

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

**INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS Y SUS
EFECTOS SOBRE LOS FLUJOS DE AGUA SUPERFICIAL QUE INGRESAN A
LA CIÉNAGA DE AYAPEL**

LAURA PATRICIA TÉLLEZ VELASCO

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2021**

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

**INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS Y SUS
EFECTOS SOBRE LOS FLUJOS DE AGUA SUPERFICIAL QUE INGRESAN A
LA CIÉNAGA DE AYAPEL**

LAURA PATRICIA TÉLLEZ VELASCO

Trabajo de grado
para optar el título de ingeniera ambiental

Dirigido por:
David Andrés Zamora Ávila
Doctorado en Ingeniería Civil

Codirectora:
Ana Carolina Santos Rocha
Investigadora
Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:
ORDENAMIENTO AMBIENTAL DEL TERRITORIO

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2021**

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Nota de Aceptación

Firma Jurados

Jurado 1

Jurado 2

Bogotá D.C., Junio 2021.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Agradecimientos

Agradezco profundamente por ayudarme a cumplir este logro a:

Dios, por darme la fortaleza y sabiduría que me guía en todo el camino profesional y personal.

Universidad Santo Tomás, por brindarme el apoyo y la oportunidad de pertenecer a esta gran comunidad.

Docentes y Administrativos de la Facultad de Ingeniería Ambiental, por ser una guía y brindarme los conocimientos que contribuyen a la formación personal y profesional de mi persona.

Amigos y familiares, por estar incondicionalmente y brindarme su apoyo en los momentos más difíciles de mi carrera y de mi vida.

Mis padres, por ser unas personas maravillosas que siempre me animaron a no desistir y estar a mi lado en todo momento.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

RESUMEN

En la ciénaga de Ayapel y sus cuencas aferentes se desarrollan diferentes actividades antrópicas como minería, agricultura y ganadería que generan cambios en las coberturas vegetales y en el suelo. En conjunto con la deforestación estas actividades provocan una transformación del ecosistema ocasionando que en algunas zonas el complejo cenagoso se pierda áreas inundables. A pesar de esto, los efectos sobre los flujos de agua superficial derivados de las alteraciones de la cobertura vegetal no se han identificado claramente. El objetivo del presente proyecto fue evaluar los cambios hidrológicos en la ciénaga de Ayapel derivados de la fragmentación de las coberturas vegetales en sus cuencas aferentes mediante imágenes satelitales, y de esta manera determinar la relación entre las variables usadas para establecer como las actividades económicas afectan el flujo hídrico superficial en la zona de estudio.

La investigación realizada fue un estudio de caso aferente a la ciénaga de Ayapel a partir de una investigación documental de los escritos publicados acerca de las actividades económicas de la zona, y una investigación correlacional que permitió evidenciar la conexión mediante el uso del coeficiente de spearman entre las variables obtenidas a partir de los datos satelitales y datos hidroclimáticos de las estaciones administradas por el IDEAM. Esto se logró mediante el uso de los softwares R y GDAL, determinando los índices de vegetación con base en las imágenes satelitales y el estado de fragmentación a partir de dichos índices, en un periodo de veinte (20) años, entre el año 2000 y el año 2019.

Se encontró que los datos hidroclimáticos tienen una correlación positiva con los índices de vegetación, siendo algunos más altos que otros. En comparación con el índice de oscilación del sur (SOI por sus siglas en inglés), la correlación de los índices de vegetación es negativa con tendencia a nula, pero con los datos hidroclimáticos es positiva. Con respecto a las actividades económicas, los índices de vegetación muestran una correlación positiva. Por otra parte, las actividades económicas por diferentes factores locales tienen repercusión sobre el flujo del agua superficial hacia la ciénaga, ya que hacen modificaciones sobre la superficie terrestre, tales como compactación de suelo, deforestación y contaminación haciendo que la zona de estudio haya perdido en algunos puntos hasta el 50% de área en el periodo de estudio.

Palabras clave: fragmentación, correlación, índices de vegetación, imágenes satelitales.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

ABSTRACT

The aim for this project was to evaluate the hydrological changes in the Ayapel marsh derived from the fragmentation of the vegetation covers in its afferent basins through satellite images, and in this way be able to determine the relationship between the variables used to establish how economic activities affect the surface water flow in the study area.

The research carried out was a case study related to the Ayapel marsh based on a documentary investigation of the papers published about the economic activities of the area, and a correlational investigation that allowed to demonstrate the relationship based on the use of spearman coefficient between the variables obtained from satellite data and hydroclimatic data from the stations managed by IDEAM. This was achieved through the use of R and GDAL software, determining the vegetation indices from satellite images and the state of fragmentation from said indices, in a period of twenty (20) years, since the year 2000 until the year 2019.

It was found that the hydroclimatic data have a positive correlation with the vegetation indices, some being higher than others. With the southern oscillation index (SOI), the correlation of the vegetation indices is negative with a tendency to zero, but with the hydroclimatic data it is positive. Regards the economic activities, the vegetation indices show a positive correlation. On the other hand, economic activities due to different local factors have repercussions on the flow of surface water towards the marsh, since they make modifications on the land surface, such as soil compaction, deforestation and contamination, causing the study area to have lost in some points up to 50% out of the area in the study period.

Keywords: fragmentation, correlation, vegetation indices, satellite images.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Tabla de Contenido

RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN.....	10
1. OBJETIVOS	11
1.1. OBJETIVO GENERAL	11
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2. ANTECEDENTES.....	12
3. MARCO TEÓRICO	16
3.1. Zona de Estudio	16
3.1.1. Red hidrográfica Río - Ciénaga	17
3.1.2. Imágenes Satelitales	20
3.1.2.1. Sensor MODIS	21
3.1.3. Cálculo del NDVI y EVI	22
3.1.4. Métricas de Estado de Fragmentación	22
3.1.5. Variables Hidroclimáticas	23
3.1.6. Variabilidad Climática	24
3.1.7. Índice SOI	24
3.1.8. Base de Datos GLAD	24
4. METODOLOGÍA.....	26
5. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	30
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	32
6.1. Análisis de fragmentación a partir de los índices de vegetación	32
6.2. Datos Hidroclimáticos	36
6.3. Superficie del Espejo de Agua de la Ciénaga de Ayapel	48
6.4. Articulación de las actividades económicas con la Zona de Estudio	53
7. IMPACTOS DEL PROYECTO	65
7.1. Impactos Sociales	65
7.2. Impactos Ambientales	65
8. CONCLUSIONES.....	66
9. RECOMENDACIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa Ubicación Zona de Estudio	18
Figura 2. Mapa Red Hidrográfica Zona de Estudio	19
Figura 3. Absorción y reflejo de rayo de luz por las plantas.....	20
Figura 4. Ejemplos Dinámica GLAD	25
Figura 5. Diagrama de flujo metodológico	28
Figura 6. Mapa Ubicación Zona Aferente Ciénaga de Ayapel	31
Figura 7. Actividades económicas en la ciénaga de Ayapel	32
Figura 8. Gráfica Métrica índice parche más grande	33
Figura 9. Gráfica Métrica Número de Parches.....	34
Figura 10. Gráfica Métrica Densidad de Borde	35
Figura 11. Comportamiento del SOI para el periodo de tiempo seleccionado	36
Figura 12. Mapa influencia estaciones hidroclimáticas	38
Figura 13. Comportamiento NDVI precipitación Subcuenca Ayapel	39
Figura 14. Comportamiento NDVI precipitación Subcuenca Barro	40
Figura 15. Comportamiento variable Temperatura Subcuenca Ciénaga	42
Figura 16. Comportamiento variables Evaporación y Precipitación Subcuenca Ciénaga	42
Figura 17. Comportamiento variables Precipitación y Nivel Subcuenca Ciénaga..	43
Figura 18. Comportamiento NDVI precipitación Subcuenca Escobillas.....	45
Figura 19. Comportamiento NDVI precipitación Subcuenca Muñoz	46
Figura 20. Comportamiento NDVI precipitación Subcuenca Quebradona	47
Figura 21. Clasificación Superficies base de datos GLAD de acuerdo con el color del mapa	49
Figura 22. Puntos Estratégicos base GLAD para la zona de estudio	50
Figura 23. Gráfica Porcentaje Anual GLAD	51
Figura 24. Gráfica Porcentaje Mensual GLAD	52
Figura 25. Gráfica Modelo RGB.....	52
Figura 26. Mapa títulos mineros.....	55
Figura 27. Presencia de grupos armados y explotación de oro	56
Figura 28. Mapa vocación de suelos	57
Figura 29. PIB Agricultura, Ganadería	58
Figura 30. PIB Minas, Canteras.....	59
Figura 31. Mapa Minería de Oro Aluvión	60
Figura 32. Producción de Oro	61
Figura 33. Producción Acuícola Nacional	62
Figura 34. Producción Bovina Nacional	63
Figura 35. Producción Agrícola Nacional	63

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Lista de Tablas

Tabla 1. Metodología	26
Tabla 2. Tipo correlación coeficiente	29

INTRODUCCIÓN

Los humedales proporcionan una gran variedad de servicios ecosistémicos a las poblaciones aledañas permitiendo su sostenimiento económico mediante actividades asociadas como pesca, apicultura, turismo y recreación. Dentro de los servicios que estos ecosistemas brindan se pueden mencionar la regulación de contaminantes, suministro y depuración de agua, recarga de acuíferos y almacenamiento de agua subterránea, mitigación y adaptación al cambio climático y soporte a la biodiversidad, amortiguación de inundaciones, estabilización de costas y protección contra tormentas, y valores culturales (Ward, et al., 2016). La pérdida de áreas de los humedales, como consecuencia de diferentes factores antrópicos y naturales ocasionan la transformación de las coberturas de suelo y que, a vez, degradan a los ecosistemas (Bhatta, et al., 2016). Las principales actividades transformadoras de carácter intensivo y extensivo, como la agricultura, ganadería, deforestación y minería, y en menor medida para urbanización, construcción de vías y obras civiles. Sumado a esto, los eventos de variabilidad y cambio climático exacerban la degradación del estado de los ecosistemas de los humedales y con los mismos (Guittard, 2016).

Por otra parte, actualmente la ciénaga de Ayapel se ve afectada principalmente por las actividades antrópicas que se desarrollan en el mismo cuerpo de agua de la ciénaga y en sus afluentes, que corresponden principalmente a pesca, minería, agricultura y ganadería, que contribuyen al incremento de la carga contaminante en el cuerpo de agua (Zabala-Agudelo, 2017). Además de estas actividades, la ciénaga también se ve afectada por el comportamiento de las variables hidroclimáticas como precipitación y temperatura, las cuales contribuyen con el cambio de dinámica del flujo hídrico, estas variables pueden cambiar en el tiempo por diferentes factores, que ocasionan cambios en el flujo hídrico superficial y los servicios ecosistémicos que brinda (Marrugo-Negrete, et al., 2019).

Adicionalmente, no se encuentran estudios que relacionen todas las variables para evaluar su afectación sobre el flujo superficial, y por este motivo es importante el desarrollo del presente proyecto. El cual tiene como objetivo evaluar los cambios hidrológicos en la ciénaga de Ayapel derivados de la fragmentación de coberturas vegetales, mediante el uso de diferentes bases de datos como lo son earthdata, IDEAM e IGAC, y softwares como R y GDAL. Finalmente, se hizo una correlación y comparación de datos para obtener un nivel de fragmentación de la vegetación y la afectación al flujo hídrico superficial ocasionado por las actividades económicas de la zona. El documento presenta capítulos secuenciales en orden metodológico que permiten tener continuidad en hechos y procesos para llegar a los resultados que muestran a la afectación del flujo hídrico superficial.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar los cambios hidrológicos en la ciénaga de Ayapel derivados de la fragmentación de las coberturas vegetales en sus cuencas aferentes mediante imágenes satelitales.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el grado de fragmentación de las coberturas vegetales en las cuencas aferentes a la ciénaga de Ayapel mediante el cálculo del índice de diferencia normalizada de vegetación (en inglés *NDVI*).
- Seleccionar eventos antrópicos e hidroclimáticos relevantes para ciénaga de Ayapel a partir de la información histórica disponible.
- Relacionar los cambios en el *NDVI* con las alteraciones hidrológicas en la ciénaga de Ayapel.

2. ANTECEDENTES

Los humedales naturales son ecosistemas que a nivel global se encuentran amenazados por diferentes factores que ocasionan una fragmentación hídrica, afectando a las diferentes poblaciones bióticas existentes. La sobreexplotación, el desarrollo intensivo de la acuicultura y la contaminación proveniente de zonas urbanizadas, agrícolas, ganaderas y mineras, ejercen presión sobre estos ecosistemas, amenazando su existencia (Li, et al., 2019). Un estudio en East-Godavari ubicado en Andhra Pradesh (India) acerca del uso de los recursos de los manglares, en el que se encuestaron a las poblaciones de pescadores, se encontró que las especies de manglares dominantes en el ecosistema son usados para la construcción y como combustible para cocina, otros son usados para teñir redes, hacer trampas de pesca e inclusive para alimento de ganado (Dahdouh-Guebas, et al., 2006). En Canadá la Bahía James que tiene un comportamiento bilateral cubierta mayoritariamente por pantanos que se forman como red de drenajes y funcionan como unidades de almacenamiento, y turberas que se han desarrollado sobre sedimentos marinos de baja permeabilidad, y a causa de la explotación minera de los depósitos de kimberlita que se han encontrado en la zona, se han fragmentado los flujos hídricos de este ecosistema, principalmente debido a la despresurización y drenado del acuífero Silurian (Estados Unidos) y sus largos cercanos, causando afectación a la escorrentía que, tiende principalmente a disminuir y por tanto, causa una disminución en la tasa de evapotranspiración (Leclair, 2015). El incremento de los asentamientos humanos en las costas aumenta la presión sobre estos ecosistemas, ya que la agricultura, ganadería y descarga de aguas residuales cargadas de altas concentraciones de metales pesados, fertilizantes y fármacos, generan fragmentación y pérdida de área de los ecosistemas, como es el caso del Parque Natural del Marjal de Pego-Olivia, ubicado en España a orillas del mar Mediterráneo (Andreu, et al., 2016).

A nivel del trópico, se ha evidenciado que las condiciones naturales del ambiente proporcionan cambios significativos en la composición de los humedales (Duke, et al., 1998). Mediante el análisis fitoplanctónico en un sistema de lagos en Brasil se estableció una conexión entre los lagos y sus afluentes, que presenta diferente desarrollo de biodiversidad en las épocas de lluvia y de sequía, así mismo, se encuentra que la absorción de contaminantes en los periodos es diferente, dependiendo del nivel del agua, ya que factores como la temperatura, capacidad de establecimiento de cada especie y los límites de tolerancia establecen la distribución de las diferentes especies dentro de los humedales (Lázaro, et al., 2016). Otro estudio realizado en Perú muestra que debido al cambio climático la escorrentía que llega a un humedal mediante el río aumenta o disminuye en función del derretimiento de los casquetes polares y del patrón de precipitación, reafirmando que la fragmentación de los ecosistemas no solo se produce por las interacciones del hombre con la naturaleza, sino que también por factores climáticos naturales que se presentan cada periodo de tiempo y que algunas son consecuencia del calentamiento global (Polk, et al., 2017). En Costa Rica, la expansión agrícola para

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

cultivos sin prácticas de conservación de suelo y protección de la vegetación ribereña, aportan sustancias tóxicas debido a los residuos de pesticidas agrícolas altamente concentrados que derivan de estas prácticas, fragmentando y afectando las relaciones biológicas en los ecosistemas (Fournier, et al., 2018).

En cuanto a la zona de estudio, la Ciénaga de Ayapel se ha visto afectada por el cambio climático, principalmente cambio en los regímenes de precipitación y aumentos de temperatura, junto con fenómenos de La Niña y El Niño, alterando la dinámica hídrica de la zona y a su vez la hidrología local (Serna-López & Cañon-Barriga, 2019). Sumado a esta condición el ciclo hidrológico en lo que corresponde a escorrentía superficial del complejo cenagoso, también se ve afectado por las actividades antrópicas que se han desarrollado en las áreas aferentes a los afluentes de la ciénaga como agricultura, ganadería, pesca, minería y mantenimiento de diques, que permiten el flujo superficial de cantidad importante de agua en el ecosistema (Zabala-Agudelo, 2017). La minería de oro es un factor importante en la degradación y fragmentación del ecosistema, debido a las concentraciones de mercurio que se generan en esta actividad económica, que llega a los cuerpos de agua mediante escorrentía y afecta a las comunidades macrófitas y peces, bioacumulándose en estas y presentando un riesgo de salud a la población del municipio de Ayapel, la cual es la principal beneficiaria de este recurso, como es el caso de la represa Urrá en la que mediante un muestreo in situ se encontraron que los niveles de mercurio en tejidos de peces reflejan el transporte atmosférico y por escorrentía desde las zonas mineras hasta el cuerpo de agua (Marrugo-Negrete, et al., 2013; Marrugo-Negrete, et al., 2018). La afectación a las poblaciones de la zona principalmente es sobre los pescadores, pues la pesca no solo representa para ellos un medio para subsistencia sino también su principal vía de comunicación; pero los recursos hidrobiológicos de la Ciénaga están escaseando debido a su sobreexplotación por parte de los pescadores para quienes y muchas ocasiones es el único sustento de vida (Duque Quintero, et al., 2013).

La relación entre desconexiones hídricas en la Ciénaga de Ayapel con sus afluentes y las actividades antrópicas que se desarrollan en su entorno, así como la afectación de estas al ecosistema, no ha sido estudiada en gran medida. Los estudios realizados hasta el momento evalúan la calidad del agua, mostrando como disminuye al relacionarse con las actividades económicas como agricultura, ganadería, pesca y minería y las consecuencias que generan, principalmente por el aporte de nitratos al cuerpo de agua, afectando el desarrollo del fitoplancton; pero no se evalúan los cambios del flujo hídrico superficial desde las subcuencas hacia la ciénaga ni tampoco si existe una relación entre las actividades económicas, factores climáticos y el flujo superficial (Marrugo-Negrete, et al., 2018). Sumado a las problemáticas locales mencionadas, las estructuras de regulación como las presas (hidroeléctricas) representan una ruptura en la conexión hídrica del sistema, ya que la mayoría de flujo superficial se ve interrumpido por la presa construida afectando el desarrollo de las especies acuáticas y terrestres que dependen de este flujo para mantener el ecosistema, adicionalmente representan un riesgo para la

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

economía de la población debido a la disminución de caudales (Zabala-Agudelo, 2017).

Estudios que han evaluado la fragmentación hídrica y la pérdida de área de humedales han usado métodos que evalúan la presencia y ausencia de coberturas vegetales, áreas intervenidas y urbanizadas, mediante imágenes satelitales y mediciones in situ, datos socioeconómicos de los municipios y el uso de datos meteorológicos para estimar el comportamiento del ciclo hidrológico, combinado con tratamientos estadísticos como regresión lineal multivariada para hacer un diagnóstico de heterogeneidad espacial y así obtener mapas de factores relacionados con las transformaciones y fragmentaciones de la vegetación, también se han usado programas como *fragstats* y *R* (Velez-Macias, 2018). Las encuestas y tratamiento de datos obtenidos de entidades nacionales como el DANE muestran que puede existir una relación entre las actividades socioeconómicas y el área disponible para su desarrollo, y por tanto, determinar cuáles son los principales impactos sobre la comunidad, esto permite plantear mejoras en los sistemas de gestión para incrementar la calidad de vida de las poblaciones (Patiño, 2016).

Dentro de otros métodos más recientes usados para evaluar fragmentación hídrica en ecosistemas, se pueden mencionar la metodología de circuitos teóricos que consisten en hacer una estimación basada en modelos ya realizados para la proyección de los escenarios más probables de cambio de flujo superficial, esto incluyen una modelación de la temperatura de las corrientes de flujo superficial en combinación de escenarios de cambio climático, con el fin de determinar el riesgo de invasión del área de inundación de la ciénaga por parte de algunas actividades económicas como agricultura y ganadería, dependiendo de la disponibilidad de hábitat para ello. Estas modelaciones a partir de datos tomados en campo y datos históricos, consideran diferentes enfoques que permiten el análisis de movimiento de aguas superficiales y subterráneas, almacenamiento, entradas y salidas, y así estimar el comportamiento del ecosistema al cambiar las condiciones en que se encuentran (Melles, et al., 2015; Jones, et al., 2019).

Para analizar la fragmentación y desconexión hídrica desde un enfoque biológico los muestreos de macroinvertebrados, peces, parámetros de calidad del agua, metales pesados y fármacos provenientes de minería y vertimientos de aguas domésticas e industriales que principalmente aportan nutrientes y contaminantes emergentes que afectan el desarrollo de las especies de este ecosistema (Andreu, et al., 2016; Zabala-Agudelo, 2017), permiten calcular índices de abundancia e índices de diversidad y realizar un análisis de componentes principales (PCA), análisis de escalamiento no métrico multidimensional (NMDS) o procedimiento de permutación de respuesta múltiple (MRPP). Estos métodos permiten relacionar los parámetros medidos con las especies de peces e invertebrados y su influencia, dependiendo de la cercanía al lugar de pesca y la interacción que tiene con los contaminantes, pues al existir zonas con exceso de macrófitas por los aportes de nitrógenos, impiden que las especies puedan desplazarse por todo el ecosistema,

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

creando zonas de mayor contaminación que permiten identificar la fragmentación del ecosistema gracias al nivel de contaminación de cada especie, esto puede calcularse mediante el índice de calidad ecológica (ICE), que relaciona los datos de las muestras tomadas (parámetros como turbidez, nutrientes, fitoplancton, temperatura, oxígeno disuelto, pH, precipitación, entre otros) con la cuantificación de especies y número de individuos para establecer el estado del ecosistema (Marrugo-Negrete, et al., 2008; Schock, et al., 2014).

La evaluación mediante métodos estadísticos de la relación de datos satelitales, cambio de cobertura y área pertenecientes a humedales, no es un indicador completo que permite determinar la relación con las actividades antropogénicas de la zona y que afectan la conexión hídrica superficial. Se considera que la mejor aproximación a la relación de actividades antrópicas y naturales con la fragmentación vegetal y desconexión hídrica en este trabajo se obtiene al relacionar los índices de vegetación con datos obtenidos mediante sensores in situ y datos de actividades económicas, y a su vez tener en cuenta el estado de fragmentación de la zona de estudio, como se hizo para Honduras en un estudio similar (Southworth, et al., 2004).

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Zona de Estudio

Los humedales costeros y ciénagas al igual que los humedales continentales proporcionan una gran variedad de servicios ecosistémicos como regulación, culturales y de aprovisionamiento a las poblaciones humanas que se desarrollan en el entorno. Estos sistemas presentan mayor dinamismo y diversidad debido a la conexión existente con el mar, pues son ecosistemas ricos en nutrientes principalmente eutróficos; debido a esto, también presentan mayor vulnerabilidad a los cambios principalmente de calidad del agua (Andreu, et al., 2016).

Una parte que conforma los humedales corresponde a las áreas de inundación, que varían dependiendo de la época del año, pues suelen cambiar en las épocas de sequía o verano e invierno o de lluvias. Se estableció que los cuerpos de agua durante la temporada seca desarrollan una ecología más autóctona debido a la desconexión con el río principal, principalmente debido a procesos meteorológicos locales, influencia antropogénica y efecto de borde; mientras que la alta productividad predomina durante las temporadas secas en llanuras aluviales. En humedales áridos las condiciones de flujo varían ya que estos ecosistemas se enfrentan a inundaciones estacionales, cambiando de uso de suelo de llanura de inundación a suelo desnudo o tierras agrícolas. La conexión hídrica en los humedales en temporadas posteriores al monzón tiene un alto potencial de conectividad, pero la conectividad depende de la pendiente de la superficie y su rugosidad, para actuar como resistencia a la fuerza. La diferencia de conectividad entre antes y después del monzón no es completamente distintas, pues depende del uso que se les dé a las tierras agrícolas. Las áreas más alejadas del humedal, con el paso del tiempo pierden su potencial de conectividad, mientras que las cuencas próximas al humedal aumentan su potencial de conectividad con el tiempo (Lázaro, et al., 2016; Fleischmann, et al., 2018).

La ciénaga de Ayapel se encuentra ubicada en el departamento de Córdoba y hace parte del complejo cenagoso de la depresión la Momposina como se muestra en la ilustración 1, la extensión territorial de esta cuenca es de 1504 km² y su topografía varía entre 20 y 150 m.s.n.m. La ciénaga es alimentada por los caudales de las crecientes de los ríos San Jorge y Cauca, y de las subcuencas de Caño Grande, Barro, Quebradona, Muñoz y Escobilla. Esta zona presenta dos épocas anuales, una de sequía entre diciembre y marzo, y una época de lluvias entre los meses de abril a noviembre. Este régimen de precipitación determina que en la ciénaga se obtengan diferentes niveles en su lámina de agua y que los flujos de la red hidrográfica sean diferentes a lo largo del año; los niveles más bajos en la ciénaga se presentan entre los meses febrero y abril y los niveles más altos se presentan en los meses de agosto a noviembre, es decir que se presenta hidoperiodos unimodales que son comunes de la región caribe.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

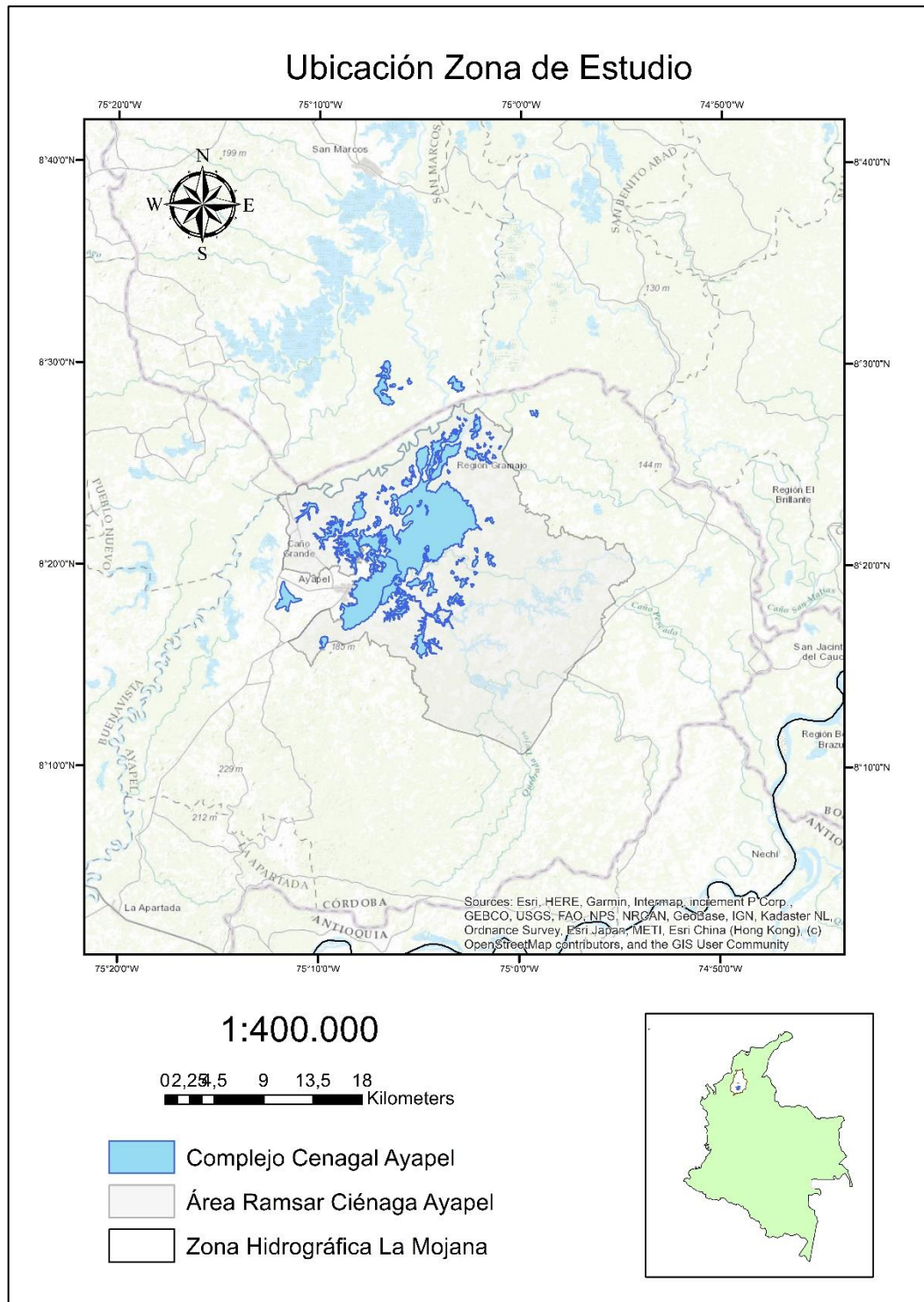
Los cambios interanuales de la precipitación y los niveles de lámina de agua, se ven reflejados en el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos que se realiza por los ecosistemas y comunidades de personas aledaña al espejo de agua de la ciénaga.

3.1.1. Red hidrográfica Río - Ciénaga

La configuración de los humedales establece una relación y conexión directa entre los ríos tributarios y la ciénaga, por tanto, las afectaciones que se den aguas arriba, es decir, que ocurran al río, se ven reflejados en el ecosistema. Ya que las ciénagas corresponden a sistemas lénticos, existe una relación con los ríos y afluentes de este cuerpo de agua, la cual permite intercambio de sedimentos y organismos principalmente, permitiendo el desarrollo de los ecosistemas. De esta manera, al extraer agua excesivamente en la parte superior de una cuenca genera que los ríos y la ciénaga aguas abajo reciban un caudal de agua menor o incluso no reciban caudal de agua; además, esto no solo repercute en el flujo aguas abajo, sino también influye negativamente en el ciclo del agua, modificando en algunos casos y bajo circunstancias específicas los patrones de lluvia, que pueden afectar no solo a esa cuenca sino a las aledañas también; igualmente la fauna y la flora se ven afectadas por cualquier cambio que se presente en algún punto del flujo de agua, y estos cambios no solo se ocasionan al modificar aguas arriba, también puede darse al modificar las condiciones aguas abajo, pues existen especies que se desarrollan al moverse a lo largo de la cuenca, por ejemplo los salmones y las anguilas al desplazarse en época de ovación. Pero las condiciones del ecosistema no pueden cambiar solo por una excesiva extracción de agua, también puede ocurrir por vertimientos industriales y domésticos sin tratamiento adecuado, que causan un exceso de nitratos y fosfatos en aguas posteriores generando eutrofización, o por aportes de residuos de pesticidas y fertilizantes provenientes de ganadería y agricultura, entre otros (Rosinsky, et al., 2007). En la ilustración 2, se muestra un mapa de la red hidrográfica en la zona de estudio.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

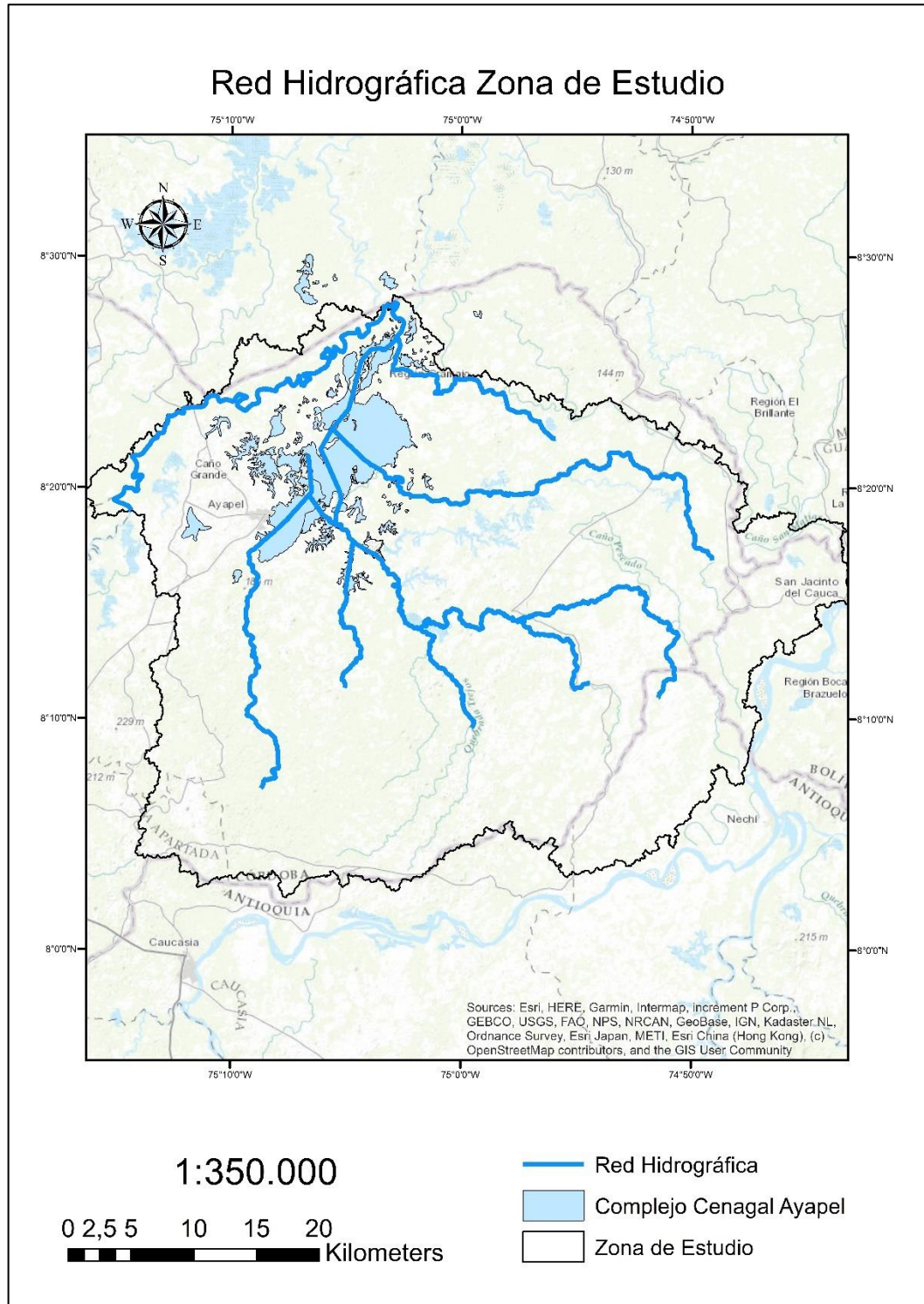
Figura 1. Mapa Ubicación Zona de Estudio



Fuente: Elaboración propia

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Figura 2. Mapa Red Hidrográfica Zona de Estudio

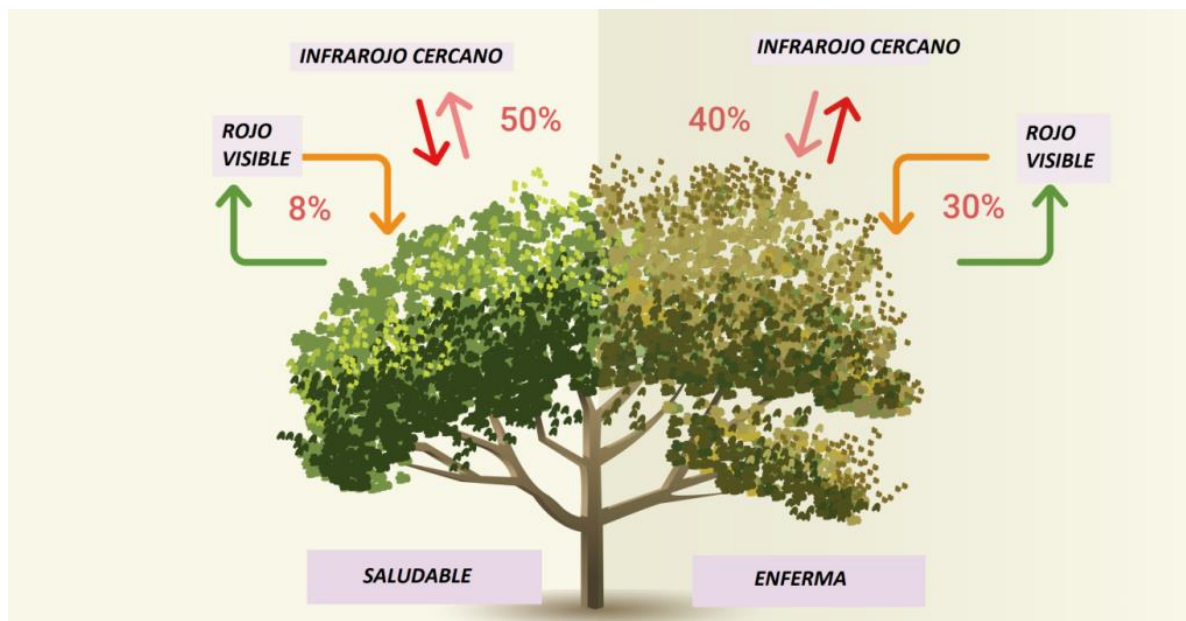


Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Imágenes Satelitales

La teledetección permite la identificación de las características y fenómenos de la superficie terrestre por medio de imágenes satelitales, que pueden ser analizadas mediante interpretación visual, es decir, sin uso de software especializados, o mediante tratamiento digital, para así poder obtener la información requerida. Las imágenes satelitales corresponden a una matriz de puntos generada por la reflexión de la energía, ya que los cuerpos sobre la superficie terrestre se comportan de diferente manera a la incidencia de la luz solar, estas son obtenidas mediante sensores remotos instalados en los satélites que captan la energía electromagnética reflejada por los objetos terrestres observados. Existen sensores remotos pasivos y activos, los sensores pasivos reciben la señal de la fuente de energía externa (generada por los rayos solares) reflejada por la superficie de los cuerpos, la mayoría de estos sensores usan la banda del espectro visible; y los sensores activos requieren de una fuente de energía interna que dispara una señal hacia la superficie terrestre. La fracción de energía que regresa a estos sensores, generalmente en los rangos visible e infrarrojo del espectro electromagnético, proporciona información sobre la superficie terrestre (Suarez Hernández, 2017). En la ilustración 3 se muestra como las plantas pueden absorber o reflejar los rayos de luz que permiten el funcionamiento de la teledetección.

Figura 3. Absorción y reflejo de rayo de luz por las plantas



Fuente: Grupo TYC GIS. (2019). NDVI ¿qué es y para qué sirve? Grupo TYC GIS. <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Las imágenes satelitales ofrecen una visión global de la superficie terrestre, esta información puede aplicarse en el análisis de fenómenos naturales y ambientales, como el seguimiento de huracanes y otros fenómenos climáticos, medición de volúmenes generados por grandes eventos de precipitación, seguimiento a actividad volcánica, identificación de áreas afectadas por inundaciones debido a fuertes precipitaciones o aumento en el nivel del mar, afectaciones por terremotos, tormentas desérticas, análisis del relieve, comportamiento de glaciares, entre otras. Además, esta información puede ser útil para la elaboración de modelos de ocupación del suelo, procesos de deforestación, aumento de agricultura, enfermedades en la vegetación, contaminación de cuerpos de agua, entre otros. Para desarrollar proyectos, es posible adquirir imágenes satelitales de sensores remotos de la NASA como Terra y Aqua MODIS, ASTER, VIIRS, CBERS-4, Sentinel-1,2, antena NAIS MODIS, Landsat 4, 5, 7 y 8, entre otros (Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales [ICDE], 2019).

3.1.2.1. Sensor MODIS

Este sensor clasificado como pasivo de acuerdo con su forma de funcionamiento, se encuentra a bordo de los Satélites Terra o EOS-AM y Aqua o EOS-PM, los cuales fueron lanzados en diciembre de 1999 y mayo de 2002 respectivamente, las órbitas de estos satélites corresponden a helio-sincrónica (inclinación de 98.2°) y cuasi-polar (inclinación 98°) respectivamente. Las primeras imágenes de este sensor se obtuvieron en febrero de 2002. Este sensor cuenta con una sensibilidad radiométrica de 12 bit en 36 bandas espectrales y un rango de longitud de onda entre 0.4 μm a los 14.4 μm . Las bandas de la 1 a la 7 son útiles para la aplicación terrestre, de 20 a la 36 cubren el infrarrojo térmico del espectro, cualidades que permiten el monitoreo preciso de las alteraciones en la superficie terrestre (Mas, 2011).

Los datos obtenidos por los satélites Terra y Aqua (incluyendo los datos MODIS) son transferidos a las estaciones ubicadas en *White Sands* (Nuevo México) a través del seguimiento y retransmisión desde el sistema de satélites. De las más importantes características que distinguen la misión MISION es que no solamente están disponibles los datos para la descarga luego de la toma de los mismo, sino que también permite una transmisión directa de datos crudos a través del sistema *Direct Broadcast* (Mas, 2011).

Los productos de MODIS se clasifican en 5 niveles dependiendo del grado de procesamiento, correspondientes a Nivel 0 (datos brutos sin ningún tratamiento), L1

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

(datos de geolocalización), 1A (productos para geolocalización, calibración y procesamiento), 1B (productos de radiancias calibradas con geolocalización) y L2G (productos que contienen variables geofísicas proyectadas en una malla uniforme), L2 (productos a partir del nivel 1B con correcciones atmosféricas y algoritmos bio-ópticos), 3 (productos de valor agregado derivados de variables geofísicas mapeadas) y 4 (productos generados por la incorporación de datos MODIS en modelos para estimar variables geofísicas). Para este caso, se usa el nivel 3 en donde se agrupan los productos derivados de variables geofísicas que elaboran compuestos de intervalos de tiempos establecidos (en este caso 16 días). Dentro de este nivel se encuentran los productos de reflectancia, índices de vegetación, temperatura y emisividad de la superficie terrestre y puntos de calor e incendios. La misión satelital MODIS fue elegida principalmente ya que contiene los datos de los índices de vegetación NDVI y EVI incorporados en los cálculos base del sistema, esta misión satelital ofrece dos registros mensuales para cada año a partir del mes de febrero de 2000 (Mas, 2011).

3.1.3. Cálculo del NDVI y EVI

Por otra parte, las imágenes satelitales pueden ser estudiadas mediante índices de vegetación, los cuales son parámetros calculados a partir de la reflectividad de las coberturas vegetales a distintas longitudes de onda, minimizando la influencia de otros factores como el suelo, usando combinaciones de bandas espectrales para identificar la vegetación. El NDVI fue desarrollado por investigadores de la NASA del estudio *Great Plains* para normalizar los efectos del ángulo cenital solar. Este índice permite establecer una relación entre las reflectancias de la superficie en las bandas infrarrojo cercano y rojo, y de esta manera minimizar los efectos de la atmósfera en diferentes épocas; esto es posible gracias a que la vegetación absorbe radiaciones en banda roja y permite una reflexión en la región infrarroja; los valores más comunes para cuerpos de agua varía entre -1.0 a -2.0, para roca arena o nieve entre -0.1 a 0.1, para arbustos y pastizales 0.2 a 0.48 y para bosques densos 0.5 a 1.0. Así pues, el índice de vegetación mejorado (EVI por sus siglas en inglés) se optimizó a partir del NDVI aumentando la sensibilidad en zonas que presentan alta biomasa y mejoró el monitoreo de vegetación al disminuir la influencia de la atmósfera, haciendo una corrección atmosférica, permitiendo el análisis de zonas con bajas coberturas vegetales (Becerro Solano, 2019).

3.1.4. Métricas de Estado de Fragmentación

En general, las métricas de área tienen pocas limitaciones, ya que todos los índices de bordes se ven afectados por la resolución de la imagen y además, el perímetro del parche y la longitud de los bordes se desviarán hacia arriba en las imágenes

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

ráster debido al contorno del parche escalonado, y esto afectará a todos los índices de los bordes. Estas se clasifican en 3 grupos: métrica de parches, métricas de clase y métricas de paisaje (Umass, 2021). Dentro de las métricas de paisaje se encuentran:

- Number of patches (NP)

“NP es igual al número de parcelas del paisaje. Tenga en cuenta que NP no incluye ningún parche de fondo interno (es decir, dentro del límite del paisaje) ni ningún parche en el borde del paisaje, si está presente” (Umass, 2021, p. 1).

- Edge Density (ED)

ED es igual a la suma de las longitudes (m) de todos los segmentos de borde en el paisaje, dividida por el área total del paisaje (m^2), multiplicada por 10,000 (para convertir a hectáreas). Si hay un borde de paisaje, ED incluye segmentos de límite de paisaje que representan solo el borde "verdadero" (es decir, parches contiguos de diferentes clases). Si no hay un borde del paisaje, ED incluye una proporción especificada por el usuario del límite del paisaje. Independientemente de si hay o no un borde de paisaje, ED incluye una proporción especificada por el usuario de borde de fondo interno. Tenga en cuenta que el área total del paisaje (A) incluye cualquier fondo interno presente (Umass, 2021, p. 1).

- Largest Patch Index (LPI)

LPI es igual al área (m^2) del parche más grande del paisaje dividido por el área total del paisaje (m^2), multiplicado por 100 (para convertir a un porcentaje); en otras palabras, LPI es igual al porcentaje del paisaje que comprende el parche más grande. Tenga en cuenta que el área total del paisaje (A) incluye cualquier fondo interno presente (Umass, 2021, p. 1).

3.1.5. Variables Hidroclimáticas

Las variables hidroclimáticas involucran condiciones atmosféricas y del suelo, tienen gran relevancia al realizar análisis frente a la disponibilidad hídrica para diferentes actividades, este tipo de variables son monitoreadas y reportadas por estaciones meteorológicas que permiten obtener registros a través del tiempo para ser analizados en diferentes escenarios. El cambio en escalas temporales y espaciales de estas variables, definen la variabilidad climática de un lugar, estos cambios pueden deberse a procesos internos en el sistema climático o a forzamientos externos antropogénicos. La precipitación permite un ciclo completo de la hidrología, permitiendo que los flujos de agua en los sistemas bióticos se

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

desarrollen. Dentro de esos procesos se pueden mencionar el caudal de los ríos y el nivel de agua de cuerpos lénticos, pues la precipitación influye directamente en estos. Estas variables son medidas en estaciones hidrometeorológicas, que en Colombia son manejadas por IDEAM y permiten el análisis del cambio de flujo en las corrientes y la afectación que se genera sobre los ecosistemas (Sistema de Apoyo para la Gestión Inteligente del Recurso Hídrico [SAGIRH], 2020; IDEAM, 2014).

3.1.6. Variabilidad Climática

La variabilidad climática hace referencia a las variaciones en datos estadísticos como desviación estándar, ocurrencia de fenómenos extremos, entre otros, y el estado del clima en escalas temporales y espaciales. Esta se puede deber a fenómenos naturales, que se denomina variabilidad interna, o forzamientos externos antropogénicos que se conoce como variabilidad externa. Las principales escalas temporales de variabilidad climática corresponden a estacional, intraestacional, interanual e interdecadal (IDEAM, 2014).

3.1.7. Índice SOI

El índice de Oscilación del Sur (SOI por sus siglas en inglés) corresponde a un índice estandarizado, el cual se basa en la presión del nivel del mar, la cual es medida en estaciones ubicadas en Tahiti y Darwin, que tiene en cuenta las fluctuaciones a gran escala en la presión del aire que se presentan entre el pacífico tropical occidental y oriental, lo que corresponde al estado de la Oscilación del Sur. Los valores del SOI corresponden con las temperaturas del océano en el pacífico tropical oriental, determinando los fenómenos de El Niño y La Niña. Este índice se calcula dividiendo la resta de la corriente Tahiti estandarizada menos la corriente Darwin estandarizada, entre la desviación estándar mensual (NOAA). Los valores tomados para el presente estudio correspondientes al índice SOI son tomados de la página *National Centers For Environmental Information – National Oceanic and Atmospheric Administration – Southern Oscillation Index (SOI)*, página oficial de obtención de datos para este índice.

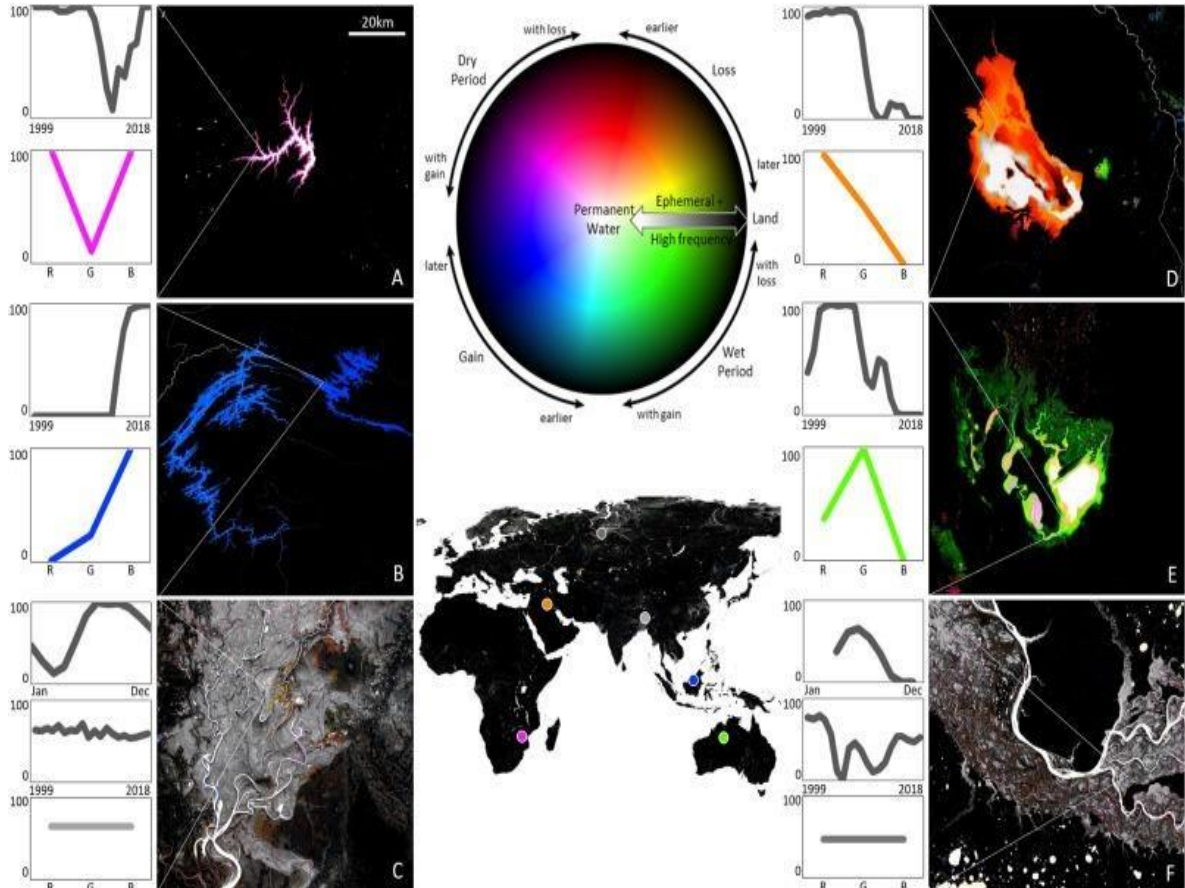
3.1.8. Base de Datos GLAD

La base de datos Global Land Analysis & Discovery (GLAD por sus siglas en inglés), muestra la dinámica interanual entre los años 1999 – 2019. Esta herramienta satelital define el agua superficial como la superficie terrestre que es visible desde el satélite y no esta oscurecida por objetos que se encuentren sobre este lugar, como bosques, vegetación acuática flotante o puentes. En la ilustración 4 se

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

muestran algunos ejemplos de como se comporta la base de datos y que representa cada uno de los colores que muestra.

Figura 4. *Ejemplos Dinámica GLAD*



Fuente: Pickens, A., Hansen, M., Hancher, M., Stehman, S., Tyukavina, A., Potapov, P., Marroquin, B. & Sherani, Z. (2020). Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*, 234(15). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720301620?via%3Dihub>

Para cada ejemplo se describe la situación del punto específico.

(A) Período seco: Represa Chicamba Real, Mozambique.

(B) Ganancia: Presa Bakun, Malasia.

(C) Estacional estable: llanura aluvial del río Meghna, Bangladesh.

(D) Pérdida: Razazza Lake, Iraq.

(E) Período húmedo: Lago Gregory, Australia.

(F) Alta frecuencia: Llanura aluvial del río Ob, Rusia (Ward, 2016).

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

4. METODOLOGÍA

En la tabla 1 se encuentran las actividades por cada objetivo y los métodos que se usaron para desarrollarlas.

Tabla 1. Metodología

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	MÉTODO
Determinar el grado de fragmentación de las coberturas vegetales en las cuencas aferentes a la ciénaga de Ayapel mediante el cálculo del índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI)	<ol style="list-style-type: none">1. Delimitar la zona de estudio geográficamente con respecto a la ciénaga de Ayapel.2. Establecer el periodo de análisis.3. Seleccionar la misión satelital y obtener las imágenes satelitales.4. Calcular los índices de vegetación en el espacio geográfico y periodo de tiempo establecido.	Revisión bibliográfica. Uso de la base de datos Earthdata. Uso del Software R y GDAL.
Seleccionar eventos antrópicos e hidroclimáticos relevantes para la ciénaga de Ayapel a partir de la información histórica disponible	<ol style="list-style-type: none">5. Recopilar la información hidrometeorológica necesaria.6. Diagramar y relacionar la información obtenida.7. Compilar la información de actividades económicas y establecer posibles relaciones con los resultados anteriores.	Uso de las bases de datos de IDEAM e IGAC. Uso de Excel para diagramación.
Relacionar los cambios en el NDVI con	<ol style="list-style-type: none">8. Efectuar un análisis de los resultados	Análisis de los resultados obtenidos.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

alteraciones hidrológicas en la ciénaga de Ayapel	9. Determinar la afectación sobre el flujo hídrico de la ciénaga de Ayapel y sus posibles causas.	
---	---	--

Fuente: Elaboración propia

Para lograr el desarrollo de cada uno de los objetivos se plantearon una serie de pasos y métodos, que se muestra en la ilustración 5. El desarrollo del proyecto consiste en obtener el índice de vegetación NDVI a partir de las imágenes satelitales obtenidas mediante la misión MODIS y procesadas en el Software R con el aplicativo GDAL, para así establecer el nivel de fragmentación de la zona de estudio, mediante los índices parche más grande (LPI, por sus siglas en inglés), número de parche (NP, por sus siglas en inglés) y densidad de borde (ED, por sus siglas en inglés). Posteriormente este índice es usado para hacer un comparativo con la información hidrometeorológica recolectada en las estaciones administradas por el IDEAM y junto a la información brindada por el índice SOI se establecen los eventos principales que pueden afectar el flujo hídrico del complejo cenagoso. También se tiene en cuenta la información de actividades económicas obtenidas de bases de datos nacionales para calcular el índice de correlación de spearman entre todas las variables que se han relacionado. Finalmente se hizo uso de la base de datos GLAD que cuenta con un histórico de datos de los últimos 20 años que establece el porcentaje de pérdida o ganancia de agua en determinadas zonas, y de esta manera determinar cómo se afecta el flujo hídrico.

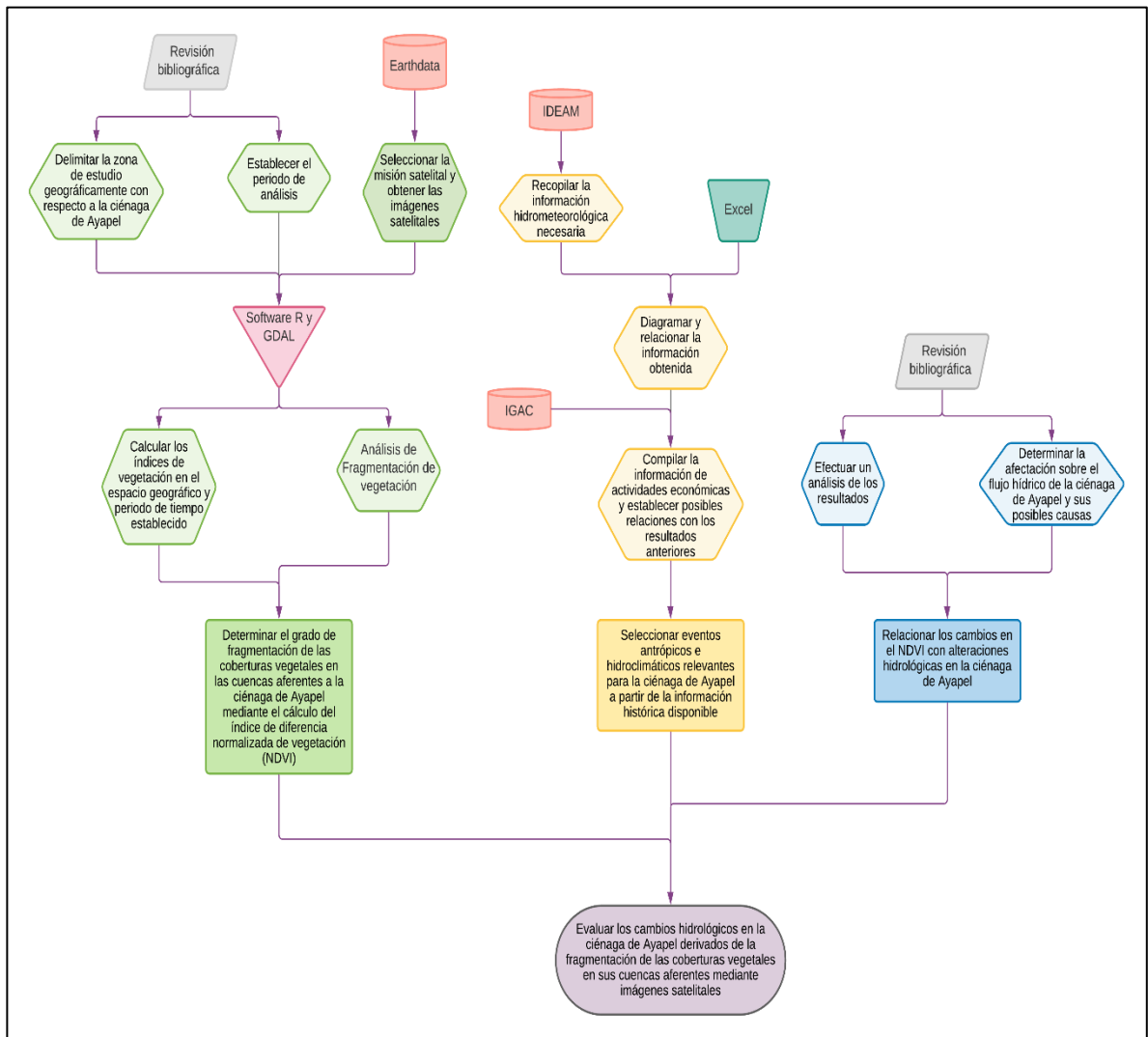
Mediante los servicios que incluye el Software R y el aplicativo GDAL permiten el análisis integrado de cada una de las celdas que componen la imagen satelital y así obtener un único dato para cada índice por imagen, debido a que la misión MODIS obtiene 2 imágenes por mes, estos valores se promedian con el fin de poder llevar a cabo una comparación entre todos los datos. El índice de vegetación usado fue el INDVI, ya que frente al EVI es un índice más completo al no depender de los coeficientes adaptables a las zonas de estudio, y por ende es el más usado en el análisis de vegetación, adicionalmente el índice EVI es usado para corregir los resultados del NDVI cuando hay influencias atmosféricas respecto a las señales obtenidas del fondo del suelo, principalmente en zonas con cubiertas vegetales densas. Debido a que en la zona de aferencia de la Ciénaga de Ayapel la vegetación no es densa, el índice más adecuado para usar es el NDVI.

Se hizo uso de la base de datos Global Land Analysis & Discovery (GLAD por sus siglas en inglés), que muestra la dinámica interanual entre los años 1999 – 2019. Debe tenerse en cuenta que la herramienta satelital GLAD define el agua superficial como la superficie terrestre que es visible desde el satélite y no esta oscurecida por

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

objetos que se encuentren sobre este lugar, como bosques, vegetación acuática flotante o puentes. La diferenciación del agua de la tierra, sombra, bruma y bosques se basó principalmente en la relación de diferencia normalizada de las bandas verde e infrarroja cercana (NDVI). Las series temporales de porcentajes de agua anual se basan en la promediación y ponderación de los datos mensuales, dependiendo de la zona de estudio y sus respectivas épocas meteorológicas.

Figura 5. Diagrama de flujo metodológico



Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos mediante las bases de datos usadas, fueron tomados para el periodo de estudio sin ninguna modificación que pudiera afectar su calidad, ya que la comparación planteada para cumplir los objetivos debe ser realizada con los

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

datos sin ajuste. La correlación de estos datos se hizo mediante el método de spearman, el cual se ajusta a los datos ya que tienen una relación monótona en la que cambian al mismo tiempo, pero no a un ritmo constante.

Éste índice varía entre los valores -1.0 y 1.0, que para este estudio se interpretaron de la siguiente forma:

Tabla 2. *Tipo correlación coeficiente*

Valor coeficiente (absoluto)	Tipo de correlación
0.0 – 0.29	Débil
0.3 – 0.45	Media
>0.46	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

5. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

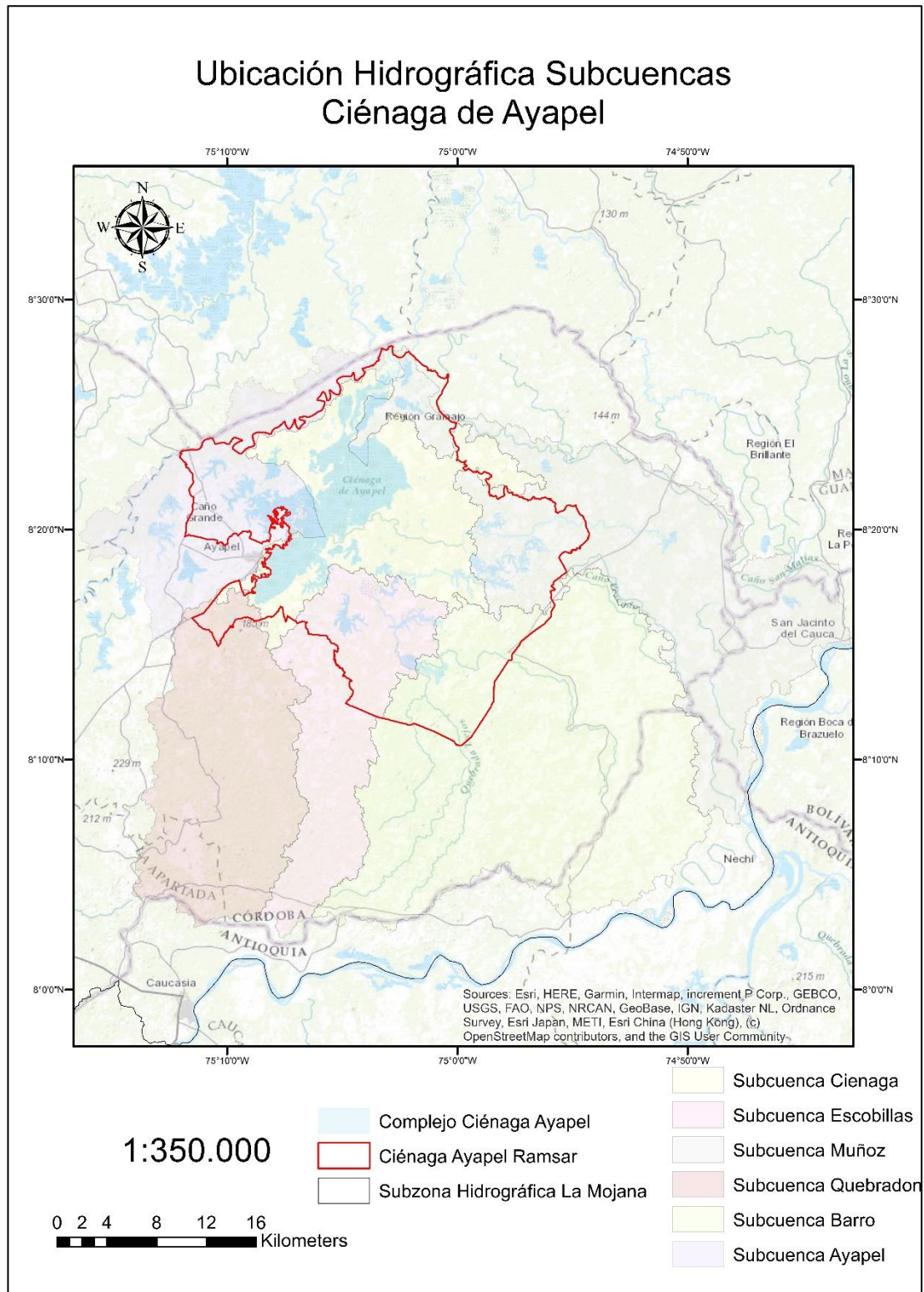
La delimitación del área de estudio se hizo mediante la interrelación de datos abiertos nacionales como las áreas, zonas y subzonas hidrográficas. Para la demarcación del área aferente a la Ciénaga de Ayapel se definió como área hidrográfica Magdalena Cauca, la zona hidrográfica corresponde a Bajo Magdalena – Cauca – San Jorge, la subzona hidrográfica esta denominada como Bajo San Jorge – La Mojana y, por último, también se encuentra localizada el área denominada como sitio Ramsar para el complejo cenagoso.

Dentro del área de estudio definida, se localizan las subcuencas hídricas que aportan el flujo directo de agua al espejo principal de la Ciénaga de Ayapel, que corresponden a ríos y/o quebradas, las cuales son Ayapel, Barro, Ciénaga, Escobillas, Muñoz y Quebradona (Serna, 2016), como se muestra en la ilustración 6. Estas subcuencas fueron tomadas del estudio en campo hecho por Vélez-Macías (2018) en el área de estudio, y teniendo en cuenta la información hídrica disponible.

La ciénaga de Ayapel corresponde a un sistema cenagoso (el segundo más importante Colombia) ubicado al sur del departamento de Córdoba, en el municipio de Ayapel. Este sistema fue incluido en la lista de humedales Ramsar en 2018, debido a la cantidad de aves migratorias que alberga el ecosistema, las cuales son aproximadamente 64 especies provenientes del Norte de América en la época de invierno, y es el hogar de más de 130 especies nativas. El complejo cenagoso tiene el río San Jorge a 5 kilómetros al occidente y el río Cauca a 40 kilómetros al norte (Llanos Pérez, 2013).

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Figura 6. Mapa Ubicación Zona Aferente Ciénaga de Ayapel



Fuente: Elaboración propia

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la ilustración 7 se muestra la ubicación de las principales actividades económicas de la zona aferente a la ciénaga de Ayapel, de acuerdo con Vélez-Macías (2018) quienes hicieron una recopilación de información en campo, donde identificó las principales actividades económicas que predominan en subcuencas aferentes a la ciénaga: la subcuenca Ayapel se caracteriza por ganadería, la subcuenca Quebradona por minería, la subcuenca Escobillas por ganadería y agricultura (principalmente arroz y maíz), la subcuenca Barro por minería de oro y agricultura (principalmente arroz y maíz), la subcuenca Muñoz por minería de oro principalmente y la subcuenca ciénaga por ganadería, pesca y agricultura (principalmente arroz y maíz) (Serna, 2016).

Figura 7. Actividades económicas en la ciénaga de Ayapel



Fuente: Serna, J. P. (2016). Modelación del comportamiento hidrosocial de la ciénaga de Ayapel (Córdoba) bajo diferentes escenarios de cambio climático. Universidad de Antioquia. https://www.researchgate.net/publication/308610830_Modelacion_del_comportamiento_Hidrosocial_de_la_Cienaga_de_Ayapel_Cordoba_bajo_diferentes_escenarios_de_cambio_climatico

6.1. Análisis de fragmentación a partir de los índices de vegetación

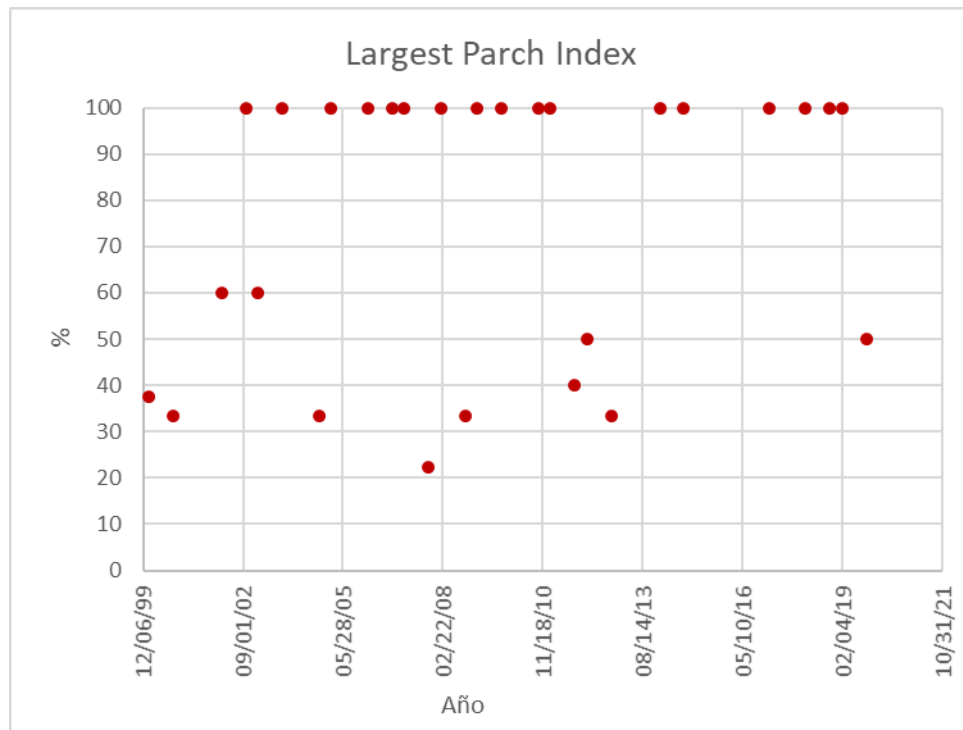
El NDVI permite hacer un análisis a través del tiempo de la fragmentación de coberturas vegetales de la zona. Para determinar el grado de fragmentación en la zona de estudio, se utilizaron principalmente 3 índices correspondientes a la función landscapemetrics (Cran R Studio, 2021) incorporada en el Software R, los cuales

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

corresponden a largest patch index (LPI), number of patch (NP) y edge density (ED); estos índices proveen información a cerca, del grado de fragmentación de un área y cómo varía a través del tiempo, los datos fueron tomados semestralmente a lo largo de los veinte años del espacio temporal estudiado.

En la ilustración 8 se muestra la gráfica para la métrica Largest Patch Index, este índice cuantifica el porcentaje del área total del paisaje que comprende el parche más grande y es una medida de dominio (Umass, 2021), cuando esta métrica se acerca a 0, es posible inferir que el tamaño del parche de vegetación más grande tiende a hacerse más pequeño, cuando la métrica tiende a 100 significa que el parche ocupa cada vez más espacio en el paisaje. Para el área de estudio se encuentra que el parche más grande tiende a aumentar su tamaño en los años 2005 a 2010 y que disminuye hasta el año 2013, donde vuelve a incrementar su tamaño, lo que coincide con la inundación a causa por la ruptura del dique en el río Cauca y la deforestación ocasionada por la minería de oro.

Figura 8. Gráfica Métrica índice parche más grande



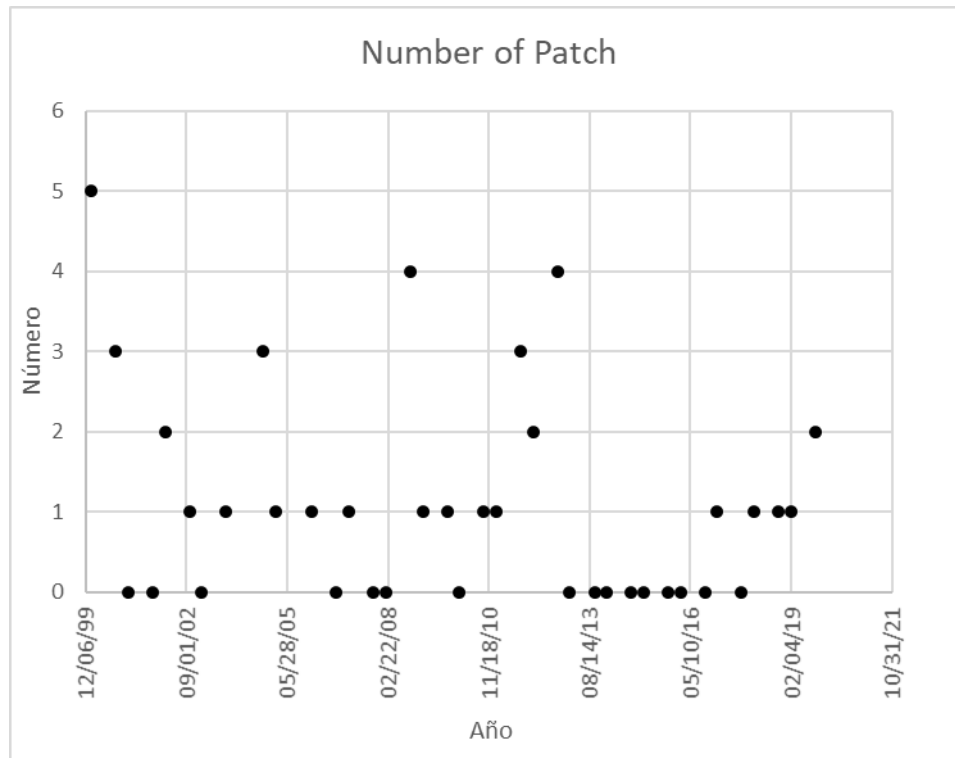
Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 9 se muestra la métrica Number of Patch, indica los números de parches que se pueden distinguir en la zona de estudio (Umass, 2021), en el caso de estudio se muestra que el número máximo de parches que se cuentan es de 5

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

en el 2000 y 4 en los años 2009 y 2012. En el mayor número de años estudiados se encuentra 1 parche, es decir que la fragmentación de la zona de estudio no se presenta en un nivel alto, puede deberse también a la gestión para la reforestación de la entidad gubernamental Corpoayapel.

Figura 9. *Gráfica Métrica Número de Parches*



Fuente: Elaboración propia

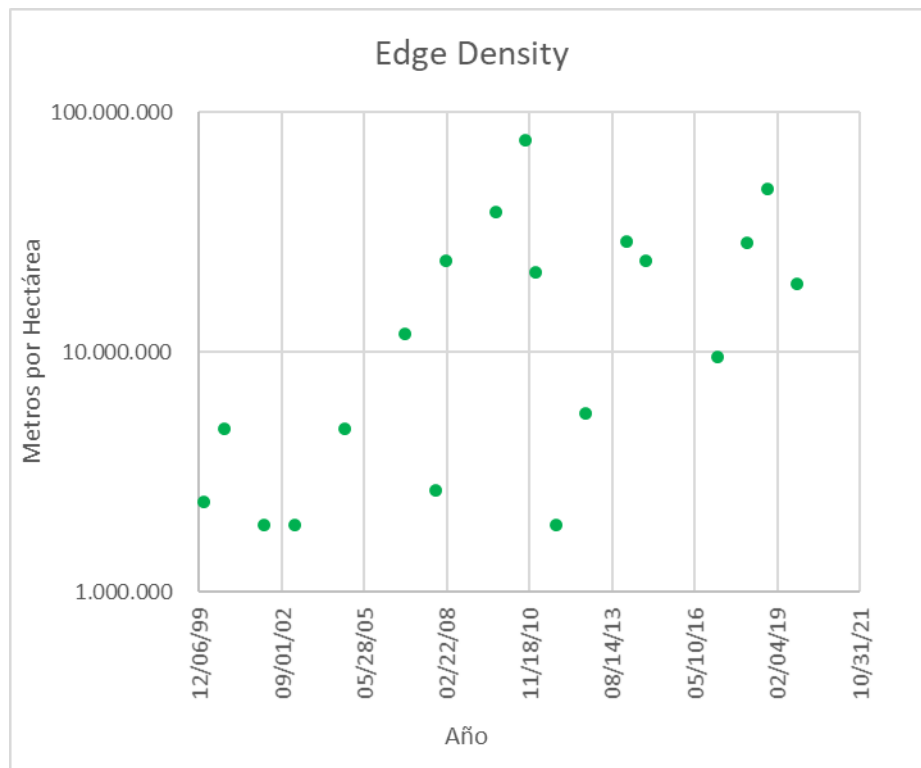
Cuando la métrica Number of Patch indica un valor de cero, es decir que no existen parches de vegetación, corresponde con los valores 100 que muestra la métrica Largest Patch Index, ya que al no existir ningún parche de vegetación el índice cuenta el área total de paisaje. Al comparar los valores del LPI en el periodo de tiempo, se obtiene que el área de parche aumentó en 33,3%, y que el valor promedio fue de 41,2, por lo que se puede decir que la fragmentación en la zona de estudio aumentó en el periodo de estudio y que está en constante cambio alcanzando tamaños mínimos del 22,2% y máximos de 60%. Por otra parte, la métrica NP indica que mientras más parches existan, mayor es la fragmentación, de manera que la fragmentación que presenta el complejo cenagoso es bajo ya que el número máximo de parches es de 5. La fluctuación en los valores de LPI puede deberse a que las plantaciones de maíz y arroz tienen un periodo en el cual se corta la vegetación existente para sembrar nuevamente; también, las actividades mineras y de reforestación influyen en el aumento o disminución de áreas de vegetación, esto

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

implica un cambio tanto en el tamaño de los parches de vegetación de los que estas actividades hacen parte, como del número de parches existentes.

Finalmente, en la ilustración 10 se muestra el comportamiento de la métrica Edge Density que permite la comparación entre paisajes de diferentes tamaños, que se conforman por la densidad y longitud de bordes por unidad de área, es decir, se mide en metros por hectárea, cuando el valor se acerca a 0 significa que no existe borde en el paisaje, es decir que el paisaje consta de un solo parche, ya que esta métrica es la suma de las longitudes de todos los segmentos de borde (Umass, 2021), para el caso de estudio se encuentra que la fluctuación de los valores coinciden mayoritariamente con los de la gráfica anterior, pero esta gráfica indica que los parches de vegetación encontrados en la zona de estudio corresponden a áreas grandes ya que los bordes suman valores superiores a un millón de metros por hectárea, corroborando que la fragmentación en la zona aferente a la ciénaga de Ayapel tiene un nivel bajo. Lo que puede explicarse ya que muchos terrenos están cubiertos por cultivos y pastizales, ocupando gran área del área de estudio, lo cual se puede relacionar con el NP que muestra un bajo número de parches de vegetación.

Figura 10. Gráfica Métrica Densidad de Borde



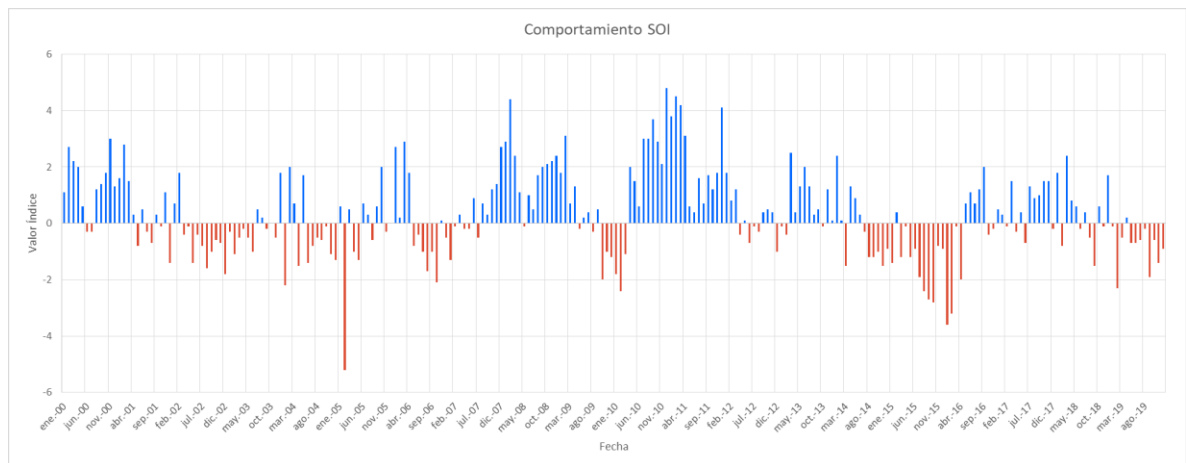
Fuente: Elaboración propia

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

6.2. Datos Hidroclimáticos

Para el análisis de estas variables, se tuvo en cuenta el Southern Oscillation Index (SOI por sus siglas en inglés), el cual permite relacionar los fenómenos climáticos como lo son El Niño (en color rojo) y La Niña (en color azul), con los cambios en la fragmentación de las coberturas y el flujo hídrico del complejo cenagoso, en la ilustración 11 se muestra el comportamiento de este índice para el periodo de tiempo seleccionado en los datos hidroclimáticos, donde los valores en azul indican un índice positivo, que hace referencia a que se presentan temporadas de lluvias; mientras que los valores en rojo son negativos y corresponden a escenarios de sequía.

Figura 11. *Comportamiento del SOI para el periodo de tiempo seleccionado*



Fuente: Elaboración propia

Como lo muestra la gráfica del comportamiento del SOI a través del periodo de tiempo seleccionado, se pueden identificar los eventos más representativos, los cuales corresponden a los años 2000, 2007 y 2010 que presentan fenómeno La Niña, donde el que causó más afectaciones sobre todo el territorio nacional fue el evento en 2010. Como consecuencia de este, se desbordaron algunos ríos y en el caso del río Cauca el nivel ascendió hasta la cota máxima y provocó la ruptura del dique carretable entre Colorao y Nechi – San Jacinto del Cauca, suceso que generó la inundación de la zona aferente a la ciénaga de Ayapel. Adicionalmente, en los años 2005 y 2015 se presentó un fenómeno El Niño, donde el que ocurrió en 2015 fue el que más impactos causó, ya que se produjeron fuertes sequías ya que este fenómeno se presentó desde el 2014 hasta el 2016.

El uso de los datos macroclimáticos correspondientes a SOI, permite establecer si en los fenómenos más representativos, es decir, para los años 2010 en el que se presenta un fenómeno La Niña de gran magnitud al igual que en el año 2015 un

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

fenómeno El Niño que afectó al país de manera significativa tuvo una influencia representativa sobre el flujo hídrico superficial en la ciénaga de Ayapel, que corresponde al área de estudio del presente proyecto. De manera que, se usó este índice para establecer los fenómenos más representativos y establecer si existe una correlación con los datos usados para el área de estudio.

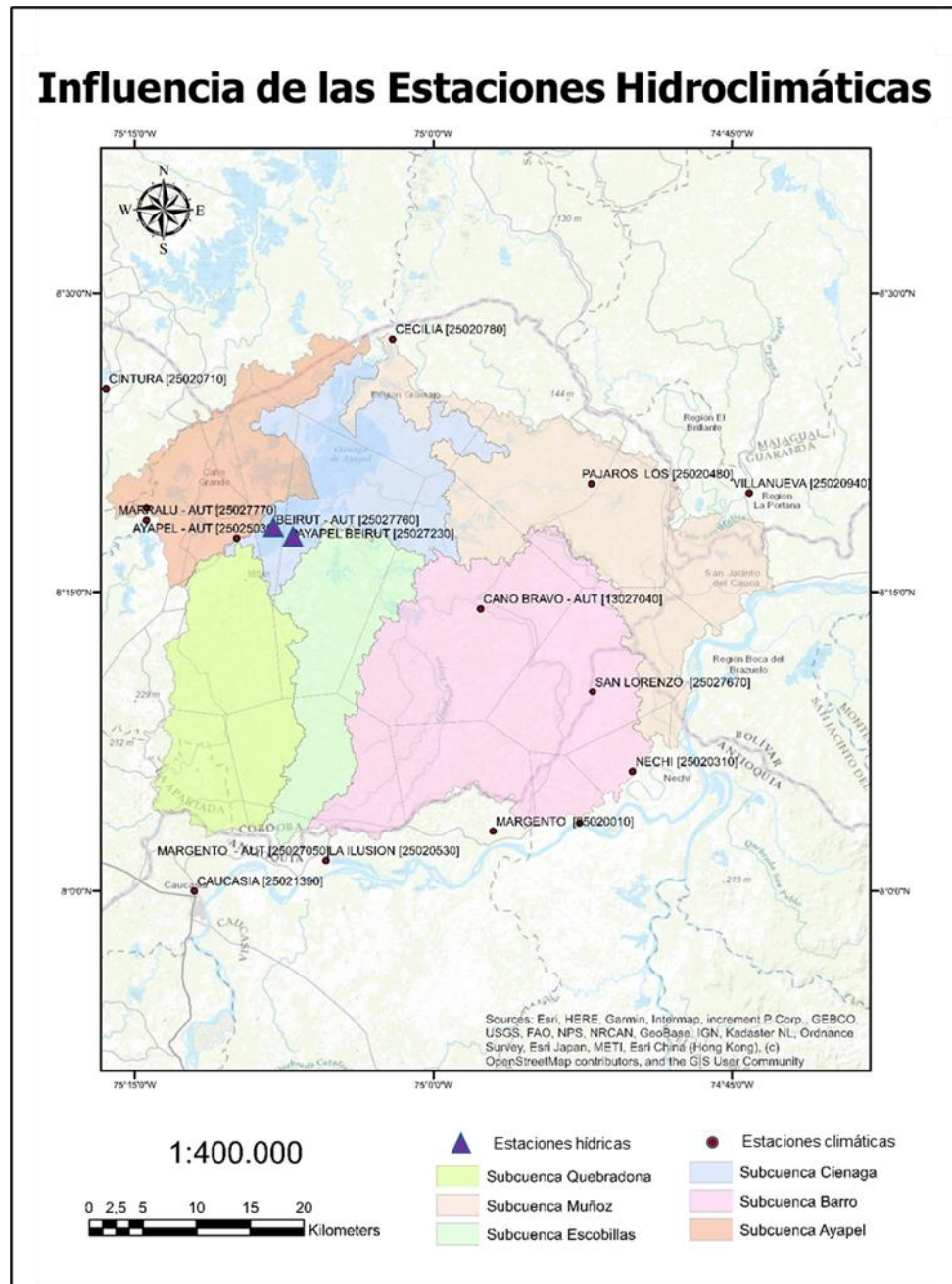
Se hizo uso de la base de datos (DHIME) del IDEAM para obtener los registros de datos hidroclimáticos para el periodo de tiempo 2000 – 2019, que corresponde al mismo periodo donde hay información disponible del satélite MODIS. Para elegir las estaciones hidroclimáticas usadas se hizo el método de polígonos de Thiessen y posteriormente una revisión de los datos disponibles en cada una de ellas para tomar las que con su registro abarcan la mayoría de periodo de estudio, y así asignarlas a cada una de las subcuencas como se muestra en la ilustración 12, obteniendo que para el estudio se hizo uso de los datos de 5 estaciones, de las cuales 4 son meteorológicas y 1 limnimétrica.

Teniendo en cuenta lo anterior y la disponibilidad de los datos de cada estación, se tomó para cada subcuenca una estación registrará datos de precipitación, ya que al momento de evaluar flujo hídrico esta variable es la más representativa, dado que la escorrentía depende principalmente de la precipitación (Instituto Geofísico, 2017). Adicionalmente, para la subcuenca Ciénaga en la cual se localiza el principal cuerpo de agua del complejo cenagoso, se tomaron los valores disponibles de nivel, evaporación, temperatura máxima y mínima.

Para la subcuenca Ayapel se hizo uso de la estación Cintura, para la subcuenca Barro se hizo uso de la estación Nechi, para la subcuenca Ciénaga se hizo uso de las estaciones Ayapel y Beirut, para las subcuencas Escobillas y Muñoz se hizo uso de la estación Ayapel.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Figura 12. Mapa influencia estaciones hidroclimáticas



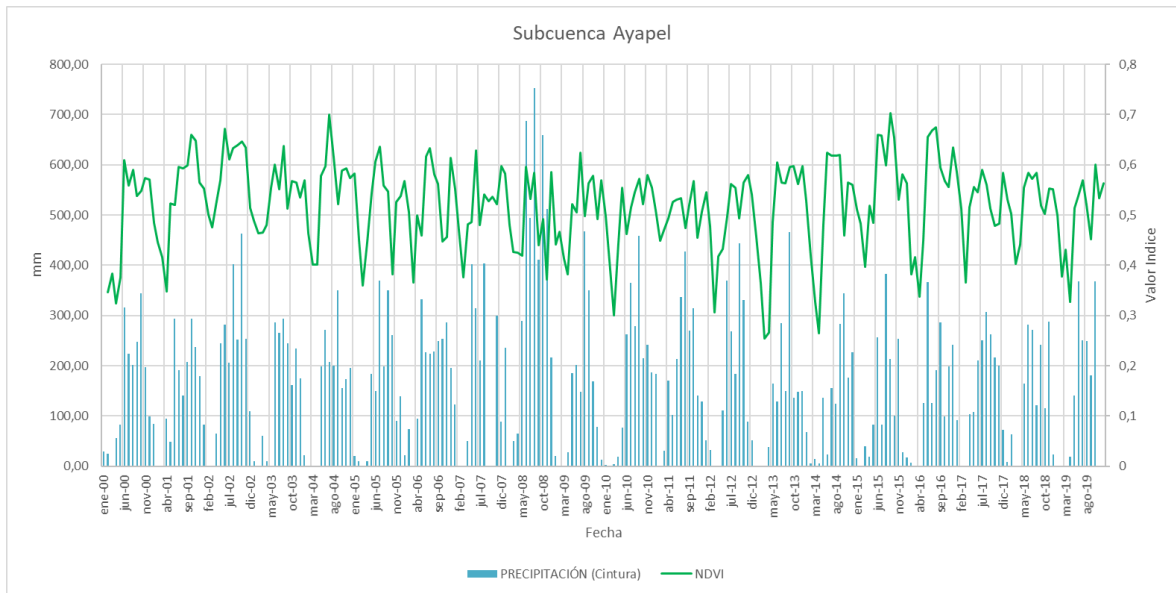
Fuente: Elaboración propia

Los datos hidroclimáticos fueron obtenidos a escala mensual para realizar un comparativo con el comportamiento del índice de vegetación NDVI para cada subcuenca, como se muestra en las ilustraciones de la 12 a 19.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

En la ilustración 13 se presenta el comportamiento de la precipitación mensual en la subcuenca Ayapel, donde evidenció que para el periodo comprendido entre julio a noviembre se presentan los mayores registros de esta variable, mientras que para los meses entre diciembre y abril se presentan eventos de lluvia de menor magnitud.

Figura 13. Comportamiento NDVI precipitación Subcuenca Ayapel



Fuente: Elaboración propia

En la subcuenca Ayapel se evidenció que mayoritariamente la variabilidad del índice de vegetación se asemeja con el comportamiento de la precipitación. Para el fenómeno El Niño más representativo de la gráfica 10 (2015) se evidencia que la disminución de la precipitación se presentó a finales de este año, lo que coincide con lo que muestran los índices, ya que para finales de 2015 e inicios del 2016 la vegetación disminuyó hasta uno de los valores más bajos registrados. Por otra parte, para el fenómeno La Niña más representativo (2010) se encuentran registros altos de precipitación. Aunque en ese año las lluvias se incrementaron en gran parte del territorio nacional, en esta subcuenca los valores de precipitación no registran los valores más altos. Además, los valores del índice de vegetación oscila entre el 20% y 70% de cobertura vegetal en la subcuenca, coincidiendo con los periodos de registro de la precipitación.

Para el análisis y comparación de datos se hace uso del coeficiente de correlación de spearman, el cual puede tomar un valor entre -1 y 1, teniendo en cuenta que, 1 corresponde a una perfecta asociación positiva, -1 corresponde a una perfecta asociación negativa, 0 corresponde a que no existe asociación alguna entre los datos, y el nivel de significancia corresponde a 0.05.

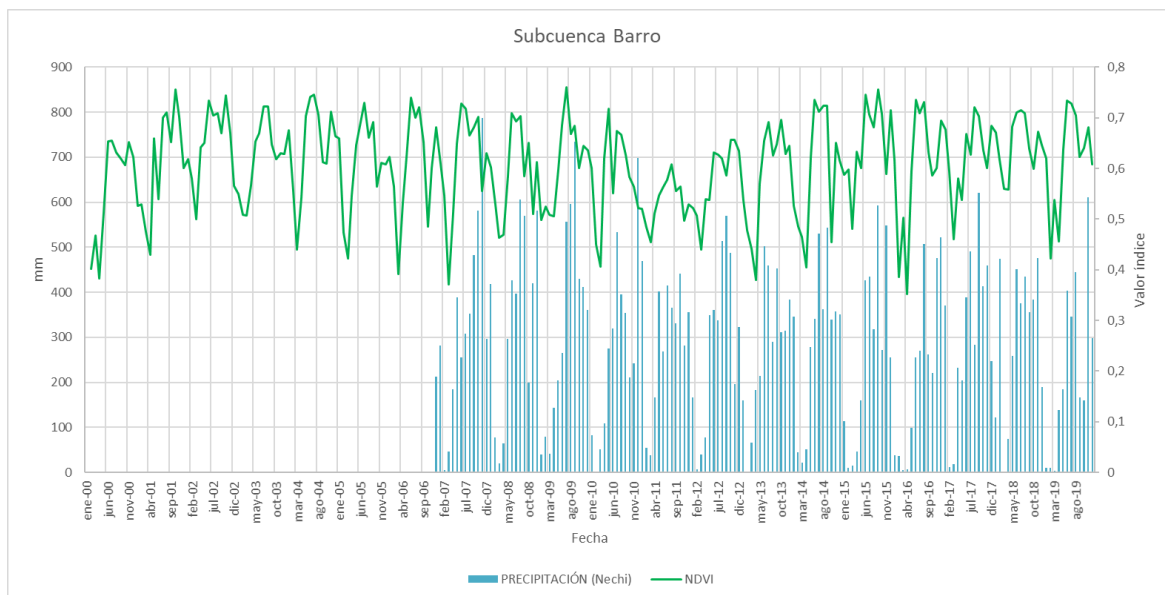
INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Por otra parte, los índices de vegetación en este momento del registro histórico muestran valores oscilantes entre el 50% y 60% de cobertura vegetal. El coeficiente de correlación de spearman (-0.0072) muestra una relación muy cercana a cero por debajo del nivel de significancia, es decir, no es significativo y por tanto el valor indica una mala correlación, para las variables precipitación y SOI indicando que estas dos variables no presentan una correlación.

El cálculo de la correlación de Spearman, para esta subcuenca arrojó un valor de 0.4934 lo que corresponde a una correlación positiva, ya que supera el valor de significancia para este coeficiente y además, es una correlación regular al acercarse a 0.5, indicando que los valores de precipitación y el índice de vegetación NDVI tiene una correlación directa, es decir que al aumentar la precipitación también aumentan los valores del NDVI, aunque la correlación no es evidente en la gráfica para todos los momentos evaluados. El coeficiente de correlación de Spearman (-0.1744) supera el valor de significancia y su valor indica una correlación regular ya que su valor es muy cercano a 0, de manera que existe una relación negativa entre el NDVI y el índice SOI, ya que su valor es muy cercano a 0 se puede decir que no existe una correlación significativa entre estas variables, es decir no es significativa la correlación.

En la ilustración 14 se muestra el comportamiento de la variable climática precipitación y los valores obtenidos para el índice de vegetación NDVI.

Figura 14. Comportamiento NDVI precipitación Subcuenca Barro



Fuente: Elaboración propia

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Debido a la disponibilidad de datos en la base DHIME de IDEAM en cuanto a precipitación, para la subcuenca Barro la estación Nechí cuenta con un registro a partir del 2007, por lo que en esta subcuenca solo se pueden relacionar los datos a partir de esta fecha. Para estos datos, el índice de correlación de spearman entre la variable precipitación y el NDVI arrojó un valor de 0.0559, mostrando que la correlación tiende a 0, es decir, no es significativo el valor de correlación, así mismo la relación entre estas dos variables es mala, lo que puede significar que no existe una relación importante entre las variables.

Para el fenómeno El Niño más representativo (2015) se encuentra que los valores de precipitación son bajos en el primer semestre del año y que luego se incrementa, lo que corresponde con el comportamiento de los índices de vegetación; al final del año y comienzos del 2016 se evidencia que los índices presentan uno de los valores más bajos, al igual que la precipitación, lo cual sugiere que las afectaciones sobre esta cuenca por este fenómeno se evidencian al final de la ocurrencia de este fenómeno. Por otra parte, en la presencia del fenómeno La Niña más representativo (2010) se encuentra uno de los mayores registros de precipitación, aunque no uno de los mayores porcentajes de cobertura vegetal.

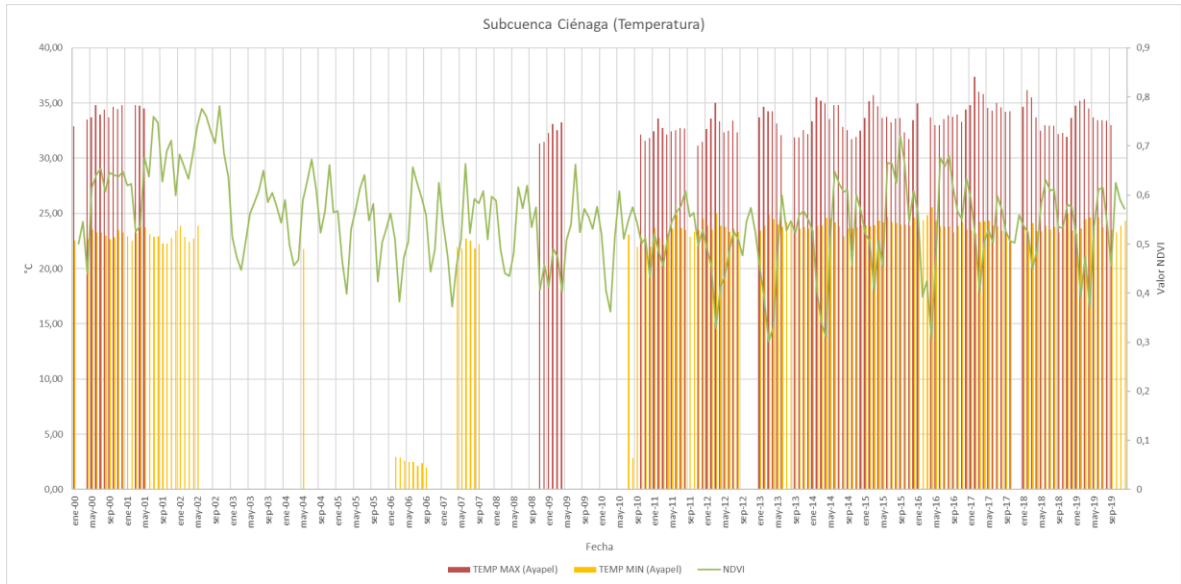
Entre el año 2011 y 2012 se muestra que aunque los valores de precipitación no disminuyeron, el porcentaje de cobertura sí; esto principalmente se debe a la inundación que provocó la ruptura del dique en el río Cauca y que duró aproximadamente 3 años luego del fenómeno La Niña. Fuera de este evento, los índices de vegetación y el comportamiento de la precipitación coinciden en la mayoría de fluctuaciones. Además, la correlación de spearman arroja un valor de -0.2307, este valor supera el nivel de significancia, sin embargo no representa una correlación buena, por el contrario la relación entre estas variables es regular, indicando relación negativa entre el SOI y el NDVI, esto corresponde a que cuando uno aumenta el otro disminuye.

El valor de correlación de spearman arrojó valor de 0.5652, este valor supera el nivel de significancia y puede decirse que es una correlación buena entre las variables, ya que el valor supera el valor de 0.5, así mismo, indica una correlación positiva entre la precipitación y el NDVI, lo que corresponde a que cuando un valor aumenta el otro también y cuando uno disminuye el otro disminuye proporcionalmente aunque no siempre se evidencia este comportamiento.

En las gráficas 15, 16 y 17 se muestra el comportamiento de las variables climáticas precipitación, evaporación, temperatura máxima y temperatura mínima, la variable hídrica nivel y el valor obtenido para el índice de vegetación NDVI en la subcuenca Ciénaga, donde se ubica el cuerpo de agua del complejo cenagoso Ayapel.

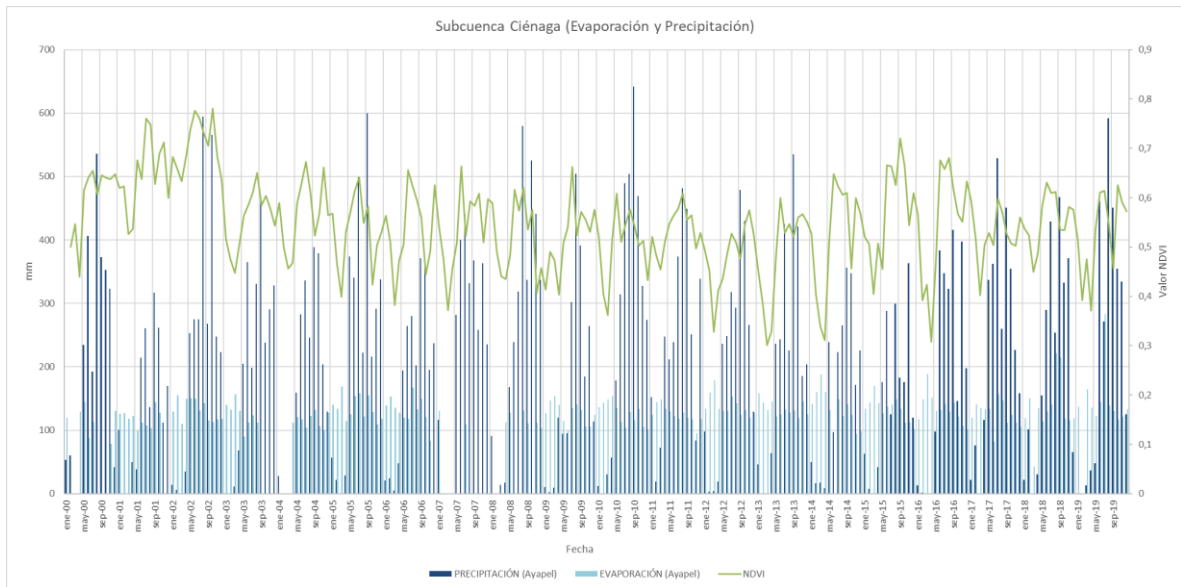
INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Figura 15. Comportamiento variable Temperatura Subcuenca Ciénaga



Fuente: Elaboración propia

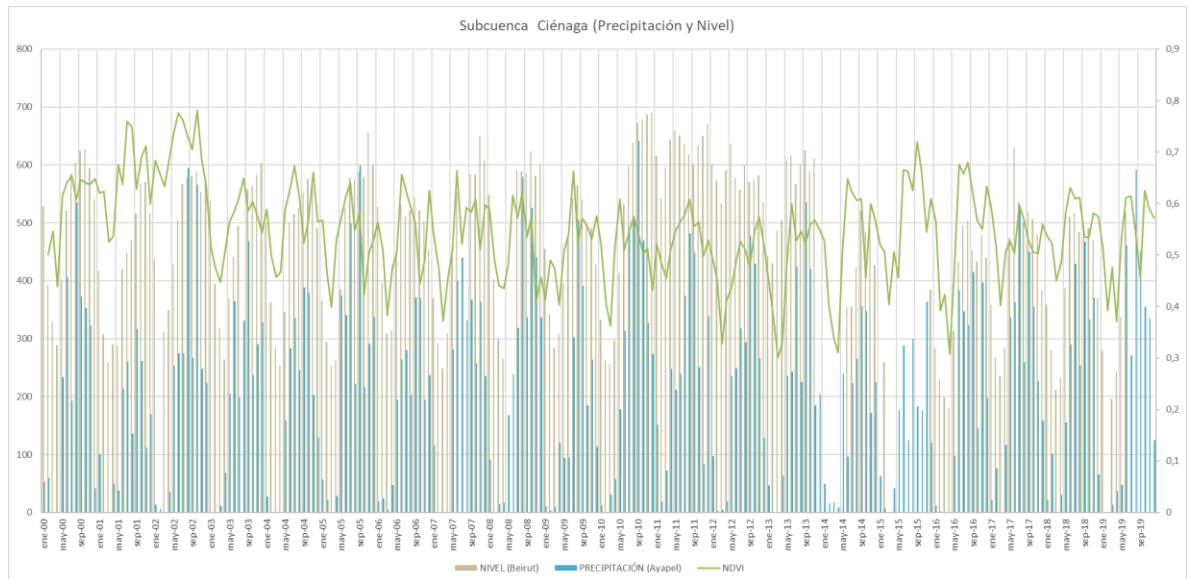
Figura 16. Comportamiento variables Evaporación y Precipitación Subcuenca Ciénaga



Fuente: Elaboración propia

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Figura 17. Comportamiento variables Precipitación y Nivel Subcuenca Ciénaga



Fuente: Elaboración propia

En el cuerpo de agua es imperativo medir más variables además de la precipitación, ya que pueden influir en la disminución del área correspondiente al cuerpo de agua. Por tal motivo se hizo uso de datos de temperatura, nivel, evaporación y precipitación. Como en las subcuencas anteriores el comportamiento de la precipitación coincide con las fluctuaciones de los índices de vegetación, pues como lo indica el coeficiente de correlación de spearman (0.5140) las variables precipitación y valor de NDVI mantienen una correlación positiva, es decir directa, ya que el valor obtenido en el coeficiente de correlación supera el nivel de significancia y como este valor supera el 0.5, puede afirmarse que corresponde a una correlación buena entre las variables evaluadas. Sin embargo, el comportamiento del promedio de la temperatura mínima no coincide con estas fluctuaciones ya que se mantiene casi constante durante todo el periodo de estudio, al igual que el promedio de la temperatura máxima mensual, el coeficiente de correlación de spearman para estas variables con los valores de NDVI corresponde a 0.1418, valor que supera el nivel de significancia pero, muestra una tendencia hacia 0, lo que se puede interpretar como una correlación mala entre las variables, para la temperatura máxima, indicando que la correlación es directa, pero no en la magnitud en que se relaciona la precipitación con el NDVI; de la misma manera, la correlación de la temperatura mínima con el NDVI corresponde a valores de 0.0604 (spearman) que muestra una correlación positiva pero con un valor cercano a 0, por este motivo la relación no se evidencia en la gráfica y muestra un valor no significativo de la correlación.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

En cuanto al nivel, se evidencia que este incrementa en los periodos en los que la precipitación también es mayor, coincidiendo con el resultado de coeficiente de spearman (0.3120) que muestra una correlación directa o positiva, es decir, que ambas variables aumentan o disminuyen proporcionalmente en algunos de los momentos comparados, ya que el valor obtenido es superior al nivel de significancia, se puede interpretar como una correlación regular, pero significativa para estas variables. Por otra parte, como lo indica la correlación de spearman (0.1775) para los valores de evaporación, que indican que existe una correlación positiva pero es baja y no evidenciable en la gráfica, el valor obtenido es cercano a 0 y supera el nivel de significancia del coeficiente, por tanto, se puede interpretar como una correlación mala para las variables.

Para el fenómeno El Niño más representativo (2015) se muestra que la precipitación disminuye considerablemente, por lo que el nivel y la cobertura vegetal también, mientras que el promedio de temperaturas se mantiene constante y la evaporación aumenta. Por otra parte, en el fenómeno La Niña más representativo (2010) se presentan los mayores valores de precipitación y por tanto los mayores valores de nivel, aunque los promedios de temperaturas muestran un ligero incremento y la evaporación no disminuye sino que se mantiene en unas fluctuaciones constantes, al igual que los índices de vegetación.

Los valores del SOI al relacionarlos con las demás variables indican según el coeficiente de spearman que, con el NDVI (spearman -0.1823) tiene una relación negativa, es decir inversamente proporcional, con un valor muy cercano a 0 y superando el nivel de significancia, lo que puede interpretarse como una mala correlación; con la precipitación (spearman 0.0120) una relación que tiende a 0, es decir, que la relación tiende a ser nula, ya que supera el valor de significancia pero se encuentra muy cercano al 0, interpretándose como una correlación mala; con el nivel (spearman 0.2569) una relación positiva, es decir directamente proporcional, ya que el valor obtenido supera el nivel de significancia, pero como su valor no supera el 0.5, puede decirse que es una correlación regular; con la evaporación (spearman -0.0082) una relación que tiende a ser nula ya que sus valores tienden a 0 y se encuentra por debajo del nivel de significancia. Por otra parte, la relación con la temperatura es negativa, como los indican el índice de correlación de spearman (temperatura máxima -0.1199 y temperatura mínima -0.2624), indicando que son inversamente proporcionales ya que al aumentar una, la otra disminuye y viceversa, estos valores superan el nivel de significancia, pero su tendencia es hacia 0, por lo que puede interpretarse como una correlación regular o mala.

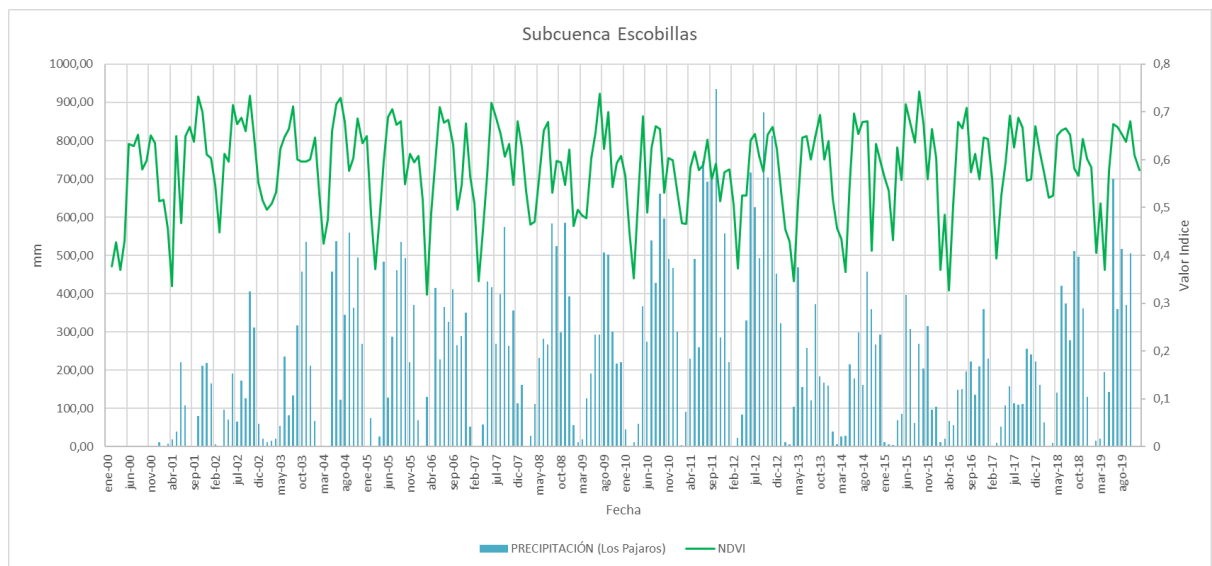
Adicionalmente, el coeficiente de correlación de spearman (0.6739) muestra que la precipitación es directamente proporcional con el nivel, ya que el valor de correlación es superior a 0.6, es decir, que cuando uno aumenta o disminuye el otro

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

también, valor que corresponde a una correlación buena, es decir significativa; que la precipitación y la evaporación son inversamente proporcionales ya que el valor de correlación spearman (-0.2142) muestran un valor negativo, es decir que al aumentar una variable la otra disminuye y viceversa, al igual que ocurre con la temperatura, pues la correlación muestra valores negativos, para temperatura máxima obtuvo un valor de -0.4626, y para la temperatura mínima se obtuvo -0.1906 respectivamente, de manera que estos valores pueden interpretarse como correlación regular a mala para la temperatura mínima y regular para la temperatura máxima, ya que su valor es muy cercano a 0.5.

En cuanto al nivel, el coeficiente de spearman frente a la evaporación arrojó valor de -0.1791, con la temperatura máxima y mínima se obtuvieron coeficientes con valor de -0.5627(spearman) y -0.1693 (spearman) respectivamente; esto muestra que la relación entre estas variables es negativa, es decir, son inversamente proporcionales, pero este comportamiento es tan bajo que no se evidencia en las gráficas. Por otra parte, la evaporación según el coeficiente de correlación de spearman muestra una relación positiva con ambas variables de temperatura (máxima 0.3096 y mínima 0.1422).

Figura 18. Comportamiento NDVI precipitación Subcuenca Escobillas



Fuente: Elaboración propia

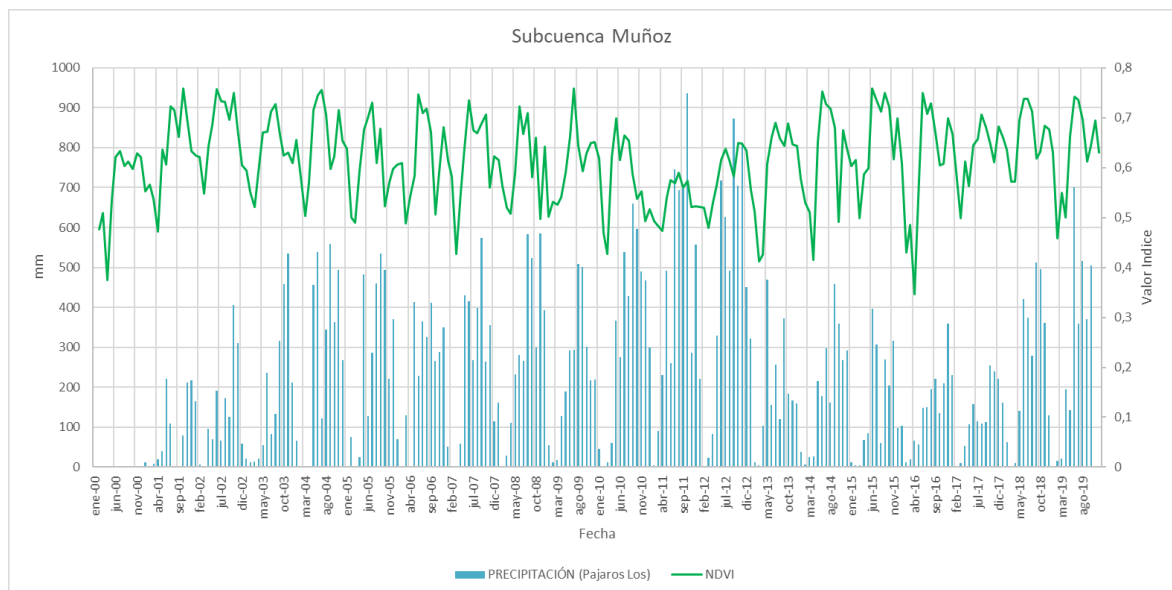
Para la subcuenca Escobillas se encuentra que los registros del año 2000 para precipitación muestran un valor de 0, como se muestra en la ilustración 18, y que para los demás años, los periodos de precipitación coinciden con los de las subcuencas anteriores. Así mismo, los valores de cobertura vegetal corresponden a una relación positiva de acuerdo con los coeficientes de correlación de spearman

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

(0.4468), es decir que ambas aumentan o disminuyen proporcionalmente con esta variable, el valor obtenido en la correlación muestra que corresponde a significativa y regular ya que su valor es muy cercano a 0.5, donde se muestra que para el fenómeno El Niño más representativo (2015) la precipitación disminuyó considerablemente, así como los índices de vegetación muestran unos de los valores más bajos. Mientras que en el fenómeno La Niña más representativo (2010) se encuentra que aunque los valores de precipitación no registran sus mayores valores, es uno de los más altos, al igual que en los índices de vegetación donde se muestra uno de los valores más altos. Sin embargo, un dato relevante es que en el 2015 la cobertura vegetal muestra un valor de más del 70% cuando se presentaba un fenómeno El Niño en el periodo donde la precipitación aumenta.

Por otra parte, el índice SOI de acuerdo con el coeficiente de correlación de spearman (-0.1717) se relaciona negativamente con el NDVI, mientras que con la precipitación su relación es casi nula ya que el coeficiente de spearman corresponde a -0.03347, mostrando una tendencia hacia 0, es decir que aunque supera el valor de nivel de significancia, la correlación entre las variables es mala.

Figura 19. Comportamiento NDVI precipitación Subcuenca Muñoz



Fuente: Elaboración propia

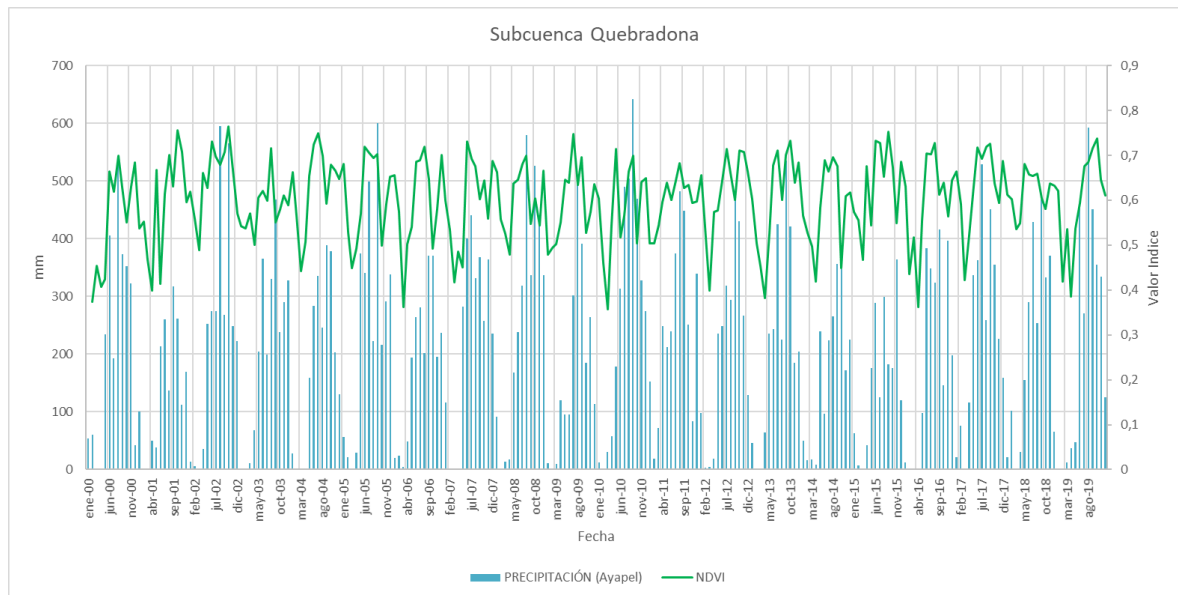
De igual manera que en la subcuenca Barro, en la subcuenca Muñoz se evidencia que posteriormente al fenómeno La Niña más representativo (2010) en el periodo de tiempo correspondiente a la inundación se muestra un decremento en el porcentaje de cobertura vegetal, pero que luego continua su comportamiento general correspondiendo a una relación positiva de acuerdo con el coeficiente de

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

correlación de spearman (0.3541) con la variable precipitación y sus debidos periodos de incremento y decremento, como se muestra en la ilustración 19, el valor de correlación indica que supera el nivel de significancia y que es una correlación regular. Por otra parte, en el fenómeno El Niño más representativo (2015) la precipitación no muestra valores demasiado bajos con respecto al resto de registros y los valores de los índices de vegetación tampoco son bajos, por el contrario presentan uno de los valores más altos.

Adicionalmente, en el 2011 se registran los valores más altos de precipitación lo que contribuye con la disminución de los valores de cobertura vegetal, ya que en esta época fue en la que se presentó la inundación por la ruptura del dique y que corresponde con el fenómeno La Niña de 2010. El índice SOI de acuerdo con el coeficiente de correlación de spearman (-0.2608) se relacionan negativamente con el NDVI, mientras que con la precipitación su relación es casi nula ya que el coeficiente de spearman corresponde a -0.0354, mostrando una tendencia hacia 0. Aunque estos valores superan el nivel de significancia, la correlación a la que corresponde es mala.

Figura 20. Comportamiento NDVI precipitación Subcuenca Quebradona



Fuente: Elaboración propia

Por último, en la ilustración 20 se observa que para la subcuenca Quebradona los registros de precipitación corresponden a los periodos de las anteriores subcuencas y que los índices de vegetación tienen una relación directa positiva de acuerdo con el coeficientes de correlación de spearman (0.5483) con esta variable, indicando una significativa y buena correlación. Sin embargo, para el fenómeno La Niña más

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

representativo (2010) aunque se registra el mayor valor de precipitación, no se registra el mayor valor de cobertura vegetal, por el contrario se mantiene su fluctuación general, y para el fenómeno El Niño más representativo (2015) los valores de precipitación son bajos al igual que los índices de vegetación, pero no corresponden a los valores más bajos.

De acuerdo a la descripción del comportamiento de cada una de las subcuencas anteriormente realizado, se puede analizar que los valores de precipitación son directamente proporcionales a la cobertura vegetal, donde se presentan dos periodos principalmente que corresponden a un aumento entre julio a noviembre y a un decremento entre diciembre a abril. Además, que la temperatura no muestra una correlación significativa, que el nivel también es directamente proporcional a la precipitación y cobertura de vegetal, pero que aunque la evaporación presenta una correlación positiva es muy baja para evidenciarse en las gráficas. Adicionalmente, los fenómenos particulares como lo son El Niño y La Niña que tienen diferentes intensidades afectan con baja o nula influencia el comportamiento de estas variables. Sin embargo, si es posible identificar estas anomalías en sus comportamientos. De acuerdo con los valores obtenidos en el coeficiente de spearman (-0.1215) para la relación del SOI con el NDVI, la relación es inversamente proporcional o negativa, mientras que la relación entre el SOI y la precipitación muestra un valor de correlación de 0.0120, en ambos casos tendiendo a 0, es decir, a ser nula la correlación.

6.3. Superficie del Espejo de Agua de la Ciénaga de Ayapel

La dinámica hídrica anual se caracterizó de acuerdo a la variabilidad interanual, si se encuentra una variación interanual menor al 50% se caracteriza por la presencia de agua con poca o ninguna variación interanual y una variación intraanual constante. De manera que al calcular la media del porcentaje anual del agua, se obtienen los rangos para identificar los diferentes tipos de superficie, como se muestra en la ilustración 21.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Figura 21. Clasificación Superficies base de datos GLAD de acuerdo con el color del mapa

Out of all clear water and land observations, if either water or land is flagged ≤ 3 times and in only $\leq 12.5\%$ of the observations, these instances are removed.							Data operations
Seasonally weight to create annual water percent time series							
3 year mean moving window							
Calculate range (interannual variability) of annual water percent							
Interannual variability $< 50\%$			Interannual variability $\geq 50\%$				Data thresholds
Calculate mean of annual percent water			Count change segments in alternating directions between local maxima and minima of annual percent water with amplitude $\geq 30\%$				
Mean $\leq 10\%$ water, Interannual variability $< 33\%$	Mean $\geq 90\%$ water, Interannual variability $< 33\%$	10% $<$ Mean $<$ 90% AND/OR Interannual variability $\geq 33\%$	1 transition		2 transitions		≥ 3 transitions
Land	Permanent water	Stable seasonal	Decreasing	Increasing	Decreasing then increasing	Increasing then decreasing	High frequency
			Loss	Gain	Dry period	Wet period	
			Monotonic		Multiple transitions		
Stable			All change types				Class aggregations
Permanent			All dynamic types				

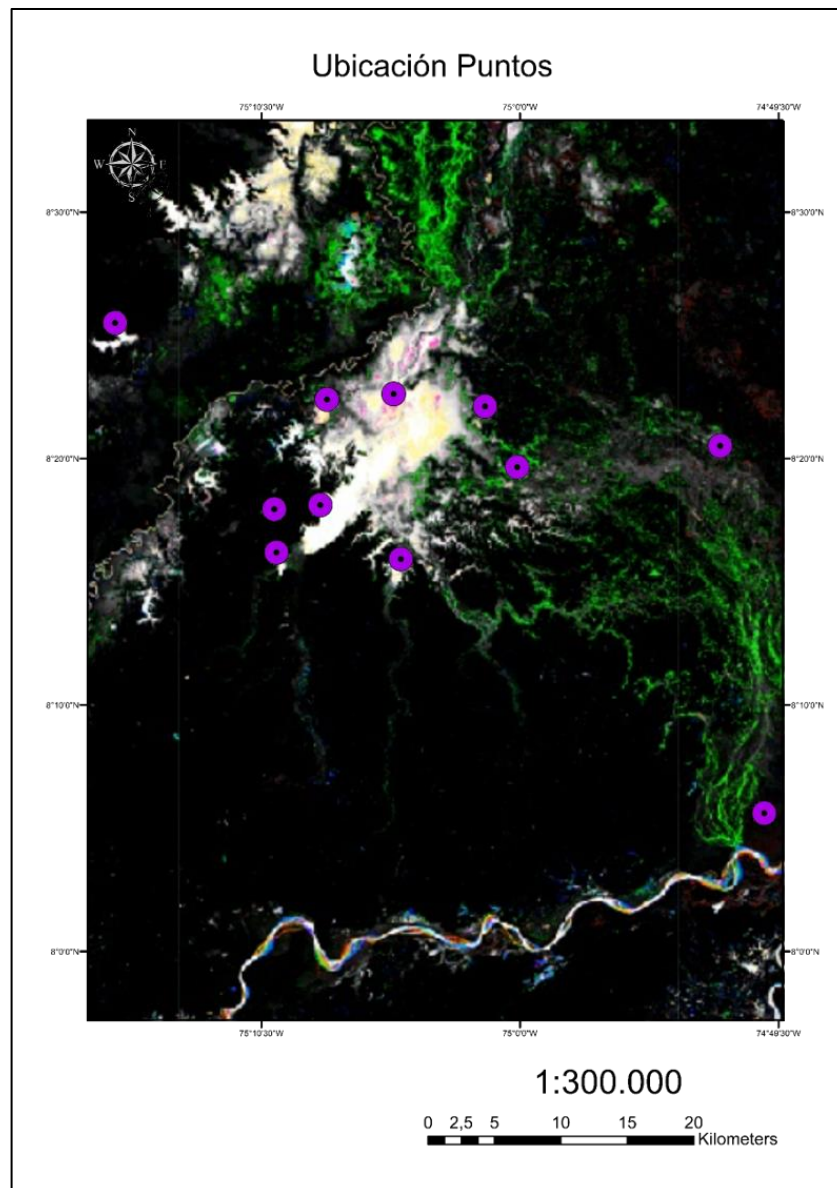
Fuente: Pickens, A., Hansen, M., Hancher, M., Stehman, S., Tyukavina, A., Potapov, P., Marroquin, B. & Sherani, Z. (2020). Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*, 234(15). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720301620?via%3Dihub>

El mapeo de clase dinámica se representa mediante los cambios en la serie de tiempo, ilustrando en 3 momentos con las bandas Red Green Blue, el valor de la banda roja se tomó al comienzo del periodo, el valor de la banda azul se tomó al final del periodo y el valor de la banda verde fue medida durante todo el periodo, permitiendo así identificar si el cambio fue comparativamente temprano o tardío en el periodo de estudio.

De acuerdo a la descripción anterior de las características que presenta la herramienta, se hizo la selección de puntos estratégicos para cada subcuenca que aporta flujo de agua superficial a la ciénaga de Ayapel (ilustración 2), como se muestra en la ilustración 21, se tomaron los puntos identificados como pérdida (decreasing) en una transición, pues si se toma en cuenta los puntos RGB, los valores mostrados en color naranja representan que en R, es decir al inicio del periodo de estudio existe un 100% de agua, G un término medio y en B se puede encontrar que el porcentaje de agua ha disminuido hasta valores cercanos a 0, como se puede mostrar en la ilustración 22.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Figura 22. *Puntos Estratégicos base GLAD para la zona de estudio*

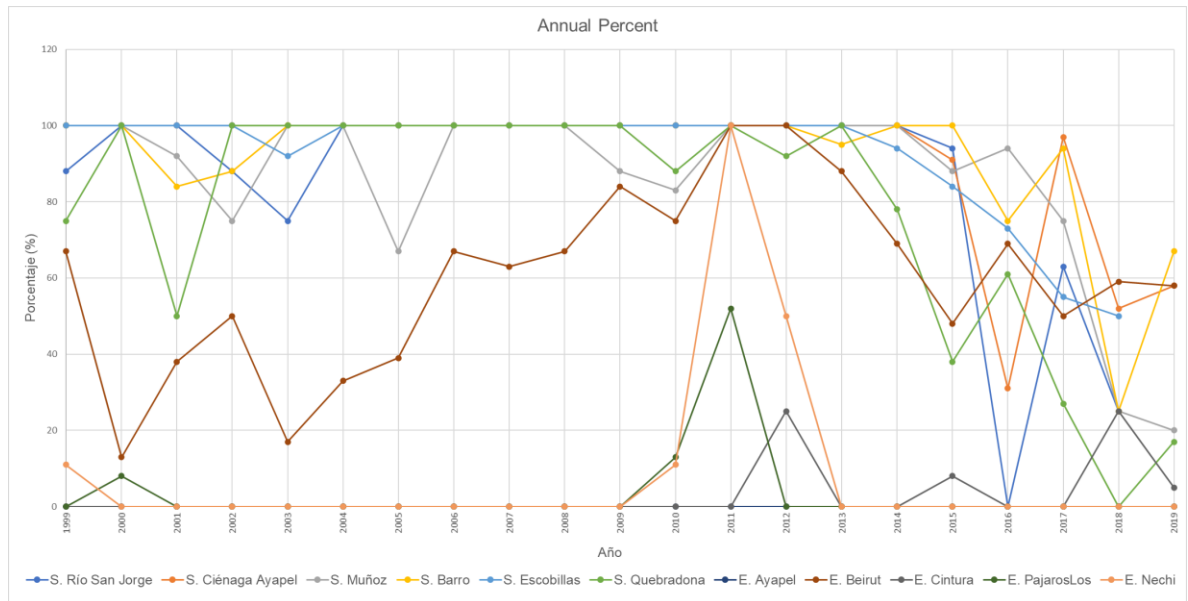


Fuente: Elaboración propia

Se crearon capas de porcentaje de agua mensual, estacional y anual, posteriormente se crearon mapas de la dinámica interanual para el periodo 1999-2018 durante todos los años, así como para cada conjunto de tres meses consecutivos. Para los puntos seleccionados en la ciénaga de Ayapel, se comparan los datos en los 3 tipos de grupos que el aplicativo permite descargar, los cuales corresponden a los mencionados anteriormente.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Figura 23. Gráfica Porcentaje Anual GLAD

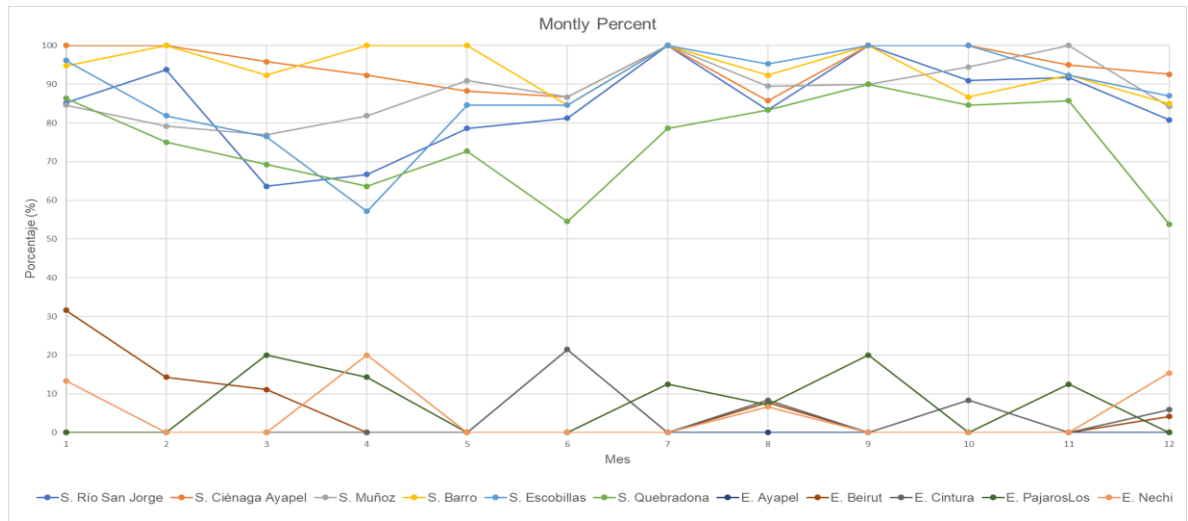


Fuente: Elaboración propia

La gráfica interanual permite identificar en qué año ocurrieron fenómenos meteorológicos que pueden generar cambios en el porcentaje de agua. En la ilustración 24 se muestra que el 2016 hubo una pérdida significativa de agua asociada principalmente al fenómeno El Niño que ocurrió a principios de este año, ocasionado por las altas temperaturas que se presentaron en el Pacífico Ecuatorial Central y Oriental, que disminuyeron y se normalizaron hacia mitades de año, este fenómeno también afectó los patrones de temperatura locales, también puede atribuirse a que en esta época de sequía se usaron las áreas inundables de la ciénaga para agricultura y ganadería zonal.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

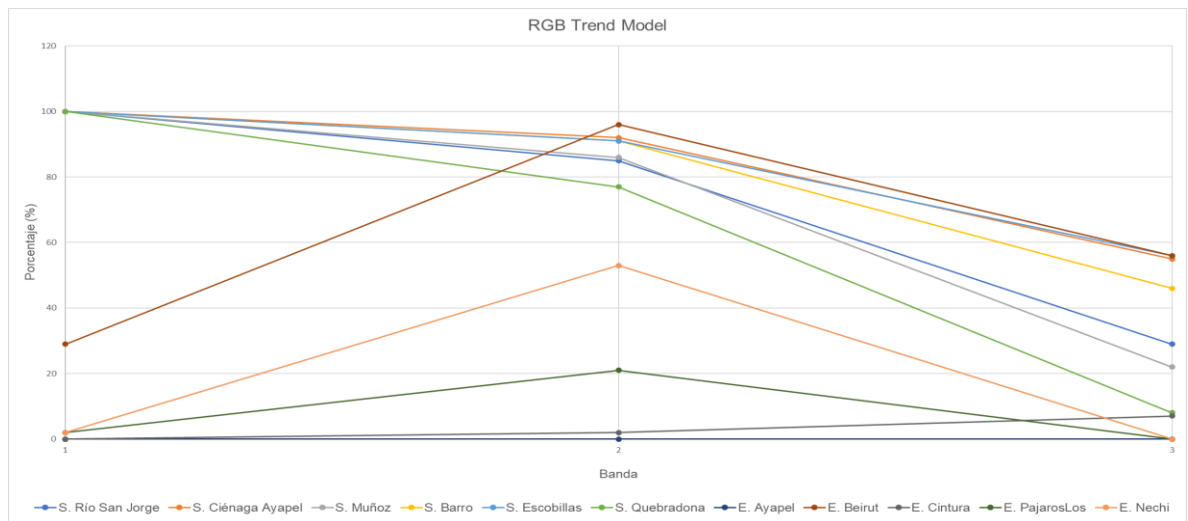
Figura 24. Gráfica Porcentaje Mensual GLAD



Fuente: Elaboración propia

Los porcentajes mensuales permiten establecer los cambios intranuales, es decir, las veces que transita entre la tierra y el agua. De esta manera se pueden establecer los periodos secos y lluviosos de la zona; de acuerdo con la ilustración 22, se puede estimar que los periodos secos principalmente se presentan en el mes 6 y en el mes 25, cuando se presenta menor porcentaje de agua.

Figura 25. Gráfica Modelo RGB



Fuente: Elaboración propia

El modelo RGB permite hacer un contexto de la evolución del área de estudio con respecto al porcentaje de agua que contiene, de acuerdo con la ilustración 25 en la ciénaga de Ayapel en 1999 se contaba con el 100% de agua y en el 2019 el nivel

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

del agua disminuyó aproximadamente 50%. Adicionalmente, el punto intermedio muestra que los cambios significativos se presentan en los últimos años.

Lo anterior puede significar que en la ciénaga de Ayapel en los últimos 20 años se ha producido una disminución del cuerpo de agua, lo que implica que la ciénaga ha perdido parte de su área, la cual puede ser aprovechada para algún tipo de actividad económica.

Adicionalmente, se puede mencionar que el flujo hídrico en la ciénaga se ve afectado por los principales afluentes de este cuerpo de agua, como lo son el río Cauca, Nechi y San Jorge, los niveles de estos cambian en función de las actividades que se desarrollan en sus alrededores, como proyecto hidroeléctrico Hidroituango que al modificar el caudal del río Cauca también afecta el nivel de la ciénaga, o la ruptura del dique que también genera un cambio en el nivel del río y por ende el nivel de la ciénaga de Ayapel (Vélez-Macías, 2018).

6.4. Articulación de las actividades económicas con la Zona de Estudio

Las actividades económicas son importantes para el desarrollo de las comunidades aledañas a la ciénaga, por esa razón es fundamental identificarlas y relacionarlas con los datos hidroclimáticos. Esta identificación se realizó mediante revisión bibliográfica de sondeos presenciales para otros trabajos y la consulta de las bases de datos abiertos del IGAC que muestra las áreas destinadas para las actividades económicas. Además, se tienen en cuenta las áreas que cuentan con presencia de minería ilegal, invasión agrícola y ganadera.

En primera instancia se tuvo en cuenta la actividad minera que se desarrolla en la zona. En la ilustración 26, y de acuerdo con los archivos del ANLA, es posible apreciar los títulos mineros que se han otorgado cerca del área aferente a la ciénaga de Ayapel. Con este mapa es posible inferir que la autoridad ambiental no ha otorgado títulos mineros en las zonas del área de estudio.

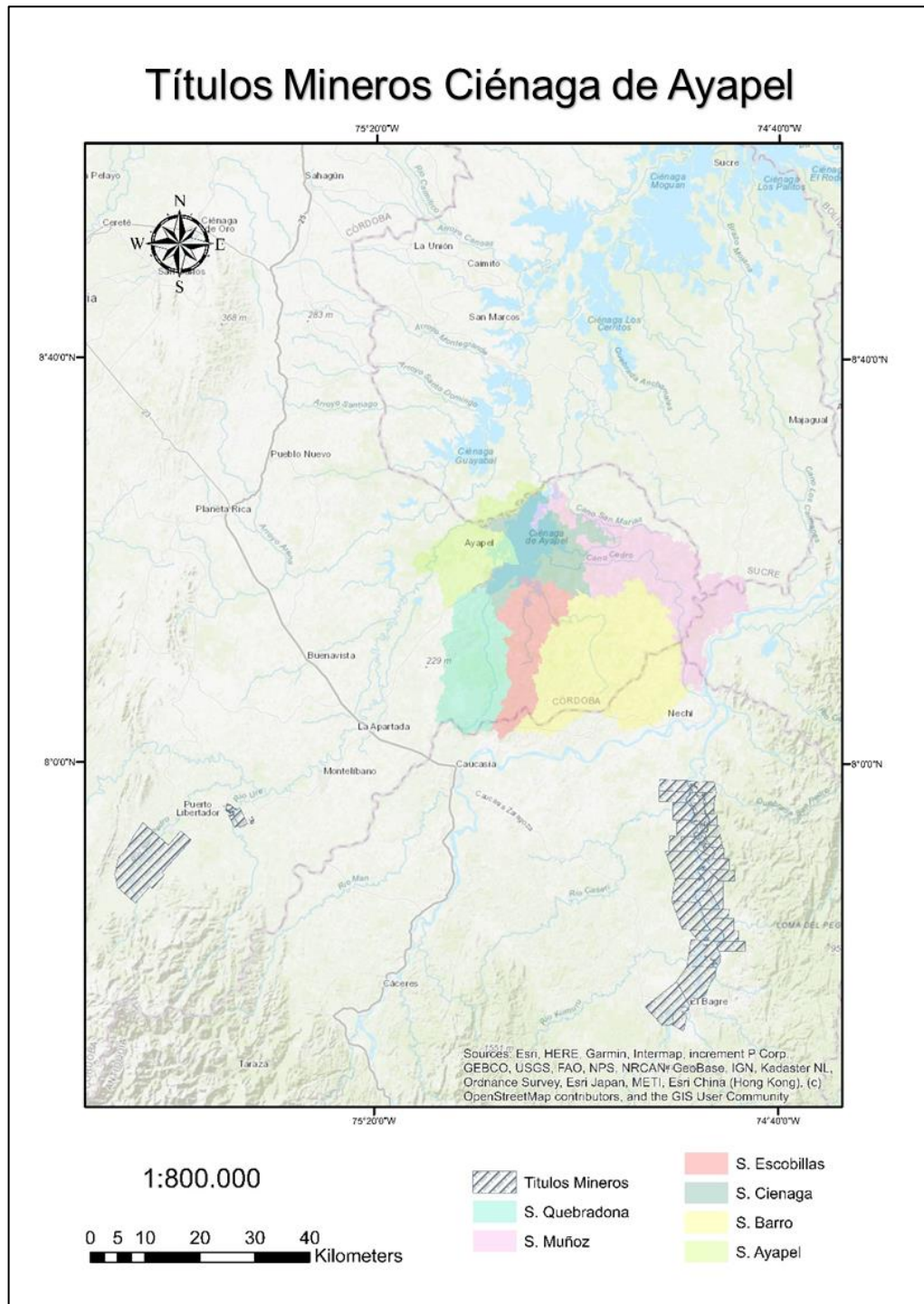
En la ilustración 27 se muestran las zonas que producen mayor oro a nivel nacional, como se puede apreciar en el sur del departamento de Córdoba se encuentra una de estas zonas productoras, siendo una zona cercana al área de estudio. Sin embargo, también se muestra que allí existe presencia de grupos al margen de la ley y bandas criminales.

En la ciénaga de Ayapel la explotación de oro no tiene títulos mineros y la mayoría son explotaciones ilegales lideradas por grupos al margen de la ley, en Córdoba la explotación minera va desde la ciénaga de Ayapel hasta traspasar las fronteras del río Nechí, en esta zona la presencia de organismos que vigilen y controlen las

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

explotaciones es muy baja y por tanto los daños ambientales causados son de una gran magnitud, principalmente el deterioro del ecosistema se ve reflejado en la contaminación hídrica que sufre el complejo cenagoso, ya que los residuos de mercurio van directamente a los cuerpos de agua, de los cuales las personas se abastecen. Actualmente los problemas de salud en las poblaciones aledañas son muy graves, no solamente como consecuencia del alto contenido de mercurio en el agua sino también por el material particulado generado al hacer remoción de masas para poder extraer el oro del suelo, causando infecciones respiratorias agudas; también los niveles de ruido ambiental debido al movimiento de la maquinaria son altos, afectando la salud de la población. A esto se le suma que la minería en Córdoba mayoritariamente es artesanal y las implicaciones sobre la salud de las personas es aún mayor (Utopía la Palabra, 2013; Restrepo Jiménez, et al., 2017).

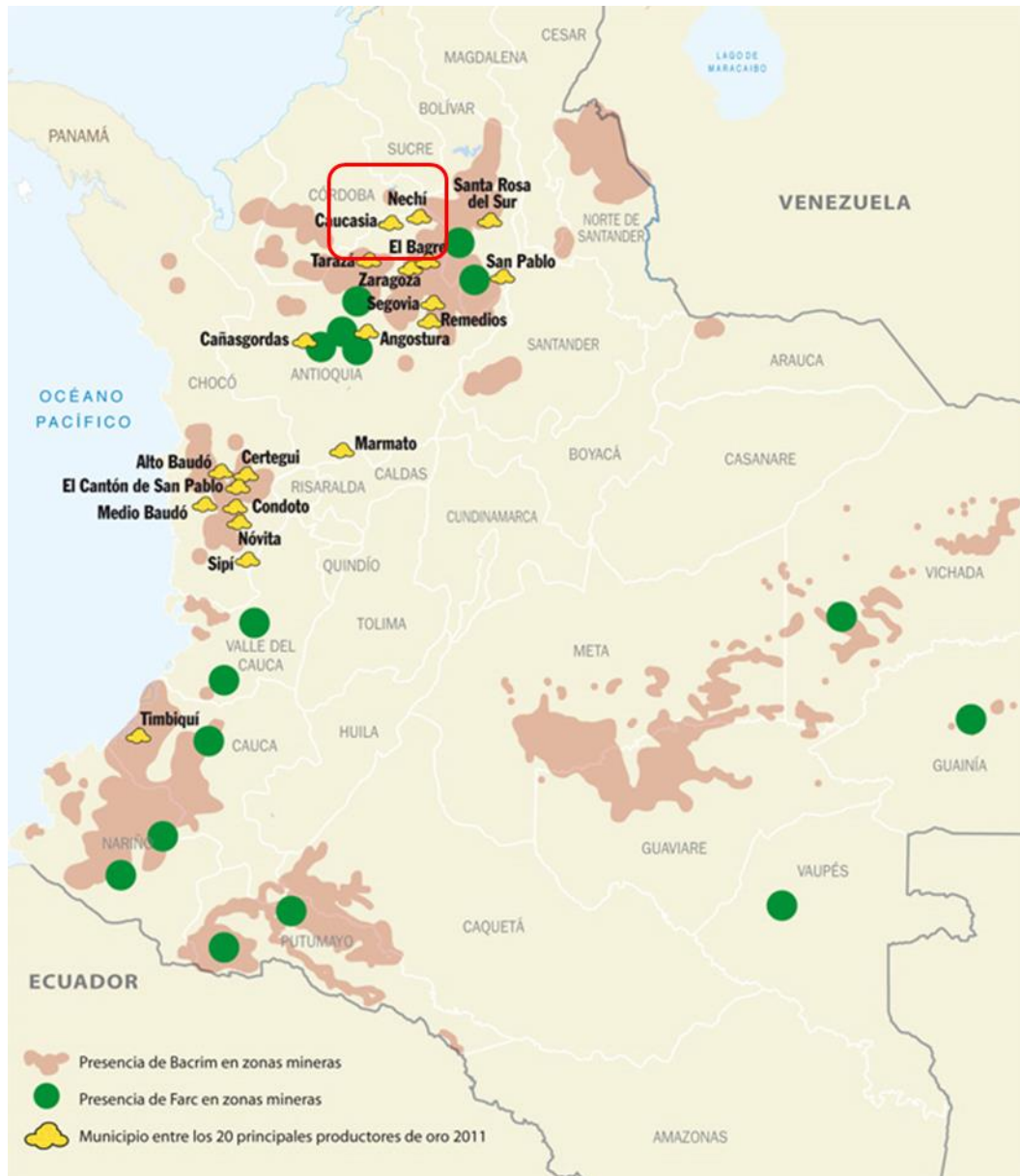
Figura 26. Mapa títulos mineros



Fuente: Elaboración propia

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Figura 27. Presencia de grupos armados y explotación de oro



Fuente: Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2020). *Censo pecuario nacional*. Instituto Colombiano Agropecuario. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018.aspx>

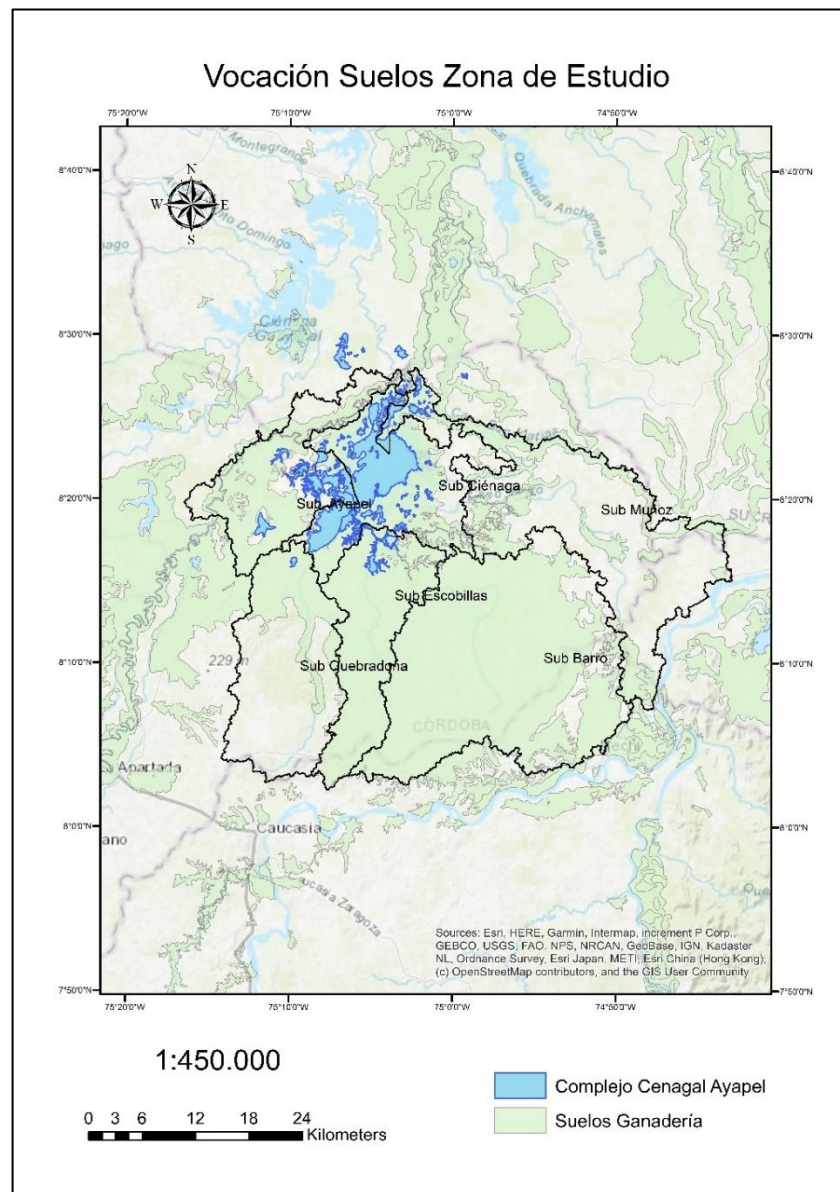
Por otra parte, en la base de datos abiertos del IGAC se encuentra que la vocación de los suelos en la zona aferente a la ciénaga de Ayapel como se muestra en la ilustración 28, la mayoría corresponden a suelos para ganadería que, en el caso de la ciénaga, en época de sequía el nivel del cuerpo de agua disminuye y los

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

ganaderos aprovechan para expandir la frontera para poder llevar a los animales a pastar en estas zonas.

De acuerdo con el censo pecuario del año 2019, córdoba es el segundo departamento con más producción bovina, el tercero con mayor producción porcina, el primero en producción bufalina, el tercero en producción equina y el cuarto en producción ovina y caprina; por lo tanto, este departamento está dentro de los principales productores (ICA, 2020).

Figura 28. Mapa vocación de suelos



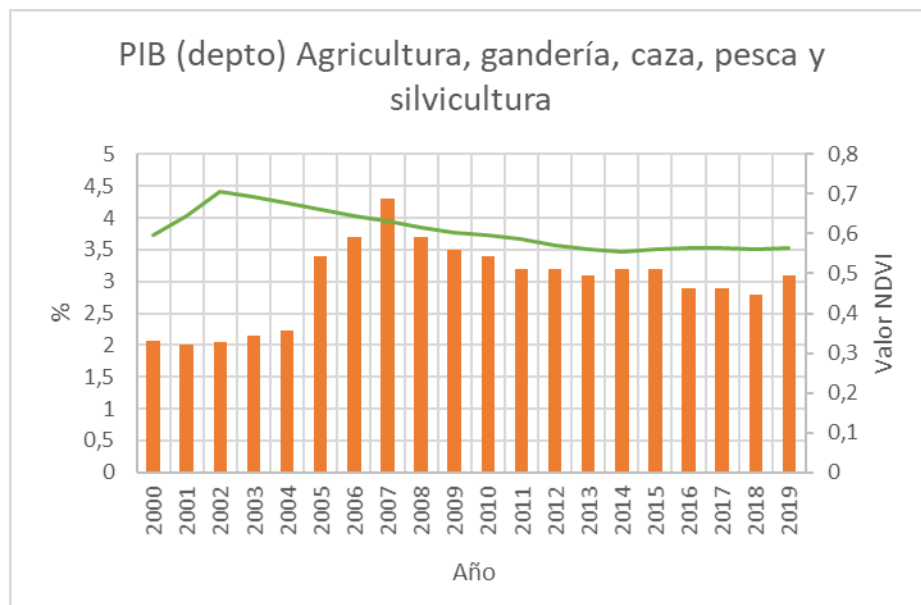
INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

De acuerdo con el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), el departamento de Córdoba es el número 3 con mayor área sembrada de cultivos genéticamente modificados, los productos que se siembran principalmente corresponden a maíz, algodón y flores azules. Aunque se usan semillas mejoradas que permiten obtener un mayor rendimiento por hectárea y que presenta beneficios ambientales, la frontera agrícola se sigue extendiendo, desplazando el cuerpo de agua para tener más terreno en el cual sembrar (ICA, 2020).

Por último, la pesca en la ciénaga de Ayapel ha aumentado en los últimos años, existiendo dos tipos de esta, una de subsistencia y la otra comercial, esto genera un impacto negativo en las especies que habitan en el cuerpo de agua de la ciénaga, esto debido a que en la mayor parte del año se está practicando la pesca (Aguilera Díaz, 2019).

En la ilustración 29 se muestra el comportamiento del Producto Interno Bruto (PIB) en el departamento de Córdoba para las actividades económicas correspondientes a agricultura, ganadería, caza, pesca y silvicultura, donde se evidencia un incremento en el año 2007, pero que en los demás años se mantiene entre 2.7% y 3.2%.

Figura 29. PIB Agricultura, Ganadería



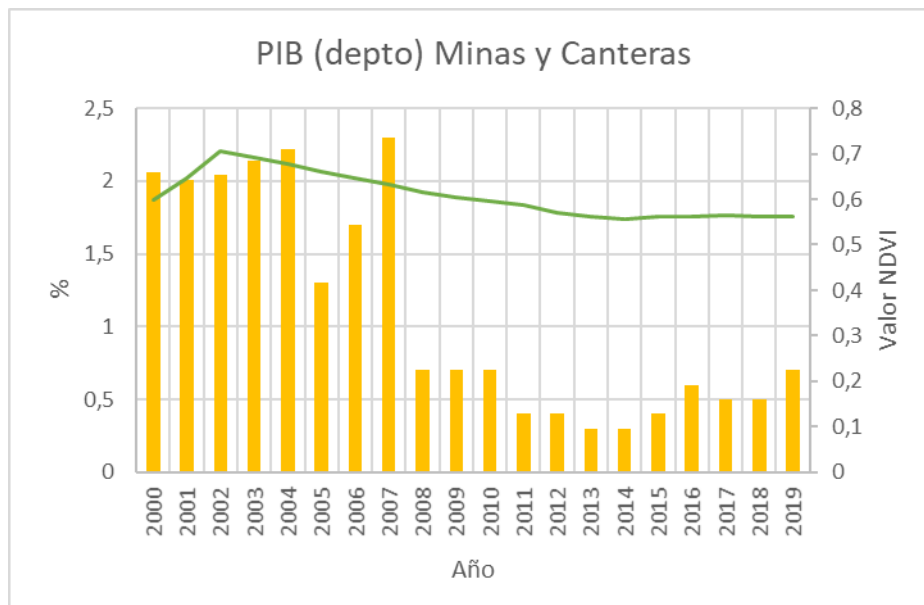
Fuente: Elaboración propia

Al relacionar los datos de este PIB con el NDVI muestra que la relación es inversamente proporcional (spearman -0.1521) principalmente debido a que se ocupan territorios para la expansión de la agricultura y la ganadería, con la

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

precipitación muestra que los valores tienden a 0 (spearman 0.0581) es decir que la relación es casi nula. Con relación al SOI el coeficiente de spearman (0.11287) muestran que la relación es positiva, pero con un valor bajo. Las implicaciones de la ganadería sobre el flujo hídrico de la ciénaga principalmente corresponden a que la escorrentía aumenta al compactarse el suelo, mientras que con la expansión de la agricultura los cultivos requieren de mayores cantidades de agua para suplir las necesidades de estos, disminuyendo la disponibilidad del agua para las propias necesidades del ecosistema.

Figura 30. PIB Minas, Canteras



Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 30 se muestra el PIB del departamento de Córdoba en cuanto a minas y canteras, mostrando que en los últimos años ha disminuido su % de participación. Al relacionar este PIB con el NDVI muestra que la relación tiende a 0 (spearman 0.0670) es decir, que la relación es casi nula, al igual que ocurre con la precipitación (spearman 0.0383) y el SOI (spearman -0.0638). Por otra parte, la relación con el PIB de agricultura y ganadería es inversamente proporcional (spearman -0.1660) lo que corresponde principalmente que el territorio puede usarse para agricultura y ganadería o para minería.

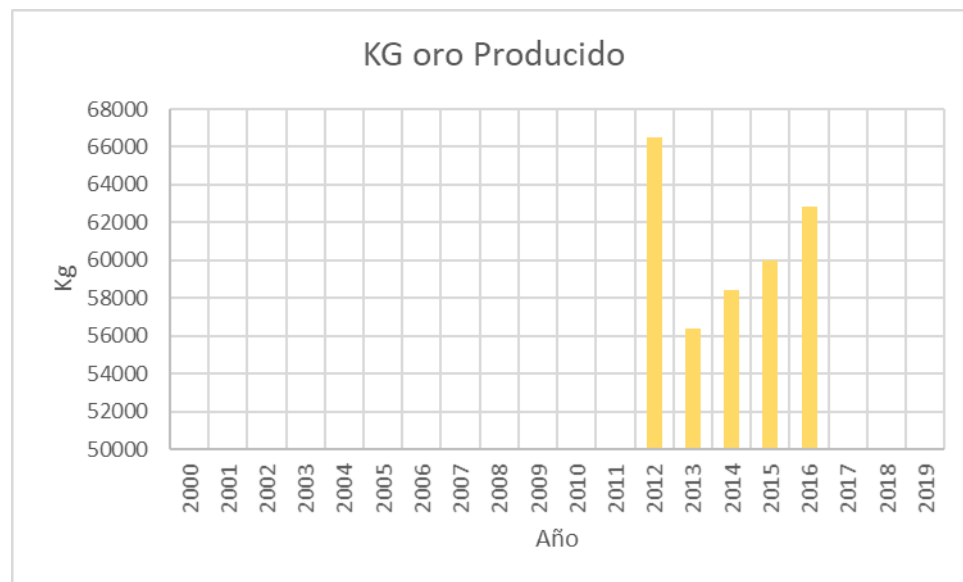
La minería de oro aluvión es la más representativa del área aferente a la ciénaga de Ayapel, ya que genera una gran contaminación sobre los cuerpos de agua y también continua deforestación para poder extraer el material del suelo, lo que provoca graves problemas ambientales, entre las cuales se puede mencionar la disminución de la capacidad de depuración del recurso hídrico y la contaminación

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

la Gestión del Riesgo de Desastres.
https://www.unodc.org/documents/colombia/2020/Octubre/Informe_EVOA_2019_ESP_B.pdf

En la ilustración 32 se muestra la producción de oro registrada en los últimos años, donde se evidencia que se incrementa y las proyecciones indican que seguirá en incremento. Esta producción tiene una relación directa positiva de acuerdo con el índice de correlación (spearman 0.7905) con el PIB de Minas y Canteras, indicando que el oro aluvión es uno de los principales materiales extraídos en el territorio de estudio. Adicionalmente, con el NDVI se obtiene una relación casi nula (spearman -0.0238), cabe aclarar que para la extracción de oro se ha procedido a deforestar varias hectáreas en el departamento de Córdoba por parte de grupos armados para realizar la extracción del mineral (Restrepo Jiménez, et al., 2017).

Figura 32. Producción de Oro

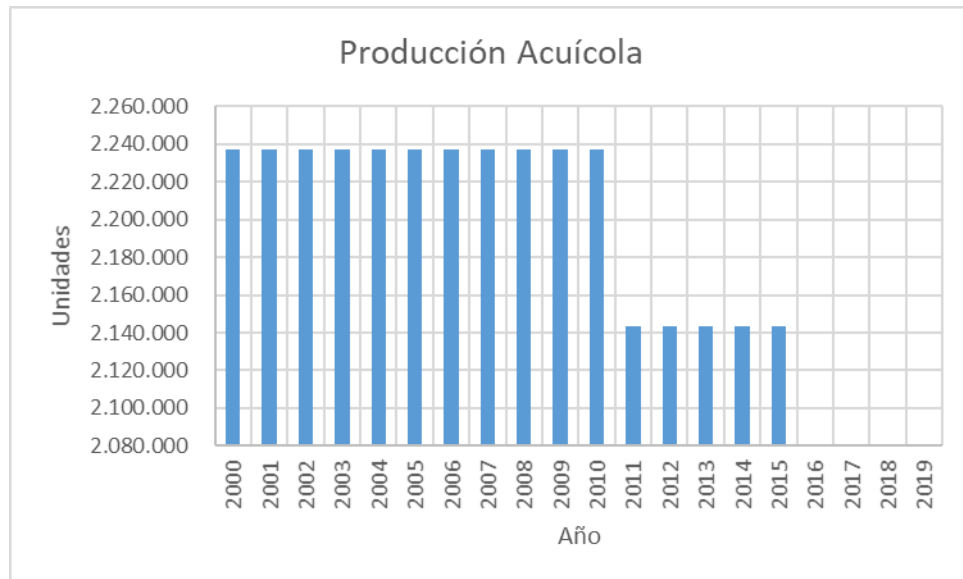


Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 33 se muestra que la producción acuícola nacional en los últimos años ha ido en decremento, principalmente porque las fuentes de agua están contaminadas, generando una afectación sobre el desarrollo de las especies de interés comercial y de sustento. Además, la pesca intensiva que se ha generado en este ecosistema genera disminución en la disponibilidad de los recursos de pesca. Posiblemente esto ha impulsado a las poblaciones a trabajar en la minería de oro de aluvión para poder tener un sustento (DANE, 2015). Al calcular el índice de correlación de spearman para comparar esta variable, se obtiene una relación casi nula con el NDVI (spearman -0.0121), determinando que no hay relación entre estas dos variables.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

Figura 33. *Producción Acuícola Nacional*

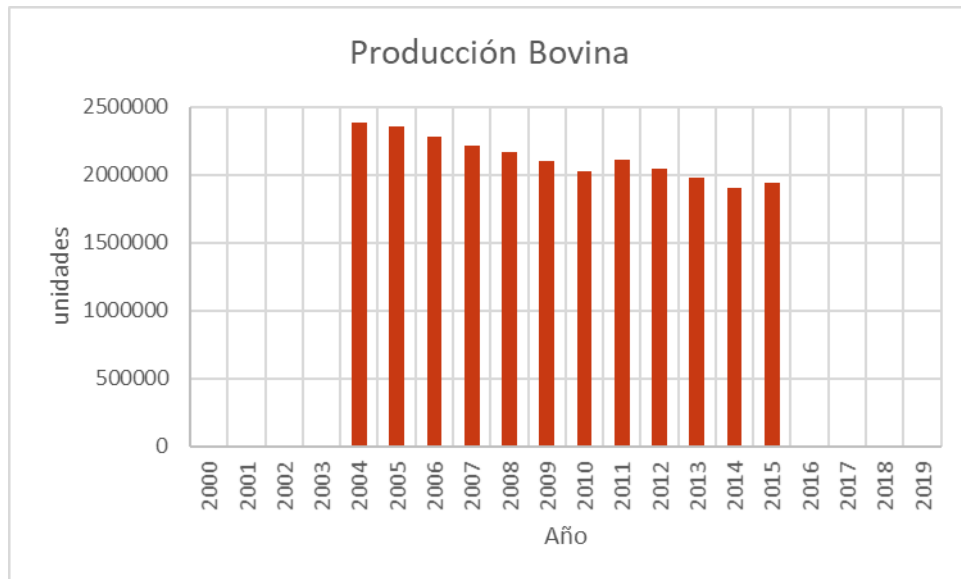


Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 34 se muestra la producción bovina nacional a lo largo de los años disponibles de información, donde se muestra una constancia en la producción, pues, aunque la población aumenta y se requieren de mayores cantidades de alimento, las áreas disponibles para la producción bovina no permiten un incremento en su producción. Sin embargo, las prácticas de llevar a los bovinos a pastar a las áreas de inundación de la ciénaga de Ayapel siguen haciéndose. La relación de esta información con el valor del NDVI es negativa, con tendencia a 0 spearman (-0.0069) indicando que no existe relación entre estas dos variables.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

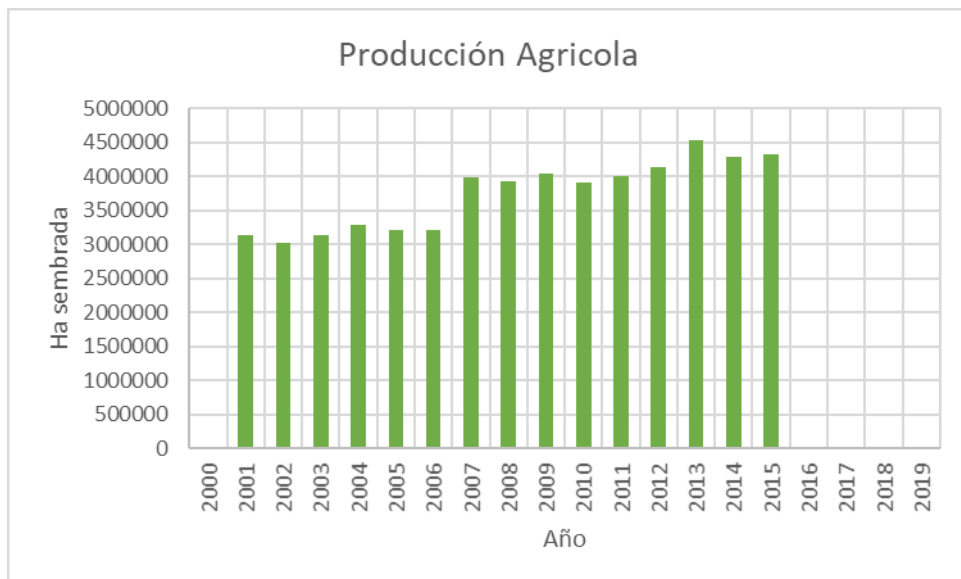
Figura 34. *Producción Bovina Nacional*



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 35 se muestra la producción agrícola nacional, que ha ido en aumento a lo largo de los años, esto debido a que el desarrollo y el aumento poblacional demanda una alta producción de alimentos para abastecimiento. al relacionar estas variables (spearman -0.1645) tienen una relación negativa, es decir, inversamente proporcional, cuando una aumenta la otra disminuye y viceversa.

Figura 35. *Producción Agrícola Nacional*



Fuente: Elaboración propia

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

De acuerdo con lo anteriormente descrito y teniendo en cuenta que en la zona de estudio a partir del año 2007 se ha mostrado un decremento en los terrenos y en los productores agrícolas, y la ganadería no genera mucho empleo para las personas, la actividad económica más representativa es la minería, ya que las personas ven rentable esta actividad para su subsistencia.

7. IMPACTOS DEL PROYECTO

7.1. Impactos Sociales

Dentro de los impactos sociales que genera el desarrollo de este proyecto se pueden mencionar:

- Permite plantear una adecuada gestión del territorio y muestra una base para establecer el plan básico de ordenamiento territorial.
- Facilita la creación de organizaciones comunitarias para el adecuado orden, gestión y registro de las actividades económicas desarrolladas en la zona.

7.2. Impactos Ambientales

- Muestra las posibles zonas a intervenir para recuperar el ecosistema reforestando los lugares que son usados actualmente para explotación minera.
- Establece que es importante hacer un seguimiento a las actividades económicas desarrolladas y las consecuencias que pueden representar para el ambiente, como lo es la calidad del agua.

8. CONCLUSIONES

- De acuerdo con los registros del GLAD en los últimos 20 años la ciénaga ha perdido parte de su área como cuerpo de agua y en algunas subcuencas se evidencia que también se ha disminuido el área de flujo hídrico superficial, hasta en un 50% de pérdida. Esto puede deberse a las diferentes afectaciones que ha sufrido el área de estudio por las actividades económicas, que cada vez son más demandantes de agua y territorio para su adecuado desarrollo.
- Para la zona de estudio se encuentra que el tamaño de parche de vegetación ocupa en promedio el 41% del área total de la zona, en el periodo de estudio se muestra un cambio de tamaño de este parche de 33%. Adicionalmente, al no superar el valor de 5 para el total parches de vegetación, se puede interpretar este resultado como una fragmentación de grado bajo.
- Como actividades antrópicas relevantes que afectan la zona de estudio se encontró que las más representativas corresponden a la ruptura del dique carretable entre Colorao y Nechi – San jacinto del Cauca, la deforestación con fines de explotación minera de oro y reforestación por parte de Corpoayapel para recuperar el ecosistema.
- Dentro de las variables hidroclimáticas más representativas se encuentra la precipitación, la cual es directamente proporcional a los índices de vegetación, obteniendo valores del coeficiente de relación superiores a 0.3, otras variables como la temperatura y evaporación también tienen una correlación positiva con el NDVI, pero en menor magnitud, ya que obtuvieron valores de coeficiente de correlación entre 0.1 y 0.3.
- La correlación existente entre la variable climática precipitación y el índice de vegetación NDVI, se puede denominar de carácter fuerte, ya que el coeficiente de Spearman arroja valores similares o superiores a 0.5.
- Los fenómenos climáticos El Niño y La Niña, determinados por el SOI muestran una correlación negativa inversamente proporcional con el NDVI, la mayoría de los valores de correlación superan el nivel de significancia pero tienden a 0, lo que se puede interpretar como una correlación mala tendiente a nula, sin embargo, los eventos extremos principalmente correspondientes a una inundación se pueden evidenciar en cómo afecta a la vegetación, que principalmente es disminución.
- El incremento de actividades antrópicas para el desarrollo económico como la ganadería podría ser un factor de incremento en la compactación del suelo y, por tanto, podría generar un aumento en el flujo hídrico superficial.
- La agricultura como actividad de desarrollo demanda gran cantidad de agua para regar los cultivos y podría ser otro de los factores que afectan el flujo hídrico superficial de la zona de estudio.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

- Los flujos hídricos de la zona de estudio no solo se ven afectados por las condiciones climáticas, de vegetación y relacionadas con las actividades económicas de la subcuenca, sino también por las condiciones aguas arriba de la zona de estudio.

9. RECOMENDACIONES

- Hacer un estudio en campo con el fin de verificar el logaritmo usado por el paquete GDAL en el software R y con el cual se determinaron los índices de vegetación.
- Identificar los tipos de coberturas vegetales en campo y verificar el paquete LANDSCAPEMETRICS del software R, el cual fue usado para determinar el estado de fragmentación de las coberturas vegetales.
- Mediante estudio en campo verificar el área y hacer un nuevo esquema del uso del suelo en la zona de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera Díaz, M. (2019). *Ciénaga de Ayapel: riqueza en biodiversidad y recursos hídricos*. Banco de la República.
<https://repositorio.banrep.gov.co/bitstream/handle/20.500.12134/470/4.%20Ci%C3%A9naga%20de%20Ayapel.pdf?sequence=1>
- Andreu, V., Gimeno-García, E., Pascual, J. A., Vazquez-Roig, P. & Picó, Y. (2016). Presence of pharmaceuticals and heavy metals in the waters of a Mediterranean coastal wetland: Potential interactions and the influence of the environment. *Science of the Total Environment*, 540, 278-286.
10.1016/j.scitotenv.2015.08.007
- Becerra Solano, M. (2019). *Estimación del nivel de salinidad de los suelos de la cuenca del Río Chancay usando datos EVI y NDVI*. Revista Facultad Nacional De Agronomía, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
<http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/UNPRG/5028>
- Bhatta, L., Chaudhary, S., Pandit, A., Baral, H., Das, P. & Stork, N. (2016). Ecosystem Service Changes and Livelihood Impacts in the Maguri-Motapung Wetlands of Assam, India. *Land*, 5(2), 15. 10.3390/land5020015
- Cran R Studio (2021). *Package 'landscapemetrics'*. Cran R Studio. <https://cran.r-project.org/web/packages/landscapemetrics/landscapemetrics.pdf>
- Dahdouh-Guebas, F., Collin, S., Seen, D. L., Rönnbäck, P., Depommier, D., Ravishankar, T. & Koedam, N. (2006). Analysing Ethnobotanical and Fishery-Related Importance of Mangroves of the East-Godavari Delta (Andhra Pradesh, India) for Conservation and Management Purposes. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 2(1), 24. 10.1186/1746-4269-2-24
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2015). *Anuario Definitivo 2015*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario>
- Duke, N., Ball, M. & Ellison, J. (1998). Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves. *Global Ecology & Biogeography Letters*, 7(1), 27-47. 10.1111/j.1466-8238.1998.00269.x
- Duque Quintero, S., Quintero Quintero, M. & Duque Quintero, M. (2013). Participación de las comunidades en materia ambiental como estrategia para la conservación de la biodiversidad: el caso de los pescadores en la ciénaga de Ayapel (Córdoba). *Jurídicas*, 10(1), 164-180.
<https://doaj.org/article/1e0652fadc7c47e187fbc7a46ee2812d>

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

- Fleischmann, A., Siqueira, V., Parisb, W. Collischonn, R. Paiva, P. Pontesc, J. Crétaux, Bergé-Nguyen, M., Biancamaria, S., Gosset, M., Calmant, M. & Tanimoue, B. (2018). Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands. *Journal of Hydrology*, 561. 10.1016/j.jhydrol.2018.04.041
- Fournier, M., Fournier, M., Echeverría-Sáenz, S., Echeverría-Sáenz, S., Mena, F., Mena, F., Arias-Andrés, M., Arias-Andrés, M., de la Cruz, E., de la Cruz, E., Ruepert, C. & Ruepert, C. (2018). Risk assessment of agriculture impact on the Frío River watershed and Caño Negro Ramsar wetland, Costa Rica. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(14), 13347-13359. 10.1007/s11356-016-8353-y
- Guittard, A. (2016). *Identifying active water flow paths in a tropical wetland with radar remote sensing data (wetland interferometry): The case of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia*. Stockholms universitet, Institutionen för naturgeografic.
- Grupo TYC GIS. (2019). *NDVI ¿qué es y para qué sirve?* Grupo TYC GIS. <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>
- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2020). *Censo pecuario nacional*. Instituto Colombiano Agropecuario. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018.aspx>
- Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales [ICDE]. (2019). *Fuentes de imágenes satelitales gratuitas para generar ideas*. Infraestructura Colombiana de Datos. <http://www.icde.org.co/noticia/fuentes-imagenes-satelitales-gratuitas-generar-ideas>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2014). *Conceptos básicos de cambio climático*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <http://www.cambioclimatico.gov.co/otras-iniciativas#:~:text=La%20variabilidad%20del%20clima%20se,all%C3%A1%20de%20fen%C3%B3menos%20meteorol%C3%B3gicos%20determinados>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2015). *Análisis del impacto del fenómeno “La Niña” 2010-2011 en la hidroclimatología del país*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/An%C3%A1lisis+Impacto+La+Ni%C3%B1a.pdf/640a4a18-4a2a-4a25-b7d5-b3768e0a768a>
- Instituto Geofísico. (2017). *Determinación de modelos lluvia escurrentía*. Instituto Geofísico, Universidad Javeriana.

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/27207/Productos_Mocoa4_Determinaci%C3%B3n_modelos_lluvia_escorrent%C3%ADa.pdf?sequence=3&isAllowed=y

- Jones, C. N., Ameli, A., Neff, B. P., Evenson, G. R., McLaughlin, D. L., Golden, H. E. & Lane, C. R. (2019). Modeling Connectivity of Non-floodplain Wetlands: Insights, Approaches, and Recommendations. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 55(3), 559-577. 10.1111/1752-1688.12735
- Lázaro, W. L., Díez, S., da Silva, C. J., Ignácio, Á R. A., & Guimarães, J. R. D. (2016). Waterscape determinants of net mercury methylation in a tropical wetland. *Environmental Research*, 150, 438-445. 10.1016/j.envres.2016.06.028
- Leclair, M., Whittington, P. & Price, J. (2015). Hydrological functions of a mine-impacted and natural peatland-dominated watershed, James Bay Lowland. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4(PB), 732-747. 10.1016/j.ejrh.2015.10.006
- Li, X., Leonardi, N. & Plater, A. J. (2019). Impact of Barrier Breaching on Wetland Ecosystems under the Influence of Storm Surge, Sea-Level Rise and Freshwater Discharge. *Wetlands*, 40, 771–785. 10.1007/s13157-019-01219-x
- Llanos Pérez, J. (2013). Planes Mojana, inundación Ayapel. *Alcaldía Ayapel*. http://www.planesmojana.com/documentos/normatividad/086_Inundacion%20en%20Ayapel.pdf
- Marrugo-Negrete, J., Marrugo-Negrete, J., Verbel, J., Verbel, J., Ceballos, E., Ceballos, E., Benitez, L. & Benitez, L. (2008). Total mercury and methylmercury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia. *Environmental Geochemistry and Health*, 30(1), 21-30. 10.1007/s10653-007-9104-2
- Marrugo-Negrete, J., Marrugo-Negrete, J., Ruiz-Guzmán, J., Ruiz-Guzmán, J., Díez, S., & Díez, S. (2013). Relationship between Mercury Levels in Hair and Fish Consumption in a Population Living Near a Hydroelectric Tropical Dam. *Biological Trace Element Research*, 151(2), 187-194. 10.1007/s12011-012-9561-z
- Marrugo-Negrete, J., Marrugo-Negrete, J., Ruiz-Guzmán, J., Ruiz-Guzmán, J., Ruiz-Fernández, A., & Ruiz-Fernández, A. (2018). Biomagnification of Mercury in Fish from Two Gold Mining-Impacted Tropical Marshes in Northern Colombia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 74(1), 121-130. 10.1007/s00244-017-0459-9

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

- Mas, J. F. (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, INE, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM y Centro de Investigaciones de Geografía Ambiental. https://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/aplicacionesMODIS.pdf
- Melles, S., Melles, S., Chu, C., Chu, C., Alofs, K., Alofs, K., Jackson, D. & Jackson, D. (2015). Potential spread of Great Lakes fishes given climate change and proposed dams: an approach using circuit theory to evaluate invasion risk. *Landscape Ecology*, 30(5), 919-935. 10.1007/s10980-014-0114-z
- National Centers for Environmental Information [NOAA]. (20521, 13 de Julio). *Southern Oscillation Index (SOI)*. National Centers for Environmental. <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>
- Patiño, J. (2016). Análisis espacial cuantitativo de la transformación de humedales continentales en Colombia. *Biota Colombiana*, 16(3), 85-105. 10.21068/c2016s01a05
- Pickens, A., Hansen, M., Hancher, M., Stehman, S., Tyukavina, A., Potapov, P., Marroquin, B. & Sherani, Z. (2020). Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*, 234(15). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720301620?via%3Dihub>
- Polk, M. H., Young, K. R., Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J. & Carey, M. (2017). Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru's Cordillera Blanca. *Applied Geography*, 78, 94-103. 10.1016/j.apgeog.2016.11.004
- Restrepo Jiménez, L. C., Muñoz Hernández, H., Zúñiga Pérez, L. M. & Castillo Osorio, B. (2017). Minería ilegal y sus implicaciones en el conflicto armado en el departamento de Córdoba y Bajo Cauca Antioqueño. *Nuevo Derecho*, 13(21). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6364082>
- Rosinsky, N. M., John, M., & Robledo, S. (2007). *El agua*. Minneapolis, Minn: Picture Window Books. <http://catdir.loc.gov/catdir/toc/ecip0619/2006027110.html>
- Sistema de Apoyo para la Gestión Inteligente del Recurso Hídrico [SAGIRH]. (2020). *Variables Hidroclimáticas*. Sistema de Apoyo para la Gestión Inteligente del Recurso Hídrico. <https://www.sagirh.ucr.ac.cr/variables->

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

hidroclimaticas/#:~:text=Variables%20Hidroclim%C3%A1ticas,como%20del%20recurso%20h%C3%ADdrico%20disponible.

Schock, N., Murry, B., & Uzarski, D. (2014). Impacts of Agricultural Drainage Outlets on Great Lakes Coastal Wetlands. *Wetlands*, 34(2), 297-307.
10.1007/s13157-013-0486-x

Serna, J. P. (2016). *Modelación del comportamiento hidrosocial de la ciénaga de Ayapel (Córdoba) bajo diferentes escenarios de cambio climático*. Universidad de Antioquia.
https://www.researchgate.net/publication/308610830_Modelacion_del_comportamiento_Hidrosocial_de_la_Cienaga_de_Ayapel_Cordoba_bajo_diferentes_escenarios_de_cambio_climatico

Serna-López, J. P. & Cañon-Barriga, J. E. (2019). Projecting the future of Ayapel Ciénaga: A hydroecologic analysis under climate change scenarios. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad De Antioquia*, (95), 73-87.
10.17533/udea.redin.20190940

Southworth, J., Munroe, D., & Nagendra, H. (2004). Land cover change and landscape fragmentation—comparing the utility of continuous and discrete analyses for a western Honduras region. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2), 185-205. 10.1016/j.agee.2003.09.011

Suárez Hernández, J. C. (2017). *Estudio y caracterización de la enseñanza de la Imagen Satelital: Una revisión documental en los programas profesionales de pregrado de las Universidades públicas de Colombia (2010-2017)*. [Tesis de pregrado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13095/SuarezHernandezJenniferConstanza2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Umass. (2021, 13 de Julio). *Area/ ensity/ edge metrics*. Umass.
<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/Metrics/Area%20-%20Density%20-%20Edge%20Metrics/AREA%20-%20DENSITY%20-%20EDGE%20METRICS.htm>

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres [UNGRD]. (2016). *Fenómeno El Niño Análisis comparativo 1997-1998//2014-2016*. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20564/Fenomeno_nino-2016.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito [UNODC]. (2020). *Colombia Explotación de oro de aluvión Evidencias a partir de percepción*

INFLUENCIA DE LA FRAGMENTACIÓN DE LAS COBERTURAS

remota 2019. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
https://www.unodc.org/documents/colombia/2020/Octubre/Informe_EVOA_2019_ESP_B.pdf

Utopía la Palabra. (2013). *Minería informal en Colombia*. Utopía la Palabra.
<http://utopialapalabra.blogspot.com/2013/04/mineria-informal-en-colombia.html>

Vélez-Macías, F. J. (2018). *Un análisis espaciotemporal de los principales procesos agrosociales y aspectos geográficos en la región de la Ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia), y el desarrollo de un modelo del uso del espacio para la interpretación y simulación de la dinámica del paisaje mediante el uso de sensoramiento remoto con calibración en el terreno*. [Tesis de doctorado]. Universidad de Düsseldorf. https://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-51784/Dissertation_zur_Bibliothek_firmada-1.pdf

Ward, R. D., Friess, D. A., Day, R. H. & Mackenzie, R. A. (2016). Impacts of climate change on mangrove ecosystems: a region by region overview. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(4), e01211-n/a. 10.1002/ehs2.1211

Zabala Agudelo, A. (2017). *Diagnóstico ambiental de la ciénaga de Ayapel a través de la variación temporal de los aspectos morfo funcionales del fitoplancton y un indicador de calidad ecológica*. [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia.
http://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/9074/1/ZabalaAgudeloA_2017_DiagnosticoAmbientalCienaga.pdf