

Universidad Tecnológica de Panamá

Facultad de Ingeniería Civil

Caracterización espacio temporal y balance hídrico de la ciénaga de Las Macanas

Presentado por:

Andrea Santamaría

Yvanna Serra

Trabajo de graduación presentado a la Universidad Tecnológica de Panamá como
requisito para optar por el título de Licenciatura en Ingeniería Civil

República de Panamá

2022

RESUMEN

La ciénaga de Las Macanas es un humedal de agua dulce, ubicado en las provincias centrales de Panamá, con un área protegida aproximada de 867 ha. Es categorizada como un Área de Recursos Manejados por el Ministerio de Ambiente, donde se practica turismo, ecología, ganadería, agricultura y avistamiento de aves.

Este análisis cuantifica cómo funciona el balance hídrico de este humedal, tomando como parámetros de estudio la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía y la infiltración. Los datos climatológicos fueron obtenidos de estaciones de ETESA y MiAmbiente. Se emplearon 140 imágenes satelitales Landsat, descargadas del USGS Survey. Estas se comparan para observar el comportamiento de las diferentes coberturas de suelo, especialmente del área inundada del humedal a través de los años.

Los resultados indican que la temperatura y la precipitación no tuvieron cambios promedios significativos de 1990 a 2020. En el balance hídrico, se pudo evaluar que los años de sequía fueron el 2000, 2015 y 2019, lo cual explicaría por qué la ciénaga estuvo a punto de secarse en el año 2015, teniendo una menor área inundada y demostrando que hay un importante aporte por parte de la precipitación al balance hídrico.

La clasificación supervisada de imágenes satelitales indica una media anual de área inundada de 200 a 500 ha. La precipitación acumulada anual parece tener una influencia poco significativa con el comportamiento anual del área inundada (a excepción de los años

de sequía), mientras que el caudal del río Santa María aguas arriba parece mostrar una influencia importante.

Palabras claves: humedal, Panamá, cambio climático, hidrología, balance hídrico teledetección, Landsat, QGIS, coberturas de suelo.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada, ante todo, a nuestro Señor Jesucristo y a nuestro Dios, por darnos fuerza en los momentos más difíciles de nuestra carrera. Y, en segundo lugar, a nuestros padres, familiares y amigos, por su apoyo incondicional hasta en los momentos más complicados.

AGRADECIMIENTO

Por Andrea:

Quiero agradecer, primero a Dios, por todas las bendiciones que me ha dado y por darme siempre la fuerza para tomar cada una de mis decisiones. Agradezco a mis padres, por apoyarme en cada aspecto de mi vida, especialmente por impulsarme en lo académico. A mi hermana, por siempre estar ahí motivándome a seguir y a tener fe. Al resto de mi familia, que en los momentos que la necesito están ahí dándome la mano. A mis amigos de la universidad, por el apoyo mutuo durante toda la carrera, inclusive en las noches sin dormir, y por su motivación en cada materia. Mi agradecimiento especial a mi amiga y compañera de tesis Yvanna, por sus ánimos durante el desarrollo de esta tesis.

Por Yvanna:

Agradezco, primeramente, a Dios, por haberme dado la oportunidad y el apoyo necesario día tras día para poder realizar esta tesis y por todas las bendiciones que me ha dado. A mi familia, en especial a mi mamá y a mi tío. A mis amigos que conocí en la universidad, que me han motivado en el transcurso de la elaboración de este trabajo. Especialmente, le doy gracias a mi compañera de tesis Andrea, por ofrecerme su amistad desde que llegué a Panamá, por alentarme durante toda mi carrera y, sobre todo, por toda la dedicación, esfuerzo y compromiso al realizar esta tesis.

Por las dos:

Queremos expresarle un gran agradecimiento al Mgtr. Conrado De León, por darnos la oportunidad de ser parte del proyecto. A nuestro profesor asesor Dr. José Fábrega, por su

tiempo y guía a lo largo de toda la tesis. Al Dr. Mauricio Hooper, por todos los consejos y apoyo que nos ha dado.

Agradecemos a los miembros del equipo CREHO Ramsar, involucrados en el proyecto “Garantizando la seguridad hídrica de los humedales y montañas del río Santa María”, especialmente a la Arq. Andreína Pernia, al Dr Osvaldo Jordán, a la Lic. Eilyn Ríos, a Karoline Castillo y a Reveca Ábrego. Gracias a los profesores de la Universidad de Florida Dr. Percy Peralta y Dr. David Kaplan, por su guía a lo largo de todo el proyecto.

Agradecemos a la ONG Eco-Biosfera, especialmente a René Chang Marín y al Sr. Cuba, por su apoyo en la recolección de información. De MiAmbiente, al director general de la provincia de Herrera, Alejandro Quintero; de la ONG GEMA, a la profesora María Pinzón y al Ing. Víctor Pérez, por brindarnos apoyo en las giras y suministro de datos.

Finalmente, esta investigación no hubiese sido posible sin el financiamiento de la Senacyt, por ello, le agradecemos por todo el apoyo económico brindado.

INDICE GENERAL

RESUMEN	II
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
INDICE GENERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	XVI
INTRODUCCIÓN	XIX
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	1
1.1. LOS HUMEDALES.....	2
1.2. HUMEDALES EN PANAMÁ	5
1.3. CUENCA DEL RÍO SANTA MARÍA.....	8
1.4. CIÉNAGA DE LAS MACANAS	10
1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.6. JUSTIFICACIÓN	23
1.7. OBJETIVOS	25
1.7.1. Objetivo general.....	25
1.7.2. Objetivos específicos	25
1.8. ALCANCE.....	26
CAPÍTULO 2: BALANCE HÍDRICO.....	28

2.1. MARCO TEÓRICO.....	29
2.1.1. Ciclo hidrológico	29
2.2. METODOLOGÍA.....	32
2.2.1. Área de estudio	32
2.2.2. Cálculo del balance hídrico.....	35
2.2.2.1. Precipitación	36
2.2.2.2. Evapotranspiración	38
2.2.2.3. Evapotranspiración potencial.....	38
2.2.2.4. Escorrentía	40
2.2.2.5. Aforos de Campo	42
2.2.2.6. Infiltración.....	44
2.2.2.7. Agua subterránea	50
CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN ESPACIO TEMPORAL.....	12
3.1. MARCO TEÓRICO.....	52
3.1.1. Teledetección	52
3.1.1.1. Firmas espectrales.....	54
3.1.1.2. Interacción de los elementos de la superficie terrestre con la radiación.....	55
3.1.1.3. Misiones Landsat	57
3.1.1.4. Combinaciones multiespectrales.....	59
3.1.1.5. Sistema de Información Geográfica.....	63
3.1.1.6. Preprocesamiento de imágenes	64
3.1.1.7. Clasificación supervisada de imágenes de satélite.....	65
3.2. METODOLOGÍA.....	66

3.2.1. Imágenes satelitales	66
3.2.2. Preprocesamiento de las imágenes.....	67
3.2.3. Visita de campo.....	68
3.2.4. Procesamiento	70
3.2.4.1. Interpretación de imágenes	71
3.2.4.2. Clasificación supervisada y obtención de mapas de coberturas	73
3.2.5. Análisis de los cambios en las clases.....	75
3.2.6. Comparación con datos meteorológicos e hidrológicos	76
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. DELIMITACIÓN DE MICROCUENCA DE ESTUDIO.....	80
4.2. PRECIPITACIÓN.....	80
4.2.1. Precipitación mensual	80
4.2.2. Precipitación anual.....	81
4.2.3. Comparación de los datos de precipitación	83
4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN	83
4.3.1. Evapotranspiración potencial para el 2021	83
4.3.2. Evapotranspiración real 2021	85
4.3.3. Comparación de los datos de evapotranspiración potencial	86
4.3.4. Evapotranspiración anual potencial	88
4.4. VARIABLES CLIMÁTICAS	89
4.4.1. Temperatura anual	89
4.4.2. Humedad relativa, temperatura promedio y velocidad del viento	90
4.5. ESCORRENTÍA	91

4.5.1. Modelación hidrológica	92
4.5.2. Escorrentía teórica	95
4.5.3. Escorrentía proveniente de los arrozales circundantes a la Ciénaga.....	96
4.6. INFILTRACIÓN	96
4.6.1. Análisis de conductividad hidráulica no saturada.....	96
4.6.1.1 Mapa de conductividad hidráulica no saturada.....	97
4.6.2. Presencia de aguas subterráneas	98
4.7. BALANCE HÍDRICO	100
4.7.1. Balance hídrico con almacenamiento medido	101
4.7.2. Balance hídrico de los últimos 30 años.....	103
4.8. CAUDAL DEL RÍO SANTA MARÍA.....	104
4.9. COMPARACIÓN TEMPORAL DE ÁREAS CLASIFICADAS	107
4.9.1. Clasificación supervisada de las imágenes – comportamiento mensual.....	107
4.9.2. Ciénaga de Las Macanas: Periodo 1997 – 2002	111
4.9.3. Ciénaga de Las Macanas: Periodo 2014 – 2021	113
4.9.4. Análisis del régimen de inundación de la ciénaga	115
4.9.5. Comparación con la data climatológica.....	118
4.9.6. Comparación con la data hidrológica	122
CONCLUSIONES	126
RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES	129
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132
ANEXO	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Elementos claves del estudio de necesidades hídricas.	4
Figura 2: Principios que sustentan la Política Nacional de Humedales.	7
Figura 3: Ubicación general de la cuenca del río Santa María.	9
Figura 4: Ubicación de la ciénaga de Las Macanas, Herrera.	10
Figura 5: Área de recursos manejados en la ciénaga de Las Macanas.	12
Figura 6: Sembradíos en la zona de amortiguamiento de la ciénaga de Las Macanas.	13
Figura 7: Ganado en el cuerpo de agua de la ciénaga (noviembre de 2020).	14
Figura 8: Ibis Morito (<i>Plegadis falcinellus</i>) en la ciénaga de Las Macanas.	20
Figura 9: Inundación en la zona de visitantes en la ciénaga (6 de noviembre de 2020)...	24
Figura 10: Área de drenaje de la microcuenca de la ciénaga de Las Macanas.	33
Figura 11: Elevaciones del área de drenaje de la ciénaga de Las Macanas, elaboradas a partir del programa QGIS con la herramienta STRM downloader.	33
Figura 12: Clasificación del uso de suelo por teledetección en QGIS.	34
Figura 13: Localización de las estaciones meteorológicas y pluviómetro.	37
Figura 14: Subdivisiones de la microcuenca ciénaga de Las Macanas.	41
Figura 15: Puntos de aforo en la ciénaga Las Macanas. Los aforos 1 al 3 fueron en canales donde los arrozales descargan sus aguas y el aforo 4 en Los Toritos.	42
Figura 16: Aforo 2 de la ciénaga.	43
Figura 17: Muestras tomadas para análisis de conductividad hidráulica.	45
Figura 18: Clasificación de suelo de la microcuenca del humedal.	49
Figura 19: Localización de los sensores utilizados para medir el nivel del agua.	50
Figura 20: Distribución de la radiación cuando llega a un objeto.	54

Figura 21: Reflectividad y firmas espectrales de las distintas coberturas de Landsat 7...	56
Figura 22: Historia de lanzamiento de la serie de satélites – Landsat desde julio de 1972 hasta el último previsto en el 2021.	57
Figura 23: Composición en color verdadero.....	60
Figura 24: Composición en infrarrojo.....	61
Figura 25: Composición para usos de suelo/masas de agua.	62
Figura 26: Composición en falso color RGB 654.....	63
Figura 27: Preprocesamiento: Corrección atmosférica.....	68
Figura 28: Puntos clave para visitar el área protegida (Landsat 8 – 28 de marzo de 2021).	69
Figura 29: Diferentes coberturas de suelo en la zona de estudio del humedal. A) Espejo de agua. B) Agua con vegetación. C) Vegetación seca. D) Suelo desnudo. E) Arbustos. F) Escorrentías.	70
Figura 30: Delimitación de sitio de estudio.	71
Figura 31: Combinación A (Landsat 5 – 21 febrero 2002).....	72
Figura 32: Combinación B (Landsat 5 – 21 febrero de 2002”.....	72
Figura 33: Combinación C (Landsat 5 – 21 de febrero de 2002).	73
Figura 34: Clasificación supervisada en SCP QGIS.....	74
Figura 35: Estaciones de caudal del río Santa María de ETESA.....	77
Figura 36: Modelación de la topografía de la ciénaga de Las Macanas en el programa Autocad Civil 3D.	80
Figura 37: Modelación hidrológica de la ciénaga de Las Macanas en el software HEC-HMS 4.8.....	92

Figura 38: Resultados del afluente para flujos de entrada y salida.....	94
Figura 39: Flujo de entrada y salida para la desembocadura de la ciénaga.	95
Figura 40: Mapa de conductividad hidráulica no saturada (cm/h) de la microcuenca de la ciénaga de Las Macanas.....	98
Figura 41: Clasificación supervisada del humedal (mes de abril) durante cada año del periodo 1 y periodo 2.	108
Figura 42: Coberturas de suelo mensual de la ciénaga durante el año 2015 y porcentaje de cobertura del área inundada.	109
Figura 43: Coberturas de suelo mensuales de la ciénaga durante el año 2021 y porcentaje de cobertura inundada.	110
Figura 44: Imagen en falso color (NIR/R/G) de las inundaciones de la ciénaga de Las Macanas (color azul representa agua). Fecha: 1 de septiembre de 2020.	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Lista de mamíferos protegidos encontrados en la ciénaga de Las Macanas.....	16
Tabla 2: Lista de algunos reptiles y anfibios protegidos encontrados en la ciénaga de Las Macanas.	17
Tabla 3: Lista de algunas aves protegidas encontradas en la ciénaga de Las Macanas....	17
Tabla 4: Lista de algunos peces y crustáceos encontrados en la ciénaga de Las Macanas.	19
Tabla 5: Estaciones meteorológicas circundantes a la ciénaga de Las Macanas.....	38
Tabla 6: Superficie y coeficientes de cultivo de la ciénaga de Las Macanas.	40
Tabla 7: Localización de los puntos tomados para análisis de conductividad hidráulica en la ciénaga de Las Macanas.....	45
Tabla 8: Rangos de conductividad hidráulica propuesta.	47
Tabla 9: Grupos hidrológicos de suelo a efectos de la determinación de valor inicial del umbral de escorrentía.....	48
Tabla 10: Bandas espectrales misiones Landsat 4 y Landsat 5.	58
Tabla 11: Bandas espectrales Misión Landsat 7.	58
Tabla 12: Bandas espectrales misión Landsat 8.	59
Tabla 13. Coordenadas de los puntos para visitar el área protegida.....	69
Tabla 14: Comparación estadística de la estación meteorológica en Divisa y el pluviómetro de El Rincón.....	83
Tabla 15: Evapotranspiración histórica y del año 2021.....	84
Tabla 16: Valores de la evapotranspiración real, comparados con la evapotranspiración potencial.....	86

Tabla 17: Comparación del promedio de la evapotranspiración potencial mensual del periodo 2008 a 2012.....	88
Tabla 18: Cambios en los últimos 30 años de las variables meteorológicas en la ciénaga de Las Macanas.....	91
Tabla 19: Clasificación de suelo según textura y uso.	91
Tabla 20: Coeficiente CN para cada clasificación de suelo.....	92
Tabla 21: Subcuencas con sus respectivos tiempos de concentración.....	93
Tabla 22: Resultados de la modelación, donde se muestran los mayores volúmenes registrados para cada elemento de la cuenca.	94
Tabla 23: Aporte mensual de agua por parte de los arrozales.	96
Tabla 24: Valores resultantes para la conductividad hidráulica y su clasificación.....	97
Tabla 25: Balance hídrico en los meses de enero a diciembre de 2021 en la ciénaga de 100	
Tabla 26: Balance hídrico en los meses de enero a diciembre de 2021 en la ciénaga de Las Macanas.....	102
Tabla 27: Desglose de los porcentajes (%) de coberturas de las diferentes clases 1997 – 2002.....	112
Tabla 28: Desglose de los porcentajes (%) de coberturas de las diferentes clases 2014 – 2021.....	114
Tabla 29: Proporción de meses con áreas inundadas pequeñas y grandes.	117

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Precipitación mensual 2021 correspondiente a la estación de MiAmbiente, localizada en El Rincón, y el promedio histórico de 1990 al 2020.....	81
Gráfica 2: Precipitación del año 1990 a 2020 con línea de tendencia de 1990 hasta 1997, se usó la data de la estación meteorológica de ETESA; de 1997 a 2020, se usó la data del pluviómetro de El Rincón.	82
Gráfica 3: Precipitación anual 1990 a 2020, donde los años de sequía se muestran de color amarillo.....	82
Gráfica 4: Evapotranspiración histórica mensual y del año 2021.....	85
Gráfica 5: Comparación entre la evapotranspiración real y la potencial de la data meteorológica de la NASA para el año 2021.....	85
Gráfica 6: Comparación del promedio de precipitación mensual (2008-2012).....	87
Gráfica 7: Evapotranspiración anual del año 1990 a 2020.	89
Gráfica 8: Temperatura promedio anual para el período 1990 a 2020 en la ciénaga de Las Macanas para datos de ETESA y de la NASA.	90
Gráfica 9: Escorrentía mensual para el año 2021 en la cuenca de Las Macanas.....	95
Gráfica 10: Nivel de agua del pozo y agua superficial de la ciénaga.	99
Gráfica 11: Nivel del pozo y agua superficial de la ciénaga.....	99
Gráfica 12: Balance hídrico de los meses de enero a diciembre del año 2021 en la ciénaga de Las Macanas.....	101
Gráfica 13: Balance hídrico de los meses enero a diciembre del año 2021 en la ciénaga de Las Macanas.....	103
Gráfica 14: Precipitación y evapotranspiración de 1990 a 2019.	104

Gráfica 15: Caudales promedios mensuales multianuales de diferentes estaciones durante 2013 a 2017.....	105
Gráfica 16: Caudales promedios de cada año de la estación de San Francisco desde 1988 hasta 2018.	106
Gráfica 17: Coeficiente de variación anual de la estación de San Francisco desde 1988 hasta 2018.	107
Gráfica 18: Cambios anuales en las coberturas de suelo en la ciénaga de Las Macanas, en el periodo de 1997 – 2002.....	113
Gráfica 19: Cambios anuales en las coberturas de suelo en la ciénaga de Las Macanas en el periodo 2014 – 2021.	114
Gráfica 20: Gráfico de cajas, comparando los regímenes de inundación de la ciénaga de Las Macanas durante el periodo 1 (CV = 31 %) y periodo 2 (CV = 53 %)......	116
Gráfica 21: Cantidad anual de meses con áreas de inundación.	117
Gráfica 22: Área inundada promedio y precipitación acumulada anual (pluviómetro El Rincón)......	119
Gráfica 23: Área inundada promedio vs. precipitación acumulada anual (pluviómetro El Rincón)......	120
Gráfica 24: Área inundada promedio vs. precipitación acumulada anual dos años consecutivos (pluviómetro El Rincón)......	121
Gráfica 25: Correlación entre el área inundada versus el caudal (mes anterior) del río Santa María de la estación de San Francisco.	122
Gráfica 26: Correlación del área inundada de la ciénaga versus caudal del mes anterior del río Santa María (estación San Francisco) año 1997 a 2003.....	123

Gráfica 27: Correlación del área inundada de la ciénaga versus caudal del mes anterior
del río Santa María (estación San Francisco) año 2014 a 2018..... 124

INTRODUCCIÓN

Panamá es un país que depende, principalmente, de sus recursos naturales, especialmente del agua. El Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050 (Comité Alto Nivel de Seguridad Hídrica, 2016), específicamente en su meta N°4, expone la importancia de la protección hídrica y cómo corre el riesgo de repercusiones la contaminación de las aguas superficiales, así como el deterioro de los recursos, pérdida de biodiversidad y humedales.

Los humedales son áreas terrestres que están inundadas o saturadas de agua dulce o salada, de manera natural y permanente, esto según la convención Ramsar. Este acuerdo internacional promueve la conservación y el uso racional de los humedales. Estos ecosistemas tienen gran importancia, pues, aunque tradicionalmente se les consideran terrenos baldíos o focos de enfermedades, son esenciales para proporcionar agua dulce y alimentos, ya que funcionan como amortiguadores naturales esenciales para la biodiversidad. Sin embargo, alrededor del mundo, estos están desapareciendo rápidamente por diferentes presiones a las que son sometidos (Ramsar, 2015).

En el ámbito de la gestión del agua, la expresión “uso racional del agua” se apoya en los conceptos “caudales ecológicos”, en el caso de los ríos; y “necesidades hídricas” cuando se habla de humedales. Estos conceptos son entendidos como una reserva de agua para los sistemas naturales, de tal forma que sigan conservando sus valores naturales, proporcionando al mismo tiempo otras funciones y servicios útiles para la sociedad (Sánchez & Viñals, 2012).

Al ser la cuenca del río Santa María una de las de mayor relevancia para el país, en los últimos años se desarrollan propuestas y proyectos para evitar el deterioro al cual ha estado sometida. Uno de estos proyectos es “Garantizando la seguridad hídrica en los bosques de montaña y humedales del río Santa María”, un estudio piloto impulsado por CREHO RAMSAR, apoyado por Senacyt. Este proyecto busca promover el uso sostenible y racional de los recursos hídricos de manera informada y concertada entre los diversos actores ubicados a lo largo de la cuenca del río Santa María, cuyo aporte hídrico sustenta los servicios ambientales de importantes humedales como la ciénaga de Las Macanas (Ramsar CREHO, 2020).

Esta tesis hace parte de esta investigación, que busca apoyar a la gestión integral de la cuenca, enfocándose en los humedales; específicamente, en la ciénaga de Las Macanas. Por lo que se harán estudios hidrológicos y análisis con imágenes satelitales que brindarán nueva información a los actores claves para la toma de decisiones. El manejo adecuado de los humedales tiene mucha relación con al menos ocho de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En el capítulo I, se hace una descripción general sobre los humedales y el sitio de estudio, además del propósito de la investigación. Posteriormente, en el capítulo II, se describe el marco teórico y metodología del balance hídrico en el humedal; en el capítulo III, se describe el marco teórico y metodología sobre el análisis de las imágenes satelitales de la ciénaga. Finalmente, en el capítulo IV, se desarrollan los resultados finales, conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. Los humedales

Los humedales son áreas donde el agua cubre el suelo o está presente en o cerca de la superficie del suelo durante todo el año o en diferentes períodos del año. Los humedales pueden albergar especies tanto acuáticas como terrestres. La presencia prolongada de agua crea condiciones que favorecen el crecimiento de plantas especialmente adaptadas y promueven el desarrollo de suelos característicos de humedales.

Los humedales pueden ser costeros o continentales. Los humedales continentales son más comunes en llanuras aluviales a lo largo de ríos y arroyos, en depresiones aisladas rodeadas de tierra seca (por ejemplo, playas, cuencas y "baches"), a lo largo de los márgenes de lagos y estanques, y en otras áreas bajas donde el agua subterránea intercepta la superficie del suelo o la precipitación satura suficientemente el suelo (charcas primaverales y turberas) (Herrera, 2017).

Los humedales pueden brindar muchos beneficios a la humanidad, que van desde ser fuente de agua, alimentos y de muchas formas de vida. Son uno de los hábitats con mayor biodiversidad del mundo, proporcionan hogares para muchas especies en peligro de extinción, ofrecen un sustento para las especies de agua dulce y actúan como “estaciones de servicio” vitales para que millones de aves migratorias descansen y reposten. Muchas especies endémicas se encuentran solo en áreas específicas de humedales. Otros servicios son la investigación científica, la protección del ecosistema, la regulación del flujo de sedimentos y el régimen hídrico, recarga de las aguas subterráneas y la mitigación del cambio climático.

Los humedales han apoyado la vida humana durante milenios, y son esenciales para la salud y la prosperidad humana. Desde el Nilo hasta el Mekong, surgieron civilizaciones alrededor de los humedales y en todo el mundo continúan proporcionándonos alimentos, agua, suministros, transporte y ocio. Más de la mitad del mundo depende de productos cultivados en humedales como el arroz para su dieta básica (Conservación Internacional, 2019). Sin embargo, muchos estudios demuestran que el área y la calidad de los humedales continúan disminuyendo en la mayoría de las regiones del mundo.

Las estimaciones científicas muestran que el 64 % de los humedales del mundo han desaparecido desde 1900. En algunas regiones, especialmente en Asia, la pérdida es aún mayor. Los humedales continentales están desapareciendo a un ritmo más rápido que los costeros, pero la tendencia general es clara. Esto trae como resultado que los beneficios de estos ecosistemas hacia la sociedad estén comprometidos (Conservation International, 2019).

Es necesario que los humedales conserven sus necesidades hídricas ecológicas y ambientales; es decir, las reservas de agua son esenciales para un ecosistema y para mantener a sus seres vivos, así como para el diario vivir de los seres humanos. Cabe señalar que no es tarea sencilla determinar las necesidades hídricas de humedal (**Figura 1**), puesto que un estudio completo requiere la colaboración interdisciplinaria de profesionales de la hidrología, botánica, zoología, entre otros, trabajando en un mismo objetivo: el uso racional del agua (Sanchez & Viñals, 2012).

El énfasis en el uso racional de los humedales es lo que está establecido como misión en la Convención Ramsar. Este es uno de los primeros acuerdos multilaterales para la conservación y uso sostenible de los recursos naturales, entrando en vigor en el año 1975 (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2016). Este es un tratado internacional para la conservación y el uso sostenible de los humedales, dando énfasis a los de importancia internacional, especialmente a aquellos que sirven de hábitat para aves acuáticas (CREHO Ramsar, n.d.).

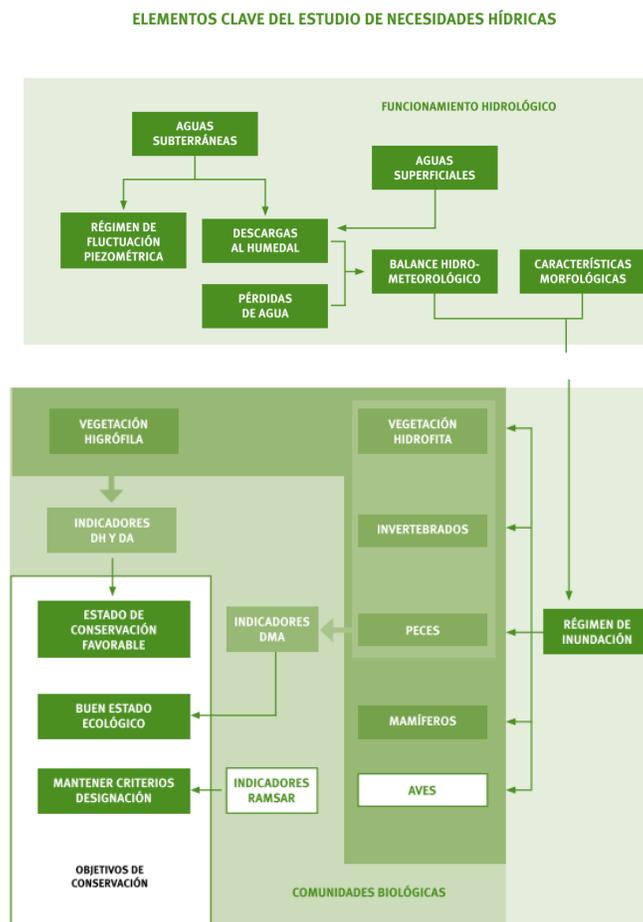


Figura 1: Elementos claves del estudio de necesidades hídricas.

Fuente: Sánchez & Viñals, 2012.

1.2. Humedales en Panamá

Panamá firmó la Convención Ramsar el 3 de enero de 1989, comprometiéndose internacionalmente a elaborar y planificar la conservación de los humedales incluidos en la Lista de Humedales de Importancia Internacional y el uso racional del resto de humedales del territorio nacional. Esta establece, en su artículo 3, la obligación del Estado a fomentar la conservación de las reservas naturales en zonas húmedas con énfasis en aves acuáticas. Hoy día, los humedales en la lista de sitios de importancia son: bahía de Panamá, golfo de Montijo, Damani-Guariviara, punta Patiño y San San Pond Sak (MiAmbiente & ARAP, 2013).

El Ministerio de Ambiente (MiAmbiente) realizó una revisión integral para poder estimar la cantidad, variedad y cobertura de los humedales en el país, con el fin de ver la posibilidad de establecer nuevas áreas protegidas para la conservación de humedales. Tan solo en Panamá, el 23 % de su superficie es representada por cuerpos de agua como lagunas, lagos, manglares, pastos marinos y zonas estuarinas, en los cuales se encuentran también humedales que son de alto valor ecológico y de importancia para la economía y el ambiente (Ministerio de Ambiente, 2021). Además, actualmente se cuenta con un inventario de humedales costeros y continentales de Panamá, donde se encuentran los humedales Ramsar, humedales en áreas protegidas y otros de importancia (Ramsar CREHO et al., 2010).

Los humedales son hábitats insustituibles desde el punto de vista ambiental y socioeconómico, con un singular patrimonio cultural y natural (Sánchez & Viñals, 2012).

Cabe destacar que la mayoría de las investigaciones y áreas protegidas son centradas en los manglares, dejando sin atención al resto de los diferentes tipos de ecosistemas húmedos, como los humedales. Hay que recordar que estos son mitigadores del cambio climático por la gran cantidad de CO₂ que absorben, irónicamente son muy vulnerables al mismo, por esta razón es necesario tener planes para el manejo y protección de estos.

Múltiples son las amenazas a las que son sometidos los humedales en Panamá, tales como (Ministerio de Ambiente, 2021):

- Desarrollo costero insostenible (residencial, comercial, turístico, entre otros).
- Conversión de áreas de humedales a producción agrícola.
- Gestión insostenible de cuencas hidrográficas, desarrollo de proyectos sin consideración del caudal ecológico y efectos acumulativos.
- Falta de manejo de desechos sólidos y aguas servidas.

Panamá tiene un marco normativo que engloba la protección y aprovechamiento de la biodiversidad; sin embargo, cambios en legislaciones generan huecos que dan paso a diferentes interpretaciones de la original, que terminan por no esclarecerse (Ministerio de Ambiente, 2018). Es por esto por lo que el marco legal debe basarse en estudios que brinden una base sólida para la toma de decisiones. Es importante hacer énfasis en los estudios de la biodiversidad, especialmente en los humedales que se encuentran en la parte baja de la cuenca del río Santa María, que han sido poco estudiados pese a ser una zona vulnerable, donde sus niveles de precipitación predominan en el rango entre los 1000 mm y 3500 mm (Comité Alto Nivel de Seguridad Hídrica, 2016).

La Política Nacional para Humedales tiene como objetivo que para el año 2050, los humedales sean utilizados de forma que sus recursos sean aprovechados de manera responsable y sin ser directamente impactados, mediante el uso de prácticas sostenibles y siguiendo las normativas establecidas. Todo esto va alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, buscando no solo la conservación del ambiente, sino el bienestar de los habitantes del país y su seguridad (Ministerio de Ambiente, 2018).

Esta política nacional se basa en ciertos principios (**Figura 2**), cuyo cumplimiento afecta los objetivos de desarrollo, entre los cuales se pueden destacar: i) el enfoque ecosistémico, ii) la responsabilidad, iii) el principio de información, educación y sensibilización y iv) la gestión adaptativa.



Figura 2: Principios que sustentan la Política Nacional de Humedales.

Fuente: Propia.

El enfoque ecosistémico plantea abordar los temas ambientales en conjunto con los económicos y sociales, dado el ser humano no es un ser individual ni aislados. La

responsabilidad establece que cada persona debe saber la importancia de los humedales y cualquier daño directo o indirecto hacia estos, la persona debe hacerse responsable de las consecuencias y pagar lo que implique su recuperación.

En el principio de información, educación y sensibilización, se indica que el Estado debe velar para que sea de conocimiento público todo lo referente a humedales y su importancia. Que el acceso sea sencillo para toda persona que esté interesada en conocer y/o tener una participación robusta en el tema. El tener un mejor acceso a la información transforma la visión de las personas y reconoce el aporte de estos ecosistemas al país. Finalmente, la gestión adaptativa se enfoca en la gestión política, la cual es la que realmente puede generar más cambios en las prácticas de uso sostenible. Esta gestión debe siempre mejorar sus procesos y métodos de manera continua.

1.3. Cuenca del río Santa María

El río Santa María (**Figura 3**) corre aproximadamente 148 kilómetros, con nacientes ubicadas en el distrito de Santa Fe, Veraguas, desembocando en el golfo de Parita, en la provincia de Herrera, República de Panamá. Diversos son los usos de las aguas de este río, como extracción de agua potable, para riego de cultivos, actividades agropecuarias e industriales, generación eléctrica, entre otros.

Varias son las áreas de importancia ecológica que se pueden encontrar, y que se integran en un contexto social y ambiental para el país.

Los principales aspectos para considerar en el manejo de la cuenca son los siguientes:

- a. Parte alta, el potencial de desarrollo ecoturístico y de conservación, con el Parque Nacional Santa Fe y la reserva forestal La Yeguada.
- b. Parte media, la relación de la cuenca con sus cuencas vecinas y la vinculación con el sistema hídrico.
- c. Parte baja, en donde la cuenca se vincula con el sistema costero marino de la bahía de Parita, manglares y actividades turísticas.

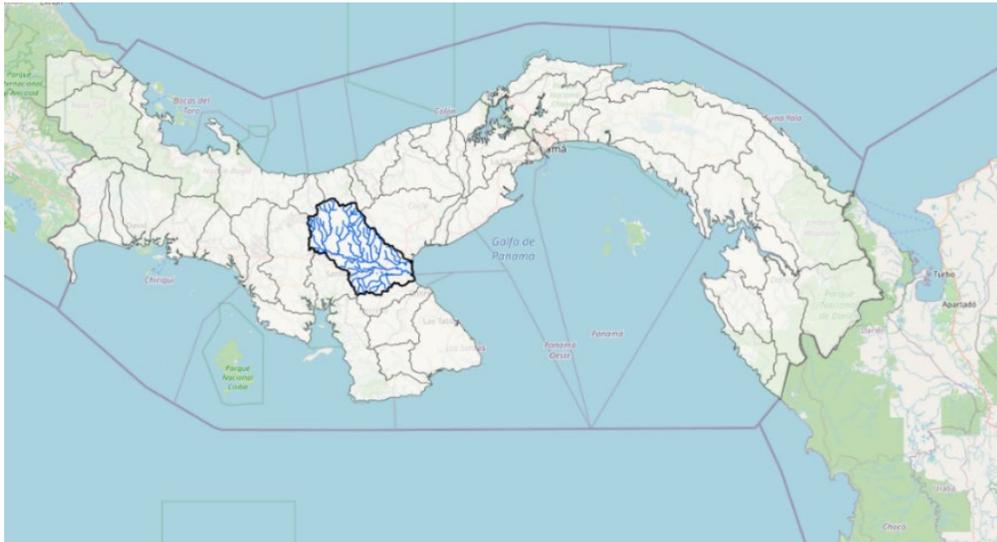


Figura 3: Ubicación general de la cuenca del río Santa María.

Fuente: Cathalac 2016.

La parte baja del río Santa María se encuentra en el denominado “arco seco de Panamá”, el cual se ubica en la costa pacífica. Se caracteriza por ser una región donde hay un bajo nivel de precipitación. La precipitación en la parte baja del río Santa María ronda alrededor de los 1400 mm anuales, la temperatura promedio anual es de 27.5 °C, siendo la mínima

21.8 °C y la máxima 33.1 °C. La evapotranspiración tiene un promedio de 1800 mm anuales (MiAmbiente, 2009).

1.4. Ciénaga de Las Macanas

La ciénaga de Las Macanas (**Figura 4**) es un humedal muy importante de las provincias centrales, y actualmente es un área protegida. Este humedal está ubicado 200 metros al sur de uno de los meandros del río Santa María, en la parte baja de la cuenca, colindante al oeste con las comunidades El Rincón y El Rodeo, en el distrito de Santa María, provincia de Herrera. Se encuentra cerca del Parque Nacional Sarigua, y cuenta con elevaciones entre los 0.00 m.s.n.m. a 0.20 m.s.n.m.

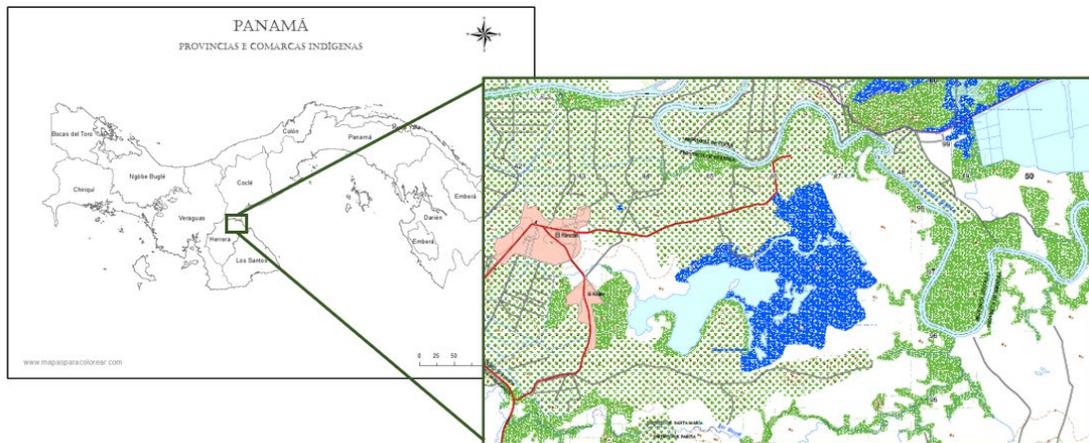


Figura 4: Ubicación de la ciénaga de Las Macanas, Herrera.

Fuente: Propia.

La designación de “ciénaga” es por su baja profundidad de agua y por la pequeña extensión, y “Macanas”, por la abundancia de este pez en el humedal. El humedal actual tuvo su

origen en lo que fue el cauce del río Santa María hace bastantes años (Ramsar CREHO et al., 2010). Lo caracteriza que tiene un cuerpo de agua perenne, así como zonas efímeras e intermitentes que varían de acuerdo con la temporada del año y abarca más de 8 ha, lo que dentro de la clasificación Ramsar de humedales lo distingue como humedal tipo continental(O).

La resolución de áreas protegidas y vida silvestre del 19 de julio de 2016 (Resolución DAPVS-0007-2016, 2016) expone cómo la ciénaga de Las Macanas fue declarada reserva biológica en el año 1987, cubriendo aproximadamente un área de 2000 hectáreas. En el año 1996, el gobierno central decidió cambiar el estatus a área de usos múltiples. Mediante el acuerdo municipal #174 de 19 de noviembre de 2008, fue declarada un área importante para la observación de aves, de acuerdo con los resultados del Programa de Áreas Importantes para Aves en Panamá, realizado por la Sociedad Audobon de Panamá. Finalmente, a través de esta resolución del 2016, se declara a la ciénaga de Las Macanas como área de recursos manejados, delimitando el polígono y reduciendo su extensión a 857 ha con 6102 m² (**Figura 5**). Actualmente, esta área es manejada por MiAmbiente.

El área de recursos manejados en la ciénaga de Las Macanas incluye el cuerpo de agua del humedal, el cual bordea parte de la zona norte y es delimitado por las tierras aluviales del río Santa María, encontrándose este a una mayor elevación. Existe en el sur una parte del terreno, que también tiene una mayor elevación en donde se encuentra el río Escota, que desemboca en el río Santa María al este del humedal. A esta zona donde se encuentran los tres afluentes (el agua de la ciénaga, el río Santa María y el río Escotá), se le conoce como Los Toritos.



Figura 5: Área de recursos manejados en la ciénaga de Las Macanas.

Fuente: Resolución DAPVS-0007-2016, 2016.

Las fuentes de agua con que se abastece la ciénaga de Las Macanas provienen de la precipitación, la escorrentía de los cultivos, la escorrentía de las tierras del norte y sur, las inundaciones por desbordamiento del río Santa María, entre otros. También, a través de Los Toritos, el agua proveniente del río Santa María y del río Escotá puede alimentar la ciénaga por la acción de las mareas; sin embargo, debido a un obstáculo ocurrido por la sedimentación en el mismo humedal, se le limita a este de fuente natural de vida (Chang, 2020).

Las comunidades vecinas al humedal son bastante dependientes del mismo. Al ser un área de recursos manejados, se pueden tener ciertas actividades de subsistencia:

- a) Agricultura: Las siembras se dan en los meses de enero y febrero para utilizar sistemas de riego. No está permitido utilizar agua de la ciénaga para regadíos. Se cultivan productos tanto en la zona protegida como en la zona de amortiguamiento (**Figura 6**). Entre estos productos se encuentran: el maíz, la sandía y el zapallo. En la zona de amortiguamiento, se da un buen rendimiento de la siembra de arroz, ya que son terrenos planos y con mayor oportunidad de riego. La siembra de caña de azúcar es a menor escala, solo en pequeñas parcelas.



Figura 6: Sembradíos en la zona de amortiguamiento de la ciénaga de Las Macanas.

Fuente: Propia.

- b) Ganadería: Esta actividad es una de las más importantes. El tipo de ganadería de la zona es para leche y carne. Esto se puede estimar en varios cientos. El ganado recorre toda la ciénaga sin límites (**Figura 7**). Los suelos en la época de enero a marzo se secan rápidamente, así que la única zona húmeda para el ganado es el humedal.



Figura 7: Ganado en el cuerpo de agua de la ciénaga (noviembre de 2020).

Fuente: Propia.

- c) Pesca: La pesca se da de forma artesanal y en menor escala a manera de subsistencia. Sin embargo, esta actividad ya no se da por la baja calidad del agua. Un ejemplo de esta situación es lo difícil que es hoy día encontrar el pez Macana (*Synbrachus marmoratus*) (Ramsar CREHO et al., 2010), el cual le da origen al nombre de la ciénaga, por la falta de agua de las mareas.

- d) Ecoturismo: Es importante destacar también que esta ciénaga es un lugar turístico, el cual no solo llama la atención de las personas por su espejo de agua, sino también por su biodiversidad. Cada año se celebra la Feria Ecoturística y Familiar Ciénaga Las Macanas, la cual aglutina a muchos visitantes, en donde se llevan a cabo eventos culturales, folclóricos, actividades recreativas, senderismo, etc. (Clima Pesca, 2017).

También se encuentran grupos organizados no gubernamentales locales que se dedican al manejo y conservación, como el grupo Local GEMA (Grupo Ecológico y Ecoturístico Las Macanas), ECOBiosfera, entre otros.

Aunque actualmente es un turismo menor, además de los turistas nacionales, las visitas también son de científicos internacionales, quienes se dedican a observar la gran cantidad de aves migratorias. El humedal de la ciénaga de Las Macanas fue declarado área protegida (Ministerio de Ambiente, 2016), debido a que es un punto clave que las aves acuáticas migratorias, procedentes de Estados Unidos y Canadá, en su viaje al sur en la llegada del invierno del hemisferio norte, utilizan para descansar (**Figura 8**).

También se destacan algunas especies protegidas en la fauna silvestre de la República de Panamá presente en el área protegida. En la **Tabla 1**, se desglosa la lista de mamíferos protegidos en el humedal. En la **Tabla 2**, se encuentra la lista de reptiles y anfibios; en la **Tabla 3**, la lista de aves protegidas; y en la **Tabla 4**, la lista de peces y crustáceos.

Tabla 1: Lista de mamíferos protegidos encontrados en la ciénaga de Las Macanas.

Nombre común	Nombre Científico
Venado cola blanca	<i>Odocoileus virginianus</i>
Tigrillo moteado	<i>Leopardus wiedii</i>
Tigrillo negro	<i>Herpailurus yagouaroundi</i>
Mono nocturno	<i>Aotus zonalis</i>
Mono aullador	<i>Alouatta palliata</i>
Mono carablanca	<i>Cebus capucinus</i>
Ñeque	<i>Dasyprocta punctata</i>
Hormiguero gigante, Oso caballo	<i>Myrmecophaga tridactyla</i>
Hormiguero	<i>Tamandua mexicana</i>
Gato de balsa	<i>Cyclodes didactylus</i>
Armadillo	<i>Dasypus novemcintus</i>
Armadillo cola de puerco	<i>Cabassous centrales</i>
Zorro gris	<i>Urocyon cinereoargenteus</i>
Gato manglatero	<i>Procyon cancrivorus</i>
Mapache	<i>Procyon lotor</i>
Gato de agua, nutria	<i>Lutra longicaudis</i>
Gato solo, zuto	<i>Nasua nasua</i>
Coyote	<i>Canis latrans</i>
Zarigüeya	<i>Didelphis marsupialis</i>
Tayra (gato negro)	<i>Eyra barbara</i>
Gato solo	<i>Nassua naria</i>
Mapache, cangrejero	<i>Procyon cancrivorus</i>
Muleto	<i>Silvilagus brasiliensis</i>
Zorro gris	<i>Urocyon cinereoargenteus</i>

Fuente: Chang 2020.

Tabla 2: Lista de algunos reptiles y anfibios protegidos encontrados en la ciénaga de Las Macanas.

Nombre común	Nombre Científico
Cocodrilo	<i>Crocodylus acutus</i>
Caimán o lagarto	<i>Caiman crocodilus fuscus</i>
Galápago	<i>Chinosternon scorpiodes</i>
Tortuga Hicotea	<i>Trachemis scripta</i>
Boa constrictora	<i>Boa constrictor</i>
Iguana verde	<i>Iguana iguana</i>
Sapito de 4 ojos	<i>Pleuroderma brachiops</i>
Rana túngara común	<i>Engystomops pustulosus</i>
Sapo común	<i>Bufo bufo.</i>
Salamadra	<i>Bolitoglossa sp</i>
Moracho, Moralejo, Basilisco	<i>Basiliscus vittatus</i>
Iguana negra	<i>Ctenosarura similis</i>
Culebra bejuquilla parda	<i>Oxibelis aeneus</i>
Culebra bejuquilla verde	<i>Oxibelis fulgidus</i>
Culebra sapera	<i>Cloelia cloelia</i>

Fuente: Chang 2020.

Tabla 3: Lista de algunas aves protegidas encontradas en la ciénaga de Las Macanas.

Nombre común	Nombre Científico
Perdiz de Rastrojo	<i>Crypturellus soui</i>
Paisana	<i>Ortalis cinereiceps</i>
Güichichi	<i>Dendrocygna autumnalis</i>
Cerceta aliazul	<i>Annas discors</i>
Guichiche marrón	<i>Dendrosyigna bicolor</i>
Pato Real	<i>Cairina moschata</i>
Loro moña amarilla	<i>Amazona ochrocephala</i>
Guaquita	<i>Ara severa</i>

Gallito de Monte	<i>Odontophorus gujanensis</i>
Anade Real	<i>Anas platyrhynchos</i>
Garza blanca grande	<i>Ardea alba</i>
Gacita bueyera	<i>Bubulcus ibis</i>
Garza gris	<i>Ardea herodias</i>
Garceta azul chica	<i>Egretta caeurulea</i>
Garza nocturna	<i>Nycticorax nycticorax</i>
Grullo	<i>Mycteria americana</i>
Pato cucharo rosa	<i>Platalea ajaja</i>
Pato Crestudo	<i>Sarkidiornis sylvicola</i>
Pato Rabudo	<i>Anas acuta</i>
Pato Cuchara	<i>Anas clypeata</i>
Pato Pechiblanco	<i>Aythya affinis</i>
Pato Collar	<i>Aythya collaris</i>
Pato Tigre	<i>Oxyura dominica</i>
Paloma escamosa	<i>Columba speciosa</i>
Torcaza común	<i>Columba cayennensis</i>
Paloma aliblanca	<i>Zenaida asiática</i>
Paloma rabiaguda	<i>Zenaida macroura</i>
Halcón peregrino	<i>Falco peregrinus</i>
Gavilán caracolaero	<i>Rosthramus sociabilis</i>
Gavilán sabanero	<i>Buteogallus meridionalis</i>
Gavilán caza murciélagos	<i>Falco sparverius</i>
Cara cara crestada	<i>Caracara cheryway</i>
Águila pescadora	<i>Pandion halliaetus</i>
Playerito coleador	<i>Actitis macularia</i>
Playerito occidental	<i>Callidris maury</i>
Gallito de ciénaga	<i>Jacana jacana</i>
Gallineta de agua	<i>Porphirula martinica</i>
Pato cuervo	<i>Anhinga anhinga</i>
Ibis morito	<i>Plegadis falsinellus</i>
Ibis común	<i>Eudocinus albus</i>

Porrón menor	<i>Aythya affinis</i>
Martín pescador	<i>Chloroceryle americana</i>
Tijereta marina, fragata	<i>Fregata magnificiens</i>
Tero sureño	<i>Vanellus chilensis</i>

Fuente: Chang 2020.

Tabla 4: Lista de algunos peces y crustáceos encontrados en la ciénaga de Las Macanas.

Nombre común	Nombre Científico
Macana	<i>Symbrachus marmoratus</i>
Peje perro	<i>Hoplias microlepis</i>
Sardina agallona	<i>Astyanax sp</i>
Tilapia	<i>Oreochromis niloticus</i>
Carpa	<i>Ciprinos carpio</i>
Chogorro	<i>Aequiden coeruleopunctatus</i>
Sargento	<i>Cichla ocellaris</i>
Camarón de río	<i>Macrobrachium</i>
Jaiba	<i>Pseudotelph</i>
Camaron	<i>Macrobragium panamense</i>

Fuente: Chang 2020.

Igualmente, en el sitio se destacan tres tipos de vegetación acuática: la flotante; la emergente, constituida de musgos, helechos y lirios acuáticos; y la enraizada. En la zona inundable, existe vegetación hidrófila con variadas hierbas. En las periferias, se pueden encontrar especies como el Corotú y el árbol Panamá, entre otras (Pinzón, 2020).

Pese a que la ciénaga de Las Macanas no es un sitio de importancia Ramsar, actualmente los lineamientos para la conservación de este humedal están basados en la Convención

Ramsar (CREHO Ramsar, n.d.). Al ser uno de los pocos lugares que no han sido totalmente explotados con fines agropecuarios en el Arco Seco, ayuda a ser un corredor biológico entre las áreas protegidas de la bahía de Parita, tales como el Parque Nacional Sarigua (Ministerio de Ambiente, 2019).



Figura 8: Ibis Morito (*Plegadis falcinellus*) en la ciénaga de Las Macanas.

Fuente: Virgilio Villalaz – CREHO.

1.5. Planteamiento del problema

Para determinar las necesidades hídricas del humedal, se debe identificar el tipo de humedal, conocer el comportamiento del balance hídrico, así como los factores y presiones que afectan la hidrología del humedal, como la variabilidad climática, los cambios en el uso de suelo, las regulaciones del río cercano e impactos locales. Sin embargo, actualmente existe poca documentación completa sobre el comportamiento hidrológico del cuerpo de agua. En cuanto al balance hídrico, son desconocidos los datos de la cantidad de agua que

se extrae y se aporta hacia la ciénaga. Igualmente, falta recopilar y analizar la información climatológica para su posterior caracterización.

Aunque el régimen hídrico en el lugar es de importancia para toda la biodiversidad y ecosistema de la zona, hacen falta estudios hidrológicos de línea base que permitan la planificación de las fincas y el mantenimiento de la salud ecológica del sistema. La falta de información del comportamiento hídrico ha desencadenado que los recursos naturales no estén teniendo un manejo adecuado y que aumenten las presiones a través de los años.

Un ejemplo de lo anterior es la aparición de una mayor cantidad de plantas acuáticas foráneas en los últimos años. Este comportamiento es determinado por la frecuencia, duración, profundidad y temporada de la inundación. Es decir, los cambios en el régimen hídrico a menudo resultan en cambios en la composición florística del humedal (Arthington & Zalucki, 1998).

Incluso, la ausencia de límites establecidos, en cuanto al área protegida de la ciénaga de Las Macanas, ha aumentado la vulnerabilidad hacia las actividades de carácter antropogénicas no reguladas. Aunque esta sea un área donde muchas de las actividades existentes son de subsistencia, la falta de regulación en cuanto a estas genera presiones en el humedal, como es el caso de la ganadería extensiva. En cuanto a las zonas de amortiguamiento, no se tiene muy claro cuáles son los límites entre el área protegida y las personas con derechos posesorios.

El ganado no tiene límites de desplazamiento, por lo que recorren desde zonas de amortiguamiento hacia al área protegida hasta adentrarse al cuerpo de agua (**Figura 7**). Esto se da más en la época seca, cuando los animales buscan agua para refrescarse y las zonas inundadas son menores, lo cual puede tener consecuencias negativas, como la contaminación ocasionada por las excretas alrededor de todo el humedal y el pisoteo que altera el suelo. El aspecto positivo de esta actividad es que las reses ayudan al equilibrio ecológico, puesto que mantienen limpia el agua de las plantas acuáticas foráneas que aparezcan.

Entre las actividades que no están permitidas dentro de los límites de la ciénaga de Las Macanas se encuentran: afectar el flujo hidrológico de la misma, el uso indebido de los productos de flora y fauna, la introducción de especies exóticas sin el permiso adecuado, depósito de desechos sólidos en el área, vertimiento de sustancias que contaminen el recurso hídrico y cualquier otra actividad que pueda dañar el área protegida (Resolución DAPVS-0007-2016, 2016). No obstante, la utilización de un sistema de riego, en las tierras de cultivo más cercanas al cuerpo de agua, hace que las aguas escurran hacia la ciénaga, debido al relieve del lugar. Si son aguas no tratadas, pueden contener residuos de productos químicos, como fertilizantes, usados para la siembra de cultivos agrícolas ocasionando también el afloramiento de mayor cantidad de plantas acuáticas en el espejo de agua.

Durante mucho tiempo, no se había tenido una delimitación definida con coordenadas del humedal, lo que amplificaba la dificultad del manejo de sus recursos. La resolución DAPVS del 2016 fue un avance en este sentido, dado que resolvió establecer los nuevos

límites del área protegida, categorizándola como Área de Recursos Manejados Ciénaga de Las Macanas; aunque el proceso de límites culminó en que el área protegida pasara de 2000 ha a 857 ha. Estas delimitaciones parecen no tener previamente ningún estudio hidrológico profundo en el lugar que determinase las necesidades de cuidado del humedal y han ido disminuyendo notablemente la extensión de esta.

1.6. Justificación

Los eventos extremos del clima han afectado a la región seca de Azuero por mucho tiempo. Por ejemplo, el Niño del 2015, conllevó una falta de agua para pozos y abrevaderos, perdiéndose muchas cosechas. Como medida de emergencia, se construyeron reservorios y se perforaron pozos subterráneos y abrevaderos para obtener el agua necesaria. Sin embargo, la falta de estudios científicos no permite que estos esfuerzos se traduzcan en soluciones sostenibles en el tiempo, que permita evitar déficits de agua y acuíferos (Comité Alto Nivel de Seguridad Hídrica, 2016).

La ciénaga de Las Macanas, al ser parte de la región de Azuero, no escapó de esta realidad, y al no contar con planes de contingencia en caso de situaciones similares, se complica mucho, debido a que una vez se seca un humedal es difícil y costoso que vuelva a la normalidad. Este evento no solo afecta la salud hídrica del humedal, sino también a las actividades económicas dependientes de esta, produciendo muertes del ganado y pérdida de cosechas (Mendoza, 2015).

Este evento extremo causó en la ciénaga cambios en la ecología y el ecosistema del lugar, tales como: la disminución de la presencia de aves migratorias y la aparición de plantas acuáticas foráneas. Aunque al año siguiente el humedal volvió a llenarse de agua, regresaron las aves en menor cantidad en comparación con los años anteriores de la sequía (Mendoza, 2015). En la actualidad, hay un número bajo de aves y también se ha registrado una disminución del número de peces.

Otro evento extremo que afecta el humedal han sido las inundaciones, las cuales son beneficiosas para limpiar el espejo de agua; pero también afectan de manera negativa a los productores del área. El incremento del nivel de agua (**Figura 9**), en los meses de estación lluviosa, puede generar pérdidas recurrentes en la siembra en asentamientos campesinos ubicados en las zonas aledañas a la ciénaga (Comunicación personal con María Pinzón, 2020).



Figura 9: Inundación en la zona de visitantes en la ciénaga (6 de noviembre de 2020).

Fuente: Propia.

Aunque el régimen de flujo del cuerpo de agua es de importancia para toda la biodiversidad y ecosistema de la zona, no existen estudios hidrológicos y documentales, solo se encuentran artículos y noticias, aunque no completamente actualizados. La falta de estudios de línea base puede ser ocasionada por la poca atención en cuanto a la importancia de este humedal como área protegida. Debe ser un objetivo tener un régimen de flujo que asegure la extensión de la vegetación nativa en condiciones saludables y resilientes, que apoye los requisitos de hábitat de las aves acuáticas y otras especies de animales, además de las funciones clave del ecosistema.

El uso correcto de los recursos naturales permitirá seguir manteniendo, de forma sostenible, el único humedal de agua permanente de las provincias centrales. Sin embargo, esto solo es posible mediante estudios profundos y apropiados en la zona.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Realizar análisis espacio temporal en las épocas seca y lluviosa en la ciénaga de Las Macanas, que contemple los efectos del balance hídrico en la misma.

1.7.2. Objetivos específicos

- Hacer entrevistas a actores claves del sitio para conocer su perspectiva y conocimiento empírico del comportamiento del humedal.

- Analizar los cambios de precipitación y evapotranspiración alrededor de la ciénaga.
- Detectar y cuantificar las entradas y salidas de agua.
- Determinar cuál es la principal entrada de agua de la ciénaga.
- Descargar y procesar imágenes satelitales históricas de periodos secos y lluviosos para obtener diferentes extensiones de clases de coberturas.
- Contrastar los cambios en las diferentes clases de coberturas con la data meteorológica, como precipitación e hidrología, como el río Santa María.

1.8. Alcance

Una ciénaga no está libre de sufrir alteraciones que amenacen el sistema, tales como sequías prolongadas, degradación de suelos, contaminación de las aguas, sedimentación, etc. Sin embargo, un humedal saludable y bien manejado desempeña un rol importante en la reducción de riesgos y desastres naturales. En este sentido, la ciénaga mitiga la erosión del suelo y el impacto de las inundaciones, puesto que tienen la capacidad de almacenar grandes cantidades de agua, reduciendo, por ende, el caudal máximo de las crecidas en las épocas lluviosas y almacenando agua durante la época seca (Ministerio de Ambiente, 2018).

La ciénaga de Las Macanas debe presentar un régimen de inundación capaz de mantener sus propios ciclos ecosistémicos, como también brindar servicios sociales y ambientales. Cuantificar la hidrología del humedal, de manera espacio temporal a largo plazo, es fundamentalmente importante para muchos aspectos del manejo y uso del humedal; puesto

que esta data puede ser utilizada para calibrar modelos hidrológicos complejos e investigar causas de cambio del humedal. Se evaluará la información de la extensión de coberturas de suelo de manera mensual y anual utilizando sensores remotos. Al calcular el balance hídrico del humedal, se tiene una mejor idea de cuáles pueden ser las principales entradas y pérdidas de agua de este. Se puede evaluar su impacto en el cuerpo de agua al definir la relación entre diferentes variables climatológicas y las diferentes coberturas de suelo, específicamente del área inundada de la ciénaga.

Las investigaciones hidrológicas, como la presentada en este trabajo, son una oportunidad valiosa para promover el uso y manejo sostenible del mayor humedal de agua dulce de las provincias centrales. Es necesaria la divulgación del conocimiento generado sobre la ciénaga de Las Macanas, con el fin de mantener y restaurar las zonas afectadas, y poder conseguir un régimen hidrológico que conserve sus características ecológicas.

Por ejemplo, los resultados obtenidos en esta tesis pueden servir para organizaciones comunitarias que intentan implementar mejores prácticas de manejo integral, promoviendo una cultura de humedales. Es igualmente importante promover alianzas entre la sociedad civil y el sector privado, que faciliten la creación de políticas participativas y hacer que las instituciones públicas y privadas puedan realmente hacer su papel de gestoras de ecosistemas.

CAPÍTULO 2: BALANCE HÍDRICO

En este capítulo, se explicará cómo se estudió el balance hídrico de la ciénaga de Las Macanas, definiendo conceptos básicos de hidrología y haciendo una descripción cualitativa y cuantitativa de los mismos. Se presenta la metodología a seguir para medir las entradas y salidas de agua del área de estudio.

2.1. Marco teórico

2.1.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un proceso continuo compuesto de diferentes elementos, que incluyen la evaporación de la superficie del agua y el suelo desnudo, la evapotranspiración de la tierra con vegetación, el transporte de vapor de agua en la atmósfera, la formación de gotas de nubes y la dinámica de las nubes, los mecanismos que conducen a la precipitación líquida y sólida, el movimiento del agua y el cambio en la humedad del suelo en el suelo no saturado, incluida la dinámica de las raíces, la escorrentía superficial y fluvial, y el flujo de agua subterránea.

El ciclo del agua del sistema de la Tierra y su variabilidad a escala global, regional y local están influenciados por una variedad de procesos e interacciones mutuas, mecanismos de retroalimentación y también se ven afectados por procesos antropogénicos. Las escalas en las que los procesos interactúan, tanto espacial como temporalmente, varían en la atmósfera, la hidrosfera, la criósfera y la biosfera de manera compleja (Bonnet, 2014).

Precipitación

La precipitación es el agua que se libera de las nubes en forma de lluvia, nieve o granizo. Dentro del ciclo del agua, la precipitación proporciona el suministro de agua atmosférica a la Tierra. La mayor parte de la precipitación cae en forma de lluvia (U.S. Geological Survey, n.d.).

Evapotranspiración

La evaporación es el proceso mediante el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se elimina de la superficie de evaporación (eliminación de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, como lagos, ríos, pavimentos, suelos y vegetación húmeda.

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos vegetales y la eliminación del vapor a la atmósfera. Los cultivos pierden su agua predominantemente a través de las estomas. Estas son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales pasan los gases y el vapor de agua. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, es decir, en los espacios intercelulares, y el intercambio de vapor con la atmósfera está controlado por la apertura estomática. Casi toda el agua absorbida se pierde por transpiración y solo una pequeña fracción se utiliza dentro de la planta.

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente, y no hay una manera fácil de distinguir entre los dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en la capa superior del suelo, la evaporación de un suelo cultivado está determinada principalmente por la fracción de la radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye durante el período de crecimiento a medida que se desarrolla el cultivo y el dosel del cultivo da sombra cada vez más al área del suelo. Cuando el cultivo es pequeño, el agua se pierde predominantemente por evaporación del suelo, pero una vez que el cultivo está bien desarrollado y cubre completamente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal.

La partición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración se presenta en correspondencia con el área foliar por unidad de superficie del suelo debajo de ella. En la siembra, casi el 100 % de la ET proviene de la evaporación, mientras que, en la cobertura total del cultivo, más del 90 % de la ET proviene de la transpiración (Food and Agriculture Organization (FAO), n.d.).

Escorrentía

La precipitación que no es evaporada se mueve (debido a la gravedad) en forma de escorrentía superficial o subsuperficial. Igualmente, parte de la precipitación se filtra en el suelo para formar reservas subterráneas (acuíferos). La escorrentía es una parte intrincada del ciclo natural del agua (U.S. Geological Survey, n.d.).

Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual el agua en la superficie del suelo ingresa al suelo. Es ampliamente estudiada tanto en hidrología como en las ciencias del suelo.

Agua subterránea

El agua subterránea constituye una parte del ciclo hidrológico. Las formaciones acuíferas de la corteza terrestre actúan como conductos de transmisión y como depósitos para el almacenamiento de agua. El agua ingresa a estas formaciones desde la superficie del suelo o desde cuerpos de agua superficial, luego de lo cual viaja lentamente por distancias variables hasta que regresa a la superficie por la acción del flujo natural, las plantas o el ser humano (Todd, 2005).

2.2. Metodología

2.2.1. Área de estudio

Topografía

Se definió como área de estudio el área de drenaje de la ciénaga de Las Macanas, delimitándose como una cuenca hidrográfica, y tomando como punto de desembocadura la unión del afluente de Los Toritos con el río Escotá. La topografía del terreno fue descargada de la página oficial del Tommy Guardia, y las curvas de nivel fueron exportadas al

programa de Autodesk Civil 3D, el cual permitió crear una superficie más realista del terreno (**Figura 11**), para luego delimitar un área de 2150 hectáreas (**Figura 10**). La topografía de la microcuenca es, en su mayoría llana, las pendientes no suelen superar los 6 grados, con elevaciones oscilando entre 0 m.s.n.m – 15 m.s.n.m.

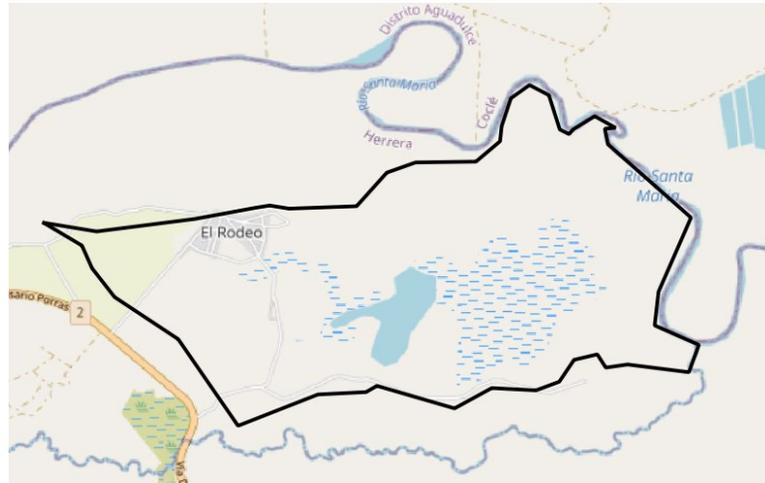


Figura 10: Área de drenaje de la microcuenca de la ciénaga de Las Macanas.

Fuente: Propia (Civil 3D).

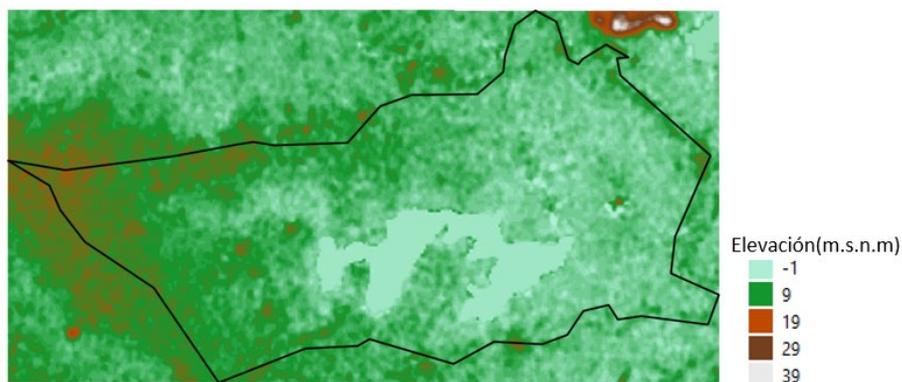


Figura 11: Elevaciones del área de drenaje de la ciénaga de Las Macanas, elaboradas a partir del programa QGIS con la herramienta STRM downloader.

Fuente: Propia.

Distribución del uso de suelo

La clasificación del uso (para el cálculo de la evapotranspiración y la escurrentía) de suelo se realizó por teledetección utilizando el software QGIS, como se muestra en la **Figura 12**. Los suelos se clasificaron en poblados, bosques, pastos y sembradíos de arrozales. Igualmente, se presentaron los cuerpos de agua y las zonas inundables. El arroz presenta una cobertura total de 323 ha, siendo el cultivo principal de la zona. Otros sembradíos incluyen la caña de azúcar, maíz y otros cultivos permanentes, los cuales abarcan 3.07 ha, lo que representa menos del 1 % del área protegida, por lo cual no fueron tomados en consideración.

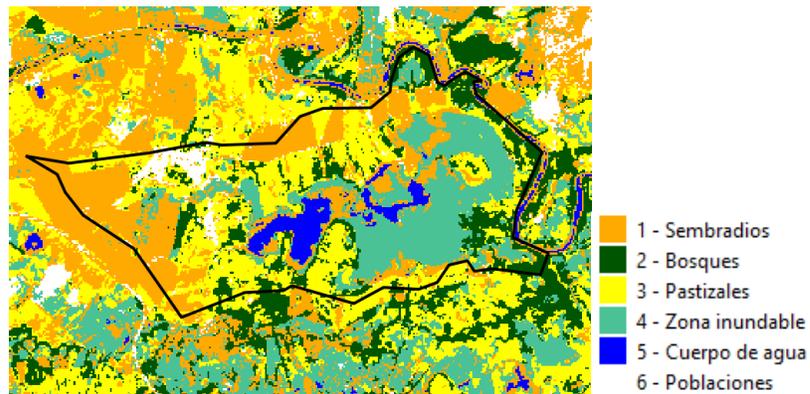


Figura 12: Clasificación del uso de suelo por teledetección en QGIS.

Fuente: Propia.

De las 2150 ha estudiadas, se vio que el uso de suelo dominante era del humedal, que abarca 820 ha, siendo 38.4 % del área de estudio; seguido de pastizales para ganadería, con aproximadamente 529 ha (23 % del área). Hay presencia de bosque latifoliado mixto

secundario, el cual rodea a los ríos Santa María y Escotá, ocupando un 2.25 % de la microcuenca.

2.2.2. Cálculo del balance hídrico

La ecuación del balance hídrico se empleó para describir el flujo del agua dentro y fuera de la microcuenca de la ciénaga. A partir de esta fórmula (Ec.1), se estudiarán los elementos de entrada y salida del agua. Para la entrada de agua, se tomó la precipitación, la escorrentía y el aporte de agua de arrozales circundantes a la ciénaga, que depositan las aguas sobrantes de sus cultivos. Como elementos de salida se consideraron la evapotranspiración, entre otros elementos.

Ecuación general de balance hídrico

$$\Delta S = \sum [\text{ENTRADAS} - \sum \text{SALIDAS}]$$

$$\Delta S = P - \sum (ET + R + G) \quad (\text{Ec.1})$$

En donde:

- ΔS =Almacenamiento (mm)
- P= Precipitación (mm)
- ET= Evapotranspiración (mm/día)
- R=Escorrentía (mm/día)
- G= Agua subterránea (mm/día)

Esta investigación abarcó dos etapas. La primera incluye el estudio del balance hídrico del año 2021 y la segunda, el estudio del comportamiento de las variables meteorológicas de los últimos 30 años (1990-2020), esto con la finalidad de estudiar la actividad

climatológica de la zona. La data del año 2021 se midió mensualmente a través de una estación meteorológica instalada en el humedal. Se organizó un estricto cronograma de actividades para medir la escorrentía mediante aforos en la microcuenca y se instalaron medidores de nivel de agua en puntos estratégicos para monitorear la presencia de aguas subterráneas durante este año.

Para el segundo período (1990-2020), se analizaron anualmente los distintos parámetros climáticos que afectan el balance hídrico, como por ejemplo, temperatura, precipitación y humedad, entre otros. Esto, con el fin de hacer una estimación del balance en dichos años para estudiar cómo estos se han comportado a través del tiempo.

2.2.2.1. Precipitación

La precipitación es un factor importante en un balance hídrico, ya que representa generalmente la principal entrada de agua. Esta variable es monitoreada de forma constante, para obtener resultados confiables del aporte de la precipitación al balance hídrico. En este análisis, se encontró que la estación meteorológica de ETESA, ubicada en Divisa (132-012) y que cuenta con 48 años de registros (1964-2012), arrojó una precipitación promedio de 143.8 mm.

Adicional a la estación 132-010 de ETESA, para esta investigación se utiliza un pluviómetro, propiedad del Ministerio de Ambiente, y una estación meteorológica instalada por el equipo de CREHO Ramsar y EcoBiosfera. El pluviómetro es de la marca Belfort observatory, y es un pluviómetro manual, está ubicado en la comunidad de El

Rincón, y tiene data desde mayo de 1997 hasta diciembre del año 2021. La estación meteorológica está dentro del área de recursos múltiples, y se instaló en diciembre del año 2020. La data de dicha estación fue descargada mediante la aplicación del programa Tempest Weather Flow. La localización de dichas estaciones se presenta en la **Figura 13**.



Figura 13: Localización de las estaciones meteorológicas y pluviómetro.

Fuente: Propia.

En la **Tabla 5**, se presentan los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas y el pluviómetro utilizado. La data fue procesada usando el programa de Microsoft Excel 2017. Dado que la estación de ETESA contaba solo con datos del período 1990-2012, se evaluó el error absoluto medio (MAE), la raíz de la desviación cuadrática media (RMSE) y el t-test para los valores anuales y mensuales, comparándolos con los datos del pluviómetro de El Rincón para confirmar si tenían relevancia estadística.

Tabla 5: Estaciones meteorológicas circundantes a la ciénaga de Las Macanas.

Entidad	Ubicación	Tipo de estación	Elevación (m.s.n.m)	Latitud	Longitud
ETESA	Divisa	Estación meteorológica	12	8.126988°	80.688779°
MiAmbiente	El Rincón	Pluviómetro	11	8.118977°	80.616751°
CREHO	Ciénaga de Las Macanas	Estación meteorológica	3	8.113019°	80.597396°

Fuente: Propia.

2.2.2.2. Evapotranspiración

La evapotranspiración se puede dividir en evapotranspiración potencial, la cual es la cantidad máxima de agua que se puede evaporar, y la evapotranspiración real, que es la producida bajo las condiciones existentes del terreno.

2.2.2.3. Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración se obtuvo desde de la estación meteorológica Divisa (132-012) de ETESA. A partir de los datos de humedad relativa, viento a 2 m, temperatura máxima y temperatura mínima, se usó la fórmula de Penman Monteith para calcular la evapotranspiración potencial de los años 1990 al 2012. Una vez calculada dicha evapotranspiración, se comparó con la evaporación con tanque también medida con la estación de Divisa (132-012), para verificar la consistencia de los datos de esta.

Adicionalmente, para los años 1990-2021, se utilizaron los parámetros meteorológicos derivados del modelo de asimilación GMAO MERRA-2 de la NASA y GEOS 5.12.4 FP-

IT. MERRA-2 es una versión del Sistema de Asimilación de Datos del Sistema de Observación de la Tierra Goddard (GEOS) de la NASA, brindando a su vez datos de humedad relativa, viento a 2 m, temperatura máxima y temperatura mínima.

Una vez se obtuvieron los parámetros climáticos, estos fueron procesados en el software ETo calculator desarrollado por la FAO, que usa la ecuación de Penman Monteith. La ecuación Penman Monteith, utilizada por el programa, usa un cultivo hipotético de pasto verde que ocupa una amplia superficie y una altura asumida de 0.12 m, que son condiciones muy similares a las de la ciénaga. Se analizó con el programa QGIS si las áreas de cultivo tenían un porcentaje significativo aproximadamente mayor a un 15 % para verificar la necesidad de ajuste en el coeficiente de cultivo de la ecuación Penman Monteith. Dado que los valores fueron menores a 15 %, este ajuste no fue necesario.

Para el cálculo de la evapotranspiración real, se utilizó la metodología presentada en el manual de la FAO (Food and Agriculture Organization (FAO), n.d.) (Ec.2)

$$Etr = (Etp) \left[(Kc) \left(\frac{A}{At} \right) \right] \quad (\text{Ec.2})$$

Etr = Evapotranspiración real

Etp = Evapotranspiración potencial

Kc = Coeficiente del cultivo

A = Área del cultivo

At = Área total

La **Tabla 6** muestra las áreas y coeficientes de cultivo usados para el cálculo de la evapotranspiración potencial. Las áreas presentadas fueron extraídas de la **Figura 12**.

Tabla 6: Superficie y coeficientes de cultivo de la ciénaga de Las Macanas.

Uso y cobertura de suelo	A (km ²)	Kc
Humedal	8.23	1
Espejo de agua	0.80	1.05
Pastizales	5.83	0.85
Bosque latifoliado mixto secundario	2.67	0.6
Arrozales	3.34	1.2
Poblado	0.64	1

Fuente: Propia.

2.2.2.4. Escorrentía

La escorrentía de una cuenca se mide, generalmente, mediante aforos de los ríos que la componen. Para nuestro caso, esta variable se calculó por medio de modelación hidrológica. Para esto, fue necesario dividir la microcuenca en áreas que tuvieran características similares de uso de suelo o de pendiente. Para ambas características, se empleó el software QGIS 3.16. Ver **Figura 11** y **Figura 12** (pendiente y clasificación de suelo, respectivamente). Las cuatro divisiones resultantes se pueden apreciar en la **Figura 14**.

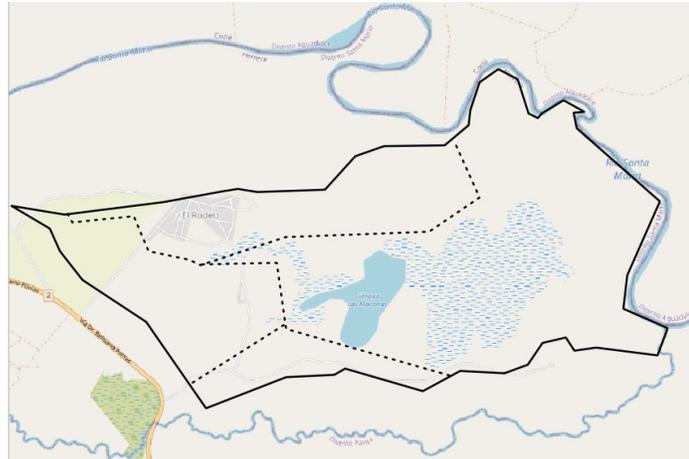


Figura 14: Subdivisiones de la microcuenca ciénaga de Las Macanas.

Fuente: Propia.

Se calculó el tiempo de concentración para cada subdivisión de la microcuenca, en el cual se utilizó la siguiente ecuación empírica (Ec.3). (United States Department of Agriculture, 2010):

$$L = \frac{l^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900Y^{0.5}} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde

L = Tiempo de retraso (h)

l = Longitud del flujo (ft)

Y = Promedio de pendiente de la cuenca %

S = Máxima retención potencial

$S = \frac{1000}{CN} - 10$ donde CN es el factor retardante.

Para calcular la longitud del flujo, se utilizó la relación empírica entre la longitud del flujo y el área de edad de drenaje, utilizando datos del Servicio de Investigación Agrícola (ARS en inglés) para cuencas hidrográficas. (Ec. 4)

$$l = 209A^{0.6} \quad (\text{Ec.4})$$

Donde A es el área de drenaje en hectáreas y l es la longitud del flujo en pies.

2.2.2.5. Aforos de Campo

La **Figura 15** presenta los cuatro aforos realizados. Tres de estos puntos son canales construidos por las arroceras que conectan con la ciénaga, y son usados para descargar las aguas sobrantes del cultivo (aforos 1, 2 y 3). Dichos canales tienen flujos de agua constantes durante casi todo el año.

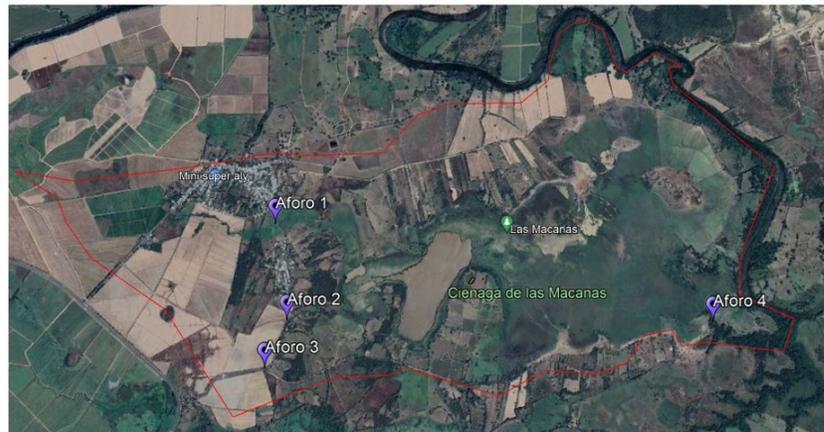


Figura 15: Puntos de aforo en la ciénaga Las Macanas. Los aforos 1 al 3 fueron en canales donde los arrozales descargan sus aguas y el aforo 4 en Los Toritos.

Fuente: Propia.

El último punto de interés, Los Toritos (aforo 4), se consideró como un punto tanto de entrada como de salida del agua. Adicionalmente, se calculó la esorrentía teórica (R), a través de las propiedades y características del suelo dentro de la microcuenca, lo cual permitió estimar la infiltración.

Debido a que el tamaño de los canales de los arrozales lo permiten, se empleó el método del flotador. Las giras de campo fueron programadas en dos etapas definidas por las estaciones lluviosa y seca de Panamá. Para la estación seca, se aforaron los tres canales de las arrocetas y en Los Toritos. En la estación lluviosa, se aforaron los mismos puntos, exceptuando el punto de Los Toritos.



Figura 16: Aforo 2 de la ciénaga.

Fuente: Propia

Los instrumentos usados para hacer los aforos fueron: cronómetro, cinta métrica, pelota (flotador), cuerda y cinta adhesiva. Se calculó el perfil transversal del canal, utilizando

mediciones de profundidad a intervalos de 20 cm. Se empleó una sección de 6 m de longitud. La velocidad promedio se midió, tomando el tiempo que tardaba el flotador en pasar de extremo a extremo de esta sección de 6 m. Este proceso se repitió 7 veces para obtener un promedio (**Figura 16**).

2.2.2.6. Infiltración

De acuerdo con datos del Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (Idiap) (Villarreal, 2018), la microcuenca de la ciénaga de Las Macanas posee mayormente suelos franco-arcillosos.

Pruebas de infiltración con Mini Disk

Se usó un infiltrómetro Mini Disk, de la empresa Decagon Devices, Inc, para estimar la velocidad de infiltración en el suelo no saturado. El procedimiento consistió en escoger una superficie de suelo lo más horizontal posible, limpiarla de hierbas y material grueso como grava, para luego aplicar una fina capa de arena seca.

En cada prueba, se llenó la cámara de burbujas con agua y se ajustó el tubo de control de succión -2 cm. Sucesivamente, el reservorio se llenó con agua y con ese valor se registraba el volumen de agua inicial. Una vez hecho este procedimiento, se colocó el infiltrómetro encima de la arena y se iniciaba la prueba, tomando nota de la variación del volumen en intervalos de 30 segundos hasta llegar a los 5 minutos. Adicionalmente, se tomó una

muestra del suelo donde se hizo la medición. Se tomaron muestras en seis puntos (ver **Figura 17**), cuya ubicación se presenta en la **Tabla 7**.



Figura 17: Muestras tomadas para análisis de conductividad hidráulica.

Fuente: Propia.

Tabla 7: Localización de los puntos tomados para análisis de conductividad hidráulica en la ciénaga de Las Macanas.

Punto	Latitud	Longitud
Punto 1	8.098916	-80.60829
Punto 2	8.111452	-80.597867
Punto 3	8.124246	-80.583875
Punto 4	8.120633	-80.60767
Punto 5	8.100094	-80.610757
Punto 6	8.105158	-80.608747

Fuente: Propia.

Análisis de la conductividad hidráulica no saturada

El infiltrómetro de Mini Disk utilizado es de la marca Decagon Devices, que suministra un MACROS Excel, el cual utiliza el método de Zhang (Zhang, 1997) para facilitar los cálculos de la pendiente de la curva de la infiltración acumulada frente a la raíz cuadrada del tiempo en función de los datos recopilados en los pasos anteriores. Esta hoja de cálculo utiliza datos obtenidos de tiempo, centímetros de agua infiltrada, modelo de infiltrómetro, succión utilizada y textura de suelo. La **Tabla 8** presenta una clasificación de los valores de conductividad hidráulica no saturada encontrados.

El infiltrómetro de Mini Disk utilizado es de la marca Decagon Devices, que suministra un MACROS Excel, el cual utiliza el método de Zhang (Zhang, 1997) para facilitar los cálculos de la pendiente de la curva de la infiltración acumulada frente a la raíz cuadrada del tiempo en función de los datos recopilados en los pasos anteriores. Esta hoja de cálculo utiliza datos obtenidos de tiempo, centímetros de agua infiltrada, modelo de infiltrómetro, succión utilizada y textura de suelo. La **Tabla 8** presenta una clasificación de los valores de conductividad hidráulica no saturada encontrados.

Tabla 8: Rangos de conductividad hidráulica propuesta.

Clase	Conductividad Hidráulica	
	cm/h	
Muy lenta	0.1	0.03
Lenta	0.1 - 0.5	0.03 - 0.12
Moderadamente lenta	0.5 - 2	0.12 - 0.5
Moderada	2.0 -6.0	0.5 - 1.50
Moderadamente rápida	6.0 - 12.0	1.50 - 3.00
Rápida	12.0 - 18.0	3.00 - 4.50
Muy rápida	>18.0	>4.50

Fuente: Service, E.U.A. Soil Conservation, 2008.

Utilizando Excel, los resultados fueron importados al programa QGIS 3.16, que emplea el método de interpolación “Inverse Distance Weighted” (IDW). Estos puntos de muestra se ponderan durante la interpolación, de manera que la influencia de un punto en relación con otro disminuye con la distancia desde el punto desconocido creado para el desarrollo de un mapa de isolíneas.

Escorrentía teórica

Con los mapas realizados en QGIS (**Figura 18**), los cuales fueron elaborados con información extraída del Idiap (Villarreal, 2018), se dividió el área de estudio con el fin de conocer la capacidad hidráulica. A través de estos cálculos, se obtuvo el coeficiente de infiltración. Con dichos coeficientes y la precipitación, se estimó la escorrentía. La **Tabla 9** presenta los grupos hidrológicos de suelo a efectos de la determinación del valor inicial del umbral de escorrentía.

Tabla 9: Grupos hidrológicos de suelo a efectos de la determinación de valor inicial del umbral de escorrentía.

Grupo	Infiltración (cuando están muy húmedos)	Potencia	Textura	Drenaje
A	Rápida	Grande	Arenosa Arenosa-limosa Franco-arenosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franca Franco-arcillosa- arenosa Franco-limosa Franco-arcillosa	Bueno a moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco-arcillosa- limosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy lenta	Pequeño (litosuelo) u horizontes de arcilla	Arcillosa	Pobre o muy pobre

Fuente: Propia.

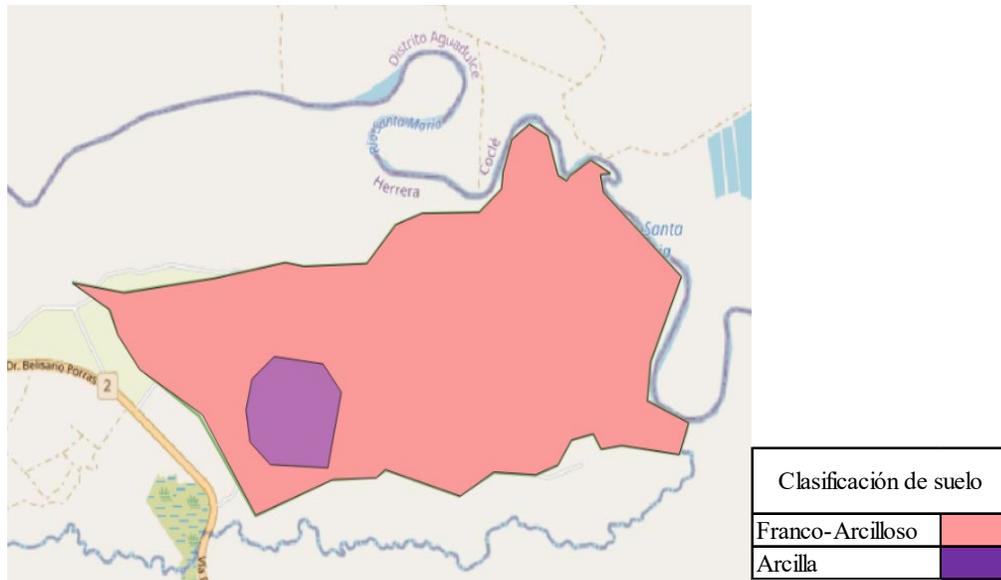


Figura 18: Clasificación de suelo de la microcuenca del humedal.

Fuente: Propia.

Se utilizó el método del S.C.S (Soil conservation service) (Ec.5) para calcular la escorrentía superficial diaria para el año 2021. Para la aplicación de este método, es necesario conocer los coeficientes CN, los cuales dependen del uso de suelo y de características, tales como textura y conductividad hidráulica. Luego, a los valores de CN se les aplicó un factor de ponderación.

$$CN_{pond} = \frac{\sum CN * A}{\sum A} \quad (Ec.5)$$

Donde:

CN = Coeficiente de suelo obtenido según tipo de suelo y uso

A = Área según cada coeficiente de suelo

Con el valor de CN, se calcula el potencial máximo de conservación del suelo (S) (Ec.6), para luego estimar la escorrentía teórica mensual (Ec.7) (Román, 2019):

$$S(mm) = \frac{25400}{CN_{Pond}} - 254 \quad (Ec.6)$$

$$\Sigma P_n = \frac{(\Sigma P - 0.2 \cdot S)^2}{\Sigma P + 0.8 \cdot S} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde, P_n = Escorrentía teórica (mm) y ΣP = Precipitación total (mm)

2.2.2.7. Agua subterránea

Por su cercanía al río Santa María, es muy probable que la ciénaga reciba ingresos de agua de este río, a través del agua subterránea. Para verificar esta entrada, se instalaron dos sensores (**Figura 19**), uno ubicado estratégicamente en un pozo fuera de servicio entre el río Santa María y la ciénaga, y el otro en el espejo de agua del humedal. Se analizaron principalmente los periodos de eventos extremos.

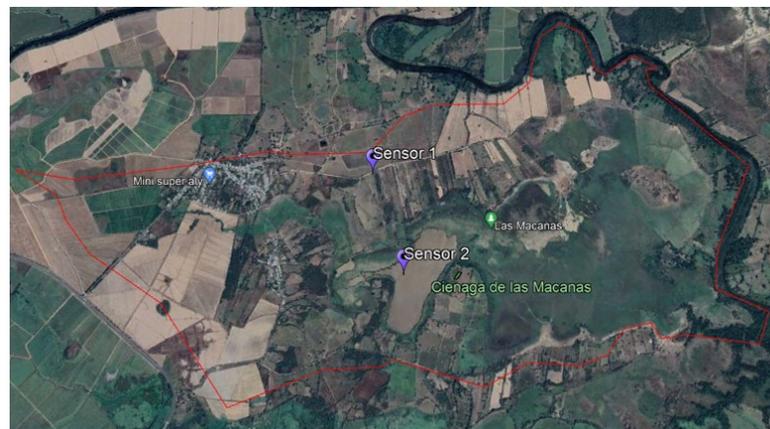


Figura 19: Localización de los sensores utilizados para medir el nivel del agua.

Fuente: Propia.

CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN ESPACIO TEMPORAL

En este capítulo, se detalla cómo se aplicó la teledetección al estudio multitemporal y su relación con la clasificación supervisada de imágenes satelitales. Se presenta la metodología utilizada en la determinación de las coberturas y en el uso de la data climatológica e hidrológica.

3.1. Marco teórico

3.1.1. Teledetección

La teledetección es el uso de sensores remotos para analizar datos de la superficie terrestre. Se captura información de la cobertura de la tierra, de una manera que no es posible desde el suelo, a partir de la intensidad de radiación electromagnética. Este tipo de observación permite obtener imágenes digitales de una gran gama de resoluciones temporales, geométricas, espectrales y radiométricas, las cuales se definen de la siguiente manera:

Concepto de imagen digital (Atencia et al., 2008):

- Resolución geométrica o espacial: Este concepto designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen. Está determinado por el tamaño del píxel, medido en metros sobre el terreno.
- Resolución espectral: Consiste en el número de canales espectrales (y su ancho de banda), que es capaz de captar un sensor.
- Resolución radiométrica: Indica el número de bits que se utiliza para almacenar cada valor del píxel de la imagen y, por tanto, la cantidad de niveles de gris en que se almacena la radiación recibida para ser procesada.

- Resolución temporal: Es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre. Es decir, cuánto tiempo pasa el satélite por la misma zona de la Tierra.

Una de las potencialidades de la teledetección con sensores pasivos, para estudios como este, es la capacidad de separar diferentes cubiertas de suelo, como masas de agua, vegetaciones, detección de fenómenos naturales o antropogénicos (Alonso, n.d.). Para las observaciones con sensores remotos, los tres elementos principales son: el sensor, el objeto y el flujo energético que permite la relación entre ambos.

Los sensores pueden ser instalados en diferentes medios de observación, como lo son las estaciones espaciales (Castaño et al., n.d.). Entre las misiones satelitales más importantes se pueden mencionar: Landsat, Sentinel, y Kronos, entre otras. El trabajo de los sensores remotos es recolectar información acerca de atributos terrestres y presentarla como valores en imágenes, guardadas en bandas ráster. Estas bandas se pueden combinar para crear composiciones de bandas, dependiendo de las necesidades.

Para usar imágenes satelitales en el área de estudio, uno de los primeros pasos es examinar la información visualmente para encontrar ciertas propiedades. Las imágenes tienen características únicas que pueden destacarse y que dependen del tipo de sensor, como por ejemplo, el sensor OLI, que opera en nueve longitudes de onda en el rango de $0.433 \mu\text{m}$ - $2.300 \mu\text{m}$ (micrómetros), proporciona imágenes con una resolución máxima de 15 metros. Dependiendo del sensor, la cantidad y tipo de características medidas dentro del estudio

pueden variar. Los detalles técnicos de cada sensor pueden ser encontrados en la metadata del conjunto de datos. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor genera una serie de datos, que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra (MITMA, n.d.).

3.1.1.1. Firmas espectrales

La firma espectral es lo que permite identificar y discriminar los diferentes objetos de la naturaleza, esto es porque cada objeto refleja, emite o absorbe la energía de forma diferente, lo cual depende de su composición química y de sus características físicas. En la **Figura 20**, se puede ver cómo la reflexión directa de la radiación solar en el agua es transmitida para ser detectada por un sensor satelital. La atmósfera es un elemento que puede dar dificultades, puesto que se interpone entre la superficie y el sensor, dispersando y absorbiendo parte de la señal.



Figura 20: Distribución de la radiación cuando llega a un objeto.

Fuente: Karszenbaum & Barraza, 2008.

Para poder identificar los diferentes objetos y procesos en la superficie terrestre, es importante conocer la reflectividad de estos con respecto a las longitudes de onda. Cada objeto (agua, vegetación o suelo) refleja la radiación de forma diferente, desarrollando lo que se conoce como signatura o firma espectral, que permite su distinción (Alonso, 2006). En la **Figura 21**, en el eje X, se pueden ver las diferentes longitudes de onda y, en el eje Y, el porcentaje de reflectividad, también conocida como firma espectral, lo que constituye la identidad de los objetos.

Las firmas espectrales muestran la radiación reflejada por los objetos en función de su longitud de onda. La radiación reflejada absorbida por el sensor se puede analizar por diferentes canales. No todos los elementos reflejan de igual manera, por lo que si se conoce el canal en el cual se está trabajando se puede fotointerpretar y trabajar utilizando la teledetección (Gis&Beers, 2017).

3.1.1.2. Interacción de los elementos de la superficie terrestre con la radiación

Respuesta espectral del agua: El agua en estado líquido tiene la capacidad de absorber energía a lo largo de las bandas de satélite que se estén usando. Como la energía es absorbida por el agua, siempre se observarán las masas de agua líquidas en tonalidades oscuras, salvo que presente sólidos en suspensión y turbidez (Gis&Beers, 2019).

El agua clara tiene excelentes propiedades en cuanto a la absorción de energía en banda infrarrojo cercano (NIR) y transmisión en el espectro visible. Por lo que la reflectividad es mucho menor en el infrarrojo cercano (NIR), y permitirá la distinción entre áreas de tierra

y agua. Si el agua contiene turbidez, la respuesta espectral variará dependiendo del tipo de turbidez.

Respuesta espectral de la vegetación: La reflectividad de la vegetación sana es baja en la banda de luz visible; sin embargo, es muy alta en la banda infrarrojo cercano (NIR), debido a la escasa absorción de energía por las plantas en esta banda. En el caso de la vegetación enferma, disminuye un poco el NIR y aumenta la reflectividad en el rojo (banda 4) y azul (banda 2). La reflectividad también depende del contenido de agua de la planta, pues si aumenta su contenido, entonces disminuye la reflectividad por el aumento de absorción de radiación por el agua y viceversa (Alonso, 2006).

Respuesta espectral del suelo: La reflectividad es relativamente baja para todas las bandas, aunque aumentando hacia el infrarrojo. Existe cierta dependencia entre la reflectividad y contenido de agua del suelo, cuanto mayor sea el contenido de agua en el suelo, mayor va a disminuir en reflectividad la región (Alonso, 2006).

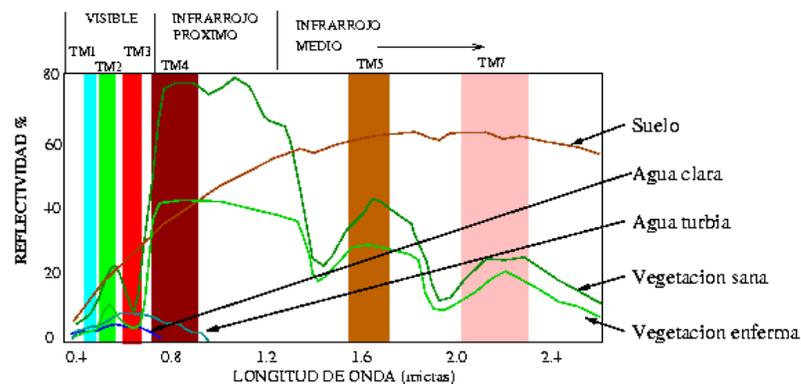


Figura 21: Reflectividad y firmas espectrales de las distintas coberturas de Landsat 7.

Fuente: Alonso, 2006.

3.1.1.3. Misiones Landsat

El programa de satélites Landsat es uno de los mejores para adquisición de datos históricos (Figura 22).

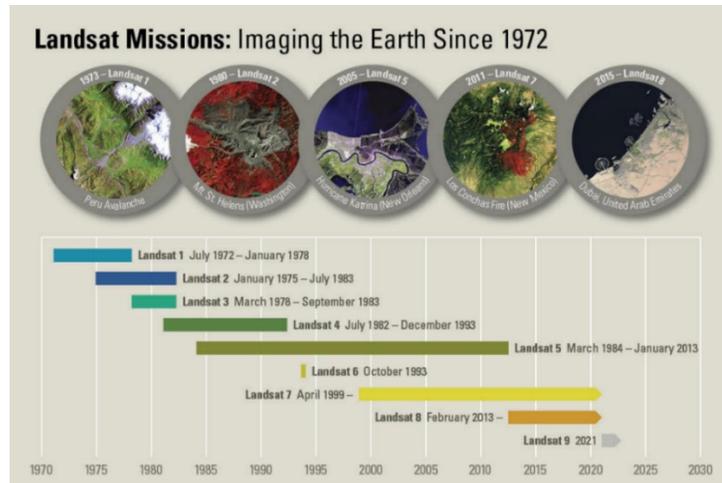


Figura 22: Historia de lanzamiento de la serie de satélites – Landsat desde julio de 1972 hasta el último previsto en el 2021.

Fuente: USGS, 2019.

LANDSAT 4 Y 5

El satélite Landsat 4 se lanzó en el año 1982 y Landsat 5, en marzo de 1984, teniendo los dos satélites sensores MSS (Sistema de Escáner Multiespectral) y TM (Mapeador Temático). MSS tiene una resolución espacial de 60 m y el TM tiene una resolución espacial de 30 m, ambos con una resolución temporal de 16 días. La misión Landsat 4 contaba con 4 bandas y la misión Landsat 5, con 7 bandas (Tabla 10).

Tabla 10: Bandas espectrales misiones Landsat 4 y Landsat 5.

LANDSAT 4 y 5 Banda	Sensor	Longitud de onda (µm)	Resolución Espacial (m)	Resolución Radiométrica
1 - Verde	MSS	0.50 - 0.60	60	8 bits
2 - Rojo	MSS	0.60 - 0.70	60	8 bits
3 - Infrarrojo Cercano (NIR1)	MSS	0.70 - 0.80	60	8 bits
4 - Infrarrojo Cercano (NIR2)	MSS	0.80 - 1.10	60	8 bits
1 - Azul	TM	0.45 - 0.52	30	8 bits
2 - Verde	TM	0.52 - 0.60	30	8 bits
3 - Rojo	TM	0.63 - 0.69	30	8 bits
4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	TM	0.76 - 0.90	30	8 bits
5 - Onda corta infrarroja (SWIR) 1	TM	1.55 - 1.75	30	8 bits
6 - Thermal	TM	10.40 - 12.50	120 * (30)	8 bits
7 - Onda corta infrarroja (SWIR) 2	TM	2.08 - 2.35	30	8 bits

Fuente: USGS, n.d

LANDSAT 7

El satélite Landsat 7 se lanzó en el año 1999, teniendo el sensor ETM+ (Mapeador Temático Mejorado), el cual posee una resolución espacial de 15 m, 30 m y 60 m, una resolución temporal de 16 días y una resolución radiométrica de 16 bits. La misión Landsat 7 cuenta con 8 bandas espectrales (**Tabla 11**).

Tabla 11: Bandas espectrales Misión Landsat 7.

Landsat 7	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Blue Band 1	0.45-0.52	30
Green Band 2	0.52-0.60	30
Red Band 3	0.63-0.69	30
NIR Band 4	0.77-0.90	30
SWIR -1 Band 5	1.55-1.75	30
TIR Band 6	10.40-12.50	60 (30)
SWIR -2 Band 7	2.09-2.35	30
Pan Band 8	.52-.90	15

Fuente: USGS, n.d

LANDSAT 8

El satélite Landsat 8 se lanzó en el año 2013, teniendo el sensor OLI (Operational Land Imager) y el sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor). El sensor OLI posee una resolución espacial de 15 m y 30 m, con una resolución temporal de 16 días. El sensor OLI promueve acceso a nueve bandas espectrales (**Tabla 12**).

Tabla 12: Bandas espectrales misión Landsat 8.
Landsat 8

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Fuente: Alonso, n.d

3.1.1.4. Combinaciones multiespectrales

La combinación de bandas multiespectrales nos permite analizar y discriminar aspectos de la superficie terrestre. Si se combinan de una manera determinada, pueden brindar información que se puede interpretar como vegetación, usos de suelos o masas de agua (Gis&Beers, 2017).

Composición en color natural - color verdadero Landsat 8 (bandas 4, 3, 2). Landsat 7 (RGB 3, 2, 1)

Gracias a esta combinación, es posible tener la percepción visual de la Tierra con nuestros ojos como si se estuviese en el espacio, también conocida como el espectro visible. Esta combinación consiste en las bandas visibles (rojo, verde y azul), y permite discriminar aguas como turbias y poco profundas (Atencia et al., 2008). Entre más oscuros sean los tonos de azul significa que el agua es más profunda. La vegetación se va a mostrar en tonalidad verde. Los suelos en tonalidades marrones y amarillos, y la roca en tonos plateados (**Figura 23**).



Figura 23: Composición en color verdadero.

Fuente: Jiménez, 2016.

Composición en falso color RGB. Landsat 8 (bandas 5, 4, 3) Landsat 7 (bandas 4, 3, 2)

Esta composición también conocida como infrarrojo. Es bastante útil para diferenciar el estado de la vegetación. Las tonalidades rojas se refieren a vegetación, en donde las más densas, arbóreas, como bosques y montes, se encuentran en tonalidades de rojo oscuro, y los cultivos y praderas vigorosas entre tonos claros de rojo y rosa. Las zonas urbanas y suelos desnudos son bastante identificables con tonos de celeste. En caso de cuerpos de agua, las tonalidades varían de acuerdo con la cantidad de partículas en suspensión, en las que los tonos de azul oscuro son aguas claras, pasando a un azul verdoso en cuerpos de agua con mayor turbidez y sedimentación. En el caso donde exista nula vegetación, las tonalidades son blancas (**Figura 24**).

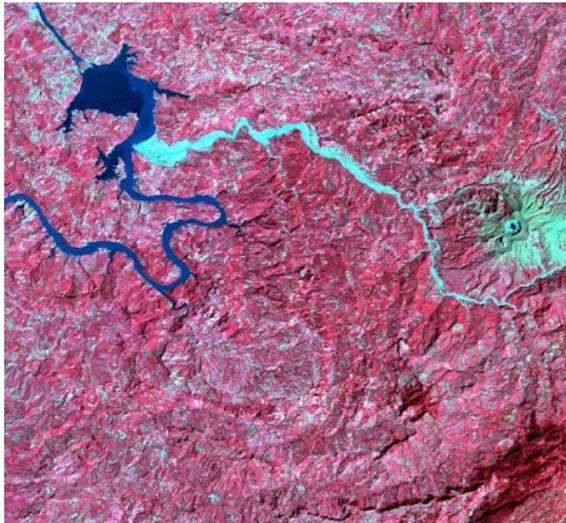


Figura 24: Composición en infrarrojo.

Fuente: Jiménez, 2016

Composición en falso color RGB. Landsat 8 (bandas 5, 6, 4). Landsat 7 (bandas 4, 5, 3)

Realza con gran detalle los límites de masas, agua y tierra. El agua se ve de color azul intenso. Los diferentes tipos de vegetación se muestran en colores marrones, verdes y naranja, esto dependiendo de la cantidad de humedad que contengan. Los colores son más anaranjados y chocolates cuando tienen más contenido de agua. En el caso de los suelos desnudos, se diferencian en color celeste (**Figura 25**).

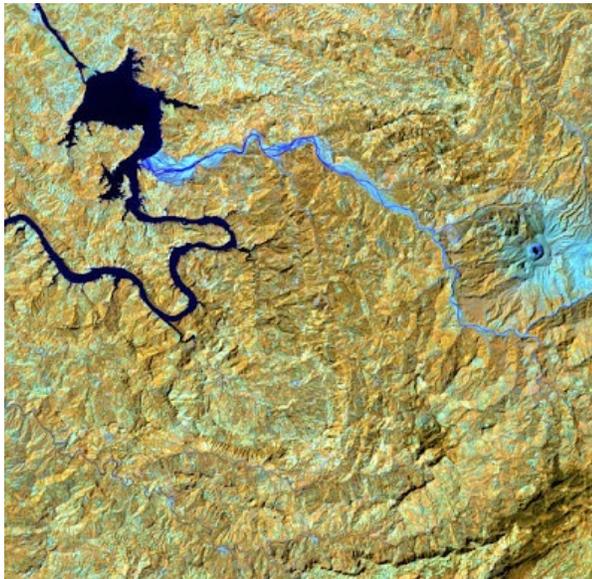


Figura 25: Composición para usos de suelo/masas de agua.

Fuente: Jiménez, 2016.

Composición en falso color RGB. Landsat 8 (bandas 6, 5, 4). Landsat 7 (bandas 5, 4, 3)

Esta composición muestra diferenciación entre el suelo y el agua. Los cuerpos de agua tienen tonalidades de color azul oscuro. La vegetación es de color verde y, en el caso de que contengan mucha humedad, pasa a un verde más oscuro. Si el suelo está desnudo, entonces sus tonalidades serán de color rosa, al igual que las zonas urbanas (**Figura 26**).

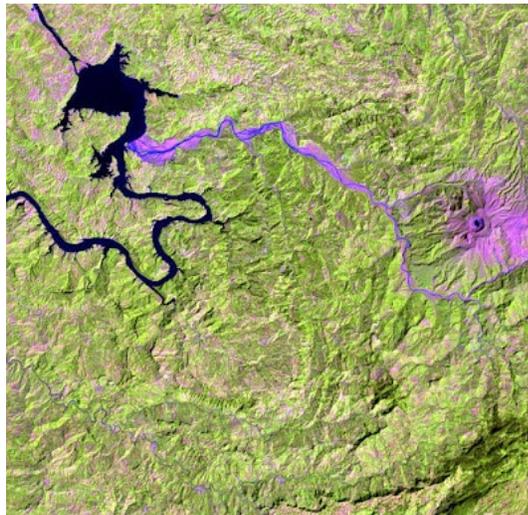


Figura 26: Composición en falso color RGB 654.

Fuente: Jiménez, 2016.

3.1.1.5. Sistema de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) permite acceder a observar, tratar y emplear una gran serie de información orientada geográficamente. Al utilizar datos de localización, se manipula la información geográfica de manera eficaz, creando mapas con información de tablas y bases de datos. También es posible poder ver patrones, tendencias y relaciones

que las bases de datos o listados no permiten y los resultados catastrales si permiten (Atencia et al., 2008).

El Sistema de Información Geográfica 'QuantumGis' (QGIS) es de licencia libre, y trabaja por medio de una caja de herramientas básicas que permiten el análisis espacial de diferentes elementos espaciales o estadísticos. Este tiene 'plugins' creados por los desarrolladores GIS, dentro de los cuales se establece el llamado SCP (Semi-Automatic Classification Plugin), que permite hacer el pre y postprocesamiento de las imágenes satelitales (Urquia, 2018).

3.1.1.6. Preprocesamiento de imágenes

Una imagen de satélite está sometida a una serie de interferencias que hacen que la información aparezca perturbada por una serie de errores (Correcciones a las imágenes de satélites, 2006). Las principales correcciones necesarias para la eliminación de anomalías en las imágenes son:

- Los fallos en los sensores generan pixeles incorrectos, lo que hace necesaria la corrección radiométrica.
- Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación de sensores generan distorsiones en la imagen global, lo que hace necesaria la corrección geométrica.
- La interferencia de la atmósfera altera de forma sistemática los valores de los pixeles, lo que hace necesaria la corrección atmosférica. Esta corrección mejora la calidad de

la imagen, pues busca eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que capta el sensor y se refleja en la imagen.

3.1.1.7. Clasificación supervisada de imágenes de satélite

La clasificación de una imagen digital consiste en categorizarla, lo que permite hacer una delimitación de diferentes coberturas, interpretando los números digitales de cada pixel de la imagen. Estos pixeles se convierten en un lenguaje que se puede manipular y trabajar para lograr un mapeo distintivo de una zona (Fonseca & Gómez, 2003). Existen varias metodologías para las clasificaciones de suelos y coberturas. Por ejemplo: la interpretación visual, la clasificación supervisada y la clasificación no supervisada.

La clasificación supervisada usa una data de entrenamiento, áreas de pixeles con clases conocidas para entrenar al programa de computadora a reconocer las diferentes clases. Las ventajas incluyen la habilidad de especificar la información deseada de las clases. Además, los acercamientos supervisados son, a menudo, preferidos sobre los no supervisados, porque las clases de cobertura de suelos de interés son seleccionadas a prioridad. Para utilizar este tipo de clasificación, se requiere tener cierto grado de conocimiento de campo. Entre las técnicas o algoritmos más comunes de la clasificación supervisada están: la mínima distancia y máxima verosimilitud. Máxima verosimilitud generalmente da mejores resultados que la distancia mínima, porque la covariancia de la data es tomada en cuenta (Ozesmi & Bauer, 2002).

3.2. Metodología

3.2.1. Imágenes satelitales

El uso de imágenes satelitales es una manera simple y no costosa de hacer estudios espacio temporales de humedales. Las imágenes satelitales se pueden adquirir gratuitamente en el United States Geological Survey (USGS), en la sección de EarthExplorer. Para decidir las fechas de las imágenes a usar, se debe considerar:

- Disponibilidad de escenas.
- Meses donde las cubiertas de nube sean mínimas.
- Buscar épocas del año donde las cubiertas vegetales presenten la mayor diferenciación, favoreciendo así la fotointerpretación.

La presencia de nubes provoca problemas para determinar características en las imágenes; por lo tanto, para seleccionarlas se optó por trabajar con imágenes con poca cantidad de nubes sobre la zona de estudio. Se descargó un total de 140 imágenes del sitio USGS de la misión Landsat 5, 7 y 8. Como la resolución espacial es medida por el tamaño del pixel, esta afecta el nivel de detalle en que puede ser visto el ráster.

Landsat 5 y 7 (Periodo 1997- 2003)

Se descargaron un total de 53 imágenes entre enero de 1997 y abril de 2003 de la misión Landsat 5 y 7, tratando de abarcar todos los meses del año.

Landsat 8 (Periodo 2014- 2021)

Se descargaron un total de 87 imágenes entre enero de 2014 y diciembre de 2021 de la misión Landsat 8, tratando de abarcar todos los meses del año.

3.2.2. Preprocesamiento de las imágenes

Es necesario que las imágenes tengan ciertas calibraciones antes de ser procesadas para evitar trabajar con imágenes no del todo correctas visualmente y mejorar su confiabilidad. Resulta indispensable eliminar errores y disminuir las perturbaciones que hayan sido captadas por los sensores.

Las imágenes descargadas del USGS del Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 pertenecen al nivel de colección 1. La colección 1 cuenta con tres niveles: TR, T1 y T2; y estos se basan en la calidad de los datos y el nivel de procesamiento de las imágenes (USGS, 2018). Las que están en el nivel T1 están previamente calibradas radiométricamente y ortorrectificadas usando puntos de control; es por esto por lo que se usará este nivel para el estudio. Esto permite que sean empleadas en análisis de series temporales. Sin embargo, no están corregidas atmosféricamente.

Para este estudio, el preprocesamiento de las imágenes satelitales (**Figura 27**), la corrección atmosférica se realizó con el software libre de QGIS, utilizando el método del Dark Object Substraction (DOS), implementado en el Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) de QGIS. En el proceso, las imágenes se convierten a radiancia y luego reflectancia, utilizando parámetros de escalas aditivos y multiplicativos, contenidos en el

archivo de Metadatos MTL. Además, se le aplica banda pancromática, con la herramienta CREATE PANSHARPENING, lo que mejora la resolución espacial de las imágenes, en color verdadero, de 30 m a 15 m.

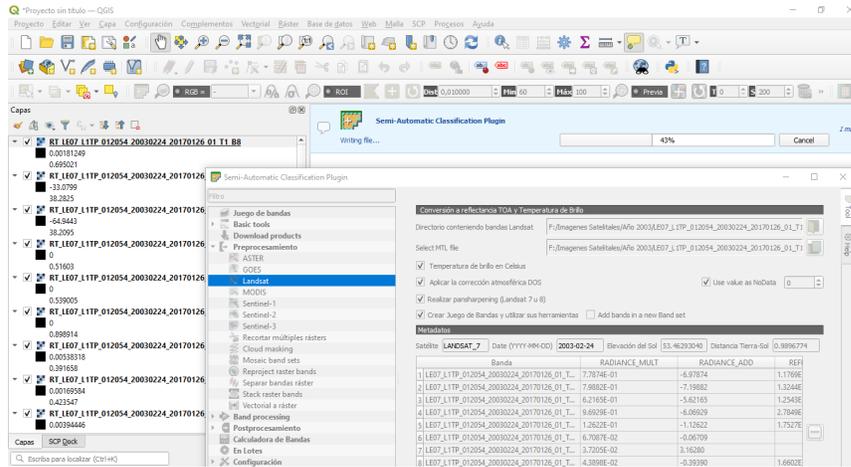


Figura 27: Preprocesamiento: Corrección atmosférica.

Fuente: Propia.

3.2.3. Visita de campo

Una manera de comparar que la data satelital o área es correcta es contrastar con el sitio. Por lo que previo a la clasificación supervisada, se escogieron puntos representativos georreferenciados en las imágenes (Tabla 13) y se hicieron visitas para evaluar las diferentes coberturas y comportamientos en estos puntos. Se utilizó la aplicación móvil Locus Map, la cual permitió hacer recorridos de manera georreferenciada.

Tabla 13. Coordenadas de los puntos para visitar el área protegida.

P	Este	Norte	P	Este	Norte
1	545647.9	897079.5	9	546073.2	895510.5
2	545512.3	897261.4	10	544388.5	895469.3
3	544635.8	896745.5	11	543851.8	896575.6
4	544377.9	896828.2	12	545629.5	896810.6
5	542949.1	897036.5	13	548177.9	896620.8
6	543147.6	895978.2	14	547510.3	895962.3
7	543200.5	895244.0	15	546518.6	897491.5
8	547486.2	895472.4	16	548485.1	896002.4

Fuente: Propia.

Estos puntos (**Figura 28**) no se escogieron al azar, sino que tenían características geomorfológicas relevantes para el estudio, y que solo visualizando la imagen satelital no permitía hacer la diferenciación de cobertura. Las coberturas observadas en diversos puntos se encuentran en la **Figura 29**.

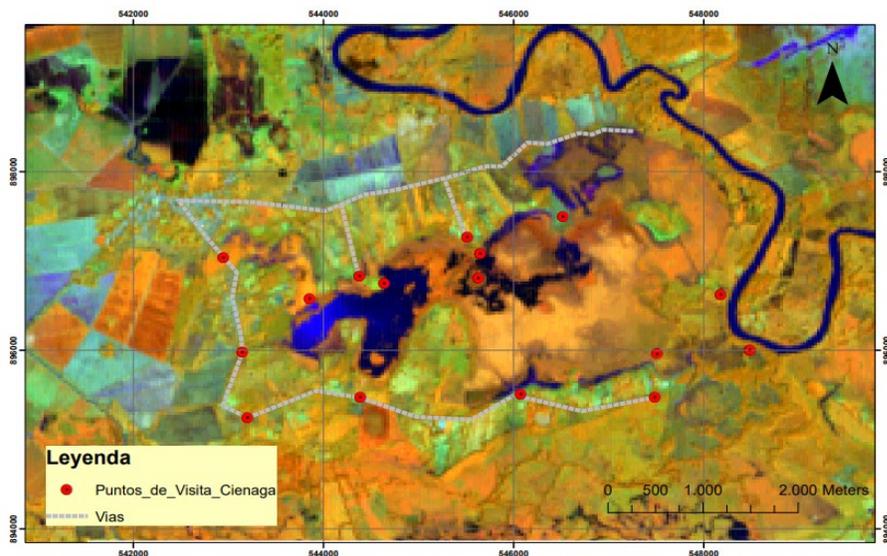


Figura 28: Puntos clave para visitar el área protegida (Landsat 8 – 28 de marzo de 2021).

Fuente: Propia.



Figura 29: Diferentes coberturas de suelo en la zona de estudio del humedal. A) Espejo de agua. B) Agua con vegetación. C) Vegetación seca. D) Suelo desnudo. E) Arbustos. F) Escorrentías.

Fuente: Propia.

3.2.4. Procesamiento

En la **Figura 30**, se delimita un área de estudio (color morado) con la herramienta CORTAR RÁSTER POR EXTENSIÓN para los procesamientos posteriores. Esta área tiene una superficie de 1527.75 ha, englobando las 857 ha del área protegida ciénaga de Las Macanas (color rosado), así como zonas importantes de amortiguamiento.

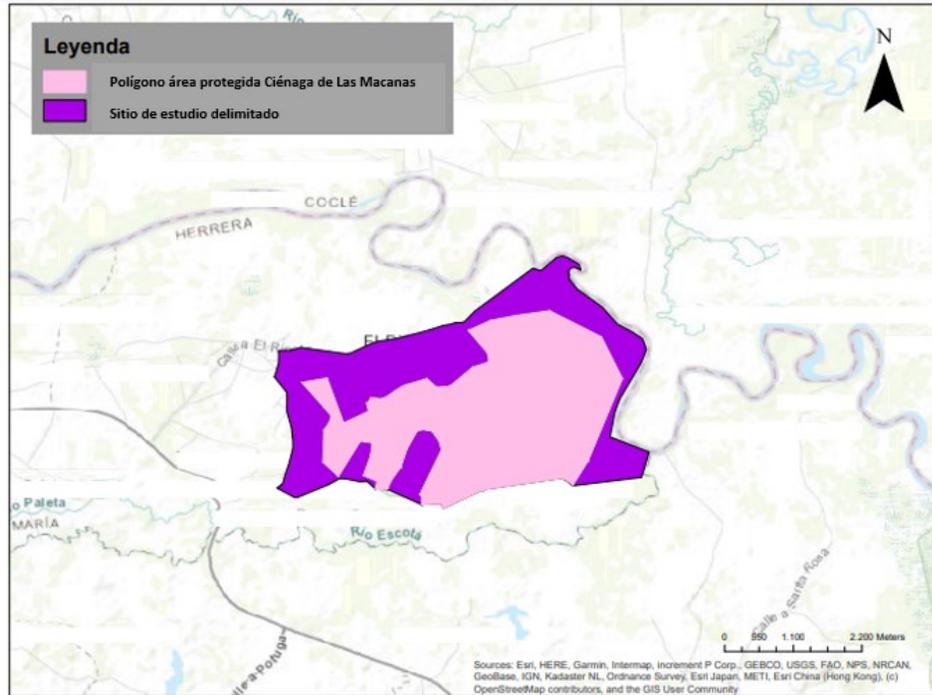


Figura 30: Delimitación de sitio de estudio.

Fuente: Propia.

3.2.4.1. Interpretación de imágenes

Se decidió trabajar con tres diferentes tipos de composiciones de bandas para la discriminación, una en color natural (**Figura 31**) y dos en falso color (**Figura 32** y **Figura 33**), para visualizar mejor las coberturas de las zonas de estudio.

Combinación A – Color natural: (Rojo, Verde, Azul)



Figura 31: Combinación A (Landsat 5 – 21 febrero 2002).

Fuente: Propia.

Combinación B – Usos de agua/Usos de suelo: (NIR, SWIR 1, Rojo)



Figura 32: Combinación B (Landsat 5 – 21 febrero de 2002”).

Fuente: Propia.

Combinación C – Infrarrojo cercano: (NIR, Rojo, Verde)



Figura 33: Combinación C (Landsat 5 – 21 de febrero de 2002).

Fuente: Propia.

Los diferentes algoritmos de combinación en falso color permiten ver con mejor claridad las imágenes, que la visualización con el color natural no permite. Para esto, se utilizó la herramienta Combinar Raster en QGIS.

3.2.4.2. Clasificación supervisada y obtención de mapas de coberturas

Para realizar la clasificación de imagen satelital, se utilizó la herramienta ‘Semi–Automatic Classification Plugin’ (SCP) del Sistema de Información Geográfica (SIG), QGIS versión 3.16.8 (**Figura 34**). Esta herramienta permite clasificar una imagen satelital de forma categorizada, creando distintos campos de entrenamiento de clases, basándose en muestras de píxeles (Al-Quraishi & Kaplan, 2021), discriminando cinco clases: cuerpo de agua, vegetación, agua con vegetación, árboles/arbustos y suelos desnudo/pastizales.

Se siguió el método de clasificación supervisada, el cual requiere un cierto grado de conocimiento de la zona que se va a estudiar y permite delimitar sobre la imagen zonas o áreas representativas de las distintas categorías que se pretenden discriminar. Estas áreas se conocen como ROI (áreas de entrenamiento) (Lozano et al., 2019).

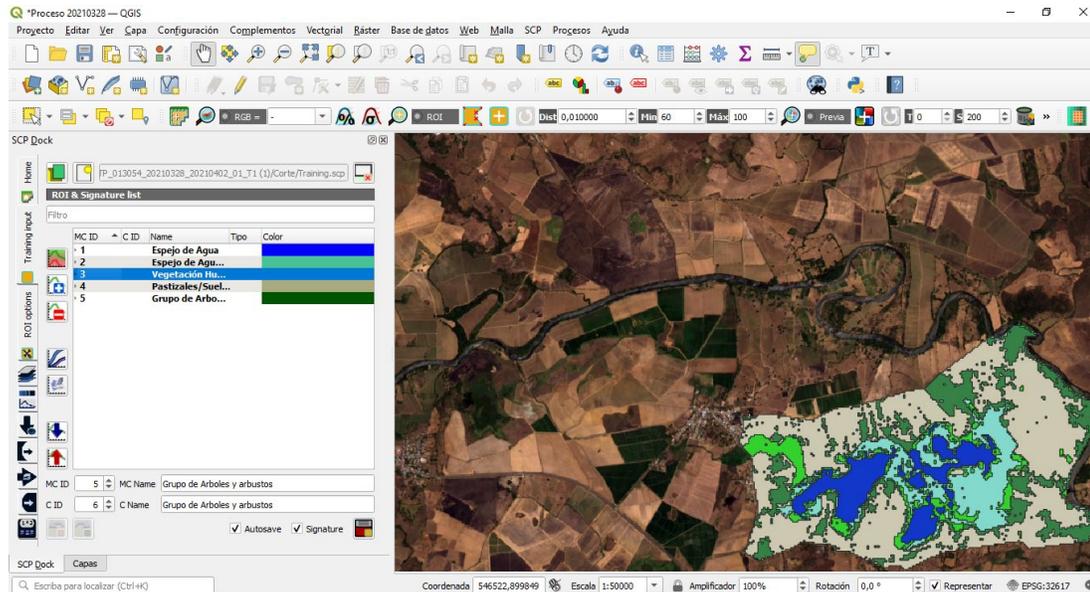


Figura 34: Clasificación supervisada en SCP QGIS.

Fuente: Propia.

Para la interpretación de imágenes (Atencia et al., 2008), se utilizó la combinación A, combinación B y combinación C para tener un mayor rango visual de la zona y un rango mayor de diferenciación entre las diferentes coberturas de suelos. Para la clasificación supervisada, se deben vectorizar las características de cobertura, creando polígonos visuales de “shapefile”, para considerarlos como polígonos base de las clasificaciones. El algoritmo que se utiliza para la clasificación es “máxima verosimilitud”, ya que generalmente da mejores resultados y es el más usado en las clasificaciones supervisadas.

Como las imágenes tienen una cobertura periódica, el humedal puede ser monitoreado por estaciones para conocer su variabilidad interanual, haciendo una comparación temporal de la lámina de agua y la detección de cambios en las coberturas. En este caso, se hizo el monitoreo mensual y anual para los periodos 1997–2003 y 2014–2021. Así se extrae la máscara de todas las imágenes y el reporte lanzado por el QGIS de áreas, con cada una de las cinco clases clasificadas.

3.2.5. Análisis de los cambios en las clases

Se procede a graficar por separado el área inundada (espejo de agua + agua con vegetación), vegetación, pastizales/suelo desnudo y grupo de árboles/arbustos; y posteriormente, evaluar su comportamiento a través de los años. Se analizarán dos periodos de manera independiente, uno que comprende los años 1997–2003 y el otro 2014–2021, para evaluar los cambios entre periodos. Por año, se calcula el porcentaje que cada una de las clases ocupa en el área de estudio de 1527.7 ha. Luego, usando los valores de superficie de área inundada, se calcula para cada período anual el promedio, el mínimo, el máximo, el percentil 25, el percentil 75 y el coeficiente de variación.

Utilizando todos los valores de superficie de área inundada de ambos periodos, se hará un nuevo cálculo de percentil 25 y 75. Tomando estos cuartiles como referencia, se determina la cantidad de meses que estuvieron bajo el primer cuartil y sobre el tercer cuartil. Con esto, se define la proporción de tiempo anual en que el humedal mantiene unas diferentes áreas inundadas.

3.2.6. Comparación con datos meteorológicos e hidrológicos

Precipitación

Para la precipitación, se utilizan los datos del pluviómetro de la oficina de MiAmbiente, en El Rincón. Esta data cuenta con 24 años de registro histórico diario, mensual y anual (mayo 1997 - diciembre de 2021). Esta data fue procesada y validada previamente para el cálculo del balance hídrico con la estación de ETESA, ubicada en Divisa (132 – 012).

Caudal

Se obtuvo data del río Santa María, específicamente de las estaciones de ETESA de Santa Fe (132-01-01), La Soledad (132-01-02) y San Francisco (132-01-03). Las dos primeras con registros de 1987 a 2017 y la de San Francisco con registros de 1988 a 2018. En la **Figura 35**, se muestra la ubicación de estas estaciones, siendo la estación de San Francisco la más cercana al humedal a una distancia aproximada aguas arriba de 47 km en línea recta.

También se utilizó data de la aplicación Streamflow Hydroviewer de Global River Forecastings Applications (GEOGLOWS) (USGS & NOAA, n. d.), que cuenta con data de los caudales de diferentes tramos del río Santa María, obtenidos de manera satelital. Para validar la precisión y exactitud de esta aplicación, se comparó la data con la estación de San Francisco, contrastando una sobre la otra y haciendo un análisis multianual de los años 2013 a 2017.

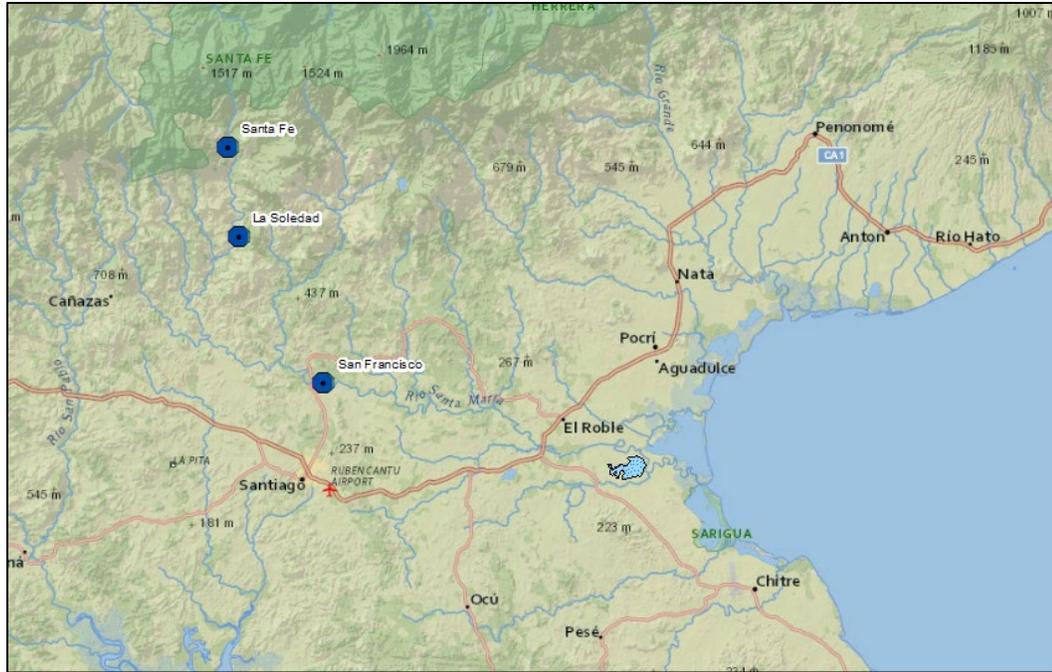


Figura 35: Estaciones de caudal del río Santa María de ETESA.

Fuente: Propia.

Al tener el desglose de superficie de las clases, obtenido gracias a la clasificación supervisada, se contrastará su comportamiento mes a mes con la data climatológica e hidrológica. En este caso, solo tendrá el enfoque del área inundada de la ciénaga para evaluar cómo esta ha sido afectada por otras variables a través del tiempo. Se hará el análisis de la variación en el eje Y, descrito por la variación en el eje X, tomando en cuenta el coeficiente de determinación (R^2) como valor de correlación.

Primero, se graficará la precipitación acumulada anual para observar su comportamiento a través de los años y se contrastará con los datos de área inundada, graficados para evaluar si esta es afectada de manera significativa por la precipitación. En segundo lugar, se graficará el caudal de la estación de San Francisco y se contrastará con los datos de área

inundada de manera mensual para evaluar cómo es afectada la ciénaga por las aguas arriba del río Santa María.

Los estudios demuestran la validez de la teledetección para observar eventos reales en un humedal que puede no tener registros de aforos, además de ser hidráulica y topográficamente complejo (Arthington & Zalucki, 1998). Es decir, la teledetección presenta oportunidades ante el problema de la escasez de datos de campo. También para proporcionar información sobre la hidrología de los humedales, comparando con datos hidrológicos existentes de aguas arriba.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Delimitación de microcuenca de estudio

Tras analizar la topografía del terreno en el software Autodesk civil 3D, se pudo delimitar un área de escorrentía de 2150 ha, que se extiende en el norte hasta el río Santa María, y en el sur con el río Escotá. Dentro de esta área de drenaje, al noroeste de esta se encuentra la comunidad de El Rodeo (**Figura 36**).

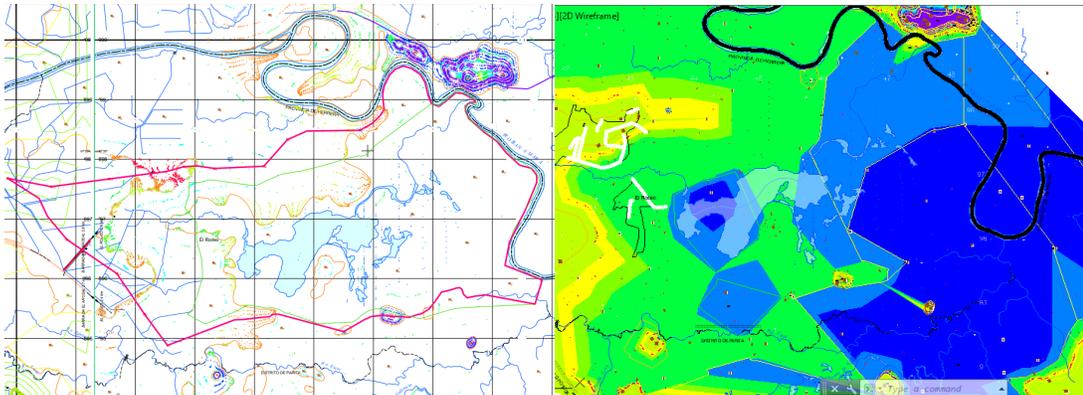


Figura 36: Modelación de la topografía de la ciénaga de Las Macanas en el programa Autocad Civil 3D.

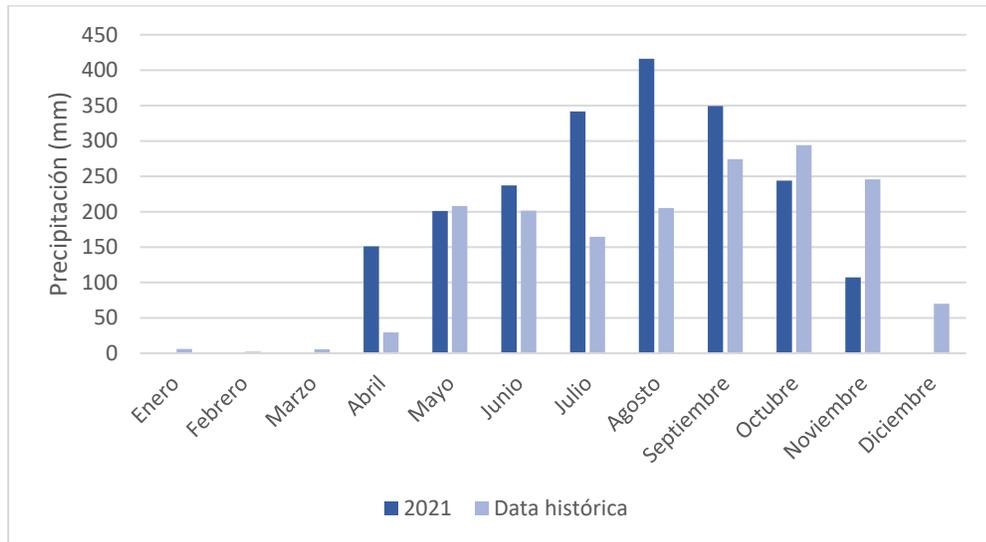
Fuente: Propia.

4.2. Precipitación

4.2.1. Precipitación mensual

En la **Gráfica 1**, se muestra la precipitación mensual del año 2021 de la microcuenca de la ciénaga de Las Macanas, la cual se obtuvo del pluviómetro ubicado en El Rincón. El promedio anual de la precipitación de la parte baja de la cuenca del río Santa María, se

obtuvo de la estación de ETESA (1985-1997) y MiAmbiente (1998-2020). Al comparar ambas estaciones, el año 2021 presentó promedios históricos mayores en la mayoría de los meses, siendo octubre, noviembre y diciembre las más notables excepciones.

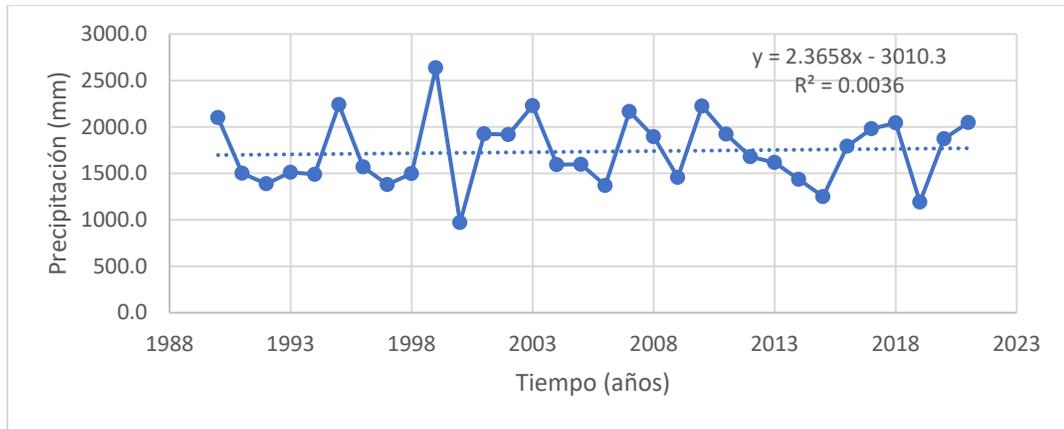


Gráfica 1: Precipitación mensual 2021 correspondiente a la estación de MiAmbiente, localizada en El Rincón, y el promedio histórico de 1990 al 2020.

Fuente: Propia.

4.2.2. Precipitación anual

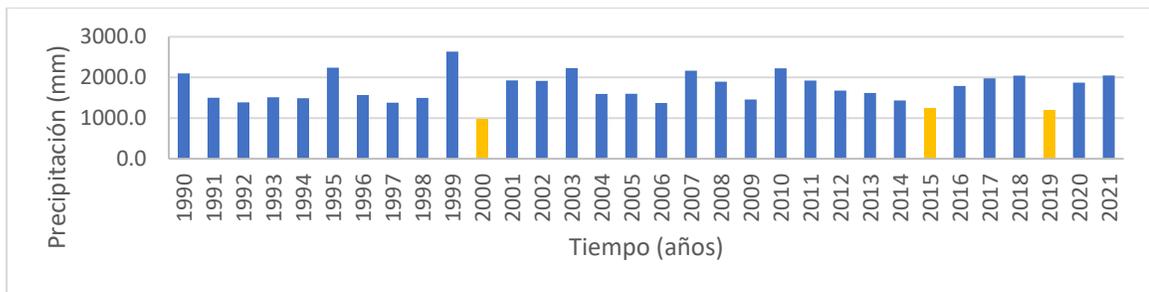
Se analizaron 30 años de precipitación desde 1990 hasta 2021. Estos datos corresponden a la estación de Divisa (1990-1997) y al pluviómetro de El Rincón (1997-2021). Siendo estas, las estaciones más cercanas a la ciénaga. Estos valores tienden a aumentar (**Gráfica 2**), con una diferencia promedio de 17.97 mm para los 31 años estudiados.



Gráfica 2: Precipitación del año 1990 a 2021 con línea de tendencia de 1990 hasta 1997, se usó la data de la estación meteorológica de ETESA; de 1997 a 2021, se usó la data del pluviómetro de El Rincón.

Fuente: Propia.

La precipitación promedio anual dio un total de 1734 mm. Para los años de sequía correspondientes al 2000, 2015 y 2019, se tuvo una precipitación por debajo de 1301 mm. Los años con exceso de precipitación fueron 1995, 1999, 2003, 2007 y 2010, contando con una precipitación superior a 2168 mm, como se ve en la **Gráfica 3**.



Gráfica 3: Precipitación anual 1990 a 2021, donde los años de sequía se muestran de color amarillo.

Fuente: Propia.

4.2.3. Comparación de los datos de precipitación

Se utilizó la información del pluviómetro de MiAmbiente, ubicado dentro del área de estudio, y la estación meteorológica de ETESA, localizada aproximadamente a 7 km de la ciénaga. Se comprobó si los datos de ambas estaciones eran estadísticamente similares, con el fin de poder utilizar ambas fuentes.

Se utilizó el t-test para dos muestras, asumiendo variables diferentes, y se comparó de forma mensual y anual. La comparación anual y mensual no rechazó la hipótesis nula, usando un alpha de 0.05. También se calculó el error absoluto medio y la raíz del error cuadrático medio, los cuales se ven en la **Tabla 14**.

Tabla 14: Comparación estadística de la estación meteorológica en Divisa y el pluviómetro de El Rincón

Escala de tiempo	MAE	RMSE	t-stat
Anual	291.02	352.967	No se rechaza la hipótesis nula
Mensual	48.6	78.897	No se rechaza la hipótesis nula

Fuente: Propia.

4.3. Evapotranspiración

4.3.1. Evapotranspiración potencial para el 2021

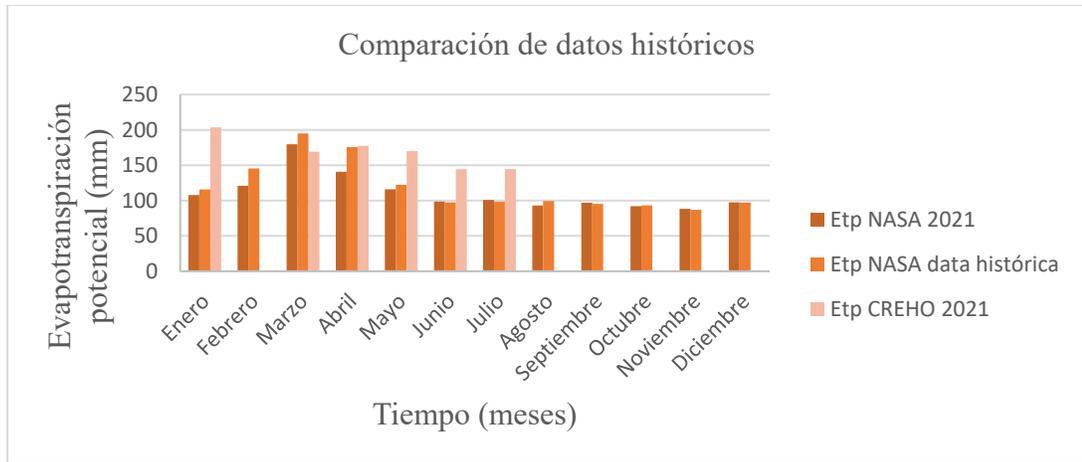
En la **Gráfica 4**, se puede ver una comparación de la evapotranspiración potencial (Etp), cuyos valores se calcularon con la ecuación de Penman Monteith, a partir de los datos de

viento, radiación solar, humedad y temperatura (máxima y mínima), proporcionados por la NASA. Para el promedio histórico, se utilizaron los años 1990 al 2020, sacando de esta forma el promedio histórico mensual. Se puede observar, en la **Tabla 15**, cómo los datos para el año 2021 de evapotranspiración son mayores que el promedio histórico de la NASA. Se aprecia que la data proveniente de la estación meteorológica de CREHO Ramsar suele tener valores muy elevados, en comparación con el promedio histórico.

Tabla 15: Evapotranspiración histórica y del año 2021

Mes	NASA data histórica Potencial (mm/mes)	Eto Potencial CREHO 2021 (mm/mes)	Eto Potencial NASA 2021 (mm/mes)
Enero	115.65	203.5	95.68
Febrero	145.42		99.04
Marzo	194.95	169	88.23
Abril	175.52	177.3	62.44
Mayo	122.32	169.9	48.61
Junio	97.43	144.2	42.73
Julio	98.36	144.6	55.76
Agosto	99.29		57.57
Septiembre	95.33		41.8
Octubre	93.25		59.67
Noviembre	87		24.35
Diciembre	97.35		97.5
TOTAL	1421.89		773.38

Fuente: Propia.

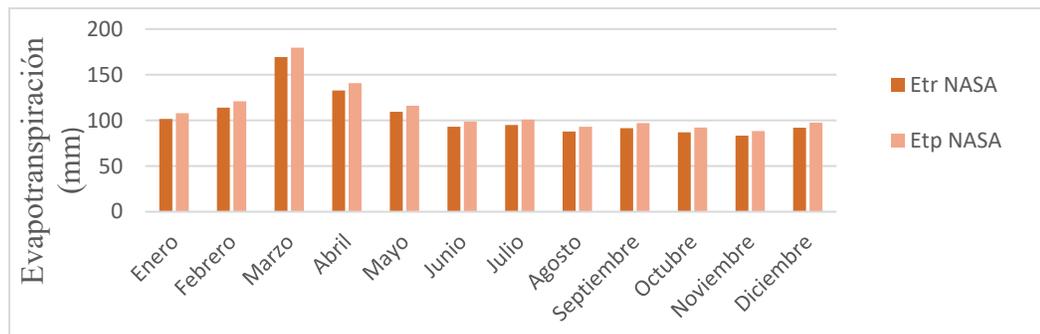


Gráfica 4: Evapotranspiración histórica mensual y del año 2021.

Fuente: Propia.

4.3.2. Evapotranspiración real 2021

Existe poca diferencia entre la evapotranspiración real (Etr) y la evapotranspiración potencial (ver **Tabla 16** y **Gráfica 5**). Esto podría explicarse, porque el humedal es un cuerpo de agua rodeado de arrozales y pastizales de poca altura (aproximadamente 10 cm).



Gráfica 5: Comparación entre la evapotranspiración real y la potencial de la data meteorológica de la NASA para el año 2021.

Fuente: Propia.

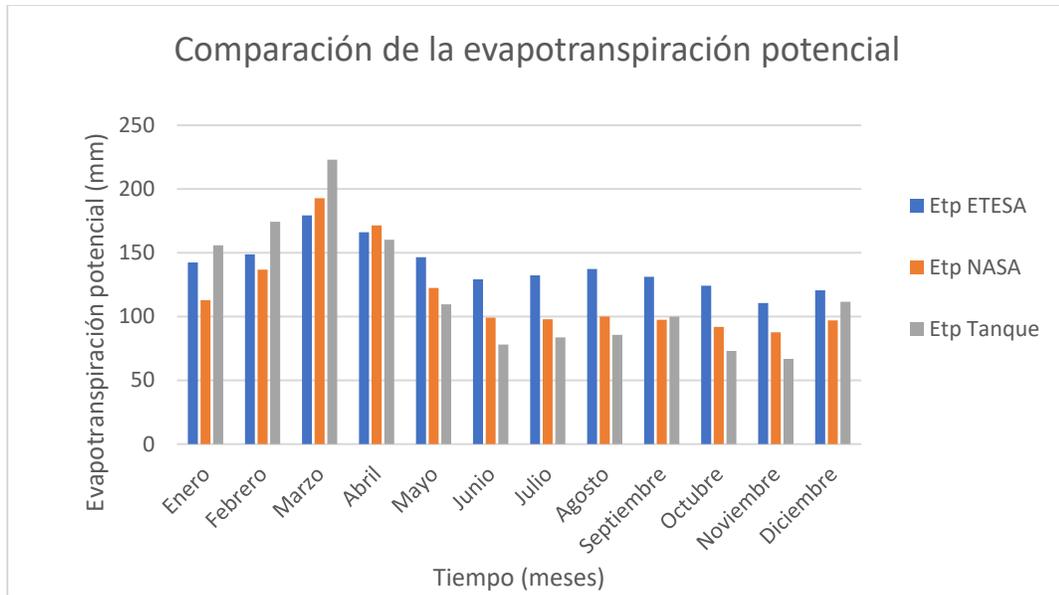
Tabla 16: Valores de la evapotranspiración real, comparados con la evapotranspiración potencial.

Mes	Eto Potencial CREHO 2021 (mm/mes)	Eto Real CREHO (mm/mes)	Eto Potencial NASA 2021 (mm/mes)	Eto real NASA (mm/mes)
Enero	203.5	191.8	107.8	101.6
Febrero			120.9	114.0
Marzo	169	159.3	179.6	169.3
Abril	177.3	167.1	140.8	132.7
Mayo	169.9	160.2	116	109.3
Junio	144.2	135.9	98.7	93.0
Julio	144.6	136.3	100.8	95.0
Agosto			93.1	87.8
Septiembre			97.1	91.5
Octubre			92.2	86.9
Noviembre			88.3	83.2
Diciembre			97.5	91.9

Fuente: Propia.

4.3.3. Comparación de los datos de evapotranspiración potencial

En la **Gráfica 6**, se muestra la variación en evapotranspiración potencial, calculada a partir de la data provista por ETESA (estación de Divisa) y la NASA, usando la ecuación de Penman Monteith. También, se muestra la evaporación por tanque registrada por ETESA (estación de Divisa). Esta comparación toma el promedio mensual de los años 2008 al 2012. Para la estación lluviosa, los datos de la NASA muestran los menores Etp para todo el año. Por otro lado, el tanque muestra una mayor Etp para la estación seca y una menor Etp para la estación lluviosa. La mayor similitud de resultados entre ambos métodos se da en abril.



Gráfica 6: Comparación del promedio de precipitación mensual (2008-2012).

Fuente: Propia.

En la **Tabla 17**, se observan los valores mensuales en mm/mes de la evapotranspiración potencial y el total anual de todas las mediciones. Se aprecia que la Etp de la estación meteorológica de ETESA en Divisa presenta valores muy distintos al tanque de ETESA, ubicado también en Divisa, y a los valores extraídos de la NASA. Por ende, se puede concluir que dicha estación pudo estar descalibrada a la hora de medir los parámetros meteorológicos.

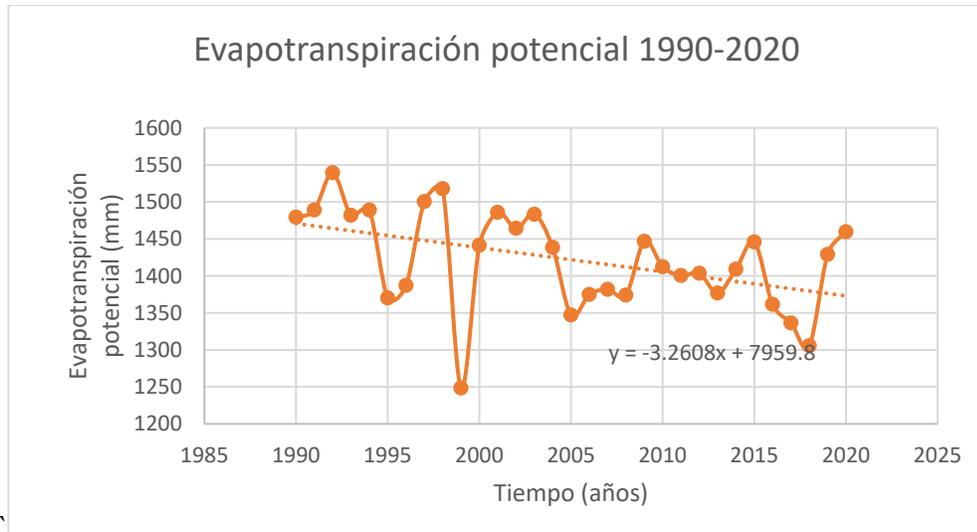
Tabla 17: Comparación del promedio de la evapotranspiración potencial mensual del periodo 2008 a 2012.

Evapotranspiración potencial (mm/mes)			
Meses	ETESA Penman Monteith	NASA	ETESA Tanque
Enero	142.4	112.9	155.8
Febrero	148.8	136.8	174.4
Marzo	179.3	192.8	223.0
Abril	166.1	171.5	160.2
Mayo	146.5	122.4	109.6
Junio	129.1	99.1	78.1
Julio	132.3	97.8	83.6
Agosto	137.3	100.0	85.7
Septiembre	131.2	97.4	99.8
Octubre	124.2	91.9	73.1
Noviembre	110.6	87.6	66.8
Diciembre	120.5	97.0	111.6
Total	1668.4	1407.3	1421.7

Fuente: Propia.

4.3.4. Evapotranspiración anual potencial

Para evaluar la evapotranspiración potencial, se usaron datos de la NASA (1990-2020), encontrándose una leve tendencia a disminuir de 3.26 mm anuales (**ver Gráfica 7**).



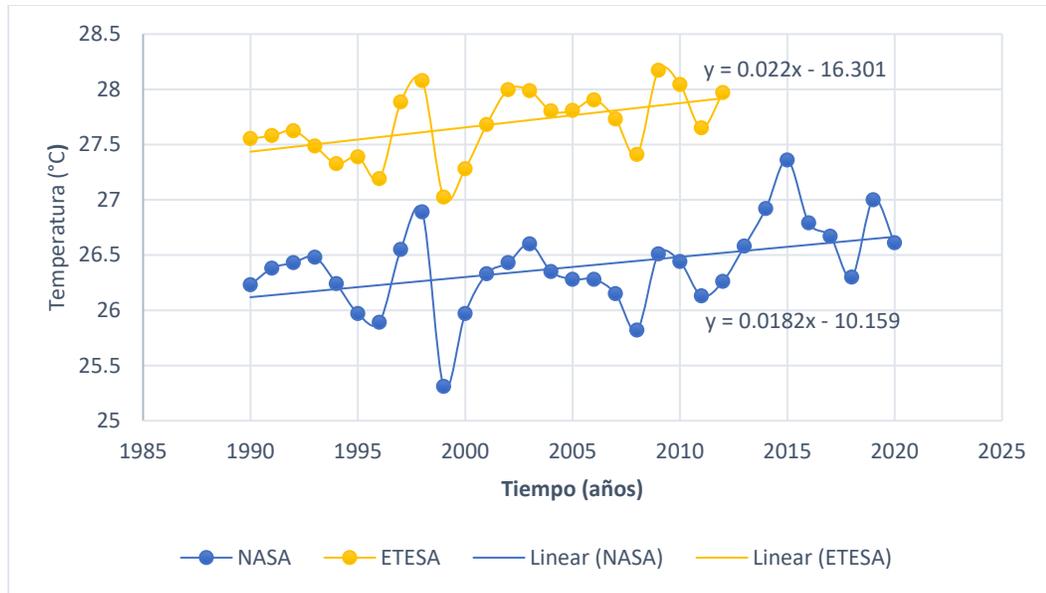
Gráfica 7: Evapotranspiración anual del año 1990 a 2020.

Fuente: Propia.

4.4. Variables climáticas

4.4.1. Temperatura anual

La **Gráfica 8** muestra los datos de temperatura anual de la estación meteorológica de ETESA de Divisa (1990-2012) y de la NASA para el período 1990-2020. La data de ETESA muestra una línea de tendencia de aumento, con un incremento total de 0.48 °C. Estos resultados fueron comparados con los datos extraídos de la NASA (1990-2020), que mostró un incremento total de 0.54 °C. Al compararse (**ver Gráfica 8**), se observó un comportamiento similar, con una diferencia de aproximadamente 1 °C, siendo mayor la de la NASA.



Gráfica 8: Temperatura promedio anual para el período 1990 a 2020 en la ciénaga de Las Macanas para datos de ETESA y de la NASA.

Fuente: Propia.

4.4.2. Humedad relativa, temperatura promedio y velocidad del viento

Con los datos extraídos de la NASA (1990-2020), se analizaron los cambios en las variables meteorológicas (**Tabla 18**) que afectan la evapotranspiración y otras variables. Para este período de 30 años, se encontró que la temperatura tuvo un incremento de 0.5 °C, la humedad relativa un aumento de 0.46 %, y la velocidad del viento una disminución de 0.4 m/s. El aumento de la humedad y el descenso de la velocidad del viento pudieron ser los causantes de que la evapotranspiración disminuyese de forma leve, aunque la temperatura haya aumentado.

Tabla 18: Cambios en los últimos 30 años de las variables meteorológicas en la ciénaga de Las Macanas.

VARIABLES METEOROLÓGICAS	CAMBIO EN LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS
Temperatura promedio	+ 0.5 °C
Humedad relativa	+ 0.46 %
Velocidad del viento	- 0.40 m/s

Fuente: Propia.

4.5. Escorrentía

En la **Tabla 19**, se clasifican las áreas según su uso de suelo. La **Tabla 20** muestra la clasificación de los grupos hidrológicos de suelo en función a su conductividad hidráulica y su área correspondiente.

Tabla 19: Clasificación de suelo según textura y uso.

Tipos de suelos	Área de arrozales (km²)	Área de pastizales (km²)	Área poblada (km²)	Área de humedal (km²)	Área de bosque (km²)	Total
Franco arcilloso	3.03	4.28	0.48	8.2	2.06	18.05
Arcilla	0	1.01	0.1	0	0.36	1.47

Fuente: Propia.

Tabla 20: Coeficiente CN para cada clasificación de suelo.

	C. Arrozales	C.Pastizales	C.Poblado	C.Humedal	C.Bosque	CN
Franco arcilloso	76.05	74.93	86.39	96.21	69.78	84.43
Arcilla	-	83.55	89.44	-	69.78	80.58
						CN promedio 84.16
						S 47.79

Fuente: Propia.

4.5.1. Modelación hidrológica

En la **Figura 12**, se aprecia la clasificación de las áreas según su uso de suelo. Esta información se utilizó de partida para hacer la modelación hidrológica con el software HEC-HMS 4.8. En la **Figura 12**, se observan las 4 divisiones de la microcuenca, asumidas como subcuencas, el cuerpo de agua de la ciénaga de Las Macanas como el punto de unión de dichas subcuencas y Los Toritos como la desembocadura de estas (**Figura 37**).

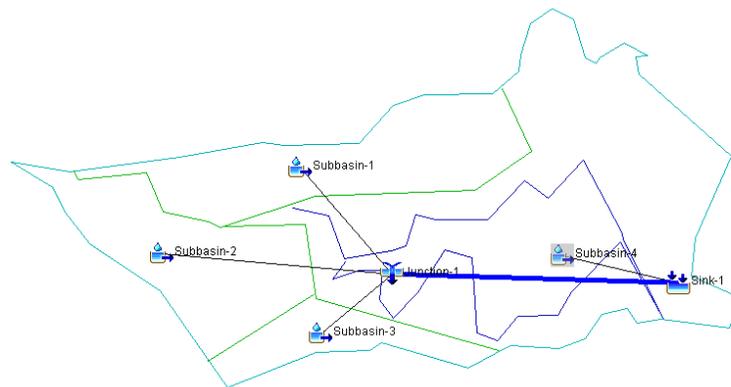


Figura 37: Modelación hidrológica de la ciénaga de Las Macanas en el software HEC-HMS 4.8

Fuente: Propia.

El método de pérdida utilizado en la modelación fue el de la curva SCS, mientras que para el método de transformación se utilizó el hidrograma unitario SCS. Los tiempos de concentración para cada subcuenca se representan en la **Tabla 21**.

Tabla 21: Subcuencas con sus respectivos tiempos de concentración.

Subcuenca	Tiempo de concentración (min)
1	1713
2	1854
3	1450
4	1502

Fuente: Propia.

Debido a que para la precipitación, el menor rango de tiempo disponible era de un día, se utilizó el método de Muskingum con un coeficiente K de 24 horas y un coeficiente X de 0.5, ya que se asumió un caudal de salida igual al de entrada. En la precipitación diaria, se introdujo la precipitación del pluviómetro de El Rincón. La **Tabla 22** muestra los mayores volúmenes registrados para cada elemento de la cuenca. En las **Figura 38** y **Figura 39**, se muestran los resultados de la modelación en HEC-HMS, observándose una relación directamente proporcional de escorrentía-precipitación.

Tabla 22: Resultados de la modelación, donde se muestran los mayores volúmenes registrados para cada elemento de la cuenca.

Elementos hidrológicos	Área de drenaje (km ²)	Descarga máxima (m ³ /s)	Tiempo de descarga máxima	Volumen (mm)
Subcuenca-1	3.77	2.6	14-oct-21	1965.11
Subcuenca-2	3.46	2.3	14-oct-21	1958.78
Subcuenca-3	1.42	0.9	06-sep-21	1956.19
Subcuenca-4	10.87	7.3	14-oct-21	2008.26
Unión-1	8.65	5.8	14-oct-21	1961.11
Extensión-1	8.65	5.8	15-oct-21	1957.53
Sumidero-1	19.52	11.3	14-oct-21	1985.78

Fuente: Propia.

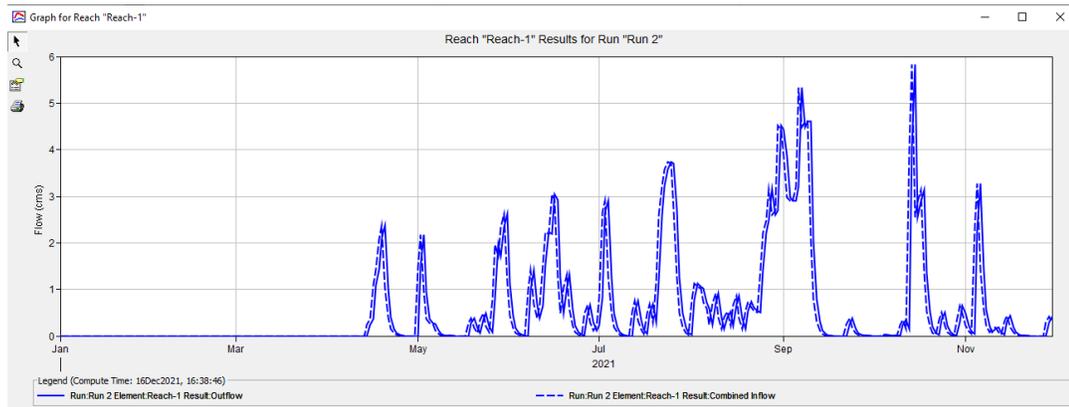


Figura 38: Resultados del afluente para flujos de entrada y salida.

Fuente: Propia.

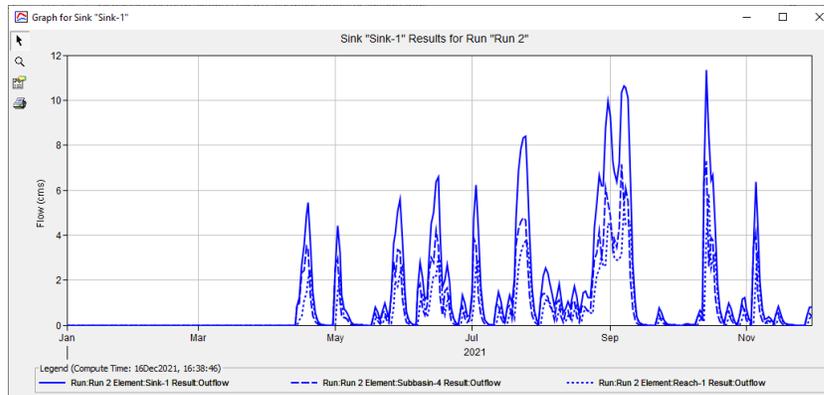
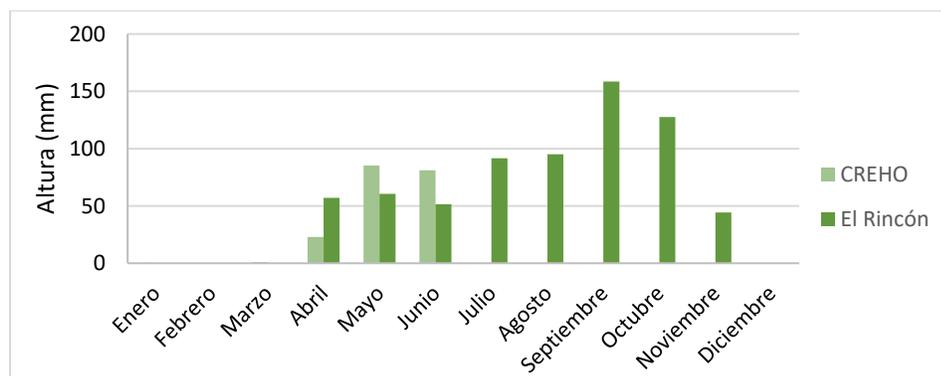


Figura 39: Flujo de entrada y salida para la desembocadura de la ciénaga.

Fuente: Propia.

4.5.2. Escorrentía teórica

Los resultados de la escorrentía teórica, calculados con el método de la curva SCS, muestran un comportamiento similar al de la precipitación. En la **Gráfica 9**, se comparan los resultados de escorrentía extraídos del pluviómetro de El Rincón y de la estación meteorológica de CREHO.



Gráfica 9: Escorrentía mensual para el año 2021 en la cuenca de Las Macanas.

Fuente: Propia

4.5.3. Escorrentía proveniente de los arrozales circundantes a la Ciénaga

Parte del área circundante de la ciénaga son sembradíos de arrozales que desechan el exceso de agua en la misma (**Tabla 23**). Debido a que el riego de estos sembradíos no proviene de la microcuenca, se asume que es agua entrante en el balance hídrico y su volumen fue medido por aforos realizados en campo, una medición correspondiente a la estación seca y la otra a la estación lluviosa. El resultado fue que en la estación seca hubo un mayor aporte que en la estación lluviosa, lo cual pudo ser ocasionado a mayores necesidades de riego en la estación seca. No se pudo tomar medición del caudal del afluente 1 (ver **Figura 15**) para la estación seca, por lo que se optó por utilizar el valor medido en la estación lluviosa.

Tabla 23: Aporte mensual de agua por parte de los arrozales.

Afluente	Est. seca	Est. Lluviosa
Aforo 1(L/s)	7.15	7.15
Aforo 2(L/s)	11.42	2.98
Aforo 3(L/s)	0.00	5.01
Total (L/s)	18.58	15.14
Total (m ³ /mes)	48153.76	39248.99
Total (mm/mes)	2.24	1.83

Fuente: Propia.

4.6. Infiltración

4.6.1. Análisis de conductividad hidráulica no saturada

Los resultados de conductividad hidráulica graficados con una función polinómica arrojaron coeficientes de determinación R^2 con valores entre 0.993 y 0.998 (gráfica no

mostrada), lo que indica un ajuste bastante alto para las pruebas realizadas en el sitio. Los valores de conductividad hidráulica variaron de moderadamente lenta a moderada con valores que van desde los 0.71 cm/h a los 2.44 cm/h, como se puede apreciar en la **Tabla 24**.

Tabla 24: Valores resultantes para la conductividad hidráulica y su clasificación.

Descripción	Conductividad hidráulica (cm/h)	Clases de conductividad
Punto 1	2.00	Moderada
Punto 2	0.71	Moderadamente lenta
Punto 3	1.50	Moderadamente lenta
Punto 4	2.44	Moderada
Punto 5	1.50	Moderada
Punto 6	0.78	Moderada

Fuente: Service, E.U.A. Soil Conservation, 2008.

4.6.1.1 Mapa de conductividad hidráulica no saturada

La **Figura 40** muestra un mapa de isolíneas de conductividad hidráulica, realizado a través de la interpolación IDW. En esta figura, la conductividad hidráulica más alta se ubica en la parte norte y sur de la microcuenca (tonalidad verde), mientras que las conductividades hidráulicas no saturadas más bajas se ubican en el centro de la microcuenca, cerca del cuerpo de agua (tonalidad roja).

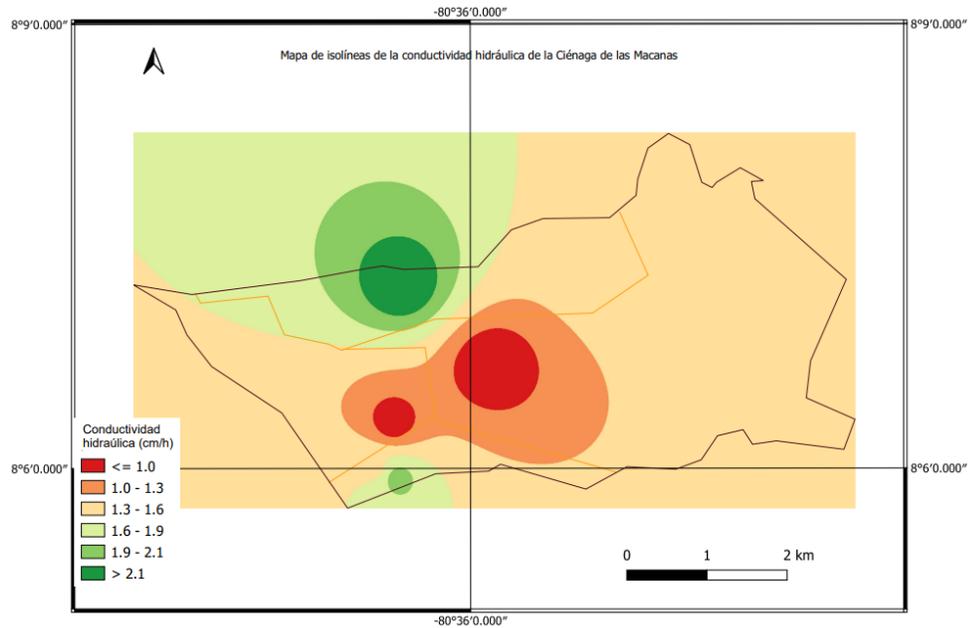
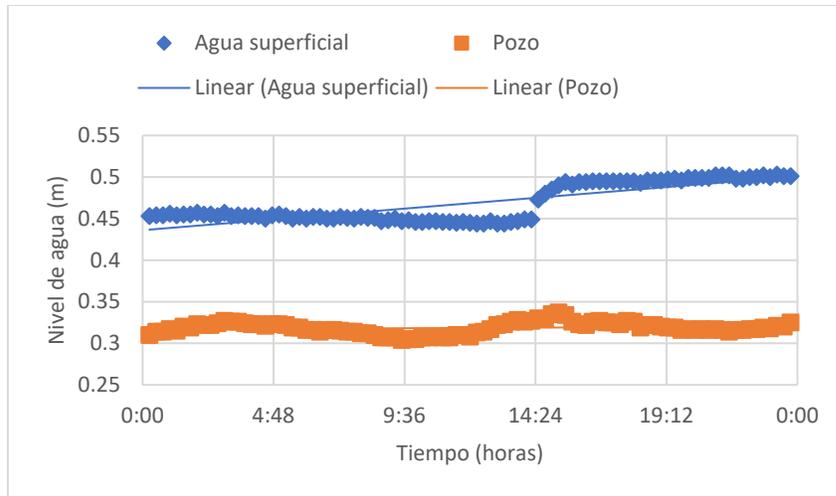


Figura 40: Mapa de conductividad hidráulica no saturada (cm/h) de la microcuenca de la ciénaga de Las Macanas.

Fuente: Propia.

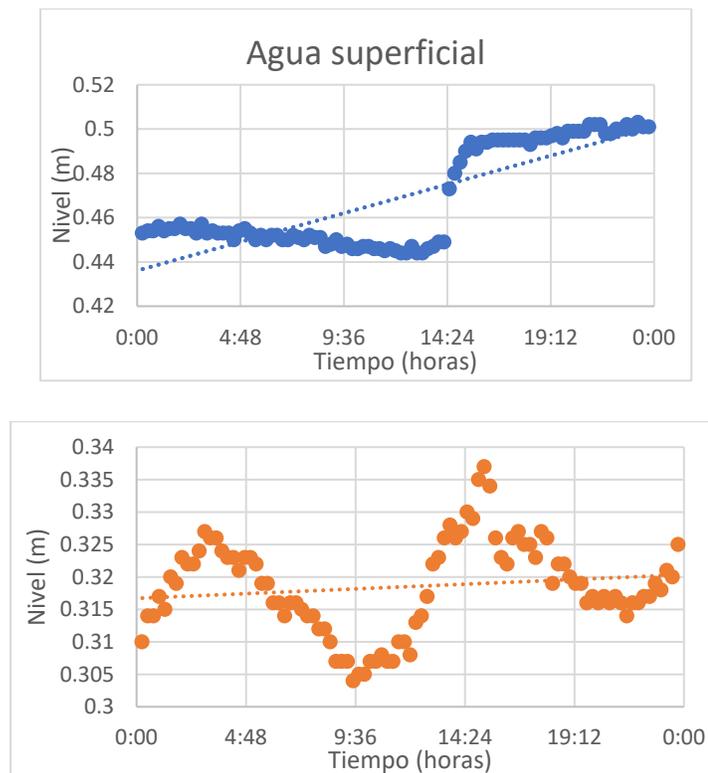
4.6.2. Presencia de aguas subterráneas

Para medir la influencia de aguas subterránea en la ciénaga, se evaluó el registro del nivel de agua de los sensores en un evento de precipitación extrema, específicamente el evento del 1 de mayo de 2021, donde se registró una precipitación de 80.4 mm. En la **Gráfica 10** y en la **Gráfica 11**, se observa que, al aumentar la altura del nivel de agua de la ciénaga “sensor 2” (**Figura 19**), también lo hace de forma menos abrupta la superficie de agua del pozo “sensor 1” (**Figura 19**).



Gráfica 10: Nivel de agua del pozo y agua superficial de la ciénaga.

Fuente: Propia.



Gráfica 11: Nivel del pozo y agua superficial de la ciénaga.

Fuente: Propia.

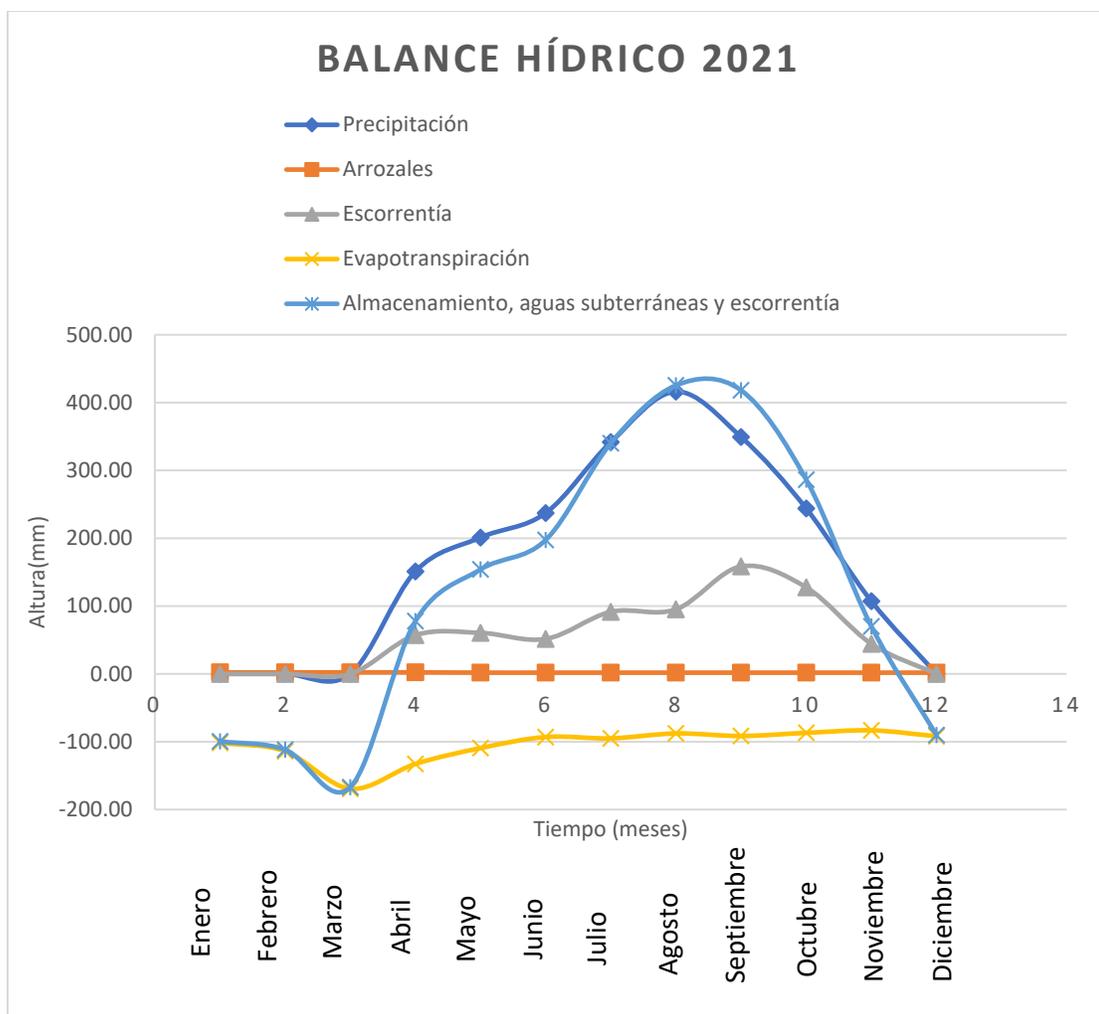
4.7. Balance hídrico

En la **Tabla 25** y en la **Gráfica 12**, se observan los resultados del balance hídrico de enero a diciembre. En este, la mayor fuente de entrada es la precipitación, siendo el aporte agrícola por parte de los arrozales, prácticamente nulo. Dentro de las salidas de agua del sistema, la evapotranspiración es la fuente más importante.

Tabla 25: Balance hídrico en los meses de enero a diciembre de 2021 en la ciénaga de Las Macanas.

Tiempo (meses)	Resultados(mm)				Almacenamiento, aguas subterráneas y escorrentía
	Entradas			Salidas	
	Precipitación	Arrozales	Escorrentía	Evapotranspiración	
Enero	0.00	2.24	0.00	-101.62	-99.38
Febrero	0.00	2.24	0.00	-113.97	-111.73
Marzo	0.00	2.24	0.00	-169.30	-167.06
Abril	151.10	2.24	57.13	-132.73	77.74
Mayo	201.10	1.83	60.51	-109.35	154.08
Junio	237.20	1.83	51.51	-93.04	197.50
Julio	341.70	1.83	91.56	-95.02	340.06
Agosto	416.20	1.83	95.13	-87.76	425.39
Septiembre	349.30	1.83	158.53	-91.53	418.13
Octubre	243.90	1.83	127.57	-86.91	286.38
Noviembre	107.20	1.83	44.34	-83.24	70.12
Diciembre	0.00	1.83	0.00	-91.91	-90.08

Fuente: Propia.



Gráfica 12: Balance hídrico de los meses de enero a diciembre del año 2021 en la ciénaga de Las Macanas.

Fuente: Propia.

4.7.1. Balance hídrico con almacenamiento medido

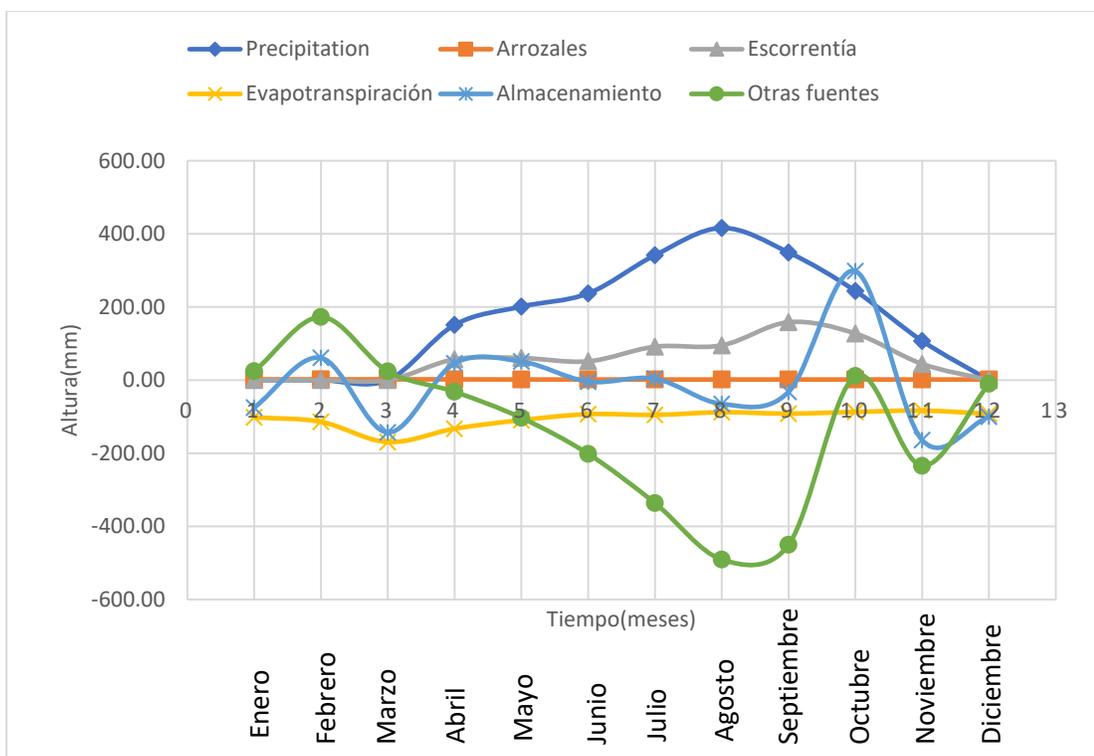
El sensor instalado en el agua superficial de la ciénaga nos permite conocer cómo cambia el nivel del agua del humedal, y por ende, el almacenamiento. Para este balance, se usaron los mismos valores que en el punto 4.7, pero se le agregó como valor conocido el

almacenamiento (**Tabla 26**). Esto nos permite cuantificar cuán influyentes son las otras entradas y salidas de agua que no pudieron ser medidos directamente en este trabajo, tales como el agua subterránea, la escorrentía entrante del río Santa María, la escorrentía saliente del humedal, entre otros. Para la estación seca, en la ciénaga se observa una fuerte influencia de las otras fuentes de agua, mientras que, ya entrada la estación lluviosa, la principal fuente de agua es la precipitación y la principal salida de agua sería la correspondiente a otras fuentes (**ver Gráfica 13**).

Tabla 26: Balance hídrico en los meses de enero a diciembre de 2021 en la ciénaga de Las Macanas.

Tiempo (meses)	Resultados (mm)					
	Precipitación	Arrozales	Escorrentía	Evapotranspiración	Almacenamiento	Otras fuentes
Ene	0.00	2.24	0.00	-101.62	-75.00	24.38
Feb	0.00	2.24	0.00	-113.97	61.00	172.73
Mar	0.00	2.24	0.00	-169.30	-143.00	24.06
Abr	151.10	2.24	57.13	-132.73	46.00	-68.37
May	201.10	1.83	60.51	-109.35	51.00	-227.07
Jun	237.20	1.83	51.51	-93.04	-4.00	-385.90
Jul	341.70	1.83	91.56	-95.02	4.00	-591.31
Ago	416.20	1.83	95.13	-87.76	-65.00	-770.30
Sept	349.30	1.83	158.53	-91.53	-32.00	-685.79
Oct	243.90	1.83	127.57	-86.91	298.00	-101.76
Nov	107.20	1.83	44.34	-83.24	-164.00	-296.65
Dic	0.00	1.83	0.00	-91.91	-100.00	-9.92
	2047.70	23.56	686.28	-1256.38	-123.00	-2915.91

Fuente: Propia.



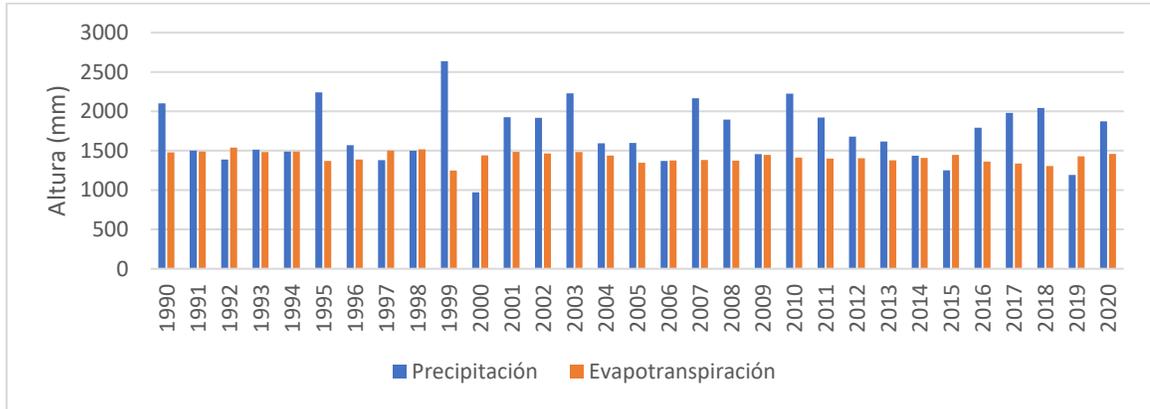
Gráfica 13: Balance hídrico de los meses enero a diciembre del año 2021 en la ciénaga de Las Macanas.

Fuente: Propia.

4.7.2. Balance hídrico de los últimos 30 años

Analizando los datos de precipitación y evapotranspiración mostrados (ver **Gráfica 2** y **Gráfica 7**) de los últimos 30 años, se observó que la precipitación es generalmente mayor a la evapotranspiración (ver **Gráfica 14**), con tiempos excepcionales de lluvia cada cuatro o cinco años. Se aprecia que las lluvias interanuales parecen tener un efecto importante en la recarga de agua en la ciénaga. Por ejemplo, la sequía de 2015 pudo ser causada por una combinación de un año con poca lluvia, y sin eventos extraordinarios de precipitación desde el año 2010. Igualmente, en el año 2019, hubo menos precipitación, sin afectar tanto

a la ciénaga como en el año 2015; lo mismo pudo ocurrir debido a que en 2018 sí se registraron unos altos niveles de precipitación.



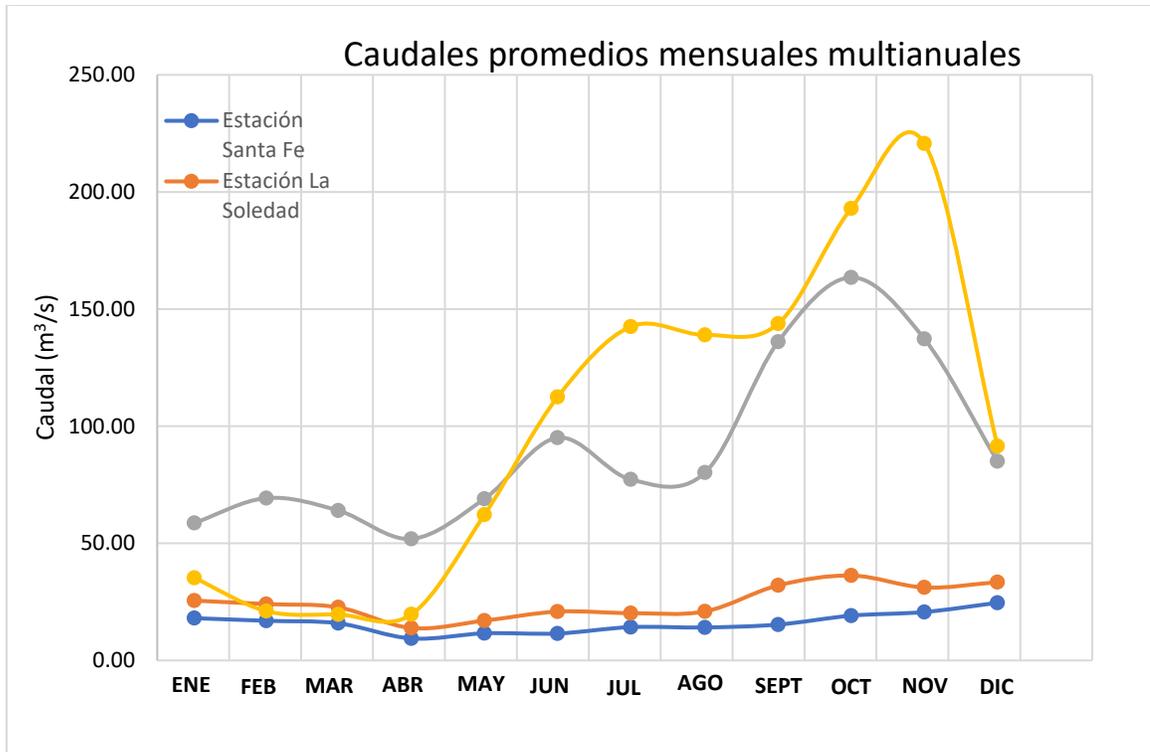
Gráfica 14: Precipitación y evapotranspiración de 1990 a 2019.

Fuente: Propia.

4.8. Caudal del río Santa María

Se analizan los promedios mensuales multianuales entre los años 2014 y 2017 de las 2 estaciones ubicadas río arriba, las cuales están más cercanas entre sí: Santa Fe (132-01-01) y La Soledad (132-01-02). Se puede observar en la **Gráfica 15** cómo los caudales de estas estaciones tienen una tendencia de comportamiento similar durante los años analizados.

Luego, se ve el cambio significativo que tiene la estación aguas abajo (132-01-03) con las dos estaciones ya mencionadas, puesto que en aguas arriba existen muchos afluentes que afectan el caudal de la estación de San Francisco.

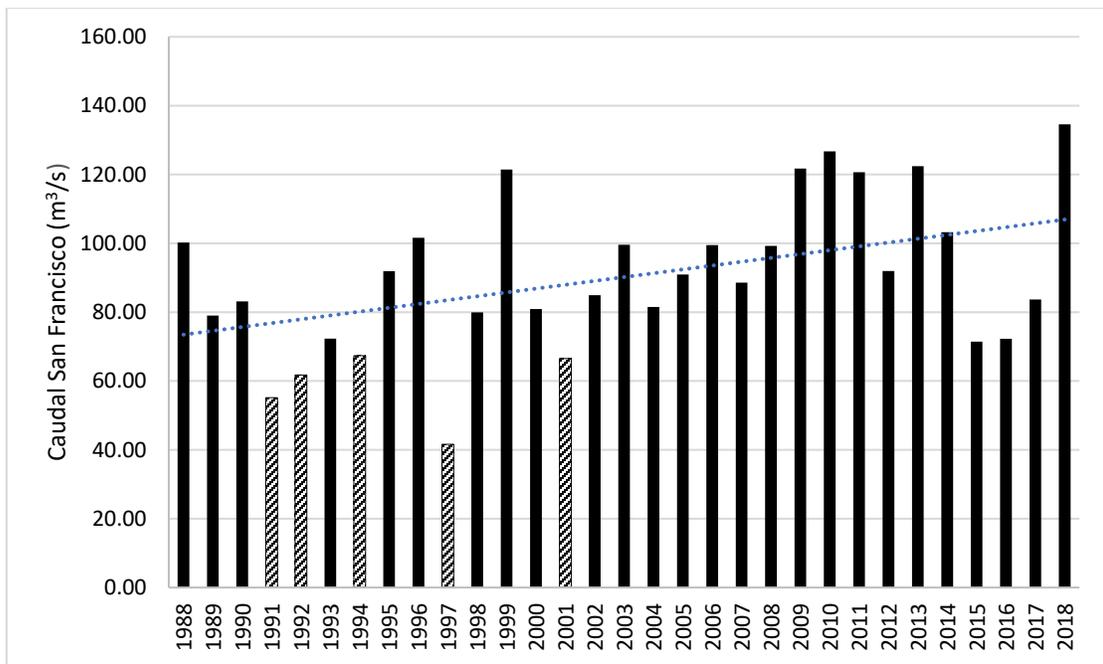


Gráfica 15: Caudales promedios mensuales multianuales de diferentes estaciones durante 2013 a 2017.

Fuente: Propia.

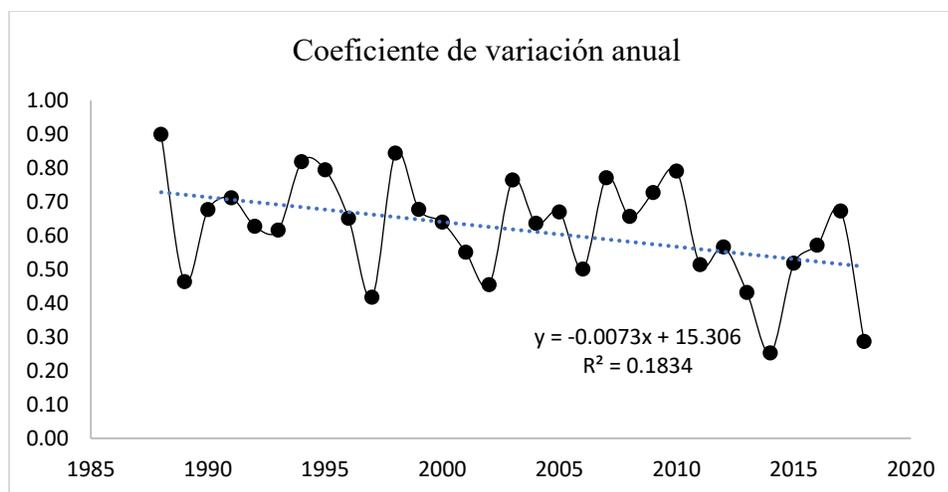
Al compararla con la data de la aplicación de caudales de Hydroviewer, su tendencia de comportamiento mensual es diferente. El Hydroviewer muestra ciertos meses más bajos que la estación 132-01-03 y en otros más altos que la estación 132-01-03, estando completamente desajustada a la estación de ETESA. Por lo tanto, debido a ambos análisis, se descarta el uso del Hydroviewer para obtener data de caudal. Solo se utilizará la estación de San Francisco (132-01-03), ubicada aguas arriba, al ser previamente correlacionados por ETESA.

En la **Gráfica 16**, se observa el caudal de la estación de San Francisco (132-01-03). Sus niveles más bajos han sido durante 1991, 1992, 1994, 1997 y 2001. Y sus niveles más altos durante 1999 y 2018. También se puede ver que, durante los últimos años, ha habido una tendencia a aumentar su magnitud de caudal. La **Gráfica 17** muestra la variación entre los datos de caudal anuales observados. Esta gráfica muestra cómo el coeficiente de variación (CV) disminuye a través de los años. La disminución del CV indica que los valores mensuales de caudal son más constantes. En resumen, durante los últimos años, el caudal ha tenido la tendencia de aumentar, mientras que la variación mensual de los valores de caudal se ha vuelto más constante.



Gráfica 16: Caudales promedios de cada año de la estación de San Francisco desde 1988 hasta 2018.

Fuente: Propia.



Gráfica 17: Coeficiente de variación anual de la estación de San Francisco desde 1988 hasta 2018.

Fuente: Propia.

4.9. Comparación temporal de áreas clasificadas

4.9.1. Clasificación supervisada de las imágenes – comportamiento anual y mensual

El proceso de clasificación supervisada se realizó en 140 imágenes tomadas entre los años 1997 a 2003 y 2014 a 2021, siendo cada año diferente en cuanto al comportamiento de las coberturas de suelo de la ciénaga. Mediante el método de clasificación supervisada, en la **Figura 41**, es posible observar cómo es que las diferentes clases de cobertura se reparten o dividen por medio del área de estudio de 1527.75 ha, y cómo varían a través de los meses y años. Cada color representa una clase de cobertura; así, el color azul representa ‘espejo de agua’ y el color verde azulado ‘agua con vegetación’, siendo la suma de estas dos zonas el ‘área inundada’ del humedal. El color verde claro es ‘vegetación verdosa’, el color amarillo es ‘suelo desnudo’ y el color verde oscuro es ‘grupo de árboles y arbustos’.

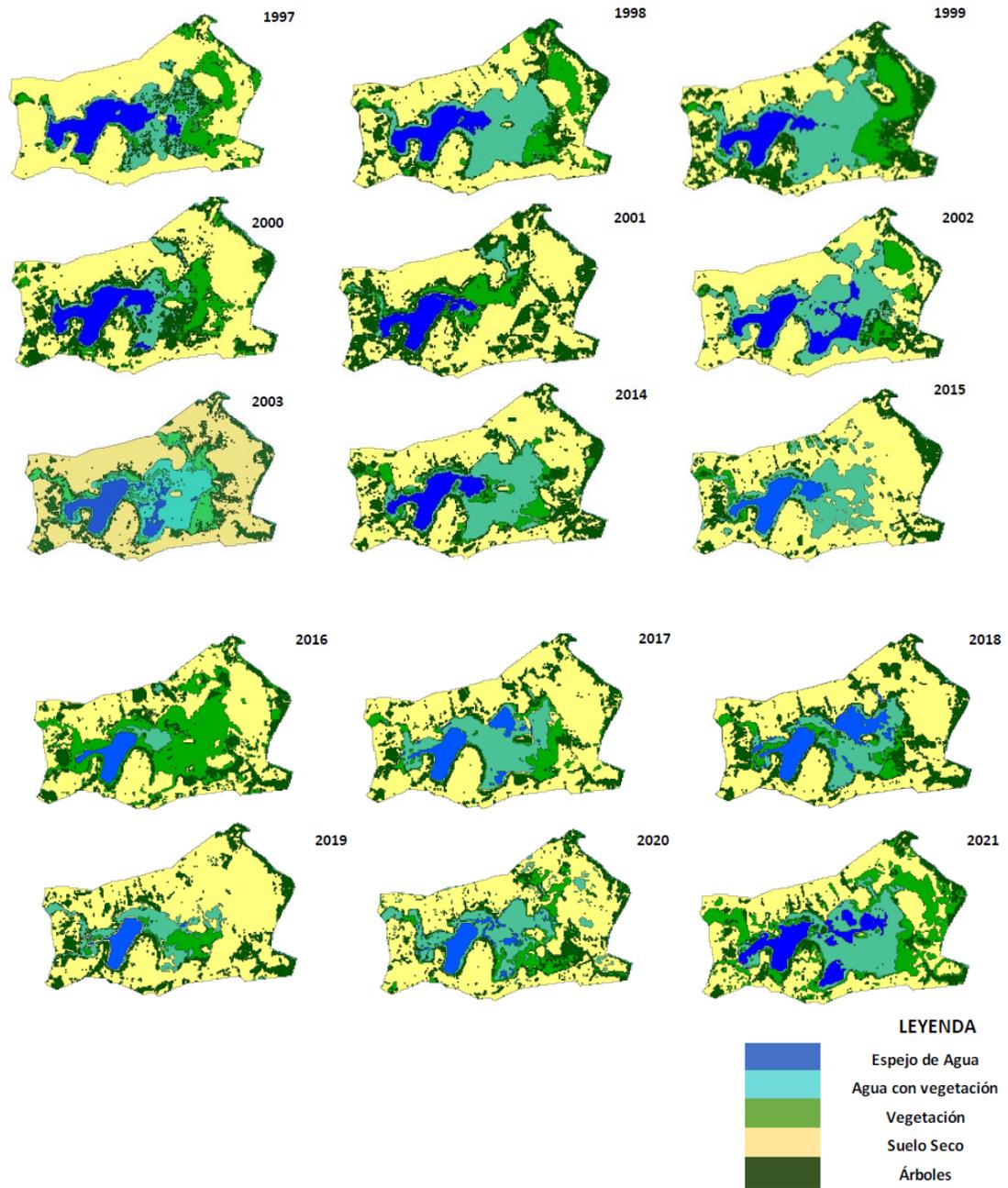


Figura 41: Clasificación supervisada del humedal (mes de abril) durante cada año del periodo 1 y periodo 2.

Fuente: Propia.

No fue posible separar la clase ‘espejo de agua’ de la clase ‘agua con vegetación’, puesto que, durante varios meses del año, el espejo de agua está cubierto por vegetación flotante que no permiten diferenciar entre estas clases, por lo que se decide considerarla como una sola, llamándola ‘área inundada’.

En la **Figura 42** y **Figura 43**, se observan dos casos representativos, respectivamente: el año 2015 (extrema sequía) y el año 2021 (inundaciones extremas). En el año 2015, se presenta una variación de su cobertura de área inundada entre 5 % y el 30 %, llegando a uno de los niveles más bajos que ha tenido el cuerpo de agua. Mientras que, en el año 2021, se observó una variación del 25 % al 56 %. Como se ha expuesto anteriormente, el área total utilizada para estos cálculos es de 1527.75 ha, y hubo una diferencia de imágenes satelitales disponibles: 10 imágenes para el año 2015 y 5 imágenes para el año 2021.

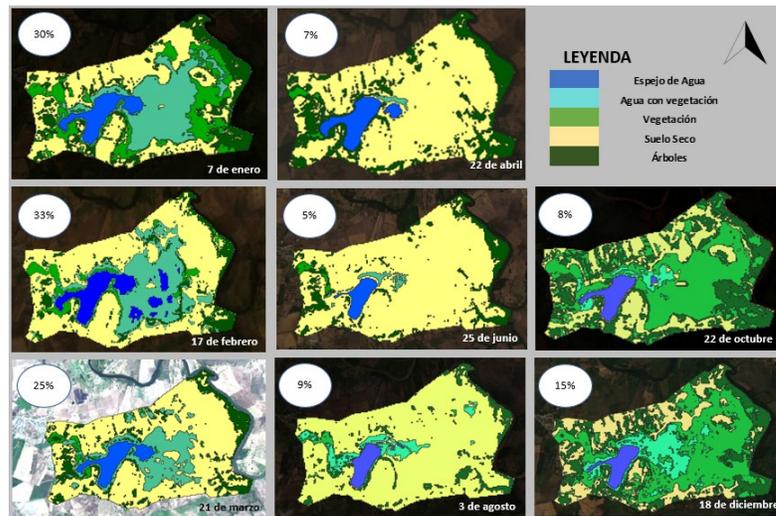


Figura 42: Coberturas de suelo mensual de la ciénaga durante el año 2015 y porcentaje de cobertura del área inundada.

Fuente: Propia.

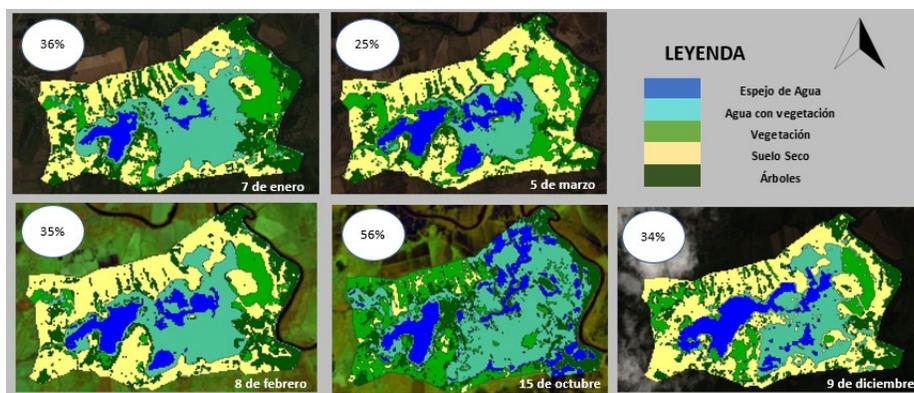


Figura 43: Coberturas de suelo mensuales de la ciénaga durante el año 2021 y porcentaje de cobertura inundada.

Fuente: Propia.

Se observa, en la **Figura 42** y **Figura 43**, cómo la cobertura de área inundada disminuye en los meses de la época seca (diciembre – abril) y vuelve a aumentar en la época lluviosa (mayo a noviembre), manteniéndose inundado durante todo el año. La humedad aumenta progresivamente a medida que comienza la temporada de lluvia; sin embargo, en el 2015 no se llegó a los niveles esperados de inundación cuando la lluvia empezó. Lo que sugiere que no hubo una cantidad de agua lluvia apreciable acumulada en el subsuelo de meses anteriores para que la capa superior del suelo del humedal se inundase.

En la **Figura 44** se muestra la hidrodinámica del humedal. A través de los meses, se mantiene siempre inundado hacia el extremo oeste, por estar más bajo que el resto del terreno. A medida que sube el nivel del agua en la época lluviosa, se expande hacia el este, en los planos de inundación, llegando hasta la zona conocida como Los Toritos, donde las aguas drenan hacia el río Escotá y, finalmente, llegan al río Santa María.

En el caso de las recargas, se observa el aporte de los arrozales que provienen del este, zona que siempre está vercosa y húmeda, incluso en los meses más secos, y el aporte por parte del río proviene de la parte norte, mayormente en la época lluviosa. Finalmente, la mayor cantidad de bosques está en la parte este del área de estudio, bordeando el río Santa María y la entrada de Los Toritos.



Figura 44: Imagen en falso color (NIR/R/G) de las inundaciones de la ciénaga de Las Macanas (color azul representa agua). Fecha: 1 de septiembre de 2020.

Fuente: Propia.

4.9.2. Ciénaga de Las Macanas: Periodo 1997 – 2002

Al hacer un análisis anual de las coberturas en el periodo 1 (**Gráfica 18**), se puede observar que predominan los ‘suelos tipo desnudo y de pastizales’, los cuales ocupan más del 35 % de la zona de estudio. Esta clase tiene su punto máximo en 2001 con el 37 % y un mínimo

en 1999 con un 27 %. En segundo lugar, se encuentra la clase de ‘agua con vegetación’, que cuenta con más del 20 % de cobertura, teniendo su máxima cobertura en 1999 con 27.5 % y cobertura mínima en 2001 con 20.1 %.

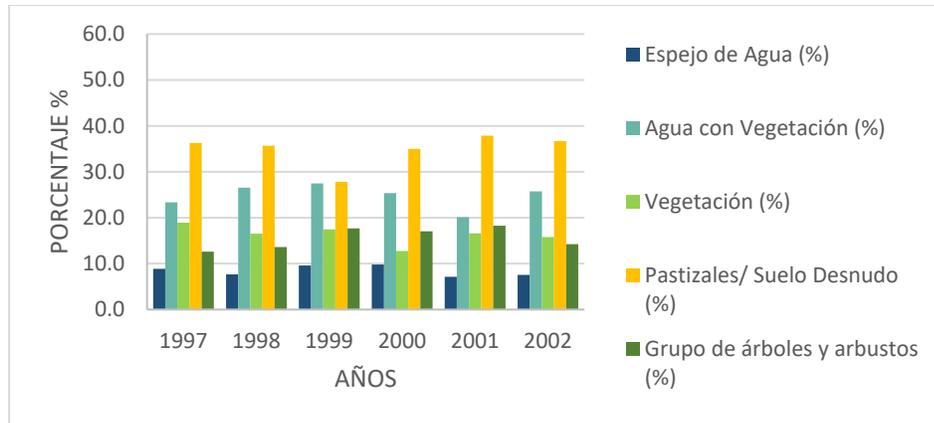
En la **Tabla 27**, se observa que el ‘espejo de agua’, libre de vegetación flotante en su superficie, posee una cobertura menor al 10 % durante los años analizados, teniendo su cobertura mínima en el año 2001, con un 7.1 %. La ‘cobertura boscosa’ ha ido aumentando a través de los años desde 12 %, en el 2001, hasta un 18 %, en el 2002. También se puede ver el comportamiento de ‘vegetación verdosa’, la cual no ha tenido cambios significativos en las variaciones de cobertura.

Tabla 27: Desglose de los porcentajes (%) de coberturas de las diferentes clases 1997 – 2002.

Desglose de porcentajes de clases					
Año	Espejo de agua (%)	Agua con vegetación (%)	Vegetación (%)	Pastizales/ suelo desnudo (%)	Grupo de árboles y arbustos (%)
1997	8.9	23.3	18.9	36.3	12.6
1998	7.6	26.5	16.5	35.7	13.6
1999	9.6	27.5	17.5	27.8	17.7
2000	9.8	25.4	12.8	35.0	17.0
2001	7.1	20.1	16.6	37.9	18.3
2002	7.5	25.7	15.8	36.7	14.3

Fuente: Propia.

Durante este período, el promedio de área inundada ronda aproximadamente las 500 ha de superficie, que sería el 32 % de cobertura del área de estudio.



Gráfica 18: Cambios anuales en las coberturas de suelo en la ciénaga de Las Macanas, en el periodo de 1997 – 2002.

Fuente: Propia.

4.9.3. Ciénaga de Las Macanas: Periodo 2014 – 2021

Al hacer un análisis anual de las coberturas del periodo 2 (**Gráfica 19**), se puede observar de manera general que los ‘pastizales y suelos desnudos’ continúan ocupando la mayor parte de la zona de estudio, esta vez con porcentajes variados a través de los años, superiores al 30 %, aumentando significativamente en el año 2015 con un 57 %. La clase de ‘agua con vegetación’ tiene una variación entre un 8.8 % y 17.2 %, posteriormente, empieza a incrementarse con el porcentaje más alto en 2020, con un 28.7 % de cobertura.

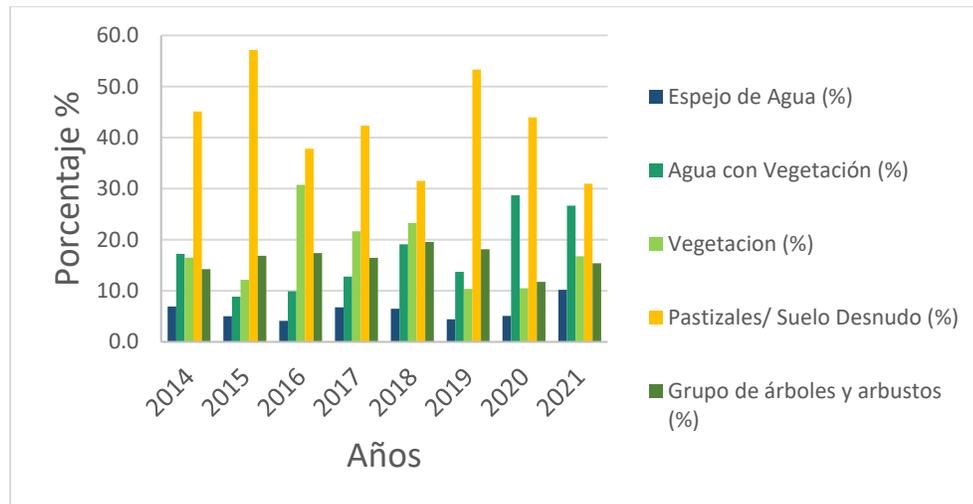
En la **Tabla 28**, se puede observar cómo el ‘espejo de agua’, libre de vegetación flotante sobre su superficie, va disminuyendo desde 2014 hasta 2020, teniendo variaciones entre 4.1 % y 6.9 % de cobertura. Esta clase solo se incrementa significativamente en el año 2021, con un 10.2 % de cobertura. La ‘vegetación verdosa’ y la ‘cobertura boscosa’ tienen

variaciones a través de los años que no muestran un patrón definido, es decir, parece que su comportamiento ha sido constante, sin aumentos ni bajos muy bruscos.

Tabla 28: Desglose de los porcentajes (%) de coberturas de las diferentes clases 2014 – 2021.

Desglose de porcentajes de clases					
Año	Espejo de agua (%)	Agua con vegetación (%)	Vegetación (%)	Pastizales/ suelo desnudo (%)	Grupo de árboles y arbustos (%)
2014	6.9	17.2	16.5	45.1	14.3
2015	5.0	8.8	12.1	57.1	16.9
2016	4.1	9.9	30.7	37.8	17.4
2017	6.8	12.8	21.7	42.4	16.5
2018	6.5	19.1	23.3	31.5	19.6
2019	4.4	13.7	10.4	53.3	18.2
2020	5.1	28.7	10.5	44.0	11.7
2021	10.2	26.7	16.8	31.0	15.4

Fuente: Propia.



Gráfica 19: Cambios anuales en las coberturas de suelo en la ciénaga de Las Macanas en el periodo 2014 – 2021.

Fuente: Propia.

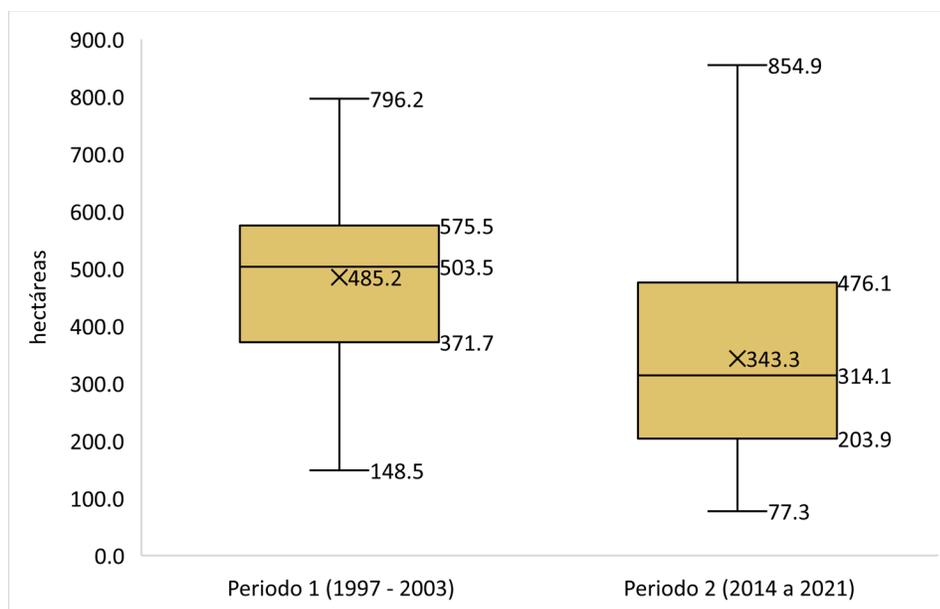
Durante este periodo, el área inundada se mantiene en un rango promedio de 200 ha a 500 ha, que sería alrededor del 13 % al 32 % del área de estudio.

Si se hace la comparación entre los mínimos de cobertura de ambos periodos, se puede observar cómo disminuyó notablemente la superficie del espejo de agua un 3 %, que sería una superficie aproximada de 45 ha, esto siendo generado en parte por el aumento de vegetación flotante.

4.9.4. Análisis del régimen de inundación de la ciénaga

En la **Gráfica 20**, se comparan valores del área inundada del periodo 1 (1997 a 2003) con el periodo 2 (2014 a 2021). Durante el periodo 1, se puede observar cómo el promedio del área es mayor, con un valor de 485.2 ha, mientras que el valor del promedio del periodo 2 es de 343.4 ha. También se observa cómo los valores del percentil 25 y percentil 75 del periodo 2 son menores que el periodo 1. Siendo estos 476.1 ha y 204.9 ha, respectivamente.

Durante el periodo 1, se observa cómo el mínimo de área es mayor que el periodo 2. En cuanto a los Coeficientes de Variación (CV) de los datos régimen de inundación, el periodo 1 tiene un CV de 31 % y el periodo 2, un CV de 53 %. Los valores muestran que, en el periodo 1, los datos son más constantes y menos dispersos; mientras que, en el periodo 2, los valores han llegado a ser más extremos.



Gráfica 20: Gráfico de cajas, comparando los regímenes de inundación de la ciénaga de Las Macanas durante el periodo 1 (CV = 31 %) y periodo 2 (CV = 53 %).

Fuente: Propia.

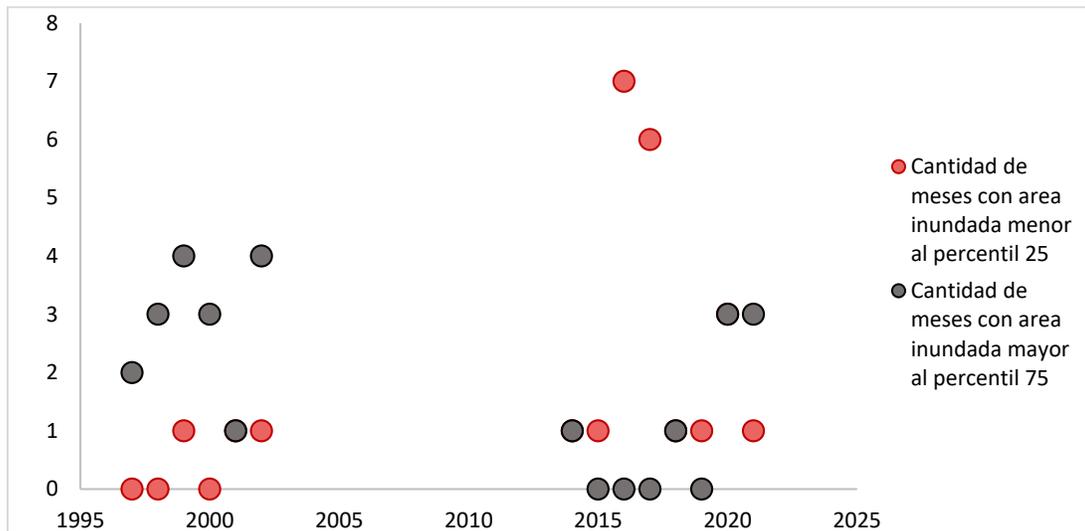
En el siguiente análisis, en vez de ser por periodos, se consideran todos los datos del área de inundación, es decir, el conjunto de ambos periodos. El percentil 25 obtenido es de 267.5 ha y el percentil 75 obtenido es de 522.17 ha. En la **Tabla 29**, se puede observar anualmente la cantidad de meses disponibles con imágenes, y cuántos de ellos tienen un área mayor al percentil 75 y menor al percentil 25.

En la **Gráfica 21**, se muestra de forma cronológica cómo es el comportamiento de los meses con su área inundada. En el periodo 1, durante los primeros cinco años, se observa mayor cantidad de meses con área inundada mayor al percentil 75 y pocos meses con áreas menor al percentil 75, mientras que en el periodo 2, se observa cómo disminuyó la cantidad de meses con área mayor al percentil 75.

Tabla 29: Proporción de meses con áreas inundadas pequeñas y grandes.

Cantidad			
Año	Meses disponibles	Área < 25th	Área > 75th
1997	5	0	2
1998	7	1	3
1999	7	0	4
2000	6	1	3
2001	5	1	1
2002	5	1	4
2014	8	1	1
2015	10	7	0
2016	9	6	0
2017	5	1	0
2018	8	1	1
2019	6	3	0
2020	7	1	3
2021	5	0	3

Fuente: Propia.



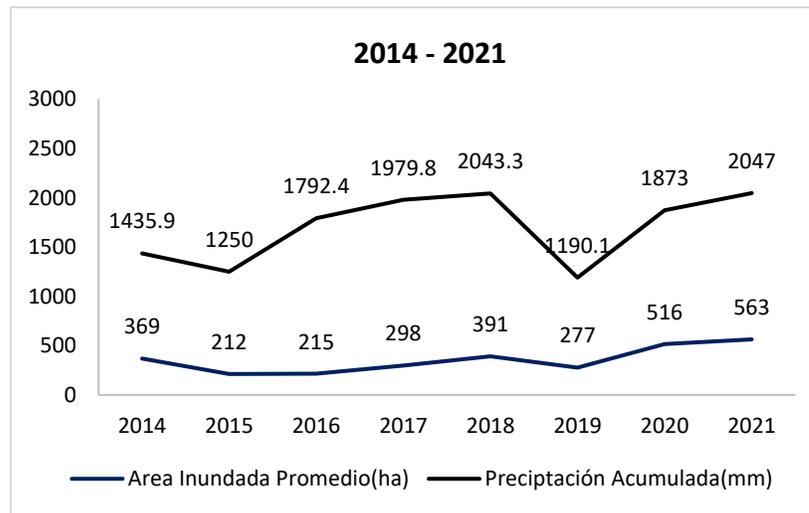
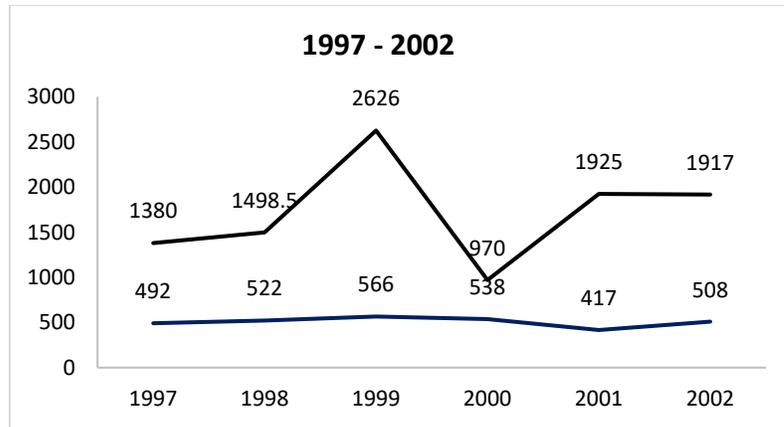
Gráfica 21: Cantidad anual de meses con áreas de inundación.

Fuente: Propia.

4.9.5. Comparación con la data climatológica

Al comparar el promedio anual de área inundada de la ciénaga con la precipitación anual acumulada del pluviómetro de El Rincón en ambos periodos, se obtuvo la **Gráfica 22**, en la cual se puede observar que los años 2015 y 2019 tienen la menor área de inundación. El 2015 tuvo una precipitación anual de 1792.4 mm y el 2019, una precipitación anual de 1190.1 mm. Se esperaría que, al ser menor la precipitación del 2019, fuese menor la cobertura de agua inundada a la de 2015, y no es así. La cobertura del 2019, incluso con una precipitación menor, es mayor a la del 2015.

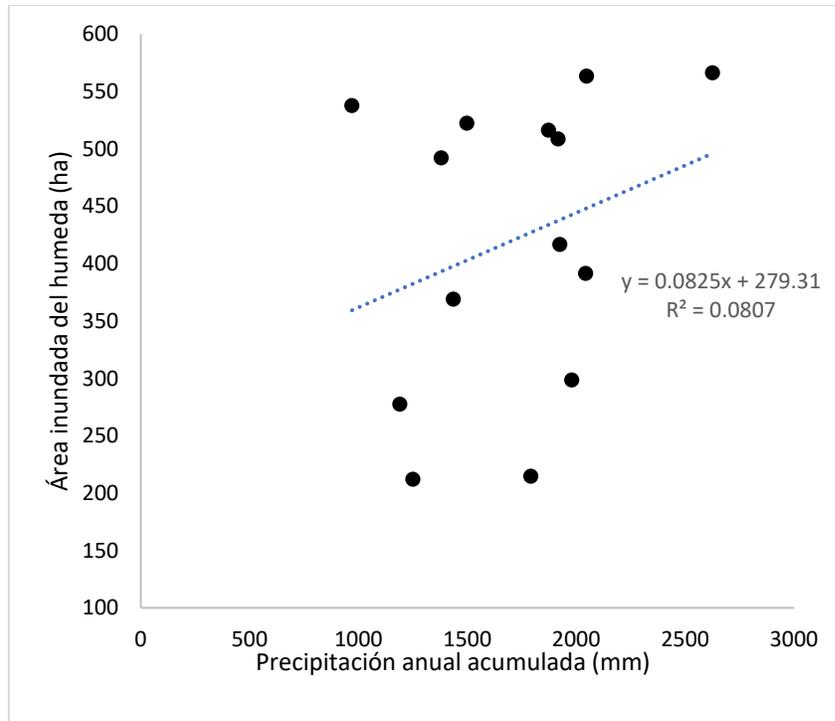
También se puede observar que los años 1999 y 2000 tienen una mayor área de inundación; en 1999, se tuvo una precipitación anual de 2626 mm y en 2000, de 1970 mm. Incluso, con unos niveles muy bajos de precipitación en el 2000, comparados con 1999, el área de inundación no disminuyó demasiado. En este caso, puede ser que los altos niveles del año anterior, 1999, se hayan mantenido con niveles altos el año siguiente, 2000. Se puede mencionar, igualmente, que los años 1997 y 1999, con precipitaciones entre 1380 mm y 2626 mm, tuvieron mejor comportamiento del área inundada que el año 2018, con una precipitación de 2043 mm.



Gráfica 22: Área inundada promedio y precipitación acumulada anual (pluviómetro El Rincón).

Fuente: Propia.

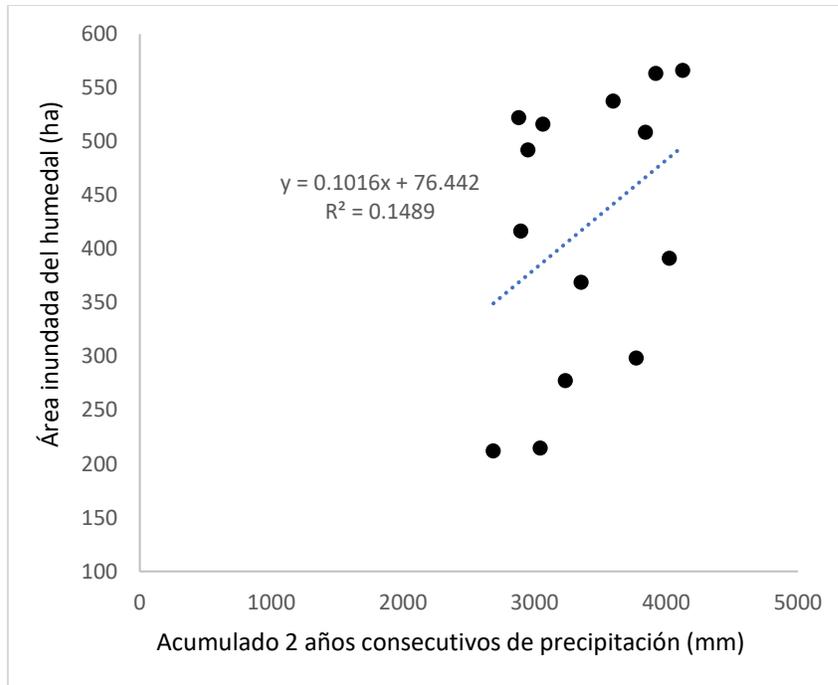
Al ver el análisis por correlación, se puede observar en la **Gráfica 23** la baja influencia que solo el año en curso tiene sobre el área inundada (coeficiente de determinación de $R^2=0.081$).



Gráfica 23: Área inundada promedio vs. precipitación acumulada anual (pluviómetro El Rincón).

Fuente: Propia.

Ahora, si se hace el análisis de cuánto es la variación en el eje Y descrito por la variación en el eje X, tomando en cuenta dos años consecutivos de precipitación, se puede ver en la **Gráfica 24**, una influencia mayor que solo tomando en cuenta la precipitación anual del año en curso. Con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.149$, se sabe que el 14.9 % de la variabilidad del área inundada puede atribuirse a una relación lineal con la precipitación anual acumulada de dos años consecutivos.



Gráfica 24: Área inundada promedio vs. precipitación acumulada anual dos años consecutivos (pluviómetro El Rincón).

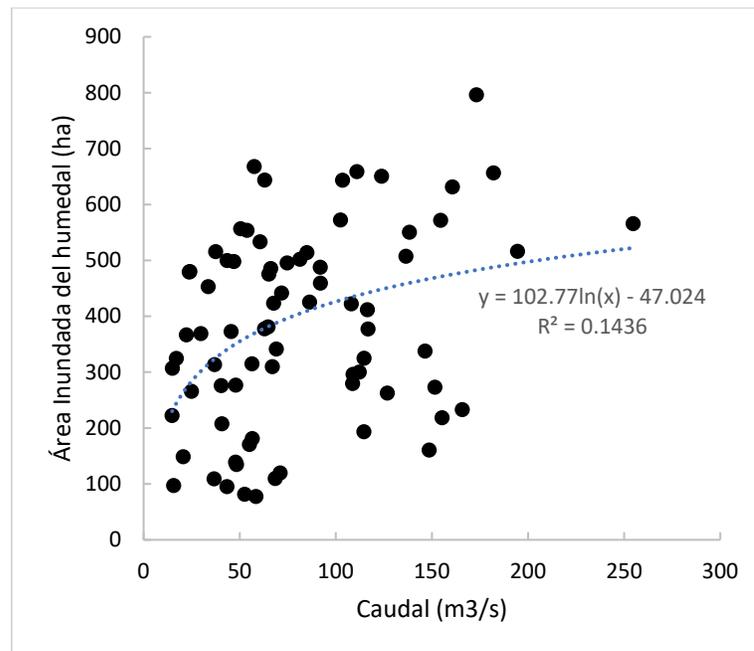
Fuente: Propia.

Cuando se analiza el comportamiento mensual de la precipitación, se observa que el inicio de las precipitaciones se da en los meses de abril y mayo; sin embargo, luego de analizar año tras año, el retraso en el mes de inicio de la precipitación no puede determinar el comportamiento del área promedio anual inundada de la ciénaga del resto del año. La influencia de la precipitación acumulada anual sobre el área inundada se percibe mayormente sumando dos años consecutivos de precipitación. La influencia de considerar un tercer año consecutivo es inferior con un $R^2 = 0.06$.

4.9.6. Comparación con la data hidrológica

Debido a que la estación de San Francisco se encuentra aguas arriba, en las gráficas se evaluará cuánto es afectado por el caudal promedio del mes anterior al área inundada del mes en curso. (Ejemplo: cuánto afecta el caudal promedio del mes de enero al área inundada de febrero).

En la **Gráfica 25**, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.143$, se considera que el 14.3 % de la variabilidad del área inundada puede atribuirse a una relación logarítmica con el caudal del mes anterior del río Santa María.

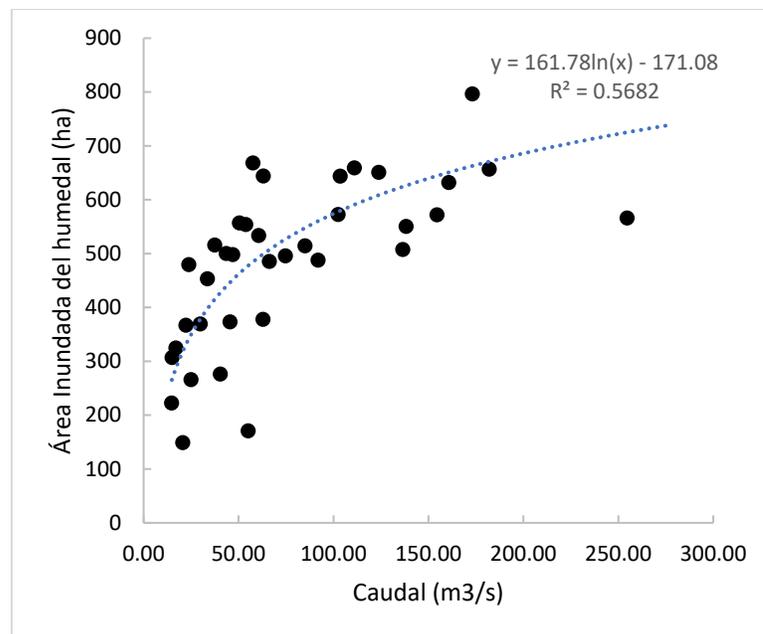


Gráfica 25: Correlación entre el área inundada versus el caudal (mes anterior) del río Santa María de la estación de San Francisco.

Fuente: Propia.

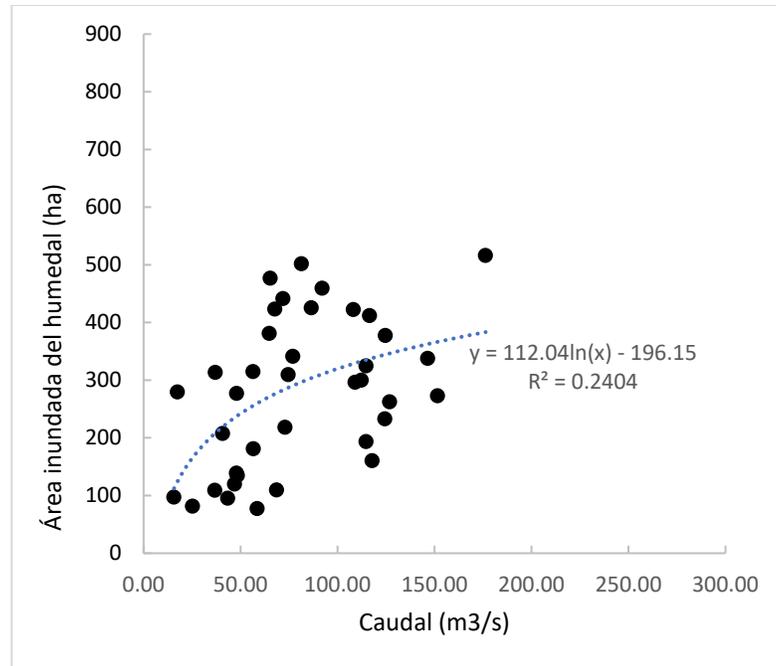
Sin embargo, se hace necesario mostrar las gráficas por periodos, para observar mejor cuánto ha sido la influencia del río durante los años de estudio. En la **Gráfica 26** se hace el desglose del periodo 1, donde, por el coeficiente de determinación de $R^2 = 0.568$, se sabe que el 56.8 % de la variabilidad del área inundada puede atribuirse a una relación logarítmica con el caudal del mes anterior del río Santa María.

En la **Gráfica 27**, se hace el desglose del periodo 2, donde, por el coeficiente de determinación de $R^2 = 0.240$, se sabe que el 24.0 % de la variabilidad del área inundada puede atribuirse a una relación logarítmica con el caudal del mes anterior del río Santa María. Se observa como en el periodo 1 existe una correlación mas alta entre las variables área inundada y caudal, que en el periodo 2.



Gráfica 26: Correlación del área inundada de la ciénaga versus caudal del mes anterior del río Santa María (estación San Francisco) año 1997 a 2003.

Fuente: Propia.



Gráfica 27: Correlación del área inundada de la ciénaga versus caudal del mes anterior del río Santa María (estación San Francisco) año 2014 a 2018.

Fuente: Propia.

También se puede observar, en la **Gráfica 27**, que los valores de área inundada no superan los 500 ha, mientras que en la **Gráfica 26**, se observa que en el periodo 1 fue posible superar esa cifra, llegando hasta las 800 ha de cobertura. Si el caudal del río, en la estación de San Francisco, no ha tenido grandes cambios en magnitud, entonces la disminución del área inundada podría ser causada por las siguientes razones:

1. Acciones humanas
 - a. Si grandes cantidades de agua son extraídas del río entre la estación de San Francisco y la ciénaga.
 - b. Si el agua es extraída del mismo cuerpo de agua de la ciénaga.
 - c. Si existen grandes extracciones en pozos, almacenamientos de agua subterránea.

2. Acciones no humanas (ambientales)
 - a. Arrastre de sedimentos por el río que estén obstruyendo la entrada de agua.
 - b. Cambios en los agujeros de las mareas.

CONCLUSIONES

1. Con base en el objetivo de esta investigación, se logró el cálculo del balance hídrico, así como el análisis anual de las diferentes clases de coberturas de suelo y su posterior comparación con las variables meteorológicas e hidrológicas. El estudio de las imágenes satelitales permitió obtener gran cantidad de información de las características del terreno y reducir la cantidad de trabajo de campo.
2. El aporte de agua por parte de los arrozales circundantes al humedal no parece tener una influencia significativa, porque su magnitud es pequeña.
3. La entrada principal es la precipitación, seguida de la escorrentía; el principal flujo de salida es la evapotranspiración. Existen aportes de agua por parte de las aguas subterráneas.
4. Las aguas subterráneas tuvieron un aporte significativo en la estación seca del año 2021. Sin embargo, el aporte de agua por parte de la precipitación sigue siendo mayor.
5. La clasificación supervisada muestra el aumento de las áreas secas y suelos desnudos en los circundantes del humedal, cubriendo zonas que la mayor parte del tiempo eran áreas de vegetación vercosa. En cuanto a la clase de árboles, esta no ha disminuido durante los años, manteniendo su densidad en todo el borde colindante al río Santa María.
6. Se puede ver cómo el espejo de agua de la ciénaga ha ido disminuyendo de manera significativa en el periodo analizado. Se observa, en los últimos ocho años, cómo este se ha ido cubriendo por vegetación flotante que no permiten mayor área abierta de espejo de agua.

7. Es importante resaltar la disminución progresiva del área de inundación, luego de comparar ambos periodos. Además, una mayor variabilidad en la superficie, siendo menos constante en el periodo 2 que en el periodo 1.
8. Se observa la influencia de las fluctuaciones de las lluvias interanuales sobre el área de inundación. El efecto que tiene la precipitación anual acumulada, solo del año en curso, sobre el área de inundación de la ciénaga es bajo. Es decir que, aunque tiene influencia en mantener húmeda la zona, su comportamiento no influye de manera considerable el régimen de inundación. Sin embargo, el aporte de sumar dos años consecutivos de precipitación, del año anterior y el año presente, tiene una mayor influencia sobre el área de inundación. También se debe comentar que el mes de inicio de las lluvias, no necesariamente afectará de manera positiva o negativa el régimen de inundación del resto del año.
9. Los aportes más significativos de agua han de provenir del río Santa María, mayormente en la época lluviosa, lo cual puede significar que la precipitación de la parte alta y media es la verdadera fuente principal de agua del humedal, ya que esta influye en el caudal del río aguas arriba, y la posterior acumulación en aguas subterráneas en la parte baja.

La influencia mayor que tiene el caudal del mes anterior sobre la ciénaga se explicaría por las lluvias interanuales, debido a que estas pueden estar acumulándose en aguas subterráneas, viajando desde la parte alta a la baja de la cuenca.

10. En los últimos 30 años, no ha habido un aumento significativo de la evaporación ni tampoco un descenso en la precipitación; por ende, no se le puede atribuir la

disminución del área húmeda de la ciénaga. Sin embargo, el cambio de los patrones de precipitación sí pudiera estar teniendo un efecto en la disminución de esta.

11. Las lluvias interanuales parecen tener un efecto importante en la recarga de agua en la ciénaga, lo que podría explicar por qué el humedal en los últimos años se está secando, debido al aumento de los años de sequía y la disminución de los años húmedos.

RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES

1. Es necesario contabilizar cuánta agua se está extrayendo del río Santa María para actividades agropecuarias, entre la estación de San Francisco y la ciénaga, y cómo esto puede afectar el humedal.
2. Instalar una estación hidrológica más cercana a la ciénaga que pueda medir el caudal y saber, de manera más precisa y exacta, la influencia del río. A su vez que es necesario conocer cuánta agua de la misma ciénaga de Las Macanas está siendo utilizada para fines agropecuarios. Se recomienda hacer un conteo de la cantidad de ganado que depende del humedal.
3. Al ser difícil predecir el comportamiento del régimen de inundación, tanto los agricultores como los ganaderos deben tener planes de contingencia para evitar ser afectados por eventos extremos de sequía e inundación.
4. Lastimosamente, por el daño en el sensor de la misión Landsat 7, no se pudieron obtener imágenes de los años 2004 a 2013, por esto no fue posible hacer un estudio de años seguidos. Se recomienda continuar con el estudio en la siguiente década para seguir documentando el comportamiento del humedal, a fin de obtener al menos más de 20 años seguidos de análisis.
5. Para un estudio profundo del almacenamiento en el humedal, son necesarios estudios de batimetría, y que se tomen medidas de manera constante del nivel de agua del humedal durante un tiempo prolongado. La falta de datos históricos del nivel de agua limita el estudio del balance hídrico y almacenamiento.

6. Para garantizar las necesidades hídricas del humedal, es necesario disminuir las presiones que sufre este, por lo que el uso adecuado y manejo sostenible de los recursos del área protegida deben ser prioridad. Al incrementar el uso de los planos de inundación, como tierras adecuadas para la agricultura y la ganadería de manera descontrolada, entonces esto puede limitar el papel regulador que tiene el humedal. Se reduce, de forma considerable, el área protegida de la ciénaga y se altera la dinámica hídrica del humedal, generando condiciones descontroladas de manejo ambiental, afectando épocas secas y lluviosas. Se demandaría un ordenamiento ambiental de las prácticas agropecuarias para que se garantice el equilibrio entre las actividades y el ambiente.
7. Es necesaria la comunicación continua y acuerdos claros entre las diferentes partes interesadas de la comunidad, propietarios de fincas en el humedal e instituciones sobre el cuidado y uso del humedal. Así también, el intercambio continuo de información permitirá generar nuevas políticas ambientales y futuros proyectos sobre la conservación del cuerpo de agua, como estudios para la delimitación de usos de suelo, demanda hídrica de los agricultores y ganaderos, análisis de calidad de agua, entre otros.
8. En cuanto a planes a futuro para el mantenimiento del área protegida, sería necesario tener cerca, divisiones, abrevadores, corrales e instalaciones apropiadas para el manejo de los animales. En el área sureste de la ciénaga, es posible establecer pastos resistentes que obliguen a las reses mantenerse en límites.

9. En el caso de aquellas personas con títulos de propiedad dentro del área protegida, se deben adoptar medidas para la protección de la tierra, vida silvestre y régimen hidrológico, entre otros.
10. Los datos de la modelación en HEC-HMS son necesarios calibrarlos, se recomienda usar una metodología distinta por la incursión de la marea, por esta razón el modelo debe ser ajustado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Quraishi, A. K., & Kaplan, D. A. (2021). *Connecting changes in Euphrates River flow to hydro pattern of the Western Mesopotamian Marshes. Science of the Total Environment, 768*, 144445. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144445>
- Alonso, D. (n.d.). *Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel*. MappingGIS. Retrieved September 10, 2021, from <https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/>
- ASTM International. (2021, Mayo). *Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. Retrieved from ASTM-D7928 – 17: <https://www.astm.org/d7928-17.html>
- Arthington, A. H., & Zalucki, J. M. (1998). *Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: Review of methods*. LWRDC Occasional Paper Series 27/98, 141.
- Atencia, V., Contreras, J., & Vergara, D. (2008). *Estudio multitemporal de imágenes satelitales con fines de delimitación del complejo bajo San Jorge margen Izquierdo (B13) y diagnóstico de zonas intervenidas antrópicamente (agricultura y ganadería)*.
- Bonnet, L. B.-M. (2014). *The Earth's Hydrological*. Springer.
- Castaño, S., Reyes, J., & Vela, A. (n.d.). *La Teledetección. Sus Bases*. (pp. 183–194).
- Cathalac. (2016). Ministerio de Ambiente de Panamá. Retrieved from *Cuencas Cathalac*:

<http://cuencas.cathalac.org/cuencas/cuencas-prioritarias/santa-maria>

Chang, R. (2020, Noviembre 6). *Ciénaga de Las Macanas*. (A. Santamaría, & Y. Serra, Interviewers).

Clima Pesca. (2017, julio 2). *Ciénaga de Las Macanas*. Retrieved from <https://climapesca.org/2017/07/cienaga-las-macanas/>

Comité Alto Nivel de Seguridad Hídrica. (2016). *Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos*. <https://doi.org/10.29327/15276.1-3>

Conservación Internacional. (2019, 05 25). Retrieved from <https://www.conservation.org/peru/novedades/2019/10/29/qu%C3%A9-es-carbono-azul#:~:text=Los%20ecosistemas%20de%20carbono%20azul%20son%20un%20h%C3%A1bitat%20cr%C3%ADtico%20para,costeros%20de%20todo%20el%20mundo%22>

Conservation International. (2019). *CARBONO AZUL. Métodos para evaluar las existencias y los factores de emisión de carbono en manglares, marismas y pastos marinos*. Retrieved from https://iaria.es/wp-content/uploads/2020/10/spanish_carbonoazul_lr.pdf

Correcciones a las imágenes de satélites (p. 10). (2006). <https://www.um.es/geograf/sigmur/index.html>

Fonseca, J. J., & Gómez, S. M. (2003). *Análisis multitemporal mediante imágenes Landsat caso de estudio: Cambio de área, laderas de la ciénaga de Tumaradó, Parque Natural Los Katíos*. Universidad Militar Nueva Granada, 1, 1–26.

<http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/9268/2/FonsecaJohnJairo2013.pdf>

CREHO Ramsar. (n.d.). Retrieved from <https://creho.org/acerca-de/>

David K. Todd, L. W. (2005). *Groundwater hydrology*. California: John Wiley and Sons, Inc.

Gis&Beers. (2017, July 25). *Galería de firmas espectrales para teledetección*.
<http://www.gisandbeers.com/galeria-de-firmas-espectrales-para-teledeteccion/>

Gis&Beers. (2019). *Técnicas de análisis de masas de agua con teledetección*.
<http://www.gisandbeers.com/tecnicas-analisis-masas-de-agua-teledeteccion/>

Jiménez, S. (2016, March 20). *Combinación RGB con bandas del satélite Landsat 5, 7 y 8*.
<https://www.hidraulicafacil.com/2016/03/Com.Landsat7.html>

Jorge Alfredo Herrera Silveira, C. T. (2017). *Carbono azul, manglares y política pública. Elementos para Políticas Públicas. Ciclo del Carbono y sus Interacciones*, 43-52.

Karszenbaum, H., & Barraza, V. (2008). *Introducción a la Teledetección Cuantitativa. Iafe*, 25(3), 1–11.

Lozano, S., Presidente, T., Mc, O., Aurelio, A., & Avenda, B. (2019). *Identificación del uso de suelo y vegetación (mediante clasificación no supervisada / supervisada) de la Unidad de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA) “ Cocodrilos Chacchoben ”, Bacalar , Quintana Roo , México, Osvaldo Martínez Manza.*

Mendoza, G. (2015, abril 18). *Ciénaga Las Macanas, en peligro por la sequía*. El Siglo.

MiAmbiente. (2009). *Plan de manejo integral de la parte alta, media y baja de la cuenca*

del río Santa María. Panamá.

Ministerio de Ambiente. (2016). Resolución DAPVS 0007-2016. Panamá.

Ministerio de Ambiente. (2019, diciembre 11). *Panamá promueve una agenda azul en la COP25*. Retrieved from <https://www.miambiente.gob.pa/panama-promueve-una-agenda-azul-en-la-cop25/>

Ministerio de Ambiente. (2021, Febrero 1). MIAMBIENTE. Retrieved from miambiente: <https://www.miambiente.gob.pa/humedales-riqueza-de-gran-valor-natural-y-economico/>

Resolución DAPVS-0007-2016, 8 (2016). [https://chm.cbd.int/api/v2013/documents/05B386D2-5BCD-A52D-6097-F853803CC619/attachments/Resolución DAPVS-0007-2016 que establece los límites del ARM ciénaga de Las Macanas.pdf](https://chm.cbd.int/api/v2013/documents/05B386D2-5BCD-A52D-6097-F853803CC619/attachments/Resolución%20DAPVS-0007-2016%20que%20establece%20los%20limites%20del%20ARM%20ciénaga%20de%20Las%20Macanas.pdf)

MiAmbiente, & ARAP. (2013). *Manglares de Panamá*.

MiAmbiente, NATURA, PRODESO, & CATIE. (2009). *Plan de Manejo Integral de la Parte Alta, Media y Baja de la Cuenca del Río Santa María*.

Ministerio de Ambiente. (2018). *Política Nacional de Humedales de la República de Panamá, 2020 -2050*.

MITMA. (n.d.). *Teledetección*. Retrieved September 10, 2021, from <https://www.mitma.gob.es/instituto-geografico-nacional/observacion-del-territorio/teledeteccion>

Ozesmi, S. L., & Bauer, M. E. (2002). *Satellite remote sensing of wetlands. Wetlands*

Ecology and Management, 10(5), 381–402.
<https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>

Pinzón, M. (2020, Noviembre 6). *Ciénaga de Las Macanas*. (Andrea Santamaría, & Y. Serra, Interviewers).

Ramsar. (2015). *La Convención de Ramsar: ¿de qué trata?* Ramsar.Org/Library, 1–3.
www.ramsar.org/about/the-scientific-technical-review-panel

Ramsar CREHO. (2020). *Nueva Iniciativa para Seguridad Hídrica en los Bosques de Montaña y Humedales del río Santa María en Panamá | CREHO Ramsar*.
<https://creho.org/nueva-iniciativa-para-seguridad-hidrica-en-los-bosques-de-montana-y-humedales-del-rio-santa-maria-en-panama/>

Ramsar CREHO, Ambiente, M. de, & AVINA. (2010). *Inventario preliminar de los humedales continentales y costeros de Panamá*.

ResearchGate. (2021, Septiembre). ResearchGate. Retrieved from Hydrologic cycle:
<https://www.researchgate.net/>

Román, J. S. (2019). *Cálculo de la Precipitación Neta, mediante el método del S.C.S.* Universidad de Salamanca, 12.

Sánchez, R., & Viñals, M. J. (2012). *Manual para la determinación de las necesidades hídricas de los humedales*. El Contexto Español.

Secretaría de la Convención de Ramsar. (2016). *Manual de la Convención Ramsar*. Ramsar, 5, 118. www.ramsar.org

Service, E.U.A. Soil Conservation. (2008). *Drainage Surveys*. Washington.

- Urquia, L. J. E. (2018). *Comparación de métodos de clasificación supervisada y no supervisada entre paquetes de procesamiento digital de imágenes.*
- USGS. (n.d.). *What are the band designations for the Landsat satellites?* Retrieved September 10, 2021, from https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products
- USGS. (2019). *Landsat Missions Timeline.* <https://www.usgs.gov/media/images/landsat-missions-timeline>
- U.S. Geological Survey. (n.d.). *U.S.G.S Science for a changing world.* Retrieved August 31, 2021, from <https://www.usgs.gov/>
- United States Department of Agriculture. (2010). *Time of Concentration.* In *U. S. Agriculture, National Engineering Handbook* (p. 630).
- Villarreal, J. E. (2018). *Panamá, en mapa de suelos de América Latina.* *Informaciones Agronómicas de Hispánoamérica*, 8.
- Zhang, R. (1997). *Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer.* American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.

ANEXOS

Anexo 1: Visita a la ciénaga con equipo de CREHO, Universidad de Florida y MiAmbiente.



Anexo 2: Entrevista al señor René Chang, EcoBiosfera Panamá (7 de noviembre de 2020).



Anexo 3: Presentación del proyecto “Garantizando la seguridad hídrica en los bosques de montaña y humedales del río Santa María”.



Anexo 4: Mapa de recorridos en la ciénaga.

