



**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL CUERPO DE AGUA DEL EMBALSE
TOMINÉ, EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA, PARA EL PERÍODO
1977 – 2023.**

Luis Eduardo Alba

Código: 11792019971

Elkin Francisco Moreno Landero

Código: 11792017701

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá DC. Colombia

2024

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL CUERPO DE AGUA DEL EMBALSE
TOMINÉ, EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA, PARA EL PERÍODO
1977 – 2023.**

**Luis Eduardo Alba
Elkin Francisco Moreno Landero**

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

Director:
Dr. Andrés Felipe Carvajal Vanegas

Universidad Antonio Nariño
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil
Bogotá DC. Colombia

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado _____,
cumple con los requisitos para optar al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Ciudad, Día Mes Año.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios, a mi madre Luz Mariana Alba, a mi hermana Lía Mariana Alba y a mis primas Carolina Castañeda y Killy Alba, quienes me motivaron a iniciar y finalizar exitosamente este camino académico.

Luis Eduardo Alba.

Agradezco a Alejo, Yaneth, Milena, Albeiro, Ma. Camila y Cristina, por la paciencia, el apoyo incondicional y la motivación que como familia siempre me brindaron.

A Hamilton Riaño Suárez por su asesoría y acompañamiento permanente durante la realización de este trabajo.

Elkin Moreno Landero.

CONTENIDO

1	RESÚMEN.....	8
2	ABSTRACT.....	9
3	INTRODUCCIÓN	10
4	OBJETIVOS.....	12
4.1	OBJETIVO GENERAL	12
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
5	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	13
5.1	MARCO TEÓRICO.....	13
5.1.1	Análisis Multitemporal.....	13
5.1.2	Cuerpos de agua.....	14
5.1.3	Sensores Remotos.....	16
5.2	ESTADO DEL CONOCIMIENTO	22
5.2.1	Contexto Nacional	22
5.2.2	Contexto Internacional	23
6	METODOLOGÍA	26
6.1	LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	26
6.1.1	Caracterización Climatológica	28
6.2	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	31
6.3	MATERIALES E INSUMOS	31
6.3.1	Imágenes Satelitales Landsat.....	31
6.3.2	Datos Hidrometeorológicos	32
6.3.3	Fotografías Aéreas IGAC	32
6.4	PROCEDIMIENTO	33
6.4.1	Obtención de Imágenes Satelitales	34
6.4.2	Selección de Bandas para Composición (<i>Composite Bands</i>).....	35
6.4.3	Fusionado de Banda Pancromática (<i>Pan-Sharpned</i>)	38
6.4.4	Corte de Área Útil.....	39
6.4.5	Rectificación del Sistema de Referencia	41
6.4.6	Digitalización de los Elementos a Analizar.....	41
6.4.7	Obtención de Fotografías Aéreas	43
6.4.8	Georreferenciación de Fotografías Aéreas	44
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
7.1	RESULTADOS	47

7.1.1	Comparación entre períodos de análisis	50
7.2	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS	60
8	CONCLUSIONES.....	65
9	RECOMENDACIONES.....	66
10	BIBLIOGRAFÍA.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Elementos conceptuales del marco teórico.	13
Figura 2:	Foto embalse de Tominé, con presencia de vegetación tipo buchón.	16
Figura 3:	Localización del área de estudio.	27
Figura 4:	Valores promedio mensuales de precipitación.	29
Figura 5:	Valores promedio mensuales de temperatura.	29
Figura 6:	Valores promedio mensual de brillo solar.....	30
Figura 7:	Valores promedio mensual de evaporación.....	30
Figura 8:	Procedimiento metodológico.....	33
Figura 9:	Selección del área de interés para búsqueda de imágenes satelitales.....	34
Figura 10:	Cuadro opciones de descarga de imágenes Landsat.....	35
Figura 11:	Reflectancia de materiales.....	36
Figura 12:	Banda 5 en imagen Landsat 8.....	37
Figura 13:	Selección de bandas para <i>Composite Bands</i>	37
Figura 14:	Resultado de <i>Composite Bands</i>	38
Figura 15:	Pánel creación de <i>Pan-Sharpned</i> en ArcMap.....	39
Figura 16:	Comparación imágenes con y sin <i>Pan-Sharpned</i>	39
Figura 17:	Selección del área útil de la imagen de satélite.	40
Figura 18:	Resultados corte área de interés de la imagen de satélite.....	40
Figura 19:	Reproyección al sistema MAGNA-SIRGAS Origen Nacional en ArcMap.....	41
Figura 20:	Digitalización de elementos.	42
Figura 21:	Descarga de fotografías aéreas del Geoportal IGAC.	43
Figura 22:	Fotografía aérea sin georreferenciar.....	44
Figura 23:	Proceso de georreferenciación de fotografías aéreas.	45
Figura 24:	Fotografías aéreas georreferenciadas.	45
Figura 25:	Digitalización elementos de las fotografías aéreas.....	46
Figura 26:	Superficie total del embalse por años de análisis.	48
Figura 27:	Tendencia de la superficie del embalse.....	50
Figura 28:	Precipitación total anual: estación Guatavita.	51

Figura 29: Caudales promedio anuales Río Aves y Río Siecha.....	51
Figura 30: Mapa comparativo de superficie período 1977 – 1987.	53
Figura 31: Mapa comparativo de superficie períodos 1977, 1985 y 1987.....	54
Figura 32: Mapa comparativo de superficie período 1987 – 1997.	55
Figura 33: Mapa comparativo de superficie período 1997 – 2007.	57
Figura 34: Mapa comparativo de superficie período 2007 – 2015.	58
Figura 35: Mapa comparativo de superficie período 2015 – 2023.	59
Figura 36: Mapa comparativo de superficie, todos los períodos de estudio.	61
Figura 37: Foto zona sur o cola del embalse de Tominé.	62
Figura 38: Foto zona centro-occidental del embalse de Tominé (isla principal).....	62
Figura 39: Fotos implementación de barreras físicas para contención de buchón.	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros técnicos misiones Landsat 1 a 4.....	18
Tabla 2: Parámetros técnicos misión Landsat 5.....	18
Tabla 3: Parámetros técnicos misión Landsat 7.....	19
Tabla 4: Parámetros técnicos misión Landsat 8.....	19
Tabla 5: Parámetros técnicos misión Landsat 9.....	20
Tabla 6: Imágenes Landsat empleadas.	31
Tabla 7: Insumos hidrometeorológicos utilizados.	32
Tabla 8: Fotografías aéreas empleadas.	32
Tabla 9: Parámetros para filtros de búsqueda de imágenes Landsat.	35
Tabla 10: Superficie del embalse por años de análisis.	47
Tabla 11: Porcentaje de cambios entre períodos de análisis.....	49
Tabla 12: Valores de caudal promedio anual.....	51

1 RESÚMEN

Como resultado del presente estudio, se determinó que el área del embalse de Tominé, localizado en el departamento de Cundinamarca, en Colombia, presentó importantes variaciones dentro del período comprendido entre 1977 y 2023. A través del procesamiento de imágenes satelitales Landsat de diferentes años y del empleo de fotografías aéreas de origen IGAC para el año 2007, se identificó y digitalizó el espejo de agua del embalse y las superficies cubiertas con vegetación acuática tipo buchón. El proceso de edición y análisis se adelantó a través del Software ArcMap 10.8.1.

Los resultados arrojaron los siguientes valores de área del embalse, para cada uno de los años de análisis: 2.978 hectáreas en 1977, 2.010 en 1987, 2.337 en 1997, 3.228 en 2007, 2.884 en 2015 y 2.905 hectáreas para el año 2023. De acuerdo con estos valores, se tiene que, a partir del primer año de estudio, el embalse presentó una disminución pronunciada de su superficie en un período corto de tiempo y luego un incremento paulatino durante períodos más largos. Así mismo, se encontró que el año con mayor extensión fue 2007, año en el cual también se calculó la mayor ocupación de buchón, con un 25,4% del total de la superficie del embalse.

Los cambios de la superficie del embalse estuvieron asociados principalmente al trasvase de aguas desde y hacia el río Bogotá y a los aportes recibidos por precipitación, en lo cual incidió el comportamiento de fenómenos de variabilidad climática interanual con El Niño y La Niña. Por su parte, el extremo sur o cola del embalse, la bahía sur-oriente o lugar donde se ubicaba el antiguo pueblo de Guatavita y el centro-occidente o sector de la isla principal, fueron las zonas que espacialmente presentaron las mayores variaciones por crecimiento o retroceso de la línea de costa del embalse.

Palabras clave: Embalse de Tominé, análisis multitemporal, imágenes de satélite Landsat, espejo de agua, Buchón.

2 ABSTRACT

The multi-teemporal Analysis of Tomine reservoir was made to found the variations in a long period of time, it was determined the area of Tominé reservoir, located in the department of Cundinamarca, in Colombia, presented important variations within the period between 1977 and 2023. with the processing of Landsat satellite images from different years and Through the use of aerial photographs of IGAC origin for the year 2007, the water mirror of the reservoir and the surfaces covered with aquatic vegetation (water hyacinth) were identified and digitized. The editing and analysis process was carried out through ArcMap 10.8.1 Software.

The results showed the following reservoir area values, for each of the years of analysis: 2,978 hectares in 1977, 2,010 in 1987, 2,337 in 1997, 3,228 in 2007, 2,884 in 2015 and 2,905 hectares for the year 2023. According With these values, it appears that, starting from the first year of the study, the reservoir showed a pronounced decrease in its surface in a short period of time and then a gradual increase over longer periods. Likewise, it was found that the year with the greatest extension was 2007, the year in which the greatest occupation of water hyacinth was also calculated, with 25.4% of the total surface of the reservoir.

The changes in the surface of the reservoir were mainly associated with the transfer of water to the Bogotá River and the contributions received by precipitation, which was influenced by the behavior of interannual climate variability phenomena like El Niño and La Niña. For its part, the southern end or tail of the reservoir, the south-eastern bay or place where the old town of Guatavita was located and the central-west or sector of the main island, were the areas that spatially presented the greatest variations due to growth or retreat of the reservoir's coastline.

Keywords: Tominé reservoir, multi-temporal analysis, Landsat satellite images, water mirror, water hyacinth.

3 INTRODUCCIÓN

Los estudios y análisis de cambio multitemporal de los cuerpos de agua son fundamentales para comprender los procesos hidrológicos, ambientales y socioeconómicos que ocurren en una determinada región. En el caso particular de Cundinamarca, un departamento ubicado en el centro de Colombia, la gestión adecuada de los recursos hídricos es crucial debido a su importancia tanto para el suministro de agua, como para el sostenimiento de sus ecosistemas naturales.

En las últimas décadas, Cundinamarca ha experimentado importantes cambios en su paisaje debido a diversos factores como la expansión urbana, la actividad agrícola, la deforestación y los efectos globales del cambio climático (Triana, 2023). Estos cambios pueden tener un impacto significativo en los cuerpos de agua tanto naturales como artificiales del departamento, alterando su tamaño, forma y calidad (Branco et al., 2012).

De esta forma, se busca analizar el cambio multitemporal del embalse de Tominé, un cuerpo de agua ubicado en los municipios de Sesquilé, Guatavita y Guasca en el centro del departamento de Cundinamarca. Ello con el fin de identificar su variación física desde el año 1977 hasta la actualidad y de entender las principales causas generadoras de esos cambios. Para la identificación de la variación de la superficie del cuerpo de agua se utilizaron imágenes de satélite y fotografía aéreas, seleccionadas en periodos de tiempo con intervalos de 10 años y 8 años, en las cuales se emplearon técnicas combinadas de procesamiento digital y de análisis espacial. Así mismo, para conocer las causas de dichos cambios, se utilizaron datos e información de variables hidroclimatológicas e información bibliográfica en la cual se documentan las intervenciones físicas y acciones de manejo que se han llevado a cabo en el embalse.

El acceso a datos históricos permite identificar patrones y tendencias a corto, mediano o largo plazo, y en el caso del embalse de Tominé ayuda a tener una mejor comprensión de los factores causales y las condiciones que han favorecido los cambios en su superficie; además de los impactos y problemáticas de tipo ambiental que ha enfrentado, entre ellas el aumento de carga orgánica en el agua del embalse y por la proliferación de plantas acuáticas. Así mismo, el monitoreo histórico proporciona una base de referencia para evaluar la efectividad de las medidas tomadas para mitigar esos impactos y problemáticas; por tanto, al comparar los datos actuales con los datos históricos, es posible determinar si las estrategias implementadas por las entidades o actores involucrados con la operación del embalse, entre ellas las adoptadas en el Plan de Manejo Ambiental (MINAMBIENTE, 2008) han tenido efectos positivos y si adicionalmente se requiere de otras acciones complementarias.

Los resultados de este estudio proporcionarán información importante para la gestión sostenible del recurso hídrico en este embalse y reforzará las metodologías que se vienen aplicando en los

análisis de evolución o transformación de humedales, ciénagas, lagunas y otros cuerpos de agua en Colombia. Así mismo, los hallazgos podrán ser utilizados por las autoridades locales y planificadores regionales para tomar decisiones informadas en relación con la conservación, la planificación y uso del suelo, especialmente en lo relacionado con el manejo del recurso hídrico.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar los cambios en la lámina de agua del embalse de Tominé, en el departamento de Cundinamarca, para el período comprendido entre el año 1977 y 2023.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Identificar el área del embalse de Tominé para los años 1977, 1987, 1997, 2007, 2015 y 2023.
- ✓ Determinar los porcentajes de cambio en el área del embalse de Tominé, dentro de los intervalos de tiempo definidos entre 1977-2023.

5 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

5.1 MARCO TEÓRICO

Figura 1: Elementos conceptuales del marco teórico.



5.1.1 Análisis Multitemporal

El análisis multitemporal es una técnica utilizada en la interpretación de imágenes de satélite, de fotografías aéreas y mapas, que pueden ser procesados a través de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estudiar cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo (Rao et al., 2009). Se utilizan imágenes o fotografías aéreas de diferentes fechas para comparar y analizar los cambios en la cobertura vegetal, la urbanización, el uso suelo, cuerpos de agua, entre otros elementos. Los datos recolectados en estos análisis pueden ser empleados para el monitoreo y manejo de recursos naturales, para tomar decisiones en la planificación urbana, para estudiar los cambios en la superficie terrestre que se puedan generar con el cambio climático o para la gestión ambiental (Ochoa, 2023).

Los estudios de análisis multitemporal en cuerpos de agua constituyen una herramienta de gran importancia al momento de analizar fenómenos que se han dado en diferentes temporalidades, dado que permiten identificar cambios relevantes que puedan sufrir los cuerpos de agua o que se presenten dentro de sus zonas de influencia. Generalmente enfatizan en la determinación de cambios de su superficie (extensión) así como en el análisis de los factores socio-económicos y ambientales que ejercen presión en dichas dinámicas de cambio (Godoy & González, 2017).

Ha sido muy frecuente el empleo de este tipo de análisis para la determinación y caracterización de cambios en cuerpos de agua asociados a sistemas de humedales, ciénagas, lagunas y embalses, tanto en Colombia como a nivel mundial. Los métodos empleados van desde la integración de datos hidrometeorológicos, combinados con información cartográfica, hasta el empleo de imágenes de sensores remotos y su procesamiento a través de software de herramientas SIG. Estos análisis han aportado numerosas metodologías e importantes elementos para el estudio de los ecosistemas relacionados con cuerpos de agua, para el manejo de infraestructuras asociadas a los mismos y para la gestión adecuada de los recursos, bienes o servicios que estos pueden proveer.

5.1.2 Cuerpos de agua

Un cuerpo o masa de agua es cualquier área que se encuentran en la superficie terrestre o incluso en el subsuelo (acuíferos, ríos subterráneos, etc.) tanto en estado líquido, como sólido (glaciares, casquetes polares) bien sean naturales o artificiales y que pueden ser de agua salada o de agua dulce (FCEA, 2020).

Los cuerpos de agua superficiales se pueden clasificar dentro de dos tipos: lóticos, que son aquellos que siempre están en movimiento hacia una dirección fija, como los ríos, quebradas, arroyos, canales o manantiales; y los lénticos, que permanecen estáticos o estancados, tales como los lagos, lagunas, humedales, pantanos, embalses o jagueyes.

Las masas de agua superficiales también se pueden diferenciar teniendo en cuenta cómo fue creado su lugar de depósito o de escorrentía. En este sentido, si el origen obedece a condiciones naturales corresponderá a un cuerpo de agua natural; o, por el contrario, si responde a acciones por parte de la intervención humana, corresponderá a un cuerpo de agua artificial, como es el caso de los embalses, jagueyes o canales de riego.

5.1.2.1 Embalses

Los embalses son áreas de cuerpos de agua artificiales, producto de la construcción de una presa sobre el lecho de un río o arroyo, la cual cierra parcial o totalmente su cauce (EMGESA, 2012) y que suelen tener diversos propósitos, como el abastecimiento de agua para consumo humano, la generación de energía eléctrica, el empleo para usos agropecuarios, para fines recreo-deportivos, entre otros (Franquet J., 2010).

Adicional a los anteriores propósitos, los embalses también se construyen con el objetivo de regular el caudal de un río o una cuenca hidrográfica, almacenando el agua de los períodos húmedos para utilizarlos durante los períodos más secos, así como para contener y atenuar los

caudales extremos de las crecidas, cumpliendo otra función de regulación de crecientes (EMGESA, 2012).

Teniendo en cuenta que los embalses comprenden un diseño y construcción humana, y que su operación depende de la disponibilidad del recurso hídrico, pueden verse afectados a lo largo del tiempo por diversos factores, entre ellos los climáticos. Un prolongado periodo de sequía o la ocurrencia del fenómeno de El Niño, que en el territorio colombiano se manifiesta principalmente a través de escasos volúmenes de precipitación, condicionan una posibilidad de reducción de la superficie de estos cuerpos de agua. O, al contrario, largos períodos lluvia o la caída de grandes volúmenes de precipitación, que pueden estar asociados a fuertes temporadas lluviosas o a fenómenos de variabilidad climática interanual como La Niña, pueden incidir en el aumento de la superficie de los embalses. En ambos casos, bien por la reducción del volumen del cuerpo de agua o por un aumento de su superficie, pueden poner en riesgo la operación de los mismos y afectar sus demás usos asociados.

El Cambio Climático al cual asistimos hoy en día, también implica un reto para el funcionamiento y mantenimiento de los embalses, debido a la incertidumbre en el comportamiento de los futuros patrones hidro-meteorológicos y la amenaza global que este fenómeno representa (Pham-Duc et al., 2020). Lo anterior, asociado a los usos del suelo, las intervenciones hidráulicas y demás condiciones derivadas de otros factores socio-ambientales, pueden constituir elementos adicionales para la afectación de la calidad del agua, la transformación de los espacios y para el aumento o disminución de los espejos de agua (Rey D., 2020).

Dentro de esta serie de afectaciones y de amenazas en el funcionamiento y comportamiento de los cuerpos de agua, también se tiene la presencia u ocupación de vegetación con capacidad de eutrofización, de la cual el buchón (*Eichhornia crassipes*) es la más común en Colombia y dentro del embalse de Tominé (Figura 2). Esta especie invasora presenta alta competitividad con especies nativas, un rápido crecimiento y reproducción, provocando la formación de densas colonias flotantes que disminuyen los flujos del agua y la disponibilidad de oxígeno. Dentro de sus impactos, además de cubrir los espejos de agua, también puede generar la asfixia de la vegetación nativa, crear condiciones favorables para la reproducción de vectores de enfermedades y causar otros problemas de tipo ambiental en lagunas, presas y canales de riego (CORPOBOYACÁ, 2020).

Entender las dinámicas hidro-climáticas naturales e identificar los procesos antrópicos, sin duda ayudarán en el adecuado manejo de los embalses y en una planeación efectiva que no afecte significativamente la provisión de sus servicios, sus funciones o sus usos derivados; y en ello contribuyen indiscutiblemente los estudios o análisis de tipo multitemporal, que como ya se indicó, constituyen una herramienta de gran importancia al permitir identificar, caracterizar y comparar

los cambios presentados y aportar información para estimar tendencias, futuros comportamientos y para la toma informada de decisiones.

Figura 2: Foto embalse de Tominé, con presencia de vegetación tipo buchón.



Como también se indicó, el empleo de insumos como imágenes de sensores remotos, de datos geospaciales y su procesamiento a través de herramientas SIG, integran elementos esenciales para obtener resultados a la hora de determinar cambios, variaciones de áreas y afectaciones espacio-temporales a este tipo de cuerpos de agua.

5.1.3 Sensores Remotos

Los sensores remotos o teledetección son sistemas o instrumentos para captar información de un objeto a distancia, bajo la forma de fotografías, registros eléctricos, magnéticos, perfiles u otras formas de datos, y así identificar y definir las características físicas o biológicas de los objetos (Vargas C., 2008). En un sentido amplio, la teledetección, además de englobar los procesos de toma de imágenes o de captura de información de los objetos sin entrar en contacto con ellos, también involucra su posterior tratamiento e interpretación (Chuvieco S., 2008).

La teledetección, al capturar los rasgos físicos de elementos en la superficie terrestre, basa su proceso en la medición de radiación reflejada y emitida por cada uno de los componentes. Esos elementos como rocas, suelos, vegetación, agua, etc., así como las construcciones urbanas, vías, entre otras de origen antrópico, absorben, reflejan o emiten una cantidad de energía que depende

de la longitud de onda, la intensidad del rayo electromagnético o las características de absorción de los objetos (Vargas C., 2008).

Las imágenes satelitales y fotografías aéreas, como uno de los productos más representativos de la teledetección, proporcionan información muy útil para diferentes tipos de análisis. El carácter multispectral y digital de la información registrada por los sensores remotos ha dado lugar a los estudios espectrales que permiten establecer diferencias entre los múltiples elementos de la superficie terrestre. Otro factor importante es la regular periodicidad con la cual se captura y registra este tipo de información, brindando importantes insumos para abordar el análisis de fenómenos que presentan comportamientos dinámicos (SEGEMAR, 2019).

En el presente estudio, para la determinación y análisis de la variación de la superficie del embalse de Tominé, se tendrán como insumos principales imágenes de tipo satelital y fotografía aéreas tomadas a partir de cámaras fotogramétricas análogas. Por ello, a continuación, se describen las principales características técnicas y conceptuales asociadas a la fotointerpretación y a los programas satelitales que dieron lugar a la proporción de los materiales de sensores remotos utilizados.

5.1.3.1 Características de las imágenes satelitales Landsat

La misión Landsat corresponde a un programa satelital de observación de la tierra operado por los Estados Unidos y destinado principalmente al monitoreo coberturas vegetales, para aplicaciones geológicas y para el estudio de los recursos terrestres. Como tal, Landsat (*LAND: tierra y SAT: satélite*) fue el primer satélite enviado por este país al espacio, denominado inicialmente ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*) y posteriormente adoptó el conocido nombre Landsat (INEGI, 2023).

La misión ha sido conformada por 8 satélites, estando a cargo de su operación y mantenimiento la NASA (*Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio*) y de la producción y comercialización de imágenes el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos). Las imágenes, dependiendo del satélite y sensor, pueden estar conformadas de 4 hasta 11 bandas, incluyendo un canal pancromático, rango visible, infrarrojo y térmico. Así mismo, una resolución espacial que varía entre 15, 30, 60 y 120 metros, lo cual se puede considerar dentro de un rango de resoluciones moderadas o intermedia (INEGI, 2023; IGAC-CIAF, 2013).

Las siguientes son las características específicas de la costelación de satélites Landsat, destacando principalmente sus bandas por modo o canal espectral, resolución espacial y temporalidad:

- *Misiones Landsat 1 a 4*

Corresponde a los satélites 1, 2, 3 y 4 lanzados el 23 de julio de 1972, el 22 de enero de 1975, el 5 de marzo de 1978 y el 16 de julio de 1982 respectivamente. Estos satélites contaban con una órbita circular y sincrónica con el sol, a una altura aproximada de 920 km. y completaban una órbita alrededor de la tierra cada 103 minutos con 27 segundos. Su sistema de cámaras fue diseñado y pensado para capturar la franja del espectro electromagnético visible y una porción del infrarrojo, su resolución espacial por pixel es de 80 por 80 metros y su temporalidad de paso por un mismo sitio sobre la superficie de la tierra se daba sobre los 18 días. Ver Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros técnicos misiones Landsat 1 a 4.

Modo espectral	Resolución	Bandas		Temporalidad
Multiespectral	80 metros	Banda 4 - Azul	0.5 – 0.6 μm	18 días
		Banda 5 - Verde	0.6 – 0.7 μm	
		Banda 6 - Rojo	0.7 – 0.8 μm	
		Banda 7 - Infrarrojo cercano 1	0.8 – 1.1 μm	

Fuente de datos: (INEGI, 2023).

μm : Micrómetros.

- *Misión Landsat 5*

Satélite lanzado el 1 de marzo de 1984. Contaba con una temporalidad de 16 días, un periodo orbital (tiempo que tarda en completar una órbita alrededor de la tierra) de 98.9 minutos y estaba a una altura aproximada de 705 km. Sus imágenes poseen una resolución espacial de 30 por 30 metros en su modo multiespectral y una resolución de 120 por 120 metros en su modo termal. Ver Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros técnicos misión Landsat 5.

Modo espectral	Resolución	Bandas		Temporalidad
Multiespectral	30 metros	Banda 1 - Azul	0.45 – 0.52 μm	16 días
		Banda 2 - Verde	0.52 – 0.60 μm	
		Banda 3 - Rojo	0.63 – 0.69 μm	
		Banda 4 - Infrarrojo cercano 1	0.76 – 0.90 μm	
		Banda 5 - Infrarrojo cercano 2	1.55 – 1.75 μm	
		Banda 7 - Infrarrojo medio	2.08 – 2.35 μm	
Termal	120 metros	Banda 6 - Infrarrojo térmica	10.4 – 12.5 μm	

Fuente de datos: (INEGI, 2023).

- *Misión Landsat 7*

Fue un satélite lanzado el 15 de mayo de 1999, a una altura de 705 kilómetros. Poseía una órbita helio-sincrónica, motivo por el cual siempre pasaba a la misma hora por un mismo lugar. Su temporalidad era de 15 días y capturó imágenes con una resolución espacial de 30 metros por 30 metros en su modo multiespectral, y a partir de 2002 incorporó el canal pancromático (PAN) para obtener resoluciones de hasta 15 metros. Fue la primera misión Landsat en incorporar la banda PAN, posibilitando escalas de hasta 1:25.000, pero algunas imágenes presentaron fallas por bandeado, lo que conllevó a pérdida significativa de información en muchas de ellas. Ver Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros técnicos misión Landsat 7.

Modo espectral	Resolución	Bandas		Temporalidad
Multiespectral	30 metros	Banda 1 - Azul	0.45 – 0.52 μm	15 días
		Banda 2 - Verde	0.52 – 0.60 μm	
		Banda 3 - Rojo	0.63 – 0.69 μm	
		Banda 4 - Infrarrojo cercano 1	0.76 – 0.90 μm	
		Banda 5 - Infrarrojo cercano 2	1.55 – 1.75 μm	
Termal	60 metros	Banda 7 - Infrarrojo medio	2.08 – 2.35 μm	
		Banda 6 - Infrarrojo térmica	10.4 – 12.5 μm	
Pancromática	15 metros	Banda 8 - Pancromática	0.5 – 0.9 μm	

Fuente de datos: (INEGI, 2023).

- *Misión Landsat 8*

Satélite lanzado el 11 de febrero de 2013, el cual cuenta con una órbita sincrónica con el sol a una altitud de 705 Km. Su periodo orbital es de 98.9 minutos y revisita un mismo punto sobre la superficie de la tierra cada 16 días. Captura imágenes con una resolución espacial en el modo multiespectral de 30 por 30 metros, de 15 por 15 metros en el modo pancromático y de 100 por 100 metros en el modo termal. Este satélite se encuentra operativo en la actualidad. Ver Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros técnicos misión Landsat 8.

Modo espectral	Resolución	Bandas		Temporalidad
Multiespectral	30 metros	Banda 1 - Costera	0.43 – 0.45 μm	16 días
		Banda 2 - Azul	0.45 – 0.51 μm	
		Banda 3 - Verde	0.53 – 0.59 μm	
		Banda 4 - Rojo	0.63 – 0.67 μm	

		Banda 5 - Infrarrojo cercano	0.85 – 0.88 μm	
		Banda 6 - Infrarrojo de onda corta	1.57 - 1.65 μm	
		Banda 7 - Infrarrojo de onda corta 2	2.11 – 2.29 μm	
		Banda 9 - Cirrus	1.36 – 1.38 μm	
Termal	100 metros	Banda 10 - TIRS 1	10.60 – 11.19 μm	
		Banda 11 - TIRS 2	11.50 – 12.51 μm	
Pancromática	15 metros	Banda 8 - Pancromática	0.50 – 0.68 μm	

Fuente de datos: (IGAC-CIAF, 2013).

TIRS: Thermal Infrared Sensor.

- *Misión Landsat 9*

Es el último satélite de la serie Landsat, puesto en órbita el 27 de septiembre de 2021 a una altura de 705 kilómetro y busca continuar con el papel de análisis y estudio de las diferentes coberturas de la tierra y como apoyo para la gestión de recursos naturales. Tiene prevista una vida útil de 5 años, con una órbita helio-sincrónica y un periodo de revisita a un mismo punto sobre la superficie de la tierra cada 8 días. Sus bandas conservan las características del satélite Landsat 8, con resoluciones espaciales de 30 metros en el visible (multiespectral), pancromática de 15 metros y termal de 100 metros (ver Tabla 5). Pero a diferencia de Landsat 8, introduce mejoras en los instrumentos OLI 2 y TIRS 2 para optimizar la captura de datos provenientes de cuerpos de agua, de humedad del suelo y vegetación. Así mismo, la resolución radiométrica pasa de 12 a 14 bits (NASA, 2023).

Tabla 5: Parámetros técnicos misión Landsat 9.

Modo espectral	Resolución	Bandas		Temporalidad
Multiespectral	30 metros	Banda 1 - Costera	0.43 – 0.45 μm	8 días
		Banda 2 - Azul	0.45 – 0.51 μm	
		Banda 3 - Verde	0.53 – 0.59 μm	
		Banda 4 – Rojo	0.63 – 0.67 μm	
		Banda 5 - Infrarrojo cercano	0.85 – 0.88 μm	
		Banda 6 - Infrarrojo de onda corta	1.57 - 1.65 μm	
		Banda 7 – Infrarrojo de onda corta 2	2.11 – 2.29 μm	
		Banda 9 - Cirrus	1.36 – 1.38 μm	
Termal	100 metros	Banda 10 - TIRS 1	10.60 – 11.19 μm	
		Banda 11 - TIRS 2	11.50 – 12.51 μm	
Pancromática	15 metros	Banda 8 - Pancromática	0.50 – 0.68 μm	

Fuente de datos: (NASA, 2023).

TIRS: Thermal Infrared Sensor.

5.1.3.2 Características de las fotografías aéreas

Una fotografía aérea se obtiene por la realización de un vuelo fotogramétrico, es decir, un vuelo en el que un aeroplano sobrevuela una zona tomando repetidas fotos para capturar toda una superficie de estudio, en un determinado instante de tiempo.

La fotografía es la representación cónica de la realidad y, por lo tanto, está afectada por los diferentes tipos de perspectiva, a las que hay que sumar las deformaciones del relieve del terreno, la falta de verticalidad de la toma (objetos de considerable altura como edificios y árboles aparecerán abatidos) y las distorsiones propias del objetivo de la cámara empleada.

La ortofotografía es un producto cartográfico resultante del tratamiento digital de fotografías aéreas, mediante el cual se corrigen todas las deformaciones anteriormente referidas y se le otorga un rigor geométrico equivalente a un mapa (IECA, 2014).

Si bien la definición de fotografía aérea es amplia, las imágenes aéreas resultantes se pueden clasificar en dos categorías, una vertical y otra oblicua. Las fotografías aéreas verticales son aquellas que se toman directamente por encima de la función objetivo y las oblicuas son las que se toman manualmente en un ángulo (a menudo alrededor de 45 grados) pero personalizables dependiendo de la característica (Blog del Fotógrafo, 2010).

Las fotografías aéreas se realizan tradicionalmente con cámaras especiales llamadas cámaras fotogramétricas. Para dicho proceso los vuelos deben estar perfectamente planificados, teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas (debe haber una buena luminosidad, transparencia atmosférica, poca nubosidad, etc.), la altura del vuelo (que determinará la escala de las fotos), el número de pasadas, el número de fotos en cada pasada, el intervalo de tiempo entre dos fotogramas, el material, el área a fotografiar, la hora más conveniente, entre otros factores.

Como resultado del vuelo, la fotografía aérea vertical resultante tiene que estar asociada con las fotos de alrededor, mostrando un solapamiento horizontal (también conocido como traslape o sobreposición lateral) que varía entre el 40% y el 60% y un solapamiento vertical de entre el 20% y el 40%. Este solapamiento es imprescindible para asegurar la visión estereoscópica y para que las fotografías aéreas puedan ser transformadas en ortofotografías.

En general, en las fotografías aéreas la escala puede variar de 1:1.000 a 1:100.000 y es un factor muy importante puesto que determina el uso de las fotos. Las escalas pequeñas de 1:100.000 a 1:60.000 sirven básicamente para reconocer el terreno y su detalle es muy limitado. Para análisis de usos del suelo, de grandes cuerpos de agua o para estudios geológicos, se usan imágenes con escalas entre 1:60.000 y 1:30.000. Mientras que las imágenes a gran escala (superiores a 1:10.000) poseen un gran detalle y son muy útiles para la delimitación de parcelas o para la realización de

inventarios forestales. Con imágenes con escalas mayores al 1:5.000 ya es posible diferenciar árboles individualmente y hacer estudios muy precisos (Díaz A., 2011).

En Colombia, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) es la entidad con mayor tradición y experticia en la toma, procesamiento y elaboración de productos derivados de fotografías aéreas. Las mismas han sido destinadas principalmente para la elaboración y actualización de la cartografía base oficial nacional, pero también son insumo para la generación de ortofotomapas, espaciomapas, ortoimágenes y como proveedoras de datos para la implementación de catastro multipropósito y para la elaboración de Planes de Ordenamiento Territorial. Son aerofotografías de tipo vertical, con diferentes escalas y temporalidad, y muchas se encuentran dispuestas digitalmente en un Banco Nacional de Imágenes administrado por este mismo instituto.

5.2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

5.2.1 Contexto Nacional

Dentro de la búsqueda de estudios geoespaciales, con aproximación a análisis de cuerpos de agua que presentan comportamientos caracterizados por intervención antrópica y con importantes cambios históricos del nivel de su volumen, se tuvo en cuenta el estudio realizado por (Rey D., 2020), correspondiente a un análisis multitemporal del área de la laguna de Tota, en el departamento de Boyacá, para el periodo 1989 - 2019. Esta investigación determina una disminución en el área del espejo de agua de la laguna, producto del desarrollo de diferentes actividades socioeconómicas en la región, principalmente la siembra de cultivos de papa y cebolla, sumado a la fuerte intervención de las diferentes coberturas y ecosistemas. Para el estudio se empleó un método automatizado, haciendo uso de dos imágenes satelitales, una de la misión Landsat 5 para el año 1989 y otra Landsat 8 para el año 2019, las cuales se procesaron mediante una clasificación supervisada en los Software Erdas 2014 y ArcGis 10.5. El análisis multitemporal determinó que la lámina de agua de la laguna, a lo largo de 30 años, presentó una mayor variación en algunos sectores, principalmente en los costados norte y sur, y sumó una reducción total de 4.1 km².

Así mismo, se referenció el trabajo realizado por (Acosta R. & Morales F., 2021) relacionado con un análisis espacio-temporal del complejo cenagoso del Bajo Sinú en el departamento de Córdoba, tomando las épocas secas de los periodos 2014, 2017 y 2020. Este complejo, considerado uno de los espejos de agua natural más importantes del departamento, viene presentado una disminución de su área en los últimos años. Para este análisis usaron imágenes Landsat 8, realizando procesos de clasificación supervisada en los softwares Erdas Imagine 2014 y ArcMap 10.7. Como resultado, luego de identificar el espejo de agua en cada periodo y de realizar una comparación entre los mismos, evidenciaron una disminución del complejo cenagoso a partir del año 2014 (6.126,1 ha),

reduciéndose en 2017 a 4.871,7 ha y en 2020 a 3.840 ha, siendo una reducción del 37% entre el primer y último período. Este estudio fue base fundamental para determinar la selección de insumos relacionados con un mismo período climático (en este caso para periodos secos).

Así mismo, se tuvo en cuenta un ensayo de grado del año 2021, correspondiente a un análisis multitemporal del espejo de agua del Embalse del Muña en el municipio de Sibaté, Cundinamarca, donde uno de sus propósitos fue usar imágenes satelitales y emplear herramientas SIG para determinar cambios espacio-temporales del cuerpo de agua y analizar las problemáticas ambientales asociadas al mismo. En este caso, emplearon imágenes de satélite Sentinel para determinar cuánto varió el espejo de agua durante los años 2015, 2018 y 2021, mediante técnicas de clasificación no supervisada. Los resultados mostraron una disminución del espejo de agua del 4.74% entre 2015 y 2018, atribuido a posibles acciones de dragado y retiro de buchón; mientras que para 2021 el área aumento respecto al año 2015 en un 3.57%. El estudio recomienda una descontaminación del río Bogotá, a través de la ampliación de la PTAR Salitre y de la construcción de la planta Canoas, para que el abastecimiento a este embalse sea de aguas tratadas y descontaminadas (Ruiz C., 2021).

Otro estudio de caso a nivel nacional, en el cual se tuvo en cuenta el comportamiento bimodal de la precipitación y de variación de cuerpos de agua, es la investigación de (Reyez Mendoza, 2023). Comprende un análisis multitemporal del espejo de agua de la ciénaga de Zapatosa, ubicada entre los departamentos del Cesar y Magdalena, durante el periodo 2015 – 2017 y 2021. Teniendo como contexto la problemática socio-ambiental que se ha venido desencadenando en los últimos años en las zonas contiguas a los espejos de agua de este complejo, la metodología utilizada emplea la comparación de imágenes satelitales Landsat 8, las cuales fueron procesadas mediante los softwares Erdas Imagine y ArcGis Pro. Como resultado para los periodos lluviosos, en 2015 se determina un área de 34.682 ha, unas 50.760 has para 2017 y 46.646 has para 2021, determinando un aumento del 34,50% entre el primer y último período. Así mismo, para la temporada seca, se determina un aumento del 15,17% entre el año 2015 y 2021.

5.2.2 Contexto Internacional

A nivel internacional y como aproximación a los análisis de la variación de cuerpos de agua, se tuvo en cuenta la metodología de investigación aportada en el estudio de uso de sensores remotos para la estimación de la pérdida de agua de los lagos Tushka en Egipto en 2008. En esta investigación:

"... la modelización de la pérdida de agua para los lagos Tushka requirió varios tipos de datos de diferentes fuentes. Se adquirieron y procesaron tres imágenes ASTER de febrero de 2002 y cuatro imágenes SPOT-4 de febrero de 2006 para delinear las áreas de superficie de los lagos. ... Dado que la reflectancia del agua es casi nula en las bandas infrarrojas reflectantes, y la mayoría de las

coberturas terrestres son de mayor reflectancia ... Puede surgir incertidumbre ya que hay píxeles de zonas mixtas y de transición entre la tierra y el agua que residen entre los picos, y es difícil encontrar el valor exacto del umbral. Sin embargo, el umbral se fijó en todas las imágenes para minimizar los errores en la estimación del área de la superficie de los lagos en las diferentes fechas dadas" (Bastawesy, Khalaf, & Arafat, 2008).

En el anterior estudio se empleó una amplia variedad de imágenes satelitales y se clasificaron las áreas para su respectiva digitalización, usando como punto de partida los valores de pixel acorde con la reflectancia del terreno. A partir de esta investigación se tuvo una referencia para determinar errores en el presente estudio, como en el caso de algunos valores de pixel que al estar en el umbral entre dos tipos de coberturas (por ejemplo, entre agua y tierra) presentan dificultades para su identificación y clasificación al momento del proceso de digitalización.

Otro estudio de referencia fue el correspondiente al monitoreo del lago Ohrid en la República de Macedonia, a partir del uso de imágenes MERIS y Landsat y realizado por (Stefouli & Charou, 2012). Como propósito, los autores ponen de manifiesto la importancia del uso de la teledetección para la investigación, monitoreo y análisis multitemporal en los sistemas lacustres, sobre todo para aquellos ubicados en áreas remotas y así poder proporcionar información necesaria para guiar a los tomadores de decisión. Como parte del análisis emplearon imágenes MERIS/ENVISAT para extraer parámetros de calidad del agua del lago, e imágenes Landsat (con temporalidad de 25 años) para realizar los análisis de hidráulica y extensión. Como resultado, aportaron una base de datos con información valiosa para evaluar y estimar cambios de los cuerpos de agua y de sus áreas adyacente, además de una metodología de análisis que puede ser replicada en ambientes similares.

En este mismo sentido, también se puede referenciar el estudio realizado para el lago Chad sobre su dinámica hidrológica bajo el contexto del actual cambio climático (Pham-Duc et al., 2020). En este se logra determinar una estabilidad y recuperación estacional de la extensión y volumen de este lago ubicado en el África sub-Sahariana (Sahel). Este cuerpo de agua, durante la década de 1980 vio reducir su tamaño en más del 90%, poniendo en peligro el abastecimiento de agua y la provisión alimenticia para aproximadamente 50 millones de personas, y en riesgo la biodiversidad y ecosistemas únicos presentes en esta parte del continente africano.

Los autores del anterior estudio, utilizando un enfoque multi satélite o multi sensor, cuantificaron las variaciones del lago Chad y analizaron la variabilidad del ciclo hidrológico en la región, encontrando que la extensión del cuerpo de agua se ha estabilizado durante las últimas dos décadas. Para reconstruir la extensión y determinar el nivel del agua superficial combinaron información de imágenes ópticas MODIS, junto con altimetría satelital de las misiones Topex-Poseidon, Jason 1-2-3, ENVISAT y SARAL. Esta combinación de productos les permitió comparar de forma más eficiente la superficie de aguas abiertas frente a las superficies cubiertas por vegetación, lo cual

siempre ha sido complejo de diferenciar a través de técnicas de teledetección en cuerpos de agua poco profundos.

Otro estudio con una metodología similar al caso de análisis del embalse de Tominé fue el adelantado para el lago Prespa, al norte de Macedonia, en 2022. Acorde con la información de los investigadores, Prespa es un lago de origen tectónico y relativamente poco profundo, que para el período 1951-2008 disminuyó 8 metros verticalmente, pasando de una cota de altitud de 852 metros a una de 844 metros. Sin embargo, después de 2008 identificaron una leve estabilización y recuperación de su nivel, pasando a una cota de 847 metros para septiembre de 2021. Entre las complejas y múltiples causas de la disminución, los resultados teorizan sobre una posible combinación de factores, entre ellos el cambio climático, la reducción por aporte de ríos tributarios y el incremento en la extracción de agua para riego. Para la identificación de los cambios emplearon una metodología aplicada, a partir de la comparación de imágenes combinadas y multibanda y en la cual fue fundamental el análisis de variables como la reflectancia del terreno y el empleo de índices como el NDVI (Soria & Apostolova, 2022).

6 METODOLOGÍA

6.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El cuerpo de agua del embalse de Tominé se ubica en el departamento de Cundinamarca, sobre la cuenca alta del río Bogotá, entre los municipios de Sesquilé, Guatavita y Guasca, a una distancia aproximada de 50 kilómetros al noreste de la ciudad de Bogotá D.C. (ver Figura 3). Administrativamente, Guatavita y Sesquilé pertenecen a la provincia de Sabana Norte y Guasca a la provincia del Guavio.

El embalse empezó su construcción en el año 1959 y entró en operación en 1962. A febrero de 2023 contaba con un perímetro de 53,3 km y una superficie de 2.905 ha., así como una capacidad almacenada de 690,5 millones de metros cúbicos de agua. Por su parte, el área operativa del mismo es de 4.888 hectáreas, la cual se divide en dos zonas de manejo (MINAMBIENTE, 2008), así:

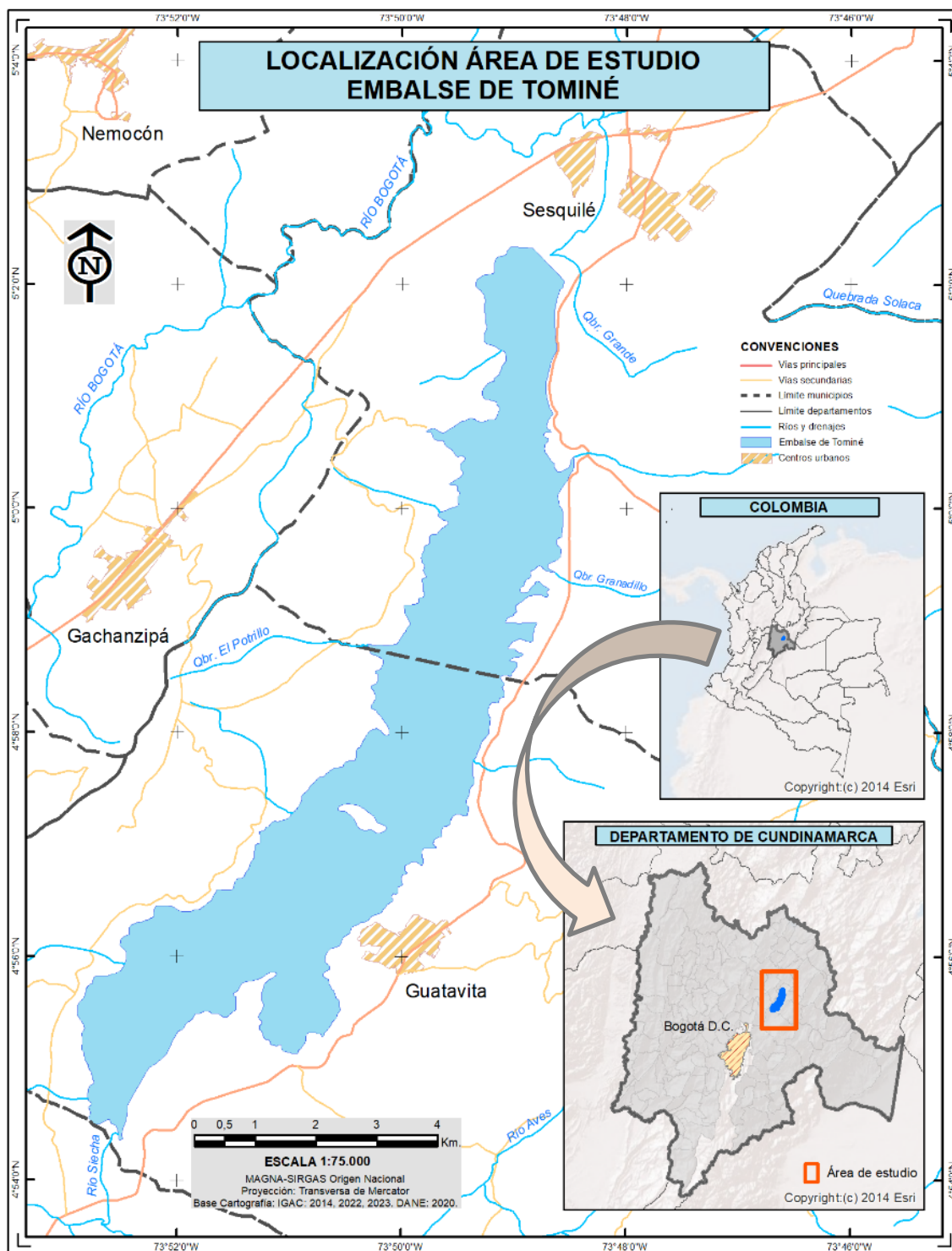
- *Área Operativa Inundable (AOI)*: la cual depende del volumen de agua almacenado por la operación del embalse y se ubica entre el nivel mínimo técnico (cota 2.566,63 m.s.n.m.) y la cota máxima de inundación (2.598,38 m.s.n.m.).
- *Área Operativa No Inundable (AONI)*: que no depende del volumen de agua almacenado por la operación del embalse y se ubica entre la cota máxima de inundación (2.598,38 m.s.n.m.) y los límites prediales del Grupo de Energía Bogotá. Tiene un área aproximada de 1.247 ha.

El presente estudio solo tendrá en cuenta el área física del cuerpo de agua, es decir, su Área Operativa Inundable (AOI), sin tener en cuenta los niveles mínimos o máximos.

La entidad encargada de su operación es el Grupo de Energía de Bogotá (GEB) la cual en sus inicios planeó el embalse para generar energía eléctrica, pero la vida útil para ese uso original como fuente de generación continua ya se cumplió (CAR; Ecoforest; Planeación Ecológica Ltda., 2006). Actualmente el embalse tiene una función multipropósito, siendo su principal uso el almacenamiento de aguas provenientes tanto del río Tominé (confluencia de los ríos Siecha, Aves y Chipatá) como del bombeo de los caudales excedentes de la cuenca alta del río Bogotá. Adicionalmente y según lo contemplado en el Plan de Manejo Ambiental Embalse (MINAMBIENTE, 2008) cumple otras funciones, entre ellas las de regulación hídrica del caudal de la cuenca media de río Bogotá, el suministro de agua al mismo río para reducir concentración de contaminantes y mejorar la potabilización que se lleva a cabo en la planta de Tibitoc; además de proporcionar agua para consumo doméstico (tanto para las poblaciones locales como para el Distrito Capital), para riego y para otras demandas agropecuarias. Así mismo y a partir de la entrada en operación del sistema de interconexión eléctrica a nivel nacional, el embalse pasa a ser

una reserva de potencial hidro-energético, disponible ante contingencias o posibles eventos de sequía extrema.

Figura 3: Localización del área de estudio.



El cuerpo de agua hace parte de la denominada subcuenca del embalse Tominé o del río Siecha, la cual, a su vez, pertenece a la cuenca del río Bogotá. A nivel de ordenamiento ambiental, la subcuenca hace parte de dos jurisdicciones: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) en los municipios de Guatavita y Sesquilé, con un área aproximada de 19.361 hectáreas; y Corporación Autónoma Regional del Guavio (CORPOGUAVIO) en el municipio de Guasca, con un área aproximada de 17.932 hectáreas (CAR; Ecoforest; Planeación Ecológica Ltda., 2006).

Acorde a la caracterización física de la subcuenca, esta presenta una forma alargada, con drenaje superficial rápido y un tiempo de concentración de 598 minutos, lo cual puede considerarse como un tiempo de concentración alto (Betancourt & Garnica, 2017). El perímetro de la misma es de aproximadamente 99 kilómetros y su cauce principal, tomado como el de mayor longitud y caudal (Río Siecha) posee una extensión de 41 kilómetros.

El área del embalse y de la subcuenca en general, se encuentra interconectada con la capital de la República y con los demás centros poblados del Altiplano Cundiboyacense por el eje vial principal de la Carretera Central del Norte y por un anillo vial que circunda el cuerpo de agua y que comunica a las cabeceras municipales de Sesquilé, Guatavita y La Calera. Esta ubicación estratégica y el paso de estos sistemas viales han permitido un importante desarrollo socioeconómico y la potenciación del área dentro de los ámbitos turísticos y ambientales.

Dentro de sus actividades y vocación, el municipio de Sesquilé se destaca por su producción agropecuaria y minera, además de ofrecer recursos y servicios tanto ambientales como turísticos (Concejo Municipal de Sesquilé, 2020). El municipio de Guasca destaca dentro de sus renglones económicos más importantes a las actividades agrícolas, ganaderas, piscícolas, la industria floricultora y al turismo de naturaleza. Por su parte, el municipio de Guatavita se caracteriza principalmente por sus actividades ecoturísticas, asociadas tanto al embalse como a sus áreas de influencia. También es importante destacar el uso del embalse para la navegación, la práctica de deportes náuticos y la presencia en su rivera de clubes asociados a estas actividades.

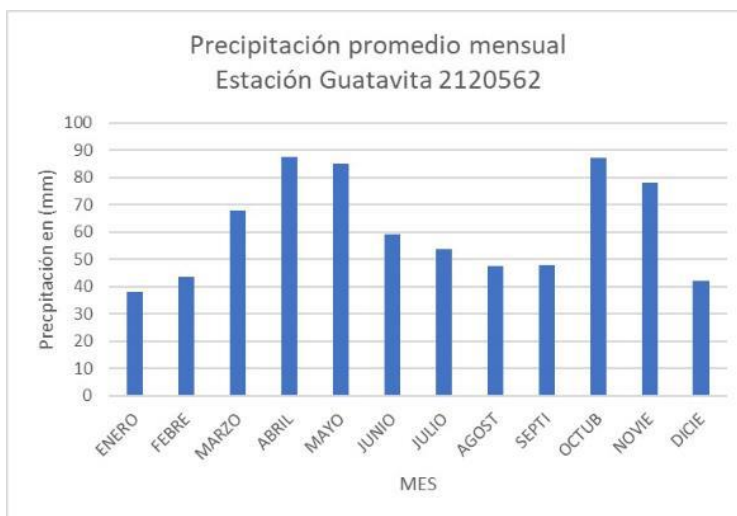
6.1.1 Caracterización Climatológica

- *Precipitación*

El régimen climático del área de estudio se caracteriza por tener un comportamiento bimodal de precipitación, con dos períodos de valores máximos, alternados con otros dos períodos de valores mínimos. Los períodos de mayor precipitación comprenden los meses de marzo a mayo y de octubre a noviembre, mientras que los meses de diciembre a febrero y de junio a septiembre comprenden los períodos de menor precipitación o de época seca (Figura 4). Teniendo como referencia la estación climatológica Guatavita, la cual se puede considerar como representativa

para la parte baja de la subcuenca, el promedio anual de precipitación para el área de influencia del embalse es de 737 milímetros.

Figura 4: Valores promedio mensuales de precipitación.

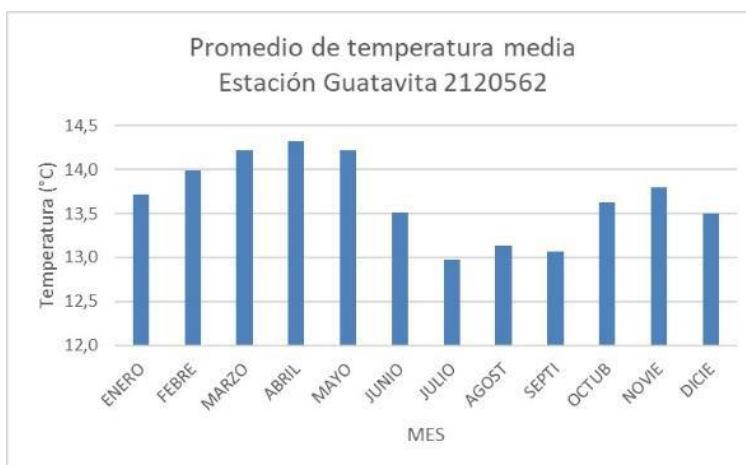


Fuente datos: CAR

- *Temperatura*

Los valores medios mensuales de la temperatura, de acuerdo a los datos tomados de la estación Guatavita, permiten identificar una distribución de tipo uniforme a lo largo de todo el año, encontrándose los valores más bajos en el segundo semestre (meses de julio y agosto) con un promedio de 13 °C. Por su parte, los valores más altos se presentan en los meses de marzo, abril y mayo, siendo abril el mes con mayor registro, con un promedio de 14,3 °C. Según esto, el valor promedio anual para el área de estudio es de 13.7 °C. (Figura 5).

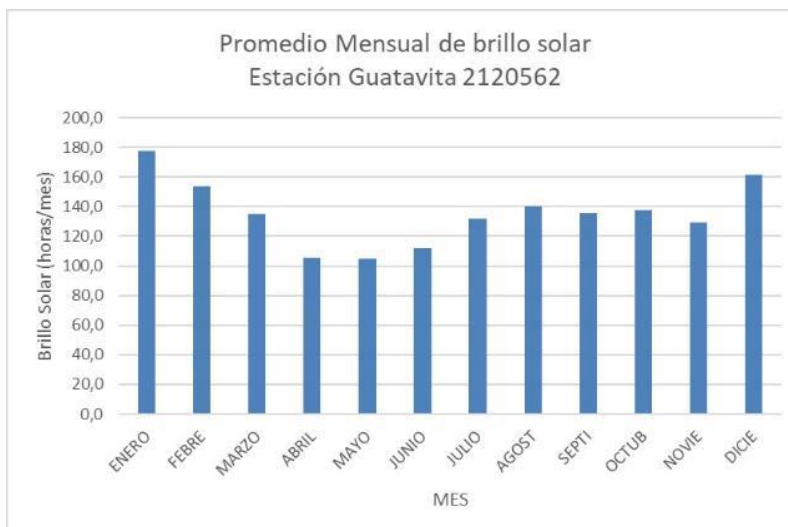
Figura 5: Valores promedio mensuales de temperatura.



Fuente datos: CAR

- *Brillo solar*

Figura 6: Valores promedio mensual de brillo solar.



Fuente datos: CAR

La distribución temporal de esta variable para el área de estudio configura un régimen de tipo monomodal. Tomando como base los datos arrojados por la estación Guatavita, los valores más altos se presentan en los meses de enero, con un registro de 177 horas, y diciembre con 162 horas. De otro lado, los valores más bajos se observan entre los meses de abril y mayo, con un registro promedio de 105 horas en cada uno (Figura 6). En general, el valor total anual para esta área es de 1.625 horas.

- *Evaporación*

Figura 7: Valores promedio mensual de evaporación.



Fuente datos: CAR

La distribución temporal de la evaporación también es de tipo uniforme a lo largo del año. De acuerdo con los datos tomados de la estación Guatavita, los registros más altos se presentan en el mes de marzo, con valores promedios de 100 mm, muy por encima del valor precipitado. Por su parte, los valores más bajos se observan a mitad del año, en el mes de junio, presentando en promedio 85 mm (Figura 7). De esta forma, el valor total promedio anual es de 1.113 mm, valor que, al compararse con el promedio de precipitación, es mucho más alto (144% superior).

6.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio se enmarca dentro del tipo de investigaciones analíticas correlacionadas, las cuales están orientadas a buscar y determinar las relaciones multitemporales que explican las variaciones del nivel del espejo de agua del embalse, y para lo cual se tomaron como base las siguientes variables:

1. Variación en hectáreas (ha) del área del embalse.
2. Variación en hectáreas (ha) del nivel de eutrofización del cuerpo de agua.
3. Variable de temporalidad.
4. Comportamiento climático e intervenciones antrópicas que puedan generar cambios en el volumen y tamaño del cuerpo de agua.

6.3 MATERIALES E INSUMOS

Dentro de los materiales e insumos utilizados para el presente estudio, se emplearon de imágenes satelitales de diferentes misiones Landsat, fotografías aéreas de origen IGAC y bases de datos con información hidro-meteorológica de la zona de estudio.

6.3.1 Imágenes Satelitales Landsat

Se seleccionó como insumo principal imágenes satelitales tipo Landsat, debido a su facilidad de obtención, disponibilidad para amplios periodos de tiempo, calidad e interoperabilidad entre las diferentes misiones, frecuencia corta de temporalidad y por una adecuada resolución espacial.

Las imágenes empleadas y sus principales criterios técnicos se relacionan en la Tabla 6:

Tabla 6: Imágenes Landsat empleadas.

Período	Insumo	Fecha toma	Misión	Sensor	Nubosidad
1977	LM02_L1GS_008057_19770107_20200907_02_T2	07-01-1977	Landsat 1	MSS	4%
1987	LT05_L1TP_008056_19870429_	29-04-1987	Landsat 4	TM	38%

	20201014_02_T1				
1997	LT05_L2SP_008057_19970830_20200909_02_T1	30-08-1997	Landsat 4	TM	42%
2015	LC08_L1TP_008056_20150104_20200910_02_T1	04-01-2015	Landsat 8	OLI/TIRS	2%
2023	LC08_L2SP_008057_20230211_20230218_02_T1_ST	11-02-2023	Landsat 8	OLI/TIRS	31%

MSS: Multispectral Scanner. TM: Thematic Mapper. OLI/TIRS: Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor.

6.3.2 Datos Hidrometeorológicos

Para este tipo de información se emplearon series de datos compilados de estaciones pluviométricas y limnimétricas, ubicadas en el área de influencia directa del embalse (Tabla 7). De ellas se obtuvieron y procesaron datos para los análisis que requirieron revisión de información de precipitación y de caudal de los principales ríos de la subcuenca del embalse.

Tabla 7: Insumos hidrometeorológicos utilizados.

Período	Variable	Tipo información	Nombre estación	Fuente
1977-2021	Precipitación	Valores totales	Guatavita (Cód. 2120562)	CAR
1977-2021	Caudal	Valores medios mensuales	Vega La (Cód. 2120751)	CAR
1977-2021	Caudal	Valores medios mensuales	Santo Domingo (Cód. 2120799)	CAR

6.3.3 Fotografías Aéreas IGAC

Para el año de análisis 2007 se emplearon fotografías aéreas pancromáticas de fuente IGAC. Estas imágenes aéreas de tipo digital, las cuales fueron convertidas a partir de un proceso de escaneo fotogramétrico de rollos análogos, se utilizaron a fin de suplir la ausencia de imágenes satelitales de buena calidad de la misión Landsat para este período de análisis. Las fotografías aéreas empleadas se relacionan en la Tabla 8:

Tabla 8: Fotografías aéreas empleadas.

Parámetros	Línea de vuelo C-2800	Línea de vuelo C-2801
Número de fotos	132 y 134	144 y 145
Fecha de toma	02 de febrero de 2007	03 de febrero de 2007
Escala	1:39.750	1:41.400
Distancia focal	152.499 mm	152.499 mm
Sensor	Wild RC-30	Wild RC-30
Área de toma (promedio)	7.144 hectáreas	7.221 hectáreas

Fuente de datos: (IGAC, 2023).

6.4 PROCEDIMIENTO

Figura 8: Procedimiento metodológico.



El proceso de obtención de insumos que fueron objeto de procesamiento y análisis para el presente estudio, se realizó siguiendo el presente orden metodológico o paso a paso (ver Figura 8):

- Obtención de imágenes de satélite.
- Selección y composición de bandas multiespectrales.
- Fusión de bandas multiespectrales y pancromáticas.
- Corte de imágenes o selección del área útil.
- Rectificación del sistema de referencia.
- Digitalización.

En consideración a que las materias primas principales fueron imágenes satelitales proporcionadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), dentro del trabajo realizado fue necesario, como complemento o apoyo, realizar la descarga de fotografías aéreas de origen IGAC, con la finalidad de subsanar el bandeo presente en la mayor parte de las imágenes Landsat del año 2007. El paso a paso para el procesamiento de las fotografías fue similar al aplicado para las imágenes satelitales, adicionando solo un proceso de georreferenciación debido a que las fotos utilizadas no contaban con información de geolocalización. Los pasos adicionales fueron los siguientes:

- Obtención de fotografías aéreas.
- Georreferenciación de las fotografías aéreas.

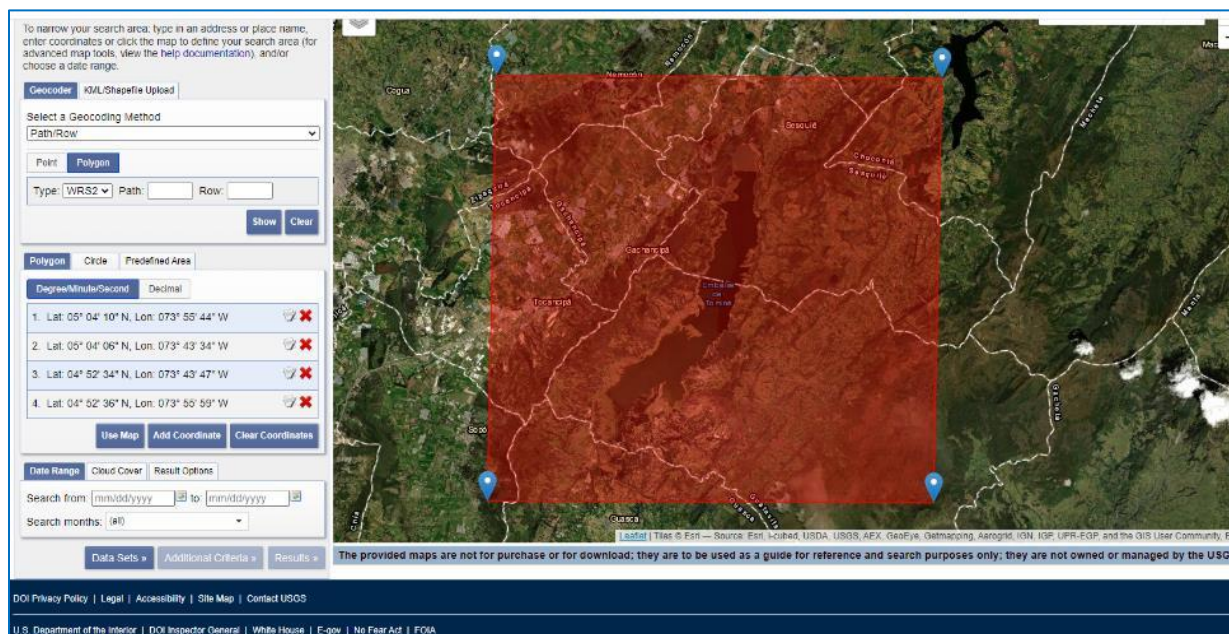
A continuación, se detalla cada paso de forma individual, describiendo el proceso realizado, el software utilizado y otros aspectos relevantes.

6.4.1 Obtención de Imágenes Satelitales

La obtención de las imágenes se adelantó a través de descarga gratuita a partir del visor *EarthExplorer* perteneciente al USGS, atendiendo los siguientes pasos:

- Se accedió al sitio web y se generó una acreditación personal para la utilización de las imágenes; para el presente proyecto se usó una cuenta estudiantil (Universidad Antonio Nariño).
- Se definió el área de interés dentro del mapa interactivo que presenta el portal, dibujando un polígono de selección como se muestra en la Figura 9.

Figura 9: Selección del área de interés para búsqueda de imágenes satelitales.



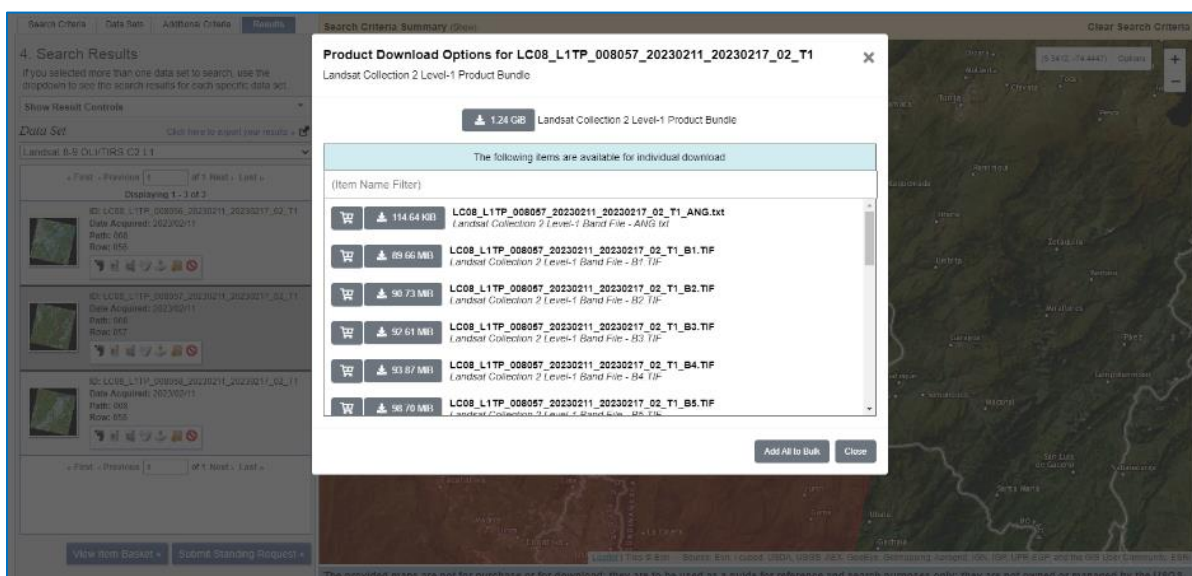
- Se utilizaron los filtros disponibles a fin de refinar la búsqueda (tipo de datos, fechas, sensor de satélite y nubosidad), tal y como se indica en la Tabla 9:

Tabla 9: Parámetros para filtros de búsqueda de imágenes Landsat.

ID	Fecha	Misión Satélite	Nubosidad	Colección
1	Ene/2023 - Marzo/2023	Landsat 8	0 - 40 %	L1
2	Ene/2015 - Marzo/2015	Landsat 8	0 - 15 %	L1
3	Ene/2007 - Marzo/2007	Landsat 7	0 - 100 %	L1
4	Jul/1997 - Sept/1997	Landsat 4	0 - 100 %	L1
5	Ene/1987 - Abril/1987	Landsat 4	0 - 100 %	L1
6	Ene/1977 - Marzo/1977	Landsat 1	0 - 100 %	L1
7	Ene/1985 - Marzo/1985	Landsat 5	0 - 20 %	L1

- Una vez efectuados los filtros y luego de hacer clic en "Results", se obtuvo una lista de imágenes coincidentes. Explorando los resultados y haciendo clic en las ventanas de miniaturas se obtuvieron vistas previas y detalles adicionales de cada imagen.
- Después de seleccionar la imagen deseada, se procedió a descargarla ("Download") eligiendo, para el presente caso, el formato (.TIFF), como se ilustra en la Figura 10:

Figura 10: Cuadro opciones de descarga de imágenes Landsat.



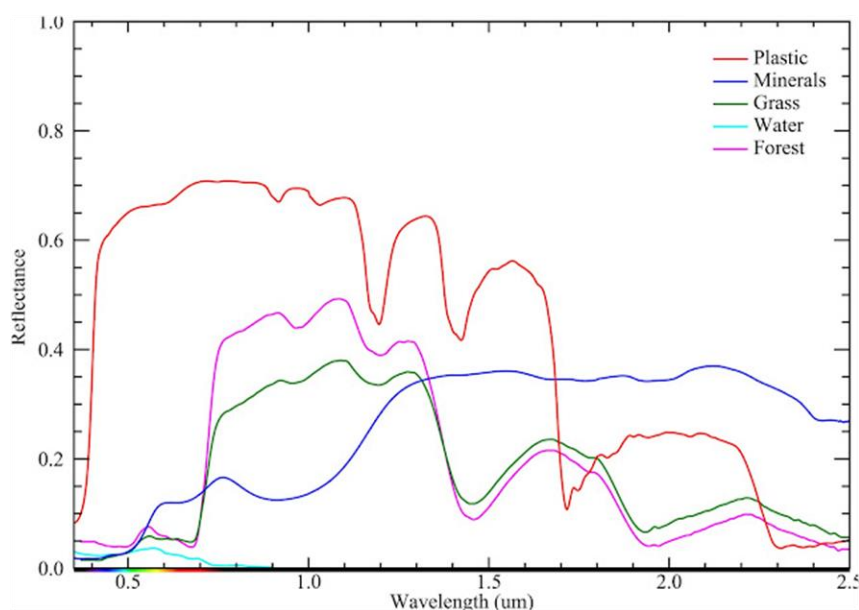
6.4.2 Selección de Bandas para Composición (*Composite Bands*)

La selección de bandas para las composiciones, se realizó partiendo de la información de reflectancia de los diferentes tipos de materiales presentes en el terreno. Teniendo como base el presente caso de estudio, la reflectancia de los cuerpos de agua es casi 0 a partir de los 0.9

micrómetros (μm) en el espectro electromagnético, como se aprecia en la Figura 11, lo cual fue fundamental para la selección de las bandas.

De esta forma, la banda correspondiente al Rojo o primera banda seleccionada para la composición, es la que captura los datos del infrarrojo cercano (ver Figura 12), teniendo en cuenta que captura los datos en un rango cercano a los $1.4 \mu\text{m}$ y garantiza una mejor visualización de los cuerpos de agua dentro de las diferentes imágenes satelitales. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el rango de la longitud de onda varía de acuerdo con las diferentes misiones Landsat.

Figura 11: Reflectancia de materiales.



Fuente: (Cheng et al., 2022).

La selección de bandas correspondientes al Verde y al Azul se hicieron en bandas con valores cercanos a $0.7 \mu\text{m}$ y $0.5 \mu\text{m}$ respectivamente, ya que la reflectancia en las coberturas de vegetación, minerales o de suelos desnudos es alta en esas franjas y permite mayor contraste visual respecto a los cuerpos de agua. Ello contribuye a una mejor diferenciación de las diferentes coberturas y a facilitar la posterior digitalización de los elementos asociados a la superficie del embalse.

Para adelantar la composición de bandas se empleó el software ArcMap 10.8.1, el cual cuenta con diferentes herramientas y extensiones para el procesamiento y análisis de archivos tipo ráster. Para la composición de bandas, la caja de herramientas que ofrece el software permite seleccionar los canales RGB (*Red-Green-Blue*) en orden ascendente, por lo cual, en la imagen resultante la primera banda corresponderá con la de colores rojos, la segunda con colores verdes y la tercera con la de colores azules. Adicionalmente, la operación permite agregar más bandas, lo que posteriormente permitirá modificar la composición RGB, resaltar otro tipo de información y

facilitar la captura de mayor cantidad de elementos. En la Figura 13 se muestra la disposición de bandas para el *Composite Bands* de la imagen Landsat seleccionada para 2023.

Figura 12: Banda 5 en imagen Landsat 8.

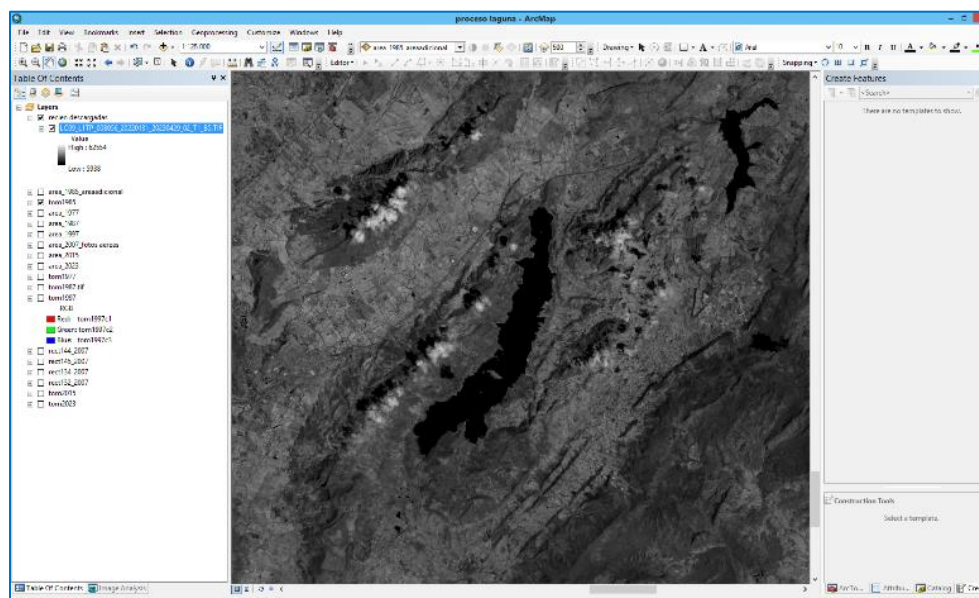
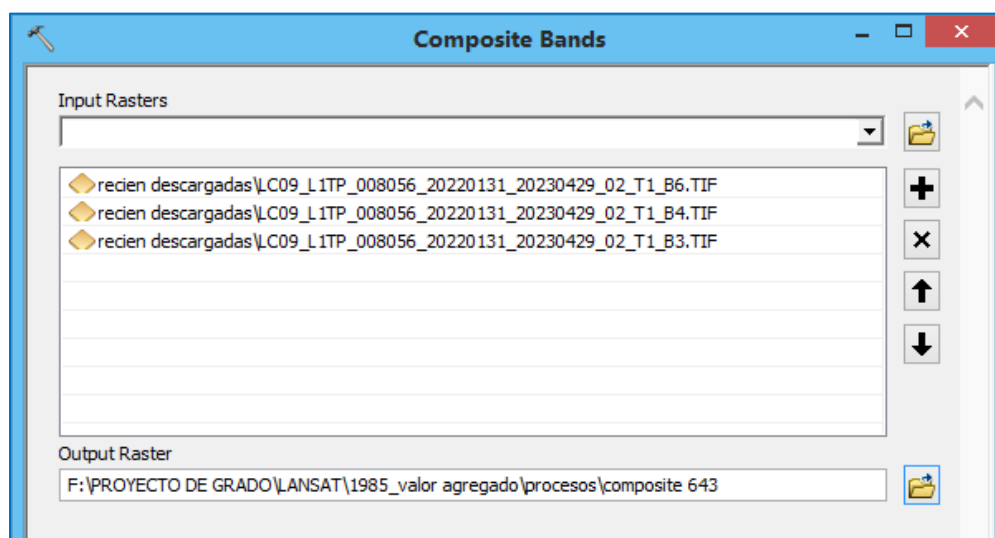
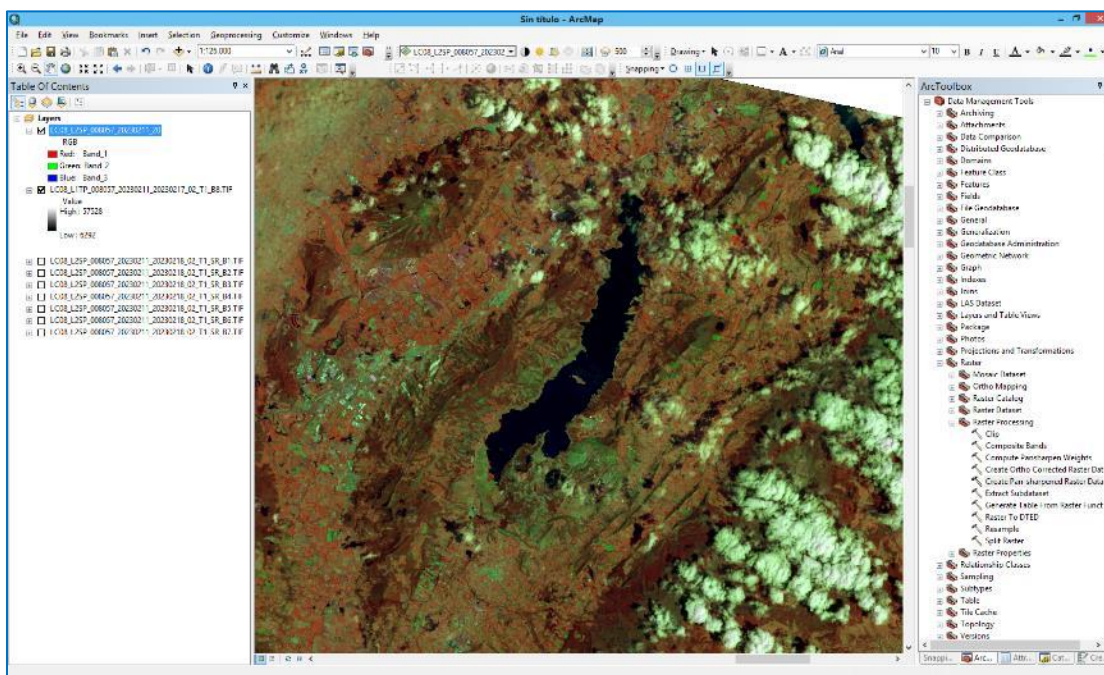


Figura 13: Selección de bandas para *Composite Bands*.



Posterior a la composición de bandas y a la asignación de los respectivos canales RGB para su visualización, las imágenes satelitales se apreciarán como se muestra en la Figura 14, en la cual se destaca un alto contraste entre los cuerpos de agua (tonos azul oscuro) y las demás coberturas.

Figura 14: Resultado de *Composite Bands*.

6.4.3 Fusión de Banda Pancromática (*Pan-Sharpened*)

Finalizada la obtención de las imágenes multiespectrales o multibanda, se procedió a aumentar la resolución de estas haciendo uso de las bandas pancromáticas. Dicho procedimiento solo fue realizado para las imágenes satelitales provenientes de la misión Landsat 8, debido a que incorpora un sensor que captura imágenes a blanco y negro con mayor resolución (15 metros x 15 metros). Esta técnica permite interpolar los datos de cada pixel de 30 metros por 30 metros y calcular su respectivo valor en datos de tamaño de 15 metros por 15 metros.

La funcionalidad utilizada del software ArcGIS 10.8.1 permite realizar esta interpolación mediante diferentes métodos matemáticos. Dentro de este ejercicio se realizó una operación mediante la opción calculo simple, la cual usa el promedio de valores de los canales RGB y de los valores de pixel de la banda pancromática. Este método resulta muy eficiente para este tipo de imágenes, dado que la banda pancromática corresponde a la misma captura de las bandas multiespectrales y ofrece como resultado una ampliación en el valor de la resolución espacial final (Figura 15).

En la Figura 16 se puede apreciar un ejemplo de la mejora en la resolución, visualización y diferenciación de coberturas para la imagen satelital del período 2023. En este caso, para el sector sur-occidental del embalse, en la primera imagen (multibanda o RGB) se aprecia un menor detalle de los elementos capturados, mientras que en la segunda (con *Pan-sharpened*) se pueden observar e identificar con mayor detalle elementos como vías, construcciones, tipos de vegetación, etc.

Figura 15: Pánel creación de *Pan-Sharpened* en ArcMap.

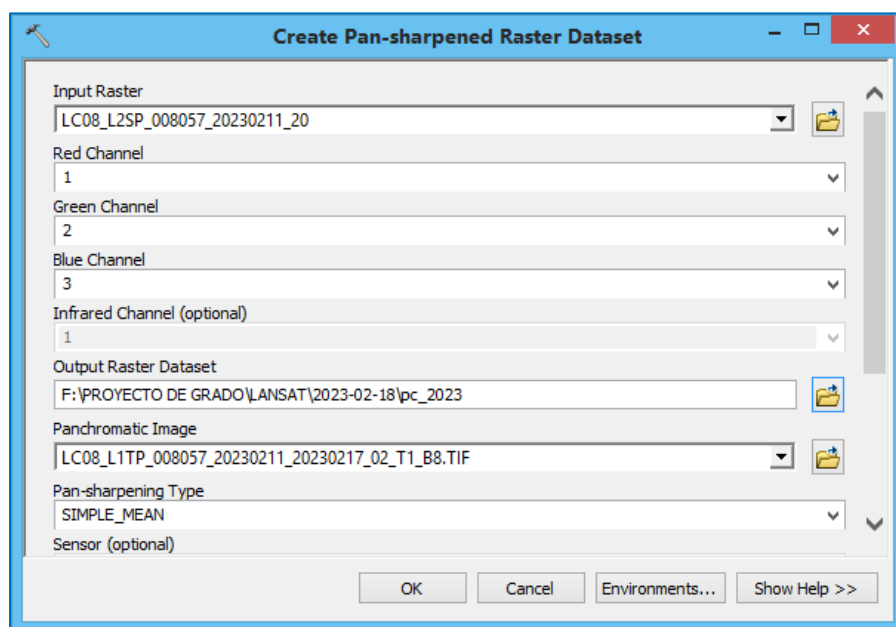
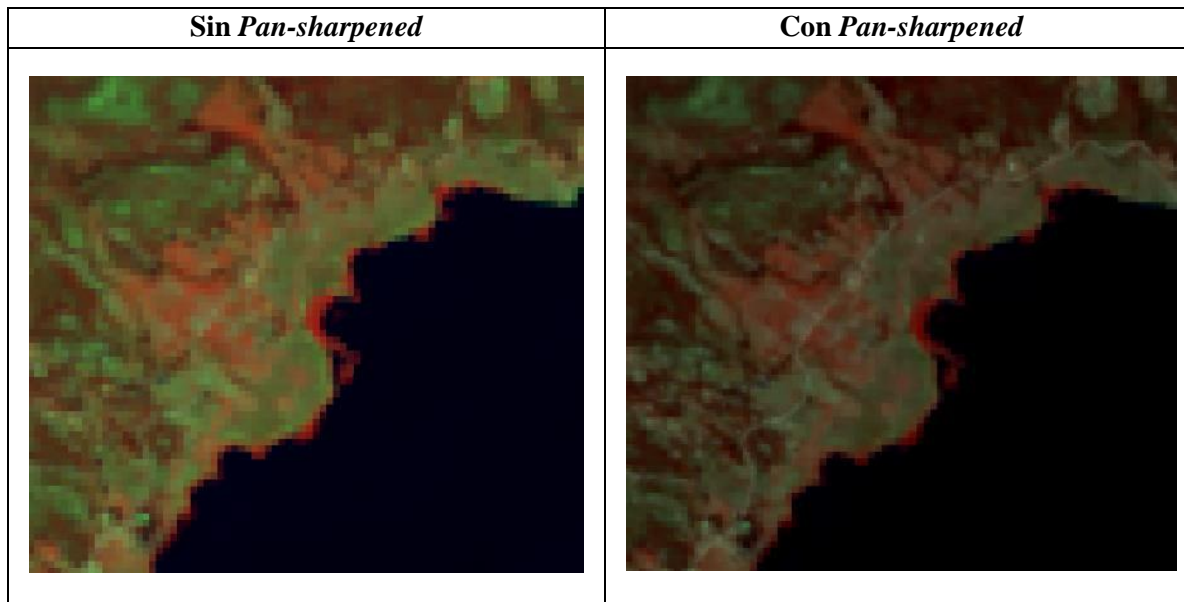


Figura 16: Comparación imágenes con y sin *Pan-Sharpened*.



6.4.4 Corte de área útil

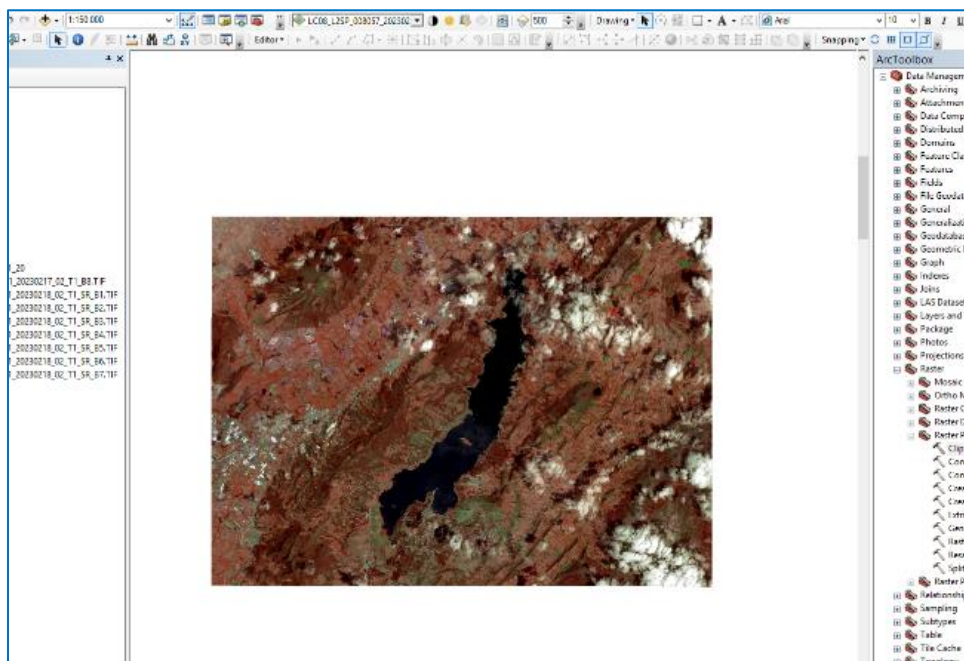
Para facilitar los procesos posteriores se realizó un corte de cada imagen, dejando un área específica de aproximadamente 52.000 hectáreas, a fin de reducir el tamaño de la imagen original y evitar pérdida de calidad. Se redujo así el tamaño de los archivos en disco, facilitando posteriores

procesos de maquina como en la digitalización, al desplegar varias capas y al adelantar análisis con múltiples imágenes al mismo tiempo.

Figura 17: Selección del área útil de la imagen de satélite.



Figura 18: Resultados corte área de interés de la imagen de satélite.



Para realizar el corte también se utilizaron herramientas de procesamiento de ArcMap, y a fin de garantizar que todas las imágenes de análisis quedaran con la misma área, se creó un polígono en formato *shapefile*, el cual se empleó como molde para todos los cortes (Figura 17). Las imágenes

resultantes conforman un archivo independiente a sus imágenes originales, pero mantienen las mismas características y resolución de pixel (15 metros x 15 metros).

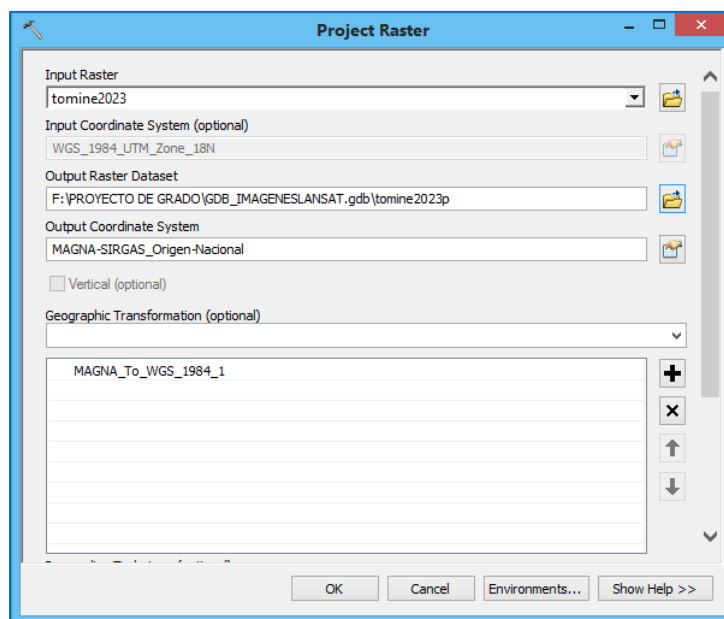
Como se ve observa en la Figura 18, el resultado de corte homogeniza el área de estudio y reduce el tamaño de archivo de la nueva imagen, lo cual facilitará su despliegue y procesamiento.

6.4.5 Rectificación del Sistema de Referencia

Para adelantar la digitalización y realizar los análisis posteriores, se realizó una re-proyección del sistema de coordenadas de las imágenes cortadas. Ello debido a que las imágenes Landsat descargadas se encuentran georreferenciadas en un sistema de coordenadas geodésicas (XYZ) y se requirió transformarlas a coordenadas planas (XY) del sistema MAGNA-SIRGAS_Origen Nacional y así poder adaptarlas al nuevo Marco Geocéntrico Nacional de Referencia para Colombia. Este nuevo sistema fue definido e implementado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a través de la Resolución 471 de 2020.

Este proceso de re-proyección o rectificación también se adelantó empleando las herramientas que dispone, para este fin, el Software ArcMap 10.8.1 (Figura 19).

Figura 19: Reproyección al sistema MAGNA-SIRGAS Origen Nacional en ArcMap.



6.4.6 Digitalización de los Elementos a Analizar.

Previo al proceso de digitalización, se realizó la selección de los elementos o niveles a capturar para la superficie del embalse. Para la definición de los elementos se tuvo en cuenta su relevancia

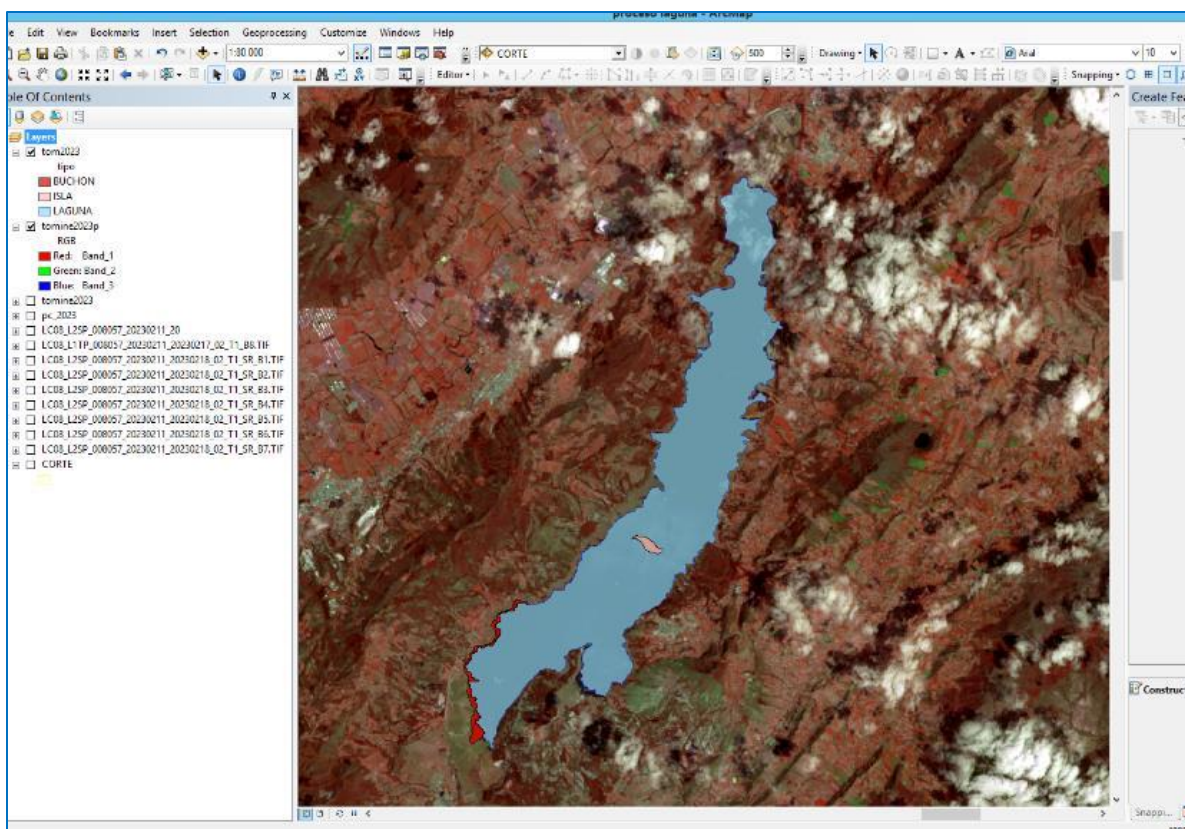
e integralidad con el cuerpo de agua y que pudieran ser visibles dentro de las imágenes aéreas. Así se seleccionaron los siguientes elementos:

- Espejo de agua del embalse.
- Buchón (vegetación acuática).
- Islas.

A partir de la definición de los niveles de captura, se procedió a la digitalización de polígonos mediante superposición de líneas segmentadas. Para garantizar que cada porción de segmento resultara con un tamaño mínimo de 5 metros, se determinó un nivel de detalle de máximo 3 puntos por pixel. También se fijó una tolerancia de 5 metros para el trazado de límites entre elementos.

Como resultado final, se obtuvieron capas en formato *shape* (vectorial) para cada uno de los 6 períodos de tiempo establecidos. Cada archivo integra y diferencia los elementos de captura seleccionados. En la Figura 20 se muestra un ejemplo de elementos digitalizados para la superficie del embalse de Tominé.

Figura 20: Digitalización de elementos.



6.4.7 Obtención de Fotografías Aéreas

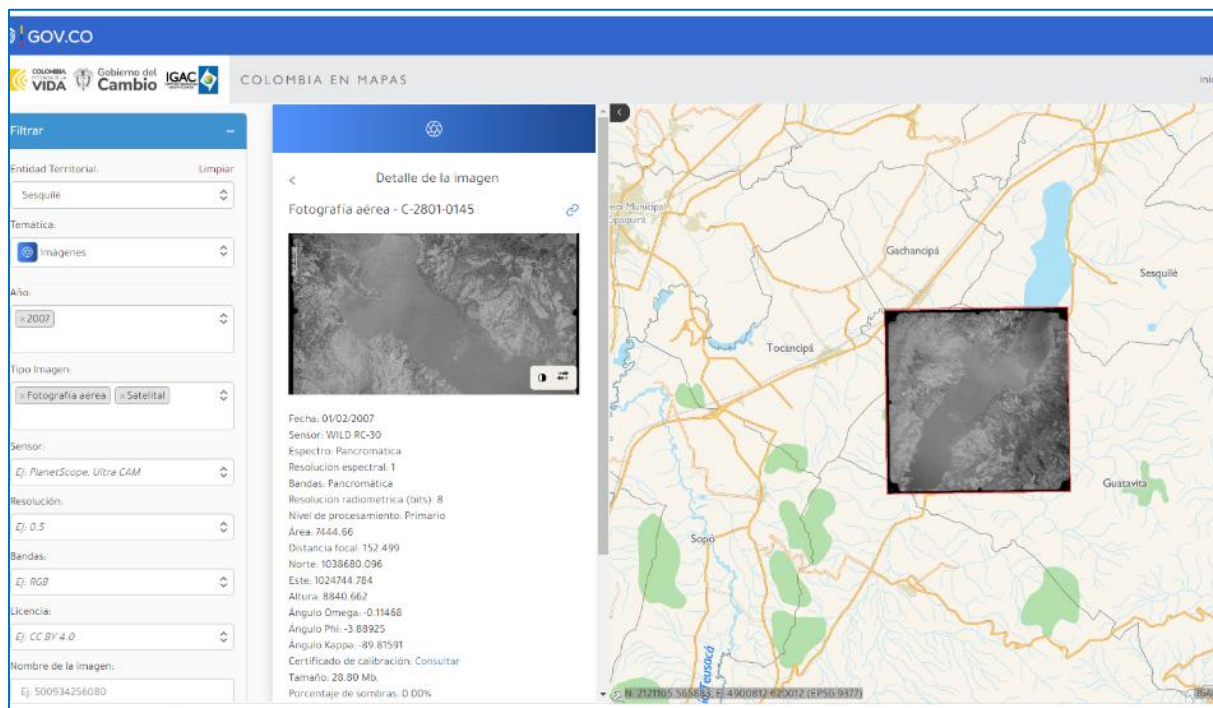
Para la obtención de las fotografías aéreas se recurrió al Geoportal oficial del IGAC dispuesto dentro de la página web <https://www.igac.gov.co/>. Dentro de la sección “Colombia en Mapas” se tiene un repositorio de imágenes satelitales y fotografías aéreas, disponibles para uso o consulta general.

Para adelantar la búsqueda y obtener las fotografías aéreas a utilizar, se selecciona el área de interés, que en este caso se filtró con una búsqueda por el municipio de Sesquilé y como resultado desplegó los vuelos y fotografías coincidentes. La herramienta también ofrece una previsualización de la información disponible, lo cual permite al consultante identificar y seleccionar las fotografías requeridas.

Posterior a la identificación y selección de las fotografías, se despliega la opción de descarga, así como se muestra en Figura 21, pero para ello es probable que el sistema solicite ingresar con una cuenta de *Google*, ya que el no ingresar con usuario registrado, es posible que el portal restrinja la descarga.

Para finalizar la descarga, el portal solicita la aceptación de términos y condiciones y la confirmación de la elección. Con ello se obtiene un archivo de extensión *.TIFF*, el cual es un recurso de forma comprimida, diseñado para compartir datos de tipo Raster.

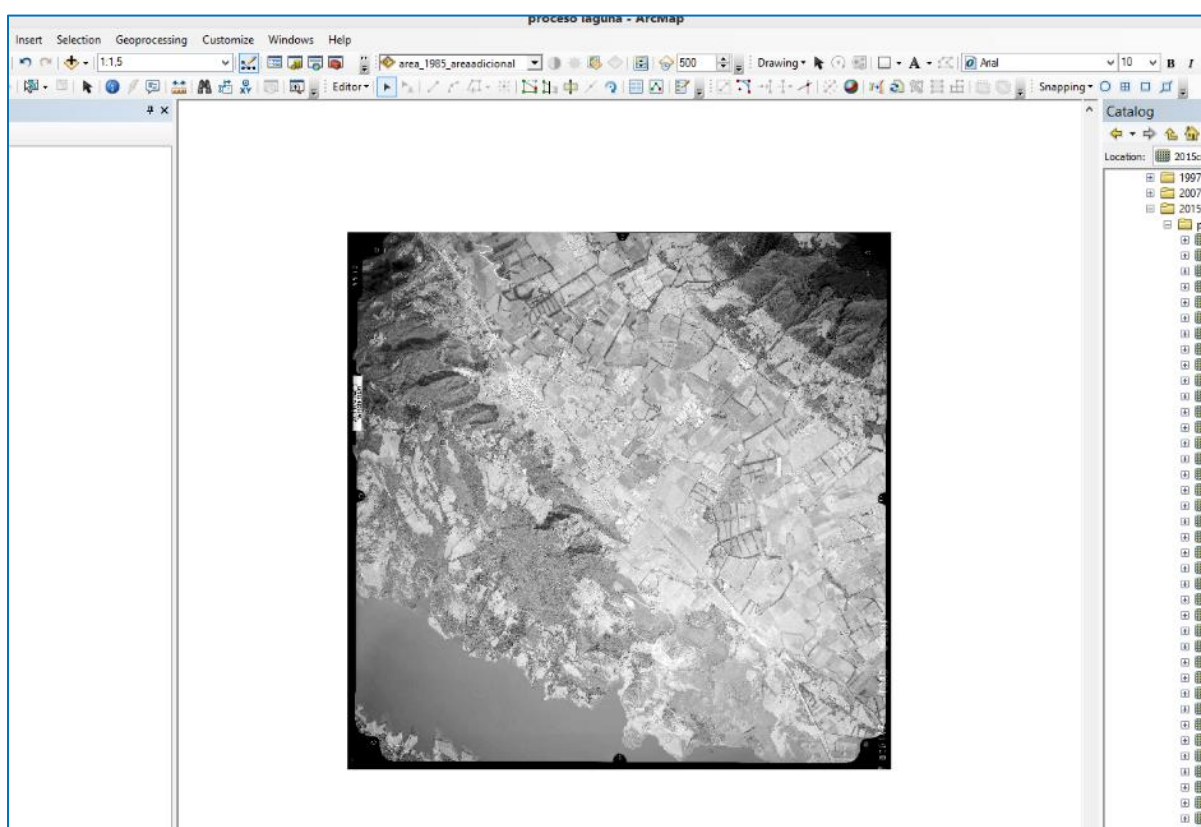
Figura 21: Descarga de fotografías aéreas del Geoportal IGAC.



6.4.8 Georreferenciación de Fotografías Aéreas

Las fotografías aéreas descargadas no tienen asignado un sistema de referencia, por tanto, al cargarlas y desplegarlas en el software ArcGIS, estas se visualizarán en un lugar diferente al que les debe corresponder según su ubicación real (Figura 22). Posterior al despliegue y haciendo uso de las herramientas dispuestas en el menú *Customize* y *Customize Mode*, se ingresa a la opción *Georreferencing*, la cual una vez activada ayudará a alinear y ajustar las imágenes mediante el botón *Fit to Display*. Con lo anterior se garantiza la visualización de las fotos dentro del área de trabajo del mapa y su superposición sobre una base o capa del área de estudio georreferenciada previamente.

Figura 22: Fotografía aérea sin georreferenciar.



A partir de este apoyo visual, se procede a agregar puntos de control *Add Control Points*, los cuales se pueden elegir a partir de elementos claramente identificables en las fotografías aéreas; por ejemplo, se pueden identificar y elegir esquinas de edificios, intersecciones de carreteras, etc. Con los puntos de control seleccionados, a través del botón *Registrar* (Figura 23) se pueden verificar las coordenadas resultantes, las cuales se relacionan en una tabla de puntos de control. Después de incluir varios puntos de control, se guardan los ajustes (*Save Georeferencing*) y se exportan las

imágenes a un nuevo archivo, a fin hacerlas interoperables y dejar disponibles los puntos de georreferenciación que se generaron durante el proceso. Ver Figura 24.

Figura 23: Proceso de georreferenciación de fotografías aéreas.

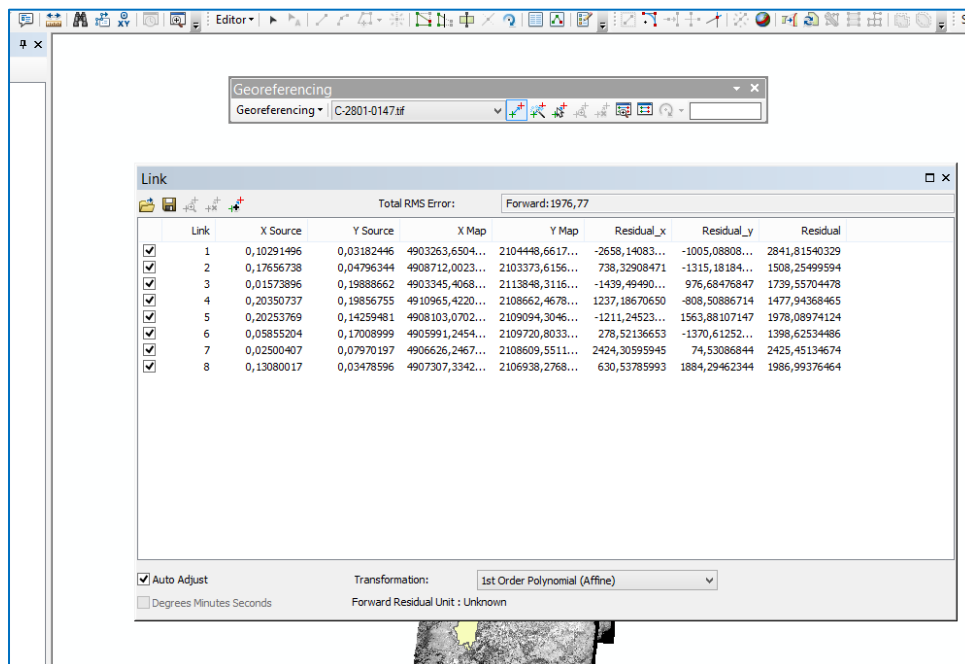
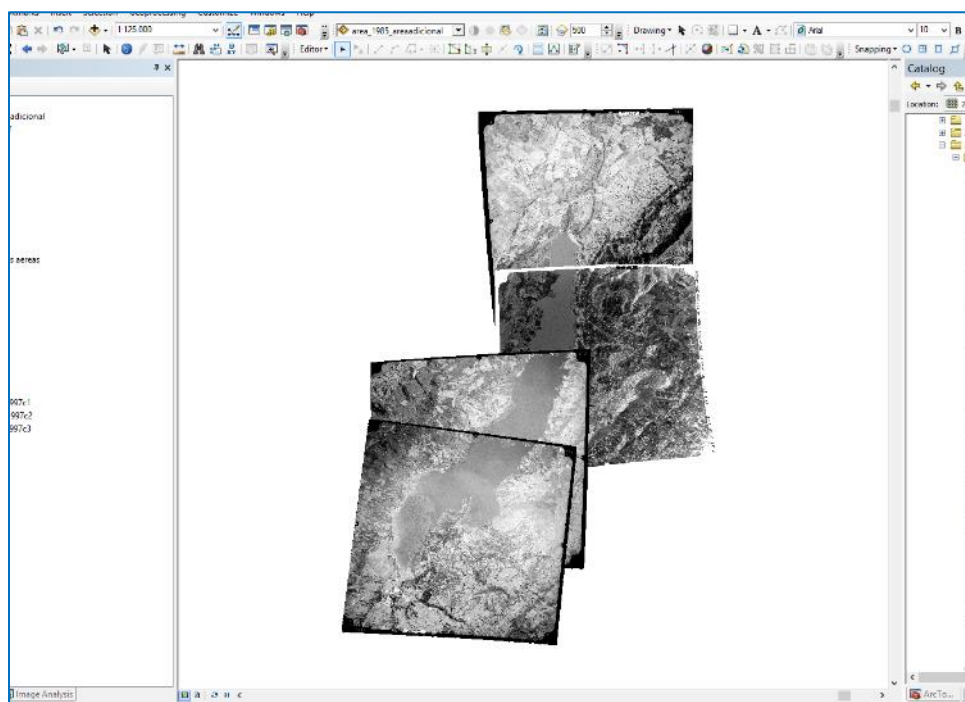


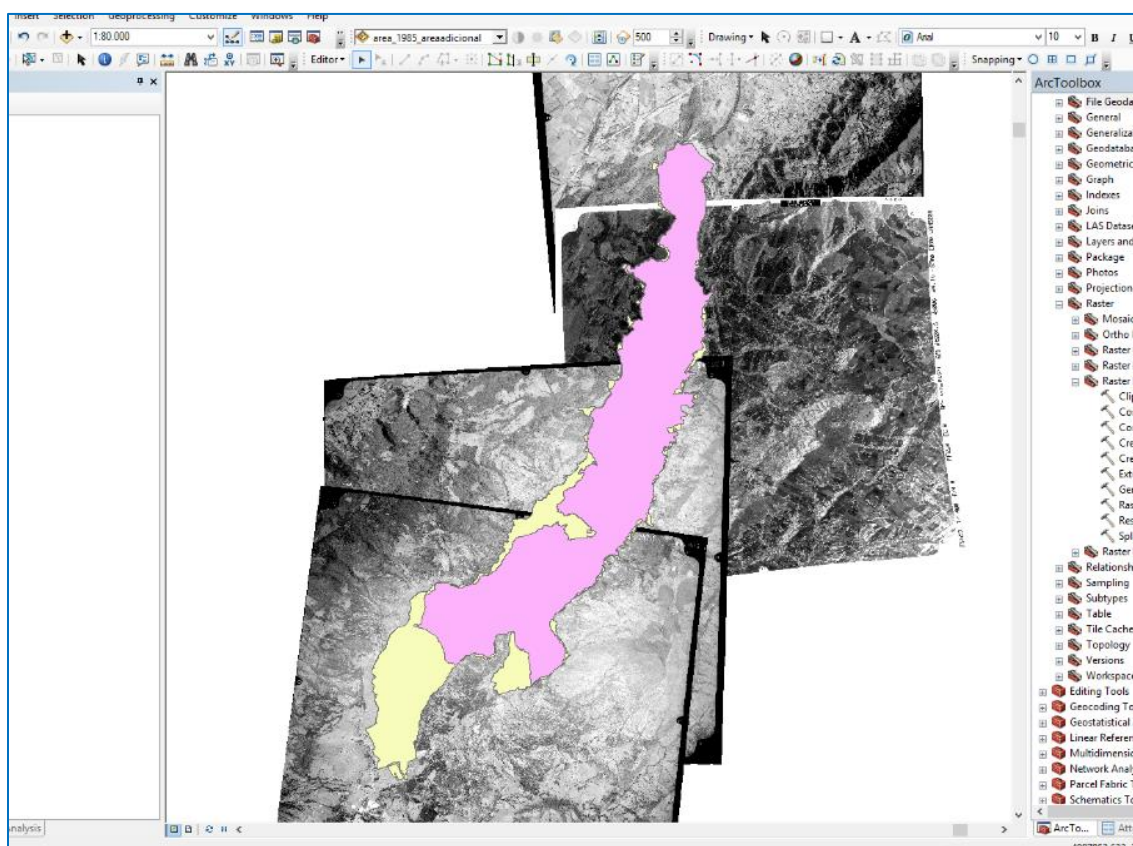
Figura 24: Fotografías aéreas georreferenciadas.



Para la digitalización de los elementos previamente definidos, se empleó el mismo procedimiento descrito para la obtención de polígonos de las imágenes de satélite Landsat, dando como resultado nuevos polígonos con los niveles de captura extraídos de las fotografías aéreas (Figura 25).

Es importante precisar que las fotografías aéreas solo se emplearon como insumo para digitalizar los elementos de la superficie del embalse en 2007, ante la ausencia de imágenes Landsat, de otras misiones satelitales y de cartografía con la calidad y características técnicas requeridas para este período de estudio.

Figura 25: Digitalización elementos de las fotografías aéreas.



7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se analizaron períodos de tiempo con intervalos cada 10 años, con excepción de los períodos entre 2007 y 2023, los cuales se analizaron con intervalos cada 8 años. Lo anterior responde a que el primer período de tiempo del cual se tiene disponibilidad de imágenes satelitales, con resolución e información suficientes para esta área, es a partir de 1977; por tanto, ese fue el primer año de análisis elegido y luego de este se escogieron períodos decadales hasta 2007. Entre este último año y 2023 se decidió tomar el valor medio, es decir el año 2015, dando como resultado dos nuevos intervalos de 8 años cada uno.

Para la elección temporal de las imágenes de satélite y fotografías aéreas, se decidió tomar el primer trimestre del año, con excepción de 1997, para el cual se empleó una imagen del tercer trimestre. La razón para escoger el primer trimestre del año obedeció a que coincide con un período de bajas precipitaciones y de poca nubosidad para el área de estudio, lo que se tradujo en una mayor posibilidad de contar con imágenes de mejor calidad. En el caso excepcional de 1997, donde se eligió una imagen satelital del mes de agosto, fue debido a la no disponibilidad de imágenes que permitieran visualizar el embalse durante el primer trimestre de ese año y por ello se optó por una del tercer trimestre, a fin de garantizar una coincidencia con el segundo intervalo seco o de bajas precipitaciones para el área de estudio.

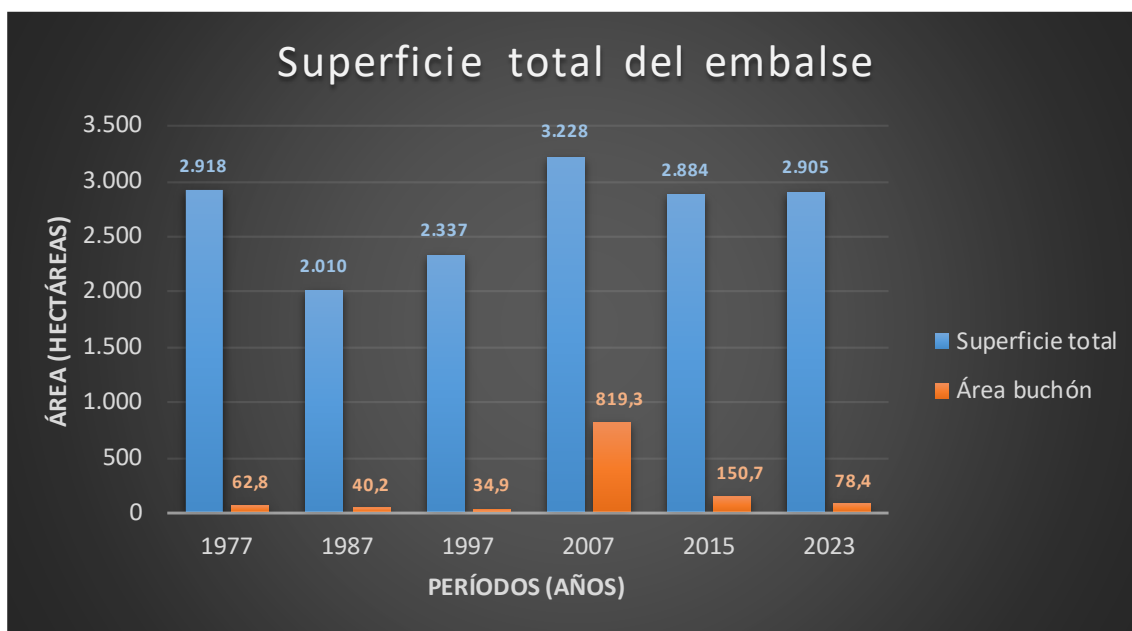
7.1 RESULTADOS

Una manera efectiva de comenzar a análisis del presente trabajo es a través de la presentación de los resultados de las áreas, extensiones o superficies determinadas para cada uno de los años elegidos. Estos resultados se presentan en la Tabla 10 y Figura 26, en la cual se proporciona una visión sintetizada de los datos obtenidos, permitiendo analizar y evaluar integralmente los hallazgos del estudio.

Tabla 10: Superficie del embalse por años de análisis.

Año	Área Espejo de Agua (ha)	Área Buchón (ha)	Porcentaje Ocupado por Buchón	Superficie Total (ha)
1977	2.855	62,8	2,2%	2.918
1987	1.970	40,2	2,0%	2.010
1997	2.302	34,9	1,5%	2.337
2007	2.408	819,3	25,4%	3.228
2015	2.733	150,7	5,2%	2.884
2023	2.826	78,8	2,8%	2.905

Figura 26: Superficie total del embalse por años de análisis.



De acuerdo con la Tabla 10 y la Figura 26, el año en que se determinó mayor extensión para el embalse correspondió a 2007, donde se registró un área total de 3.228 hectáreas; mientras que el año con menor extensión correspondió a 1987, con 2.010 hectáreas. Cabe mencionar, que al momento del procesamiento de la información se encontró un dato para un período diferente a los estudiados, a partir del cual se determina que la menor extensión del embalse, después de 1977, se presentó en el año 1985 con solo 1.123 hectáreas. Comparativamente, lo anterior corresponde a 1/3 de la extensión registrada en 2007 y a aproximadamente la mitad del área que tenía el embalse durante 1987.

También, teniendo en cuenta la Tabla 10 y la Figura 26, se evidencia que el año con mayor presencia de buchón en el cuerpo de agua correspondió a 2007, en el cual esta especie vegetal acuática ocupaba un área de 819,3 hectáreas, lo que equivalía a un cuarto (25,4%) de la superficie total del embalse durante ese mismo año. La situación anterior derivó, que, en el Plan de Manejo Ambiental (PMA) adoptado en 2008, se diera una gran relevancia al manejo y extracción de esta especie invasora (MINAMBIENTE, 2008). Sin embargo, desde el año 2005 ya se venían implementando actividades de extracción, que aunadas a las medidas tomadas en el PMA conllevaron a la remoción, hasta 2012, de aproximadamente 768 hectáreas de forma mecánica y de otras 127 hectáreas manualmente (EMGESA & Energía de Bogotá, 2013). Por su parte, el año con menor ocupación de buchón se registró en 1997, con un área de 34,9 hectáreas, lo que solo representaba un 1,5% respecto al total del embalse.

Es importante indicar, que la superficie identificada y cartografiada con ocupación de buchón correspondió a las áreas donde esta especie estuvo confinada o donde hubo representatividad de la misma dentro del cuerpo de agua, por lo que las áreas calculadas son aproximadas y la ocupación real en cada período pudo ser superior.

Así mismo, se calculó el área con espejo de agua en cada año, lo cual correspondió a la superficie del embalse no ocupada con vegetación acuática. Así se encontró que el año con mayor espejo de agua fue en 1977, con 2.855 hectáreas y el año con menor lámina correspondió a 1987 con 1.970 hectáreas. Sin embargo, hay que aclarar que estos valores están comparados aritméticamente entre todos los años y no teniendo en cuenta la proporción del espejo de agua frente a la superficie total del embalse.

A partir de los datos obtenidos, se calculó el porcentaje de cambio entre cada período (Tabla 11) y se simuló una posible tendencia de la superficie del embalse para los años siguientes (Figura 27). El porcentaje de cambio indica la relación de la variación entre un año analizado y su correspondiente con el inmediatamente anterior; mientras que la tendencia, entendida como la normalización de datos y el empleo de ecuaciones para la obtención de proyecciones y estimaciones en períodos futuros, se tomó como un indicador para inferir el posible comportamiento de la superficie embalse durante los próximos años.

Tabla 11: Porcentaje de cambios entre períodos de análisis.

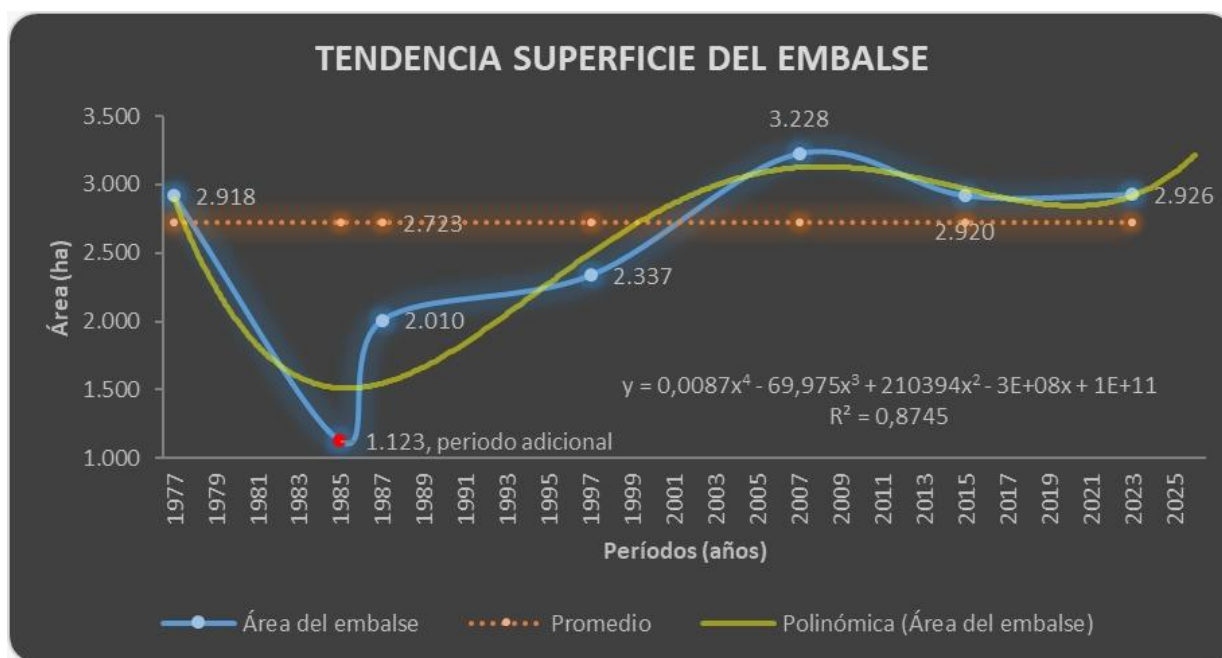
Año	Superficie Total (ha)	Porcentaje de Cambio	Descripción Resultados de Cambio
1977	2.918	0	No aplica.
1987	2.010	-31,1	Disminución de la superficie.
1997	2.337	16,3	Aumento de la superficie.
2007	3.228	38,1	Aumento de la superficie.
2015	2.884	-10,6	Disminución de la superficie.
2023	2.905	0,7	Aumento leve de la superficie.

Como resultado del cálculo de los porcentajes de cambio entre períodos, se tiene que entre 1977 y 1987 hubo una disminución de la superficie del embalse, pero a partir de este, el área del mismo empieza a aumentar, alcanzando un máximo para el período 1997-2007. Luego empieza una nueva disminución, para finalmente presentar una relativa estabilización de su área con un leve aumento entre 2015 y 2023.

El resultado de estimación de tendencia, sugiere que el embalse continuará aumentando levemente su extensión durante los próximos años. Ello siempre y cuando se mantengan condiciones hidroclimáticas similares a las presentadas durante los períodos de estudio, que no se adelanten grandes

intervenciones hidráulicas que afecten la capacidad del embalse o que no se realicen grandes trasvases desde o hacia el río Bogotá que impliquen la extracción o llenado con grandes volúmenes de agua.

Figura 27: Tendencia de la superficie del embalse.

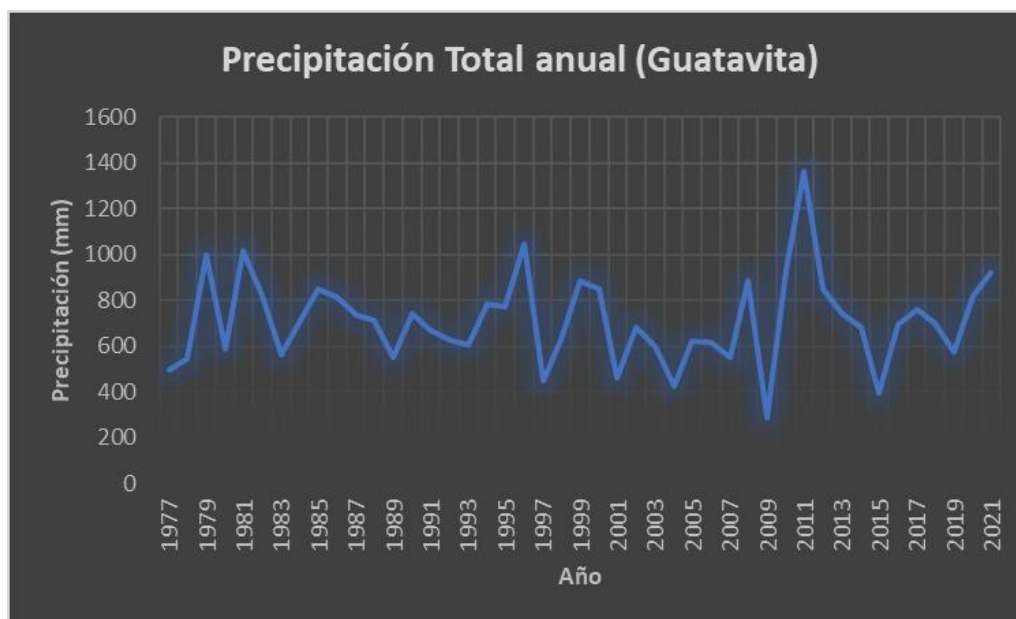


7.1.1 Comparación entre períodos de análisis

A continuación, se presenta un análisis del comportamiento de la superficie del embalse durante los diferentes períodos de estudio, teniendo en cuenta el área total, la ocupación con buchón y los principales factores antrópicos e hidro-climáticos que influyeron en cada uno de ellos.

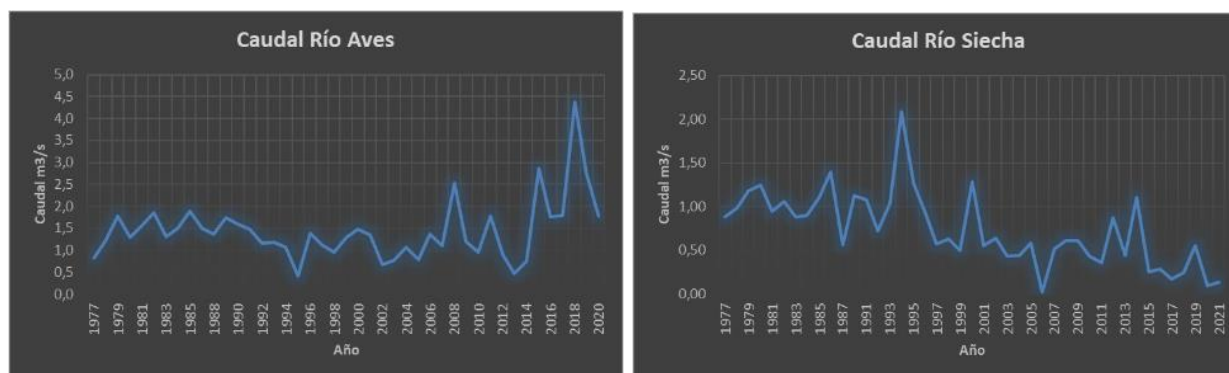
Se incluye un análisis comparativo tomando como base los datos de las Tabla 10 y Tabla 11, datos de precipitación total, datos de caudales medios mensuales e información de actividades antrópicas llevadas a cabo durante esos intervalos de tiempo y que pudieran incidir en la configuración de la superficie del embalse. Los datos de precipitación se tomaron de la estación climatológica Guatavita, por ser representativa para toda el área de estudio (Figura 28); y los datos de caudal se tomaron de las estaciones La Vega (ubicada sobre el río Aves) y Santo Domingo (que adelanta mediciones del río Siecha) (Tabla 12 y Figura 29). Se tuvieron en cuenta esas estaciones de caudal por estar localizadas cerca a la cola del embalse y por ser esos ríos los principales aportantes de agua por gravedad.

Figura 28: Precipitación total anual: estación Guatavita.



Fuente datos: CAR

Figura 29: Caudales promedio anuales Río Aves y Río Siecha.



Fuente datos: CAR

Tabla 12: Valores de caudal promedio anual.

Período	Estación Vega La (Río Aves) (m³/s)	Estación Santo Domingo (Río Siecha) (m³/s)	Aporte Total (m³/s)
1977-1987	1,5	1,0	2,5
1987-1997	1,3	1,1	2,4
1997-2007	1,1	0,6	1,7
2007-2015	1,4	0,6	2,0
2015-2021	2,6	0,2	2,8

Fuente datos: CAR

También, dentro de la comparación entre períodos, se tuvo en cuenta la presencia de los fenómenos de variabilidad climática interanual El Niño y La Niña ocurridos durante los intervalos de análisis. Lo anterior debido a que estos fenómenos impactan directamente a los patrones de precipitación (aumento o disminución de la cantidad de lluvias, variación en los períodos húmedos y secos, etc.) y a las condiciones socio-ambientales del área de estudio (CORPOGUAVIO-CAR, 2015). En este sentido, durante un período de ocurrencia de El Niño, los efectos en la región Andina se manifiestan a través de la disminución de precipitaciones; y, al contrario, con la presencia de La Niña, los efectos se traducen en excesos de precipitación, especialmente en el nororiente, centro y sur de la región Andina de Colombia (IDEAM, 2005).

7.1.1.1 Período 1977 – 1987

Durante este primer intervalo de estudio se presentó una importante disminución del área del embalse (Figura 30) pasando de 2.918 hectáreas en 1977 a 2.010 hectáreas en 1987, determinándose una reducción del 31,1% de todo el cuerpo de agua. Respecto al buchón, no se presenta una variación significativa en su cobertura, el cual se mantuvo en una ocupación promedio del 2% frente a la superficie total del embalse; sin embargo, si registra una disminución de su área calculada, pasando de 62,8 hectáreas en 1977 a 40,2 en 1987.

Al revisar los datos hidro-meteorológicos del área de estudio, se encontró un caudal promedio de 1.5 m³/s para el río Aves y 1.0 m³/s para el río Siecha, adicional a un aporte por precipitación total de 8.134 mm para el intervalo estudiado. Con estos valores se puede inferir que el aporte volumétrico recibido por el embalse fue más bajo frente al aporte esperado, el cual, acorde con los estudios técnicos e información presentada en el Plan de Manejo Ambiental, era de 3.94 m³/s (MINAMBIENTE, 2008).

Así mismo, la información de variabilidad climática interanual indica que se presentó un periodo de tiempo mayormente marcado por el fenómeno de El Niño, teniendo una etapa muy intensa durante los años 1982 y 1983 y fuerte entre 1986 y 1987 (IDEAM-PNUD, 2012), lo cual se tradujo en bajas precipitaciones y pocos aportes de agua natural o por gravedad para el embalse hasta el año 1987. Los anteriores elementos explican la importante disminución de área que sufrió el embalse hacia el final de este intervalo de tiempo.

Los anteriores datos e información hidro-climática también se correlacionan con la situación que presentó el embalse para el año 1985, el cual se identificó como el año con menos área, extensión o superficie a partir de 1977, con solo 1.123 hectáreas (Figura 31). Esta superficie fue un 61,5% menor comparada con la del año 1977 y un 44,1% inferior comparada con la de 1987.

Figura 30: Mapa comparativo de superficie período 1977 – 1987.

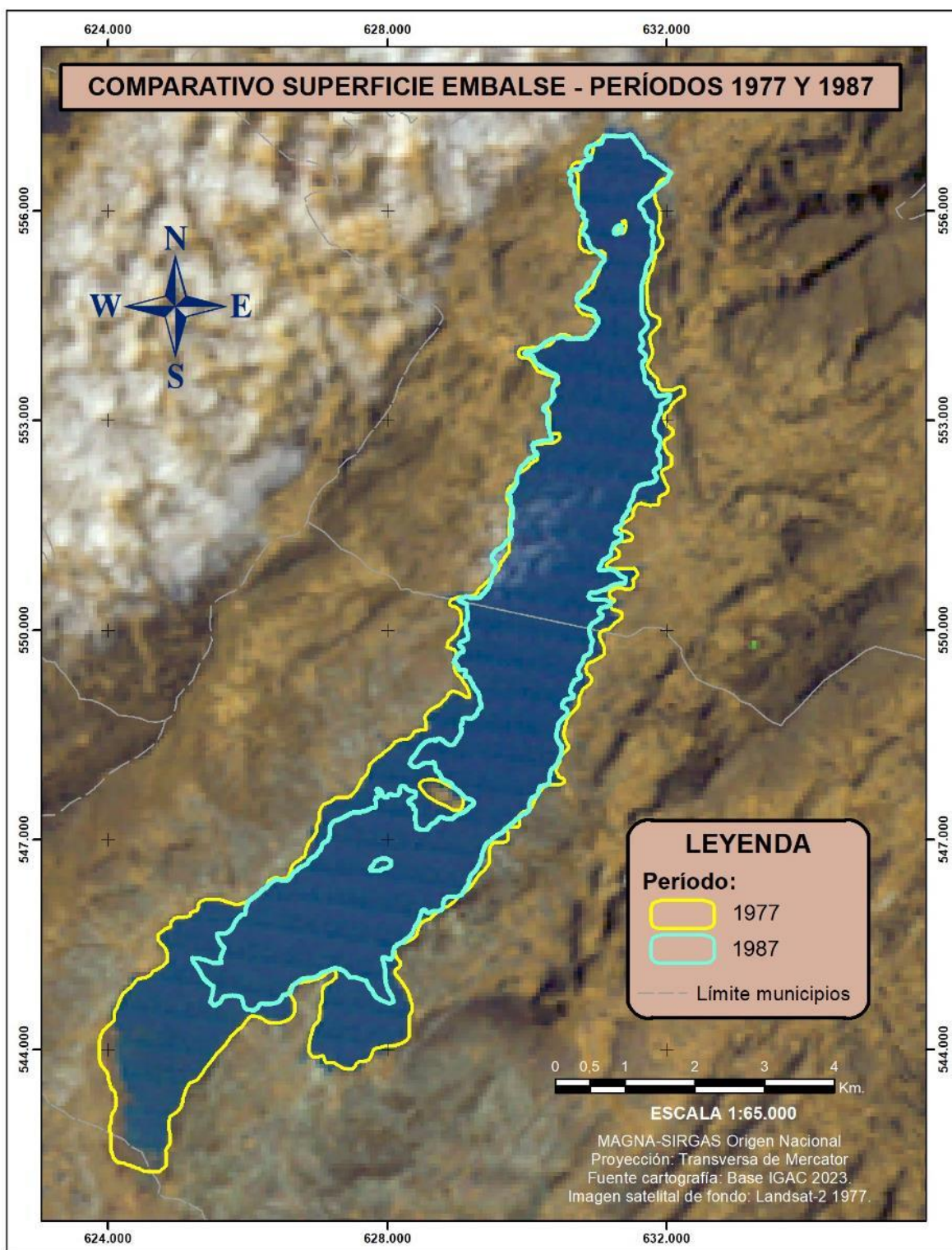
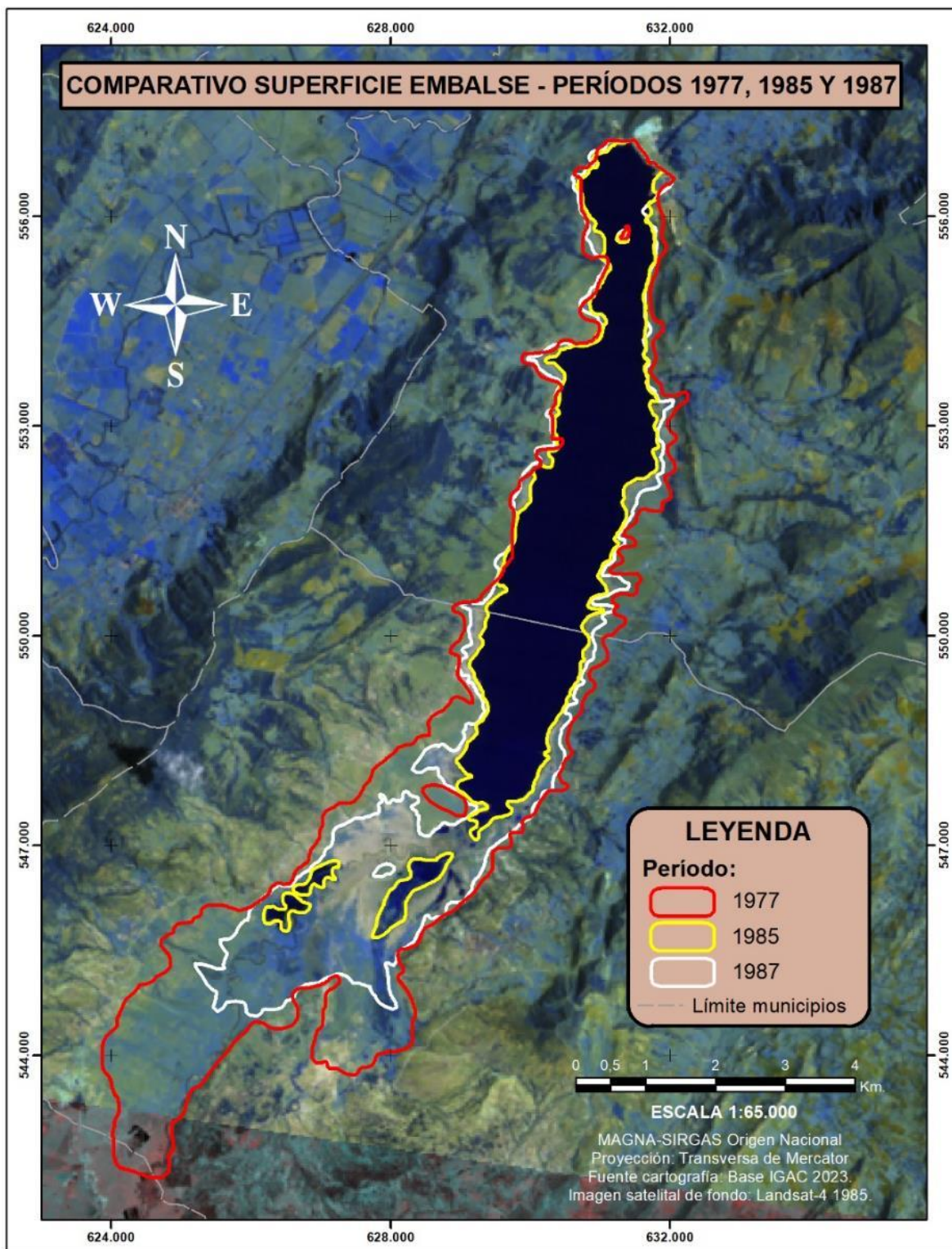


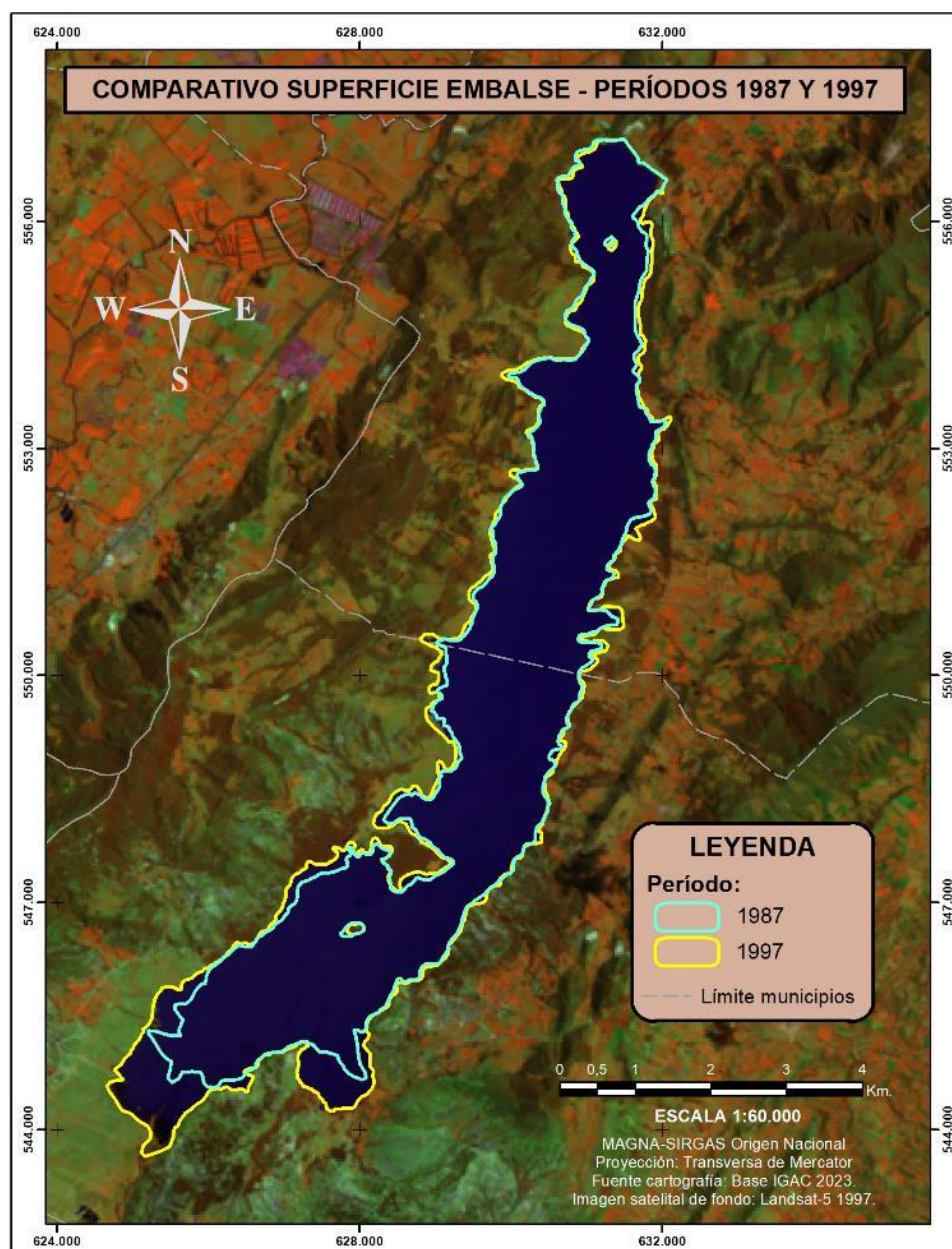
Figura 31: Mapa comparativo de superficie períodos 1977, 1985 y 1987.



7.1.1.2 Período 1987 – 1997

En este segundo intervalo de análisis, se presentó una leve recuperación del área del embalse (Figura 32) pasando de 2.010 hectáreas en 1987 a 2.337 hectáreas en 1997, determinándose un incremento del 16,3%. Por su parte, la cobertura de buchón presentó una pequeña reducción en el área ocupada dentro del espejo de agua, pasando de 40,2 hectáreas en 1987 a 34,9 hectáreas en 1997, con un promedio de ocupación del 1,5% frente a la superficie total del embalse.

Figura 32: Mapa comparativo de superficie período 1987 – 1997.



Al revisar los datos de caudal de los ríos Aves y Siecha, se observa un caudal promedio recibido de 2,4 m³/s dentro de este intervalo, junto con un aporte por precipitación total de 7.689 mm, lo cual es comparativamente menor a lo presentado en el período anterior. Sin embargo, el aumento en la superficie del embalse para el año 1997 es explicado por el paulatino incremento de precipitaciones presentadas desde el año 1994, con valores máximos hacia 1996 (Figura 28), las cuales aportaron volúmenes significativos de agua previo al último año de este intervalo. Así mismo, al revisar la información de variabilidad climática interanual, se encontró un periodo de tiempo con presencia de los fenómenos El Niño y La Niña, pero con una etapa muy fuerte de La Niña entre 1988 y 1989, momento en el cual el embalse también recibió importantes aportes de agua.

7.1.1.3 Período 1997 – 2007

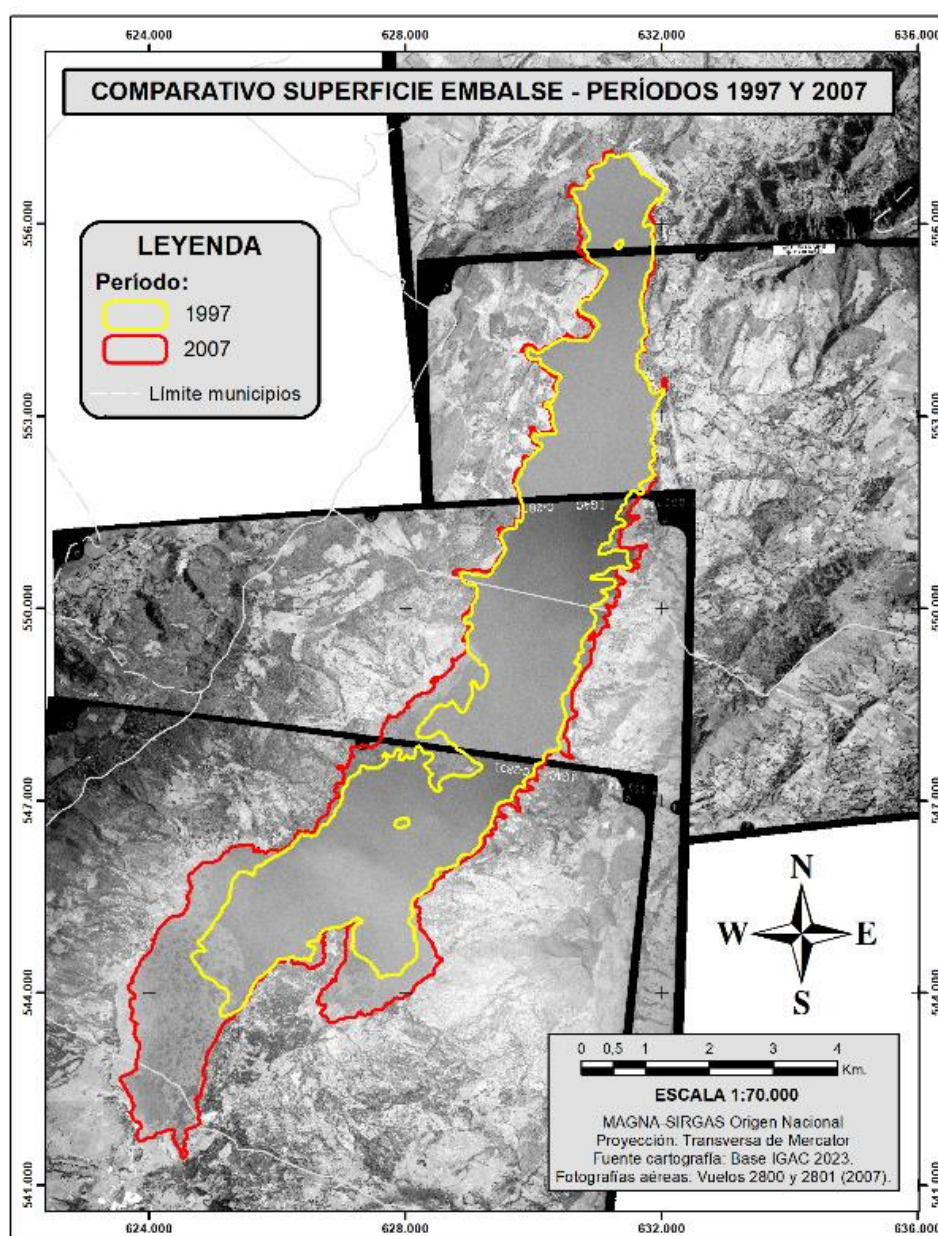
Dentro de este intervalo se presenta el mayor aumento del área del embalse (Figura 33) pasando de 2.337 hectáreas en 1997 a 3.228 hectáreas en 2007, registrándose un incremento del 38,1% de la superficie. De igual forma, la cobertura de buchón alcanza su máxima extensión, con un incremento del 2.250%, pasando de 34,9 hectáreas en 1997 a 819,3 hectáreas en 2007, lo cual significaba que un 1/4 de la superficie del embalse estaba cubierta por este tipo de vegetación acuática (Tabla 10).

Los datos de caudal y de precipitación para el área de estudio son inferiores a los presentados durante los anteriores períodos de estudio, con valores de aporte de 1,7 m³/s desde los ríos Siecha y Aves y valores de precipitación total de 6.769 milímetros. De lo anterior se deduce que el aporte volumétrico por agua natural no fue suficiente para que el embalse alcanzara el nivel registrado en 2007. Así mismo, al verificar la información de variabilidad climática interanual, se observó un periodo de tiempo mayormente marcado por el fenómeno de El Niño, con una etapa débil finalizando el año 2006, pero que representó un déficit severo de precipitación durante los dos primeros meses de 2007 (IDEAM-PNUD, 2012).

De acuerdo con los datos e información anterior, se puede inferir que la extensión alcanzada por el embalse no se dio debido al aporte de aguas por gravedad; por lo tanto, se deduce que su llenado obedeció a una intervención antrópica, a través del trasvase paulatino y constante de aguas desde el Río Bogotá. Este almacenamiento por trasvase se pudo dar atendiendo a las funciones de regulación hídrica, de almacenamiento y de potencial hidro-energético que cumple este embalse, a fin de mantener agua de reserva ante la probabilidad de prolongación de los períodos de sequía que ocurrían en esos momentos, y ante la posible necesidad de volver a generar energía eléctrica. De esta forma, el embalse alcanzó el nivel de superficie más alto de los calculados durante los diferentes períodos de análisis.

En relación a la cobertura de buchón, la cual ocupaba un 25,4% del cuerpo de agua en 2007, se tiene, que a raíz de su alta proliferación y la problemática socio-ambiental que estaba suscitando, se adelantara un reforzamiento de las acciones de control y de manejo por parte de las entidades competentes (MINAMBIENTE, 2008). De ello se desprende que, en el Plan de Manejo Ambiental aprobado en 2008, se hiciera fuerte énfasis en el proceso de analizar causas y buscar soluciones como la extracción, disposición final y en la toma de medidas preventivas para el futuro control de este tipo de vegetación.

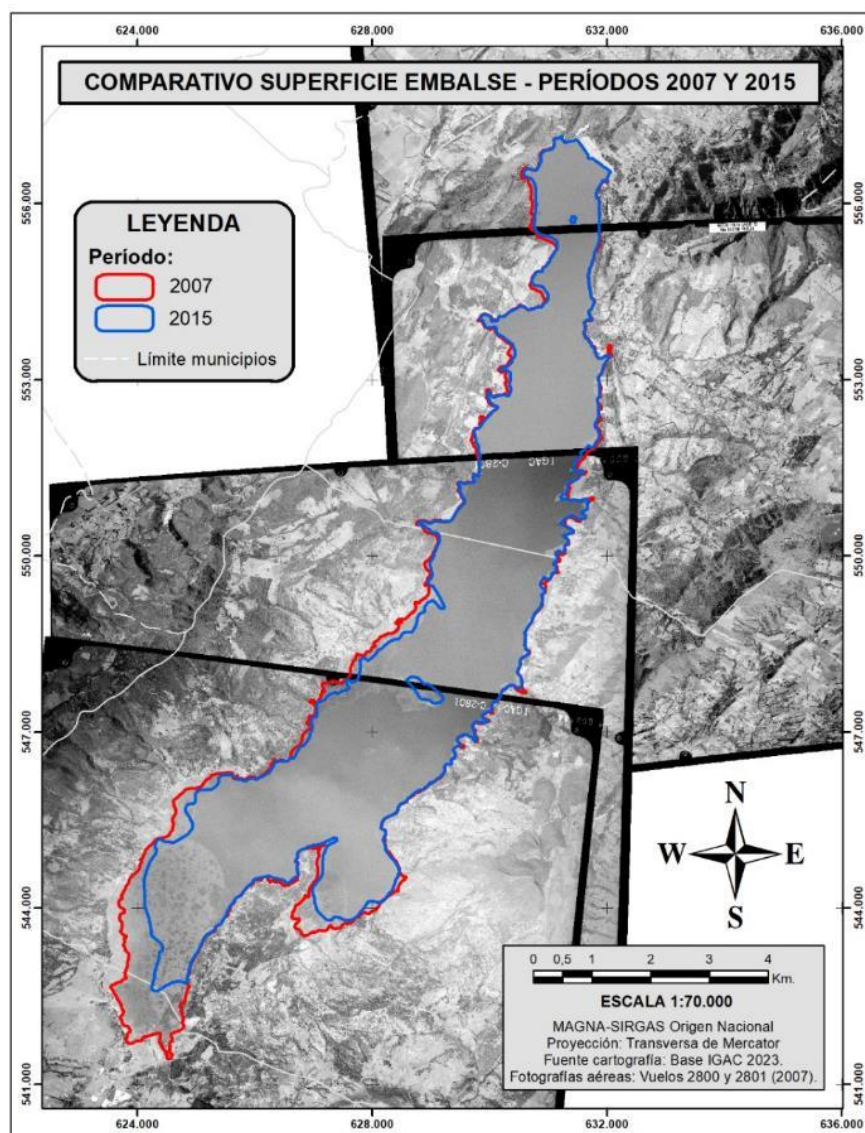
Figura 33: Mapa comparativo de superficie período 1997 – 2007.



7.1.1.4 Período 2007 – 2015

Durante este intervalo de análisis, el cual solo abarcó 8 años, se presentó una disminución del área del embalse (Figura 34) pasando de 3.228 hectáreas en 2007 a 2.884 hectáreas en 2015, determinándose una reducción del 10,7% de su superficie. El buchón también presentó una disminución de su cobertura, pasando de 819,3 hectáreas en 2007 a 150,7 hectáreas en 2015, mostrando una reducción del 81,6% y pasando a representar solo el 5,2% de la superficie total del embalse. Esta reducción del área ocupada por el buchón obedeció a la realización de acciones de control y de extracción iniciadas desde 2006 y que fueron reforzadas con otras medidas luego de la implementación del Plan de Manejo Ambiental en 2008 (EMGESA & Energía de Bogotá, 2013).

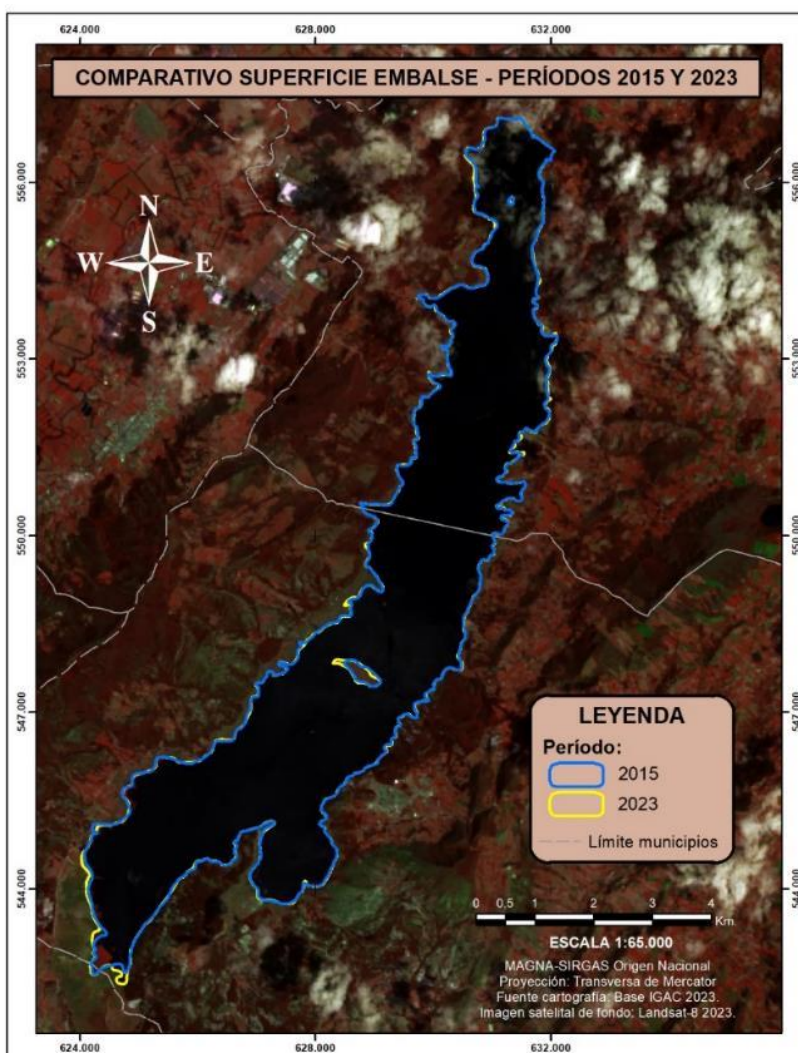
Figura 34: Mapa comparativo de superficie período 2007 – 2015.



La revisión de los datos de caudales arrojó un valor promedio recibido por año de 2,0 m³/s, adicional a un aporte por precipitación de 6.684 milímetros. De acuerdo con estos valores, se puede determinar que el aporte volumétrico recibido por el embalse fue más bajo frente al aporte esperado. Así mismo, al verificar la información de variabilidad climática interanual, se observó un periodo de tiempo mayormente marcado por el fenómeno El Niño, con una etapa muy fuerte a partir del año 2014 y que abarcó todo el año 2015. Sin embargo, previo a estos años se registraron períodos muy fuertes de La Niña entre 2010 y 2012, por lo cual se deduce que el embalse, a pesar de haber recibido altos volúmenes de precipitación en estos años (Figura 28), con la posterior ocurrencia de un fenómeno de El Niño entre 2014 y 2015, su área volvió a reducirse.

7.1.1.5 Período 2015 – 2023

Figura 35: Mapa comparativo de superficie período 2015 – 2023.



El último intervalo de análisis, que al igual que el anterior también fue de 8 años, se caracterizó por un leve aumento del área del embalse (Figura 35), pasando de 2.884 hectáreas en 2015 a 2.905 hectáreas en 2023, registrando un incremento del 0,7% de su superficie. Por su parte, la cobertura de buchón continuó disminuyendo, pasando de 150,7 hectáreas en 2015 a 78,4 hectáreas en 2023, siendo una disminución del 47,9% y pasando a representar solo el 2,8% respecto a la superficie total del embalse. Esta continuación en la reducción del área ocupada por el buchón, también obedeció a las acciones de extracción, de control y prevención llevadas a cabo con la implementación del Plan de Manejo Ambiental.

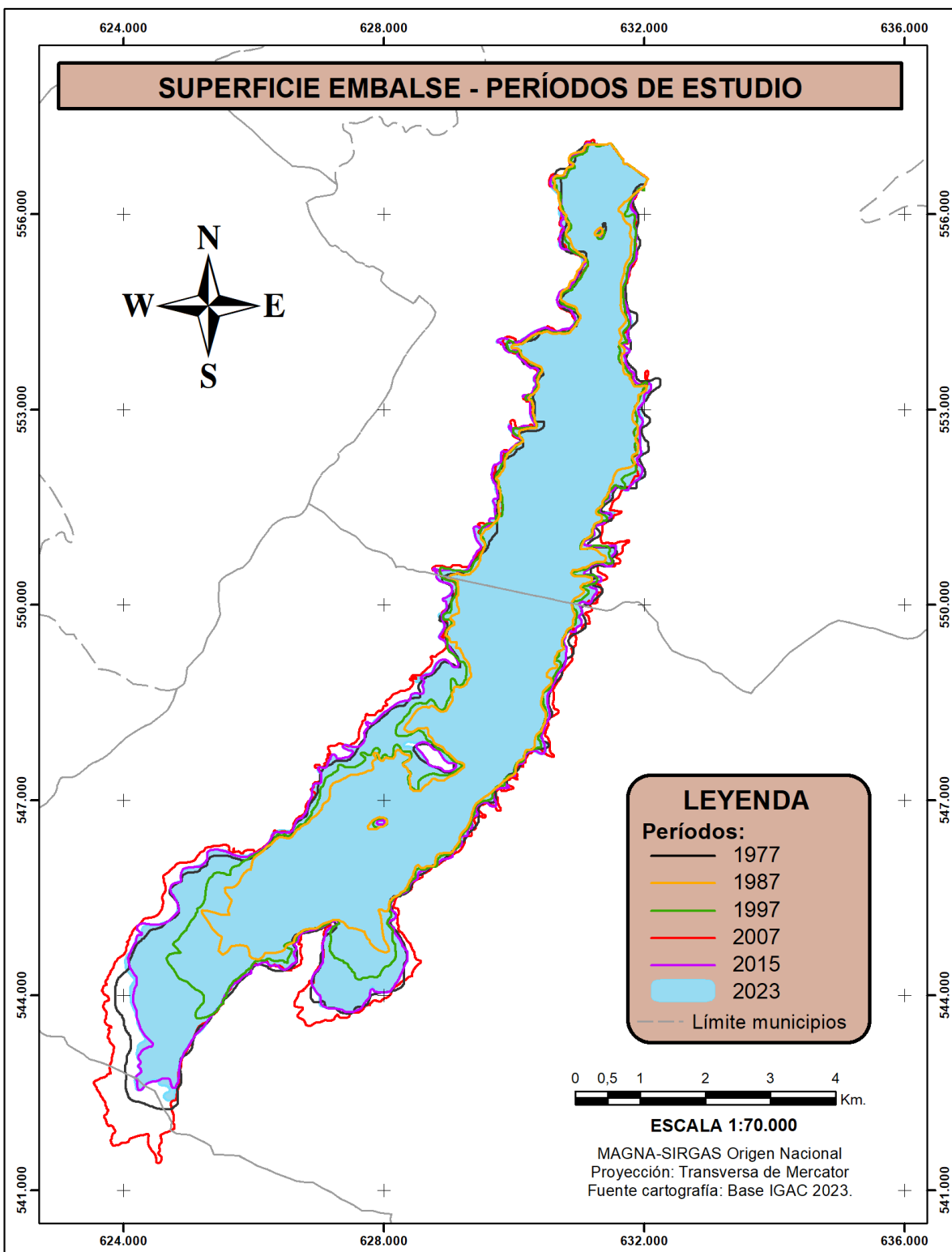
El incremento del área del embalse (comparada con la presentada en 2015) está relacionada con los aportes volumétricos esperados y recibidos durante este intervalo de tiempo. Al respecto, los datos de caudal de las estaciones de referencia muestran un total de 2.8 m³/s recibidos y un aporte por precipitación de 4.856 milímetros hasta el año 2021 (Tabla 12 y Figura 28). Por su parte, la información de variabilidad climática interanual también determinó un intervalo de tiempo mayormente asociado a altas precipitaciones, especialmente por la ocurrencia de un fenómeno muy fuerte de La Niña entre 2020 e inicios de 2023.

7.2 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

El presente análisis multitemporal, sobre la variación del cuerpo de agua del embalse de Tominé, ha proporcionado resultados significativos que aportan a la comprensión de las dinámicas del lugar y que pueden apoyar en la futura gestión para esta área de estudio. Al procesar y analizar las imágenes seleccionadas se pudieron determinar patrones, identificar cambios espaciales por origen natural y antrópico, y determinar algunas características físicas propias de este cuerpo de agua. Estos resultados ofrecen una visión detallada de esas dinámicas, las cuales permitirán inferir tendencias y proyectar posibles escenarios futuros para el comportamiento físico del embalse.

Dentro de los cambios y patrones identificados, se pudo establecer cuáles fueron las zonas del embalse donde se presentaron las mayores variaciones espaciales de la superficie, por crecimiento o retroceso de su línea de costa (Figura 36). Estas correspondieron al extremo sur o cola del embalse (Figura 37), a la bahía sur-oriental donde se ubicaba el antiguo centro poblado de Guatavita y a la zona centro-occidental donde se encuentra actualmente la isla principal de este embalse, la cual se forma durante los años de mayor extensión (Figura 38). Estas tres zonas, donde se identificó la mayor variación espacial, se caracterizan por ser áreas con grandes extensiones de terreno, con pendientes relativamente planas o de poca profundidad (en los casos en que se encuentran inundadas). Y esa condición de poca pendiente favorece que las masas de agua se extiendan o retrocedan ampliamente sobre estas zonas. No se encontraron alteraciones espaciales asociadas a grandes intervenciones hidráulicas o a uso del suelo que afectaran significativamente a las zonas de mayor variación y a las demás áreas operativas del embalse.

Figura 36: Mapa comparativo de superficie, todos los períodos de estudio.



El análisis comparativo de las diferentes superficies calculadas, también permitió, aparte de las tres áreas de mayor variación identificadas, evidenciar otra zona donde se presentaron reducciones localizadas del cuerpo de agua. Esa zona corresponde a la orilla centro - oriental del embalse, sobre la actual cabecera municipal de Guatavita, sus alrededores y la ocupada por los diferentes clubes náuticos hacia el nororiente. Este hecho puede estar asociado a una ganancia de terreno por acción humana, sin embargo, se deben realizar más estudios y verificaciones a fin de determinar la verdadera causa que dio lugar a un retroceso continuo del cuerpo de agua en esas zonas.

Figura 37: Foto zona sur o cola del embalse de Tominé.

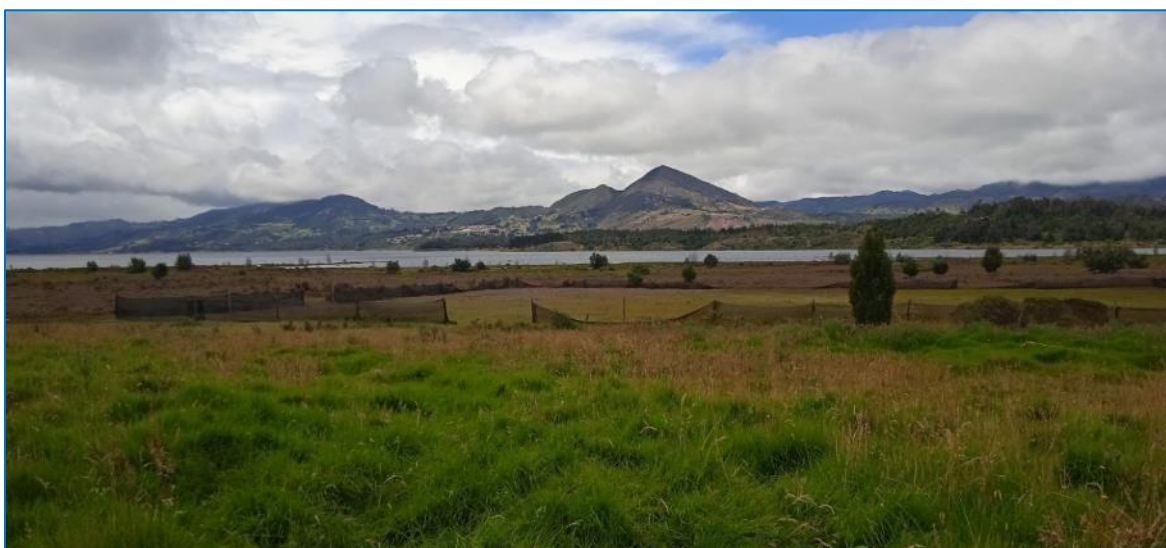
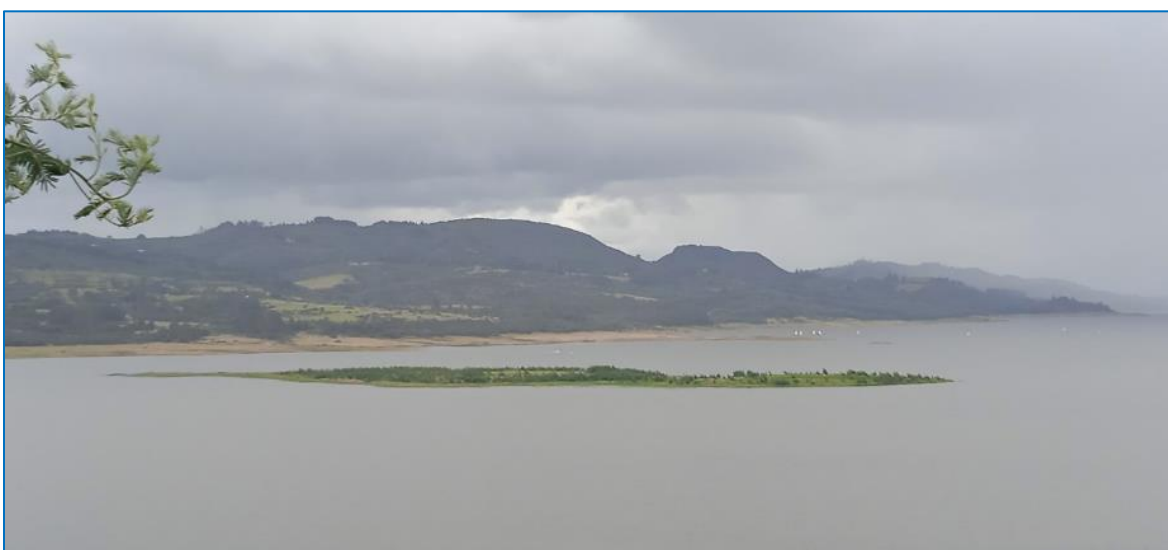


Figura 38: Foto zona centro-occidental del embalse de Tominé (isla principal).



Se pudo establecer que el año con menor nivel de agua para el embalse, dentro de los años analizados, fue 1887, y el año con mayor superficie fue 2007. A partir de estos valores extremos, de las demás áreas calculadas y de la identificación de causas asociadas a esas variaciones, se determinó una tendencia del comportamiento físico de la superficie en un corto plazo, la cual indicó, que de presentarse condiciones climáticas similares a las ocurridas durante los últimos 40 años, de no presentarse contingencias que impliquen extracción de grandes volúmenes de agua y de no adelantarse intervenciones hidráulicas significativas, la extensión del cuerpo de agua continuará hacia un leve aumento. Este tipo de resultado puede constituir un insumo importante para adelantar previsiones o para proyectar decisiones de acción o de planeación frente al manejo y futura gestión del embalse.

Figura 39: Fotos implementación de barreras físicas para contención de buchón.



Luego de la aplicación del estudio, también se logró evidenciar la importante funcionalidad de regulación hídrica que cumple este embalse, principalmente para la cuenca media del río Bogotá. Este hecho se logró identificar especialmente en los periodos marcados con fuertes sequías, como en el caso del intervalo 1997-2007, en donde el área del embalse mostró una realidad diferente (mayor extensión) a la esperada de acuerdo a los datos hidro-climáticos revisados, permitiendo identificar un llenado artificial con aguas provenientes del río Bogotá.

Respecto al análisis sobre la presencia de buchón en este cuerpo de agua, como ya se indicó, se pudo determinar un pico de ocupación hacia el año 2007, con un momento de rápida proliferación a partir del año 1997. La presencia de esta vegetación acuática conforma uno de los impactos más importantes sobre el embalse, puesto que afecta negativamente sus acciones de operación y los servicios que ofrece y conlleva a la necesidad permanente de implementar medidas de prevención y regulación, tanto en el área del cuerpo de agua como en sus áreas aferentes o de captación (toda la subcuenca). Sin embargo, esta problemática ha sido comprendida y analizada en toda su dimensión y fue acogida dentro del actual Plan de Manejo Ambiental, dando como resultado la toma acertada de medidas y la ejecución de actividades tendientes a su control y prevención en un corto y mediano tiempo.

Se logró evidenciar que la mayoría de medidas de control propuestas en el PMA a partir de 2008, como la implementación de barreras físicas (guayas con tubos de PVC) para el confinamiento, control y la extracción del buchón (Figura 39), así como el trabajo mancomunado con las poblaciones y demás actores locales, han resultado efectivas, y muestra de ellos es el logro en la reducción del buchón a partir de 2007, pasando de un 25,4% a menos de un 3% de ocupación en un periodo de 8 años.

La presencia y variación del buchón, que logró ser cuantificado a través de los ejercicios de fotointerpretación y digitalización, también permitió de forma indirecta, llamar la atención sobre otras problemáticas asociadas, como el aumento de carga orgánica dentro del embalse, producto del ingreso de sedimentos, nutrientes y contaminantes que alteran la calidad del agua; y que se traduce en perjuicios económicos a usuarios del embalse, en la configuración de conflictos sociales con las comunidades locales, en la alteración de los ciclos hidrobiológicos de los ecosistemas del lugar y en el deterioro del paisaje en general.

8 CONCLUSIONES

La identificación de la extensión del embalse de Tominé, luego del procesamiento y digitalización de diferentes imágenes satelitales Landsat y de las fotografías aéreas empleadas, arrojó los siguientes resultados para los años de estudio seleccionados: 2.978 hectáreas (ha) en 1977, 2.010 ha en 1987, 2.337 ha para 1997, 3.228 ha para 2007, 2.884 ha en 2015 y 2.905 ha para el año 2023.

El cálculo de determinación de cambios para el embalse de Tominé, mostró, a partir del primer año de estudio, una disminución pronunciada de su superficie en un período corto de tiempo y luego unos leves pero constantes incrementos en períodos de tiempos más largos. De acuerdo con ello, entre los años 1977 y 1987 la superficie del embalse presentó una fuerte disminución calculada en un 31,1%, para luego experimentar un aumento leve del 16,3% hasta el año 1997, tendencia que se continuaría con un aumento más fuerte del 38,1% hasta 2007, y luego presentar una disminución del 10,7% hasta el año 2015, para finalizar con un leve aumento del 0,7% hasta 2023.

Las áreas del embalse donde se registraron las variaciones espaciales más amplias de su superficie se determinaron en tres zonas principalmente: en el extremo sur o cola del embalse, la bahía sur-oriente o lugar donde se ubicaba el antiguo pueblo de Guatavita y la zona centro-occidental donde emerge la isla principal del embalse durante sus períodos de mayor extensión. La razón más importante para explicar el crecimiento o retroceso de la línea de costa en estas zonas está asociada a la topografía relativamente plana y a las pendientes muy bajas que estas presentan.

La presencia de vegetación acuática tipo buchón dentro del cuerpo de agua ha generado problemáticas e impactos socio-ambientales, que han sido abordadas y manejadas por la entidad encargada de la operación del embalse. La superficie cubierta con buchón presentó su máxima extensión en el año 2007, con 819,3 hectáreas que representaron una ocupación del 25,4% del área total del embalse; pero a partir de ese año, a raíz de las acciones de manejo y de extracción implementadas, se logró reducir su cobertura hasta 78,4 hectáreas en 2023, volviendo a porcentaje de ocupación similares a los presentados en el año 1977.

9 RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que los estudios y/o análisis de tipo multitemporal, aplicados a cuerpos de agua requieren de poca cantidad de insumos y que ofrecen mucha efectividad en la obtención de resultados, se recomienda su potenciación y un mayor enfoque hacia los cuerpos de agua artificiales, a fin de mejorar las diferentes metodologías aplicables y poder disponer de mayores elementos que aporten a su mejor gestión y planeación. Así mismo, se recomienda elegir intervalos de tiempo más cortos, preferiblemente menores a 5 años, lo cual permitirá identificar mayores variaciones y explicar de mejor manera las causas asociadas a esos cambios.

La selección y escogencia de imágenes satelitales, de fotografías aéreas o de otros insumos de sensores remotos para posteriores estudios, se recomienda se haga teniendo los períodos de tiempo en que puedan ocurrir diferentes fenómenos climáticos, entre ellos los asociados a la variabilidad climática interanual como El Niño o La Niña, además de conocer previamente sus comportamientos o formas de manifestación dentro del área de estudio elegida. De igual manera, es recomendable elegir la misma temporada del año para la selección de insumos, a fin de garantizar condiciones climáticas, ambientales e incluso socio-económicas similares y comparables dentro del área de estudio.

Para el caso del Embalse de Tominé y con el objeto de formular mejores acciones de tipo preventivo frente a la proliferación de vegetación acuática invasora, como el buchón, se recomienda adelantar análisis de parámetros físico – químicos del agua con más frecuencia. A través de ello se reducirían esfuerzos y se evitaría la destinación de grandes recursos en la ejecución de acciones para el control, erradicación o manejo de los impactos generados por la presencia de estas especies en el cuerpo de agua.

También, para el caso del embalse de Tominé, se recomienda adelantar estudios con mayor profundidad que ayuden a determinar los impactos sociales, ambientales y territoriales que pueden estar generando en el cuerpo de agua los clubes náuticos que se encuentran ubicados en su zona nor-oriental.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Acosta R., J., & Morales F., C. (2021). *Análisis Espacial y Temporal del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú en épocas Secas, Durante los Período 2014-2017-2020, en el Departamento de Córdoba Colombia*. Bogotá D.C.: Universidad Antonio Nariño.
- Barriga Rodríguez, J. (2019). *Evaluación de la Calidad Hídrica e Impactos Socioambientales de los Embalse de Cundinamarca, Colombia*. Bogotá D.C.: Universidad Javeriana.
- Bastawesy, M., Khalaf, F., & Arafat, S. (2008). The Use of Remote Sensing and GIS for the Estimation of Water Loss from Tushka Lakes, Southwestern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 52, 73-80. doi:10.1016/j.jafrearsci.2008.03.006
- Betancourt, L. A., & Garnica, C. M. (2017). *Estudio Hidrológico y Evaluación de Demanda en la Cuenca Hidrográfica del Embalse Tominé*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Blog del Fotógrafo. (2010). *¿Qué es Fotografía Aérea?* Obtenido de <https://www.blogdelfotografo.com/fotografias-aereas/>
- Branco, P., Segurado, P., Santos, J., Pinheiro, P., & Ferreira, M. (2012). Does Longitudinal Connectivity Loss Affect the Distribution of Freshwater Fish? *Ecological Engineering*, 70-78. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857411002205>
- Bustamente Fernández, C. (2008). *Efectos Ambientales Generados por la Construcción y Operación de un Embalse*. Sincelejo: Universidad de Sucre.
- Camargo, E., & Dussan, K. (2022). *Detección de Cambios en la Línea de Costa en el Municipio de Arboletes para los Años 2001, 2010 y 2022 Utilizando Imágenes Landsat 7 y 8*. Bogotá D.C.: Universidad Antonio Nariño.
- CAR; Ecoforest; Planeación Ecológica Ltda. (2006). *Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá. Subcuenca Embalse del Tominé 2120-17*. Bogotá D.C.: CAR.
- Cheng, J., & et al. (2022). Remote Sensing Big Data for Water Environment Monitoring: Current Status, Challenges, and Future Prospects. *Earth's Future*, 10, 6-7. doi:10.1029/2021EF002289
- Chuvieco S., E. (2008). *Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio*. (3a. Edición actualizada. ed.). Barcelona: Ariel Ciencia.

- Concejo Municipal de Sesquilé. (2020). Acuerdo 007 de 2022. Plan de Desarrollo Municipal Sesquilé, Cundinamarca 2020-2023. Sesquilé, Cundinamarca.
- Contraloría de Cundinamarca. (2019). *Embalses de Cundinamarca*. Bogotá D.C.: Contraloría de Cundinamarca.
- CORPOBOYACÁ. (4 de Septiembre de 2020). *Corpoboyacá*. Obtenido de <https://www.corpoboyaca.gov.co/noticias/abc-de-la-especie-invasora-buchon-de-agua-eichhornia-crassipes/>
- CORPOGUAVIO-CAR. (2015). *Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico -PORH- Para las Unidades Hidrográficas del Nivel I Embalse de Tominé y Río Teusacá, del Que Hacen Parte de la Subzona Hidrográfica del Río Bogotá*. Bogotá: CORPOGUAVIO-CAR.
- David, D. (2020). Notas de Clase para la Asignatura de Percepción Remota, Especialización en Sistemas de Información Geográfica. Bogotá D.C.: Universidad Antonio Nariño.
- Díaz, A. (2011). *Biogeografía*. Obtenido de <https://biogeografia.net/fotografia03.html#:~:text=En%20general%2C%20en%20las%20fotograf%C3%ADas,su%20detalle%20es%20muy%20limitado>
- EMGESA & Energía de Bogotá. (2013). *Plan de Manejo Ambiental Tominé*. Bogotá D.C.: EMGESA.
- EMGESA. (2012). *¿Cómo Funcionan los Embalses?* Obtenido de Portal EPM: <https://www.epm.com.co/site/Portals/0/Como%20funcionan%20los%20embalses.docx>
- Espinosa Pinzón, B. (2023). *Modelo de Análisis Espacial como Herramienta de Intervención para el Manejo Integral de Acacia Decurrens en el Embalse de Tominé*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Estupiñán, L., Florez, C., Quiñonez, M., Pacheco, A., & Santos, A. (Mayo de 2015). Detection and Characterization of Colombian Wetlands: Integrating Geospatial Data with Remote Sensing Derived Data. Using Alos Palsar And Modis Imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-7/W3, 385-382. doi:<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-375-2015>, 2015
- FCEA. (2020). *Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C. Agua.org.mx*. Obtenido de Cuerpos de Agua: https://es.wikipedia.org/wiki/Cuerpo_de_agua
- Flórez, G., Betancur, J., Monterroso, M., & Londoño, J. (Octubre - Diciembre de 2018). Temporary Wetland Evolution in the Upper Chinchiná River Basin and its Relationship

- with Ecosystem Dynamics. *DYNA*, 85(207), 351-359.
doi:<https://chooser.crossref.org/?doi=10.15446%2Fdyna.v85n207.69963>
- Franquet Bernis, J. (2010). *Agua que no has de Beber... 60 Respuestas al Plan Hidrológico Nacional*. Madrid: Editorial Dykinson, S.L.
- Galindo Coy, Y. (2021). *Análisis Multitemporal de Cambio en el Espejo de Agua del Río Cusiana Mediante Procesamiento Digital de Imágenes Landsat*. Bogotá D.C.: Universidad Antonio Nariño.
- García, E., & Buitrago, D. (2022). *Análisis Multitemporal y de Fragmentación de la Cobertura de Bosque en el Municipio de San Jacinto, Bolívar*. Bogotá D.C.: Universidad Antonio Nariño.
- Godoy, D., & González, L. (2017). *Análisis Multitemporal de la Extensión del Cuerpo de Agua del Embalse del Muña, Cundinamarca; y las Afectaciones Ambientales del mismo para Poblaciones Cercanas: Sibaté Cundinamarca*. Bogotá D.C.: Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A.
- IDEAM. (2005). *Atlas climático de Colombia*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).
- IDEAM-PNUD. (2012). *Evolución de Precipitación y Temperatura Durante los Fenómenos El Niño y La Niña en Bogotá - Cundinamarca (1951 - 2012)*. Bogotá D.C.: IDEAM-PNUD.
- IECA. (3 de Octubre de 2014). *Blog Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía*. Obtenido de ¿Qué es una fotografía aérea y qué es una ortofotografía?: <https://ws089.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/blog/2014/10/foto-aerea-vs-ortofotografia/>
- IGAC. (2023). *Colombia en Mapas*. Obtenido de <https://www.colombiaenmapas.gov.co/#>
- IGAC-CIAF. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Bogotá D.C.: IGAC.
- INEGI. (2023). *Dirección General de Geografía y Medio Ambiente: Imágenes de Satélite LANDSAT*. Recuperado el 2023, de <https://en.www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/>
- MINAMBIENTE. (2008). Resolución 0776 de 2008. *Por la Cual se Establece un Plan de Manejo Ambiental para el “Embalse de Tominé” y se Toman Otras Determinaciones*. Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

- NASA. (2023). *Landsat Science - Landsat 9*. Obtenido de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/>
- Ochoa, F. (16 de 01 de 2023). *¿Qué es un Análisis Multitemporal?* Obtenido de El Blog de Franz: <https://acolita.com/que-es-un-analisis-multitemporal/#:~:text=Un%20an%C3%A1lisis%20multitemporal%20es%20una,a%20largo%20del%20tiempo.>
- Pham-Duc, B., Sylvestre, F., Papa, F., Frappart, F., Bouchez, C., & Crétaux, J. (2020). The Lake Chad Hydrology Under Current Climate Change. *Scientific Reports Nature Research*, 1-10. doi:10.1038/s41598-020-62417-w
- Ramirez Ubaté, S. (2005). *Evaluación de la Degradación Natural de la Especie Eichinornia Craissispes (Buchón) para el Embalse del Muña*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.
- Rao, L., Kiran, N., Srivastava, N., & Singh, A. (9 de Enero de 2009). *Development of a GIS Based Application for Selection of Villages for Sodic Land Reclamation*. Obtenido de Geospatial World: <https://www.geospatialworld.net/article/development-of-a-gis-based-application-for-selection-of-villages-for-sodic-land-reclamation/>
- Rey Diaz, D. (2020). *Análisis Multitemporal del Área Correspondiente a la Laguna de Tota para el Período 1989-2019*. Bogotá D.C.: Universidad Antonio Nariño.
- Reyez Mendoza, N. (2023). *Análisis Multitemporal del Espejo de Agua en la Ciénaga de Zapatosa Ubicada en los Departamentos del Cesar y Magdalena, Durante el Periodo 2015 – 2017 y 2021*. Bogotá D.C.: Universidad Antonio Nariño.
- Ruiz Chavarro, M. (2021). *Análisis Multitemporal del Espejo de Agua del Embalse del Muña Mediante Imágenes Satelitales Sentinel*. Bogotá D.C.: Universidad Militar Nueva Granada.
- SEGEMAR. (2019). *Sensores Remotos - Geología y Recursos Minerales*. Obtenido de Argentina.gov.ar: <https://www.argentina.gob.ar/produccion/segemar/geologia-y-recursos-minerales/sensores-remotos>
- Soria, J., & Apostolova, N. (2022). Decrease in the Water Level of Lake Prespa (North Macedonia) Studied by Remote Sensing Methodology: Relation with Hydrology and Agriculture. *Hydrology*, 1-12. doi:10.3390/hydrology9060099
- Stefouli, M., & Charou, E. (2012). Ohrid Lake Monitoring using Meris and Landsat Images. *BALWOIS*, 1-13.

- Triana, A. P. (2023). *Análisis Multitemporal de la Expansión Urbana en el Municipio de Zipaquirá, Cundinamarca en el Periodo 1991-2022*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Antonio Nariño. Obtenido de Repositorio Universidad Antonio Nariño: <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/7808>
- Vargas C., G. (2008). La Teledetección en la Observación, Estudio y Monitoreo de la Tierra. *Revista Innovación y Ciencia.*, XV(3), 106-118.
- Veloza, J. (2017). *Análisis Multitemporal de las Coberturas y Uso del Suelo de la Reserva Forestal Protectora-Productora "Casablanca" en Madrid Cundinamarca entre los Años 1961 y 2015: Aportes para el Ordenamiento Territorial Municipal*. Bogotá D.C.: Universidad Distrital - IGAC-CIAF.