

“Análisis geoespacial de los cambios de cobertura y de la contaminación generados por actividades mineras en la microcuenca del río Teta, municipio de Buenos Aires, Cauca”

"Geospatial Analysis of Land Cover Changes and Pollution Generated by Mining Activities in the Teta River Micro-Watershed, Municipality of Buenos Aires, Cauca"

Clara Isabel Delgado¹
clara.delgado00@usc.edu.co

Dayan Lizeth Ibarra²
dayan.ibarra00@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Especialización en Sistemas de Información Geográfica.
(1), (2)

Resumen

En las riberas del río Teta, del municipio de Buenos Aires, departamento del Cauca, se desarrollan actividades de extracción de oro de aluvión comúnmente empleando mercurio (Hg) de forma desmedida, generando residuos peligrosos los cuales son vertidos al río sin ningún control. Esta práctica y demás actividades antrópicas conlleva a una significativa alteración y contaminación de los cuerpos de agua, de la biota, y la salud de la población humana que está directamente relacionada con la actividad minera, así como de los habitantes de la zona. El objetivo del presente estudio fue analizar mediante la aplicación de herramientas SIG y de teledetección la variación espacio-temporal de las coberturas del suelo como resultado de los impactos generados por la contaminación proveniente de las actividades de extracción de oro y otras actividades humanas en la microcuenca del río Teta. Para ello, se realizó un análisis bitemporal (Jiménez-Moreno et al, 2011), en el cual se emplearon imágenes satelitales tipo Landsat de los años 1989 y 2019, y mediante la utilización de diferentes herramientas de geoprocésamiento se realizó una clasificación supervisada del río en un buffer de 100 metros a cada lado, conforme a la Franja de Protección Hídrica o Franja Especial Protectora (FEP). Además, de manera complementaria y con el fin de realizar un mayor análisis, se empleó la capa de usos y coberturas del suelo LULC del año 2019 proporcionada por la plataforma de ESRI, la cual tiene como base imágenes Sentinel 2, lo que permite un mayor detalle a comparación de otras fuentes. Lo anterior se comparó con la clasificación supervisada mediante el índice Kappa. Así mismo, se relacionó con datos obtenidos en campo en el año 2019 en 5 puntos de río Teta, sobre concentraciones de Hg en agua y sedimentos, parámetros fisicoquímicos y muestreo de macroinvertebrados para determinar la calidad biológica del agua mediante el índice BMWP/Col. Se evaluó el comportamiento espacial de las concentraciones de Hg a lo largo del gradiente altitudinal, al igual que la variación de la calidad biológica y fisicoquímica del cuerpo de agua y su relación con las actividades desarrolladas en la microcuenca. Los resultados mostraron un desarrollo y crecimiento de las actividades de extracción de oro en el río entre el año 1989 y 2019, evidenciando considerables pérdidas de cobertura vegetal y boscosa en las riberas, y la alteración de la morfología fluvial. Respecto a la contaminación del río, se evidenció una tendencia de aumento de las concentraciones del metal en sedimentos en relación con la morfología del río, siendo mayor en zonas de bajas corrientes de agua o remansos, destacándose la estación E3. Por otro lado, en la estación E4, lugar donde no hay actividades mineras hay una disminución de dichos valores. Respecto a la calidad biológica del río, se evidenció un impacto negativo de contaminación por carga orgánica aguas abajo, aunque las actividades mineras no son la mayor fuente de generación de estos vertimientos, si lo son las viviendas y las actividades agropecuarias desarrolladas en la microcuenca, como en la estación E4, donde hay extensos cultivos de caña, lo que otorga un significativo aporte de carga orgánica. Además, los índices de contaminación (ICO) e Índice de calidad del agua (ICA) reflejan la degradación y perturbación del cuerpo de agua dadas por las actividades antrópicas desarrolladas en la zona de incidencia.

Palabras Clave: Landsat, Teledetección, Corine Land Cover, LULC, Usos de suelo, SIG, Calidad del agua.

Abstract

On the banks of the Teta River in the municipality of Buenos Aires, department of Cauca, alluvial gold mining activities are carried out, often using mercury (Hg) in an excessive manner, generating hazardous waste, which is dumped into the river without any control. This practice and other anthropic activities lead to significant alteration and contamination of water bodies, biota, and the health of the human population that is directly related to the mining activity, as well as the inhabitants of the area. The objective of this study was to analyze through the application of GIS and remote sensing tools the spatio-temporal variation of land cover as a result of the impacts generated by contamination from gold mining and other human activities in the Teta River micro-watershed. For this purpose, a bitemporal (Jimenez-Moreno et al 2011) analysis was performed using Landsat satellite images from 1989 and 2019, and by using different geoprocessing tools, a supervised classification of the river was performed in a buffer of 100 meters on each side, according to the water protection strip. In addition, in a complementary manner and in order to carry out a greater analysis, the 2019 LULC land use and land cover layer provided by the ESRI platform was used, which is based on Sentinel 2 images, which allows for greater detail compared to other sources. This was compared with the supervised classification using the Kappa index. Likewise, it was related to data obtained in the field in 2019 at 5 points of the Teta river, on Hg concentrations in water and sediments, physicochemical parameters and macroinvertebrate sampling to determine the biological quality of the water using the BMWP/Col index. The spatial behavior of Hg concentrations along the altitudinal gradient was evaluated, as well as the variation of the biological and physicochemical quality of the water body and its relationship with the activities developed in the microbasin. The results showed a development and growth of gold mining activities in the river between 1989 and 2019, showing considerable loss of vegetation and forest cover on the riverbanks, and alteration of river morphology. Regarding river contamination, there was a trend of increasing metal concentrations in sediments in relation to the morphology of the river, being higher in areas of low water currents or backwaters, highlighting station E3. On the other hand, at station E4, where there are no mining activities, there is a decrease in these values. Regarding the biological quality of the river, a negative impact of contamination by organic load was evidenced downstream, although mining activities are not the major source of generation of these discharges, but housing and agricultural activities developed in the micro-watershed are, as in station E4, where there are extensive sugar cane crops, which provides a significant contribution of organic load. In addition, the contamination index (ICO) and water quality index (ICA) reflect the degradation and disturbance of the water body due to anthropic activities developed in the area of incidence.

Keywords: Landsat, Remote sensing, Corine Land Cover, LULC ,Land use, GIS, Water quality.

I. INTRODUCCIÓN

Colombia debido a su ubicación geográfica, es uno de los países con mayor biodiversidad y por ende, uno de los más ricos en recursos naturales. Sin embargo, en el ámbito de los recursos mineros, ha surgido un problema relacionado con la extracción de oro. Esta actividad ha incentivado las economías ilícitas y representa un desafío significativo, ya que se lleva a cabo con bajos estándares ambientales y técnicos, lo que causa daños graves e irreversibles al medio ambiente (Mejía, 2016). En particular, esta actividad ilegal deja una huella de deforestación, contaminación y destrucción de la vegetación, especialmente en zonas boscosas y cuerpos de agua. Lo anterior se evidencia en el territorio colombiano, en donde en las últimas décadas ha existido un auge de la actividad minera ilegal de oro debido a la alta demanda y el alza del precio en el mercado internacional (Mejía, 2016; Sierra, 2019). En el proceso de amalgamación, se generan residuos peligrosos que suelen ser vertidos al ambiente sin control, especialmente a las fuentes hídricas, afectando a la fauna, flora y humanos que allí habitan o dependen de este recurso (IPBES, 2019). Según la UNODC (2016), Colombia es uno de los países que afronta más problemáticas ambientales en el continente, siendo la minería una de las más sobresalientes. Para Salazar et al., (2017) en Colombia, las actividades de extracción de oro artesanal y a pequeña escala emiten cerca de 1400 toneladas de Hg al año, siendo esta actividad, unas de las más grandes fuentes de contaminación por Hg.

En la microcuenca del río Teta, municipio de Buenos Aires, desde antes de la llegada de los españoles, los nativos practicaban la minería artesanal mediante el barequeo. Con la colonización, la explotación de oro superficial empezó un crecimiento a gran escala con la construcción de túneles alrededor del Cerro de La Teta (Servicio Geológico Colombiano - SGC, 2018; Muñoz, 2020). El río Teta, cuya longitud de 32,56 Km desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Cauca, ha sido escenario principalmente de la actividad minera de oro aluvión y filón. Además, es el recurso hídrico principal

del cual se hacen posible la realización de varias actividades de los pobladores del sector. En la zona se encuentra el servicio de acueducto inter veredal, el cual suministra agua a varias veredas del municipio de Buenos Aires. Así mismo, es fuente para el desarrollo de actividades de pesca, riego de cultivos y recreación. No obstante, las condiciones de saneamiento básico en la microcuenca no son idóneas y no existe alcantarillado, lo que ha causado el vertimiento de aguas residuales domésticas, agrícolas y del proceso del beneficio del oro sin tratamiento previo (Delgado, 2022). Es por esta razón, que monitorear este problema se ha convertido en una prioridad para las instituciones públicas, asumidas principalmente desde la argumentación académica, en especial, para zonas de difícil acceso por problemáticas y dinámicas sociales atribuidas al conflicto armado en Colombia.

La teledetección y las herramientas SIG son una herramienta útil que permite monitorear en gran medida estas dinámicas socioambientales en territorios de difícil acceso. Actualmente, los sensores remotos, permiten el seguimiento y control del uso y explotación de los recursos naturales en la superficie terrestre. Sin embargo, la teledetección de mercurio en agua, sedimentos o materia orgánica son aún un desafío. En consecuencia, este estudio busca evaluar la relación de la variación espacio temporal de las coberturas del suelo entre los años 1989 y 2019, causada por la minería ilegal en la franja especial protectora del río Teta, y la influencia de los usos del suelo de la microcuenca con los resultados obtenidos en campo y laboratorio por Delgado (2019), en donde se analizaron las concentraciones de mercurio, calidad fisicoquímica y biológica del agua de 5 puntos a lo largo del gradiente altitudinal del río.

Los índices de la calidad del agua (ICA) e índices de la contaminación (ICO) posibilitan la cuantificación de los procesos físicos, químicos y biológicos de los diferentes compuestos que están en los cuerpos de agua, lo que permiten evaluar los impactos generados por la contaminación. Es importante mencionar que los parámetros fisicoquímicos refieren el estado puntual del momento en el que se toma la muestra de agua, y no del estado del recurso hídrico en un determinado rango de tiempo. En este estudio se tiene en cuenta el índice Biological Monitoring Working Party (BMWP) el cual tiene en cuenta la comunidad de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores, ya que dan mayor información acerca de la calidad del agua en largos periodos de tiempo.

En consecuencia, este estudio pretende analizar mediante la aplicación de herramientas SIG y teledetección, la variación espacio-temporal de las coberturas del suelo como resultado de las actividades mineras en la microcuenca del río Teta, Municipio de Buenos Aires, Cauca. Específicamente se busca determinar, mediante la clasificación supervisada, los cambios de la cobertura del suelo en la franja protectora del río Teta entre los años 1989 y 2019; identificar las coberturas y usos de suelos de la microcuenca del río Teta en el año 2019 y su influencia sobre la calidad biológica y fisicoquímica del agua; y demostrar el comportamiento espacial de las concentraciones de mercurio y los índices de calidad del agua a lo largo del gradiente altitudinal del río Teta.

Con este estudio, se espera proporcionar información útil que sirva como base para el análisis y la toma de decisiones en la planificación y gestión del recurso hídrico en el territorio caucano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS /METODOLOGÍA

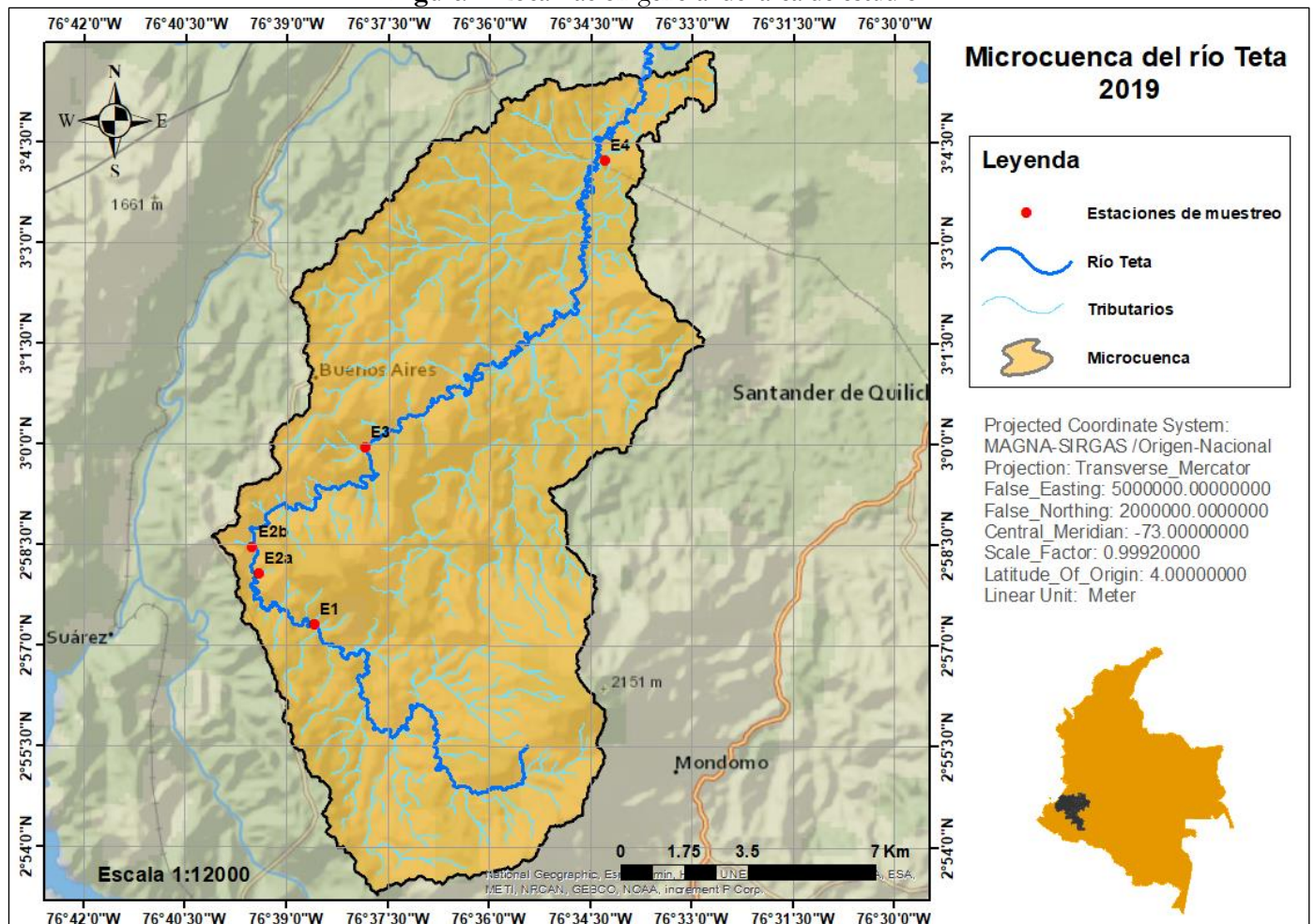
La metodología aplicada es de tipo mixta, no experimental y observacional (Ato y Benavente, 2019; Luza et al 2023) la cual abarca elementos de metodologías cuantitativas como lo son los datos medibles obtenidos en la clasificación supervisada referente a los cambios en las coberturas y usos del suelo en dos tiempos, y los índices de la calidad del agua. En cuanto a los componentes de tipo cualitativo estos comprenden la observación, interpretación y análisis de las coberturas y usos del suelo con el fin de determinar en qué medida se relacionan los cambios con las actividades mineras de extracción del oro en la microcuenca y la franja especial protectora del río Teta. Utilizar esta metodología, permitió determinar la asociación entre las variables de distribución de coberturas, el porcentaje de cambio de las mismas, con los índices de la calidad del agua obtenidos en 5 puntos a lo largo del gradiente altitudinal del río Teta en el año 2019.

Los parámetros a estudiar son: las coberturas del suelo mediante imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8, los impactos ambientales relacionados con la minería de extracción del oro, concentraciones de mercurio en agua y sedimentos, los índices de calidad y contaminación del agua geoespacializados mediante herramientas de información geográfica. Este estudio se desarrolló en las etapas descritas a continuación:

2.1 ZONA DE ESTUDIO

La microcuenca del río Teta con un área de 179.44 Km² abarca parte del territorio geográfico del municipio de Buenos Aires y de Santander de Quilichao en el departamento del Cauca. Las estaciones de muestreo comprenden cinco puntos geográficos distintos, de los cuales los 4 primeros (E1, E2a, E2b, E3) hacen parte del municipio de Buenos Aires y el último (E4) a Santander de Quilichao. E1: 2° 57' 19,87" N y 76° 38' 34,01" W; E2a: 2° 57' 52,29" N y 76° 39' 31,15" W; E2b : 2° 58' 28,84" N y 76° 39' 29,04" W; E3: 2° 59' 58,13" N y 76° 37' 51,00" W; y E4: 3° 04' 14,27" N y 76° 34' 26,56" W. La localización de la microcuenca del río Teta y las estaciones de muestreo se señalan en la Figura 1.

Figura 1. Localización general del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

2.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE CAMPO

Los datos sobre los parámetros fisicoquímicos e índices sobre la calidad biológica del agua (BMWP/Col) se obtuvieron de un estudio previo realizado por una de las autoras de este trabajo en el año 2019, los cuales fueron tomados en las estaciones de muestreo referidas en la Figura 1. Dicha investigación se titula “Bioacumulación de mercurio en macroinvertebrados acuáticos del río Teta, municipio de Buenos Aires, zona minera del Cauca” (2022), de la Universidad del Cauca. Así mismo, se tuvieron en cuenta datos sobre las concentraciones de Hg en agua y sedimentos del 2019 del Plan de Ordenamiento del Recursos Hídrico de la Corporación Autónoma Regional del Cauca – CRC (2020).

Figura 2. Fotografías de fase de campo. Colecta e identificación de macroinvertebrados del río Teta (2019).



Fuente: Delgado (2022)

2.2.1. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos e índices de la calidad y contaminación del agua

Fueron tomadas *in situ* datos sobre el pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto (OD) mediante una sonda multiparamétrica. Los nutrientes (nitratos y fosfatos) se midieron mediante metodología visual con un kit de nutrientes *in situ*. Los análisis de dureza, alcalinidad, sólidos suspendidos totales y volátiles (SST y SSV), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y coliformes fueron analizados en laboratorio. Con los datos obtenidos, se calcularon los índices de la calidad del agua (ICA), de contaminación por materia orgánica (ICOMO) y de contaminación por mineralización (ICOMI) para cada estación de muestreo. La clasificación por color de cada una de las estaciones de muestreo del río Teta conforme su grado de contaminación se realizó teniendo en cuenta la Tabla 1.

Tabla 1. Calificación de la calidad del agua (ICA) y contaminación (ICO)

BMWP	ICA	Color
Buena	Buena	Azul
Aceptable	Aceptable	Verde
Dudosa	Regular	Amarillo
Crítica	Mala	Naranja
Muy crítica	Muy mala	Rojo

Fuente: ICA (2020); Ramírez & Cardeñosa (1999)

2.2.2. Calidad biológica del agua

Fueron colectados manualmente macroinvertebrados acuáticos usando redes con ojo de maya de 0.5 mm diámetro, lo que permitió su captura en tramos y hábitats representativos en el río. La identificación taxonómica se realizó mediante un estereoscopio utilizando guías especializadas como las de Domínguez & Fernández (2009), Merrit & Cummins (1996), y Roldán (1988). De tal manera, dependiendo de las familias taxonómicas encontradas en cada estación de muestreo (Figura 1), se determina la calidad biológica del agua, mediante el índice BMWP/Col de Roldán (1988) (Tabla 2).

Tabla 2. Clases de calidad y valores asignados al Índice de la Calidad Biológica (BMWP)

Índice de Calidad Biológica de Agua (BMWP)			Convenciones de calificación
Puntuación	Calidad	Significado	Color
> 100	Buena	Aguas muy limpias a limpias	
61 - 100	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas	
36 -60	Dudosa	Aguas moderadamente contaminadas	
16 -35	Crítica	Aguas muy contaminadas	
< 16	Muy crítica	Aguas fuertemente contaminadas	

Fuente: Roldán (1996)

2.2.3. Concentraciones de mercurio en agua y sedimentos

Las muestras de agua y sedimentos fueron recolectadas en las estaciones de muestreo (Figura 1). Posteriormente, fueron analizadas en el laboratorio mediante un Analizador Directo de Mercurio (DMA). Se señalan los datos anteriormente descritos en la Tabla 3.

Tabla 3. Concentraciones de mercurio e índices de la calidad del agua y contaminación

Estación	Hg Agua mg/L	Hg Sedimentos µg/g	ICA	ICOMO	ICOMI	BMPW
E1	0.405	404.5	0.69	0.40	0.02	103.00
E2a	0.4	327	0.71	0.41	0.02	102.00
E2b	0.35	6916	0.72	0.46	0.05	74.00
E3	0.35	23130	0.62	0.53	0.08	73.00
E4	0.35	479.5	0.63	0.48	0.07	20.00

Fuente: Elaboración propia. La clasificación por colores de los índices de la calidad del agua (ICA), Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO), Índice de contaminación por mineralización (ICOMI) e Índice de la calidad biológica del agua (BMWP) está definida conforme el grado de contaminación (IDEAM, 2020; Ramírez & Cardeñosa, 1999; Roldán, 1996; Oñate y Cortez, 2020), resumidas en la Tabla 1 y 2.

2.3. CAMBIO DE LAS COBERTURAS DEL SUELO EN LA FRANJA ESPECIAL PROTECTORA (FEP) DEL RÍO TETA, MEDIANTE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA PARA LOS AÑOS 1989 Y 2019

2.3.1. Selección de imágenes satelitales: Landsat 5 y 8.

Del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) fueron descargadas y empleadas dos imágenes satelitales ópticas multitemporales del Landsat 5 y Landsat 8, capturadas en los años 1989 y 2019 respectivamente. Estas imágenes fueron utilizadas para evaluar el cambio en las coberturas de la tierra, inducido por la minería en la microcuenca de estudio. Para la selección, se consideró la imagen libre de nubes al 20%. Posteriormente, se comprobó la superposición de las imágenes de los diferentes sensores en el área de estudio y se determinó que una sola imagen cubría toda el área de influencia de la microcuenca, eliminando de esta manera, la necesidad de realizar una ortorrectificación.

Para desarrollar el límite de la franja especial protectora, se estableció un buffer de afectación de 100 metros alrededor de la capa del río Teta. El límite de la cuenca de estudio, se extrajo de la imagen completa del DEM (Modelo Digital de Elevación) previamente delimitada. Y la clasificación de las imágenes, se realizó mediante el ráster multibanda como parámetro de entrada, con las especificaciones de los satélites presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones de los datos satelitales utilizados en este estudio

SATÉLITES	LANDSAT 5	LANDSAT 8
Fecha de la toma	1989	2019
Sensor	TM Óptico	OLI_TIRS Óptico
Resolución Espacial	30m	30m
Resolución Espectral	6 bandas	8 bandas
Resolución Radiométrica	8 bits	8 bits
Nivel de procesamiento	1T	1T
DATUM	WGS84	WGS84

Fuente: (SURVEY, 2016), características imágenes LANDSAT

2.3.2. Clasificación supervisada, puntos de entrenamiento y algoritmo de clasificación.

La clasificación supervisada se realizó para el buffer de la franja especial protectora del río Teta. La clasificación del observador determinó 5 categorías amplias de uso de la tierra que fueron: Cultivos [1], Bosque [2], Suelo desnudo [3], Áreas construidas [4] y Agua [5]. Las imágenes Landsat 5 y Landsat 8, se rasterizaron en una sola imagen multibanda sin procesar y se usaron combinaciones que maximizaron la visualización de diferentes tipos de cobertura para la imagen del año 1989 (Tabla 6) y para la imagen del año 2019, se usó la combinación de “falso color” y una imagen de satélite de Google, como imagen de referencia.

El algoritmo que se usó para la clasificación fue de máxima verosimilitud, en el software de ArcGIS Pro 3.2.0, licencia estudiantil (Copyright 2023 ESRI, Inc. All Rights Reserved). Esta herramienta considera las varianzas y covarianzas de las firmas de las clases al asignar cada celda a una de las clases representadas en el archivo de firma. Si se asume que la distribución de una muestra de clases es normal, una clase puede describirse mediante el vector de valor medio y la matriz de covarianza. Usando estas dos características para cada valor de celda, se calculó la probabilidad estadística de pertenencia a cada clase para determinar a cuál clase pertenece cada celda. Al seleccionar la opción predeterminada "Igual" para la Ponderación de la probabilidad a priori, cada celda se asigna a la clase con la mayor probabilidad de pertenencia.

2.3.3. Procesamiento de los datos, verificación y validación del procesamiento.

Las áreas clasificadas se evaluaron mediante una matriz de cambios en formato ráster, teniendo en cuenta el código de la unidad de cobertura. Los valores que se encontraron por encima y debajo de la diagonal principal, representaron los cambios de las coberturas (Rodríguez et al., 2017). Debido a que el proceso de discriminación visual para identificar el método de clasificación más efectivo resulta complejo, se optó por aplicar el índice Kappa (Tabla 5), el cual se define como: $K = (Po - Pe) / (1 - Pe)$. Siendo $Po = \text{Número de aciertos} / \text{Número total de clases}$, $Po = (A1 + B2 + C3) / M$, $Pe = \text{Cálculo generado desde la matriz de confusión}$, $Pe = (EP1 \times EU1) + (EP2 \times EU2) + (EP3 \times EU3)$.

El índice Kappa como medida de concordancia entre dos evaluadores, determina el rendimiento de un clasificador que asigna categorías a los datos, es decir, verifica la validación del procesamiento. Se calcula como la razón entre las concordancias observadas y las esperadas al azar, en relación con el máximo de las concordancias posibles y las esperadas al azar. Cuanto mayor sea el índice, mayor será la concordancia y por tanto mejor será el clasificador.

Tabla 5. Medidas de concordancia: Índice Kappa
VALORACIÓN DEL ÍNDICE KAPPA

VALOR DE K	Fuerza de la Concordancia
0.2	Pobre
0.21-0.40	Débil
0.41-0.60	Moderada
0.61-0.80	Buena

0.81-1.00

Muy buena

Fuente: López & Fernández (2001)

A partir de las clasificaciones generadas para cada intervalo temporal, se calculó la diferencia píxel a píxel utilizando la poligonización de la clasificación supervisada realizada sobre la imagen Landsat 8 (Tabla 4) del 2019 y se comparó con la imagen Sentinel de 2019 (Tabla 6), con el objetivo de verificar y valorar el procesamiento usado.

2.4. COBERTURAS Y USOS DEL SUELO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO TETA EN EL AÑO 2019 Y SU INFLUENCIA SOBRE LA CALIDAD BIOLÓGICA Y FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA.

Se describe la metodología aplicada para identificar las coberturas y usos del suelo y su relación en cada una de las subzonas de interés teniendo en cuenta las estaciones muestreadas.

2.4.1 Delimitación de la cuenca hidrográfica

Para delimitar la microcuenca del río Teta, fue empleado como dato de entrada un Modelo Digital de Elevación (DEM) el cual fue descargado de la plataforma de la Alaska Satellite Facility (ASF). Utilizando el software ArcGis 10.8 sobre el DEM se aplicó la herramienta Fill, la cual relleno los vacíos que este contenía. Seguidamente se utilizó la herramienta Flow Dirección para determinar la dirección del flujo del cuerpo de agua con base en la pendiente. Mediante la herramienta Flow Acumulación se determinó la red hídrica. Posteriormente se fijó un punto de descarga, el cual fue ubicado antes de la desembocadura al río Cauca y refiere al volumen del agua que sale de la microcuenca. Con la aplicación de la herramienta Watershed se obtiene la delimitación de la cuenca en formato Ráster. Por último, se poligoniza para tenerla en formato vectorial. Para obtener la red hídrica de la microcuenca se utilizó la herramienta Map Algebra.

2.4.2. Selección de productos cartográficos: Capa de coberturas y usos del suelo.

Para la identificación de las coberturas y usos del suelo de la microcuenca del río Teta en el año 2019, se realizó empleando la capa de coberturas y usos del suelo de la plataforma de ESRI, derivadas de imágenes satelitales Sentinel 2, con una resolución de 10 metros, la cual emplea la leyenda Corine Land Cover. Posteriormente se poligonizó el ráster para hacer la clasificación. Se determinaron 4 clases: Bosques, Cultivos, Áreas construidas y Suelos desnudos. Con la herramienta Extract Mask se crea el Clip del ráster con base en la cuenca hidrográfica delimitada anteriormente. Las características de la capa utilizada se describen en la Tabla 5.

Tabla 6. Características capa LULC

Sistema de coordenadas de los datos de origen	Universal Transverse Mercator (UTM) WGS84
Sistema de coordenadas del servicio	Web Mercator Auxiliary Sphere WGS84 (EPSG:3857)
Imágenes de origen	Sentinel – 2 L2A
Resolución Espacial	10 m
Resolución Espectral	6 bandas

Fuente: ESRI (2024).

2.5. COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE MERCURIO Y LOS ÍNDICES DE LA CALIDAD Y CONTAMINACIÓN DEL AGUA A LO LARGO DEL GRADIENTE ALTITUDINAL DEL RÍO TETA.

Basándose en los datos obtenidos en campo sobre las concentraciones de mercurio en agua y sedimentos, así como en los índices de calidad y contaminación del agua en las estaciones muestreadas, se aplicó una interpolación IDW (Inverse Distance Weighting) en un buffer de 200 metros alrededor del río. Se utilizó una simbología de colores conforme el grado de contaminación o concentraciones de Hg a lo largo del río. Aunque la cantidad de estaciones de muestreo es baja, la utilización de esta herramienta tiene el propósito de obtener una visualización más detallada sobre las concentraciones de contaminantes, proporcionando contexto y profundidad de los datos cuantitativos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CAMBIO DE LAS COBERTURAS DEL SUELO EN LA FRANJA ESPECIAL PROTECTORA DEL RÍO TETA, MEDIANTE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA PARA LOS AÑOS 1989 Y 2019.

Para la clasificación supervisada de las imágenes satelitales de los años 1989 y 2019, se utilizó una combinación de bandas que maximizaron la diferenciación entre diferentes tipos de cobertura. Tanto en Landsat 5 como en Landsat 8, las bandas de infrarrojo cercano (NIR) y las de infrarrojo de onda corta (SWIR) son muy útiles para distinguir entre agua, vegetación y suelo desnudo (Tabla 6).

Tabla 6. Combinaciones de bandas para Landsat 5 y Landsat 8

Banda	Landsat 5		Landsat 8	
	Numero de Banda	Valor (Micrómetros)	Numero de Banda	Valor (Micrómetros)
NIR	4	0.76 - 0.90	5	0.85 - 0.88
SWIR 1	5	1.55 - 1.75	6	1.57 - 1.65
Rojo	3	0.63 - 0.69	4	0.64 - 0.67

Fuente: MappingGIS

En la imagen Landsat 5, es usual emplear la combinación 5-4-3 debido a que con dos bandas en la región del infrarrojo (SWIR y NIR) se puede obtener una mayor diferenciación entre el suelo y el agua (INEGI,2010). La vegetación se muestra en diversas tonalidades de verde y rosa, las áreas urbanizadas y el suelo expuesto se presentará en tonalidades rosadas y, por último, el agua independiente de sedimentos, toma tonos negros. Por tanto, conociendo estas categorías, se procedió a clasificar mediante puntos los píxeles según las tonalidades expresadas en la literatura, seguidamente se vectorizó el ráster y analizó cuál ha sido la matriz de cambios que ha tenido la FEP del río Teta durante 30 años. La imagen también presentó corrientes en color azul, que se pueden atribuir a pequeñas escorrentías o suelos con humedad.

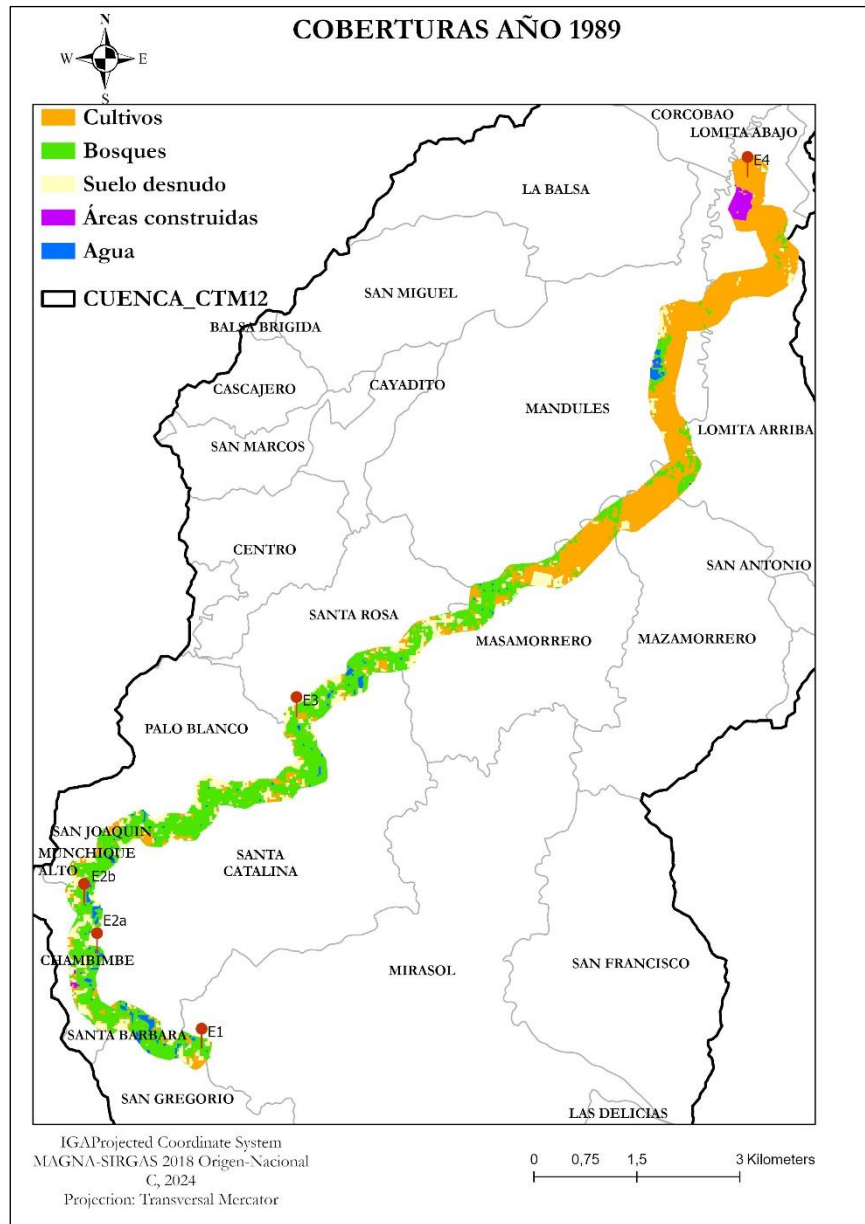
Para el análisis del suelo desnudo del año 1989, se empleó una imagen del satélite Landsat 5, y una combinación 7,5 y 3. Los píxeles que aparecieron en color marrón, naranja y rosa, fueron clasificados como suelos desnudos. Para la identificación de las zonas urbanas se usó la combinación 4-3-2, donde la visualización (NIR-Rojo-Verde) permitió evidenciar la infraestructura en tonos cian o grises. Así mismo, para la combinación 7-4-2, se visualizaron los centros poblados en tonos claros como blancos o grises. La vegetación aparece en tonos rojos y el agua en tonos azul oscuro o negro.

Para el año 1989, en especial en la cuenca alta, se evidenció la presencia de coberturas de bosque y acumulación de agua en los costados donde el bosque es más denso. Sin embargo, también hay presencia de suelos desnudos y de algunas construcciones. Respecto a la cuenca media, alrededor del río se evidencia la presencia de cultivos y bosques. Las áreas con suelos desnudo posiblemente para la fecha en la que se tomó la imagen satelital eran terrenos en etapa de labranza o preparación del suelo para la siembra (Figura 3)

Al momento de ejecutar la clasificación del área de influencia, los píxeles con un verde más oscuro se delimitaron como pastos y los píxeles con un verde vivo se delimitaron como bosques. La coloración marrón correspondía a suelos desnudos o lotes en periodo de labranza y su visualización de igual manera como suelos desnudos. Los cuerpos de agua tomaron una coloración entre azul oscuro y negro. Por último, las urbanizaciones o centros poblados se identificaron con una coloración entre grises y morados (Figura 3).

Respecto al año 2019, se puede observar que, en la cuenca alta, aunque en menor proporción que en 1989, predominan los bosques. En la cuenca media predominan pastos, suelos desnudos y algunos cuerpos de agua con escasa vegetación ribereña, lo que probablemente está asociado a la minería que se desarrolla en la zona. En la cuenca baja predominan suelos de cultivos perennes como la caña. Lo que puede argumentar que la visualización de su aparente estado de desnudes esta atribuido a la labranza del suelo (Figura 3).

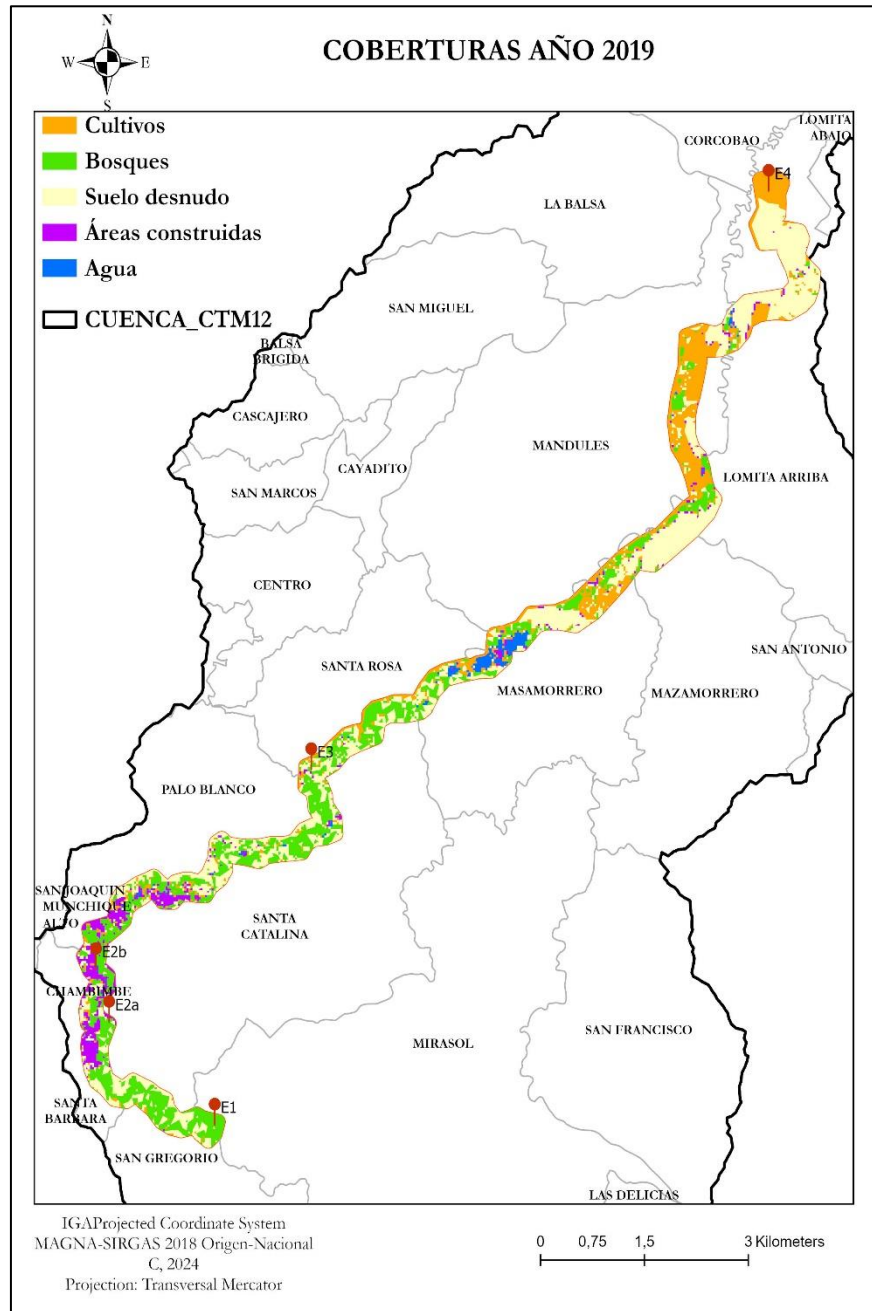
Figura 3. Análisis geoespacial de coberturas vegetales año 1989 de la Franja Especial Protectora del río Teta.



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 3, las estaciones E1, E2a y E2b presentan una predominancia de bosques, cuerpos de agua y remanentes de suelos desnudos. La categoría de áreas construidas es mínima hasta alcanzar la estación E3, ubicada en la vereda Santa Rosa, donde se identifican dos cuerpos de agua separados. En la vereda Mazamorrero, predomina la cobertura de cultivos y vegetación, con algunos remanentes de suelos desnudos. Para las veredas de Mandules y Lomita Arriba, se observa un incremento en las coberturas agrícolas que se extiende hasta la estación E4 en la vereda Lomita Abajo, se destaca una notable presencia de áreas construidas adyacentes a la franja protectora del río.

Figura 4. Análisis geoespacial de coberturas vegetales año 2019 de la Franja Especial Protectora del río Teta.



Fuente: Elaboración propia

La Figura 4 presenta la clasificación obtenida mediante el uso del clip de la franja especial protectora multibanda de la imagen rasterizada de Landsat 8. Esta clasificación fue realizada de manera más detallada debido a la aplicación de varias combinaciones espectrales: la combinación 3-5-4 se utilizó para una vigilancia precisa de la vegetación, la combinación 6-5-4 para verificar el verdor de las coberturas forestales y la combinación 4-3-2 para identificar los tonos grises o marrones claros de los suelos desnudos. Adicionalmente, se efectuó una verificación satelital con una imagen de referencia de Google. La clasificación correspondiente al año 2019 fue comparada con las capas de coberturas y usos del suelo obtenidas de la plataforma de ESRI, que emplea la leyenda Corine Land Cover (Tabla 6).

La clasificación de la estación de muestreo E1, en la vereda San Gregorio, revela una predominancia de vegetación con parches dispersos de suelos desnudos. En las estaciones E2a y E2b, se observa una mayor representatividad de áreas construidas entre las veredas Chambimbe y Munchique Alto. En las veredas de Palo Alto y Santa Catalina, se identifican

pequeños parches aleatorios de áreas construidas hasta la estación de muestreo E3, lo cual corrobora la aparición de entables mineros en la franja especial protectora del río Teta, según lo observado en el trabajo de campo. Entre las veredas de Santa Rosa y Mazamorrero, se puede observar un espejo de agua que no existía en 1989, el cual actualmente se identifica como un punto crítico de alta contaminación del río (Figura 5). En las veredas de Mandules y Lomita Arriba, los usos del suelo siguen siendo predominantemente agrícolas, similar a hace 30 años, hasta la estación de muestreo E4, donde en 2019 no se observa el parche de área construida destacado en 1989.

Tabla 7. Comparación de coberturas del suelo en la Franja Especial Protectora del río Teta en los Años 1989 y 2019

CLASE	Año 1989		Año 2019	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Cultivos	368,94	42,06	180,87	20,62
Bosques	360,27	41,08	251,04	28,62
Suelo desnudo	113,14	12,90	360,45	41,10
Áreas construidas	12,69	1,45	62,68	7,15
Agua	22,04	2,51	22,04	2,51

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la clasificación para el período de estudio de 30 años (1989-2019), según se detalla en la Tabla 7, indican cambios significativos en las coberturas del suelo desnudo los cuales aumentaron de un 12.90% al 41.10%, lo que representa una pérdida de cobertura vegetal de 247.31 hectáreas. Lo anterior puede estar atribuido principalmente a las actividades de extracción de oro. Esto evidencia que en 30 años en el área forestal protectora del río Teta se ha perdido un 28.2% de las coberturas vegetales.

En relación a la pérdida de flora, representada en coberturas boscosas, se observó una tasa de cambio 12.46% durante un período de 30 años. Este cambio incluye pérdidas significativas de especies vegetales endémicas, silvestres, maderables y no maderables, lo que repercute negativamente en los ecosistemas naturales. El estado fragmentado de los bosques, los polígonos formados y el paisaje discontinuo, resaltan la necesidad de implementar estrategias de conservación, preservación y recuperación de estos ecosistemas. Esta pérdida se ve representada en 109,23 ha de bosque intervenido.

Respecto a los cultivos, las coberturas disminuyeron casi a la mitad, pasando de un 42% en 1989 a un 20% en el 2019. No obstante, al comparar esta cobertura con la de los suelos desnudos, los cuales aumentaron en un 28%, se puede deducir que dicho aumento puede atribuirse a que en la época para la cual fue tomada la imagen satelital, gran parte de las áreas donde se desarrollaban actividades de agricultura identificadas en 1989, se encontraban en una etapa de post cosecha o pre siembra. Lo anterior lo justifica la existencia de los extensos cultivos de caña que han tenido presencia en estas zonas bajas cercanas al río Cauca. En este sentido, se puede decir que el aumento total aproximado de cultivos en la franja especial protectora del río Teta está representado en un 8%. Esto sugiere que, durante los últimos 30 años, la franja especial protectora del río en la cuenca baja, ha tenido una presencia constante de intervención agrícola.

En cuanto a las áreas construidas, en el área de la FEP se identificó un aumento de 5 veces más para el 2019 respecto a las Ha construidas en 1989. El aumento de los asentamientos humanos atribuidos mayormente a las actividades mineras y la construcción de entables, se ve reflejado en especial entre las estaciones E2a y E2b, las cuales abarca las veredas de Chambimbe, Alto Munchinque, San Joaquín, hacia el costado oeste y Santa Catalina, hacia el costado este.

Por último, en relación a las coberturas de agua, a nivel porcentual, el agua se mantuvo constante, sin embargo, la variabilidad se denotó visiblemente en relación a la distribución de parcheo de las fuentes hídricas. En donde para el año 1989 hacia la cuenca media, los polígonos de agua se distribuyen separados de las coberturas boscosas. A diferencia, para el año 2019, los polígonos de agua se juntan en casi uno mismo. Las imágenes satelitales evidencian notablemente el impacto

ambiental que esta zona del río ha tenido por intervención minera. Para la fecha, las madres viejas que pudieron haber existido hace 30 años, son hoy lagunas de oxidación de vertimientos mineros, las cuales también han perdido la cobertura vegetal y representan en el presente estudio un solo polígono impactado por entables ilegales, así como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Punto crítico de contaminación por minería ilegal en la FFP del río Teta

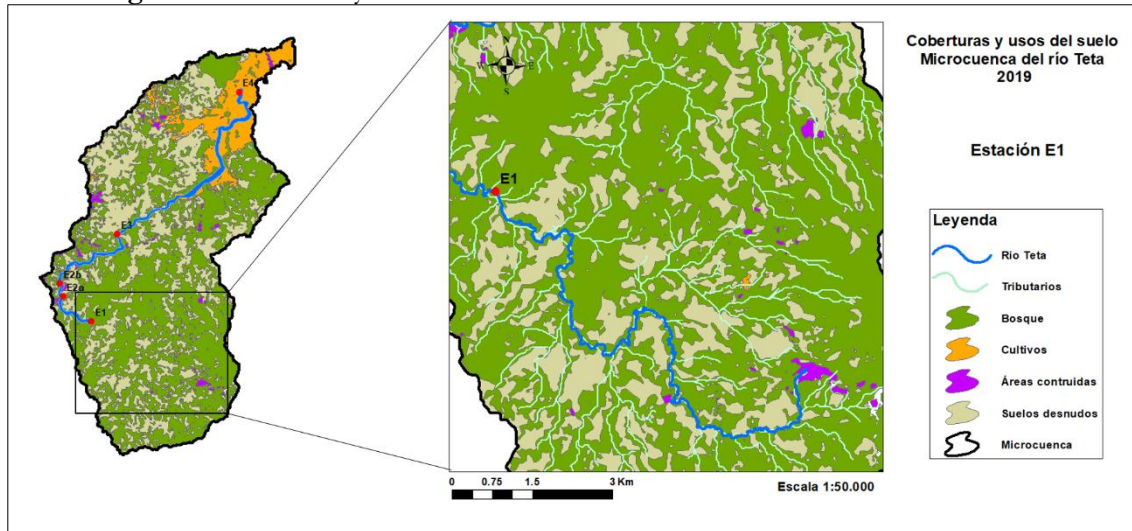


Fuente: Google satélite

3.2 COBERTURAS Y USOS DEL SUELO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO TETA EN EL AÑO 2019 Y SU INFLUENCIA SOBRE LA CALIDAD BIOLÓGICA Y FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA.

Teniendo en cuenta la red de drenaje perteneciente a los tributarios que vierten sus aguas al río Teta, y que cualquier actividad antrópica que genere contaminación afecta toda su red fluvial y lo que dependa de esta, como es el caso de la cuenca hidrográfica, lugar en donde es posible la interrelación e interdependencia entre los sistemas bióticos y físicos (Cabrera & Fierro, 2013), se establecieron áreas de influencia para cada una de las estaciones de muestreo y se relacionó con los datos obtenidos sobre la calidad del agua y las concentraciones de Hg.

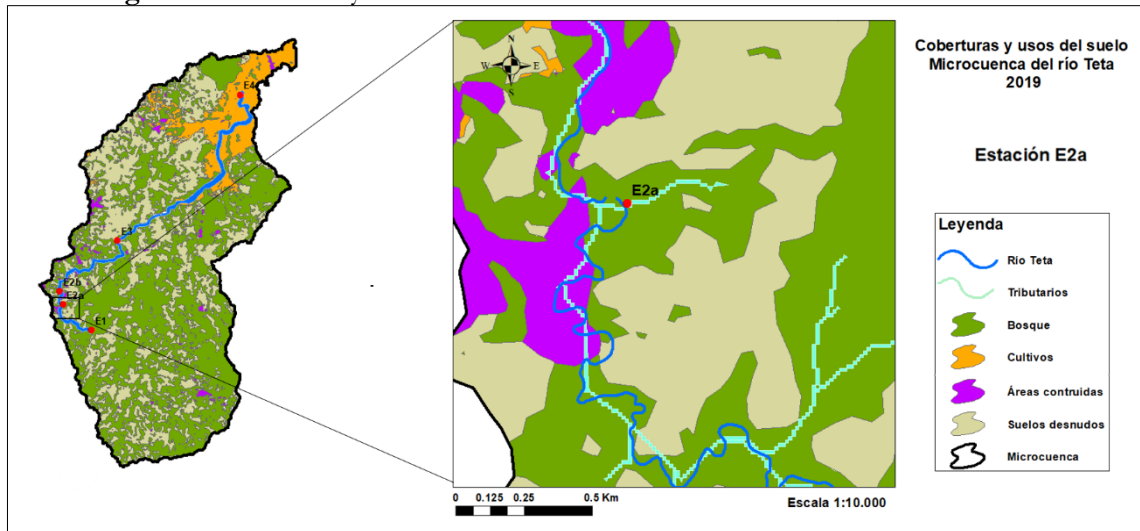
Figura 6. Coberturas y usos del suelo de la zona de influencia de la estación E1.



Fuente: Elaboración propia

Según la E1 (Figura 6), la zona de influencia de esta estación, ubicada en la parte alta de la cuenca, abarca varios tributarios. En esta área no se observan entables mineros ni construcciones en las riberas del río. Sin embargo, se han identificado algunas edificaciones en las zonas altas, que pueden corresponder a viviendas rurales dispersas. Estas viviendas podrían afectar los índices de calidad del agua debido al aporte de carga orgánica, dado que generalmente no cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales. Además, la presencia de áreas con suelos desnudos contribuye significativamente al aporte de sedimentos en los cuerpos de agua.

Figura 7. Coberturas y usos del suelo de la zona de influencia de la estación E2a.

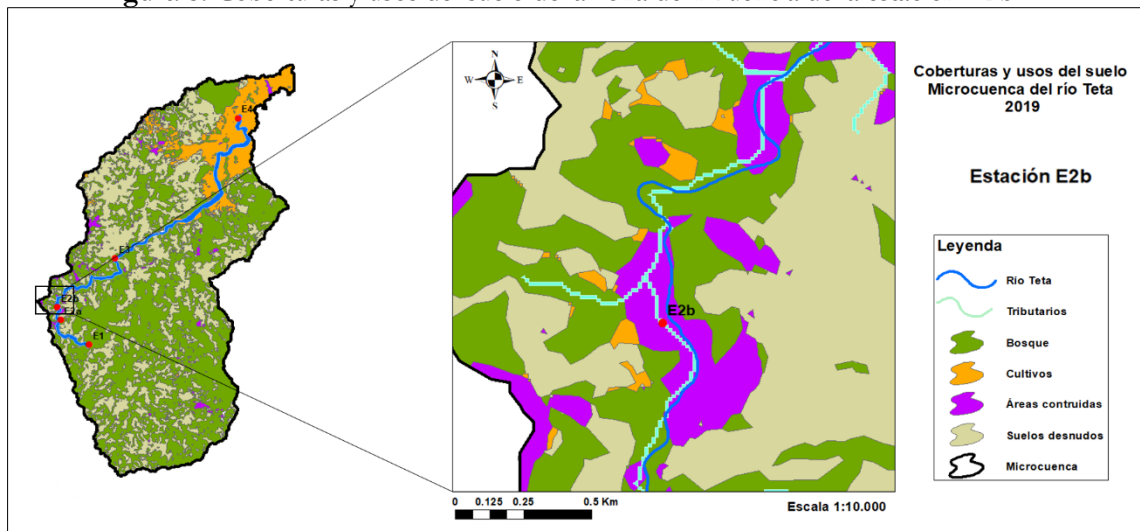


Fuente: Elaboración propia

En el área de influencia de la estación A2a (Figura 7) es notoria la presencia de áreas construidas en las laderas del río Teta, lo que resulta coherente con las visualizaciones realizadas en campo, donde se identificaron numerosos entables mineros. Así mismo, hay presencia de grandes áreas de suelos desnudos.

En las estaciones E2a y E2b, la presencia de áreas construidas en las laderas del río es predominante. Aunque la extracción de oro es la principal fuente de subsistencia para muchas familias, también se realizan actividades agrícolas, como se puede observar en la Figura 8.

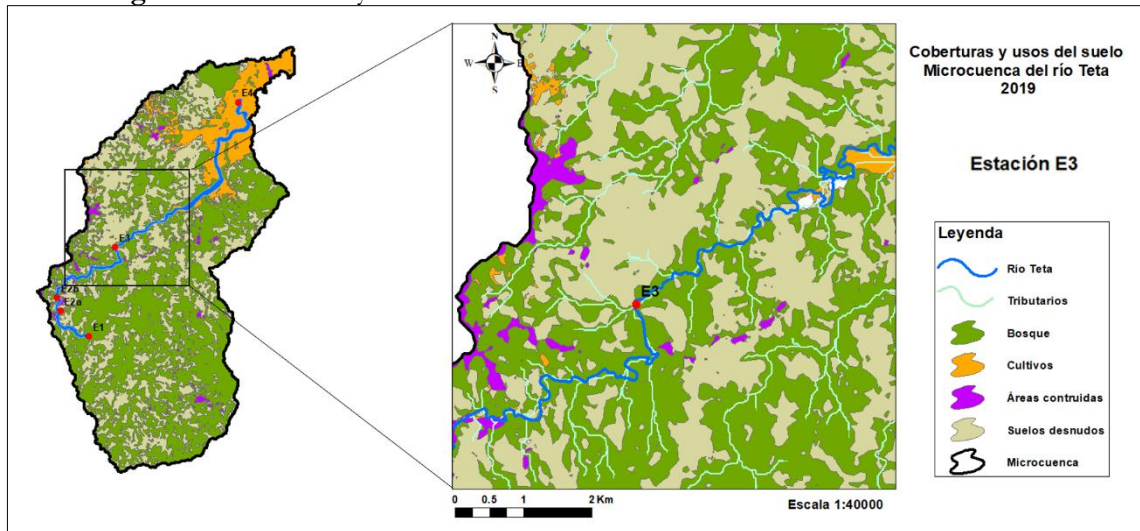
Figura 8. Coberturas y usos del suelo de la zona de influencia de la estación E2b.



Fuente: Elaboración propia

En la estación E3, aunque no se evidencian construcciones en las riberas del río, el área de influencia correspondiente a las partes altas, muestra la presencia de áreas construidas dispersas y algunas zonas de cultivos. Esto puede resultar en un aporte significativo de carga orgánica debido a las aguas residuales domésticas y los residuos de fertilizantes (Figura 9).

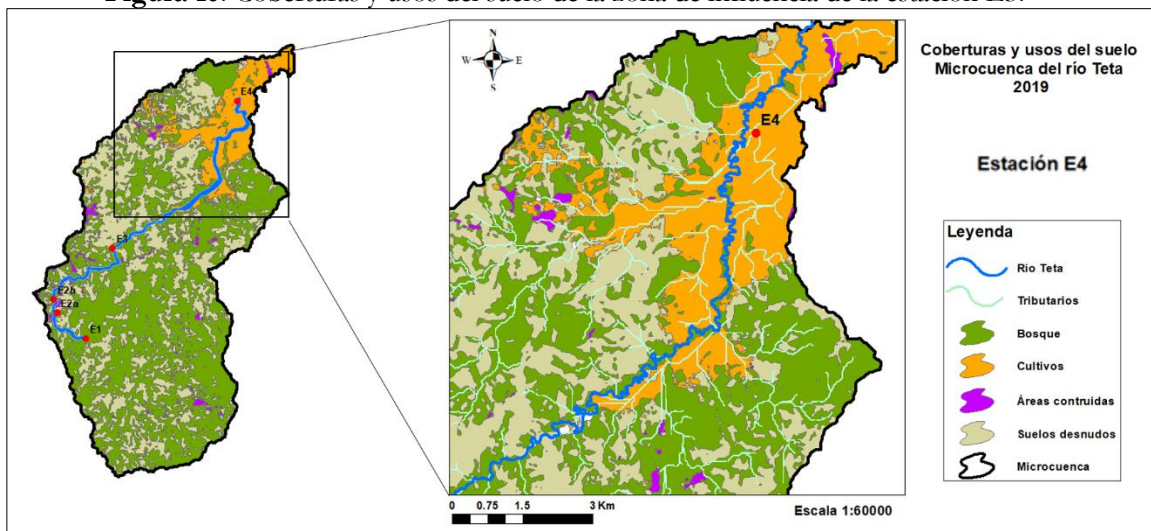
Figura 9. Coberturas y usos del suelo de la zona de influencia de la estación E3.



Fuente: Elaboración propia

Respecto a la última estación (E4), ubicada en la zona baja de la microcuenca, su área de influencia se caracteriza por extensos cultivos de caña, lo que puede contribuir a un significativo aporte de carga orgánica debido a los agroquímicos utilizados. Además, en este punto del río, las aguas son notablemente más turbias y presentan un alto contenido de sedimentos (Figura 10).

Figura 10. Coberturas y usos del suelo de la zona de influencia de la estación E3.

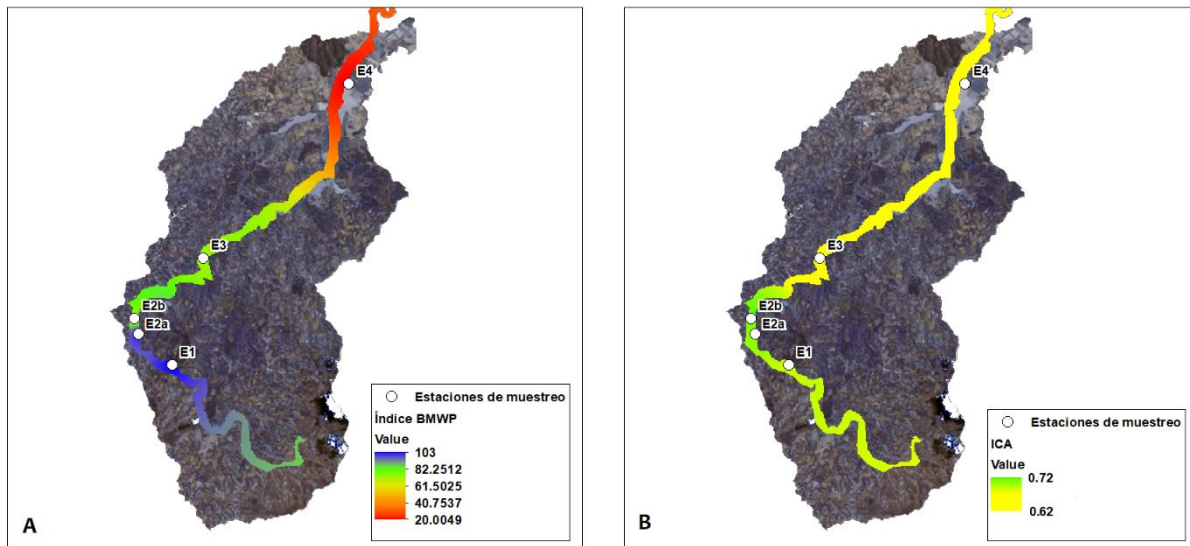


Fuente: Elaboración propia

3.3 COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR CARGA ORGÁNICA Y LAS CONCENTRACIONES DE MERCURIO A LO LARGO DEL GRADIENTE ALTITUDINAL DEL RÍO TETA.

Teniendo en cuenta las diferentes coberturas y usos del suelo de las zonas de influencia de las estaciones de muestreo vistas anteriormente, y los resultados obtenidos mediante el Índice BMWP/Col (Figura 11A), el cual proporciona información sobre el estado biológico del río en relación con la contaminación por carga orgánica, se puede corroborar que hay un aumento en la contaminación aguas abajo. Las estaciones E1 y E2a muestran valores para aguas muy limpias a limpias. Sin embargo, para los tramos de las estaciones E2b y E3, la calidad del agua es aceptable, con una coloración verde para aguas ligeramente contaminadas. Este sector, está sometido a contaminación por vertimientos de origen doméstico y agropecuario. Cabe resaltar que estas veredas no cuentan con alcantarillado ni planta de tratamiento de aguas residuales. La última estación (E4) identificada en color rojo, indica una calidad "muy crítica," lo que refiere a aguas fuertemente contaminadas. Este deterioro se debe principalmente a los extensos cultivos de caña en la zona, los cuales generan vertimientos con alto contenido de nutrientes provenientes de los agroquímicos. Además, en este punto, el río recibe contaminantes arrastrados desde aguas arriba, los cuales no han sido auto depurados debido a la capacidad limitada del río para eliminar estos contaminantes, exacerbada por el deteriorado estado ecológico.

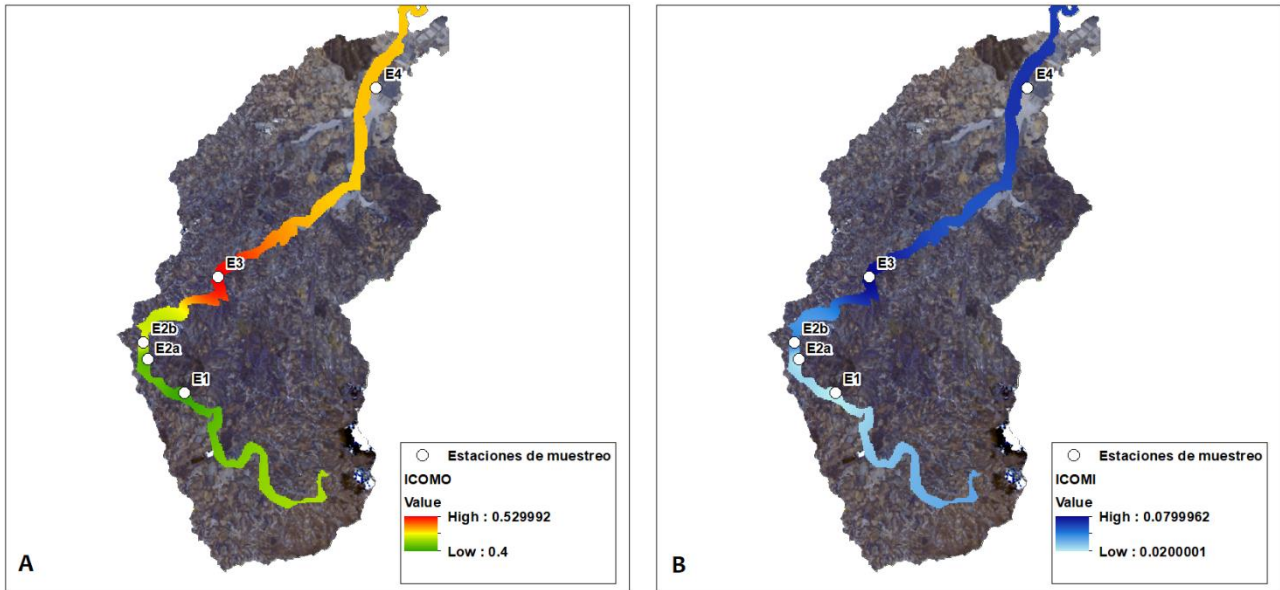
Figura 11. Índice BMWP e Índice ICA del río Teta



Fuente: Elaboración propia. Figura 11A: Índice de la calidad biológica BMWP; Figura 11B: Índice calidad del agua (ICA).

Los valores obtenidos del Índice ICA indican un gradiente de concentración aceptable entre las estaciones E1, E2a y E2b, y regular en las estaciones E3 y E4. No obstante, es importante resaltar que los parámetros fisicoquímicos en los que se basa el cálculo del índice ICA proporcionan información puntual sobre el estado del cuerpo de agua en un momento determinado, lo que puede experimentar grandes fluctuaciones a lo largo del día. Por esta razón, se considera que la información dada por el análisis de biomonitorio mediante la utilización de macroinvertebrados, ofrece una mayor información acerca del estado ecológico del cuerpo de agua en relación con la contaminación orgánica.

Figura 12. Índices de la contaminación del agua (ICO)

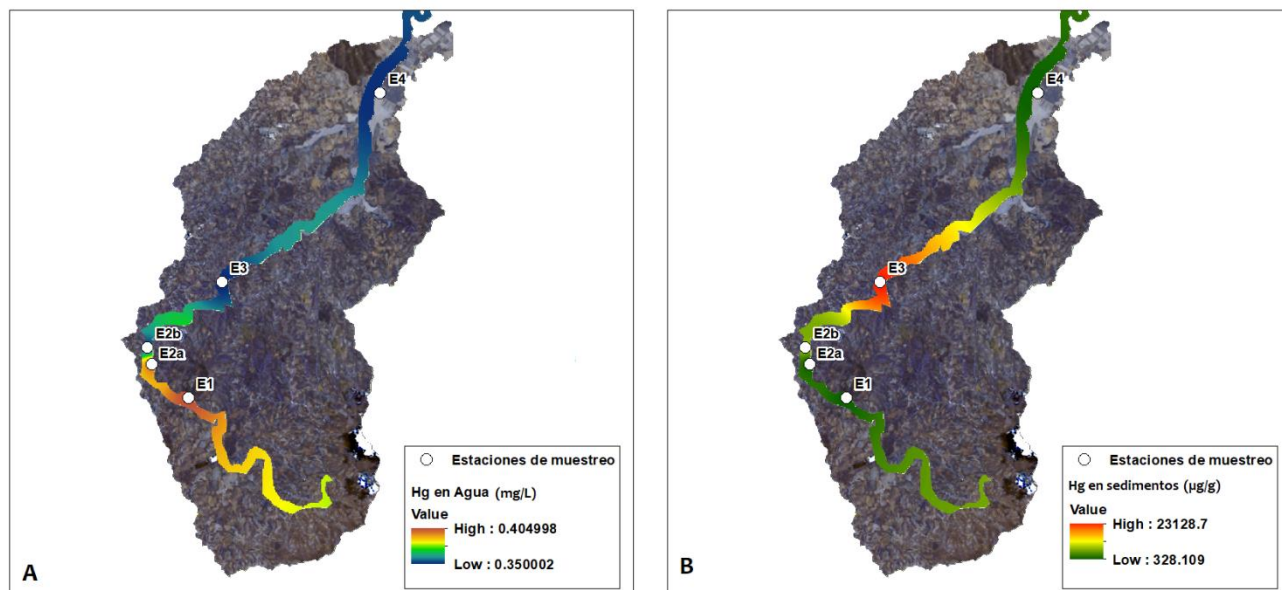


Fuente: Elaboración propia. Figura 12A: Índice de la contaminación por materia orgánica (ICOMO); Figura 12B: Índice de la contaminación por mineralización (ICOMI).

El Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO), se expresa a través de diferentes variables fisicoquímicas como lo son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), coliformes totales y el porcentaje de saturación de oxígeno. La figura 12A muestra una mayor concentración de materia orgánica en la estación E3. Aunque en esta zona, la presencia de áreas construidas es significativamente menor a comparación de las estaciones E2a y E2b, los resultados pueden estar relacionados con las cargas provenientes de dichas estaciones previas.

El índice de contaminación por mineralización (ICOMI), el cual tiene en cuenta los sólidos disueltos presentes, la dureza y la alcalinidad (Ramírez et., al 1997), muestra un gradiente de concentración bajo cercano a cero con valores que oscilan entre 0.02 en las estaciones E1, E2a y E2b, para la cuenca alta y media. Los valores aumentan levemente hacia la cuenca baja con valores de 0.07 a 0.09, lo que puede estar asociado con los usos de suelo para actividades agrícolas. El uso intensivo de fertilizantes y otros productos químicos, así como al aporte de minerales del suelo influyen en el aumento de los valores de contaminación por mineralización. Estos factores contribuyen a la mayor presencia de sólidos disueltos, cationes de calcio y magnesio, y aniones de carbonatos y bicarbonatos en el agua.

Figura 13. Concentraciones de mercurio (Hg) en agua y sedimentos



Fuente: Elaboración propia. Figura 13A: Concentración de Hg en agua (mg/L); Figura 13B: Concentración de Hg en sedimentos (ug/g).

Respecto a las concentraciones de mercurio evaluadas en agua y sedimentos (Figura 13), en la primera estación (E1) se encontraron concentraciones, que, aunque fueron bajas, la presencia del metal puede estar relacionada con la posible existencia de minería artesanal que se practicaba décadas atrás en el río Teta. Esta actividad podría haber dejado trazas de sedimentos con Hg que, paulatinamente pueden liberar el metal al cuerpo de agua. Así mismo, los factores físicos como vientos y precipitaciones pueden transportar el metal a largas distancias del lugar de emisión (Rajar et al., 2004; Marrugo, 2015; Delgado, 2022).

Las concentraciones de Hg en el agua disminuyen con el gradiente altitudinal debido a la naturaleza del metal de adherirse al material particulado y posteriormente sedimentarse (Delgado, 2022). Esto se evidencia con las concentraciones halladas en los sedimentos, las cuales fueron más altas en la estación E3. En esta zona, como se mencionó anteriormente, las actividades extractivas de oro son menores; sin embargo, las condiciones físicas del río en este tramo favorecen una mayor sedimentación de los sólidos suspendidos provenientes de aguas arriba. Es importante resaltar que, debido al movimiento continuo del río, las concentraciones de contaminantes vertidos en un punto pueden afectar las concentraciones del agua en puntos más bajos.

4. CONCLUSIONES

El análisis de la variación espacio-temporal realizado en los años 1989 y 2019 sobre las coberturas de la Franja Especial Protectora del río Teta, utilizando herramientas SIG y teledetección, permitió identificar y cuantificar los cambios significativos provocados por las actividades mineras en la región. La clasificación supervisada evidenció una notable transformación en los usos y coberturas del suelo, con un aumento en áreas degradadas y una reducción significativa en las coberturas vegetales naturales. Estos hallazgos resaltan la necesidad de implementar medidas de gestión ambiental y restauración ecológica para mitigar los impactos negativos de la minería y promover el desarrollo sostenible en la microcuenca.

De acuerdo al análisis sobre las coberturas y usos del suelo de toda la microcuenca del río Teta para el año 2019, la estación E1 (aguas arriba) es la zona menos intervenida antrópicamente, caracterizada por coberturas boscosas. En las

estaciones E2A y E2B se observa una clara influencia minera, evidenciada por áreas construidas relacionadas con los entables mineros en las riberas del río. En la estación E3, la influencia de la minería disminuye notablemente, mientras que en la estación E4 predomina la influencia agrícola, especialmente con cultivos de caña.

Al relacionar los usos del suelo con los índices ICA e ICO, que consideran parámetros fisicoquímicos, se observa que la fiabilidad de estos índices es baja debido a sus numerosas fluctuaciones diarias. Sin embargo, el índice BMWP proporciona datos más consistentes sobre las cargas de contaminación orgánica, mostrando una mayor coherencia con los tipos de coberturas y usos del suelo en la microcuenca. Estos hallazgos subrayan la necesidad de implementar medidas de gestión ambiental y restauración ecológica para mitigar los impactos negativos de la minería y la agricultura, promoviendo el desarrollo sostenible en la región.

Las concentraciones de Hg en agua disminuyeron con el gradiente altitudinal, lo que está dado por la naturaleza del metal de adherirse al material particulado y sedimentarse. Sin embargo, las concentraciones más altas de Hg en sedimentos se encontraron en la estación E3, donde las actividades extractivas de oro son menores, pero las condiciones físicas favorecen la sedimentación de sólidos suspendidos.

La minería ilegal ha causado una degradación significativa en la Franja Protectora Especial y en la calidad del agua del río Teta, ocasionando altos impactos en los ecosistemas y afectando a la población humana que depende del recurso hídrico. Los efectos negativos incluyen la acumulación de sedimentos, el desvío de los cauces de los ríos y, principalmente, la disminución de la vegetación a lo largo del tiempo. Estas alteraciones han tenido un impacto directo sobre la calidad del agua del río Teta, afectando su salud ecológica y la disponibilidad de recursos hídricos en la microcuenca. La degradación de los ecosistemas acuáticos y la alteración de los parámetros de calidad del agua subrayan la necesidad urgente de implementar estrategias de conservación y restauración ambiental. Esto es crucial para proteger la franja protectora y mejorar la gestión sostenible de los recursos naturales en la región.

Los mapas sobre las coberturas y usos del suelo de la microcuenca, así como los cambios en la Franja Espacial Protectora y los resultados sobre los análisis de la calidad del agua, otorgan información importante para tomar medidas respecto a planes referentes a la Gestión del Recurso Hídrico del municipio de Buenos Aires.

La aplicación de técnicas avanzadas de SIG y teledetección se ha demostrado como una metodología eficaz para el monitoreo y la gestión de recursos naturales, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas para la planificación territorial.

5. REFERENCIAS

Arenas, O. A. (2021). Análisis multitemporal del impacto ambiental ocasionado por la deforestación generada por la minería ilegal en el nordeste antioqueño, sobre el río Nechí y sus afluentes. Universidad Militar Nueva Granada. Trabajo de grado Especialización en Geomática. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10654/40379>

Ato, Manuel, López, Juan J., & Benavente, Ana. (2013). Un sistema de clasificación de los diseños de investigación en psicología. *Anales de Psicología*, 29(3), 1038-1059. <https://dx.doi.org/10.6018/analesps.29.3.178511>

Bahri, A. (2009). Managing the other side of the water cycle: making wastewater an asset. TEC Background Paper No. 13. Global Water Partnership, Stockholm.

Bocanegra-Herrera, C. C., & Vidal, C. J. (2016). Development of a simulation model as a decision support system for sugarcane supply [Desarrollo de un modelo de simulación como un sistema de soporte de decisiones para el abastecimiento de caña de azúcar]. *DYNA (Colombia)*, 83(198), 181–187.

- Centro de Investigación de la Caña [CENICANA]. (2006). Carta trimestral. Producción de caña de azúcar en el valle del río Cauca. Año 28, N°1, 16-37.
- Centro de Investigación de la Caña [CENICANA]. (2008). Informe anual 2007. Cali. 108p.
- Chavarro, A., & Gélvez, E. (2016). Caracterización de la calidad de las aguas de la quebrada Fucha utilizando los índices de contaminación ICO con respecto a la precipitación y usos del suelo. Mutis, 6(2), 19-31.
- Delgado, C.I. (2022). Bioacumulación de mercurio em macroinvertebrados acuáticos del río Teta Cauca, Zona minera del Cauca. Universidad del Cauca. Tesis de Maestría.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje. 34p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2020). Hoja metodológica del Índice de calidad del agua (Versión 1.1). 12p.
- Islam, K., Vilaysouk, X., & Murakami, S. (2020). Integrating remote sensing and life cycle assessment to quantify the environmental impacts of copper-silver-gold mining: A case study from Laos. Resources, Conservation and Recycling, 154, 104630.
- Jiménez, B., & Asano, T. (2008). Water reclamation and reuse around the world. In B. Jiménez & T. Asano (Eds.), Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs (Chap. 1). IWA Publishing, London.
- Jiménez-Moreno, María Josefa, González-Guillen, Manuel de Jesús, Escalona-Maurice, Miguel, Valdez-Lazalde, José René, & Aguirre-Salado, Carlos Arturo. (2011). Comparación de métodos espaciales para detectar cambios en el uso del suelo urbano. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente, 17(3), 389-406.
- Kamrul Islam, X., Vilaysouk, X., & Murakami, S. (2020). Integrating remote sensing and life cycle assessment to quantify the environmental impacts of copper-silver-gold mining: A case study from Laos. Resources, Conservation and Recycling, 154, 104630.
- Lazarova, V., & Bahri, A. (2005). Water Reuse for Irrigation: Agriculture, Landscapes, and Turf Grass. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Leaño Sanabria, J. J., & Pérez Barriga, D. (2020). Determinación de la Calidad del Agua mediante el índice BMWP/BOL (bioindicadores ecológicos) del Río Trancas, Municipio de Entre Ríos - Tarija. Acta Nova, 9(4), 567-591.
- Lin, C., Wu, C. C., Tsogt, K., Ouyang, Y. C., & Chang, C. I. (2015). Effects of atmospheric correction and pansharpening on LULC classification accuracy using WorldView-2 imagery. Information Processing in Agriculture, 2(1), 25-36.
- Luza, T., Córdova, O., Gonzáles, J., Flores Limo, F., & Flores, C. (2023). *Métodos mixtos de investigación para principiantes*. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.106>
- Mejía, J. A. (2016). Análisis multitemporal utilizando técnicas de Teledetección de la pérdida de cobertura vegetal por causa de la minería ilegal en el Bajo Cauca Antioqueño.
- Oñate Barraza, H., & Cortéz Henao, G. Y. (2020). Estado del agua del río Cesar por vertimientos residuales de la ciudad

de Valledupar. Bioindicación por índice BMWP/Col. Revista Tecnura, 24(65), 39+. Gale OneFile: Informe Académico.

Poveda-Sotelo, Y., Bermúdez-Cella, M. A., & Gil-Leguizamón, P. (2022). Evaluación de métodos de clasificación supervisada para la estimación de cambios espacio-temporales de cobertura en los páramos de Merchán y Telecom, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 44(2), 51-72.

Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulaciones y aplicación. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3), 135-153.

Ramírez, Restrepo, R., & Cardeñosa, M. (1999). Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos. Formulaciones. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(5), 89-99.

Rodríguez Castiblanco, E. A., Sandoval Ramírez, J. H., Chaparro Cordón, J. L., Trejos González, G. A., Medina Bello, E., Ramírez Hernández, K. C., Castro Marín, E., Castro Guerra, J. A., & Ruiz Peña, G. L. (Eds.). (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/34>.

Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., & Macomber, S. A. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, 75(2), 230-244.

Young, N. E., Anderson, R. S., Chignell, S. M., Vorster, A. G., Lawrence, R., & Evangelista, P. H. (2017). A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4), 920-932. h