



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

**CONTRIBUCIÓN DE LOS CAUDALES AMBIENTALES EN LA CONSERVACIÓN
DE LA HIDRODINÁMICA DEL MANGLAR BARRA DE SANTIAGO, UBICADO EN
AHUACHAPÁN, EL SALVADOR**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN Y LA ESCUELA DE POSGRADO COMO REQUISITO
PARA OPTAR AL GRADO DE**

MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

GUILLERMO ARTURO CORNEJO HERNÁNDEZ

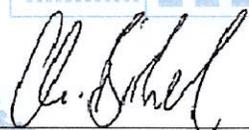
TURRIALBA, COSTA RICA

**AÑO
2023**

Este trabajo de final de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Examinador del estudiante, como requisito para optar por el grado de

MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

FIRMANTES:



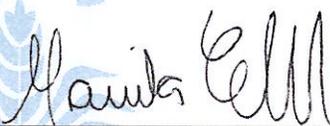
Christian Birkel Dostal, Ph.D.

Director Principal del Trabajo de Graduación



Carlos Giovanni Rivera, M.Sc.

Miembro Comité Asesor del Trabajo de Graduación



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.

Decana, a.i. de la Escuela de Posgrado



Guillermo Arturo Cornejo Hernández

Candidato

Agradecimientos

Varias personas colaboraron e hicieron posible este proyecto de investigación en distintas fases de su desarrollo, por ello agradezco:

A mi esposa Abigail Rosales y mi hijo Ramsés Cornejo por su apoyo incondicional en todo el proceso de realización de esta investigación, así como su acompañamiento en inspecciones de campo y toma de datos.

A todo el equipo de guarda recursos que apoyó en el trabajo de campo tanto en identificación de las conexiones del manglar como en la batimetría, y a Don Alberto y Don Valentín, que realizaron gestiones para que esto fuera posible.

A Francisco Gavidia, Oceanógrafo del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por su apoyo para tener mayor comprensión sobre la dinámica de las mareas en el país y particularmente en la bocana de las lagunas costeras, así como por la información sobre mareas proporcionada.

A William Abarca por su apoyo en la modelación hidráulica de diversos escenarios a numerosas resoluciones espaciales, lo que sirvió para encontrar la resolución espacial óptima que podía simularse en el menor tiempo posible, manteniendo la hidrodinámica del manglar con variaciones menores de una resolución a otra.

A Enrique Barraza, por compartir sus conocimientos sobre el manglar y registros de salinidad en el estero, casualmente tomados en campo en el mismo año utilizado para la simulación hidráulica; dichos datos permitieron apreciar la habilidad del modelo hidráulico para replicar la salinidad del manglar, y por lo tanto su hidrodinámica.

A mis asesores Christian Birkel y Carlos Rivera, por creer en este proyecto de investigación y este investigador, por su guía en aspectos claves como el diseño de la investigación, la logística en campo, la delimitación de la cantidad de trabajo y lo que se podría alcanzar con él, y por su paciencia en que el proyecto alcanzara su desarrollo completo con tiempo extra.

Finalmente, agradezco a Dios quien a través del Divino Niño me acompaña en cada etapa de mi vida, me sostiene y fortalece para seguir adelante.

Contenido

Agradecimientos	iii
Contenido.....	iv
Índice de cuadros	vi
Índice de figuras.....	vii
Lista de acrónimos, abreviaturas y unidades	x
Resumen.....	xi
Abstract	xii
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación del tema.....	2
1.3. Importancia	2
1.4. Objetivo general	2
1.5. Objetivos específicos	2
2. Marco referencial.....	2
2.1. Ubicación del área de estudio	2
2.2. Descripción del área de estudio.....	3
2.2.1. Red de ríos	3
2.2.2. Orografía.....	4
2.2.3. Precipitación y temperatura	4
2.2.4. Población	4
2.3. Los bosques de manglar	4
2.4. Características topográficas y de flujos de agua de los manglares	5
2.5. Modelación hidrológica	7
2.6. Modelación hidráulica.....	8
2.7. Caudales ambientales	8
3. Metodología.....	9
3.1. Bases de datos y control de calidad.....	9
3.1.1. Recopilación de datos	9
3.1.2. Control de calidad y generación de bases de datos.....	10
3.1.3. Simulación hidrológica	11
3.1.4. Simulación hidráulica	12

4. Resultados.....	14
4.1. Resultados de las simulaciones hidrológicas	14
4.1.1. Régimen de precipitación	14
4.1.2. Temperatura y Evapotranspiración potencial (ETP)	14
4.1.3. Demandas de agua y naturalización.....	15
4.1.4. Calibración.....	17
4.1.5. Exportación de la calibración en ríos con estación hacia ríos sin estación.....	17
4.1.6. Régimen fluvial.....	19
4.1.7. Regímenes fluviales bajo los tres escenarios	22
4.2. Resultados de las simulaciones hidráulicas.....	24
4.2.1. Profundidad promedio mensual de las zonas permanentemente inundadas	27
4.2.2. Áreas del espejo de agua y volúmenes promedios mensuales de las zonas permanentemente inundadas.....	27
4.2.3. Salinidad promedio mensual de las zonas permanentemente inundadas.....	28
5. Análisis de la experiencia de la realización del estudio	32
6. Conclusiones.....	33
7. Recomendaciones	35
8. Literatura citada.....	36
ANEXOS	38
A1. Cuadros.....	38
A2. Mapas	45
A3. Instrumentos	57

Índice de cuadros

Cuadro 1. Población total (hab) de los municipios en las cuencas del MBS, en los últimos cuatro censos poblacionales.....	4
Cuadro 2. Precipitación media mensual interanual (mm) de los principales afluentes al Manglar Barra de Santiago.....	38
Cuadro 3. Temperatura media mensual interanual (°C) de los principales afluentes al Manglar Barra de Santiago.....	38
Cuadro 4. Evapotranspiración potencial media mensual interanual (mm) de los principales afluentes al MBS.....	38
Cuadro 5. Extracción neta de agua (m ³ /s) por demandas poblacional y agrícola en las principales cuencas afluentes al MBS.	39
Cuadro 6. Composición geológica por cuenca hidrográfica afluente al manglar Barra de Santiago. (Valores en Km ²).	40
Cuadro 7. Composición geológica porcentual por cuenca hidrográfica afluente al manglar Barra de Santiago. (Valores en %).	40
Cuadro 8. Pedología porcentual por cuenca hidrográfica afluente al manglar Barra de Santiago. (Valores en %).	41
Cuadro 9. Uso del suelo porcentual por cuenca hidrográfica afluente al manglar Barra de Santiago. (Valores en %).	41
Cuadro 10. Composición porcentual de cobertura vegetal por cuenca hidrográfica afluente al manglar Barra de Santiago. (Valores en %).	42
Cuadro 11. Aportaciones de agua dulce (MMC) de los ríos afluentes al MBS.	43
Cuadro 12. Aportaciones de agua dulce total (MMC) de los ríos afluentes al MBS medias mensuales interanuales.	44
Cuadro 13. Régimen de caudales naturales en metros cúbicos por segundo (m ³ /s) y régimen de caudales ecológicos mínimos en porcentaje (%), aplicado al caudal natural de cada río afluente al MBS.	44

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del Manglar Barra de Santiago “MBS”, límites administrativos y regiones hidrográficas.	3
Figura 2. Clasificación de la topografía de manglares (Cintron y Novelli, 1984), modificado de (Mazda & Wolanski, 2009). (a) bosque ribereño; (b) bosque de franja; y (c) bosque de cuenca.	5
Figura 3. Gráficas de series de tiempo de la elevación de marea. Modificado de (Mazda & Wolanski, 2009). (a) Puerto Ishigaki, Okinawa en Japón; (b) en la bocana del río Chone en las inmediaciones de Ecuador; y (c) en la costa Long Hoa, Can Gio en Vietnam, durante un año. Las líneas grises muestran el nivel medio del mar. (Adaptado de Mazda y Kamiyama 2007)..	7
Figura 4. Propuesta de transectos para realizar la batimetría del Manglar Barra de Santiago. Imagen de Google Earth.	10
Figura 5. Ríos principales y estaciones hidrométricas afluentes al MBS. En la esquina inferior derecha se encuentra la estación mareográfica Acajutla.	11
Figura 6. Flujograma de trabajo para el uso de la base de datos y la elaboración de escenarios en la modelación de la hidrodinámica del Manglar Barra de Santiago.	13
Figura 7. Precipitación media mensual interanual de los principales afluentes al Manglar Barra de Santiago.	14
Figura 8. Temperatura media mensual interanual de los principales afluentes al Manglar Barra de Santiago.	15
Figura 9. Evapotranspiración potencial media mensual interanual de los principales afluentes al Manglar Barra de Santiago.	15
Figura 10. Demanda de agua agrícola y poblacional por mes desde mayo del 2012 hasta abril del 2017, para las principales cuencas afluentes al Estero Barra de Santiago.	16
Figura 11. Demandas de agua media mensual, agrícola y poblacional por cuenca afluente principal al MBS.	16
Figura 12. Geología por cuenca hidrográfica principal afluente al manglar Barra de Santiago.	18
Figura 13. Pedología por cuenca hidrográfica principal afluente al manglar Barra de Santiago.	18
Figura 14. Uso del suelo por cuenca hidrográfica principal afluente al manglar Barra de Santiago.	18
Figura 15. Cobertura vegetal por cuenca hidrográfica principal afluente al manglar Barra de Santiago.	19
Figura 16. Aportaciones diarias observadas naturalizadas y simuladas en Millones de Metros Cúbicos “MMC”. Superior: río Cara Sucia. Inferior: río El Naranjo.	20
Figura 17. Aportaciones mensuales observadas naturalizadas y simuladas en Millones de Metros Cúbicos “MMC”. Superior: río Cara Sucia. Inferior: río El Naranjo.	21
Figura 18. Arriba: aportación anual total de agua dulce de los ríos afluentes al MBS por año hidrológico. Abajo: aportación media mensual interanual de agua dulce y aportación media mensual del año 2020-21 utilizado en la simulación hidráulica.	22

Figura 19. Caudales medios mensuales por río y por escenario para el año hidrológico 2020-2021.	23
Figura 20. Fila superior y centro: alcantarillas que conectan al MBS con el estero de la bocana del río El Rosario. Foto inferior izquierda: alcantarillas que conectan al MBS con Garita Palmera. Foto inferior derecha: canal que conecta al Estero del río El Rosario con el estero Costa Azuul bajo condiciones de avanzado azolvamiento.	24
Figura 21. Bocana del Estero Barra de Santiago y su desplazamiento hacia el oeste desde 1969 hasta el 2020.	25
Figura 22. Arriba: Registro de la sonda deeper pro +, a la izquierda la traslación de la embarcación y a la derecha el sondeo de profundidad y detección de peces; destaca el trazo amarillo que es el registro de la varilla metálica graduada para corroborar físicamente la profundidad. En medio a la izquierda: sondeo con varilla metálica de la profundidad en el estero, a la derecha registro de las alcantarillas que conectan al MBS con otros esteros. Abajo: batimetría resultante.....	26
Figura 23. Profundidad, área y volumen promedio mensual de las zonas permanentemente inundadas del MBS.....	28
Figura 24. Comparativo de la salinidad entre estación lluviosa y estación seca. Superior: octubre; inferior: abril. Los cinco sitios resaltados: El Cajete, El Zapatero, El Centro, La Bolita y Gloria Linda, son los sitios de muestreo monitoreados por el PhD Enrique Barraza (Barraza & Melara, 2022).....	29
Figura 25. Salinidad observada (registrada) y simulada en cinco sitios del Estero Barra de Santiago para 5 momentos de los 8760 que tiene la simulación: 12/10/2020 11:00, 23/11/2020 10:00, 21/12/2020 09:00, 22/03/2021 10:00 y 06/04/2021 10:00.	30
Figura 26. Salinidad promedio mensual de mayo 2020 a abril 2021 de las zonas permanentemente inundadas en cada mes en el Estero Barra de Santiago.....	31
Figura 27. Profundidad promedio mensual de mayo y junio de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.....	45
Figura 28. Profundidad promedio mensual de julio y agosto de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.....	46
Figura 29. Profundidad promedio mensual de septiembre y octubre de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.....	47
Figura 30. Profundidad promedio mensual de noviembre y diciembre de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.....	48

Figura 31. Profundidad promedio mensual de enero y febrero de 2021, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.....	49
Figura 32. Profundidad promedio mensual de marzo y abril de 2021, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.....	50
Figura 33. Salinidad promedio mensual de mayo y junio de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. En mayo los escenarios Ambiental y Real tienen mayor salinidad con respecto al escenario Natural, con +0.63 Kg/m ³ y +0.89Kg/m ³ respectivamente. Para junio no se tienen diferencias significativas, pero es notorio el cambio de salinidad en toda la zona de manglar con respecto a mayo a causa de la reducción en salinidad por las crecidas de los ríos.	51
Figura 34. Salinidad promedio mensual de julio y agosto de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.....	52
Figura 35. Salinidad promedio mensual de septiembre y octubre de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.....	53
Figura 36. Salinidad promedio mensual de noviembre y diciembre de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. En noviembre los escenarios Ambiental y Real tienen mayor salinidad con respecto al escenario Natural, con +0.20 Kg/m ³ y +0.21Kg/m ³ respectivamente; mientras que en diciembre dicha diferencia es de +0.50 Kg/m ³ y +0.32Kg/m ³ respectivamente y es notorio el incremento de salinidad en el manglar con respecto a noviembre.	54
Figura 37. Salinidad promedio mensual de enero y febrero de 2021, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. En enero los escenarios Ambiental y Real tienen mayor salinidad con respecto al escenario Natural, con +0.98 Kg/m ³ y +1.36Kg/m ³ respectivamente; mientras que en febrero dicha diferencia es de +1.19 Kg/m ³ y +1.67Kg/m ³ respectivamente.....	55
Figura 38. Salinidad promedio mensual de marzo y abril de 2021, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. En marzo los escenarios Ambiental y Real tienen mayor salinidad con respecto al escenario Natural, con +1.35 Kg/m ³ y +1.99Kg/m ³ respectivamente; mientras que en abril dicha diferencia es de +1.32 Kg/m ³ y +2.00 Kg/m ³ respectivamente.	56
Figura 39. Ecosonda deeper pro +.	57
Figura 40. Varillas graduadas y cinta métrica.	57

Lista de acrónimos, abreviaturas y unidades

ADM:	Análisis de Doble Masa.
ASA:	Autoridad Salvadoreña del Agua.
CCC:	Coefficiente Compuesto de Calibración.
CRRH:	Comité Regional de Recursos Hidráulicos.
CSC:	Corredor Seco Centroamericano.
GAP:	Algoritmo Genético para optimización de Parámetros, por sus siglas en inglés.
GCM:	Modelo de Circulación General, por sus siglas en inglés.
IEH:	Índice de Estrés Hídrico.
Kg/m ³ :	Kilogramos de cloruros por metro cúbico de agua. Unidad de medición para la concentración de salinidad en el agua.
Km ² :	Kilómetros cuadrados. Medida de área para la extensión del manglar.
LGRH:	Ley General de Recursos Hídricos.
m:	Metros. Unidad de medida de longitud.
mm:	Milímetros.
m ³ /s:	Metros cúbicos por segundo. Unidad de medida de los flujos de agua.
MARN:	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador.
MAG:	Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador.
MBS:	Manglar Barra de Santiago.
MDT:	Modelo Digital de Terreno.
MMC:	Millones de Metros Cúbicos.
PNGIRH:	Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico.
Q _{·Alt} :	Caudal alterado.
Q _{·Amb} :	Caudal ambiental.
Q _{·Eco} :	Caudal ecológico.
Q _{·Nat} :	Caudal natural.
QBM:	Caudal Básico de Mantenimiento.
RHC:	Región Hidrográfica C “Cara Sucia – San Pedro”.
SICA:	Sistema de Integración Centroamericana

Resumen

En esta investigación se estudia la incidencia que tiene establecer caudales ambientales para la protección del régimen fluvial de los ríos, en la hidrodinámica del Manglar Barra de Santiago (MBS), ubicado al occidente de El Salvador, en Centroamérica. Inicialmente se realizaron tres jornadas de campo en la zona del MBS, una para recorrer los límites del mismo y conocer sus conexiones con otros manglares colindantes, resultando que al occidente se conecta con el manglar de Garita Palmera mediante dos tuberías de 1.5 m de diámetro, y al oriente con el estero del río El Rosario mediante 11 alcantarillas de 0.6 m de diámetro.

Estas infraestructuras hidráulicas se establecieron como frontera para el territorio de estudio, limitando los ríos afluentes y las zonas de flujo libre de agua. En las otras dos inspecciones de campo se realizó la batimetría del canal principal del estero, debido a que este ha desplazado su bocana a 1 Km al occidente de donde se ubicó hace 20 años, época de la que data el último Modelo Digital de Terreno (MDT) disponible de buena resolución espacial 10m x 10m; con la batimetría se actualizó dicho MDT.

Posteriormente se simuló hidrológicamente los ríos afluentes al manglar bajo condiciones naturales en el programa HBV Light; del régimen fluvial resultante se obtuvieron dos escenarios más modificando las aportaciones de los ríos: el escenario real, que considera las extracciones de agua para agricultura y consumo humano sin límites de gestión, y el escenario ambiental, que establece límites a las extracciones de agua para agricultura y consumo humano.

Finalmente se simuló hidráulicamente el manglar con el programa Iber 3.2.2, determinando que, dados los caudales bajos de los ríos afluentes, el régimen de caudales ambientales no incide significativamente en la profundidad, la extensión de las zonas permanentemente inundadas ni el volumen almacenado en el estero; pero sí en la salinidad al reducir en un 40% el exceso de salinidad provocado por las extracciones de agua de los ríos para uso en la agricultura y el uso poblacional; este sería un elemento de incidencia que actuaría a largo plazo, pues al cambiar la salinidad del agua, se modifican las condiciones del ecosistema y las especies que habitan en él, las cuales a su vez, inciden en la modificación del entorno.

Palabras clave: manglar, Barra de Santiago, simulación, hidráulica, hidrología, salinidad, caudales, ambientales.

Abstract

This research studies the incidence of establishing environmental flows for the protection of the fluvial regime of rivers, in the hydrodynamics of the Barra de Santiago Mangrove (MBS by its name in Spanish), located in western El Salvador, in Central America. Initially, three field days were carried out in the MBS area, one to explore its limits and learn about its connections with other neighboring mangroves, resulting in a connection to the west with the Garita Palmera mangrove through two 1.5 m diameter pipes, and to the east with the El Rosario River estuary through 11 0.6 m diameter culverts.

These hydraulic infrastructures were established as a border for the study territory, limiting the tributary rivers and the areas of free flow of water. In the other two field inspections, the bathymetry of the main channel of the estuary was carried out, due to the fact that the mouth of the estuary has moved 1 km to the west of where it was located 20 years ago, a time from which the latest Digital Terrain Model (MDT by its name in Spanish) available with good spatial resolution of 10m x 10m; with the bathymetry this MDT was updated.

The tributary rivers to the mangrove were simulated hydrologically under natural conditions in the HBV Light program; From the resulting fluvial regime, two more scenarios were obtained by modifying the contributions of the rivers: the real scenario, which considers water withdrawals for agriculture and human consumption without management limits, and the environmental scenario, which establishes limits on water withdrawals for agriculture and human consumption.

Finally, the mangrove was simulated hydraulically with the iber 3.2.2 program, determining that, given the low flows of the tributary rivers, the environmental flow regime does not significantly affect the depth, the extension of the permanently flooded areas or the volume stored in the estuary; but it does affect salinity, reducing by 40% the excess salinity caused by the extraction of water from rivers for use in agriculture and human consumption; This would be an element of incidence that would act in the long term, since by changing the salinity of the water, the conditions of the ecosystem and the species that inhabit it are modified, which in turn, affect the modification of the environment.

Key words: mangrove, Barra de Santiago, simulation, hydraulic, hydrology, salinity, environmental flow.

1. Introducción

Los bosques de manglar se encuentran amenazados en muchos países del mundo, entre los que se encuentra El Salvador. Estos bosques salados dependen, en parte, del equilibrio entre los flujos de agua salada provenientes del océano y las aguas dulces continentales, y es en este último elemento donde la alteración es mayor, pues es donde se desarrollan las actividades de la sociedad humana, ante las que si no se gestionan las cuencas hidrográficas de forma adecuada, manejando los recursos con equilibrio y sostenibilidad, se degrada el medio ambiente de forma descontrolada; en ese sentido, la investigación que se plantea en este documento busca indagar en uno de los elementos más importantes relacionados con el manejo de cuencas hidrográficas y la gestión de los recursos hídricos, como son los caudales ambientales y su contribución en el mantenimiento de la hidrodinámica de uno de los manglares más importantes de El Salvador, el manglar Barra de Santiago.

1.1. Antecedentes

Desde 1980, se estima que se ha perdido un quinto de los bosques de manglar; principalmente de la Región Asia-Pacífico y Centroamérica (Van Lavieren, Spalding, Alongi, Kainuma, & Clüsener-Godt, 2012). En algunos países, las pérdidas han sido más pronunciadas, como es el caso de El Salvador, que ha perdido el 60% de su cobertura desde 1950, pasando de 100,000 ha a cerca de 40,000 ha para el año 2013 (MARN, 2013); de esa cobertura el área que corresponde al Manglar Barra de Santiago “MBS” no es clara, pues (Molina Lara & Esquivel, 1993) citaron que para 1980 Barra de Santiago contaba con 1980 ha de manglar, sin embargo, once años después según el Inventario Nacional y Diagnóstico de los Humedales de El Salvador (Jiménez, Sánchez-Mármol Gil, & Herrera, 2004) su cobertura de manglar era de 2,868 ha, estimándose en casi 1,000 ha más; posteriormente, la ficha de humedales RAMSAR (Barraza, y otros, 2013) indicó que del humedal, 2,331.2 ha corresponden a la denominación “Bosque de manglar del Pacífico sobre sustrato limoso, secundario y/o intervenido”, siendo un punto intermedio entre las dos extensiones anteriores; y más recientemente, el Inventario Nacional de Humedales (Domínguez, Castillo, & Magaña, 2018) indicaron 3,017 ha de costa para el MBS. Lo anterior, sumado al hecho de la degradación del bosque de manglar, constata la dificultad de encontrar un dato fiable sobre el verdadero estado de dicho ecosistema.

Por otra parte, en cuanto a los caudales de agua dulce que alcanzan al manglar, se estima que estos podrían estar reducidos significativamente, pues de acuerdo al Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador “PNGIRH” (MARN, 2017), los ríos de la Región Hidrográfica C “RHC” para el período May/1965-Abr/2012 presentaron un Índice de Estrés Hídrico “IEH” medio de 0.22, valor que ha incrementado levemente en los últimos años, pues en la actualización de los modelos numéricos hidrológicos y de gestión del PNGIRH (Cornejo Hernández, 2021), que abarcó el período May/2012-Abr/2017, el IEH resultante fue de 0.23; sin embargo, el IEH se calcula para un año hidrológico completo, pero si se evalúa por estación lluviosa y seca, se pueden encontrar condiciones más adversas, pues los usos del agua son más intensos en la estación seca, cuando los caudales son más bajos, condición que podría implicar un desbalance en la salinidad del manglar, la degradación de la vegetación y la posibilidad de ocurrencia de intrusión salina en el agua subterránea.

1.2. Justificación del tema

La situación descrita en los antecedentes se ha manifestado en la última década con la desecación de algunos ríos afluentes al manglar, como El Quequeisque, San Francisco, El Naranjo, entre otros; ante esta situación, la Jueza Ambiental de Santa Ana, requirió al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) establecer regímenes de caudales ambientales en los ríos para proteger al manglar, lo que se realizó estudiando la ictiofauna de los ríos Cara Sucia y El Naranjo, y los períodos históricos de sequías; sin embargo, se desconoce qué incidencia tienen los caudales ambientales así definidos en el estuario de Barra de Santiago; por ello, como una medida de apoyo para la gobernanza del territorio, la gestión de los recursos hídricos y para garantizar que los caudales ambientales establecidos efectivamente protejan al MBS, se plantea la presente investigación que proporcione ese respaldo técnico.

1.3. Importancia

La investigación se realizará para garantizar que los caudales ambientales establecidos en los ríos afluentes al MBS, efectivamente lo protejan, mediante la conservación de la hidrodinámica del estuario; en ese sentido, la investigación se realizará a nivel institucional para el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador “MARN”, que es el encargado de proteger los ecosistemas, así como para el Juzgado Ambiental de Santa Ana, que ha ordenado realizar las acciones necesarias para protegerlo.

A nivel poblacional, la investigación va dirigida principalmente a los habitantes de los Distritos San Francisco Menéndez y Jujutla, que son los directamente beneficiados en la protección del manglar, pues parte de su economía se debe a los frutos del mar (camarones, cangrejos, etc.), así como encuentran en el MBS una fuente de recreación inconmensurable; mientras que de forma indirecta, la investigación se dirige al resto de la población visitante al manglar, sea nacional o extranjera, pues se benefician de los bienes turísticos, paisajísticos, climáticos, entre otros que provee dicho ecosistema.

1.4. Objetivo general

Estudiar la importancia de establecer caudales ambientales en los ríos afluentes a las zonas de manglar, a partir del caso de estudio del Manglar Barra de Santiago “MBS”.

1.5. Objetivos específicos

1. Determinar la condición de degradación actual de la hidrodinámica del MBS, comparando el régimen natural contra el régimen alterado.
2. Estimar la incidencia que tienen los caudales ambientales en la conservación de la hidrodinámica del MBS.

2. Marco referencial

2.1. Ubicación del área de estudio

El Manglar Barra de Santiago (MBS), se ubica al occidente de El Salvador, en el territorio costero localizado entre las coordenadas de latitud norte 13.67° y 13.76°, y entre las coordenadas de longitud oeste: -89.96° y -90.05°, es el cuarto manglar más extenso del país con 2,168.33 Ha (21.68 Km²) según la capa de Uso del Suelo 2010 del MARN.

El MBS es una zona de especial interés de conservación ambiental, pues en las cabeceras de las cuencas afluentes al estero se encuentra el Parque Nacional Bosque El Imposible, mientras que los bosques de manglar o bosques salados son áreas frágiles protegidas por la Ley de Medio Ambiente.

Hidrográficamente y para la Gestión de los recursos hídricos, el MBS es parte de la Zona Hidrográfica II (ZH-II) que se constituye de cinco Regiones Hidrográficas, desde la B hasta la F; en ese sentido, el MBS se encuentra en la Región Hidrográfica C (RHC) “Cara Sucia – San Pedro”. Administrativamente, el MBS se ubica en el departamento de Ahuachapán, entre los distritos (antes municipios) de San Francisco Menéndez y Jujutla, en una zona limítrofe con el distrito (antes municipio) de Acajutla del departamento de Sonsonate (ver **Figura 1**).

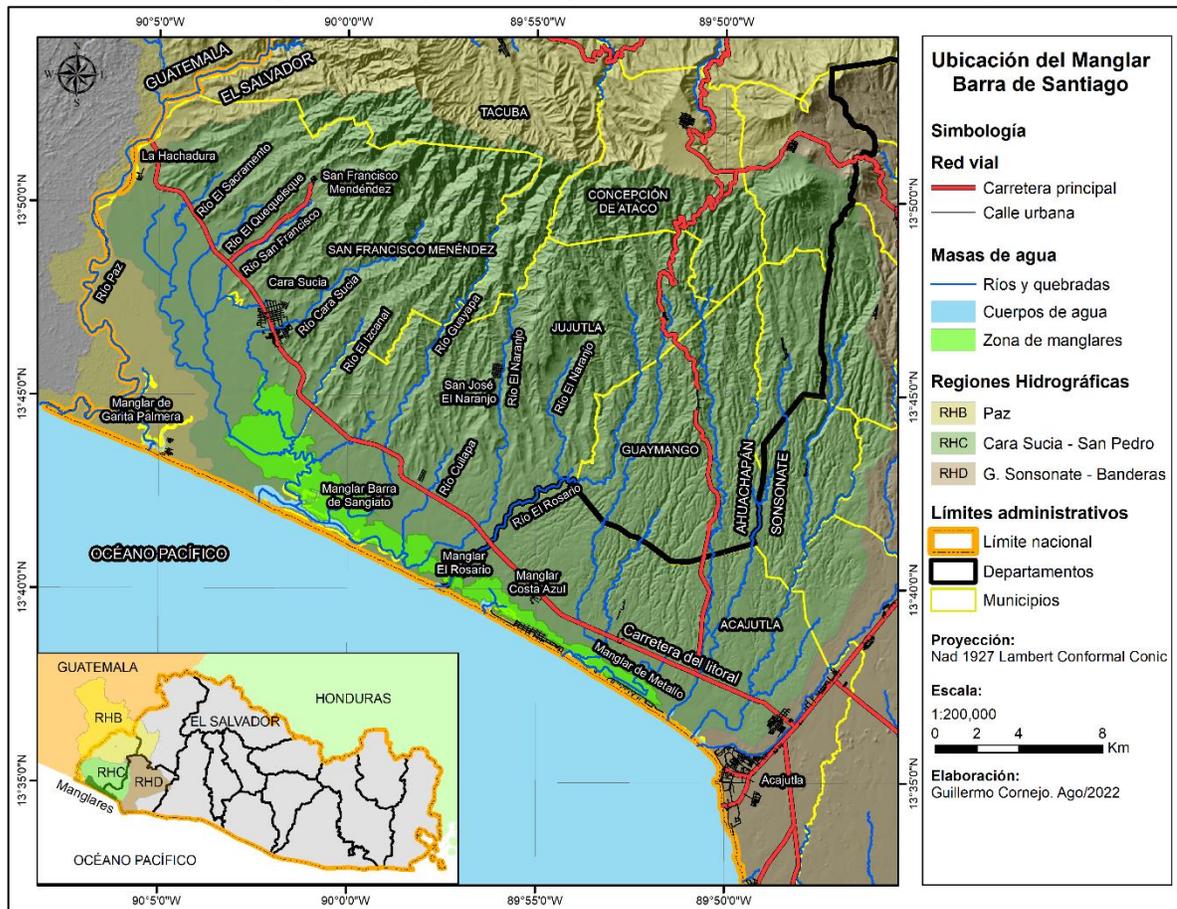


Figura 1. Ubicación del Manglar Barra de Santiago “MBS”, límites administrativos y regiones hidrográficas.

2.2. Descripción del área de estudio

2.2.1. Red de ríos

El área de escurrimiento hacia el MBS se constituye de ocho corrientes principales, que de oeste a este son: zanjón del Chino, los ríos Cara Sucia, El Izcanal, de Faya, Aguachapío, Guayapa, Cuilapa y El Naranjo, que en conjunto sus cuencas suman aproximadamente 313 Km², sin incluir el estero. El MBS colinda al norte y al oeste con el río Paz que es limítrofe con Guatemala y en la desembocadura del brazo Zanjón EL Aguacate, tiene al manglar de Garita Palmera. Al este colinda con el río El Rosario, que en su desembocadura también cuenta con bosque de manglar; y al sur, colinda con el Océano Pacífico, en donde desemboca. (ver **Figura 1**).

Cabe destacar que, es posible que en condiciones naturales y dentro del territorio salvadoreño, los manglares de Garita Palmera, Barra de Santiago, El Rosario, Costa Azul y Metalío formaran una sola franja de manglar íntegro, que por acción antrópica con la ampliación de la frontera agrícola y la construcción de carreteras se ha fragmentado al estado actual.

2.2.2. Orografía

La orografía de sus cuencas afluentes presenta elevaciones que van desde los 0 msnm en la bocana, hasta los 1,430 msnm en la cadena volcánica de la cordillera Tacuba – Apaneca, en donde nacen los ríos que le proporcionan agua dulce; estos ríos transcurren en dirección sur-suroeste, y a lo largo de su recorrido conectan varias Áreas Naturales Protegidas (ANP), por lo que, se aprecia cómo el sistema de ríos tiene especial relevancia para transportar desde las ANP's, además de agua, material biológico como semillas, ictiofauna, macroinvertebrados y microorganismos, además de variados elementos inertes del sistema natural como sedimentos, nutrientes y pétreos de diversa granulometría (Cornejo & Rivera, 2020).

2.2.3. Precipitación y temperatura

La cuenca del manglar cuenta con una climatología de precipitación en la que, de mayo a octubre ocurre el 93% de la lluvia del año hidrológico, y en los meses de noviembre a abril, el 7% restante, contando con precipitaciones anuales que van desde los 1,400 mm en torno a la costa, hasta los 2,000 mm en la cabecera de algunas cuencas; mientras que la evapotranspiración potencial se presenta poco variable, oscilando desde los 1,540 mm hasta los 1,565 mm en las cuencas hidrográficas afluentes (Cornejo & Rivera, 2020).

2.2.4. Población

De acuerdo a los censos poblacionales de El Salvador de 1961 (MINEC, 1965), 1971 (MINEC, 1974a), 1992 (MINEC, 1992) y 2007 (MINEC, 2017), la población de los municipios San Francisco Menéndez, Jujutla y Tacuba es creciente a lo largo del tiempo (ver **Cuadro 1**) y es San Francisco Menéndez el municipio más poblado de la zona.

Cuadro 1. Población total (hab) de los municipios en las cuencas del MBS, en los últimos cuatro censos poblacionales.

Distrito (Municipio)\Año	1,961	1,971	1,992	2,007
San Francisco Menéndez	13,418	22,120	36,423	42,607
Jujutla	11,189	16,490	26,975	28,599
Tacuba	12,485	17,847	20,744	29,858

2.3. Los bosques de manglar

Los bosques de manglar son ecosistemas costeros, con especies altamente adaptadas a vivir en ambientes litorales, donde son influenciados por el mar y sistemas hídricos continentales. La mezcla de agua en esa frontera tierra-mar, provoca agua salobre (o salada), lo que da origen al término bosques salados. Estos ecosistemas son considerados entre los más prominentes y productivos del mundo. La diversidad de especies en estos ecosistemas, contempla una amplia gama de entidades taxonómicas, como es el caso de aves, mamíferos, moluscos, peces, reptiles y otros invertebrados, que utilizan el ecosistema como ambiente de refugio, alimentación y reproducción (MARN, 2013).

De acuerdo al Foro de Avances en la conservación y restauración inclusiva de Manglares (MARN, 2013), entre las amenazas que estos bosques salados enfrentan se encuentran: el cambio de uso de suelo, la alteración de flujos hidrológicos del ecosistema, el declive de las poblaciones pesqueras, la contaminación, los impactos por fenómenos naturales y las enfermedades de la flora nuclear; de ellos, los caudales ambientales buscan proporcionar cierta estabilidad a la alteración de los flujos hidrológicos, limitando el detrimento de los mismos ante las extracciones de agua, disminuyendo la intrusión de la cuña salina, al permitir mayor filtración de agua dulce desde el lecho de los ríos hacia los estratos subterráneos, y reduciendo la concentración de contaminantes provenientes de los cascos urbanos y zonas agropecuarias ubicados en las cuencas afluentes.

2.4. Características topográficas y de flujos de agua de los manglares

La modelación numérica de la hidrodinámica de humedales es un campo de la ciencia relativamente poco explorado, (Mazda & Wolanski, 2009) realizaron una revisión sobre las investigaciones más relevantes, resaltando que las características que a continuación se describen sobre los componentes de la modelación, la topografía de los manglares y los tipos de bosque, y las oscilaciones de marea y oleaje que afectan sobre ellos.

La modelación del ecosistema de manglares se basa en cuatro componentes interconectados entre sí, estos son: atmósfera, flujo de agua, formación de tierra y biota; de los cuales, en esta investigación se abordarán dos de dichos componentes: el atmosférico y el flujo de agua.

La topografía de los manglares, desde el punto de vista de la hidrodinámica, se puede clasificar en tres tipos, basado en el bosque que la compone, que puede ser ribereño, de franja o de cuenca, como se muestra en la **Figura 2**.

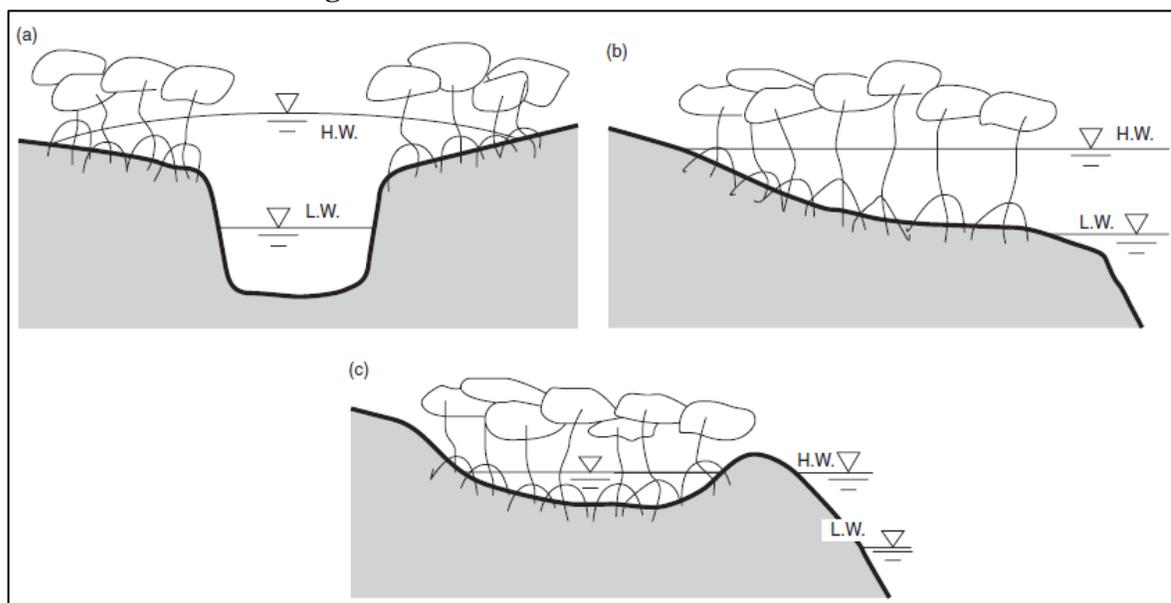


Figura 2. Clasificación de la topografía de manglares (Cintron y Novelli, 1984), modificado de (Mazda & Wolanski, 2009). (a) bosque ribereño; (b) bosque de franja; y (c) bosque de cuenca.

- Manglar de bosque ribereño (tipo R): se compone de planicies de inundación a los costados de los ríos; son inundados por mareas altas y expuestos por mareas bajas.

- Manglar con bosque de franja (tipo F): se compone de pantanos a lo largo de la línea de costa que están directamente expuestos a la acción de las mareas y el oleaje.
- Manglar con bosque de cuenca (tipo B): se compone de depresiones que son rara vez inundadas por mareas altas, y los flujos de agua dentro de ella están principalmente gobernados por los flujos de agua subterránea, de manera que, la inundación de estas depresiones cambia más estacionalmente que con las mareas del día a día.

Así, el MBS es de tipo R “rivereño”, pues tiene contacto con el mar solo en la bocana, y luego se constituye de canales internos en el área continental y las áreas inundables que los rodean. En cuanto a las escalas de tiempo del flujo de agua en el sistema, existen tanto flujos verticales como horizontales, con diversa periodicidad. De (Mazda & Wolanski, 2009) estos se pueden resumir en los siguientes:

- **Cambios estacionales:** influenciados por cambios en la estación climática, cambios estacionales en el nivel de marea (frecuentemente negados), debidos a cambios en la dirección y velocidad del viento, en la temperatura del agua, en la presión atmosférica y en la escorrentía de los ríos, debido a la precipitación; sin embargo, esta estacionalidad se evidencia en la **Figura 3** para diversos manglares.
- **Cambios quincenales en el régimen de mareas:** influenciados por los ciclos lunares, generan variaciones en el agua salada que ingresa a los manglares.
- **Cambios diarios en variables atmosféricas:** relacionado a variaciones en la radiación solar que produce cambios en la temperatura del suelo y el agua, y afecta a las actividades de la biodiversidad y transpiración de las plantas.
- **Cambios de marea con el período diurno o semidiurno:** conocido como desigualdad de marea y se debe a la sumatoria de los componentes armónicos senoidales de marea diurna: K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , y S_1 ; así como a los semidiurnos M_2 , S_2 , N_2 y K_2 , que hacen variar la amplitud de la onda de marea, cambiando los niveles de marea alta y baja a diario, así como el intervalo de tiempo entre mareas consecutivas.
- **Oscilaciones de resonancia:** son oscilaciones libres cuya longitud de onda depende de las dimensiones horizontales y verticales de la profundidad del agua dentro del pantano; este movimiento de agua puede transportar hojas y materiales suspendidos.
- **Olas del mar:** son oscilaciones cuyo período varía desde menos de 1 segundo a más de 20. En los manglares tipo R, afectan mínimamente, manteniéndose la superficie del agua calma, mientras que en los tipo F inciden directamente y se atenúan con las raíces de los manglares.
- **Turbulencia del agua:** es generada por todas las irregularidades del terreno y la vegetación, principalmente en las zonas de raíces de los manglares, donde se producen turbulencias y torbellinos, por lo general con menor periodicidad que las olas de mar. Estas turbulencias actúan mezclando y esparciendo agua y materiales, contribuyendo a la formación y mantenimiento de la distribución del material en el pantano.
- **Eventos perjudiciales:** sistemas ciclónicos atmosféricos, tsunamis e incremento del nivel del mar por CC, son elementos que llevan a la destrucción de áreas costeras, remueven sedimentos y cambian el régimen de erosión-deposición afectando el oleaje.

- **Interacción entre procesos con diferentes escalas de tiempo:** los bentos y la topografía, interactúan a escalas de tiempo de varias décadas o más, como producto de la sucesión entre la fisiología y la ecología de la biota; esta última no responde de forma instantánea a los cambios diarios o semidiurnos del régimen de mareas, pero sí responde a las características de inundación de varias décadas, con frecuencia de manera logarítmica.

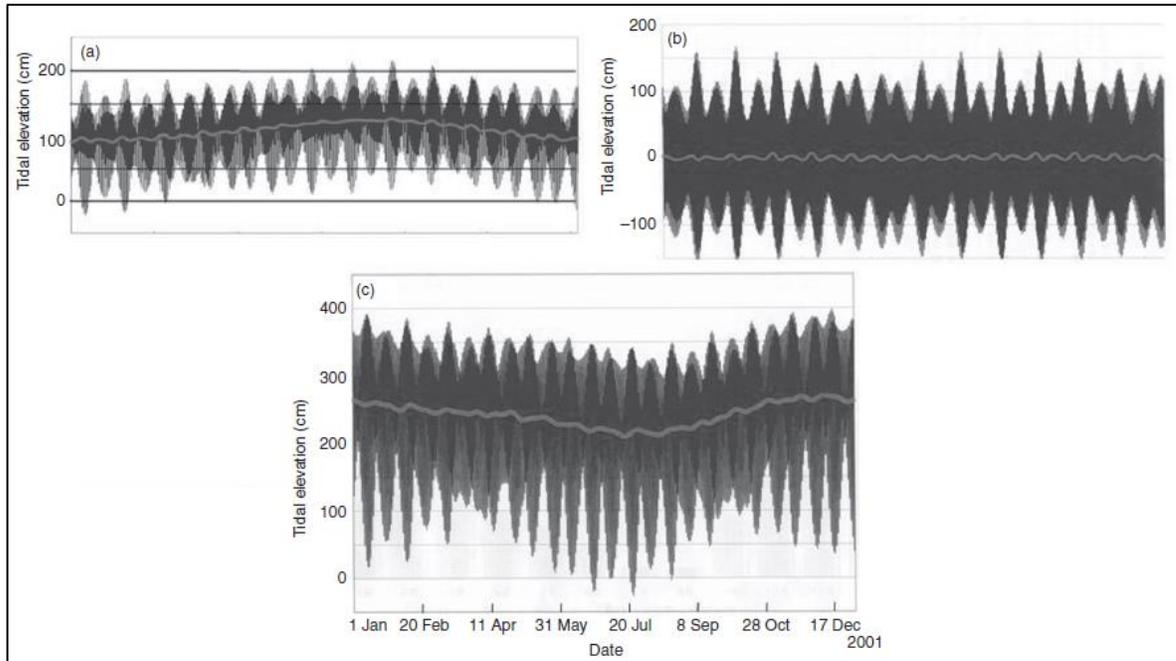


Figura 3. Gráficas de series de tiempo de la elevación de marea. Modificado de (Mazda & Wolanski, 2009). (a) Puerto Ishigaki, Okinawa en Japón; (b) en la bocana del río Chone en las inmediaciones de Ecuador; y (c) en la costa Long Hoa, Can Gio en Vietnam, durante un año. Las líneas grises muestran el nivel medio del mar. (Adaptado de Mazda y Kamiyama 2007).

2.5. Modelación hidrológica

La modelación hidrológica es un proceso útil para conocer las aportaciones de agua que una cuenca puede producir, cuando se carece de datos hidrológicos, cuando son escasos o están incompletos. La modelación hidrológica comúnmente se basa en formulaciones empíricas o semi empíricas que buscan representar los flujos de agua dentro de una cuenca, como son la evapotranspiración real, la infiltración y percolación, el flujo superficial y diversos flujos subsuperficiales y subterráneos; todo con el objetivo de resolver el balance hídrico.

Existen numerosos programas informáticos para realizar este proceso, algunos de los más utilizados en El Salvador son HBV (SMHI, 2006) con el que se han trabajado cuencas como río Paz, Grande de San Miguel, Grande de Sonsonate, Jiboa y Torola; el programa EvalHid (Paredes Arquiola, Solera Solera, Álvarez, & Lerma Elvira, 2014) empleado a escala nacional para la elaboración de los modelos hidrológicos del PNGIRH (MARN, 2017); y el modelo HEC-HMS para simular eventos extremos en la cuenca del río Paz, el río Lempa, entre otros. Los primeros dos programas son modelos distribuidos, para la simulación de flujos de agua diarios o mensuales por largos períodos de tiempo, mientras que el último es un modelo de eventos, que permite simular los caudales generados en una cuenca para algunos días, durante la ocurrencia de un evento extremo de exceso de agua.

2.6. Modelación hidráulica

Mientras la modelación hidrológica permite conocer los volúmenes de agua producidos por una cuenca, la modelación hidráulica permite conocer las características físicas del flujo de un volumen de agua a través de un terreno, de manera que se pueden conocer características como la velocidad y dirección del agua, profundidad, elevación, turbulencia y dispersión de partículas (arrastre de sedimentos y movimiento de contaminantes). En El Salvador, los modelos hidráulicos más utilizados para la delimitación de zonas inundables son HEC-RAS, empleado en algunos casos de estudio y para el diseño de infraestructura ribereña para control de inundaciones; y el programa iber, empleado para definir las planicies de inundación del PNGIRH (MARN, 2017); este último se define como “un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios” (Bladé, y otros, 2014).

En el caso particular de la modelación numérica de la hidrodinámica de manglares (Mazda & Wolanski, 2009) indican que es necesario identificar el mecanismo dominante que controla al sistema según el tipo de manglar, especialmente en la escala de tiempo; en ese sentido, se pueden tener modelos acoplados representando cada uno distintos forzantes, pudiendo resultar los siguientes: modelo de circulación de marea, modelo de oleaje, modelo de tsunami, modelo de aguas subterráneas, modelo de dispersión de materiales y un modelo ecosistémico como un sistema holístico; de manera que, según el tipo de problema que se busca estudiar, debe buscarse la mejor manera de representar las características del sistema de manglar.

2.7. Caudales ambientales

En El Salvador la Ley General de Recursos Hídricos (Asamblea Legislativa, 2022) aprobada a finales del año 2021 y publicada en el año 2022 se tienen las siguientes definiciones:

- **Caudal ambiental:** Régimen hídrico propio, característico de cada cuenca hidrográfica que debe mantener todo cuerpo de agua, que respete su geomorfología, permita el correcto desarrollo de los ciclos biológicos de las especies asociadas al medio hídrico, conservar la sostenibilidad de los ecosistemas hídricos y satisfaga las necesidades de la población.
- **Caudal ecológico:** Flujo de agua que se debe mantener en las fuentes naturales de agua para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje y otros aspectos de interés científico y cultural.

La diferencia básica entre ambos conceptos es que el caudal ecológico, principalmente busca la conservación de la ecología, mientras que el ambiental, además de cumplir con el caudal ecológico, busca satisfacer las demandas de agua, ubicadas aguas abajo que cuentan con mayor prioridad de uso. En ese sentido, para las desembocaduras de los ríos en el MBS, el caudal ambiental y el caudal ecológico son iguales, debido a que no se tienen demandas de agua dentro de la zona protegida.

Los caudales ecológicos se calculan en el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales “MARN” como un porcentaje del caudal natural que circula por los ríos; estos porcentajes son definidos a partir del cruce de dos metodologías (MARN, 2021): la simulación hidrobiológica del hábitat físico (USGS, 2001) de tres especies de peces en cada río y el Método de Caudal Básico de Mantenimiento “QBM” (Mas, 2005).

La simulación del hábitat físico busca determinar el caudal óptimo ante el que una especie de pez encuentra las condiciones preferentes de hábitat, el cual se caracteriza por profundidad de las zonas inundadas, velocidad del agua y sustratos del lecho del río. De este modo, el caudal óptimo es el caudal idóneo para una especie de pez en particular, por ello, se utilizan al menos tres especies de peces para encontrar el caudal óptimo promedio que sea representativo del río.

El QBM es en esencia un método de tipo hidrológico que, por medio de medias móviles aplicadas a los caudales históricos más bajos consecutivos, busca encontrar el caudal que represente el último punto de inflexión, bajo el cual ocurrirían las sequías extremas que generarían condiciones desfavorables en el ecosistema, y sobre el cual ocurrirían los caudales de sequía ordinarios a los que el ecosistema se habría adecuado. El desarrollo estadístico de esta metodología se encuentra en (Palau, 2004).

3. Metodología

El estudio se realizó modelando hidrológicamente las principales cuencas afluentes al estero y modelación hidráulica de la zona de manglar hasta su bocana en el mar, variando entre tres escenarios de uso del agua y de la gestión de los recursos hídricos: régimen natural, que considera la falta de alteraciones antrópicas; régimen real, que considera la extracción de agua actual de los ríos para usos diversos; y régimen ambiental, que considera la protección de los ríos mediante regímenes de caudales ambientales.

3.1. Bases de datos y control de calidad.

Consistió en obtener toda la información necesaria para simular las diversas condiciones a las que puede estar sometido el manglar; este campo se divide en dos actividades:

3.1.1. Recopilación de datos

Se requirieron cinco tipos de información para llevar a cabo la investigación, estas fueron: hidrometeorológica, usos del agua, caudales ambientales, topográfica y batimétrica. La base de datos hidrometeorológica (precipitación, temperatura, hidrometría y mareas), la de usos del agua (poblacional y agrícola), la de caudales ambientales y la topográfica provienen del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales “MARN”; y finalmente la base de datos batimétrica fue levantada en campo con el equipo “deeper Pro +”, con el apoyo de guarda recursos, realizando recorridos en lancha durante la marea alta, para captar la mayor cantidad de profundidades posibles de acuerdo a los transectos mostrados en la **Figura 4**, destacando que los transectos finales estuvieron supeditados a la navegabilidad al momento del sondeo batimétrico, pues tanto la marea como los bancos de arena son limitantes para levantar esta información.



Figura 4. Propuesta de transectos para realizar la batimetría del Manglar Barra de Santiago. Imagen de Google Earth.

3.1.2. Control de calidad y generación de bases de datos

El control de calidad de las cinco bases de datos consistió en los siguientes pasos:

Precipitación y temperatura

- Análisis visual, para el descarte de datos fuera de escala del período histórico.
- Relleno y extensión de datos del período histórico (1970-2020) mediante el promedio de las tres estaciones con mayor correlación.
- Elaboración de Análisis de Doble Masa “ADM”, para la identificación de posibles períodos de tiempo anómalos dentro del período histórico.
- Procesamiento de las pruebas estadísticas “t” de Student y “F” de Fisher, para determinar si debe o no corregirse al período de tiempo anómalo a escala anual, en la media y la desviación estándar, respectivamente según cada prueba.
- Homogenización de la precipitación y temperatura mediante las correcciones surgidas a partir del ADM y las pruebas “t” y “F”.

Hidrometría

- Análisis visual, para descarte de crecidas máximas sin curvas de recesión.
- Análisis de balance de escorrentía para descartar crecidas fuera de escala.

Marea

- Los niveles faltantes en la estación mareográfica de Acajutla, fueron rellenados de acuerdo a la onda que mejor replique los máximos y mínimos de marea más cercanos.

Topografía

- Se utilizó un Modelo Digital de Terreno “MDT” de resolución espacial 10m x 10m para definir las cuencas afluentes a la zona de manglar y el terreno circundante al estero.

Batimetría

- La batimetría se realizó durante las horas de máxima marea registrada en la estación mareográfica de Acajutla, para reducir al máximo la corrección a realizar en las profundidades registradas.
- Se elaboró un MDT con resolución de 10 m x 10 m en la zona del estero, el cual se acopló con el MDT del terreno circundante.

Otras bases de datos

- Las bases de datos de uso del agua no serán corregidas, pues son producto de concesiones de uso de agua del sector agrícola y estimaciones de uso del sector poblacional.

3.1.3. Simulación hidrológica

Los ríos afluentes al manglar se simularon hidrológicamente en el programa HBV Light para obtener los caudales naturales afluentes al MBS. La simulación se realizó con paso de tiempo diario para el período 1970-2021, y se calibraron con dos estaciones hidrométricas ubicadas en las cuencas bajas de los ríos Cara Sucia y El Naranjo. En la **Figura 5** se muestran los principales ríos afluentes. Este campo consideró las siguientes actividades:

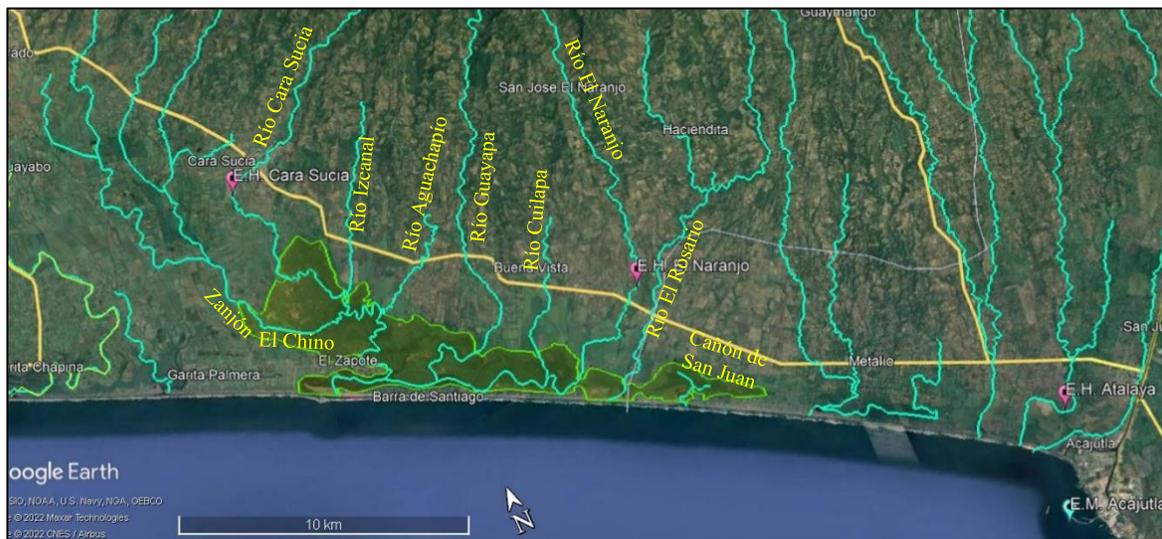


Figura 5. Ríos principales y estaciones hidrométricas afluentes al MBS. En la esquina inferior derecha se encuentra la estación mareográfica Acajutla.

- Determinación de precipitación y temperaturas máximas, medias y mínimas por cuenca, con polígonos de Thiessen, ajustando el valor de precipitación y temperatura media anual de cada cuenca de acuerdo a su elevación media y al gradiente altitudinal de precipitación y temperatura.
- Cálculo de evapotranspiración potencial por medio de la formulación de Hargreaves, que considera temperaturas máxima, media y mínima. La ETP media por cuenca se obtuvo con polígonos de Thiessen.
- Naturalización de caudales de Cara Sucia y El Naranjo, mediante registros hidrométricos y usos del agua en los períodos 2017-2022.
- Calibración de los dos modelos hidrológicos mediante el Algoritmo Genético para Optimización de Parámetros “GAP”. Para la calibración se utilizó un coeficiente compuesto por tres coeficientes: coeficiente de determinación “ r^2 ”, que busca ajustar la forma del hidrograma; eficiencia del modelo “Reff”, que se ajusta a caudales pico y eficiencia del modelo para el logaritmo de los caudales “LogReff”, que se ajusta a caudales bajos; el Coeficiente Compuesto de Calibración “CCC” se calculó así:

$$CCC = 0.3r^2 + 0.3Reff + 0.4LogReff$$

- Transposición de los parámetros calibrados en Cara Sucia y El Naranjo hacia el resto de cuencas, con base cobertura boscosa, uso del suelo, tipo de suelo y morfometría.
- Generación de la serie de caudales alterados de cada río, modificando los caudales naturales simulados con los usos de agua.
- Para el desarrollo de esta investigación los caudales ambientales se obtuvieron aplicando los porcentajes definidos en el documento “Determinación de caudales ecológicos en ríos de El Salvador” (MARN, 2021) a los caudales simulados hidrológicamente para todos los ríos afluentes al MBS.

3.1.4. Simulación hidráulica

La hidrodinámica del manglar se simuló con el software *iber 3.2.2*, considerando al manglar como un sistema por el que fluye agua desde las desembocaduras de ríos hacia la bocana del mar, sitio donde también ingresa la marea, condicionada por la topografía del terreno y la batimetría de los canales del manglar. La selección de modelar 2D en lugar de 1D se debe a la composición del manglar de canales y pantanos, que bajo condiciones de bajos flujos de agua puede actuar como canales unidimensionales, pero bajo condiciones de flujos altos de agua, se convierte en un pantano de área variable, que requiere representación bidimensional para valorar la variación en extensión y salinidad. Esta etapa consideró lo siguiente:

- **Caudales de ríos:** provenientes de simulaciones hidrológicas.
- **Niveles de marea:** provenientes de la estación mareográfica de Acajutla.
- **Topografía y batimetría:** define las condiciones de flujo.
- **Salinidad:** los datos de ríos son del Sistema de Información Hidrológica de El Salvador (MARN, 2022), que cuenta con un muestreo anual desde el año 2006 para las cuencas alta, media y baja de los ríos Cara Sucia, Guayapa y El Naranjo; La salinidad del mar, se tomó de (Amador, y otros, 2016).

En la **Figura 6** se muestra el esquema lógico de trabajo para generar los escenarios que permitan comparar entre los regímenes natural, alterado y gestionado, para valorar la alteración actual existente y la contribución de los caudales ambientales en el escenario gestionado:

3.1.4.1. Escenario E1: Natural

Este escenario considera que los influjos de los ríos ocurren bajo condiciones naturales, sin afecciones antrópicas, a la vez, los influjos de mareas ocurren bajo condiciones históricas. En términos resumidos, se diría que este escenario es el ideal, un manglar sin alteraciones.

3.1.4.2. Escenario E2: Real

Este escenario considera que los influjos de los ríos ocurren bajo condiciones alteradas, debido a las demandas de agua antrópicas que extraen tanta agua como exista disponibilidad, a la vez, los influjos de mareas ocurren bajo condiciones históricas. En términos resumidos, este escenario es el más apegado a la realidad del territorio y refleja las condiciones alteradas.

De la comparación de E1 y E2 se cumple el **Objetivo específico 1**, sobre determinar la degradación actual de la hidrodinámica del MBS.

3.1.4.3. Escenario E3: Ambiental

Este escenario considera que los influjos de los ríos ocurren bajo condiciones alteradas, debido a las demandas de agua antrópicas que extraen agua hasta donde el caudal ambiental les permite, a la vez, los influjos de mareas ocurren bajo condiciones históricas. En términos resumidos, este escenario considera el equilibrio entre la naturaleza y los requerimientos humanos, tanto para subsistencia, como para su desarrollo económico.

De la comparación de E2 y E3 se cumple el **Objetivo específico 2**, sobre estimar la contribución de los caudales ambientales en la conservación de la hidrodinámica del MBS.

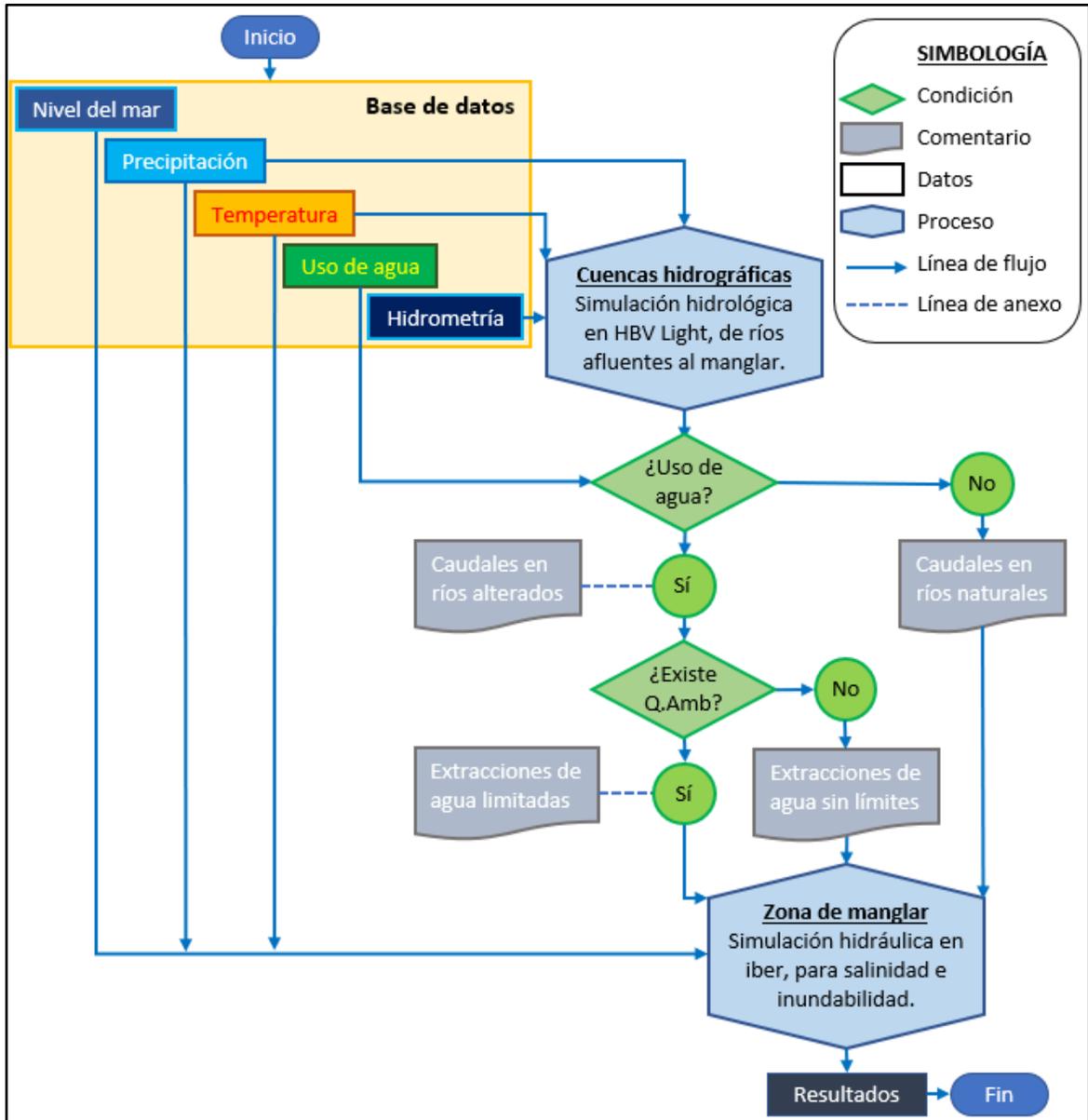


Figura 6. Flujograma de trabajo para el uso de la base de datos y la elaboración de escenarios en la modelación de la hidrodinámica del Manglar Barra de Santiago.

4. Resultados

Los resultados se presentan a continuación en dos grandes apartados, primero para la simulación hidrológica y luego para la simulación hidráulica

4.1. Resultados de las simulaciones hidrológicas

Contempla los resultados de la simulación de los caudales de los ríos a partir del clima en la cuenca, determinadas por precipitación y temperatura.

4.1.1. Régimen de precipitación

Las cuencas afluentes al MBS cuentan con precipitaciones multianuales que varían entre los 2,167 mm en la cuenca Zanjón del Chino, hasta 2,790 mm en la cuenca Cara Sucia (ver **Cuadro 2** de los Anexos). A escala intra anual, todas las cuencas tienen un régimen de precipitaciones típico del Corredor Seco Centroamericano “CSC”, con inicio en mayo y término en abril, dividido en dos estaciones climáticas: una lluviosa o húmeda que inicia en mayo y concluye en octubre, en la que precipita en torno al 94% de la lluvia anual, y una estación seca que inicia en noviembre y concluye en abril, en la que precipita el 6% restante. Ver **Figura 7**.

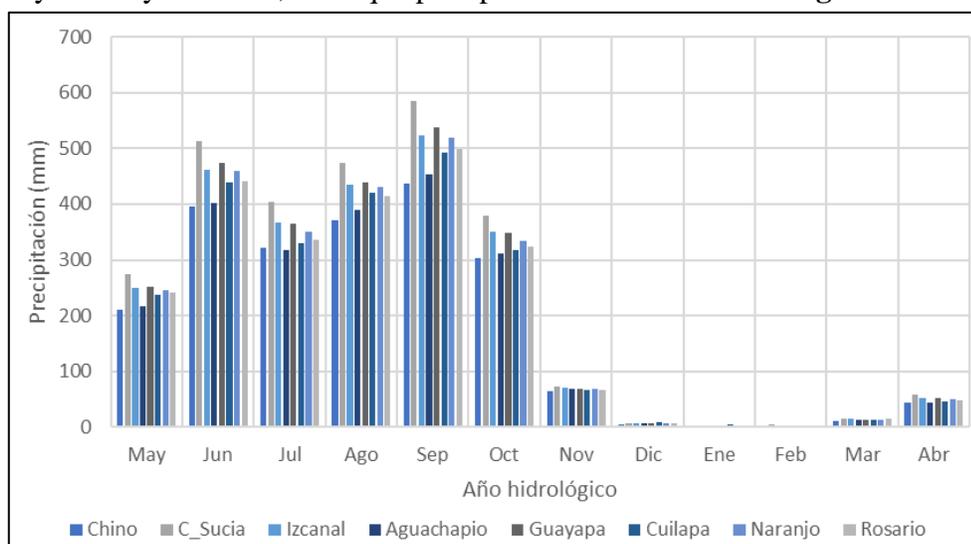


Figura 7. Precipitación media mensual interanual de los principales afluentes al Manglar Barra de Santiago.

4.1.2. Temperatura y Evapotranspiración potencial (ETP)

En cuanto a las temperaturas las cuencas se agrupan en 2, siendo Guayapa, El Naranjo y El Rosario el grupo de mayor altitud, con temperaturas media mensuales que oscilan desde 24.25 °C en diciembre y enero los meses más fríos, hasta los 26.75°C de temperatura media en abril, el mes más cálido; luego, las cuencas El Chino, Cara Sucia, El Izcanal, Aguachaío y Cuilapa, que tienen mayor planicie costera, presentan temperaturas mayores, con 26.5°C de temperatura media en septiembre y octubre los meses más fríos, hasta los 29°C de temperatura media mensual en abril, el mes más cálido. Ver **Figura 8** y **Cuadro 3** de los Anexos.

La ETP varía poco de una cuenca a otra dado que las temperaturas son relativamente similares entre ellas y estables a lo largo del año, variando la ETP anual de 1,667 mm en la cuenca El Rosario, hasta 1830 mm en la cuenca Zanjón El Chino. Las menores ETP mensuales se dan de octubre a febrero entre 120 y 140 mm, y las mayores de marzo a agosto entre 160 y 170 mm. Ver **Figura 9** y **Cuadro 4** de los Anexos.

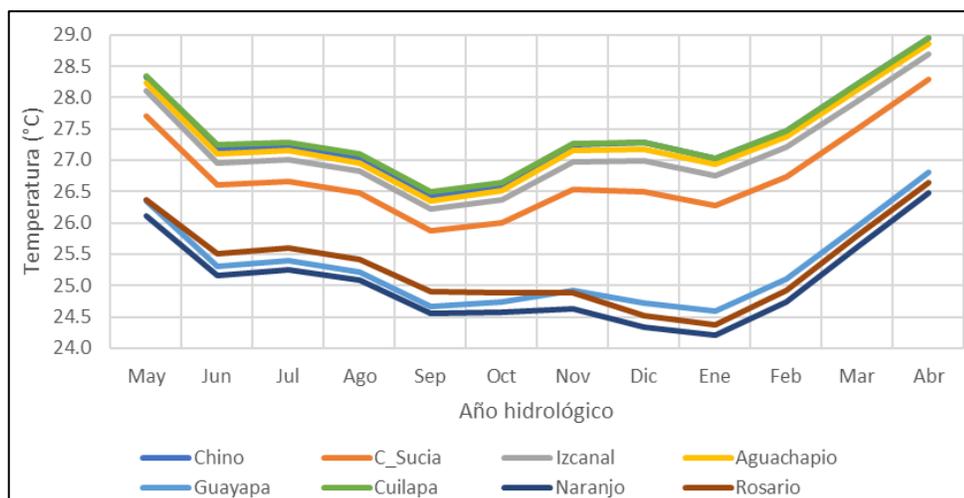


Figura 8. Temperatura media mensual interanual de los principales afluentes al Manglar Barra de Santiago.

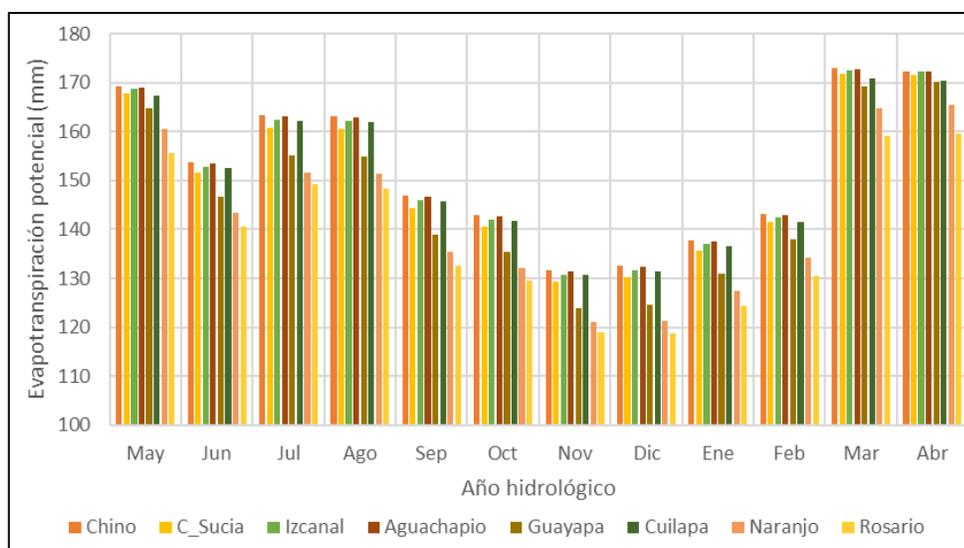


Figura 9. Evapotranspiración potencial media mensual interanual de los principales afluentes al Manglar Barra de Santiago.

4.1.3. Demandas de agua y naturalización

En las cuencas afluentes al MBS se tienen dos demandas de agua principales: agrícola y poblacional; la primera proviene de la estimación de la demanda de agua requerida por tipo de cultivo y su respectiva extensión de los permisos emitidos por el Ministerio de Agricultura y Ganadería “MAG”; mientras que la segunda son estimaciones de uso de agua poblacional a partir de dotación por población tipo urbana y rural de acuerdo a proyecciones de población a nivel de distrito (antes municipio). Ambas demandas provienen de “Disponibilidad Hídrica para el primer ciclo de actualización 2012-2013 hasta 2016-2017” (Cornejo Hernández, 2021). En la **Figura 10** se muestran las extracciones totales de agua por mes en cada cuenca principal afluente al MBS, a lo largo de cinco años hidrológicos, desde mayo de 2012 hasta abril de 2017. Cabe destacar que, en el caso de la demanda poblacional se consideran las extracciones superficiales y subterráneas brutas, las pérdidas por conducción y suministro, y el retorno como aguas residuales.

De la **Figura 10** resalta que todas las cuencas tienen un régimen de extracciones distinto, así como que, de todas las cuencas la de mayor demanda de agua es el río Guayapa y hacia los últimos años también el río El Rosario; otro aspecto importante es la temporalidad de las extracciones, que se incrementa significativamente y de forma gradual durante la estación seca desde noviembre hasta abril, que es la época de riego de cultivos, luego en los meses de mayo a octubre la demanda cae a mínimos para abastecer el consumo poblacional. Esta temporalidad se aprecia mejor en la **Figura 11**, en la que se muestran las medias mensuales interanuales por cuenca afluente principal.

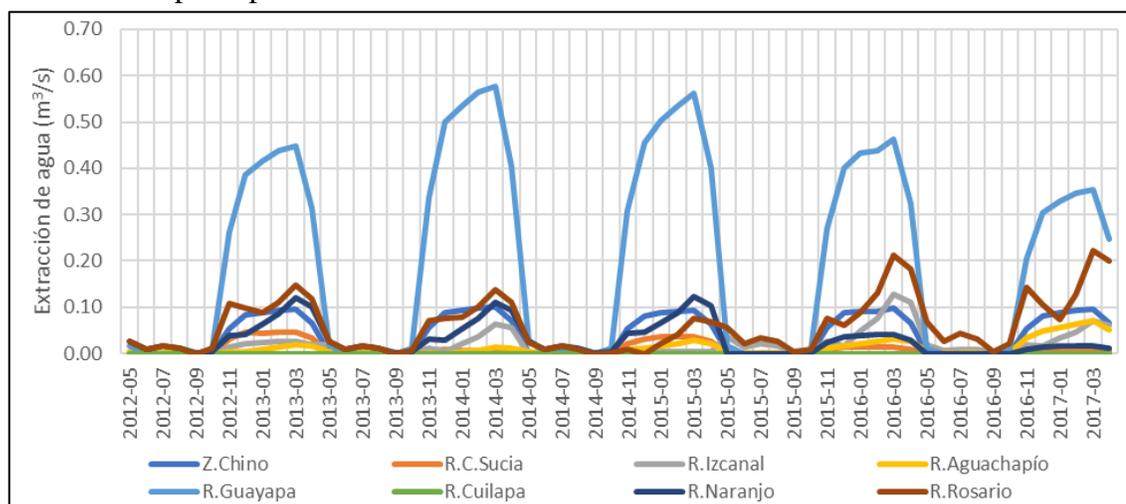


Figura 10. Demanda de agua agrícola y poblacional por mes desde mayo del 2012 hasta abril del 2017, para las principales cuencas afluentes al Estero Barra de Santiago.

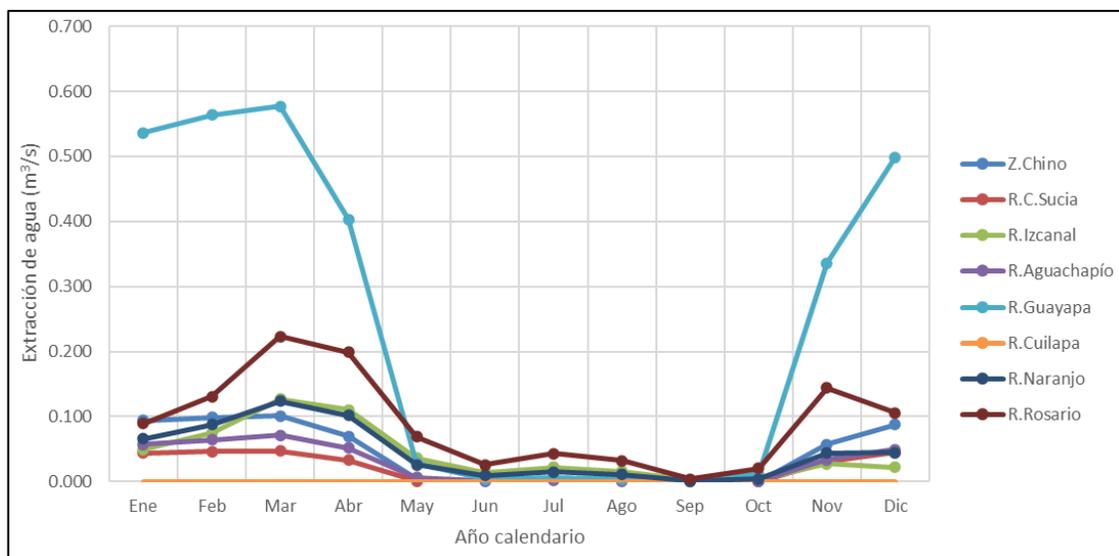


Figura 11. Demandas de agua media mensual, agrícola y poblacional por cuenca afluente principal al MBS.

Para el proceso de naturalización de los registros hidrométricos de Cara Sucia y El Naranjo utilizados en la calibración, debido a que su disponibilidad es poca y a que corresponden a los años 2018-2020 que no son parte de los que se tienen registros de usos del agua, se utilizó la media mensual interanual de las extracciones mostradas en la **Figura 11** y cuyos valores se incluyen en la **Cuadro 5** de los Anexos.

4.1.4. Calibración

En la **Figura 16** se muestra la calibración a nivel diario para las cuencas Cara Sucia y El Naranjo, las únicas con registro hidrométrico histórico en la zona. El Coeficiente Compuesto de Calibración obtenido luego de 220,000 iteraciones bajo el Algoritmo Genético para Optimización de Parámetros “GAP”, distribuidos en 20 procesos de calibración, 10 para cada cuenca, fue de 0.583 para Cara Sucia y 0.594 para El Naranjo. Las limitantes para alcanzar mayores valores de calibración son que la curva de descarga para ambas estaciones se encuentra definida para caudales bajos y medios, pero no para caudales altos, aspecto notorio al no alcanzar a simularse los caudales picos; sin embargo, dicha condición también puede deberse a una limitante del modelo hidrológico. Otra fuente de error es la representatividad que las estaciones meteorológicas tengan de los microclimas locales y el relleno y extendido de datos que se haya empleado en la base de datos, pero estos son aspectos ineludibles.

En la **Figura 17** se muestra la calibración con paso de tiempo mensual, en donde se aprecia que la mayor parte del tiempo los caudales se simulan con habilidad adecuada y son principalmente los eventos extremos los que causan que los coeficientes de calibración no alcancen valores mayores.

4.1.5. Exportación de la calibración en ríos con estación hacia ríos sin estación.

Los parámetros de calibración de Cara Sucia y El Naranjo se exportaron al resto de cuencas afluentes al MBS y la cuenca del río El Rosario que es limítrofe. Los parámetros de Cara Sucia se exportaron al zanjón del Chino, la Qda. Camalote, ríos El Izcanal, de Faya y Aguachapío; mientras que los coeficientes de El Naranjo se exportaron al río Guayapa, Qda. La Bolsa, río Cuilapa, Qda. El Mango y río El Rosario. Esto se realizó debido a que la geología, pedología, usos del suelo y cobertura vegetal entre las cuencas son similares, en gran medida debido a su pequeño tamaño, que varía desde 4.23 Km² en la Qda. La Bolsa, hasta los 115.53 Km² del Zanjón del Chino, ver **Cuadro 6** de los Anexos.

En cuanto a la geología (**Figura 12** y **Cuadro 7** de los Anexos) entre 50% y 75% del área de todas las cuencas tienen rocas epiclastitas volcánicas y piroclastitas, localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas; entre 10% y 30% del área son rocas efusivas básicas-intermedias, piroclastitas volcánicas subordinadas; y entre 1% y 30% del área son depósitos sedimentarios del cuaternario.

Los suelos de las cuencas (**Figura 13** y **Cuadro 8** de los Anexos), son principalmente latosoles arcillo rojizos, desde 45% a 80%; en segundo orden son andisoles entre 20% y 60%, y en tercer orden los ríos más orientales son grumosoles entre 5% y 20%.

Los usos de suelo dominantes son tres: bosque siempre verde entre 5% y 55%, cultivos de granos básicos entre 10% y 40%, palmeras oleíferas entre 5% y 40% y cultivos anuales y permanentes. ver **Figura 14** y **Cuadro 9** de los Anexos.

La cobertura vegetal dominantes también es de tres tipos: vegetación cerrada principalmente siempre verde tropical ombrófila submontana entre 5% y 60%, vegetación abierta arbustiva predominantemente decidua en época seca entre 30% y 55%, y zonas de cultivos o mezclas de sistemas productivos entre 10% y 40%. Ver **Figura 15** y **Cuadro 10** de los Anexos.

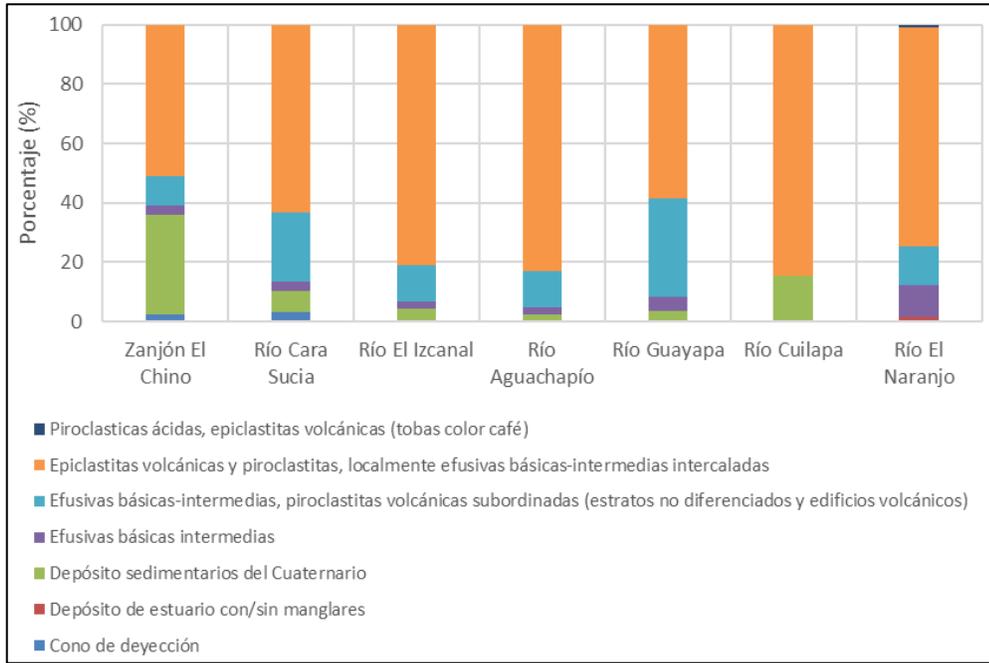


Figura 12. Geología por cuenca hidrográfica principal afluente al manglar Barra de Santiago.

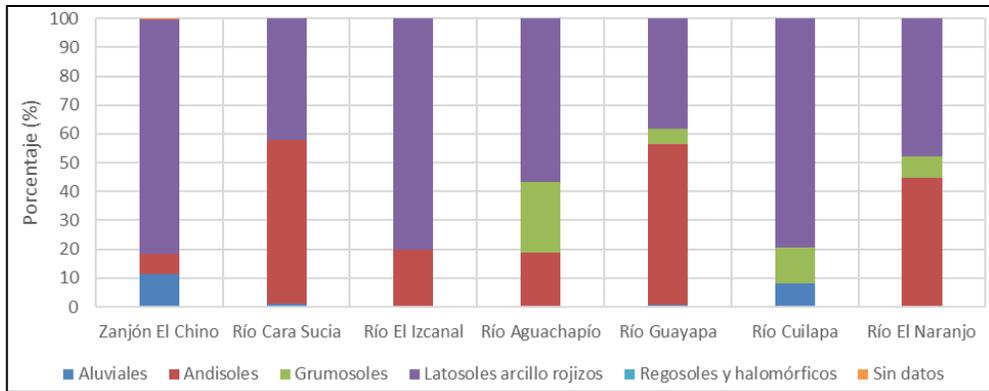


Figura 13. Pedología por cuenca hidrográfica principal afluente al manglar Barra de Santiago.

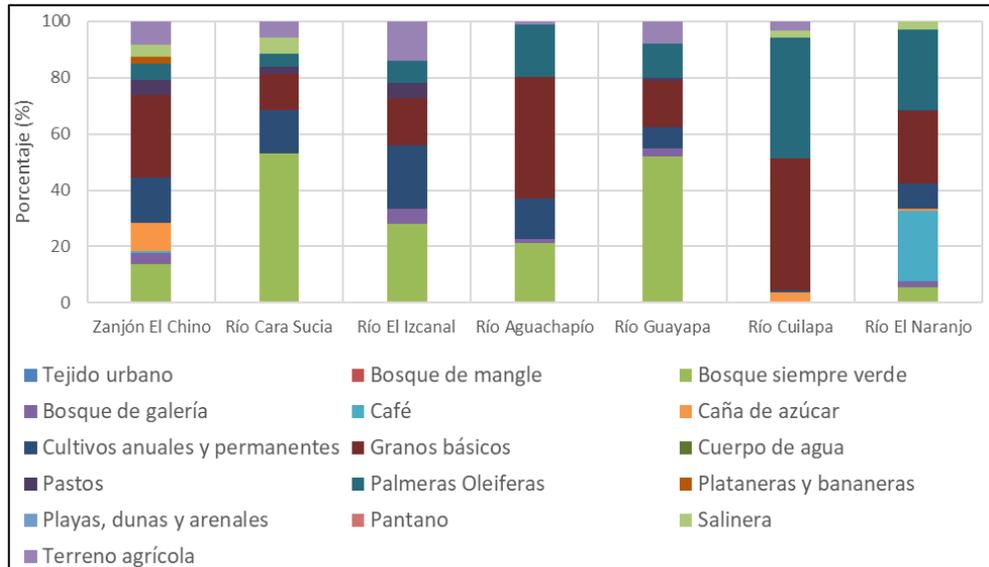


Figura 14. Uso del suelo por cuenca hidrográfica principal afluente al manglar Barra de Santiago.

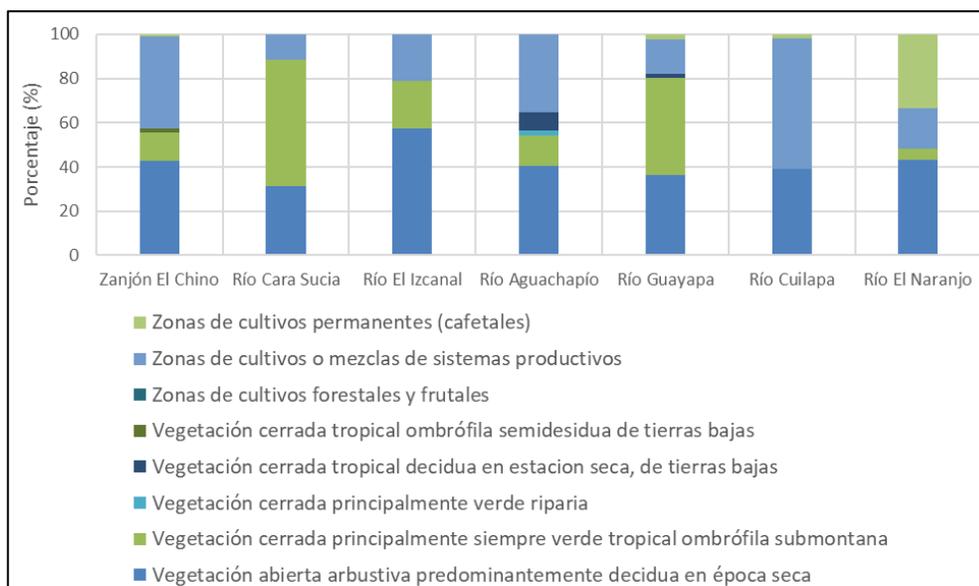


Figura 15. Cobertura vegetal por cuenca hidrográfica principal afluente al manglar Barra de Santiago.

4.1.6. Régimen fluvial

Una vez exportados los parámetros al resto de cuencas se simuló las aportaciones totales de agua dulce que ingresan al MBS, mostradas en la **Figura 18 superior**, en millones de metros cúbicos (MMC) por año hidrológico, considerando las corrientes de agua: zanjón El Chino, río Cara Sucia, Qda. El Camalote, río El Izcanal, río de Faya, río Aguachapío, río Guayapa, Qda. La Bolsa, río Cuilapa, Qda. El Mango y río El Naranjo; no se incluye al río El Rosario, por ser limítrofe, no afluente directo, pero sí se simuló.

La media multianual de aportaciones es de 266.2 MMC (ver **Figura 18 superior** y **Cuadro 11** de Anexos) y los años hidrológicos que más se acercan a dicha aportación son seis: 1974-75 con 265.2 MMC, 1978-79 y 1979-80 con 270.9 MMC y 263.9 MMC, respectivamente; 1986-87 con 257.1 MMC, 2003-04 con 265.1 MMC y 2020-21 con 259.1 MMC; de los cuales el 2020-21 es el que tuvo mejor prospecto para la simulación hidráulica, por equipararse a la media anual de aportaciones de agua dulce y por ser un año reciente, lo que se alinea con la batimetría levantada en campo que fue representativa de las condiciones geométricas del manglar y la bocana.

En la **Figura 18 inferior** (**Cuadro 12** de Anexos) se tienen las aportaciones medias mensuales interanuales de los 52 años hidrológicos simulados y las del año 2020-21, resaltando del año hidrológico medio la temporalidad de los caudales, que son altos de junio a noviembre y bajos de diciembre a mayo, estando desfasados un mes con respecto a la estación lluviosa, aunque los extremos sí coinciden, con el máximo en septiembre y el mínimo en abril.

En el año 2020 destaca la aportación extrema de junio debida a la Tormenta Tropical Amanda, el primer sistema ciclónico de la vertiente del Pacífico de finales de mayo, y logró atravesar Centroamérica hasta la vertiente del Atlántico en junio, donde se renombró como Cristóbal.

Julio presentó una canícula más intensa de lo normal con aportaciones menores de agua dulce, en agosto se normalizan las aportaciones y en septiembre, octubre y noviembre se tuvieron condiciones de menor humedad para la norma en dichos meses; finalmente, en estación seca se tienen caudales levemente superiores a la norma, lo que podría deberse a la alta recarga hídrica que generó el sistema Amanda-Cristóbal, con aportaciones superiores al 200% de la media.

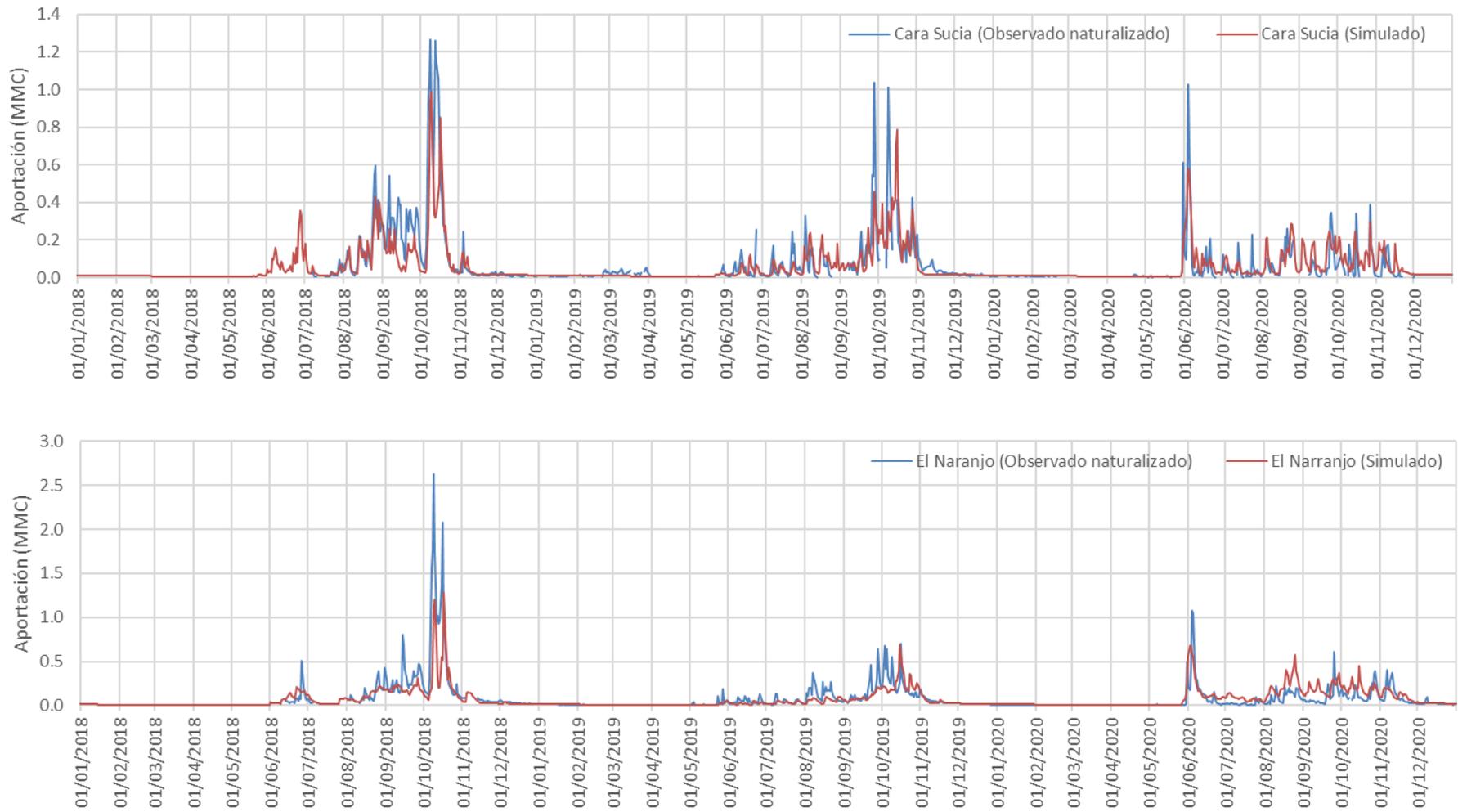


Figura 16. Aportaciones diarias observadas naturalizadas y simuladas en Millones de Metros Cúbicos “MMC”. Superior: río Cara Sucia. Inferior: río El Naranjo.

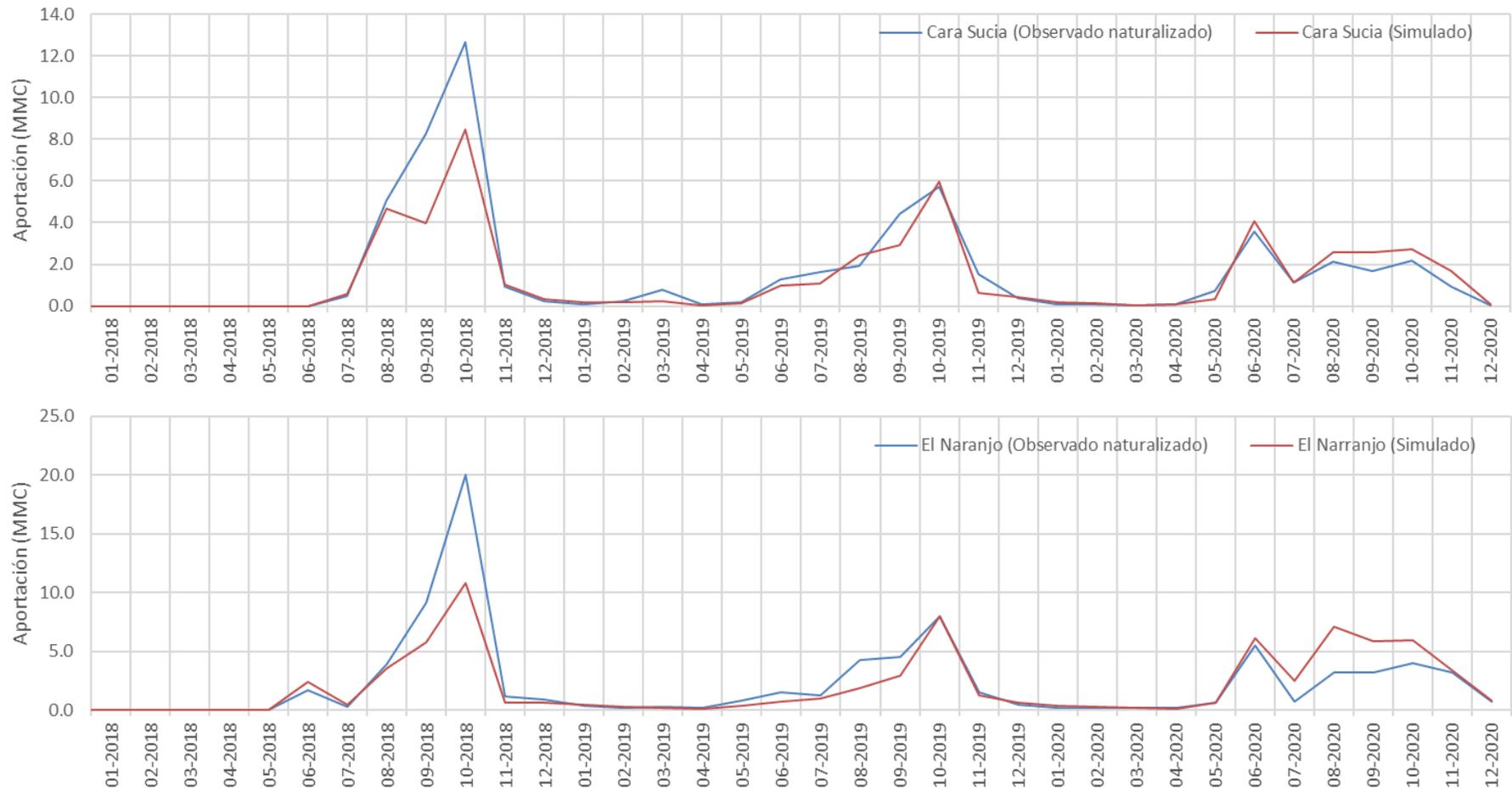


Figura 17. Aportaciones mensuales observadas naturalizadas y simuladas en Millones de Metros Cúbicos “MMC”. Superior: río Cara Sucia. Inferior: río El Naranjo.

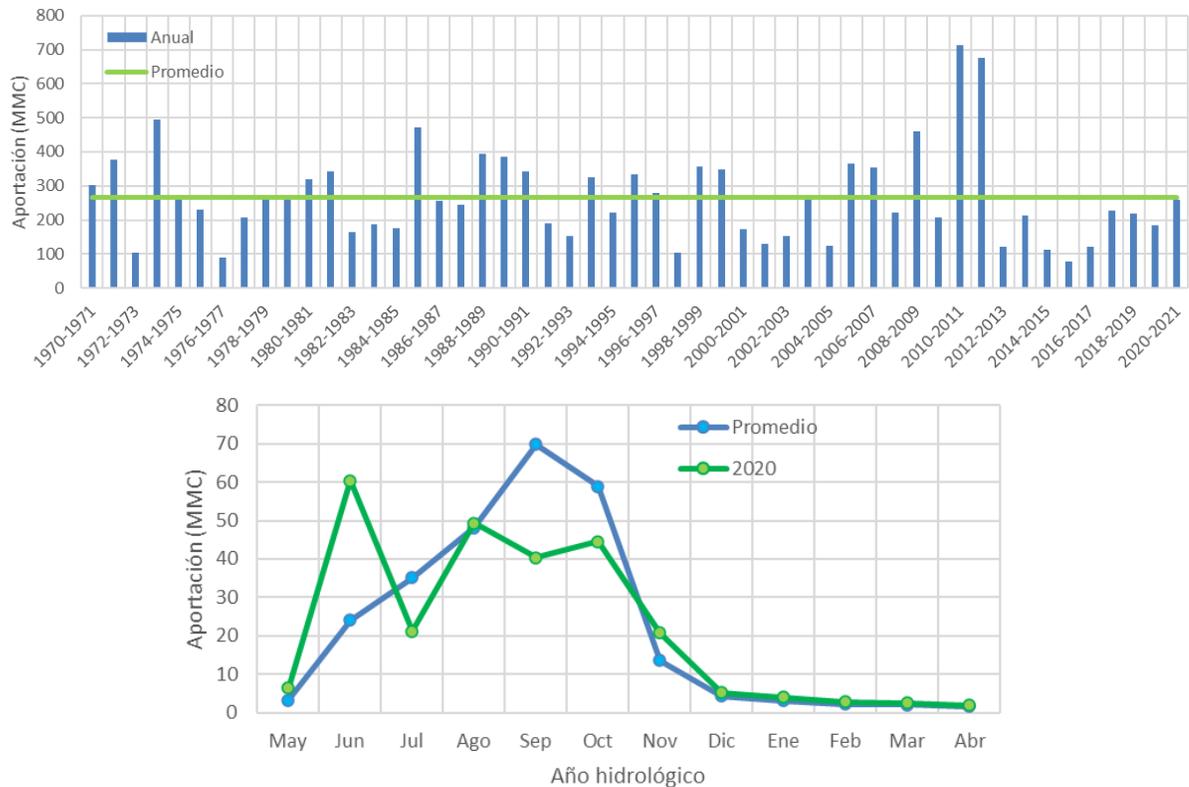


Figura 18. Arriba: aportación anual total de agua dulce de los ríos afluentes al MBS por año hidrológico. Abajo: aportación media mensual interanual de agua dulce y aportación media mensual del año 2020-21 utilizado en la simulación hidráulica.

4.1.7. Regímenes fluviales bajo los tres escenarios

Una vez determinadas las aportaciones de todos los ríos afluentes en el escenario natural, se generaron los dos escenarios faltantes: el real, que es alterado por acciones antrópicas y el ambiental, que considera la protección de caudales ambientales. El escenario real se obtuvo restando de los caudales naturales las demandas de agua, que para el año 2020 se consideraron las demandas máximas históricas para cada río, dada la recurrencia de sequías que se aprecia con la reducción de aportaciones de julio, septiembre y octubre.

El escenario ambiental se obtuvo limitando las demandas de agua del escenario real, de modo que, al alcanzar un límite inferior definido para cada corriente de agua, sea este el que se mantenga en los ríos. Las aportaciones naturales medias mensuales interanuales y el régimen de caudales ecológicos aplicado se incluyen en la **Cuadro 13** de los Anexos.

En la **Figura 19** se muestra la comparación de los escenarios natural, real y ambiental del régimen fluvial a nivel mensual de cada río principal afluente al MBS, destacando que en El Chino y Cara Sucia las demandas de agua no habrían superado el límite inferior del caudal ambiental, en Izcanal, Aguachapío, Guayapa, El Naranjo y El Rosario, las demandas de agua son de tal magnitud que se habría extraído todo el caudal de los ríos para satisfacer dichas demandas; y finalmente el río Cuilapa no cuenta con demandas de agua agrícolas registradas ni grandes poblaciones, por lo que en los tres escenarios es igual.



Figura 19. Caudales medios mensuales por río y por escenario para el año hidrológico 2020-2021.

4.2. Resultados de las simulaciones hidráulicas

La simulación hidráulica tiene su origen en las inspecciones de campo, pues de ellas surge la delimitación del terreno que se considera como el Estero Barra de Santiago y las conexiones hidráulicas que este tiene con los esteros colindantes como son Garita Palmera al oeste y la bocana del río El Rosario al este. En la **Figura 20** se muestran estas conexiones, siendo un canal con dos alcantarillas de 1.5 m de diámetro las que conectan con Garita Palmera y cuatro canales con 11 alcantarillas de 0.6 m las que conectan al MBS con el estero de la bocana del río El Rosario, las cuales se encuentran parcialmente azolvadas. Luego el Estero del río El Rosario se encuentra conectado al este con el estero Costa Azul, sin embargo, el canal de conexión se encuentra con avanzado estado de azolvamiento.



Figura 20. Fila superior y centro: alcantarillas que conectan al MBS con el estero de la bocana del río El Rosario. Foto inferior izquierda: alcantarillas que conectan al MBS con Garita Palmera. Foto inferior derecha: canal que conecta al Estero del río El Rosario con el estero Costa Azul bajo condiciones de avanzado azolvamiento.

Para el modelo hidráulico la batimetría en el canal principal del estero Barra de Santiago establece las condiciones geométricas que tiene el ingreso de agua salada desde el mar, de acuerdo a los ciclos de mareas altas y bajas, condición de especial interés debido a que el Modelo Digital del Terreno con el que se contaba establece la bocana en donde se ubicó en torno al año 2,000 (línea celeste en la **Figura 21**) condición que era necesaria actualizar con la batimetría (**Figura 22**), pues en la actualidad se ubica a casi un Km de dicha zona.

La bocana de Barra de Santiago se ha ido desplazando de forma particular, pues como se aprecia en las imágenes satelitales de Google Earth en la **Figura 21**, desde diciembre de 1,969 hasta diciembre de 1,985, esta prácticamente no tuvo desplazamiento en 16 años, luego hacia febrero del 2,003 se desplazó 250 metros hacia el oeste (18 años), posteriormente se desplazó 100 metros más para junio del 2,009 (6 años), y para diciembre del 2,012 (3 años) se desplazó 400 metros más, acumulando 750 metros, y para el noviembre del 2,020 ya contaba con una traslación total de 1,100 metros.

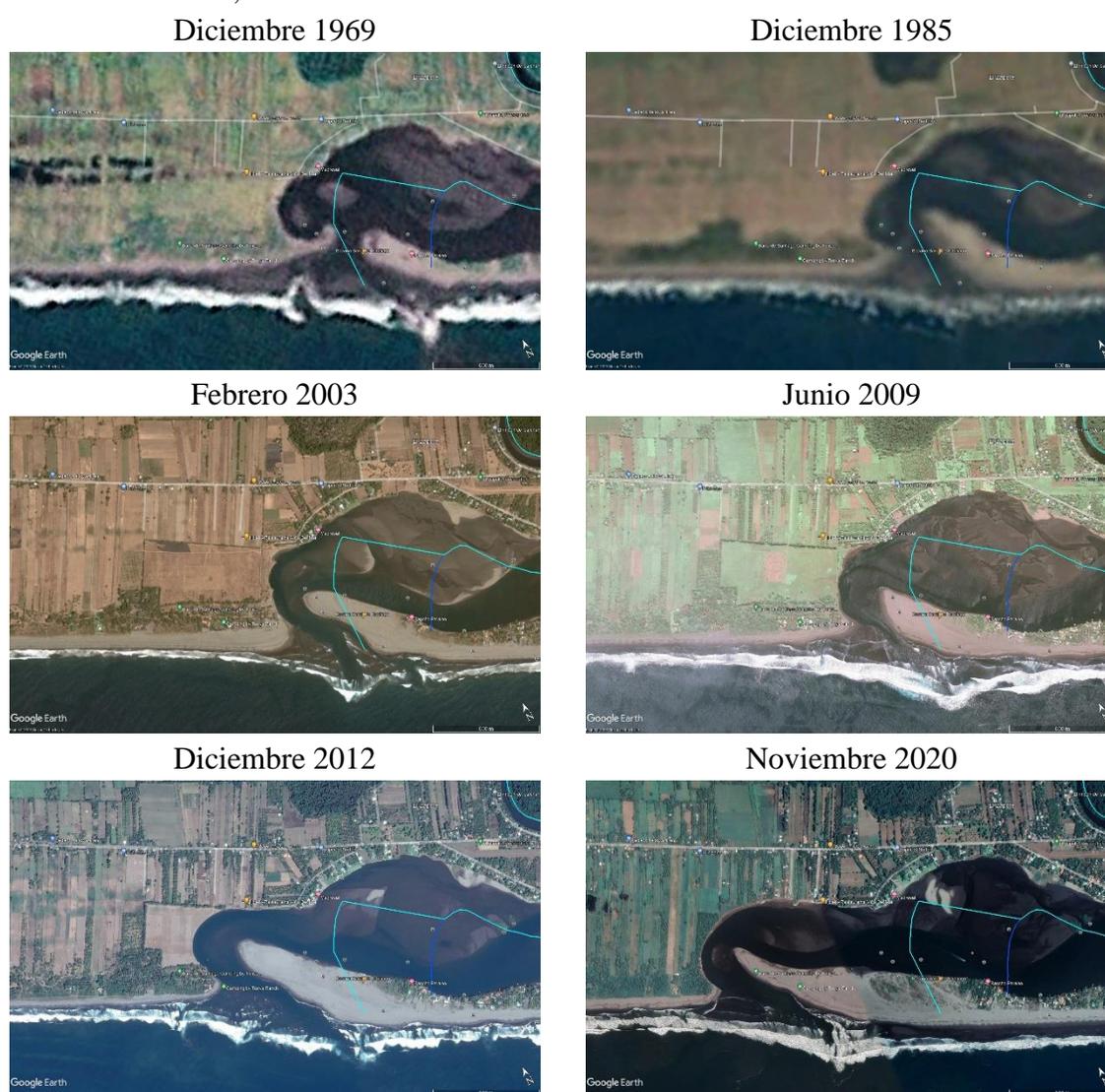


Figura 21. Bocana del Estero Barra de Santiago y su desplazamiento hacia el oeste desde 1969 hasta el 2020.

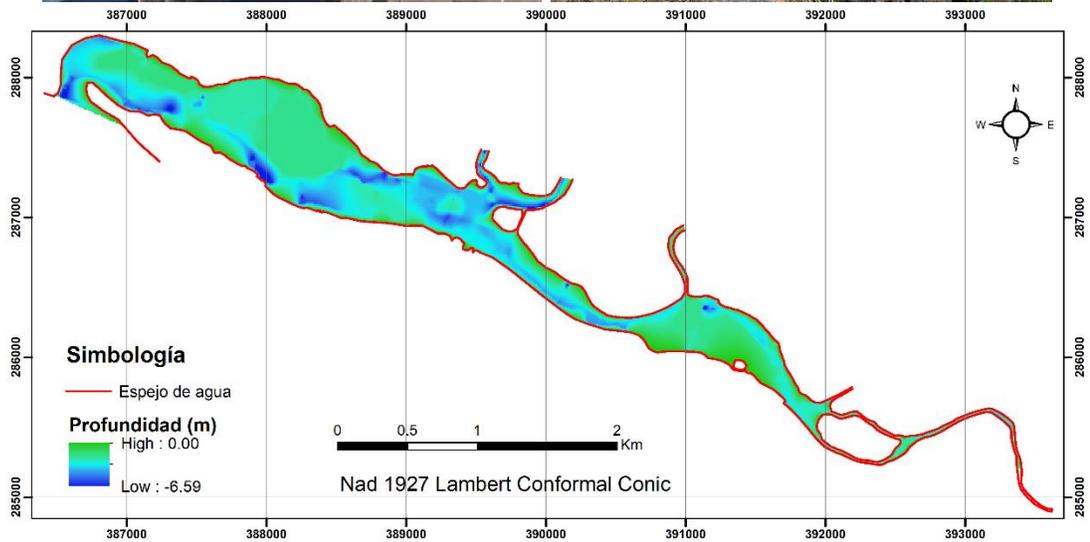
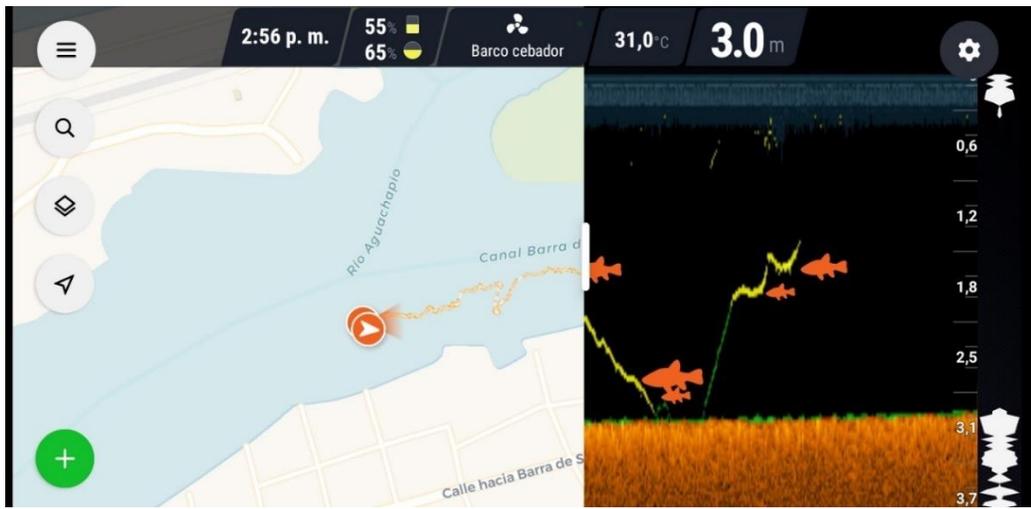


Figura 22. Arriba: Registro de la sonda deeper pro +, a la izquierda la traslación de la embarcación y a la derecha el sondeo de profundidad y detección de peces; destaca el trazo amarillo que es el registro de la varilla metálica graduada para corroborar físicamente la profundidad. En medio a la izquierda: sondeo con varilla metálica de la profundidad en el estero, a la derecha registro de las alcantarillas que conectan al MBS con otros esteros. Abajo: batimetría resultante.

4.2.1. Profundidad promedio mensual de las zonas permanentemente inundadas

Como resultado de las simulaciones hidráulicas se tiene la profundidad promedio de las zonas permanentemente inundadas por cada uno de los meses, resaltando que las mayores profundidades se dan desde mayo hasta octubre y las menores se dan de noviembre a abril, muy coincidente con el régimen de precipitaciones, aunque las diferencias entre los promedios de un mes y otro son bastante bajas como se muestra en la **Figura 23**, en donde la profundidad promedio de junio es de 0.92 m, el valor más alto, mientras que la más baja es de 0.81 m en noviembre, presentando una diferencia de solo 11 cm.

Por otra parte, el aspecto dominante en las profundidades del MBS son las mareas, y especialmente, la diferencia entre las mareas máximas y las mínimas, siendo el ejemplo más claro el mes de noviembre, el cual, a pesar de haber experimentado crecidas de ríos, muestra la profundidad más baja, incluso más que abril que es el mes con los caudales más bajos, esto se debe a que en noviembre las mareas máximas no compensaron a las mareas mínimas, propiciando menor influjo de agua salada y produciendo niveles más bajos en el estero.

Finalmente, el último aspecto relevante es que no se tienen diferencias significativas entre escenarios, las cuales se esperaban principalmente de noviembre a mayo, cuando las demandas de agua son mayores, pero solo se producen cambios en el orden de los milímetros; por ello, al comparar los mapas resultantes para todos los meses en los tres escenarios, no se aprecian diferencias significativas. Estos mapas se han incluido en los Anexos desde la **Figura 27** hasta la **Figura 32**.

4.2.2. Áreas del espejo de agua y volúmenes promedios mensuales de las zonas permanentemente inundadas

Otro de los factores que se tomaron en cuenta fue el área permanentemente inundada y su respectivo volumen de agua por mes, resultando que tampoco se tienen diferencias significativas entre escenarios, ver **Figura 23**. En la gráfica sí se nota el efecto que la estación lluviosa tiene al incrementar la extensión del espejo permanentemente inundado en casi 1 Km², comparando el valor más bajo de febrero con 11.85 Km² con el valor más alto de septiembre con 12.75 Km². En el volumen se tienen condiciones similares, pero con algunas particularidades; primero las diferencias entre escenarios son nuevamente despreciables, por lo que las extracciones de agua de los ríos durante la estación seca no incide significativamente ni en la extensión del espejo de agua ni en el volumen de la zona inundada; sin embargo nuevamente se nota la incidencia de la estación lluviosa al mantener el valor máximo del volumen inundado en 62 MMC, 4 MMC más que los 58 MMC de enero y febrero.

En cuanto a los valores bajos de mayo, estos pueden deberse al estado inicial de la zona inundada en el modelo hidráulico, debiendo emplear un tiempo en el llenado y estabilización de la zona de manglar mediante mareas y caudales de ríos, máxime considerando que en el año 2020 la estación lluviosa inició tarde.

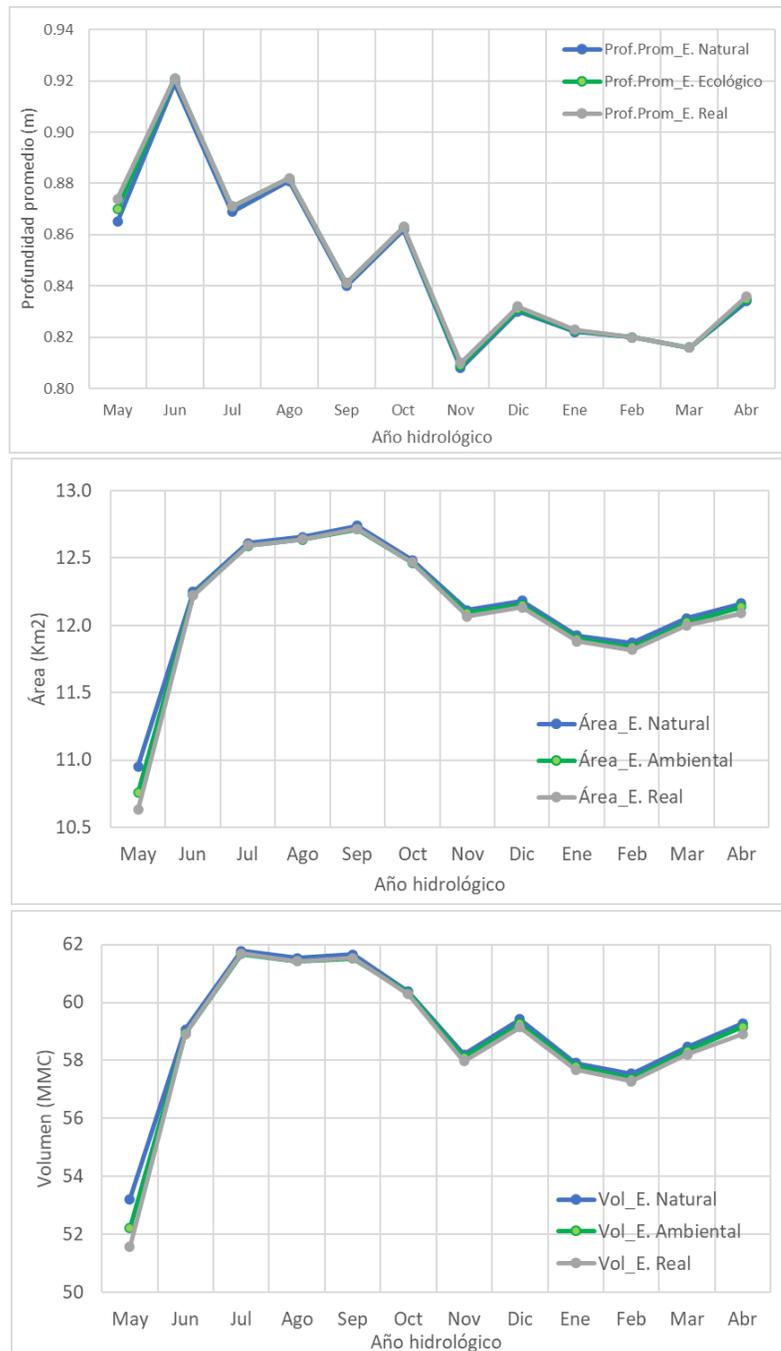


Figura 23. Profundidad, área y volumen promedio mensual de las zonas permanentemente inundadas del MBS.

4.2.3. Salinidad promedio mensual de las zonas permanentemente inundadas

Para la salinidad la situación sí cambia entre escenarios, y de mes a mes. En la **Figura 24** se comparan los mapas de salinidad promedio de octubre y abril que son los más representativos de las estaciones húmeda y seca, respectivamente; en ellos es notoria la extensión de la zona de transición o zona de mezcla, entre agua de mar y agua de río, o agua salada y agua dulce; en octubre esta zona se reduce a un mínimo entre las desembocaduras de los ríos Aguachapío y Guayapa hasta la zona de El Cajete en el canal principal; mientras que en abril la alta salinidad del mar alcanza toda la zona boscosa hasta donde los ríos confluyen con el bosque y la zona de mezcla retrocede hasta la zona entre las desembocaduras de los ríos Aguachapío y Cara Sucia.

Entre los años 2020 y 2021 el PhD Enrique Barraza realizó un monitoreo de diversas variables de la calidad del agua en cinco sitios distribuidos a lo largo del canal principal del estero (Barraza & Melara, 2022), entre estas variables monitoreó la salinidad una vez al mes, dichos sitios también se muestran en los mapas de la **Figura 24**.

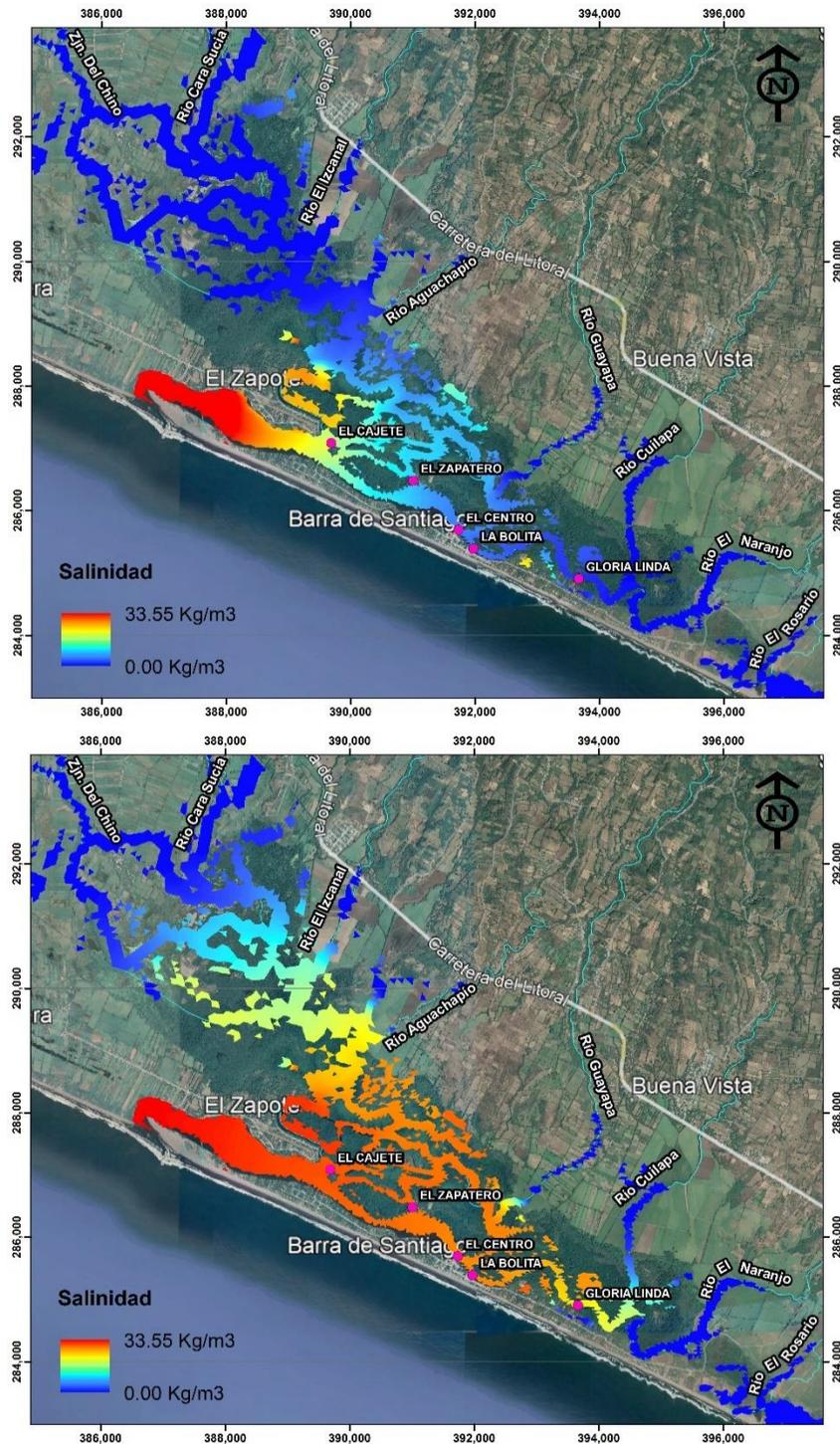


Figura 24. Comparativo de la salinidad entre estación lluviosa y estación seca. Superior: octubre; inferior: abril. Los cinco sitios resaltados: El Cajete, El Zapatero, El Centro, La Bolita y Gloria Linda, son los sitios de muestreo monitoreados por el PhD Enrique Barraza (Barraza & Melara, 2022).

Los datos del monitoreo fueron dispuestos para esta investigación, por lo que se realizó la comparación de la salinidad del escenario real a la hora de simulación más cercana al posible momento de la lectura de la salinidad, considerando la fecha de la lectura y que estas se realizaron en marea alta durante la mañana, para aprovechar las condiciones de navegabilidad del estero. Así, en la **Figura 25** se muestran las comparaciones de los cinco meses con datos comparables en los cinco sitios de muestreo.

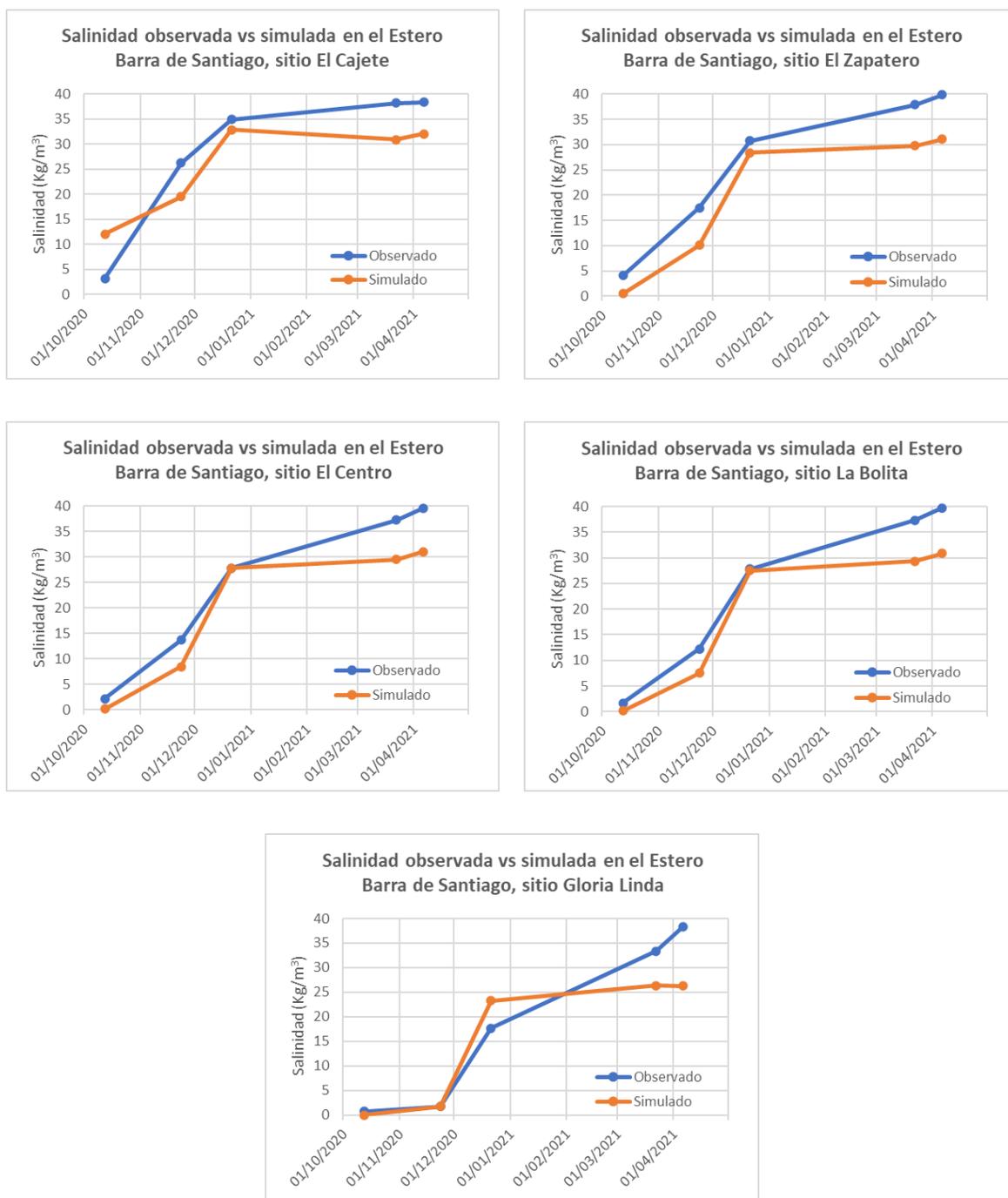


Figura 25. Salinidad observada (registrada) y simulada en cinco sitios del Estero Barra de Santiago para 5 momentos de los 8760 que tiene la simulación: 12/10/2020 11:00, 23/11/2020 10:00, 21/12/2020 09:00, 22/03/2021 10:00 y 06/04/2021 10:00.

Como resultado se tiene una buena replicación de la salinidad, considerando las numerosas variables que se tienen para llegar a simularla, como: el caudal simulado de todos los ríos afluentes, las extracciones de agua para agricultura, las extracciones de agua para uso doméstico y el retorno de aguas residuales para cada uno de dichos ríos; la batimetría realizada y la marea de la estación de Acajutla marcando las entradas y salidas de agua salada al estero.

De dichos muestreos resalta también los valores de salinidad tan bajos y cercanos a cero que se pueden alcanzar en el canal principal del estero, como se muestra para el sitio Gloria Linda en los meses de octubre y noviembre; a nivel general los valores bajos de salinidad fueron bien simulados por el modelo hidráulico; luego se tiene el incremento en los valores de salinidad en la estación seca, llegando a registrarse salinidad incluso mayor a la del mar, condición que el modelo no fue capaz de replicar, posiblemente por la subestimación de demandas de agua, por la no consideración de aguas subterráneas y por fuentes de error en todas las variables incidentes.

Finalmente, en la **Figura 26** se muestra la salinidad promedio mensual por escenario, denotando la incidencia de la estación lluviosa de junio a noviembre y luego la estación seca de diciembre a mayo, desfasados un mes con respecto al año hidrológico. En cuanto a los escenarios se aprecia como la no regulación de las demandas de agua propicia a incrementar la salinidad del estero en $+2 \text{ Kg/m}^3$ más, de lo que podría esperarse bajo condiciones naturales, incremento que se reduce a $+1.2 \text{ Kg/m}^3$ en el escenario protegido con caudales ambientales, condición sostenida durante cuatro meses desde enero hasta abril, período en que las demandas de agua se vuelven mayores y los ríos alcanzan sus caudales más bajos.

Se pueden comparar los mapas de salinidad de cada escenario por cada mes en los Anexos desde la **Figura 33** hasta la **Figura 38**.

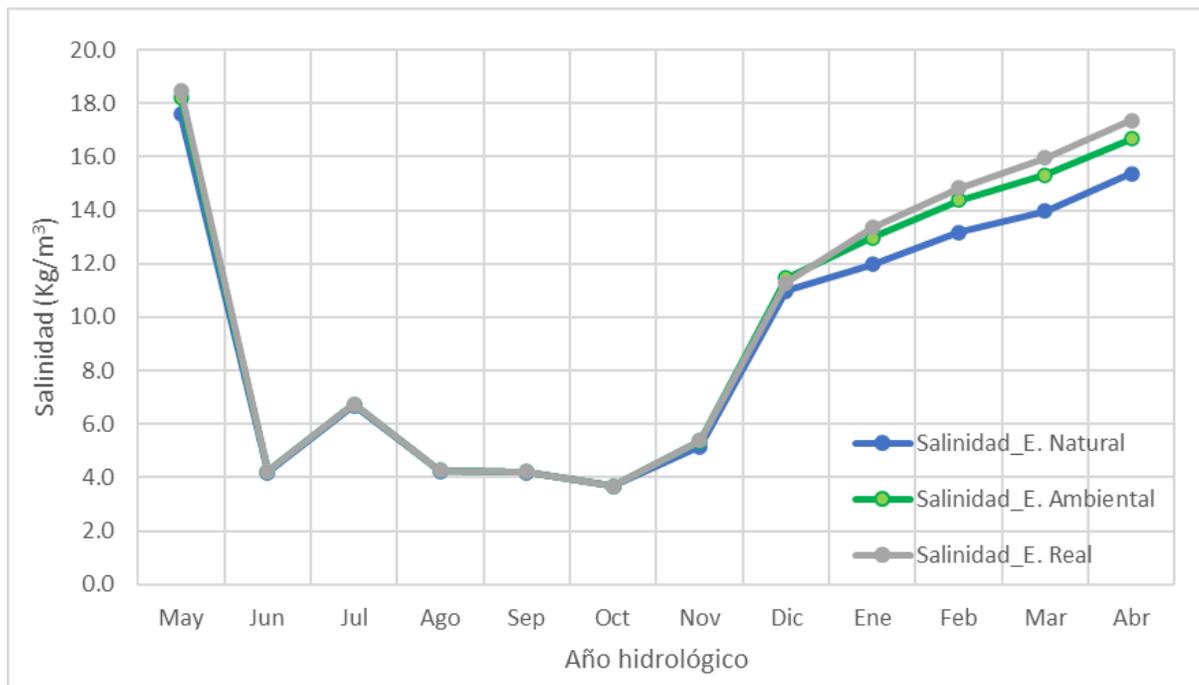


Figura 26. Salinidad promedio mensual de mayo 2020 a abril 2021 de las zonas permanentemente inundadas en cada mes en el Estero Barra de Santiago.

5. Análisis de la experiencia de la realización del estudio

La investigación arrancó con las jornadas de campo en las que fue requerido un día completo para la revisión de las conexiones del manglar, lo que inicialmente se esperaba que fuera un par de horas, y dos días para la realización de la batimetría. Dichos tiempos excedieron el que se tenía programado, por lo que en trabajos de esta índole que no son frecuentes y que están relacionados con investigación, recomendaría considerar entre el 150% y el 200% del tiempo de lo que toma una inspección de campo común a un cuerpo de agua.

Ante el uso de equipos que captan y registran información de forma electrónica y digital es importante contar con algún medio físico de verificación para garantizar que los dispositivos se encuentran operando de forma correcta. Esto fue especialmente útil en esta investigación, ya que, durante la realización de la batimetría, cuando los canales alcanzaban profundidades tan bajas en las que la lancha podía encallar, la ecosonda no era capaz de sondear las profundidades y arrojaba datos incorrectos; en dichos tramos de canales los medios físicos de verificación: varilla graduada y cinta métrica fueron útiles para conocer la geometría del estero.

En cuanto a las simulaciones hidráulicas uno de los aspectos principales a tener en cuenta es el tiempo de simulación, que para este caso estaba muy condicionado a la resolución espacial de la grilla que representaba el manglar, resaltando que en las resoluciones más finas con celdas de 10m, la modelación demoraba tanto como el tiempo real, es decir, una hora computacional simulaba una hora de la realidad, de manera que simular un año hidrológico habría sido imposible para esta investigación; mientras que en resoluciones más gruesas, con celdas de 120m se podían tener resultados en menos de dos días; por ello, realizar numerosas pruebas de simulación a distintas resoluciones espaciales es necesario previo a definir la resolución con la que se correrán todos los escenarios. En este tema, también cabe destacar que los equipos informáticos deben ser robustos para poder manejar grandes volúmenes de información en cortos períodos de tiempo.

Entre las limitantes principales para el desarrollo de esta investigación se encuentra el tiempo, ya que inicialmente consideraba más escenarios de simulación relacionados con Cambio Climático; su implementación habría requerido al menos dos meses más para contar con información lista y correr los modelos hidrológico e hidráulico. Otra limitante de tiempo es que la batimetría se podía trabajar solo los fines de semana y preferentemente a las horas de marea alta, para acceder a la mayor parte de canales posibles, por lo que cada vez que un fin de semana no contaba con horarios adecuados de marea, estos debían descartarse para la jornada de campo.

Sobre los resultados obtenidos ha sido sorprendente para este investigador notar la poca incidencia de los caudales ambientales en profundidad, extensión y volumen almacenado, así como la incapacidad del modelo hidráulico para replicar salinidades superiores a las del mar y que ocurren en la realidad; a este respecto, el investigador considera que es posible que con resoluciones espaciales finas los resultados podrían variar, ya que más canales se simularían y se apreciarían las incidencias de aspectos más locales como los de pozas y flujos bajos de agua.

6. Conclusiones

Los ríos son una parte fundamental para comprender la dinámica hídrica del Estero Barra de Santiago, pues estos transfieren la variabilidad climática al comportamiento del mismo, situación que queda constatada con los gráficos de profundidad, área del espejo de agua y volumen almacenado en las zonas permanentemente inundadas (**Figura 23**); en ellos se aprecia cómo a lo largo de la estación húmeda tanto la profundidad del estero, como la extensión del espejo de agua y el volumen del mismo presentan valores superiores a los de la estación seca.

Las condiciones mínimas de las zonas permanentemente inundadas son dominadas por el mar, en los mismos gráficos de la **Figura 23** se aprecia que, en cuanto a profundidad, el mar proporcionó los 0.81 m base de profundidad promedio mensual en noviembre, el mes con las mareas más bajas en el año simulado, mientras que las crecidas de los ríos añadieron 11 cm hasta alcanzar profundidad media mensual de 0.92 m en junio, el mes con la mayor crecida debida al evento extremo Amanda-Cristóbal. De la misma manera para la extensión del espejo de agua, el mar proporcionó 11.85 Km² base en febrero, el mes con menos agua, área que fue ampliada en 1 Km² hasta alcanzar 12.75 Km² en septiembre, el mes con más agua; esto se constata con el volumen almacenado, que fue mínimo en febrero con 57.5 MMC, proporcionados principalmente por el mar, y que incrementó 4 MMC hasta casi alcanzar los 62 MMC de forma sostenida de julio a septiembre, los meses con más agua y crecidas de ríos.

La salinidad del estero fue la cuarta variable considerada para evaluar sus condiciones, mostrando esta variable la incidencia más clara de los ríos, pues la salinidad es mínima en los meses de la estación húmeda y máxima en los de la estación seca, pero desfasada un mes, constatado tanto en los mapas de la **Figura 24** y el gráfico de la **Figura 26**. El desfase de mayo se debe al tiempo de respuesta que toman los ríos para saturar el suelo luego de la estación seca y comenzar a generar crecidas que generen grandes aportes de agua dulce al estero, y el desfase de noviembre se debería a la saturación del suelo que ante lluvias menores es capaz de generar escorrentía que termina siendo aporte de agua dulce al manglar.

Con los muestreos de salinidad realizados por (Barraza & Melara, 2022), fue posible validar la simulación hidráulica y que la salinidad cambia con los flujos de marea y los caudales incidentes de los ríos, siendo esta máxima en las zonas cercanas a la bocana y mínima en las desembocaduras de los ríos. La salinidad es uno de los factores clave para el ecosistema, pues la tolerancia a la misma es la que define las especies que lo habitan, de manera que por la estacionalidad encontrada podría ser posible que se encontrasen en el estero diversas especies entre la estación húmeda y la seca. Habiendo establecido las condiciones anteriores, puede decirse que con respecto al objetivo específico uno sobre determinar la degradación actual del manglar Barra de Santiago, en lo que a volúmenes de agua se refiere y la extensión de la misma, esta se da tal cual se daría bajo cualquier escenario, ya que es dominada en sus condiciones mínimas de profundidad, extensión y volumen almacenado por el mar; sin embargo, la hidrodinámica sí se habría afectado en los límites del estero al construirse las carreteras que lo atraviesan con sus respectivas alcantarillas parcialmente azolvadas.

Ahora bien, en cuanto a salinidad, es posible afirmar que, debido a las extracciones de agua de los ríos, el estero presenta valores más altos de salinidad en torno a $+2 \text{ Kg/m}^3$ sostenidamente desde enero hasta abril, e incluso mayo cuando el inicio de la estación húmeda se atrasa, lo que podría afectar al ecosistema por la distinta tolerancia que tengan las especies a la salinidad.

Con respecto al objetivo específico dos sobre estimar la incidencia que los caudales ambientales tienen en conservar la hidrodinámica del manglar, se puede afirmar que en lo que respecta a profundidad, extensión del área inundable y volumen de agua almacenado, actualmente los caudales ambientales no tienen incidencia significativa en el estero, pues las condiciones mínimas del mismo son dominadas por el mar; esto es así, mientras los ríos no tengan represamientos cuenca arriba, si eventualmente estos existiesen, los caudales ambientales sí tendrían incidencia en la hidrodinámica, al conservar durante la estación húmeda el flujo de crecidas hacia el estero, época en la que los ríos tienen la mayor incidencia.

En cuanto a salinidad, los caudales ambientales sí tienen incidencia al reducir en un 40% el exceso de salinidad provocado por las extracciones de agua de los ríos para uso doméstico y agrícola; este sería un elemento de incidencia que actuaría más a largo plazo en la hidrodinámica, pues al cambiar la salinidad del agua, se modifican las condiciones del ecosistema y las especies que habitan en él, las cuales a su vez, inciden en la modificación del entorno; además, cabe añadir que hay un factor importante no considerado en esta investigación y es el transporte de sedimentos por parte de los ríos, lo que junto a las mareas dan forma al estero; en este respecto los caudales ambientales podrían tener mayor incidencia en la hidrodinámica del manglar, ya que ayudarían a mantener flujo libre en los canales por los que transita el agua dulce en las zonas más someras.

En cuanto a la traslación de la bocana del estero Barra de Santiago mostrada en la **Figura 21**, esta no se da de forma gradual, sino en momentos específicos que podrían estar relacionados a los eventos extremos de precipitación y crecidas, pues al cotejar las fechas de las fotografías con las aportaciones de agua dulce de los ríos mostrada en la **Figura 18 superior**, destacan los pocos eventos extremos entre 1970 y 1985, únicamente el huracán Fifi (Sep-74), período en que no se tuvo traslación de la bocana; luego entre 1985 y el 2003 se tienen los huracanes Gilberto (Sep-88) y Mitch (Nov-98), período en que la bocana se trasladó 250 metros; posteriormente numerosos huracanes entre 2003 y 2009 entre los que destaca el Huracán Stan (Oct-05), período en que la bocana se trasladó 100 metros más, pero especialmente entre el período 2009 y 2012 se tuvieron dos años con máximos consecutivos de precipitación histórica, llegando a registrarse casi el 200% de la lluvia anual en ambos años, siendo en 2010 distribuida a lo largo de varios eventos extremos y en 2011 concentrada en 10 días por la Depresión Tropical 12E (Oct-11), como reacción a las crecidas de los eventos extremos de ambos años se habría producido la traslación de 400 metros de la bocana; posteriormente se tuvieron numerosas sequías, pero con eventos extremos en algunos años como 2017 y 2020 con la TT Amanda-Cristóbal, produciendo las traslaciones más recientes. De manera que, los eventos extremos de crecidas de ríos podrían ser el principal forzante que modifica la ubicación de la bocana de Barra de Santiago.

7. Recomendaciones

- Para realizar monitoreos de salinidad en el Estero Barra de Santiago. Se recomienda que se realice considerando los niveles de marea y la época del año, pues dependiendo de si se tiene condición de llenado o vaciado del estero variará el nivel de salinidad que puede tenerse en el agua; a la vez, dependiendo de la época del año se pueden tener salinidades bajas durante la estación lluviosa al haber grandes aportaciones de agua dulce de los ríos, y salinidades más altas en la estación seca por tenerse el efecto contrario en las corrientes de agua afluentes.
- Puede ser de interés realizar simulaciones de otros escenarios que se consideraron en un inicio para esta investigación, pero que por falta de tiempo no pudieron llevarse a cabo, como los relacionados con Cambio Climático, incremento del nivel del mar de cara al futuro, incrementos en las demandas de agua por el incremento poblacional, expansión de la frontera agrícola con sus correspondientes demandas de agua y cambio de uso del suelo, y los cambios que el mismo clima genera en los requerimientos hídricos por cambios en la temperatura y en el patrón de precipitación. Estos escenarios que quedaron fuera son:

Natural futuro: Este escenario considera que los influjos de los ríos ocurren bajo condiciones inducidas por Cambio Climático, sin afecciones antrópicas, a la vez, los influjos de mareas ocurren bajo condiciones proyectadas de ascenso en el nivel del mar. Este escenario representa las condiciones futuras a las que habrá que adaptarse.

Futuro no regulado: Este escenario considera que los influjos de los ríos ocurren bajo condiciones inducidas por Cambio Climático, los usos del agua son los proyectados a futuro, también afectados por Cambio Climático y los influjos de marea ocurren bajo condiciones proyectadas de ascenso en el nivel del mar. Este escenario representa la condición actual, proyectada hacia el futuro si no se hiciera nada por regular el uso del recurso hídrico.

Futuro gestionado: Este escenario considera que los influjos de los ríos ocurren bajo condiciones alteradas por usos de agua y Cambio Climático, así como las mareas se encuentran alteradas por el ascenso del nivel del mar, pero se combina con la protección del recurso hídrico por medio de los caudales ambientales.

- La bocana del estero Barra de Santiago se ha desplazado en torno a 1 Km en los últimos 50 años, principalmente en períodos de eventos extremos de ríos, por lo que puede ser de especial interés incorporar el análisis de arrastre de sedimentos, para lo cual sería requerido monitorear el arrastre de sedimentos en los ríos afluentes y tomar muestras de granulometría a lo largo del Estero, para determinar las zonas principales de erosión y deposición.

8. Literatura citada

- Amador, J., Rivera, E., Durán-Quesada, A., Mora, G., Sáenz, F., Calderón, B., & Mora, N. (2016). The easternmost tropical Pacific. Part I: A climate review. *Revista de Biología Tropical*, Vol. 64 (Suppl. 1): S1-S22.
- Asamblea Legislativa. (2022). *Ley General de Recursos Hídricos*. San Salvador, El Salvador: Casa Presidencial.
- Barraza, J. E., & Melara, V. (2022). Monitoring of fecal indicator bacteria in two Salvadorian estuaries. *Institute of Science, Technology and Innovation, Francisco Gavidia University, El Salvador*, 262-270; doi.org/10.54451/PanamJAS.17.3.262.
- Barraza, J. E., Benítez, M., Pérez Mena, J. M., Chipagua García, L. E., Fuentes, W., & Melara Pérez, V. E. (2013). *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) - Versión 2009-2014*. San Salvador, El Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, E., Vásquez-Cendón, M., . . . Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 30(1) pp.1-10.
- Cornejo Hernández, G. A. (2021). *Disponibilidad Hídrica para el primer ciclo de actualización desde 2012-2013 hasta 2016-2017*. San Salvador, El Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Cornejo, G., & Rivera, C. (2020). *Caudales ambientales de los principales ríos afluentes al Área Natural Protegida Manglar Barra de Santiago*. San Salvador, El Salvador.: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). p. 20.
- Domínguez, J. P., Castillo, J., & Magaña, R. (2018). *Inventario Nacional de Humedales, El Salvador*. San Salvador, El Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) - Biosistemas S.A. de C.V.
- Jiménez, I., Sánchez-Mármol Gil, L., & Herrera, N. (2004). *Inventario Nacional y Diagnóstico de los Humedales de El Salvador*. San Salvador, El Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).
- MARN. (2013). *El ecosistema de Manglar. FORO Avances en la conservación y restauración inclusiva de manglares*. San Salvador, El Salvador.: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- MARN. (2017). *Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en Zonas Prioritarias*. San Salvador, El Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- MARN. (2021). *Determinación de caudales ecológicos en ríos de El Salvador*. San Salvador, El Salvador.: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales .
- MARN. (30 de 09 de 2022). *Sistema de Información Hidrológica*. Obtenido de SIHI: <http://srt.snet.gob.sv/sihi/public/app/2/aptitudes#>

- Mas, F. M. (2005). *Caudales ecológicos: métodos, conceptos e interpretaciones*. España: Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento. CEDEX: Sección de Edición.
- Mazda, Y., & Wolanski, E. (2009). Hydrodynamics and modeling of water flow in mangrove areas. En G. M. Perillo, E. Wolanski, D. R. Cahoon, & M. M. Brinson, *COASTAL WETLANDS. An Integrated Ecosystem Approach* (págs. 231-258). Tokio, Japón: El Sevier.
- MINEC. (1965). *Tercer Censo Nacional de Población 1961*. San Salvador: Ministerio de Economía de El Salvador de El Salvador / Dirección General de Estadística y Censos, p.1-6.
- MINEC. (1974a). *Cuarto Censo Nacional de Población 1971. Volumen 1*. San Salvador: Ministerio de Economía de El Salvador / Dirección General de Estadística y Censos. Cuadros, p. 1-7.
- MINEC. (1992). *Censos Nacionales V de Población y IV de Vivienda. 1992 El Salvador*. San Salvador: Ministerio de Economía de El Salvador / Dirección General de Estadística y Censos. Tomos I-XIV.
- MINEC. (17 de octubre de 2017). *Ministerio de Economía de El Salvador*. Obtenido de Dirección General de Estadística y Censos (DYGESTIC): <http://www.digestyc.gob.sv/index.php/temas/des/poblacion-y-estadisticas-demograficas/censo-de-poblacion-y-vivienda/poblacion-censos.html>
- Molina Lara, O. A., & Esquivel, R. E. (1993). Asociaciones vegetales en el manglar de la Barra de Santiago, Ahuachapán, El Salvador. *Revista de Biología Tropical*, 37-46.
- Palau, A. (2004). MÉTODO QBM (CAUDAL BÁSICO DE MANTENIMIENTO). *Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida*, 1-12.
- Paredes Arquiola, J., Solera Solera, A., Álvarez, J. A., & Lerma Elvira, N. (2014). *Herramienta EvalHid para evaluación de recursos hídricos. Manual Técnico v1.0*. Valencia, España.: Universidad Politécnica de Valencia. Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos. p14.
- SMHI. (2006). *Integrated Hydrological Modelling System featuring HBV*. Sweden: Swedish Meteorological and Hydrological Institute.
- USGS. (2001). *PHABSIM for Windows. User's Manual and Exercises*. U.S. Geological Survey.
- Van Lavieren, H., Spalding, M., Alongi, D. M., Kainuma, M., & Clüsener-Godt, A. Z. (2012). *Securing the future of mangroves. A Policy Brief*. Okinawa, Japan: United Nations University - Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH), UNESCO-MAB with ISME ITTO, FAO, UNEP-WCMC.

ANEXOS

A1. Cuadros

Cuadro 2. Precipitación media mensual interanual (mm) de los principales afluentes al Manglar Barra de Santiago.

Mes	Chino	C_Sucia	Izcanal	Aguachapio	Guayapa	Cuilapa	Naranjo	Rosario
May	210.8	275.0	249.2	217.5	251.6	236.9	245.3	241.3
Jun	396.2	513.7	462.0	402.0	473.5	439.6	458.6	441.6
Jul	321.4	403.4	367.7	318.1	364.7	329.8	350.6	335.6
Ago	370.0	473.7	435.6	388.8	439.6	420.8	430.5	414.7
Sep	436.1	584.2	524.0	453.5	538.2	492.7	519.1	499.3
Oct	303.3	380.0	350.4	310.5	348.7	316.7	334.5	324.3
Nov	63.6	72.6	71.0	68.3	69.7	67.2	68.1	66.3
Dic	5.2	7.4	7.0	6.7	7.0	8.4	7.5	7.8
Ene	1.3	1.8	1.5	2.0	2.6	4.1	3.2	3.4
Feb	2.8	4.1	3.8	3.1	3.5	1.9	2.9	2.8
Mar	11.6	15.0	14.3	13.1	13.7	14.2	13.8	14.3
Abr	44.2	58.8	52.4	44.0	52.5	45.4	49.9	49
Anual	2166.5	2789.7	2538.9	2227.6	2565.3	2377.7	2484	2400.4

Nota: El río El Rosario no es afluente al MBS, sino que es limítrofe, pero se simuló por su cercanía.

Cuadro 3. Temperatura media mensual interanual (°C) de los principales afluentes al Manglar Barra de Santiago.

Mes	Chino	C_Sucia	Izcanal	Aguachapio	Guayapa	Cuilapa	Naranjo	Rosario
May	28.32	27.71	28.10	28.24	26.35	28.35	26.11	26.36
Jun	27.18	26.60	26.96	27.10	25.30	27.24	25.16	25.51
Jul	27.22	26.66	27.01	27.15	25.40	27.29	25.26	25.59
Ago	27.03	26.47	26.82	26.96	25.21	27.10	25.08	25.42
Sep	26.42	25.88	26.22	26.35	24.66	26.49	24.55	24.91
Oct	26.58	26.01	26.37	26.51	24.74	26.64	24.57	24.89
Nov	27.25	26.53	26.98	27.15	24.92	27.27	24.63	24.89
Dic	27.29	26.50	26.99	27.18	24.72	27.28	24.33	24.52
Ene	27.03	26.28	26.75	26.94	24.59	27.02	24.20	24.37
Feb	27.47	26.74	27.20	27.38	25.10	27.47	24.74	24.93
Mar	28.21	27.51	27.95	28.12	25.95	28.21	25.62	25.80
Abr	28.95	28.29	28.70	28.86	26.80	28.94	26.48	26.65
Anual	27.41	26.76	27.17	27.33	25.31	27.44	25.06	25.32

Nota: El río El Rosario no es afluente al MBS, sino que es limítrofe, pero se simuló por su cercanía.

Cuadro 4. Evapotranspiración potencial media mensual interanual (mm) de los principales afluentes al MBS.

Mes	Chino	C_Sucia	Izcanal	Aguachapio	Guayapa	Cuilapa	Naranjo	Rosario
May	169.2	167.8	168.7	169.0	164.8	167.3	160.5	155.5
Jun	153.7	151.5	152.9	153.4	146.7	152.6	143.3	140.6
Jul	163.4	160.8	162.4	163.1	155.1	162.3	151.7	149.3
Ago	163.1	160.6	162.2	162.8	154.9	161.9	151.3	148.4
Sep	146.9	144.4	146.0	146.6	139.0	145.7	135.5	132.7
Oct	142.9	140.6	142.0	142.6	135.4	141.8	132.1	129.5
Nov	131.7	129.4	130.8	131.4	124.0	130.8	121.0	119.0
Dic	132.6	130.2	131.7	132.3	124.7	131.5	121.3	118.8
Ene	137.8	135.6	137.0	137.5	130.9	136.5	127.4	124.4
Feb	143.1	141.5	142.5	142.9	138.0	141.6	134.3	130.5
Mar	172.9	171.8	172.5	172.8	169.3	170.9	164.8	159.2
Abr	172.4	171.7	172.2	172.3	170.1	170.3	165.5	159.5
Anual	1829.7	1805.9	1820.9	1826.7	1752.9	1813.2	1708.7	1667.4

Nota: El río El Rosario no es afluente al MBS, sino que es limítrofe, pero se simuló por su cercanía.

Cuadro 5. Extracción neta de agua (m³/s) por demandas poblacional y agrícola en las principales cuencas afluentes al MBS.

Cuenca	2012-05	2012-06	2012-07	2012-08	2012-09	2012-10	2012-11	2012-12	2013-01	2013-02	2013-03	2013-04
Z.Chino	0.001	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.000	0.054	0.082	0.089	0.094	0.096	0.066
R.C.Sucia	0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.031	0.045	0.044	0.046	0.047	0.033
R.Izcanal	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.022	0.024	0.025	0.026	0.018
R.Aguachapío	0.004	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.005	0.005	0.009	0.013	0.019	0.016
R.Guayapa	0.015	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.009	0.261	0.387	0.416	0.438	0.448	0.313
R.Cuilapa	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
R.Naranjo	0.026	0.009	0.015	0.011	0.001	0.003	0.039	0.040	0.063	0.086	0.121	0.100
R.Rosario	0.026	0.009	0.015	0.011	0.000	0.011	0.109	0.098	0.089	0.111	0.147	0.118
Cuenca	2013-05	2013-06	2013-07	2013-08	2013-09	2013-10	2013-11	2013-12	2014-01	2014-02	2014-03	2014-04
Z.Chino	0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.000	0.057	0.087	0.094	0.099	0.101	0.070
R.C.Sucia	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.006	0.008	0.007	0.007	0.007	0.005
R.Izcanal	0.019	0.007	0.012	0.009	0.001	0.002	0.011	0.004	0.021	0.037	0.063	0.056
R.Aguachapío	0.004	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.001	-0.001	0.003	0.007	0.013	0.011
R.Guayapa	0.019	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.012	0.336	0.499	0.536	0.564	0.577	0.403
R.Cuilapa	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
R.Naranjo	0.026	0.009	0.015	0.011	0.001	0.003	0.032	0.029	0.054	0.076	0.111	0.093
R.Rosario	0.026	0.009	0.015	0.011	0.000	0.006	0.071	0.075	0.078	0.101	0.137	0.111
Cuenca	2014-05	2014-06	2014-07	2014-08	2014-09	2014-10	2014-11	2014-12	2015-01	2015-02	2015-03	2015-04
Z.Chino	0.001	-0.003	-0.002	-0.002	-0.003	0.000	0.054	0.080	0.087	0.091	0.093	0.064
R.C.Sucia	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.021	0.032	0.035	0.036	0.037	0.026
R.Izcanal	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.004	0.004	0.004	0.003
R.Aguachapío	0.004	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.010	0.012	0.017	0.021	0.028	0.022
R.Guayapa	0.028	0.004	0.006	0.004	0.000	0.011	0.310	0.455	0.502	0.536	0.563	0.400
R.Cuilapa	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
R.Naranjo	0.026	0.009	0.015	0.011	0.001	0.004	0.044	0.045	0.066	0.088	0.124	0.102
R.Rosario	0.024	0.009	0.015	0.010	0.000	0.001	0.010	-0.001	0.021	0.041	0.076	0.068
Cuenca	2015-05	2015-06	2015-07	2015-08	2015-09	2015-10	2015-11	2015-12	2016-01	2016-02	2016-03	2016-04
Z.Chino	0.004	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.000	0.057	0.088	0.090	0.091	0.097	0.067
R.C.Sucia	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.009	0.013	0.014	0.014	0.014	0.010
R.Izcanal	0.036	0.014	0.022	0.016	0.002	0.003	0.027	0.017	0.049	0.075	0.127	0.110
R.Aguachapío	0.004	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.012	0.016	0.021	0.025	0.032	0.025
R.Guayapa	0.015	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.009	0.270	0.401	0.432	0.438	0.464	0.324
R.Cuilapa	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
R.Naranjo	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.001	0.024	0.035	0.039	0.040	0.042	0.029
R.Rosario	0.056	0.021	0.034	0.025	0.003	0.009	0.076	0.061	0.089	0.131	0.213	0.183
Cuenca	2016-05	2016-06	2016-07	2016-08	2016-09	2016-10	2016-11	2016-12	2017-01	2017-02	2017-03	2017-04
Z.Chino	0.001	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.001	0.053	0.081	0.088	0.092	0.095	0.065
R.C.Sucia	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.004	0.006	0.007	0.007	0.007	0.005
R.Izcanal	0.018	0.006	0.010	0.008	0.001	0.002	0.018	0.017	0.033	0.047	0.071	0.060
R.Aguachapío	0.006	0.001	0.002	0.001	0.000	0.001	0.034	0.049	0.057	0.064	0.071	0.052
R.Guayapa	0.011	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.007	0.204	0.303	0.328	0.345	0.353	0.246
R.Cuilapa	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
R.Naranjo	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.009	0.014	0.015	0.016	0.017	0.011
R.Rosario	0.069	0.026	0.043	0.032	0.004	0.020	0.144	0.106	0.073	0.127	0.223	0.199
Cuenca	2012-05	2012-06	2012-07	2012-08	2012-09	2012-10	2012-11	2012-12	2013-01	2013-02	2013-03	2013-04
Z.Chino	0.001	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.000	0.054	0.082	0.089	0.094	0.096	0.066
R.C.Sucia	0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.031	0.045	0.044	0.046	0.047	0.033
R.Izcanal	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.022	0.024	0.025	0.026	0.018
R.Aguachapío	0.004	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.005	0.005	0.009	0.013	0.019	0.016
R.Guayapa	0.015	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.009	0.261	0.387	0.416	0.438	0.448	0.313
R.Cuilapa	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
R.Naranjo	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.009	0.014	0.015	0.016	0.017	0.011
R.Rosario	0.069	0.026	0.043	0.032	0.004	0.020	0.144	0.106	0.073	0.127	0.223	0.199

Nota 1: El río El Rosario no es afluente al MBS, sino que es limítrofe, pero se simuló por su cercanía.

Nota 2: Los valores negativos indican que existe importación de agua al sistema superficial de agua.

Cuadro 6. Composición geológica por cuenca hidrográfica afluente al manglar Barra de Santiago. (Valores en Km²).

Tipo de suelo	Zanjón El Chino	Río Cara Sucia	Qda. El Camalote	Río El Izcanal	Río de Faya	Río Agua-chapío	Río Guayapa	Qda. La Bolsa	Río Cuilapa	Qda. El Mango	Río El Naranjo	Zona de manglar	Total
Área de la cuenca (Km ²)	115.53	32.15	5.23	14.73	5.21	15.13	28.46	4.23	22.22	8.19	29.91	71.66	352.67

Cuadro 7. Composición geológica porcentual por cuenca hidrográfica afluente al manglar Barra de Santiago. (Valores en %).

Tipo de suelo	Zanjón El Chino	Río Cara Sucia	Qda. El Camalote	Río El Izcanal	Río de Faya	Río Agua-chapío	Río Guayapa	Qda. La Bolsa	Río Cuilapa	Qda. El Mango	Río El Naranjo	Zona de manglar	Total
Como de deyección	2.40	3.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	1.11
Depósito de estuario con/sin manglares	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.64	20.11	4.22
Depósito sedimentario del Cuaternario	33.73	7.14	18.91	4.50	10.56	2.33	3.59	23.40	15.47	8.70	0.07	60.20	26.41
Efusivas básicas intermedias	2.94	3.20	0.00	2.31	0.00	2.27	4.91	0.00	0.00	0.00	10.37	0.00	2.72
Efusivas básicas-intermedias, pirocláticas volcánicas subordinadas (estratos no diferenciados y edificios volcánicos)	10.08	23.48	0.00	12.05	0.00	12.50	33.11	0.00	0.00	0.00	13.10	0.00	10.27
Epiclastitas volcánicas y piroclásticas, localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas	50.85	63.08	81.09	81.14	89.44	82.90	58.39	76.60	84.53	91.30	73.88	9.32	53.12
Piroclásticas ácidas, epiclastitas volcánicas (tobas color café)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	0.00	0.08
Playa: barra costera con nivel antiguo de costa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.43	0.49
Suelo anmoor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.90	0.59
Sin datos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.86	0.99
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Cuadro 8. Pedología porcentual por cuenca hidrográfica afluente al manglar Barra de Santiago. (Valores en %).

Tipo de suelo	Zanjón El Chino	Río Cara Sucia	Qda. El Camalote	Río El Izcanal	Río de Faya	Río Agua-chapío	Río Guayapa	Qda. La Bolsa	Río Cuilapa	Qda. El Mango	Río El Naranjo	Zona de Manglar	Total
Aluviales	11.40	0.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	3.53	8.27	8.60	0.45	56.89	16.31
Andisoles	6.93	57.01	0.00	19.98	0.00	18.77	55.81	0.00	0.00	0.00	44.34	0.00	17.34
Grumosoles	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.44	5.34	50.08	12.16	38.88	7.51	8.28	6.07
Latosoles arcillo rojizos	81.52	42.03	100.00	80.02	100.00	56.79	38.16	46.39	79.57	52.52	47.70	12.27	55.62
Regosoles y halomórficos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.69	3.82
Sin datos	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.87	0.84
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Cuadro 9. Uso del suelo porcentual por cuenca hidrográfica afluente al manglar Barra de Santiago. (Valores en %).

Tipo de suelo	Zanjón El Chino	Río Cara Sucia	Qda. El Camalote	Río El Izcanal	Río de Faya	Río Agua-chapío	Río Guayapa	Qda. La Bolsa	Río Cuilapa	Qda. El Mango	Río El Naranjo	Zona de manglar	Total
Tejido urbano	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01
Bosque de mangle	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.14	5.14
Bosque siempre verde	13.66	53.04	0.00	27.92	0.00	21.04	52.17	0.00	0.00	0.00	5.36	0.39	16.10
Bosque de galería	4.04	0.01	0.00	5.48	0.33	1.70	2.73	0.00	0.00	0.00	2.13	0.10	2.05
Café	0.65	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	25.06	0.00	2.34
Caña de azúcar	9.98	0.09	6.29	0.00	2.99	0.00	0.00	0.00	3.62	4.69	0.78	25.96	9.12
Cultivos anuales y permanentes	16.26	15.14	34.77	22.50	30.80	14.34	7.43	0.00	0.75	0.00	8.98	1.10	10.85
Granos básicos	29.10	13.20	6.10	16.76	42.31	43.29	16.40	51.22	46.83	74.44	25.65	12.34	25.29
Cuerpo de agua	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.10	0.66
Pastos	5.60	2.26	44.23	5.54	0.00	0.00	1.14	0.00	0.00	7.18	0.40	8.76	5.01
Palmeras Oleíferas	5.68	4.75	8.19	7.74	23.28	18.50	11.96	48.78	43.00	13.69	28.59	13.77	13.68
Plataneras y bananeras	2.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.71	1.59
Playas, dunas y arenales	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.04
Pantano	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80	0.37
Salinera	4.04	5.86	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.55	0.00	3.05	2.18	2.73
Terreno agrícola	8.36	5.64	0.00	14.06	0.29	1.13	8.08	0.00	3.25	0.00	0.00	1.36	5.02
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Cuadro 10. Composición porcentual de cobertura vegetal por cuenca hidrográfica afluente al manglar Barra de Santiago. (Valores en %).

Tipo de suelo	Zanjón El Chino	Río Cara Sucia	Qda. El Camalote	Río El Izcanal	Río de Faya	Río Agua-chapío	Río Guayapa	Qda. La Bolsa	Río Cuilapa	Qda. El Mango	Río El Naranjo	Zona de manglar	Total
Cuerpo de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.52	0.69
Sistema productivo con vegetación leñosa natural o espontánea	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.07	0.80
Vegetación abierta arbustiva predominantemente decidua en época seca	42.86	31.53	12.57	57.46	67.67	40.54	36.35	0.00	39.32	4.04	43.40	0.42	31.74
Vegetación abierta predominantemente decidua con árboles y arbustos de costa o playa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.48
Vegetación cerrada principalmente siempre verde tropical ombrófila submontana	12.55	56.98	0.00	21.24	0.00	13.49	43.83	0.00	0.00	0.00	4.69	0.00	14.82
Vegetación cerrada principalmente siempre verde. Manglar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.71	5.07
Vegetación cerrada principalmente verde riparia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
Vegetación cerrada tropical decidua en estación seca, de tierras bajas	0.00	0.00	0.00	0.00	2.13	8.50	1.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54
Vegetación cerrada tropical ombrófila semidesidua de tierras bajas	1.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.67
Zonas de cultivos forestales y frutales	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.16	0.05
Zonas de cultivos o mezclas de sistemas productivos	41.74	11.49	87.43	21.30	30.20	35.08	15.74	100.00	58.56	95.96	18.45	63.42	41.56
Zonas de cultivos permanentes (cafetales)	0.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.31	0.00	2.12	0.00	33.28	0.00	3.48
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Cuadro 11. Aportaciones de agua dulce (MMC) de los ríos afluentes al MBS.

Año	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Annual	T
70-71	4.50	14.79	17.06	63.79	108.87	69.28	9.13	4.50	3.50	2.47	2.17	1.71	301.8	M
71-72	2.33	10.09	36.28	91.08	115.50	92.40	13.81	5.00	3.74	2.71	2.27	1.76	376.9	H
72-73	2.72	24.68	5.74	18.51	20.68	10.10	8.62	4.28	3.27	2.29	1.99	1.53	104.4	S
73-74	12.98	42.98	91.91	101.07	101.07	117.93	7.47	7.34	3.91	2.75	2.61	2.06	494.1	H
74-75	2.75	52.82	23.94	25.30	117.67	25.85	4.95	3.77	2.90	2.07	1.81	1.39	265.2	M
75-76	1.23	3.30	8.35	47.25	89.20	56.39	11.08	4.31	3.29	2.38	1.99	1.52	230.3	M
76-77	1.33	9.25	13.55	7.80	15.74	27.60	3.90	3.15	2.43	1.73	1.51	1.18	89.2	S
77-78	2.48	54.98	19.24	56.56	34.02	17.29	8.63	4.15	3.17	2.23	1.94	1.59	206.3	M
78-79	1.56	42.57	63.73	35.17	77.55	32.97	4.75	4.09	3.04	2.14	1.86	1.50	270.9	M
79-80	1.63	13.37	22.96	36.82	142.44	30.50	4.66	3.63	2.80	2.06	1.73	1.32	263.9	M
80-81	1.13	22.52	23.50	82.05	124.04	48.31	5.43	3.77	2.90	2.05	1.82	1.43	318.9	M
81-82	1.44	23.66	63.35	57.64	97.63	79.49	7.28	4.14	3.17	2.24	1.97	1.54	343.6	H
82-83	1.89	22.29	12.26	8.50	68.26	32.72	6.37	3.72	2.85	2.01	1.86	1.42	164.2	S
83-84	1.20	3.46	30.35	26.65	62.63	35.39	11.13	5.19	3.75	2.73	2.32	1.79	186.6	M
84-85	2.26	19.01	19.68	25.71	59.03	28.07	8.96	4.23	3.24	2.29	2.00	1.68	176.2	S
85-86	1.83	32.55	58.48	113.90	67.55	34.72	148.05	4.37	3.34	2.35	2.05	1.56	470.8	H
86-87	12.47	51.22	48.80	52.62	52.89	18.71	6.88	4.15	3.18	2.24	2.31	1.68	257.1	M
87-88	1.44	22.54	58.88	55.45	84.24	8.57	3.73	3.59	2.47	1.80	1.51	1.16	245.4	M
88-89	1.30	49.67	72.52	106.06	111.60	30.87	7.99	4.08	3.09	2.17	1.89	1.45	392.7	H
89-90	2.45	26.20	39.38	41.05	163.37	89.70	7.95	4.28	3.27	2.32	2.04	2.00	384.0	H
90-91	13.30	30.19	92.99	48.81	80.94	55.28	5.36	5.03	3.52	2.48	2.15	1.65	341.7	H
91-92	1.51	53.34	16.82	21.85	36.64	42.72	4.47	4.95	2.99	2.16	1.80	1.39	190.6	M
92-93	1.15	2.30	21.05	51.65	39.69	21.71	4.25	3.43	2.55	1.79	1.56	1.29	152.4	S
93-94	1.90	70.65	53.89	42.86	104.19	33.89	5.91	3.87	2.96	2.09	1.83	1.40	325.4	M
94-95	3.36	14.51	28.57	48.17	41.88	63.77	7.00	4.06	3.11	2.19	1.93	1.66	220.2	M
95-96	1.88	8.56	31.16	95.50	94.19	78.39	8.95	4.93	3.48	2.51	2.09	1.80	333.4	H
96-97	3.34	19.95	66.85	52.36	57.34	57.43	7.23	4.54	3.48	2.47	2.17	1.69	278.9	M
97-98	1.50	3.04	3.82	7.23	22.15	33.74	16.82	5.22	3.25	2.28	1.99	1.52	102.6	S
98-99	1.27	8.99	48.91	48.26	60.18	71.62	102.51	4.94	3.70	2.63	2.28	1.73	357.0	H
99-00	1.63	10.53	32.47	76.48	136.13	73.48	5.22	4.02	3.09	2.24	1.87	1.75	348.9	H
00-01	2.11	8.83	5.21	16.63	64.68	54.64	9.42	3.80	2.90	2.04	1.79	1.40	173.4	S
01-02	2.24	9.48	17.61	13.79	45.85	20.12	7.11	4.13	3.14	2.21	1.92	1.46	129.0	S
02-03	1.30	11.22	21.25	32.59	41.84	17.28	12.71	4.19	3.21	2.26	2.00	1.58	151.4	S
03-04	1.37	30.21	62.28	50.94	49.77	52.64	5.57	3.90	2.99	2.18	1.84	1.40	265.1	M
04-05	1.65	7.07	12.90	14.03	22.50	49.67	4.61	3.70	2.84	2.03	1.79	1.38	124.2	S
05-06	1.23	5.54	29.20	60.08	66.07	185.63	5.69	3.82	2.94	2.08	1.85	1.74	365.9	H
06-07	2.23	27.37	47.93	35.67	78.12	113.18	34.69	4.81	3.68	2.59	2.34	1.84	354.4	H
07-08	2.14	5.75	12.23	32.58	41.74	111.29	4.93	3.83	2.93	2.15	1.82	1.46	222.8	M
08-09	1.33	45.91	100.26	105.22	122.81	69.79	4.39	3.49	2.70	1.94	1.71	1.30	460.9	H
09-10	1.22	3.95	17.78	40.74	53.63	29.91	45.41	4.27	3.31	2.45	2.15	2.13	207.0	M
10-11	36.29	129.21	138.45	145.39	206.59	37.43	6.02	3.91	3.60	2.74	2.46	1.92	714.0	H
11-12	1.85	15.82	52.92	90.28	56.81	439.17	6.09	3.99	3.10	2.30	1.94	1.51	675.8	H
12-13	2.10	3.29	10.33	27.30	23.69	38.69	4.64	3.69	2.84	2.02	1.77	1.35	121.7	S
13-14	1.37	12.68	22.33	47.85	48.31	54.44	11.40	4.38	3.37	2.38	2.18	1.68	212.4	M
14-15	1.86	15.57	6.94	15.43	30.69	23.43	7.12	3.72	2.86	2.03	1.78	1.38	112.8	S
15-16	1.18	1.47	2.53	3.49	12.87	30.51	15.50	3.39	2.66	1.98	1.70	1.33	78.6	S
16-17	1.13	5.26	21.87	27.21	33.75	12.09	6.45	4.28	3.37	2.37	2.13	1.62	121.5	S
17-18	1.98	36.47	44.16	37.73	54.10	37.50	4.70	3.73	2.87	2.04	1.81	1.44	228.5	M
18-19	1.89	19.63	7.58	38.03	43.73	82.08	11.30	4.48	3.35	2.37	2.07	1.59	218.1	M
19-20	2.16	5.89	9.40	27.69	36.88	82.22	7.65	4.20	3.24	2.36	1.98	1.54	185.2	S
20-21	6.43	60.36	21.14	49.30	40.29	44.55	20.75	5.24	3.96	2.79	2.42	1.83	259.1	M
Prom	3.27	24.02	35.11	48.20	69.84	58.92	13.62	4.23	3.16	2.26	1.98	1.57	266.2	
D.Est.	5.46	23.30	28.72	31.17	41.01	63.70	24.35	0.67	0.35	0.25	0.24	0.21	135.2	
Máx.	36.29	129.21	138.45	145.39	206.59	439.17	148.05	7.34	3.96	2.79	2.61	2.13	714.0	
Mín.	1.13	1.47	2.53	3.49	12.87	8.57	3.73	3.15	2.43	1.73	1.51	1.16	78.6	

Nota 1: Se considera la afluencia de Zanjón del Chino, los ríos Cara Sucia, Izcanal, de Faya, Aguachapío, Guayapa, Cuilapa, El Naranjo; además de las Qdas. Camalote, La Bolsa y El Mango.

Nota 2: Se consideran 52 años hidrológicos, desde May/1970-Abr/1971 hasta May/2020-Abr/2021.

Nota 3: T = Tipo de año: Húmedo "H" Apo > 328.63 MMC, Seco "S" Apo < 186.05 MMC o Medio "M".

Cuadro 12. Aportaciones de agua dulce total (MMC) de los ríos afluentes al MBS medias mensuales interanuales.

Mes	Aportación total media mensual interanual	Aportación total año hidrológico 2020-2021
May	3.270	6.430
Jun	24.020	60.362
Jul	35.113	21.143
Ago	48.199	49.304
Sep	69.843	40.288
Oct	58.925	44.551
Nov	13.620	20.752
Dic	4.229	5.235
Ene	3.163	3.962
Feb	2.259	2.787
Mar	1.975	2.421
Abr	1.569	1.833
Multianual	266.186	259.069

Cuadro 13. Régimen de caudales naturales en metros cúbicos por segundo (m^3/s) y régimen de caudales ecológicos mínimos en porcentaje (%), aplicado al caudal natural de cada río afluente al MBS.

Mes	Chino	C_Sucia	Izcanal	Aguachapio	Guayapa	Cuilapa	Naranjo	Rosario	Q.Eco
May	0.421	0.163	0.089	0.060	0.178	0.134	0.177	0.424	64.41
Jun	3.199	1.298	0.670	0.426	1.416	0.912	1.346	2.992	51.88
Jul	4.446	1.679	0.876	0.559	2.193	1.366	1.991	4.305	61.58
Ago	5.686	2.144	1.137	0.763	3.178	2.162	2.926	6.424	48.69
Sep	8.339	3.243	1.665	1.128	4.842	3.312	4.417	9.815	59.78
Oct	7.428	2.573	1.389	0.948	3.699	2.628	3.337	7.596	53.52
Nov	1.652	0.545	0.317	0.235	0.919	0.742	0.845	1.962	51.31
Dic	0.527	0.173	0.091	0.070	0.257	0.221	0.240	0.584	61.79
Ene	0.434	0.142	0.075	0.057	0.170	0.146	0.157	0.384	52.78
Feb	0.360	0.118	0.062	0.047	0.122	0.103	0.112	0.274	57.05
Mar	0.300	0.098	0.052	0.039	0.090	0.076	0.083	0.203	59.04
Abr	0.248	0.082	0.043	0.033	0.071	0.061	0.067	0.166	63.90

Nota: El régimen de caudales ecológicos incluido (MARN, 2021) corresponde al Objetivo de Conservación Ambiental Tipo 3 “OCA3”, definido en el Plan Nacional de Gestión Integrada del Recursos Hídrico de El Salvador (MARN, 2017).

A2. Mapas

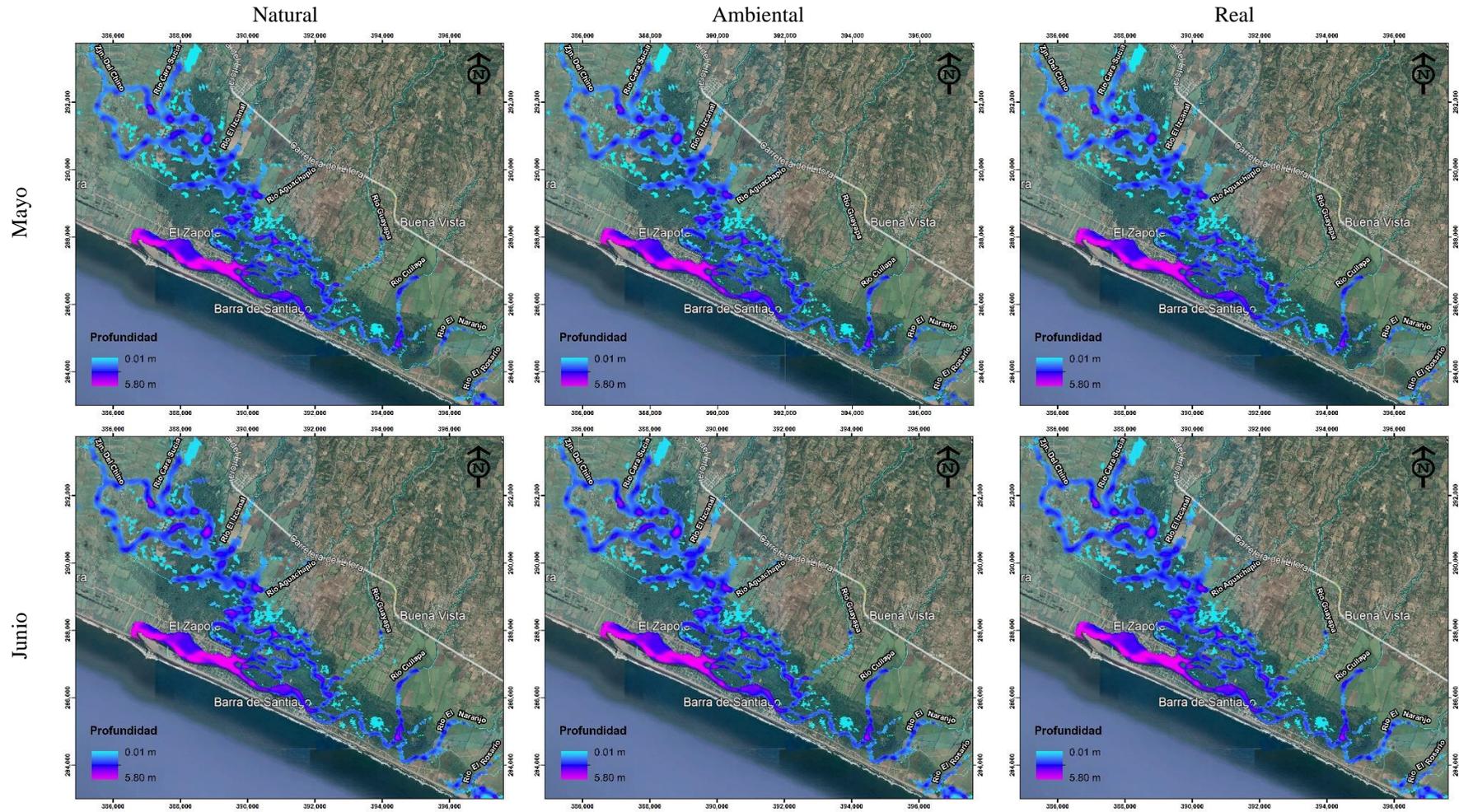


Figura 27. Profundidad promedio mensual de mayo y junio de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.

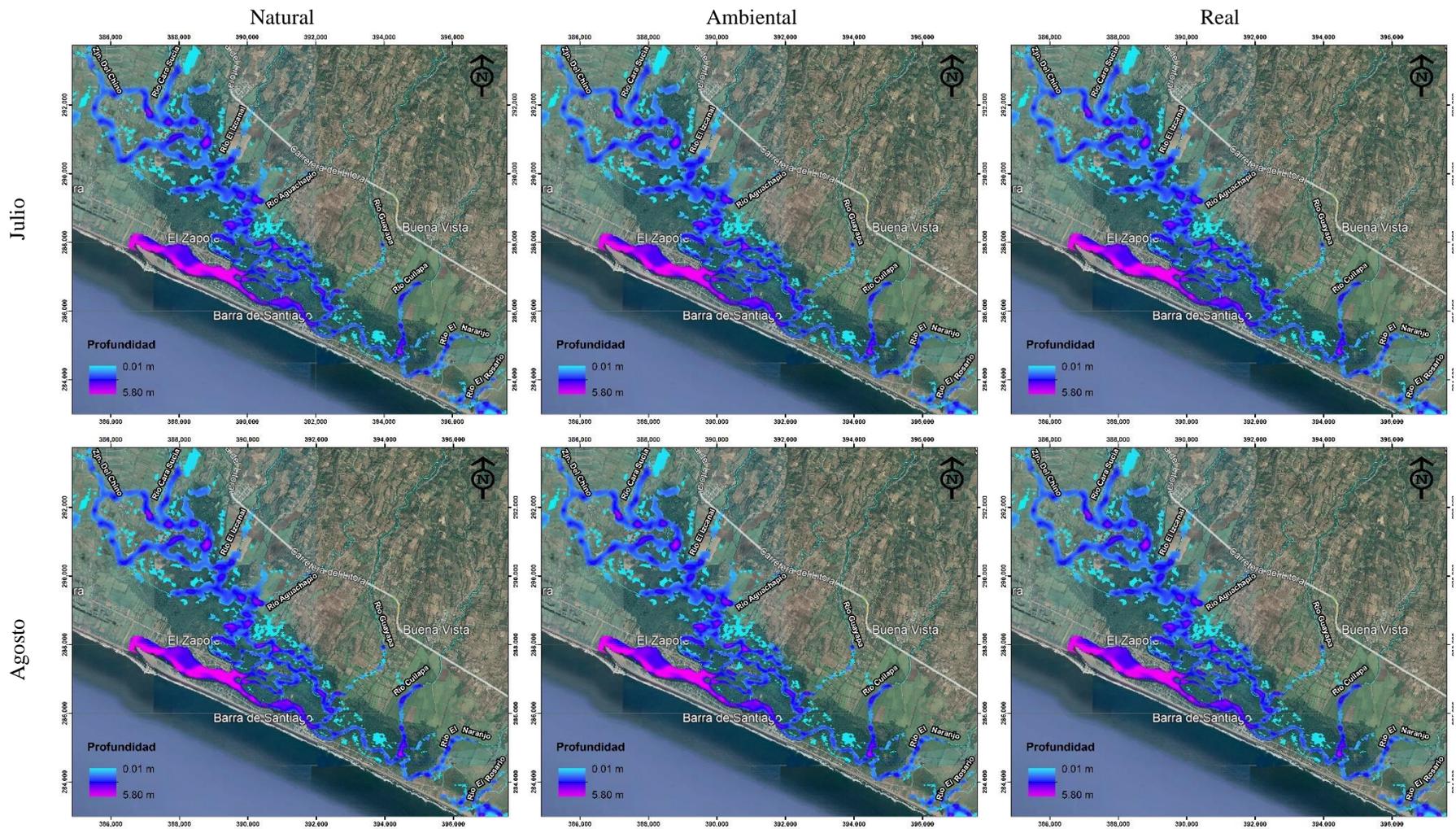


Figura 28. Profundidad promedio mensual de julio y agosto de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.

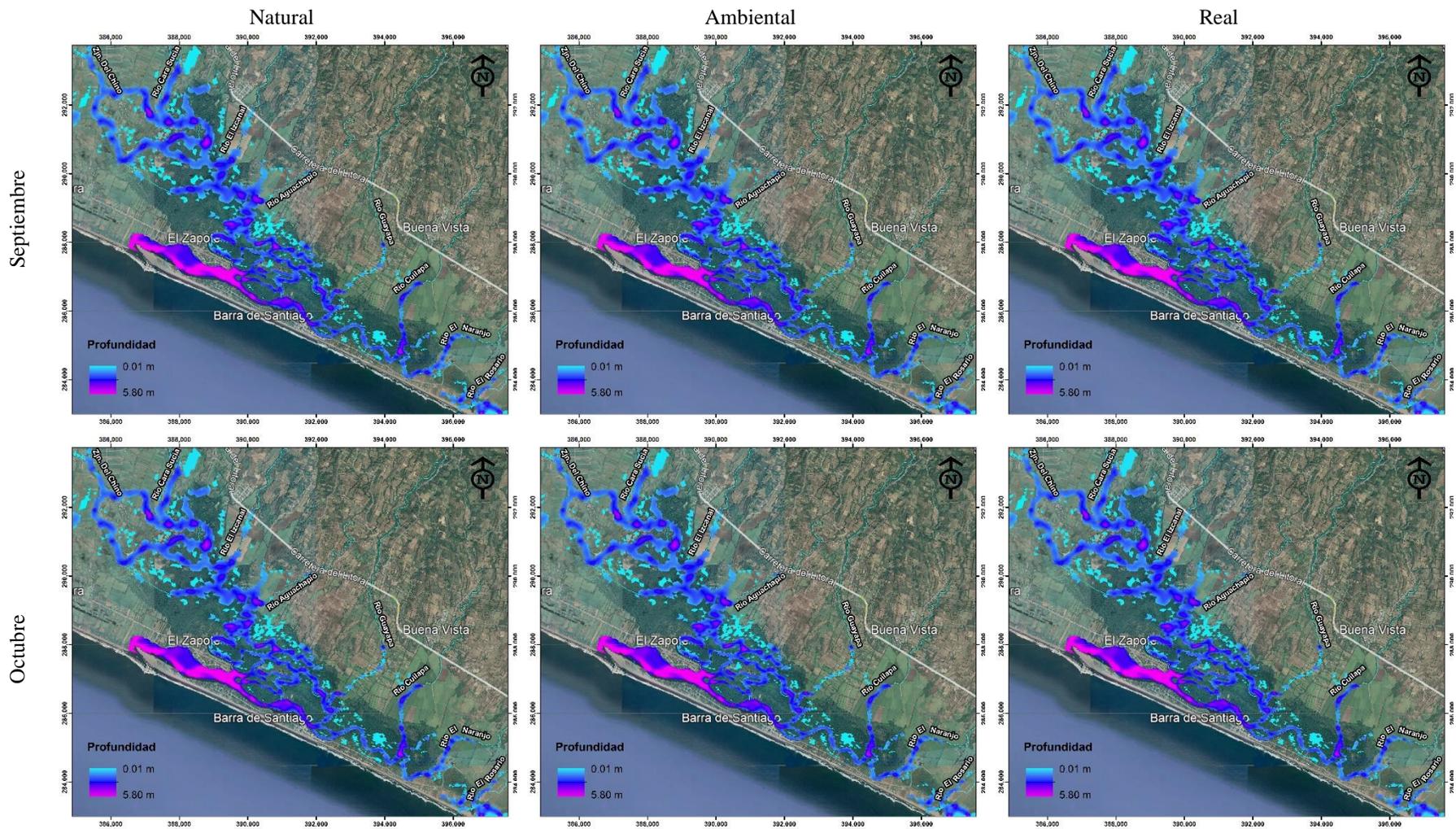


Figura 29. Profundidad promedio mensual de septiembre y octubre de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.

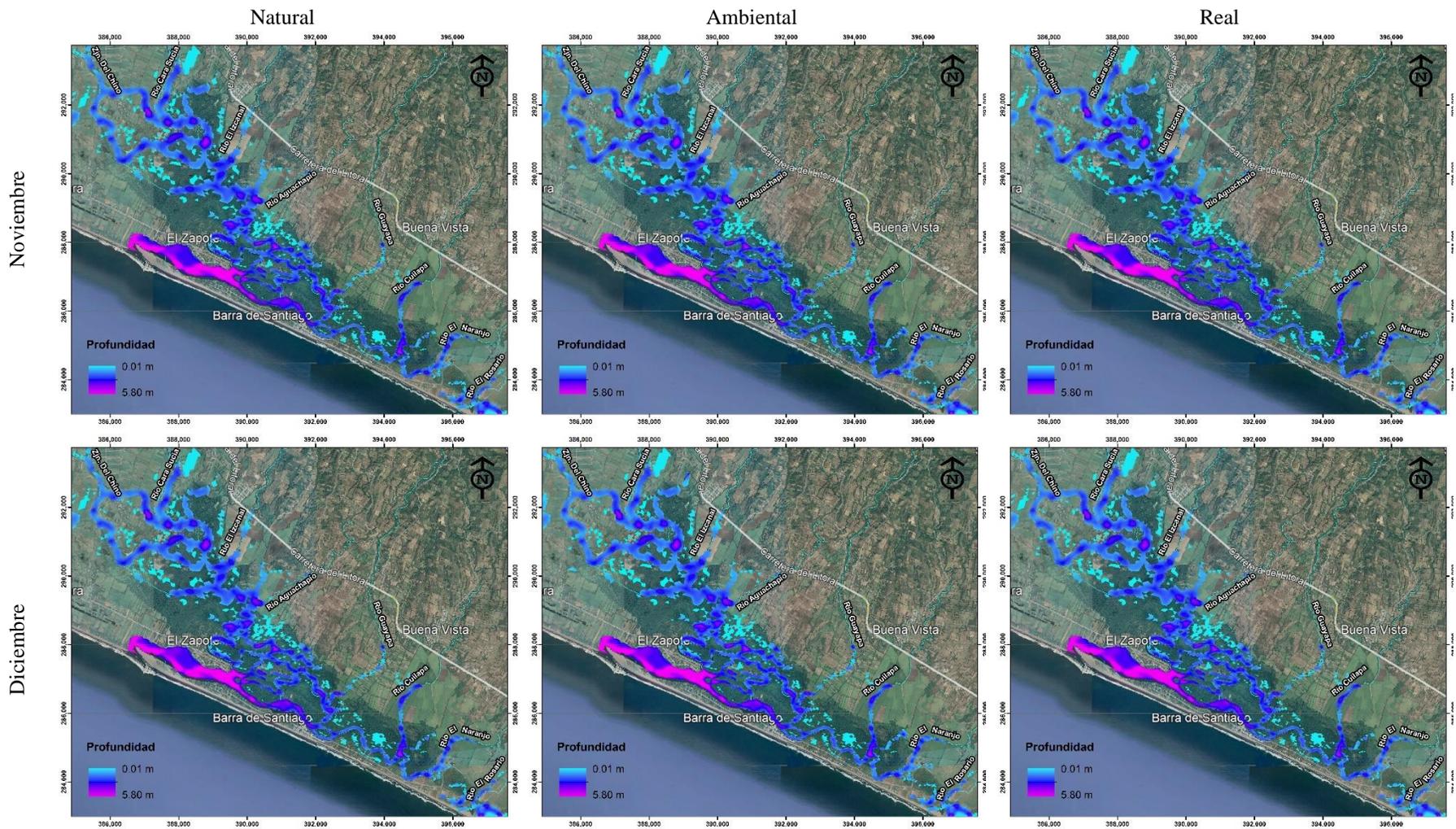


Figura 30. Profundidad promedio mensual de noviembre y diciembre de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.

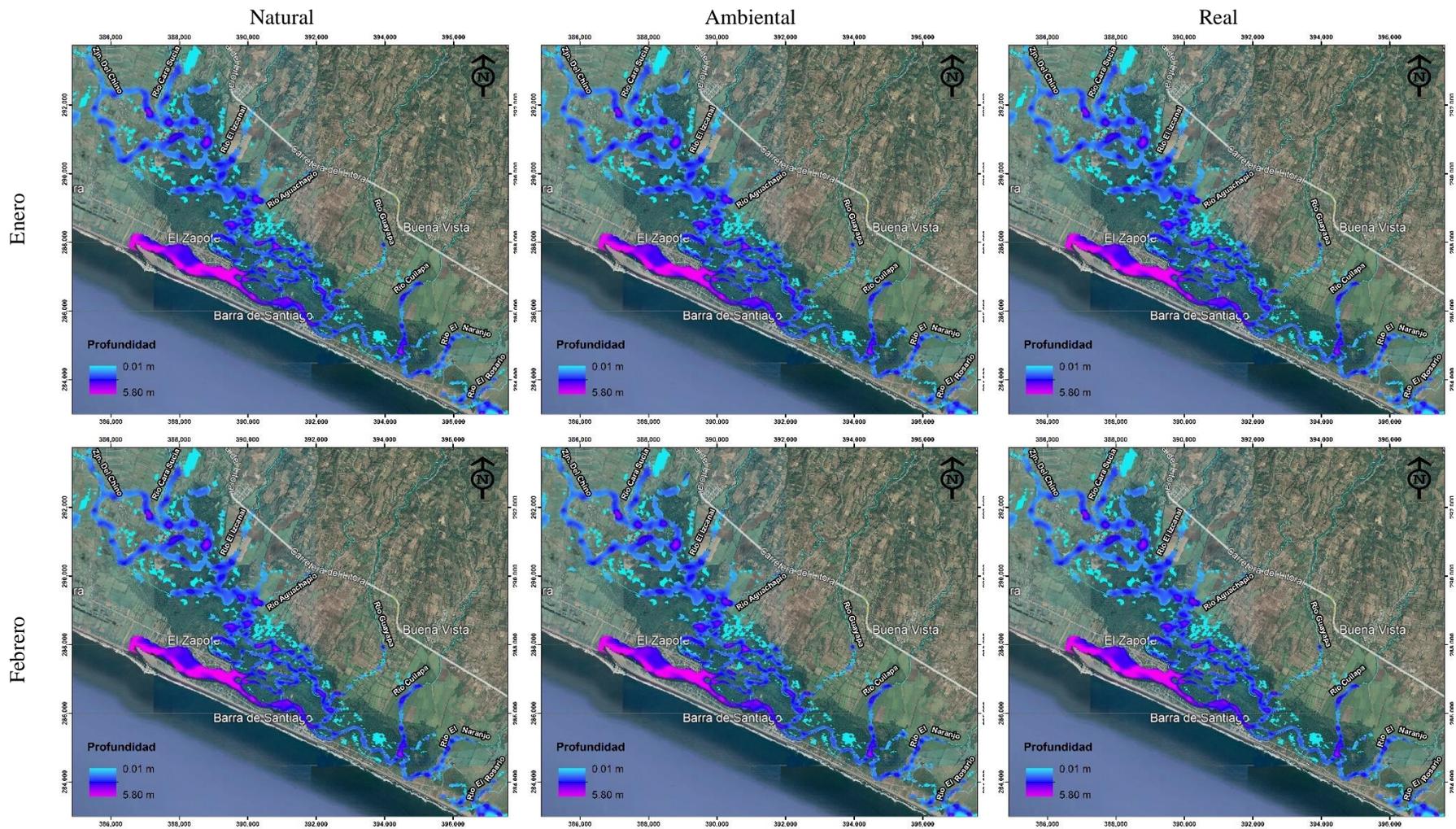


Figura 31. Profundidad promedio mensual de enero y febrero de 2021, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.

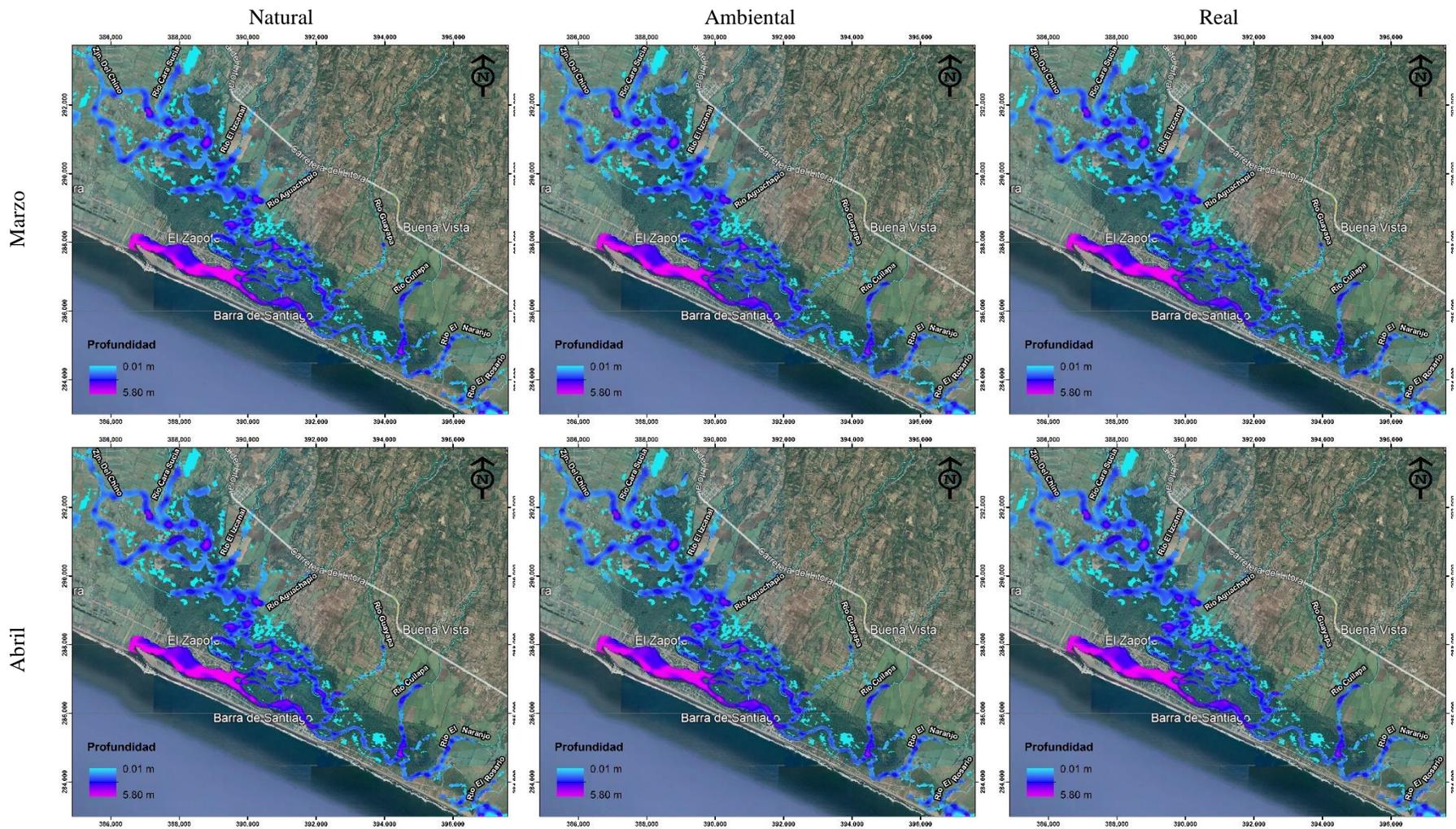


Figura 32. Profundidad promedio mensual de marzo y abril de 2021, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.

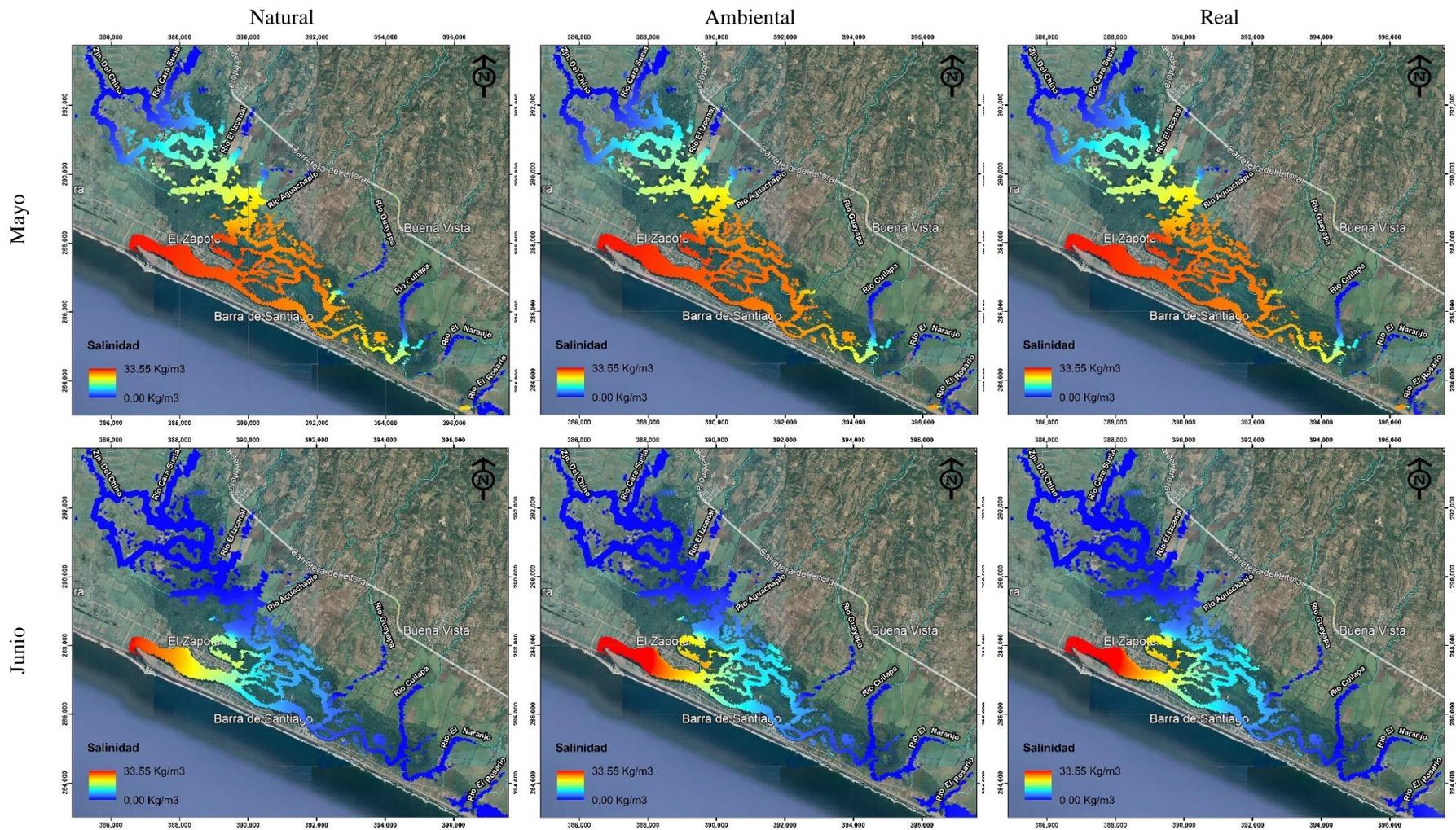


Figura 33. Salinidad promedio mensual de mayo y junio de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. En mayo los escenarios Ambiental y Real tienen mayor salinidad con respecto al escenario Natural, con $+0.63 \text{ Kg/m}^3$ y $+0.89 \text{ Kg/m}^3$ respectivamente. Para junio no se tienen diferencias significativas, pero es notorio el cambio de salinidad en toda la zona de manglar con respecto a mayo a causa de la reducción en salinidad por las crecidas de los ríos.

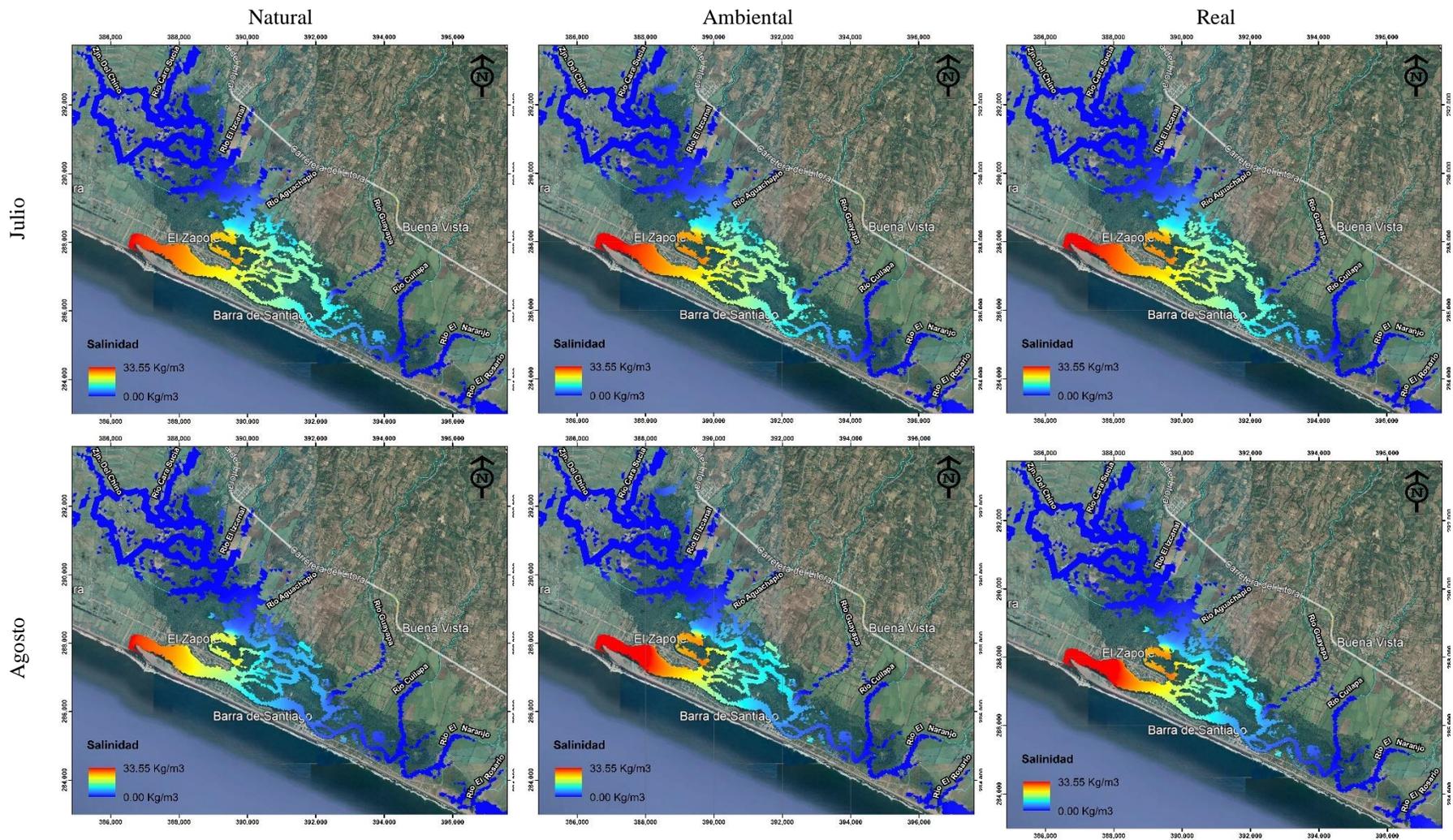


Figura 34. Salinidad promedio mensual de julio y agosto de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.

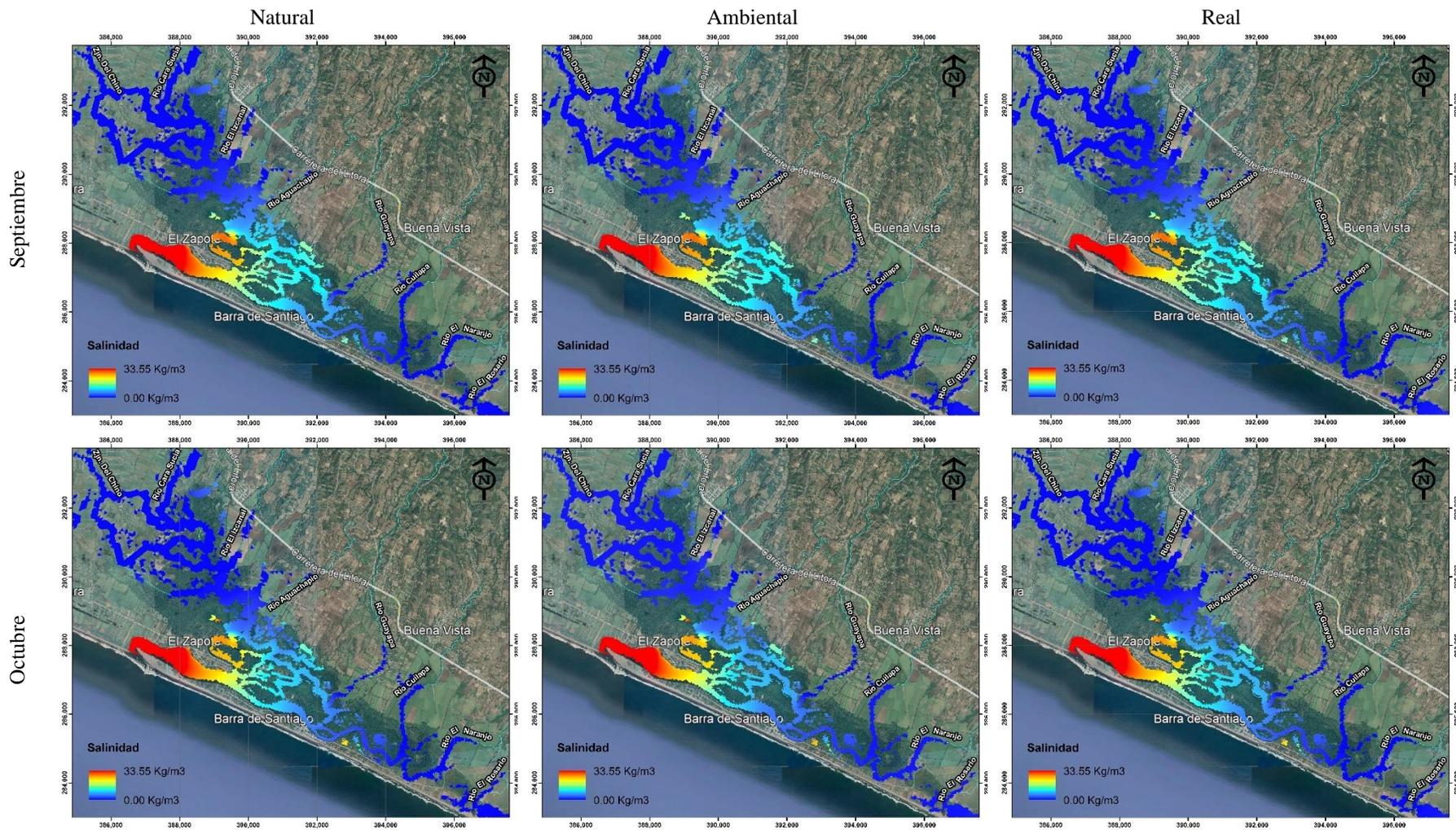


Figura 35. Salinidad promedio mensual de septiembre y octubre de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. No se tienen diferencias significativas entre los tres escenarios para ambos meses.

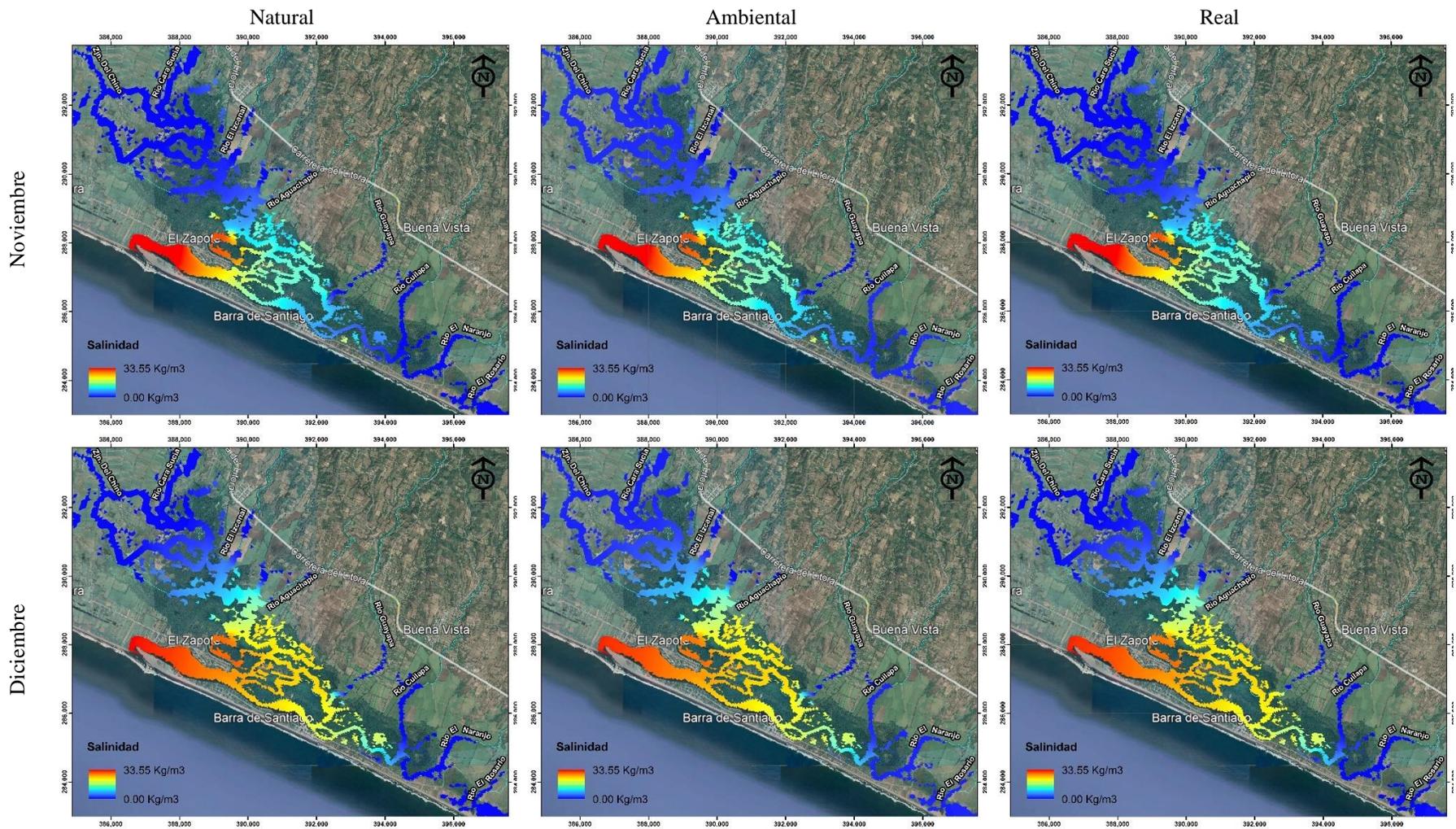


Figura 36. Salinidad promedio mensual de noviembre y diciembre de 2020, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. En noviembre los escenarios Ambiental y Real tienen mayor salinidad con respecto al escenario Natural, con $+0.20 \text{ Kg/m}^3$ y $+0.21 \text{ Kg/m}^3$ respectivamente; mientras que en diciembre dicha diferencia es de $+0.50 \text{ Kg/m}^3$ y $+0.32 \text{ Kg/m}^3$ respectivamente y es notorio el incremento de salinidad en el manglar con respecto a noviembre.

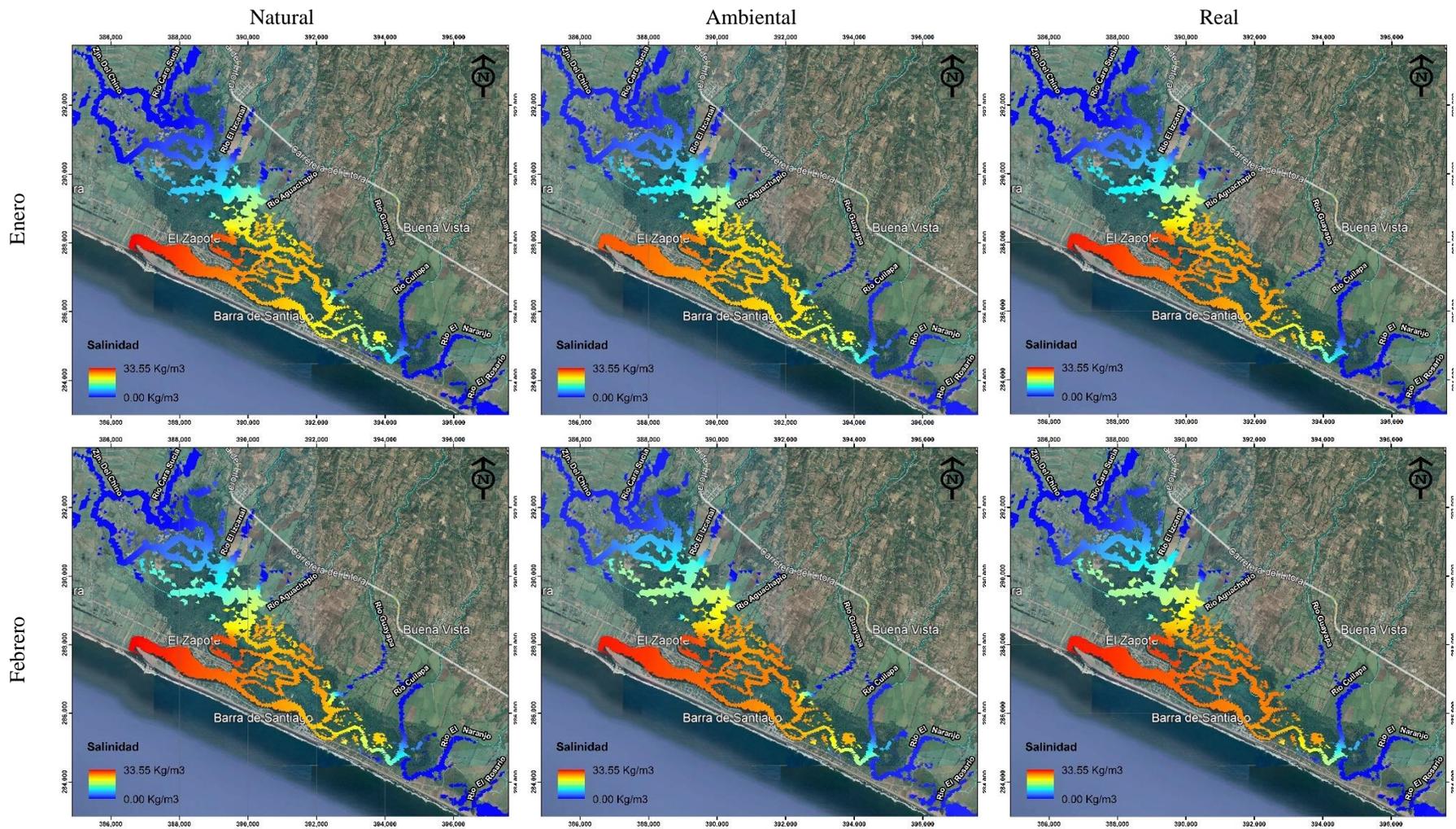


Figura 37. Salinidad promedio mensual de enero y febrero de 2021, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. En enero los escenarios Ambiental y Real tienen mayor salinidad con respecto al escenario Natural, con $+0.98 \text{ Kg/m}^3$ y $+1.36 \text{ Kg/m}^3$ respectivamente; mientras que en febrero dicha diferencia es de $+1.19 \text{ Kg/m}^3$ y $+1.67 \text{ Kg/m}^3$ respectivamente.

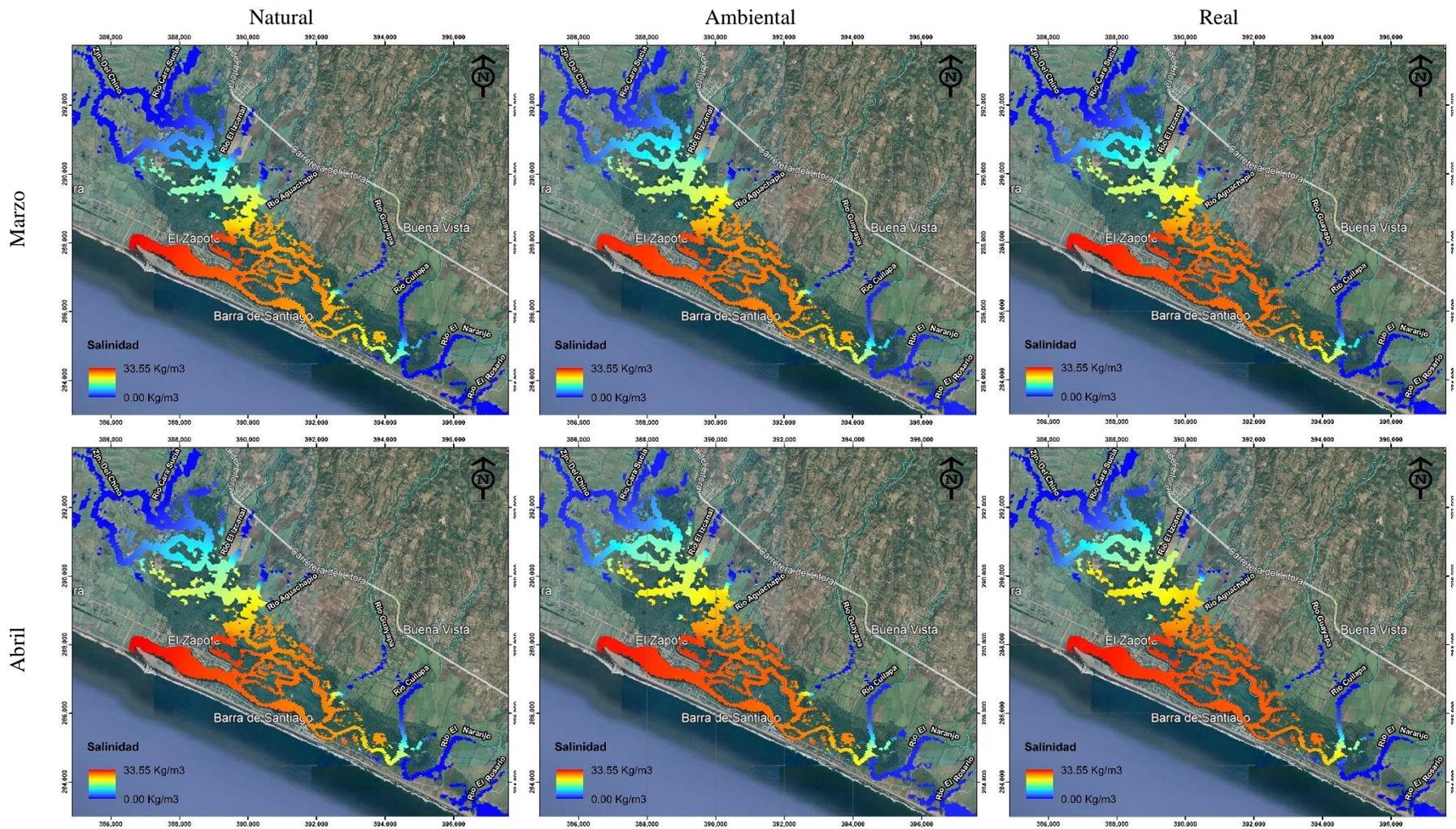


Figura 38. Salinidad promedio mensual de marzo y abril de 2021, de las zonas permanentemente inundadas de cada mes en el Estero Barra de Santiago por escenario Natural, Ambiental y Real. En marzo los escenarios Ambiental y Real tienen mayor salinidad con respecto al escenario Natural, con $+1.35 \text{ Kg/m}^3$ y $+1.99 \text{ Kg/m}^3$ respectivamente; mientras que en abril dicha diferencia es de $+1.32 \text{ Kg/m}^3$ y $+2.00 \text{ Kg/m}^3$ respectivamente.

A3. Instrumentos

- a) Ecosonda para desarrollo de batimetría: deeper pro +



Figura 39. Ecosonda deeper pro +.

- b) Varillas graduadas para validación de datos recabados por la ecosonda.



Figura 40. Varillas graduadas y cinta métrica.