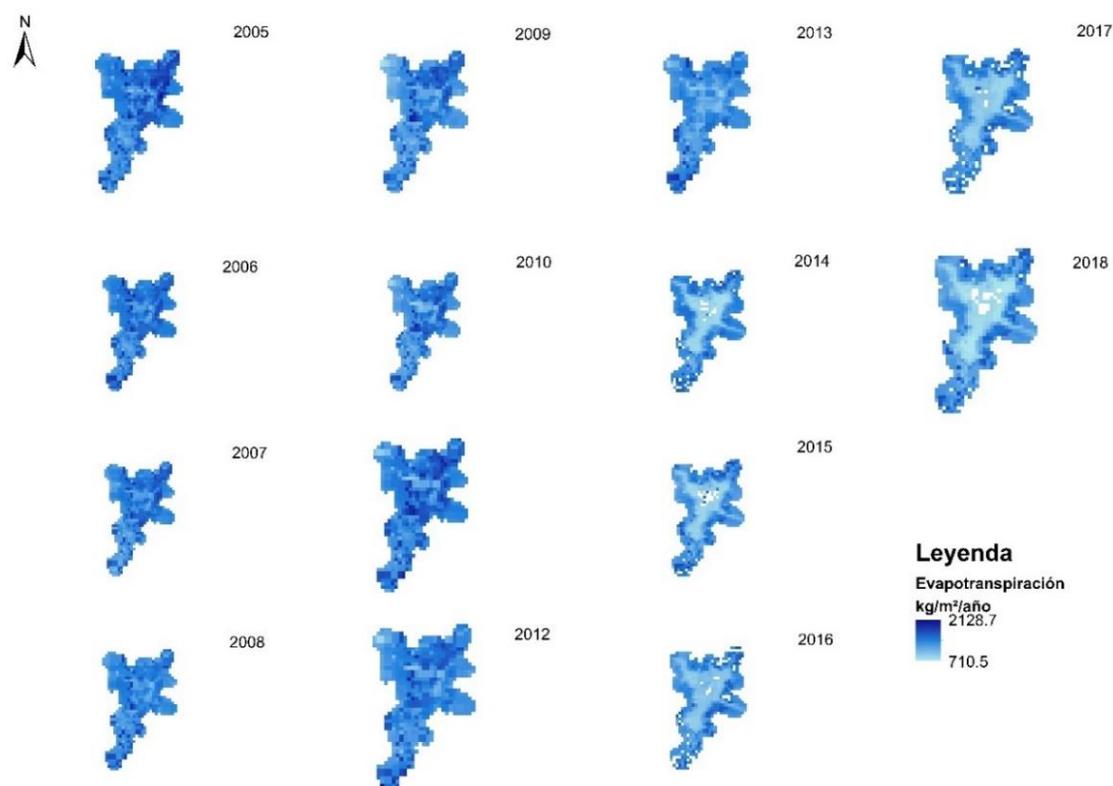
Se observa una tendencia más uniforme para los años comprendidos entre 2015 y 2018 de disminución de evapotranspiración en la zona, aunque se mantiene que la predisposición a la reducción sucede desde el año 2012, no obstante, la pendiente se realza entre los años 2013 al 2014, donde se llevó a cabo la construcción y llenado del embalse, motivo por el cual, la evapotranspiración en la zona de la represa de Hidrogramoso disminuyo notoriamente.

Figura 10. Gráfico de la evapotranspiración media anual, para los años comprendidos entre el 2005 al 2018, sin datos atípicos.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos desde la Herramienta AppEEARS (USGS & Earth Explorer, 2021).

Figura 11. Comparación de evapotranspiración en la zona de la represa de Hidrosogamoso entre los años 2005 al 2018, sin datos atípicos.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos desde la Herramienta AppEEARS (USGS & Earth Explorer, 2021).

Al observar las imágenes para cada año sin tener en cuenta los valores atípicos se puede llegar a pensar que efectivamente por la construcción del embalse de la represa de Hidrosogamoso, se disminuye la evapotranspiración, ya que, para los años comprendidos entre 2005 y 2013 la evapotranspiración oscilaba entre los valores de 879.4 Kg/m²/año y 2062.1 Kg/m²/año, a partir del 2014 los valores de evapotranspiración disminuyeron hasta 710.5 Kg/m²/año, sobre todo en el área del embalse. Como se encuentra en el estudio técnico de (IBERDROLA, 2007), la construcción de una represa genera alteraciones en la atmósfera,

debido al aumento de partículas de suspensión y contaminantes atmosféricos, afectando a su fenómenos como la Evapotranspiración.

4.3 Análisis de ET por cambio de cobertura

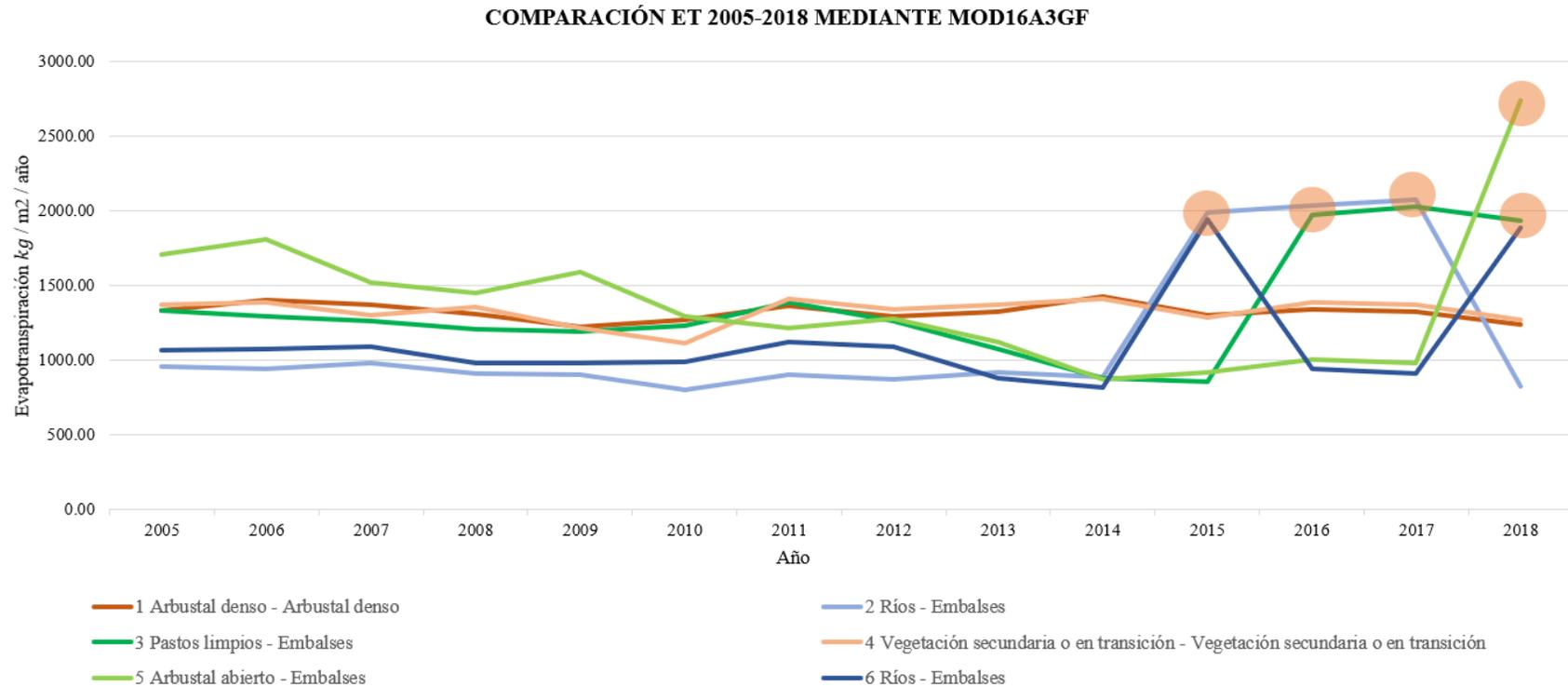
Se extrajo la información de ET para los seis puntos de control propuestos, (Tabla 7).

Tabla 7. Valores de ET anual para cada uno de los puntos de control, desde el año 2005 hasta el 2018.

PUNTO	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<i>1 Arbustal denso - Arbustal denso</i>	1331.50	1403.10	1370.40	1311.30	1224.60	1271.80	1362.80	1295.50	1324.50	1429.90	1302.80	1344.60	1328.00	1237.50
<i>2 Ríos - Embalses</i>	962.10	945.60	981.10	912.10	901.90	800.30	903.20	872.50	921.50	886.00	1989.20	2033.20	2077.10	827.60
<i>3 Pastos limpios - Embalses</i>	1333.00	1290.80	1264.30	1207.40	1195.90	1234.80	1384.20	1262.60	1077.80	878.20	859.10	1977.80	2025.80	1935.00
<i>4 Vegetación secundaria o en transición - Vegetación secundaria o en transición</i>	1370.40	1388.50	1304.00	1360.00	1215.20	1112.50	1409.90	1343.50	1375.30	1414.30	1285.80	1386.60	1374.50	1272.00
<i>5 Arbustal abierto - Embalses</i>	1709.40	1807.20	1521.20	1449.60	1592.90	1296.80	1214.50	1278.00	1118.60	874.80	922.10	1002.00	984.90	2739.40
<i>6 Ríos - Embalses</i>	1069.90	1073.40	1094.50	984.10	982.80	989.40	1123.30	1091.10	878.60	821.30	1945.30	941.90	908.00	1890.70

Algunos datos comienzan a mostrar valores atípicos, estos valores se resaltan con color naranja (Tabla 7). Luego se grafican los valores de ET que se tienen para cada uno de los puntos de control a través del tiempo (Figura 12).

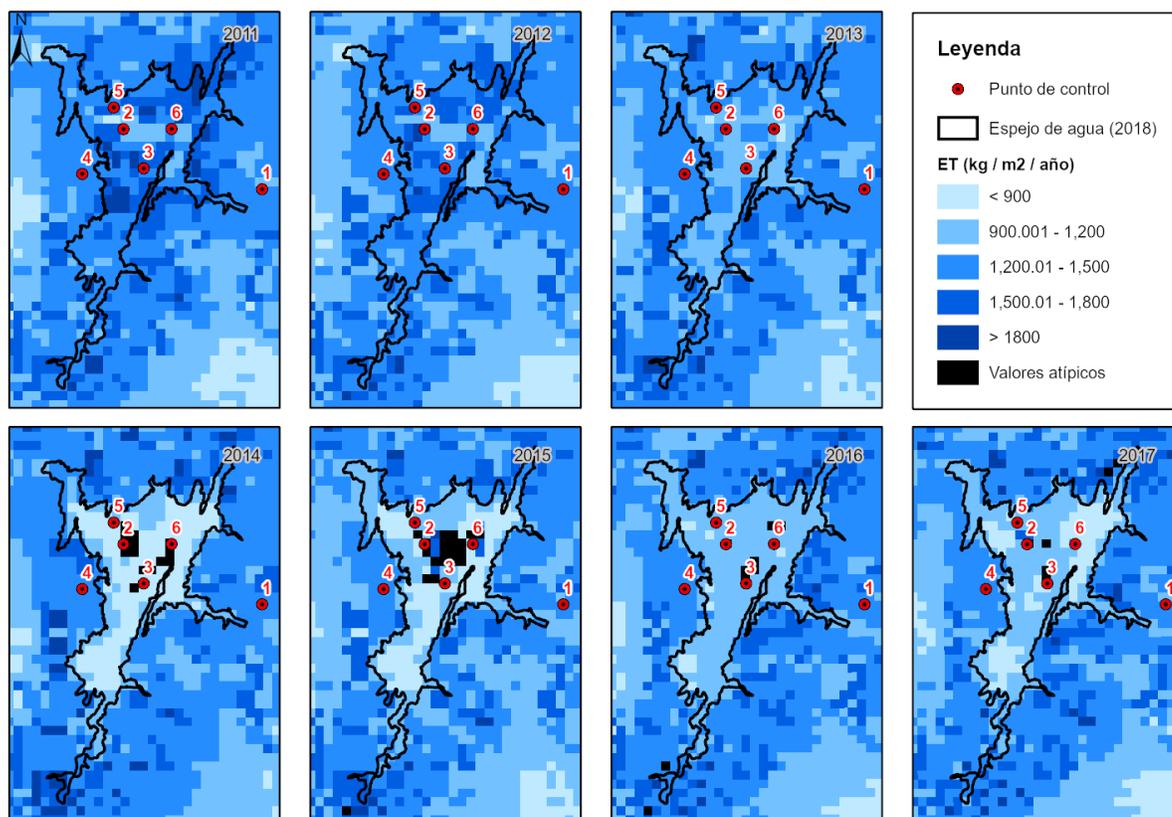
Figura 12. Comparación de ET desde el año 2005 hasta el 2018 mediante el producto MOD16A3GF.



Después del llenado de la represa en 2014 se comienzan a notar comportamientos atípicos en cuanto a las imágenes del MOD16A3GF, esto se produce porque en dichos años esos puntos de control se encontraban en un valor de píxel atípico (

Figura 13).

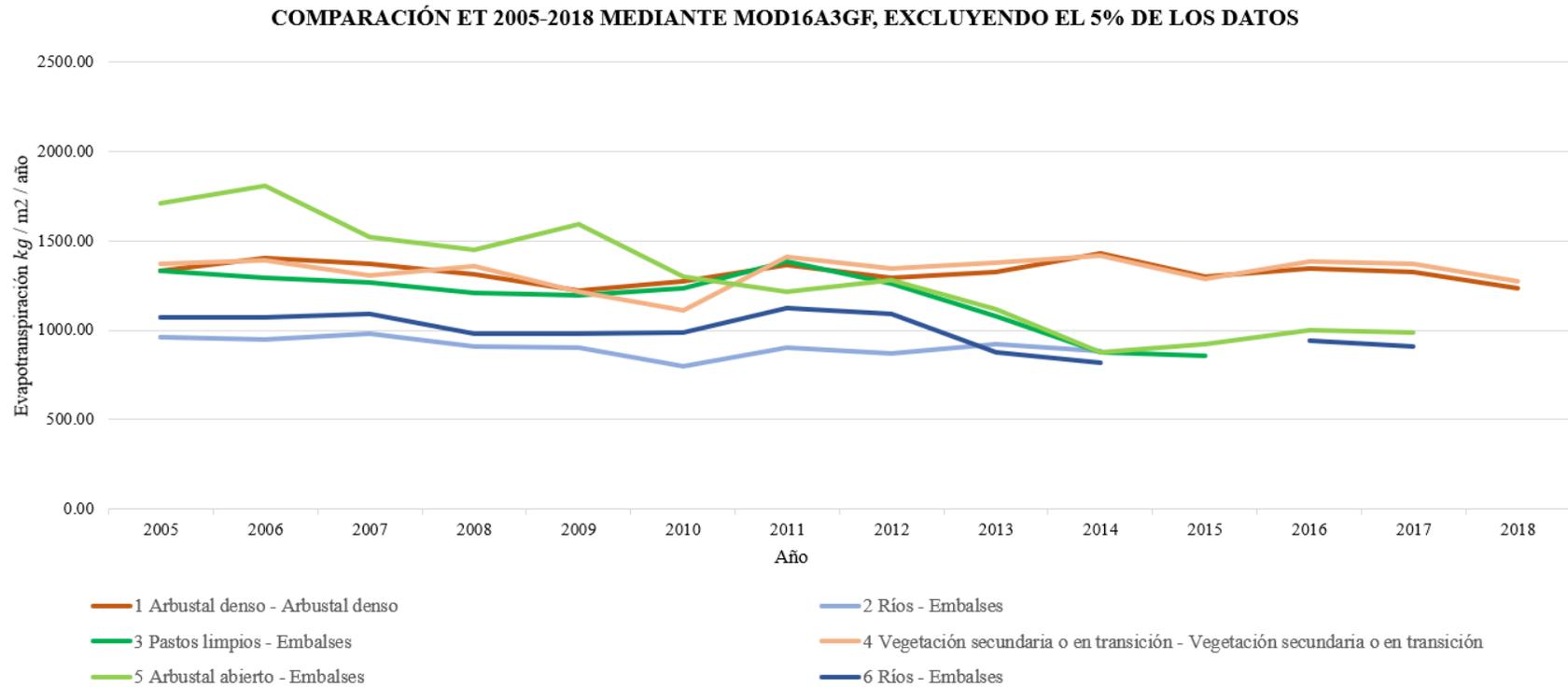
Figura 13. Aparición y distribución de píxeles atípicos en las imágenes del MOD16A3GF.



Para contrarrestar los valores atípicos de los resultados obtenidos en este análisis, se se procedió a realizar una selección de solamente el 95% de los datos, el 5% restante se excluyó del análisis (

Figura 14).

Figura 14. Comparación de ET desde el año 2005 hasta el 2018 mediante el producto MOD16A3GF, excluyendo el 5% de los datos.



Las coberturas terrestres que mantienen su cobertura vegetal a través del tiempo, (puntos 1 y 4) tienen valores promedio anuales de ET de 1324.16 kg/m^2 y 1329.46 kg/m^2 respectivamente, mientras que las coberturas acuáticas que se mantienen en el tiempo, (puntos 2 y 6) tienen valores promedio de ET de 901.26 kg/m^2 y 996.53 kg/m^2 respectivamente. Con base en estos valores promedio se puede decir que la ET de coberturas terrestres es mayor que en las coberturas acuáticas, esto concuerda con lo expuesto por Li et al., (2021) en donde se demostró que los valores de ET fueron mayores en coberturas vegetales comparado con cuerpos de agua. Por lo tanto, se esperaría una disminución en los valores de ET en los puntos en donde la cobertura cambia de terrestre a acuática, (puntos 3 y 5) y evidentemente sucede lo esperado, pues se ve que los valores de ET en estos puntos disminuyen hasta tener comportamientos similares a las coberturas acuáticas (

Figura 14; Tabla 7).

Como ya se identificó, la influencia que tienen los cambios en las coberturas vegetales sobre la ET, estos cambios comienzan a afectar el clima local, debido a la disminución de la evapotranspiración, probablemente la humedad disminuye y las épocas secas comenzarían a tener una duración más prolongada (González Córdoba, 2021).

Conclusiones

La transformación del entorno se da principalmente por el aumento de las coberturas correspondientes a superficies de agua en 5067.37 ha, lo cual representa un 37.24% del área de estudio definida, este aumento obedece principalmente a la disminución de territorios agrícolas con un total de 3394.40 ha y bosques de galería con 1159.83 ha, por otra parte, las 26.87 ha restantes corresponden a un aumento de los territorios artificializados.

Debido a la transformación de las coberturas terrestres por la construcción de la represa dentro del área de estudio, la ET tuvo una disminución en los sitios en que la cobertura pasó de terrestre a acuática, pasó de valores que rondaban una ET entre 1250.09 kg/m^2 y 1443.13 kg/m^2 a valores entre 868.65 kg/m^2 y 945.95 kg/m^2 , este comportamiento se debe a que la ET es mayor en coberturas terrestres que tienen presencia de vegetación a coberturas acuáticas o suelo desnudo, tal como expone Li et al., (2021).

Al construir una represa se transforma el paisaje debido a la cantidad de área que debe ser llenada de agua para su funcionamiento, la ET no es la excepción, esta sufre una disminución considerable al no existir vegetación, pasando de valores entre 879.4 $Kg/m^2/año$ y 2062.1 $Kg/m^2/año$, a 710.5 $Kg/m^2/año$ después de la construcción. Además, debido a la no existencia de vegetación en la zona del embalse de la represa de Hidrosogamoso, la calidad de los píxeles en las imágenes del producto MOD16A3GF, también disminuye, ya que, se hace necesario correcciones por las condiciones atmosféricas que produce el cuerpo de agua artificial.

Recomendaciones

En estudios similares se recomienda tener en cuenta los valores de pixeles atípicos que son muy comunes en coberturas acuáticas. Como se observó en este estudio, las imágenes del producto MOD16A3GF comenzaron a presentar un comportamiento anormal desde que el área de estudio fue llenada con agua, se recomienda hacer una depuración estadística, de tal manera que el estudio tenga en cuenta información de calidad, de esta manera los resultados obtenidos no se verán afectados por valores independientes atípicos.

Como se observó en estudios previos los datos de ET potencial de MOD16A3GF pueden discrepar de los datos de ET real tomados de estaciones en la zona, por esto, al realizar un estudio sobre ET y clima de la región se recomienda realizar modelos estadísticos comparativos con datos de estaciones.

En cuanto a la presencia de valores atípicos también queremos recomendar que en futuros estudios se pueda implementar un sistema de control y seguimiento a la aparición de valores atípicos y disminución de ET, esto con el ánimo de tener disponible un insumo de mayor calidad para posibles Estudios de Impactos Ambiental que se deseen implementar en el área de estudio y que tengan en cuenta la mitigación de los impactos causados por la pérdida de ET.

Bibliografía

- Adhikari, P., Chakraborty, S., & Das, S. Kr. (2019). USE OF REMOTE SENSING DATA FOR EXPLORING POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION OVER GANGTOK. *International Conference on Advanced Computational and Communication Paradigms* (.
- Alvarado Barrientos, M. S., & Orozco Medina, I. (2017). Comparison of satellite-derived potential evapotranspiration (MOD16A3) with in situ measurements from Quintana Roo, Mexico. *IEEE xplore, 2016 IEEE 1er Congreso Nacional de Ciencias Geoespaciales (CNCG)*, 13-17.
- Brutsaert, W. (1982). *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. 1982.
- Degano, M. F., Rivas, R. E., Sanchez, J. M., Carmona, F., & Niclós, R. (2019). Assessment of the Potential Evapotranspiration MODIS Product Using Ground Measurements in the Pampas. *Congreso Bienal de Argentina IEEE 2018 (ARGENCON)*.
- Domingo, F., & Villagarcía, L. (2003). *¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: Estado actual y evolución*. 16.
- González Córdoba, Y. A. (2021). *Efectos de los cambios en la cobertura vegetal de la cuenca del Amazonas en la evapotranspiración regional: Análisis de simulaciones con el modelo de superficie Noah-MP*. 54.

- IBERDROLA. (2007). *ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN PEDRO II, PROVINCIA DE OURENSE* (p. 245)
[Administrativo]. https://www.eib.org/attachments/pipeline/20090168_eia_es.pdf
- IDEAM. (2021). *CAPAS GEO - IDEAM*. <http://www.ideam.gov.co/capas-geo>
- Li, M., Chu, R., Islam, A. R. Md. T., & Shen, S. (2021). Characteristics of surface evapotranspiration and its response to climate and land use and land cover in the Huai River Basin of eastern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 683-699. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10432-9>
- Mc Donald, J. E. (1961). On the ratio of evaporation to precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 42, 185-189.
- Montes, S. (2019, febrero 19). Las plantas hidroeléctricas representan 68% de la oferta energética en Colombia. *La Republica*.
<https://www.larepublica.co/especiales/efecto-hidroituango/las-plantas-hidroelectricas-representan-68-de-la-oferta-energetica-en-colombia-2829562>
- NASA. (2021). *MODIS Web*. MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.
<https://modis.gsfc.nasa.gov/>
- Osorio Rosado, C. A. (2021). *La Consulta popular ante los impactos ambientales de la construcción de Proyectos hidroeléctricos en Colombia. Estudio del Caso de la hidroeléctrica El Quimbo*. Universidad Católica de Colombia.
<file:///C:/Users/Laura/Zotero/storage/4GC2EEH3/Impactos%20ambientales%20de%20los%20proyectos%20hidroelectricos%20en%20Colombia.pdf>
- Padredin, Y. M., & Baquero Montoya, O. L. (2018). ESTIMACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN EL

VALLE DEL CAUCA Y SU RELACIÓN CON LA AMENAZA DE SEQUÍA METEOROLÓGICA, ENTRE LOS AÑOS 2000 AL 2015. 2018, 100.

Rivas, R., & Caselles, V. (2004). *A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing based surface temperature and local meteorological data*. 93, 68-76.

Roa Avendaño, T. (2016, julio 1). *Hidrosogamoso: Conflicto y resistencia*.

<https://www.semillas.org.co/es/hidrosogamoso-conflicto-y-resistencia>

Running, Steve, Mu, Qiaozhen, & Zhao, Maosheng. (2017). *MOD16A3 MODIS/Terra Net Evapotranspiration Yearly L4 Global 500m SIN Grid V006* [Data set].

<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A3.006>

Running, S. W., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2019a). *MOD16A3GF MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled Yearly L4 Global 500 m SIN Grid V006* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.

<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A3GF.006>

Running, S. W., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2019b). *User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS LAND Algorithm*.

Shuttleworth, W. J. (2007). *Putting the «vap» into evaporation*. 11, 210-244.

Tavera Amado, D. (2018). *Proyecto estratégico desarrollo integral embalse Topocoro* [Presentación]. Gobernación de Santander.

USGS. (2021). *EarthExplorer*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

USGS, & Earth Explorer. (2021). *LP DAAC - AppEEARS*.

<https://lpdaac.usgs.gov/tools/appeears/>

Wu, X., & Meng, D. (2016). *Analysis of Temporal and Spatial Characteristics about Surface Actual Evapotranspiration in Haihe River Basin Based on MODIS*. 16.

Zhao, W., Li, A., & Deng, W. (2013). *TIME SERIES EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION BASED ON MODIS/TERRA SATELLITE DATA OVER SOUTH ASIA*.