

**EFFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y FACTORES ANTRÓPICOS
SOBRE LA REPRODUCCIÓN DE LOS PECES MIGRADORES DEL RÍO SINÚ
AGUAS ABAJO DE LA HIDROELÉCTRICA URRÁ, CÓRDOBA, COLOMBIA**

Presentado por

Jailer Hernández Muñoz

Luz Estrella López Morales

Director

Prof. Víctor Julio Atencio García, MSc

Codirector

José Gregorio Martínez, Ph.D.

Trabajo de grado para optar al título de
Magíster en Gestión de Cuencas
Hidrográficas

Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad Santo Tomás

Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas

Septiembre de 2026

Nota de aceptación:

Jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

Luz Estrella López Morales

Primeramente, a Dios, por bendecirme con la vida y por darme la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante. A mi esposo, Augusto León, por su amor, su apoyo incondicional y su compañía en cada paso de este camino. A mis hijos, Cristian Camilo y Vanesa, por ser mi mayor orgullo e inspiración. Y a mi amada nieta, Abigail, por llenar mi vida de alegría y darme nuevas razones para seguir adelante. A ustedes, mi familia, que son mi mayor motivación y fortaleza, dedico con todo mi corazón este logro tan anhelado.

Jailer Hernández Muñoz

A mi familia por el apoyo durante este arduo pero lindo proceso, a mis padres Aminadab y Miguel Ángel, y a mis hermanos. Mis más sinceros agradecimientos.

AGRADECIMIENTOS

A la Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas de la Facultad de Ciencia Ambientales de la Universidad Santo Tomás.

A la Empresa Urrá S.A.-E.S.P. por su aporte al desarrollo de esta investigación.

Al Instituto de Investigación Piscícola de la Universidad de Córdoba (CINPIC) por su contribución con la infraestructura, equipos y materiales necesarios para la realización de esta investigación.

Al profesor Víctor Julio Atencio García por su valiosa e incondicional orientación durante la realización de este trabajo.

Al profesor José Gregorio Martínez por su valiosa ayuda en la interpretación de los datos analizados en esta investigación.

A María José Ortiz Roa, a Danilo Andrés Cogollo, a Jaider Alonso Martínez, a Reinaldo Cano Cuello y a todos los colegas del CINPIC por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

RESUMEN

El presente estudio evaluó los efectos de la variabilidad climática y de diversos factores antrópicos sobre la reproducción de los principales peces migradores del río Sinú aguas abajo de la Hidroeléctrica Urrá, durante el periodo 2001–2022. La investigación se enfocó en cuatro especies de importancia ecológica y pesquera: bocachico (*Prochilodus magdalenae*), dorada (*Brycon sinuensis*), bagre blanco (*Sorubim cuspicaudus*) y barbul (*Pimelodus yuma*). La variabilidad climática asociada al fenómeno ENSO (El Niño–Oscilación del Sur), junto con actividades antrópicas como la construcción de hidroeléctricas, la contaminación, la pérdida de conectividad entre el río y las ciénagas y la sobrepesca, ha alterado la dinámica reproductiva de estas especies. La Hidroeléctrica Urrá fragmentó el curso natural del río Sinú, modificando el régimen hidrológico y reduciendo las áreas de migración y desove.

Se analizaron datos de ictioplancton colectados diariamente durante la temporada reproductiva de los peces migradores (abril a septiembre) durante 22 años (2001-2022). También se evaluaron variables ambientales como: temperatura del agua, temperatura ambiente y caudal. Se utilizaron pruebas estadísticas no paramétricas (Shapiro-Wilk, Kruskal-Wallis y Dunn) y el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest. Asimismo, se realizó una caracterización espacial de las zonas de desove mediante ArcGIS y el índice de Herfindahl-Hirschman (HHI). Los resultados sugieren que el caudal fue una de las variables ambientales con mayor influencia sobre la abundancia larval. Los análisis del ENSO evidenciaron efectos del fenómeno climático (6, 12 y 24 meses post-ENSO) que presentaron diferencias significativas en la abundancia larval, especialmente durante eventos de El Niño, y se asociaron con disminuciones de la abundancia larval. Por el contrario, los años de La Niña mostraron mayores abundancias larvarias. Estas

tendencias se observaron en las cuatro especies evaluadas, aunque la dorada fue la que mostró la mayor sensibilidad a las variaciones ambientales.

Los factores antrópicos se analizaron mediante la revisión documental de la pérdida de conectividad lateral entre el río y los humedales, la construcción de vías y diques, la sedimentación en los caños, la expansión agropecuaria y la contaminación por metales pesados y pesticidas, los cuales han reducido la calidad de los hábitats reproductivos. Se identificaron concentraciones de mercurio, arsénico, cadmio y plomo en sedimentos y peces, con posibles efectos sobre la fertilidad, el desarrollo embrionario y la supervivencia larval. Además, la sobrepesca y la captura de individuos juveniles han disminuido las poblaciones reproductoras y comprometido la sostenibilidad pesquera. La caracterización espacial evidenció que la zona de desove se extiende desde la Hidroeléctrica Urrá hasta el sector Gallo Crudo, con aproximadamente 125.2 km aguas abajo. También se observó un desplazamiento de la zona reproductiva hacia sectores con mejores condiciones ambientales y de calidad del agua.

Los resultados del estudio permiten concluir que la reproducción de los peces migradores del río Sinú está determinada por la interacción entre la variabilidad climática y múltiples presiones antrópicas. El fenómeno ENSO influye indirectamente en la abundancia larval mediante cambios en el caudal y en las condiciones hidrológicas, mientras que la fragmentación del río, la contaminación, la pérdida de humedales y la sobrepesca reducen el potencial reproductivo y amenazan la sostenibilidad de las poblaciones migratorias. Este estudio resalta la necesidad de fortalecer las medidas de conservación, restaurar la conectividad ecológica y mejorar el manejo ambiental y pesquero en la cuenca del río Sinú.

Palabras clave: ictioplancton, embalses, ENSO, peces reofílicos, desoves.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
JUSTIFICACIÓN	15
OBJETIVOS	16
OBJETIVO GENERAL	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
ANTECEDENTES	19
MARCO TEÓRICO.....	21
ASPECTOS GENERALES	21
FACTORES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN LA REPRODUCCIÓN DE LOS PECES MIGRADORES	22
Factores próximos o iniciales.....	22
Factores últimos o finales	22
FACTORES ANTRÓPICOS QUE INFLUYEN EN LA REPRODUCCIÓN DE LOS PECES MIGRADORES	23
IMPACTOS GENERADOS POR LA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS CIVILES	27
MATERIALES Y MÉTODOS	32
DISEÑO METODOLÓGICO.....	33
Tipo de estudio.....	33
Análisis estadístico.....	36
RESULTADOS.....	37
FACTORES AMBIENTALES DETERMINANTES EN LA ABUNDANCIA LARVAL DE LOS PECES MIGRATORIOS.....	37
Relación entre caudal y abundancia larval.....	37
Correlación entre las variables ambientales y la abundancia larval de los peces migradores.....	38
Relación entre el fenómeno ENSO y la abundancia larval.	41
Relación entre el ENSO y la abundancia larval por especies	42
FACTORES ANTRÓPICOS DETERMINANTES SOBRE LA ABUNDANCIA LARVAL DE LOS PECES MIGRATORIOS.....	44
Pérdida de la interacción entre el río y las ciénagas o planos inundables	44
Construcción de la vía Montería-Lorica	44
Pérdida de áreas de las ciénagas y de los planos inundables.	45

Represamiento de la ciénaga Betancí.....	47
Agroquímicos.....	49
Hidroeléctrica.....	50
Sobrepesca y pesca ilegal.....	51
CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ESPACIAL DE LA ZONA DE DESOVE	53
Distribución espacial de los desoves.....	53
Sector Urrá – Pasacaballos.....	57
Sector Pasacaballo - El Toro.....	57
Sector El Toro – Carrizola	57
Sector Carrizola	58
Sector Pasacaballos	58
Distribución temporal de los desoves (2001-2022)	60
TENDENCIA MULTIANUAL POR ESPECIE.....	62
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	64
INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA SOBRE LA ABUNDANCIA LARVAL.....	64
FRAGMENTACIÓN Y PÉRDIDA DE CONECTIVIDAD ECOLÓGICA	65
REDUCCIÓN DE CIÉNAGAS Y PLANOS INUNDABLES	66
CONTAMINACIÓN Y SUS EFECTOS SOBRE LA REPRODUCCIÓN DE PECES MIGRADORES	66
METALES PESADOS	67
SOBREPESCA	69
INTERACCIÓN ENTRE FACTORES	69
CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA	70
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de metales pesados y del índice de riesgo ecológico del CCBS.	68
Tabla 2. Área de desove de las principales especies migradoras de la cuenca aguas abajo de la HU periodo 2001 a 2022.....	54
Tabla 3. Comportamiento espacial de la zona de desoves en las tres fases temporales identificadas entre 2001 y 2022.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de sitios de recolección de información. Carrizola (Alto Sinú) y Cotocá Abajo (Bajo Sinú).....	35
Figura 2. Importancia de las variables ambientales en la abundancia larval de las cuatro especies migratorias de importancia en la cuenca baja del río Sinú.....	39
Figura 3. Día del año (pico reproductivo) de cada una de las especies migradoras.....	41
Figura 4. Abundancia larval frente a fenómenos ambientales ENSO.....	43
Figura 5. Pérdida de áreas y de conectividad de las ciénagas. (a) ocupación de ciénagas para la ganadería; (b), vía Lorica-Montería; (c), pesca indiscriminada de peces en época de subienda y (d) construcción de viviendas y diques en la CGBS.....	46
Figura 6. Área de desove de las principales especies migradoras aguas abajo de la Hidroeléctrica Urrá hasta Gallo Crudo, durante el periodo 2001-2022.	53
Figura 7. Principales puntos de desove de las especies migradoras del río Sinú aguas abajo, desde la HU hasta Gallo crudo.	59
Figura 8. Distribución espacial del número de desoves de las cuatro especies migradoras de importancia comercial aguas abajo de la Hidroeléctrica Urrá.	61
Figura 9. Áreas de desove para cuatro peces migradores aguas abajo de la HU desde Urrá hasta Gallo Crudo.	63

INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática se refiere a los cambios en los parámetros hidroclimáticos con relación a su comportamiento promedio en el tiempo, evidenciados a través de las fluctuaciones diurnas de la temperatura y las variaciones interanuales de la precipitación (sequías e inundaciones), todo ello causado por fenómenos como el ENSO (El Niño-Oscilación del Sur), que ejerce una fuerte influencia sobre la hidroclimatología de las regiones Pacífico, Andina y Caribe colombianas (Díaz, 2024). Algunas actividades humanas como la construcción de hidroeléctricas, en este caso particular Urrá, acentuó los efectos de la variabilidad climática en la cuenca, debido a la fragmentación del curso natural del río Sinú en tres sectores: aguas arriba, el embalse y aguas abajo (Atencio-García, 2000), cambió la dinámica de los peces migratorios, provocó la pérdida de áreas de dispersión, maduración y desove aguas arriba (Atencio-García, 2000; Chen et al., 2023).

En este contexto, la gestión de cuencas hidrográficas requiere considerar la dinámica del río Sinú y sus ecosistemas asociados como un solo sistema interconectado, en el que las alteraciones del régimen hidrológico pueden repercutir sobre los procesos ecológicos y reproductivos de todas las especies.

Los impactos ambientales y antropogénicos sobre los recursos naturales provocan alteraciones en las características fisicoquímicas y biológicas de los cuerpos de agua (lóticos y lénticos), así como la sobrepesca, la pérdida de conectividad y la contaminación, que pueden afectar la reproducción de los peces (Valderrama, 2021). La reproducción de los peces está regulada por factores ambientales como la temperatura del agua, el fotoperiodo (horas de luz y oscuridad), la pluviosidad y el nivel de las aguas, que pueden producir cambios cíclicos

relacionados con sucesos vitales y reproductivos, fundamentales para su sobrevivencia (Kerguelén-Durango & Atencio-García, 2015; Biran et al., 2024; González et al., 2024).

Para evaluar la dimensión de estos efectos sobre la reproducción y la dinámica poblacional de las especies de peces migradores, se han realizado varios estudios en la cuenca del río Sinú, entre ellos: la contaminación por pesticidas organoclorados en la ciénaga Grande del bajo Sinú (Lans et al., 2008), la alteración del régimen de caudales caso Urrá I (Vélez, 2009), caracterización de los factores ambientales finales del ciclo reproductivo de los peces migradores del río Sinú (Kerguelén & Atencio, 2015), sobre los indicadores de la calidad del agua del río Sinú (Galeano et al., 2017) y acerca de la variabilidad hidrológica en la cuenca del río Sinú (Díaz 2024). En ese mismo sentido, los ecosistemas dulceacuícolas se ven afectados por fenómenos como el cambio climático, lo que impacta directamente en la seguridad alimentaria presente y futura, todo ello atribuible a la acción humana (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2019). De igual forma, la contaminación provocada por la expansión de la frontera agropecuaria, los procesos erosivos, la sedimentación, la desecación de caños y ríos, el vertimiento de aguas servidas y la infraestructura vial mal planificada también afectan lo ambiental y, por ende, lo social (Defensoría del Pueblo, 2022; Chen et al., 2023).

Por lo tanto, en este estudio se evaluaron los efectos de la variabilidad climática y algunos factores antrópicos como hidroeléctricas, contaminación, pérdida de áreas de desove, pérdida de la conectividad entre el río y las ciénagas, y la sobrepesca sobre la reproducción de las principales especies migradoras del río Sinú (bocachico *Prochilodus magdalenae*, dorada *Brycon sinuensis*, bagre blanco *Sorubim cuspicaudus* y barbul *Pimelodus yuma*).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los peces migradores de la cuenca del río Sinú son fundamentales para el equilibrio ecológico de los ecosistemas acuáticos, para la seguridad alimentaria y económica de las comunidades ribereñas. Especies como el bocachico, la dorada, el bagre blanco y el barbul cumplen funciones ecológicas importantes asociadas al transporte de nutrientes, conectividad entre ecosistemas y sostenimiento de las pesquerías artesanales de la región (Acosta, 2013; Vargas, 2015). Sin embargo, en las últimas décadas, las poblaciones de estos peces han experimentado disminuciones significativas debido a alteraciones ambientales y a actividades antrópicas que afectan sus procesos migratorios y reproductivos. Uno de los principales factores de transformación en la cuenca del río Sinú ha sido la construcción y operación de la Hidroeléctrica Urrá, infraestructura que modificó el régimen hidrológico natural del río, alteró los pulsos de inundación y fragmentó la conectividad longitudinal entre las áreas de migración, desove y crianza (Atencio-García, 2000). Estas modificaciones han alterado la dinámica ecológica del sistema fluvial, reduciendo la disponibilidad de hábitats adecuados para la reproducción de los peces migradores. Además, la regulación artificial de caudales puede alterar señales ambientales fundamentales que inducen el desove y sincronizan los ciclos reproductivos (Chen et al., 2023; Arratíbel, 2022).

A esta problemática se suman otros factores antrópicos presentes en la cuenca, como la pérdida de conectividad entre el río y los humedales, la sedimentación de los caños, la construcción de vías y diques (Van Looy et al., 2022; Farò & Wolter, 2024), la expansión de las actividades agropecuarias y la contaminación derivada de vertimientos domésticos, industriales y mineros. Diversos estudios han reportado la presencia de metales pesados y pesticidas en sedimentos y organismos acuáticos de la región, elementos que pueden generar efectos negativos

sobre la fertilidad, el desarrollo embrionario y la supervivencia de larvas, juveniles y adultos (Vargas & Marrugo, 2019). En ese mismo sentido, la sobrepesca y la captura de individuos en etapas tempranas han reducido las poblaciones reproductoras, comprometiendo la sostenibilidad pesquera y la conservación de todas las especies. Paralelamente, la variabilidad climática asociada al fenómeno ENSO (El Niño–Oscilación del Sur) ha generado alteraciones en variables ambientales clave como el caudal y la temperatura del agua, factores relacionados con la reproducción de los peces migradores. Los eventos de El Niño suelen asociarse con una disminución de las precipitaciones y de los caudales, mientras que La Niña se asocia con un incremento de las lluvias y de los aportes hídricos. Estas fluctuaciones pueden modificar la intensidad de los procesos reproductivos y afectar la abundancia larval de las especies migradoras. A pesar de la importancia ecológica y socioeconómica de estos peces, existe información limitada sobre la interacción entre la variabilidad climática y las presiones antrópicas en la reproducción de las especies migradoras del río Sinú, especialmente aguas abajo de la Hidroeléctrica Urrá. Aunque algunos estudios han documentado efectos hidrológicos y pesqueros asociados a la regulación del río, aún es limitada la comprensión de como las variables ambientales, como el caudal, la temperatura y los eventos ENSO influyen sobre la abundancia larval y la distribución espacial de las zonas de desove (Kerguelén-Durango & Atencio-García, 2015; Šmejkal et al., 2023).

Entonces, surge la necesidad de evaluar de manera integral los efectos de la variabilidad climática y de los factores antrópicos sobre la reproducción de los principales peces migradores del río Sinú, con el fin de comprender las dinámicas que afectan la sostenibilidad de las especies y generar información científica que contribuya al fortalecimiento de estrategias de conservación, restauración ecológica y manejo pesquero en la cuenca.

JUSTIFICACIÓN

La relevancia de esta investigación radica en que los peces migradores del río Sinú constituyen un recurso ecológico, social y económico fundamental para las comunidades ribereñas y para el equilibrio de los ecosistemas acuáticos de la cuenca. Entonces, la disminución de las poblaciones de especies como el bocachico, la dorada, el bagre blanco y el barbul representa una problemática ambiental que compromete tanto la biodiversidad regional como la sostenibilidad de la pesca artesanal (Mojica-Corzo et al., 2012).

El estudio aportará información para comprender cómo la variabilidad climática asociada al fenómeno ENSO y las actividades antrópicas, particularmente la regulación del río por la Hidroeléctrica Urrá, influyen en la reproducción de las especies mencionadas. Asimismo, permitirá establecer la relación entre variables ambientales, como el caudal y la temperatura, y la abundancia larval y la distribución espacial de las zonas de desove (Atencio-García, 2000). Esta información aportará elementos que permitan comprender el comportamiento de los procesos reproductivos frente a las variaciones ambientales de la cuenca del río Sinú, para fortalecer las bases del conocimiento, para su manejo integral. Estos resultados contribuirán al diseño de estrategias de conservación de los peces migradores, la restauración de la conectividad ecológica, el fortalecimiento del manejo pesquero y la gestión hídrica y ambiental de la cuenca del río Sinú. En conjunto, la investigación proporcionará evidencia científica para orientar acciones de conservación y monitoreo a mediano y largo plazo, dirigidas a reducir los impactos ambientales y garantizar la sostenibilidad de las poblaciones de peces migradores, teniendo en cuenta la relación entre los procesos ecológicos analizados y las condiciones ambientales de la cuenca, como una unidad de gestión.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los efectos de la variabilidad climática y de los factores antrópicos en la abundancia larval de las principales especies de peces migradores aguas abajo de la hidroeléctrica Urrá, durante el periodo 2001-2022.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la relación entre el caudal y la abundancia larval de las principales especies de peces migratorios del río Sinú.
- Establecer la relación entre el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y la abundancia larval de peces migratorios en el río Sinú.
- Analizar las variables antrópicas que afectan la reproducción de las principales especies migradoras.
- Caracterizar el área de desove de las principales especies migratorias del río Sinú, mediante el software ArcGIS.

ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación busca generar conocimiento científico sobre los efectos de la variabilidad climática y de las actividades antrópicas en la reproducción de los principales peces migradores del río Sinú, aportando información útil para la gestión ambiental y el manejo sostenible de la cuenca hidrográfica.

Desde el enfoque ambiental, el estudio evaluará la relación entre las variables climáticas e hidrológicas y la abundancia larval, así como los procesos reproductivos de especies de interés pesquero como el bocachico, la dorada, el bagre blanco y el barbul. Asimismo, analizará la influencia del fenómeno ENSO y de las alteraciones hidrológicas sobre la dinámica reproductiva y ecológica del río.

La investigación también aportará evidencia sobre la influencia de factores como la fragmentación del río, la pérdida de conectividad entre el río y los humedales, la contaminación y la sobrepesca en los hábitats reproductivos, proporcionando bases técnicas para orientar estrategias de restauración ecológica y de conservación.

Desde la perspectiva social, los resultados constituirán un insumo para fortalecer el manejo pesquero sostenible y apoyar a las comunidades que dependen de la pesca artesanal. De igual forma, podrán contribuir a los procesos de planificación ambiental, gestión del recurso hídrico y conservación de los ecosistemas asociados a la cuenca del río Sinú.

Finalmente, los resultados generarán una línea base de referencia para futuras investigaciones sobre peces migradores y ecosistemas fluviales tropicales sometidos a la variabilidad climática y a diferentes presiones antrópicas.

HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

La variabilidad climática asociada al ENSO y las alteraciones hidrológicas derivadas de las actividades antrópicas modifican el régimen de caudales y las condiciones ambientales del río Sinú, produciendo cambios en la localización de las áreas de desove y la abundancia espacio-temporal del ictioplancton de los principales peces migratorios del río Sinú.

ANTECEDENTES

Para el desarrollo de esta investigación se consultaron bases de dato como Pubmed, Elsevier y Scopus, hallando elementos concernientes a la variabilidad climática de la zona de desove de las principales especies migratorias del río Sinú, aguas abajo de la hidroeléctrica Urrá, como una problemática de interés, generada por los impactos ocasionados a los peces; como la interrupción de su ruta migratoria, alteraciones en el caudal, en la calidad del recurso hídrico, en la pérdida de espacios de maduración y desove, entre otras afectaciones que se derivan de esta intervención (Atencio-García, 2000).

Chen et al. (2023), en el estudio: *River Damming Impacts on Fish Habitat and Associated Conservation Measures*, señalan que las presas alteran la conectividad fluvial, regímenes hidrológicos y hábitats físicos de los peces, causando declives en poblaciones clave a nivel global. Según los autores, es esencial implementar y evaluar medidas de conservación como pasajes para peces y manejo ecológico para mitigar estos impactos y apoyar la sostenibilidad de recursos pesqueros y ecosistemas acuáticos.

Lans-Ceballos, et al. (2023), en el estudio: *Water quality and heavy metals levels in the Sinú River, a drinking water source in the Colombian Caribbean*, evaluaron la calidad del agua del río Sinú, midiendo metales pesados como zinc, hierro y manganeso durante estaciones seca y lluviosa. Aunque se detectó contaminación por metales, los índices indican que no existe riesgo tóxico para la salud humana en esta fuente de agua potable.

Solano et al. (1986) evaluaron la migración de peces reofílicos antes de la construcción de la Hidroeléctrica Urrá, en el trabajo titulado: *Migración de peces del río Sinú. Informe final*. Evidenciaron desplazamientos reproductivos hacia la parte alta del río Sinú y hacia varias

quebradas tributarias; también encontraron que algunos individuos permanecían en sectores cercanos a Urrá y Tierralta para completar su proceso reproductivo.

Barrera (2021), en el estudio: *Evaluación del impacto socio-económico de la construcción y operatividad del embalse Urrá I en los pescadores de Tierra Alta, Córdoba*, reportaron algunas afectaciones al sector pesquero en el Sinú, manifestadas en una disminución del recurso, debido a la interrupción del ciclo reproductivo de especies migratorias como el bocachico,

Albonis et al. (2025), a través de su estudio *Afectaciones ambientales y dinámicas socioeconómicas en el contexto de la ciénaga grande del Bajo Sinú*, evaluaron cómo los cambios ambientales afectan a las comunidades presentes en la ciénaga de Lorica, desde lo socioeconómico, desincentivando la pesca como actividad principal, conduciéndolas hacia actividades distintas a las culturales.

Estudios realizados en los últimos 22 años por el Instituto de Investigación Piscícola de la Universidad de Córdoba (CINPIC) demuestran que los peces migratorios del río Sinú desovaban aguas arriba de la hidroeléctrica Urrá y, por tanto, con la construcción de esta obra se perdieron importantes áreas de desove; sin embargo, aguas abajo se observa una dinámica reproductiva de los peces migratorios, destacándose como área de desoves tramos del río entre la presa y Tierralta.

Es preciso anotar que existe un vacío de información referente, que permita orientar procesos ambientales regulatorios, para un manejo integral de la cuenca hidrográfica del río Sinú.

MARCO TEÓRICO

ASPECTOS GENERALES

La biomasa desovante de los peces migradores del río Sinú ha disminuido significativamente debido a la construcción de la Hidroeléctrica Urrá y a la interrupción de sus rutas migratorias (Mojica-Corzo et al., 2012). Esta alteración del régimen hidrológico ha afectado la migración y la reproducción de todas estas especies, reduciendo sus poblaciones, generando impactos en la pesca y conflictos locales (Vargas & Sepúlveda, 2015). Estas especies dependen de la conectividad entre el río y los humedales, como la Ciénaga de Betancí y la Ciénaga Grande de Lorica, para su desarrollo larvario. Su periodo reproductivo está sincronizado con la temporada de lluvias y factores como las variaciones de caudal, la nubosidad y la temperatura del agua se consideran estímulos finales del ciclo reproductivo (Kerguelén-Durango & Atencio-García, 2015).

REPRODUCCIÓN DE LOS PECES MIGRATORIOS

La reproducción en los peces está regulada por un sistema neuroendocrino complejo, a través del eje hipotálamo-hipófisis-gónadas (HPG) que incluye diversas hormonas y neuropéptidos, las cuales ayudan a controlar funciones reproductivas como la maduración gonadal, la ovulación y el desove. Estas pueden ser influenciadas por factores ambientales como el fotoperiodo y las variaciones de la temperatura desempeñan un rol importante en la regulación del ciclo reproductivo y en la respuesta de los peces a señales ambientales específicas (Santhakumar, 2024).

FACTORES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN LA REPRODUCCIÓN DE LOS PECES MIGRADORES

Los factores ambientales que controlan el ciclo reproductivo se dividen en: factores próximos o iniciales, que sincronizan la reproducción con el ambiente, y factores últimos o finales, que determinan el momento y el lugar del desove (Kerguelén-Durango & Atencio-García, 2013). Entre los factores ambientales que controlan el ciclo reproductivo se destacan el fotoperiodo, la temperatura y las lluvias.

Factores próximos o iniciales

Los factores próximos, son señales ambientales que sincronizan el ciclo reproductivo, antes del desove, con las estaciones. Estos factores estimulan la maduración gonadal, modulada por señales externas como el fotoperiodo, la temperatura del agua y la disponibilidad de alimento (Kerguelén-Durango & Atencio-García, 2015). El fotoperiodo es la señal más importante, incluso en especies tropicales, porque es constante y confiable, lo que permite anticipar los cambios estacionales (Kerguelén-Durango & Atencio-García, 2013). El eje HPG se pone en marcha con la liberación de la hormona liberadora de la gonadotropina (GnRH), que estimula la secreción de gonadotropinas (LH y FSH), las cuales inducen la gametogénesis, la maduración de ovocitos y espermatozoides y preparan al organismo para el desove. Este nivel de control reproductivo garantiza que el ciclo biológico se ajuste con precisión a las condiciones ambientales percibidas por las especies (Santhakumar, 2024).

Factores últimos o finales

Los factores últimos, también denominados detonantes reproductivos, son los estímulos ambientales inmediatos que inducen el desove. En el río Sinú, el principal es el pulso de inundación, generado por el aumento rápido del caudal durante las lluvias estacionales (abril-

junio y septiembre-noviembre), que conecta el cauce principal con ciénagas y cuerpos de agua laterales (Kerguelen-Durango & Atencio-García, 2015). Estos factores son variables ambientales que determinan la época reproductiva, la disponibilidad de alimento y la temperatura, permitiendo que el desove coincida con condiciones favorables para la supervivencia de huevos y larvas, aunque su efecto depende de cada especie y ecosistema (Kerguelen-Durango & Atencio-García, 2013). Además, estos factores se relacionan con la función adaptativa y evolutiva de la reproducción. El propósito esencial no es sólo lograr la fecundación, sino también asegurar que ocurra en el momento y lugar más propicios para maximizar la supervivencia de larvas y juveniles, garantizando la subsistencia de las especies, la continuidad de las poblaciones y la estabilidad ecológica del ecosistema (Santhakumar, 2024).

FACTORES ANTRÓPICOS QUE INFLUYEN EN LA REPRODUCCIÓN DE LOS PECES MIGRADORES

La construcción de la Hidroeléctrica Urrá fragmentó el río, afectando sus migraciones, reduciendo sus áreas de desove y concentrando los peces en un tramo de 44.5 km entre la represa y el municipio de Tierralta, lo que incrementa su vulnerabilidad ante la sobrepesca, ya que las especies se encuentran más expuestas en espacios reducidos. Otras amenazas incluyen la pesca en áreas de veda, la deforestación y la contaminación orgánica e inorgánica del agua. La combinación de estos factores ha provocado una disminución de la población de las especies migradoras, lo que afecta su potencial reproductivo y su sostenibilidad a largo plazo (Mojica-Corzo et al., 2012).

Alteración al régimen hidrológico.

El río Sinú presenta características particulares, ya que desde su nacimiento atraviesa páramos, selva húmeda, humedales y zonas estuarinas (Ruiz-Guerra & Cifuentes-Sarmiento, 2021). Estos ecosistemas han sufrido cambios naturales y antropogénicos que han acelerado sus procesos de transformación (Camacho, 2020). Entre las principales alteraciones se encuentra el represamiento del río Sinú en Angostura de Urrá, que modificó el régimen natural de caudales, disminuyendo los volúmenes de agua aguas abajo y causando la desecación gradual de las tierras (Díaz, 2024).

La disminución de las lluvias sincroniza el inicio del ciclo reproductivo de los peces, favoreciendo la subienda por el río para desovar (Kerguelen-Durango & Atencio-García, 2015). Por su parte, el aumento del caudal en épocas lluviosas propicia el cierre del ciclo reproductivo conocido como bajanza, en la que, luego del desove, los peces regresan a sus sitios de refugio y alimentación (Atencio-García et al., 2008).

Estudios recientes destacan que el flujo del agua y los cambios asociados a la lluvia son señales ambientales clave para las migraciones y la reproducción de peces y otros organismos acuáticos (Šmejkal et al., 2023). Además, el ciclo biológico de los peces migratorios depende de la conectividad entre el cauce principal y las zonas laterales, como ciénagas y planicies inundables, ya que estos ambientes proporcionan espacios de reproducción, crianza y refugio, fundamentales para la conservación de poblaciones saludables de peces migratorios (Van Looy et al., 2022; Sousa et al., 2023).

Alteración del clima

Existe evidencia científica de que el cambio climático puede alterar la disponibilidad de los recursos pesqueros y afectar a las comunidades vulnerables debido al manejo inadecuado de

dichos recursos (FAO, 2024). Entre los principales detonantes se encuentran fenómenos macroclimáticos como el ENSO (El Niño Oscilación del Sur), que afecta la hidroclimatología de las regiones Andina, Pacífico y Caribe, así como las hidroeléctricas son, consideradas factores de alteración climática (Mittal et al., 2016).

En la cuenca media y baja del río Sinú, las actividades agrícolas y ganaderas han reducido la vegetación natural y provocado la desecación de humedales, aumentando la temperatura y la evapotranspiración, lo que podría indicar un calentamiento local asociado a cambios en el uso del suelo (Díaz, 2022). Estas actividades también han generado impactos en el medio biótico, como la disminución de peces migratorios, la alteración del régimen de caudales y la disminución del transporte de sedimentos (Mejía, 2019). Además, el cambio de cobertura del suelo, la infraestructura hidráulica y las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de actividades antrópicas son causas frecuentes de la degradación de los humedales y de la alteración de los patrones hidrológicos y climáticos de los ecosistemas acuáticos (IDEAM, s. f.; Patiño, 2016).

Alteración a la ictiofauna

La ictiofauna del río Sinú comprende aproximadamente 130 especies de peces, distribuidas en cerca de 12 órdenes y más de 30 familias (DoNascimento et al., 2017) y alrededor del 10% corresponde a especies migratorias, cuyo ciclo de vida depende de estas migraciones y de condiciones ambientales específicas para su supervivencia. Sin embargo, la construcción de presas y obras hidráulicas ha generado fragmentación de hábitats, bloqueo de rutas migratorias y disminución de las poblaciones de peces, además de alteraciones del caudal y del ciclo hidrológico (Kerguelén-Durango & Atencio-García, 2013).

Estas especies migratorias son fundamentales para la pesca regional, especialmente en Lórica, donde representan una fuente de ingresos y seguridad alimentaria. Entre 2006 y 2009, especies como bocachico, moncholo y yalúa fueron importantes en las capturas, aunque el bocachico presentó una disminución significativa (Banco de la República – CCI, 2025). Asimismo, ecosistemas como la Ciénaga Grande de Lórica y la ciénaga de Betancí han sido afectados por actividades humanas, lo que ha reducido la diversidad y abundancia de peces y puesto en riesgo especies de gran valor económico y ecológico (Acosta, 2013; Salas, 2019).

Alteración a la zona de desoves

La primera obra que afectó las zonas de desove de los peces migradores fue la desviación del río a la altura de Angostura de Urrá en 1996, lo que interrumpió su migración y provocó una disminución de las capturas de las comunidades pesqueras aguas abajo (Atencio, 2000). Además, provocó alteraciones en los ecosistemas, afectando la biodiversidad y el equilibrio ecológico del río Sinú (Clavijo-Bernal, 2021).

Alteración por contaminación

Algunos de los principales problemas que afectan la cuenca, obedecen a actividades humanas como vertimientos de aguas domésticas, la ganadería, la minería de arena y grava, la presencia de basuras y animales muertos en el cauce del río, afectando la calidad del agua y por ende, la salud ecológica del río (Galeano et al., 2017), junto con las dinámicas socioeconómicas tradicionales, y la falta de mecanismos para una regulación eficaz, que permita la reducción de la contaminación y recuperar la calidad del agua del río Sinú (Clavijo-Bernal, 2021).

En Colombia, la presencia de metales pesados, como el mercurio, en los cuerpos de agua se debe al aporte proveniente de la extracción de oro (Vargas & Marrugo, 2019). En Colombia, alrededor del 50% del Hg utilizado en la minería se pierde por malas prácticas, llegando a emitir hasta 150 toneladas/año de mercurio, posicionando al país como el mayor contaminante del mundo (Cordy et al., 2011). Estos metales pueden alterar el sistema endocrino y reducir la fertilidad en peces nativos de la cuenca del río Magdalena (Instituto Nacional de Salud, 2017).

Entonces, la contaminación y la degradación del hábitat acuático representan una grave amenaza para la reproducción de los peces. En la región de La Mojana (Bolívar), se han encontrado concentraciones significativas de metilmercurio (MeHg) en especies como el bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*), la pacora (*Plagioscion surinamensis*) y moncholo (*Hoplias malabaricus*), que registraron concentraciones de 0,39 µg/g; 0,38 µg/g y 0,35 µg/g respectivamente, confirmando la presencia de metilmercurio (MeHg) en la ictiofauna, lo que constituye un riesgo para la salud humana (Baleta-Anaya et al., 2022). Por otro lado, la descarga de aguas residuales no tratadas, ricas en compuestos orgánicos e inorgánicos, disminuye la calidad del agua, lo que afecta la reproducción y el desarrollo larval de especies de peces de importancia ecológica (Mojica et al., 2021).

IMPACTOS GENERADOS POR LA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS CIVILES

La diversidad de peces en la cuenca del río Sinú ha sido afectada por intervenciones humanas que han alterado el hábitat acuático y los procesos ecológicos naturales. Entre los principales factores se encuentra la Hidroeléctrica Urrá, cuyo represamiento fragmentó el curso del río, restringió las migraciones y desoves de especies migratorias y modificó el régimen de caudales, así como los pulsos naturales de inundación y sequía (Arantes et al., 2019).

Asimismo, obras como la carretera Montería–Lorica y el dique en el caño de la Ciénaga de Betancí han contribuido a la degradación y fragmentación de hábitats acuáticos, reduciendo áreas de inundación y corredores de desplazamiento de peces. Estas presiones, junto con el uso del suelo y la contaminación del agua, han disminuido la abundancia y la diversidad de especies ícticas (Martínez-Acosta et al., 2020). Estudios como el de Acosta (2013) y otras investigaciones recientes coinciden en que la fragmentación de los ríos por presas y obras de ingeniería altera los ciclos de vida de los peces migratorios y reduce la riqueza de especies.

Impactos de la Hidroeléctrica Urrá

La construcción de la Hidroeléctrica Urrá en el río Sinú fragmentó las rutas de los peces migratorios, limitando su acceso a zonas esenciales para el desove y la maduración gonadal, afectando su ciclo reproductivo (Mahecha-Jiménez et al., 2011). De igual manera, se ha alterado la dinámica reproductiva de las especies migratorias que quedaron aguas arriba del embalse; sin embargo, estudios recientes han evidenciado que el barbul ha completado su ciclo reproductivo, aguas arriba del embalse (Díaz, 2024).

Una de las especies más afectadas por la construcción de la hidroeléctrica es el rubio *Salminus affinis*, cuyas zonas de desove se encontraban en el área embalsada (Mojica et al., 2021). En esta especie, la reproducción también se activa durante la temporada de lluvias, pero su franja térmica se sitúa entre 24°C y 28°C (Jiménez-Segura & Palacio, 2020). Otro de los problemas que trajo consigo la construcción y operación de la Hidroeléctrica URRÁ a partir del año 2000 fue la afectación directa a las comunidades ribereñas, pues el río y la ciénaga representan más que un medio de producción: constituyen una forma de vida, principalmente para pescadores, que se transmite de generación en generación como una herramienta para

enfrentarse al mundo. El hecho de alterar el ciclo reproductivo de las especies de peces migradores ha llevado a muchos pescadores a buscar trabajos alternos, perdiendo así parte de su idiosincrasia (Barrera, 2017).

Impactos de la construcción del dique en la ciénaga Betancí

La dinámica natural de la ciénaga de Betancí se vio afectada desde la construcción, en 2001, de un terraplén conocido localmente como “la tapa”. Esta estructura interrumpió la conexión lateral entre la ciénaga y el río Sinú. Actualmente, el intercambio hídrico solo ocurre cuando el nivel del agua supera la altura del dique durante la temporada de lluvias, lo que permite, únicamente en esos momentos, la salida de los peces migratorios (subienda) y la entrada de las larvas y de los adultos desovados para continuar con su desarrollo y recuperación. Debido a esta desconexión, la ciénaga ha dejado de comportarse como un humedal natural con ciclos regulares de inundación y sequía y ha pasado a funcionar como un simple reservorio. Esta alteración ha generado múltiples problemas; entre ellos, la entrada de agua solo ocurre por lluvias y afluentes, mientras que las pérdidas se producen por evaporación e infiltración y que el bloqueo del flujo bidireccional impide la salida de sedimentos, lo que conlleva a su acumulación, afectando procesos ecológicos clave como el reciclaje de nutrientes, la descomposición de materia orgánica y la productividad del ecosistema (Cárdenas, 2020; Díaz, 2022; González, 2024).

Impactos de la construcción de la vía Montería-Lorica

La construcción de la carretera Montería–Lorica, ubicada en la parte occidental del Complejo de Ciénagas del Bajo Sinú (CCBS), ha generado efectos significativos en la dinámica hídrica del río y en su plano inundable, ya que el terraplén actúa como barrera entre el río Sinú y

la ciénaga. Esta vía atraviesa municipios como Montería, Cereté, San Pelayo, Cotorra y Lorica y, con ello, ha ocasionado la interrupción del flujo natural de agua entre el río y los sistemas de caños y ciénagas, al funcionar como un terraplén que impide el paso fluido del agua hacia los planos inundables. Como resultado de esta obstrucción, las áreas que antes se beneficiaban de las crecidas del río han quedado aisladas, lo que ha alterado el ciclo hidrológico del CCBS. Esta pérdida de conectividad ha contribuido a la desecación progresiva de los humedales, lo que ha afectado gravemente la estabilidad ecológica del bajo Sinú. Además, dicha transformación del paisaje hídrico ha limitado el acceso de las comunidades locales a los recursos naturales, afectando sus prácticas agrícolas y de pesca, que dependen del régimen natural de inundaciones (Vargas, 2015; Mejía et al., 2018).

Además, investigaciones recientes han destacado que la expansión de la infraestructura vial en la región ha intensificado la presión sobre los ecosistemas acuáticos, lo que ha agravado los procesos de sedimentación y alterado la morfología fluvial del río Sinú (Barrera, 2017). Asimismo, estudios sobre el agua en la cuenca del Sinú han señalado que estas modificaciones en la dinámica hídrica afectan no solo al medio ambiente, sino también a las actividades económicas tradicionales, como la pesca y la agricultura, que son fundamentales para las comunidades locales (Acosta, 2013).

Pérdida de área de las ciénagas

La pérdida de conectividad, la ganadería, el aumento de temperaturas y la expansión urbana comenzaron a provocar la pérdida de áreas en las ciénagas (Lorduy & Vellojín, 2023), y la construcción de la represa de Urrá agravó la pérdida de área de los humedales. En 2020, se evidenció una disminución drástica de la fauna y la flora acuáticas debido a la desconexión hídrica y la ocupación del territorio por actividades agropecuarias (Vargas, 2015). Esta reducción

progresiva del área de las ciénagas ha tenido efectos significativos sobre los procesos ecológicos que sustentan la reproducción de numerosas especies de peces, relacionada directamente con múltiples intervenciones humanas, como la construcción de la hidroeléctrica Urrá en la parte alta del río, la construcción de vías como la carretera Montería–Lorica, que han alterado gravemente la dinámica natural de inundación en el sistema de ciénagas (Acosta, 2013; Vargas, 2015).

Sobrepesca

La sobrepesca y la alteración del hábitat de los peces migradores han provocado una reducción significativa de sus poblaciones, especialmente en las cuencas Sinú y Magdalena, donde la regulación del caudal y la construcción de embalses han afectado su reproducción y migración. La presión pesquera sobre especies como el bocachico, combinada con prácticas destructivas como el taponamiento de ciénagas y la pesca con trasmallos y explosivos, ha reducido drásticamente sus poblaciones (Mojica-Corzo et al., 2012). La sobrepesca del rubio ha afectado la dinámica poblacional, reduciendo el número de individuos reproductores y generando cambios genéticos que pueden comprometer la reproducción a largo plazo (Mojica et al., 2021). Además, debido a la sobrepesca de otras especies de importancia comercial, como la liseta y la dorada, se ha reducido el esfuerzo pesquero, especialmente en épocas de migración previas a la reproducción (Acosta, 2013).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El río Sinú nace en el municipio de Ituango, Antioquia, en el Nudo de Paramillo, y desemboca en Bocas de Tinajones, en el mar Caribe, recorriendo 415 km. A 267 km de su desembocadura, en Angostura de Urrá se construyó la hidroeléctrica, cuya infraestructura modificó la dinámica hidrológica y ecológica del río, especialmente aguas abajo. Entre Angostura de Urrá y Tierralta se encuentra una zona de especial importancia ecológica, reconocida como área de desove de peces migradores del río Sinú (Atencio-García et al., 2000). En los tramos medio y bajo del río se localizan complejos de humedales de importancia, como la Ciénaga de Betancí, la Ciénaga Grande de Lorica, El Ostional y La Coroza, que son claves para la regulación hidrológica y la productividad biológica del sistema (figura 1).

La temperatura del agua presenta variaciones a lo largo de la cuenca, con promedios de 27,4 °C en Tierralta y de 32,2 °C en Lorica, lo que refleja un gradiente térmico asociado a las condiciones climáticas y geomorfológicas (Atencio-García et al., 2011). Asimismo, el régimen de lluvias presenta un comportamiento bimodal, con períodos húmedos de abril a junio y de agosto a octubre, alternados con fases de menor precipitación características de la cuenca del río Sinú.

DISEÑO METODOLÓGICO

Tipo de estudio

La presente investigación tiene un enfoque cualitativo y cuantitativo, con el fin de analizar variables ambientales y su relación con el comportamiento reproductivo de los peces migratorios, en términos de abundancia larval, aguas abajo de la Hidroeléctrica Urrá, así como las afectaciones que los cambios antrópicos pueden producir en el ciclo reproductivo de estas especies. Se analizaron datos de densidad y abundancia ictioplanctónicas, colectados diariamente durante la mayor parte del periodo reproductivo de los peces migradores, de abril a septiembre, entre 2001 y 2022.

La información utilizada en el presente estudio fue generada en el marco del convenio entre la Universidad de Córdoba y la Empresa Urrá S.A. E.S.P., La base de datos incluyó registros diarios de abundancia larval obtenidos en la estación Cotocá Abajo (Lorica, Córdoba); así como datos de temperatura del agua, temperatura ambiente y caudales registrados en la estación Carrizola (Tierralta, Córdoba) durante el período 2001-2022. El muestreo se realizó anualmente entre los meses de abril y septiembre, ajustando su inicio de acuerdo con la ocurrencia de las primeras lluvias en la zona de desove. La estación Carrizola se considera un sitio estratégico para el seguimiento de la reproducción de los peces migradores del río Sinú. De manera complementaria, los registros faltantes de temperatura y caudal se obtuvieron de la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

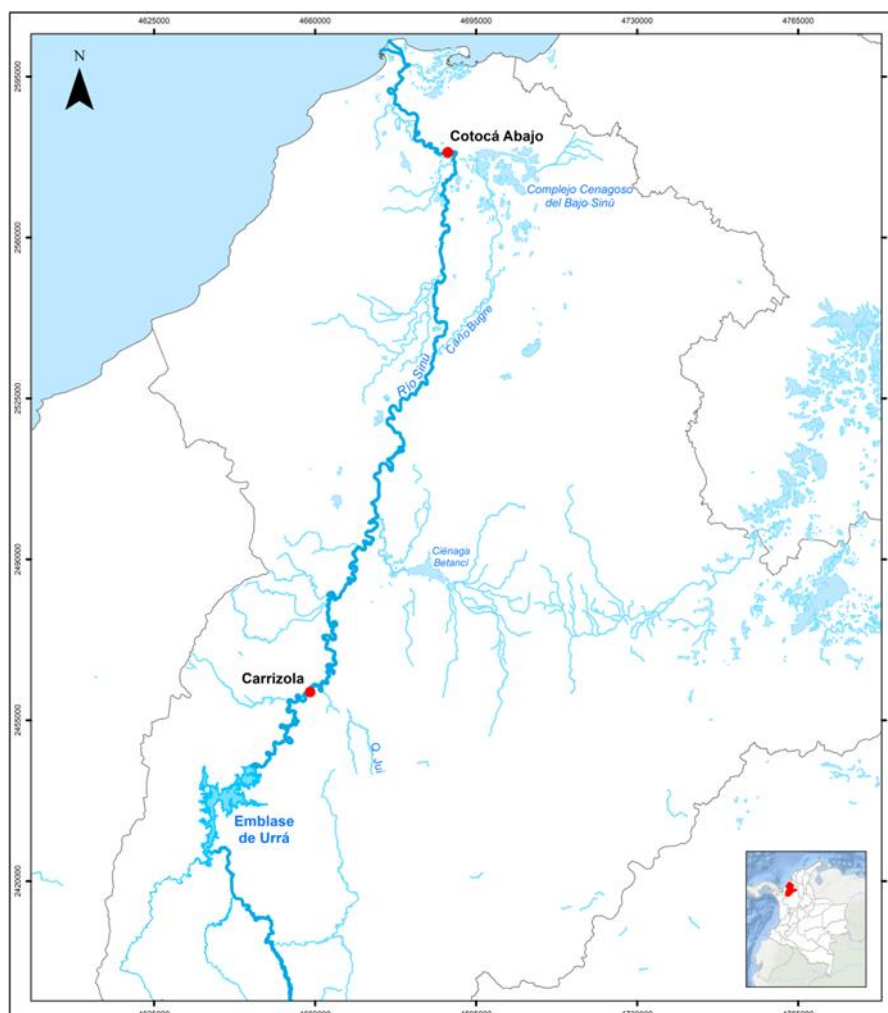
Para analizar las variables antrópicas que afectan la reproducción de las principales especies de peces migradoras del río Sinú, se realizó una revisión documental de investigaciones y antecedentes disponibles en la cuenca, considerando la pérdida de conectividad entre el río y

las ciénagas, la contaminación y la sobrepesca como la presión antropológica que puede afectar la ecología reproductiva y la sostenibilidad de las poblaciones de peces migratorias.

La caracterización de las áreas de desove de las principales especies migratorias del río Sinú se desarrolló mediante un enfoque descriptivo–espacial, apoyado en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), específicamente del software ArcGIS, con el fin de integrar información biológica, ambiental y espacial. La distribución espacial de la zona de desove (2001-2022) se evaluó mediante el Índice de Herfindahl-Hirschman (HHI) y el desplazamiento del centroide de las áreas de desove.

Estaciones de muestreo. Los sitios de muestreo estuvieron ubicados en la estación Carrizola del municipio de Tierralta, Córdoba (Fig. 1), a 36.3 km de la HU (Latitud 8°09'40.8" N y Longitud 76°05'44.8" O), donde se tomaron datos ambientales y en la estación Cotocá Abajo del municipio de Lorica, Córdoba (Fig. 1), a 227.2 km de la HU (Latitud 9°23'39.8" N y Longitud 75°54'30.1" O), ubicados sobre el cauce principal del río Sinú, donde se colectó el ictioplancton.

Figura 1. Localización de sitios de recolección de información. Carrizola (Alto Sinú) y Cotocá Abajo (Bajo Sinú).



Fuente: Elaboración autores.

Nota: Las imágenes corresponden a los sitios de colecta de ictioplancton y de registro de los parámetros ambientales.

Periodo de recolección del ictioplancton

En Cotocá Abajo (Lorica, Córdoba), diariamente se realizaron tres muestreos (07:00-08:00; 12:00-01:00 y 05:00-06:00), entre abril y septiembre, durante el periodo 2001-2022. El ictioplancton se recolectó a una distancia de 2 a 10 m de una de las márgenes (orillas) del río y

en la subsuperficie (~0.5 m de profundidad) durante un minuto, con una red cónica simple de plancton (red ictioplanctonera) con diámetro de boca de 0.5 m, 1.5 m de longitud y ojo de malla de 0.5 mm (Atencio-García et al., 2004).

Análisis estadístico.

Se analizaron datos de abundancia larval diaria (transformados mediante $\log_{10}(x+1)$) colectados durante los meses de mayor actividad reproductiva de los peces cada año (abril-septiembre, ~184 días) entre 2001 y 2022 (~4048 días), a la altura de Cotoca Abajo; mientras que los datos de las variables ambientales, como temperatura ambiente, temperatura del agua (°C) y caudal (m^3/s) se tomaron de las zonas de desove de los peces aguas abajo de la hidroeléctrica Urrá (Carrizola). Se utilizó estadística descriptiva (promedio $\pm$ desviación estándar); todas las variables ambientales analizadas fueron sometidas a pruebas de normalidad a través de test Shapiro-Wilk. Debido a que los datos analizados no cumplieron los supuestos de normalidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (KW) y cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$), se realizaron pruebas múltiples post hoc utilizando la prueba de Dunn, para el análisis de aprendizaje automático se implementó el algoritmo Random Forest (Machine Learning) mediante modelos independiente para cada especie. Se utilizaron como variables predictoras las condiciones ambientales (caudal, caudal con rezago de tres días, temperatura del agua, temperatura ambiente y día del año) y las condiciones ENSO correspondientes al momento del desove (descrito como momento actual), 6, 12 y 24 meses después de que ocurriera el desove. Se halló el coeficiente de determinación (R^2). La importancia de las variables se estimó mediante Random Forest y sus intervalos de confianza del 95% se obtuvieron mediante bootstrap.

RESULTADOS

FACTORES AMBIENTALES DETERMINANTES EN LA ABUNDANCIA LARVAL DE LOS PECES MIGRATORIOS

Variables ambientales

Las variables ambientales y la abundancia larval (2001-2022) no presentaron una distribución normal (test de Shapiro-Wilk, $p < 0.05$). La temperatura del río (estación Carrizola) registró valores entre 20.1 y 34.4 °C, con una media de 27.2 ± 1.7 °C, mientras que la temperatura ambiente registró valores entre 20.8 y 36.6 °C, con una media de 29.4 ± 1.5 °C. El caudal del río Sinú osciló entre 107.6 y 1151.0 m³/s, con media de 465.2 ± 148.2 m³/s. La abundancia larval (Cotocá Abajo) por especie registró los siguientes valores: bocachico, entre 0.0 y 4218.8 ind/día, media de 11.2 ± 125.0 ind/día; dorada, entre 0.0 y 59.0 ind/día, media de 0.1 ± 1.5 ind/día; bagre blanco, entre 0.0 y 19.7 ind/día, media de 0.1 ± 0.7 ind/día; y barbul, entre 0.0 y 34.2 ind/día, media de 0.2 ± 1.3 ind/día.

Relación entre caudal y abundancia larval

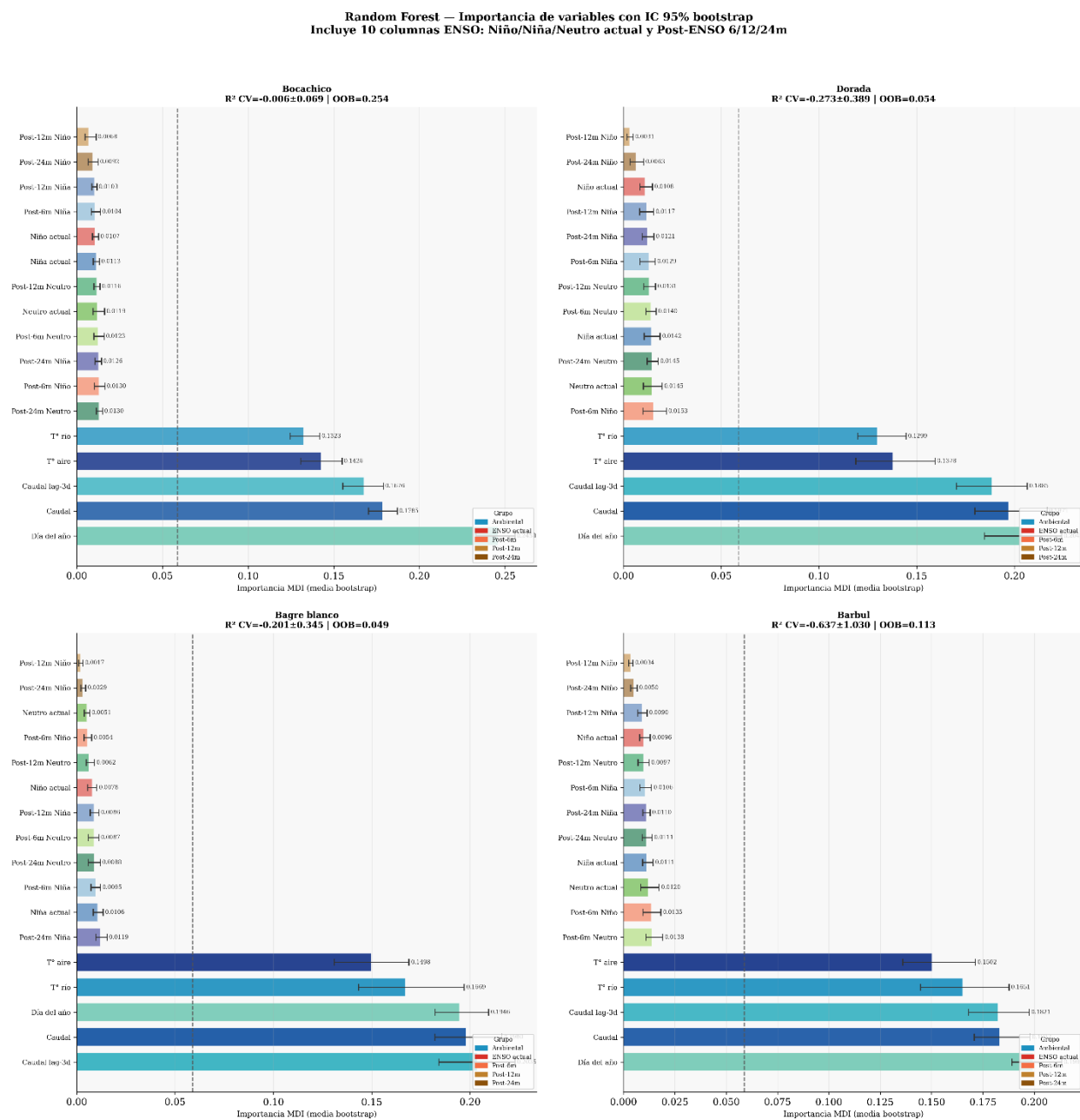
Los caudales diarios, tanto en el momento del desove como tres días después, debido a que entre el sitio de colecta del ictioplancton y las áreas de desove existe una deriva de tres días, muestran que esta variable ambiental incide directamente en la abundancia larval de las especies estudiadas. Esto se debe a que su contribución supera el nivel de confianza del 95%, evidenciando que las variaciones de caudal asociadas al fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) aumentan o disminuyen los niveles del río y de los planos inundables y, por ende, la abundancia larval, lo que establece una conexión entre lo ambiental y lo biológico (figura 2). El

caudal semanal para el desove de bocachico fue de 347 m³/s; para dorada, de 209 m³/s; para bagre blanco, de 680 m³/s; y para barbul, de 501 m³/s.

Correlación entre las variables ambientales y la abundancia larval de los peces migradores.

La figura 2 muestra la importancia relativa de las variables ambientales en la abundancia larval de las especies migratorias del río Sinú. Los resultados indican que el fenómeno ENSO, tanto en el momento del muestreo como a los 6, 12 y 24 meses posteriores, no presentó un efecto directo significativo sobre la abundancia larval. En contraste, el caudal y el día del año mostraron una relación positiva y estadísticamente significativa con esta variable (IC del 95%; $p < 0,05$), lo que sugiere que la influencia del ENSO ocurre de manera indirecta a través de cambios en las condiciones hidrológicas.

Figura 2. Importancia de las variables ambientales en la abundancia larval de las cuatro especies migratorias de importancia en la cuenca baja del río Sinú.

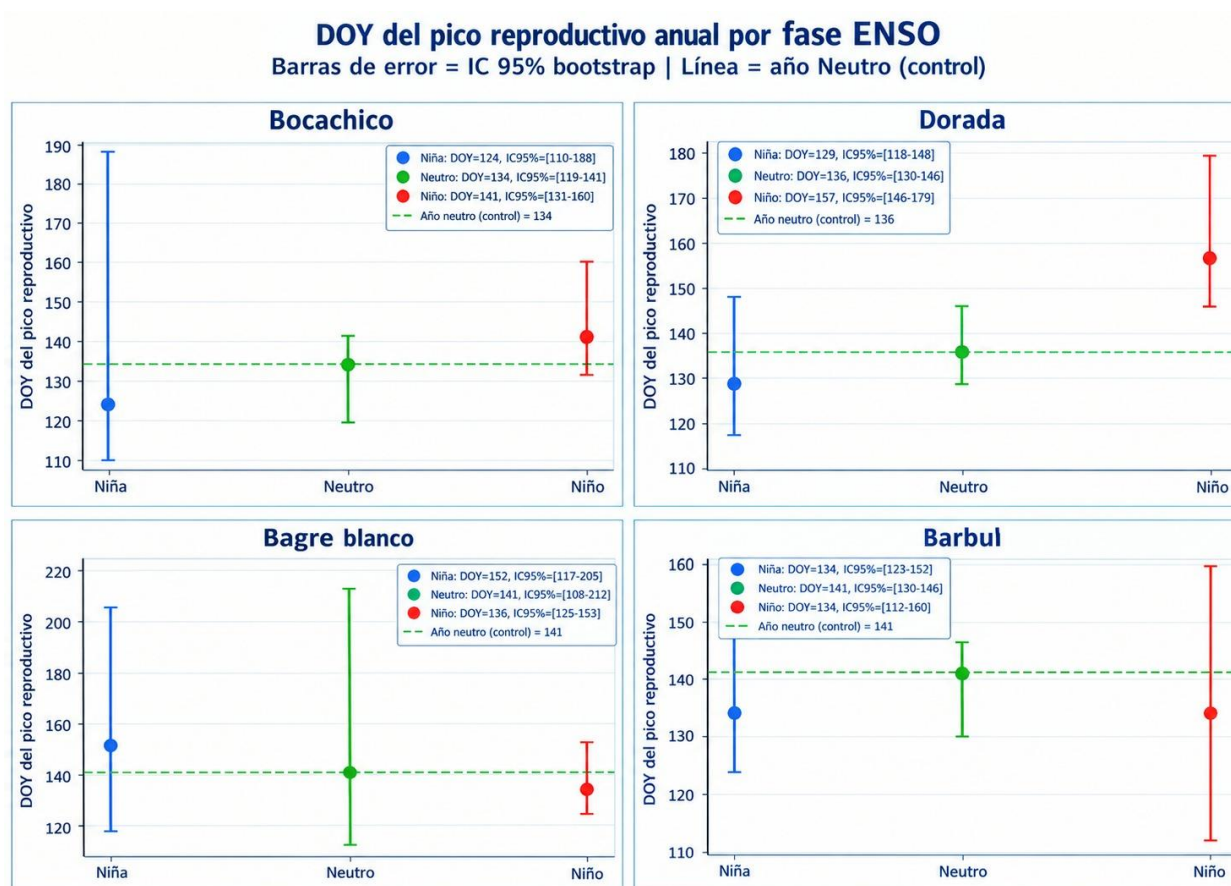


Fuente: Elaboración autores.

Entre las variables con mayor importancia para la abundancia larval, se destacó el día del año (figura 2), definido como la fecha de ocurrencia de la mayor abundancia larval de cada periodo reproductivo (pico reproductivo). Su estimación, basada en inferencia bayesiana y redes

neuronales, (IC del 95%), mostró que el fenómeno ENSO modifica el momento del pico reproductivo. Con el fenómeno año Neutro (reproducción normal), el día del año para bocachico se presenta a los 134 días; con La Niña, a los 124 días (se adelanta 10 días); mientras que con El Niño se presenta a los 141 días (se atrasa 7 días). Para dorada, el comportamiento es similar, siendo el día del año, el día 136 (Neutro); para el fenómeno La Niña se adelanta 7 días, para El Niño se atrasa 7 días también. Para bagre blanco el día del año se presenta a los 141 días, durante el fenómeno la Niña se registra a los 152 días, se atrasa 10 días, mientras que para El Niño se adelanta 7 días (134 días), para barbul el día del año se presenta a los 141 días (igual que bagre blanco), pero para los años La Niña, el día del año se adelanta al día 134 (7 días), y para los años El Niño también se adelanta 7 días (Figura 3). La temperatura óptima semanal multianual para el desove de todas las especies fue de 24.2 °C.

Figura 3. Día del año (pico reproductivo) de cada una de las especies migradoras.



Fuente: Elaboración autores.

Relación entre el fenómeno ENSO y la abundancia larval.

El análisis de los datos mediante las pruebas de Kruskal-Wallis y Dunn mostró que el ENSO, en el momento del muestreo, no produjo diferencias significativas en la abundancia larval total ($KW=1.3$, $p=0.52$). Sin embargo, el ENSO ocurrido a los 6, 12 y 24 meses anteriores al desove presentó diferencias significativas ($KW=20.3$, 40.3 , 25.7 , respectivamente; $p<0.001$) (figura 3). En general, la abundancia larval disminuyó cuando el desove fue precedido por

eventos de El Niño y aumentó cuando fue antecedido por eventos de La Niña, mientras que los años neutros presentaron un comportamiento similar al observado durante La Niña (figura 4).

Relación entre el ENSO y la abundancia larval por especies

Bocachico

En bocachico no se detectaron diferencias significativas entre las fases del ENSO durante el momento del muestreo. No obstante, a partir de los seis meses posteriores al evento climático se observaron diferencias significativas, con una disminución progresiva de la abundancia larval durante los eventos de El Niño, especialmente a los 12 y 24 meses (figura 4).

Dorada

La dorada presentó la mayor abundancia larval durante los años de La Niña. Aunque a los seis meses posteriores al ENSO no se observaron diferencias con respecto a esta fase, a los 12 y 24 meses la abundancia larval disminuyó significativamente durante los eventos de El Niño (figura 4).

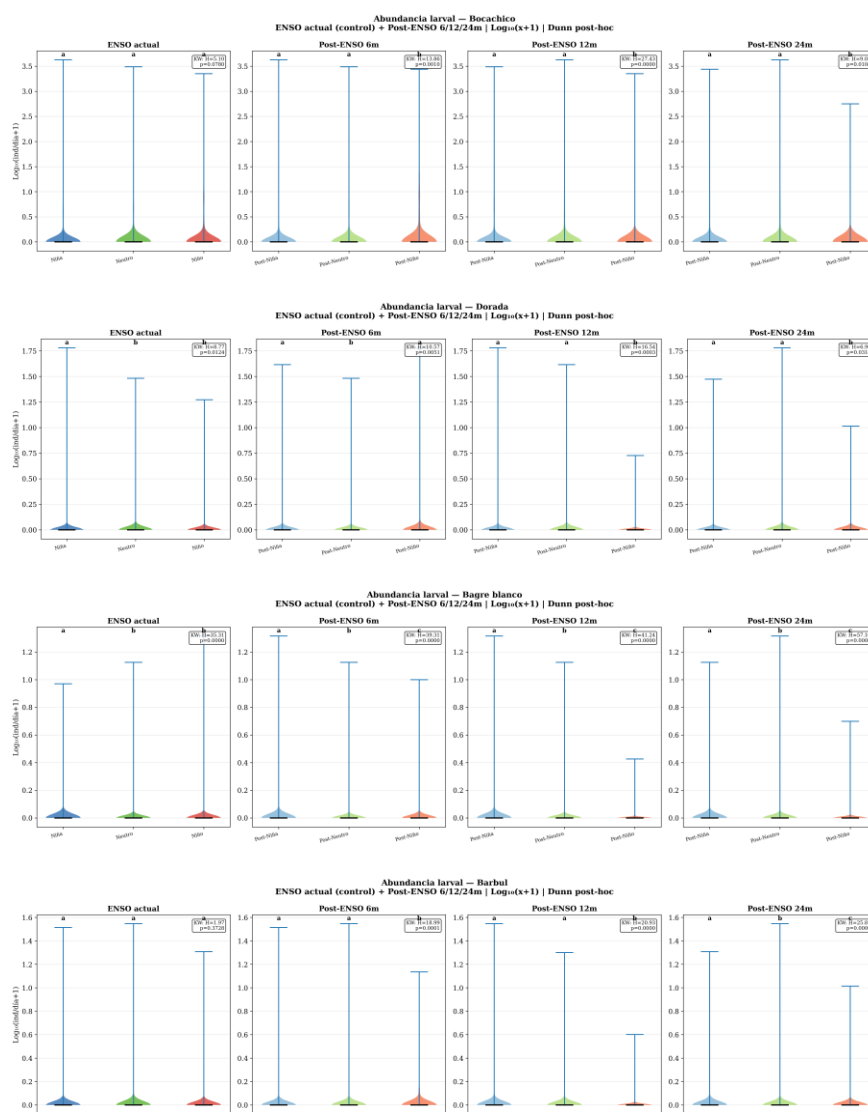
Bagre blanco

El bagre blanco mostró un patrón similar al observado en las demás especies, con mayor abundancia larval durante La Niña, valores intermedios en años neutros y una disminución significativa durante los eventos El Niño, particularmente 12 meses después de ocurrido el fenómeno (figura 4)

Barbul

El barbul presentó el mismo patrón general, con mayor abundancia larval durante La Niña y una disminución significativa en los eventos El Niño, especialmente a los 12 y 24 meses posteriores al fenómeno (figura 4).

Figura 4. Abundancia larval frente a fenómenos ambientales ENSO.



Nota: las letras a, b y c corresponden a la prueba de Dunn para identificar diferencias entre ENSO.

FACTORES ANTRÓPICOS DETERMINANTES SOBRE LA ABUNDANCIA LARVAL DE LOS PECES MIGRATORIOS

Pérdida de la interacción entre el río y las ciénagas o planos inundables

Una forma poco conocida de interrumpir la migración reproductiva de peces migradores es mediante el cerramiento de caños con mallas de pesca, con las que se impide el paso de peces migradores en edad reproductiva hacia la parte alta del río Sinú, un comportamiento reproductivo conocido como subienda. Esta actividad es muy común observarla al inicio del mes de agosto y hasta finales del mes de diciembre, cuando los pescadores perciben la presencia de peces durante sus actividades diarias, lo que los motiva a ubicar redes de pesca atravesadas en los caños Sicará-Limón y Caño Grande en el municipio de San Bernardo del Viento, para evitar la migración de los peces y de esta manera acceder a ellos de una forma más sencilla (figura 5a).

Construcción de la vía Montería-Lorica

La carretera Montería–Lorica, construida en la década de 1960, ha generado importantes transformaciones en la región. Aunque facilitó el acceso, el transporte y el desarrollo económico y social, también provocó impactos negativos en los ecosistemas del río Sinú (figura 5b). Entre estos efectos se destacan la reducción del hábitat de los peces y la alteración de la dinámica ecológica, especialmente en especies migratorias como el bocachico, la liseta y la dorada, lo que afectó la biodiversidad (Salas, 2019). Existe una actividad creciente que se deriva de la construcción de esta vía (ruta nacional 21) y del desarrollo de la piscicultura en Córdoba, la cual

consiste en la pesca de alevinos de talla comercial (~ 1 pulgada de longitud total), que quedan represados en la margen izquierda de esta vía, entre el municipio de Lorica y el corregimiento de Cotocá Arriba, este represamiento se debe a que esta parte de la ciénaga ha sido adecuada para la ganadería y agricultura, haciendo que pierda su capacidad de almacenamiento de agua en un tramo de 29 km aproximadamente; lo cual convierte esta vía en el dique más largo que atraviesa la ciénaga Grande de Lorica; todo esto se agudiza debido a la escasez de canales de comunicación (Box Culvert), que permitan la conexión de estas zonas, con zonas más profundas de la ciénaga, que quedan en la margen derecha de la vía (figura 5b).

Pérdida de áreas de las ciénagas y de los planos inundables.

Según el municipio de Montería (2002), se ocuparon planos inundables rurales del río Sinú en Las Palomas (700 ha), Santa Isabel-Palmito Picao (520 ha), Leticia-Providencia (280 ha), Leticia-Vorágine (192 ha) y Jaraquiel-El Varal (130 ha) para un total de 1.822 hectáreas. A finales del siglo XX, en los alrededores de Montería existían 48 humedales (Betancí, Martinica, Jaraquiel, La Yaya, Los Araujos, Villa Caribe y Berlín, entre otros) y se estimó que, en el periodo 1985-2011, se perdió cerca del 51% de su área debido a la expansión urbana (legal e ilegal) y a los drenajes (Salas, 2019).

Las zonas identificadas en el año 2002 continúan en riesgo de inundaciones naturales. La emergencia de febrero de 2026, ocasionada por un frente frío polar, evidenció la vulnerabilidad de esas áreas, con miles de hectáreas bajo el agua, lo que hace necesaria la activación de alertas tempranas y del trabajo institucional para recuperar y gestionar los suelos inundables y los humedales visibilizados por este comportamiento atípico, conforme a las funciones ecológicas

del sistema y a la reducción del riesgo (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2026).

Figura 5. Pérdida de áreas y de conectividad de las ciénagas. (a) ocupación de ciénagas para la ganadería; (b), vía Lorica-Montería; (c), pesca indiscriminada de peces en época de subienda y (d) construcción de viviendas y diques en la CGBS.



Nota: la pérdida de áreas y de conexión se debe a la construcción de diques para secar áreas de la ciénaga y a la realización de actividades agropecuarias.

La sentencia T-194 de 1999, proferida por la Corte Constitucional de Colombia (1999), señala que los cuerpos de agua que integran los humedales del río Sinú han sido rellenos de manera constante por particulares para la ampliación de pastos y cultivos, lo que ha alterado las características aluviales de la cuenca. La corte reconoció el fenómeno y su impacto ambiental y social, por lo cual ordenó la suspensión de las adjudicaciones irregulares de terrenos baldíos ubicados en humedales y en las riberas de las ciénagas.

Sedimentación del Caño Bugre

El Caño Bugre presenta un estado crítico debido a la fuerte sedimentación y colmatación acumuladas con el tiempo, lo que ha reducido su ancho, su profundidad y su capacidad de transporte de agua. Este proceso se asocia con factores como la degradación del río Sinú, la deforestación, la contaminación, el crecimiento urbano desordenado y la operación del embalse de Urrá, lo que genera obstrucciones, disminución del caudal y pérdida de conectividad, con impactos ecológicos y sociales en la región (de León & Llain, 2017). Asimismo, la sedimentación intensificada por las actividades agrícolas, los cambios en la cobertura vegetal y la erosión han disminuido la navegabilidad y han afectado los ecosistemas acuáticos. La acumulación de sedimentos, sumada a los vertimientos y la contaminación, ha provocado el taponamiento del caño, la pérdida de conectividad hídrica y la reducción de su valor económico y ambiental (Argel, 2022).

Represamiento de la ciénaga Betancí

En el año 2001, la ciénaga Betancí fue represada mediante la construcción de un dique de 74 metros de largo, cuatro metros de alto y cuatro metros de ancho, lo cual constituye uno de los impactos ambientales más significativos sobre la ciénaga, ya que interrumpió la dinámica fluvial natural entre la ciénaga y el río Sinú (El Tiempo, 2001). Provocando el estancamiento de sus aguas, evitando el intercambio de nutrientes, descomposición de la biomasa terrestre y la migración de peces (Cárdenas, 2020)

Un estudio multitemporal analizó el área superficial de la ciénaga Betancí en 1985, 2001, 2015 y 2020 con imágenes de Landsat y encontró una tendencia al aumento del área del cuerpo hídrico, que pasó de 497,17 ha en 1985 a 2192,45 ha en 2020, atribuible a la construcción de

obras estructurales dentro de este ecosistema, lo que pasó de ser un humedal natural a uno artificial (Cárdenas, 2020).

Contaminación orgánica e inorgánica

La contaminación es otro factor antrópico que contribuye a la disminución de la oferta de peces en el río Sinú. La contaminación se genera por la esorrentía de aguas servidas, las lluvias y los lavaderos de automóviles, estos últimos asociados al uso de detergentes provenientes de las ciudades ribereñas. Estas aguas se vierten a través de los canales de drenaje urbanos y se descargan directamente en el río Sinú. A ello se suma la presencia de plaguicidas y metales pesados derivados de actividades agrícolas y de la minería ilegal (Lans-Ceballos et al., 2023).

Por otro lado, los análisis de biodisponibilidad indicaron que el cadmio y el mercurio presentaron las fracciones más biodisponibles, lo que incrementa su potencial de incorporación a las redes tróficas. Desde el punto de vista ecotoxicológico, esta condición favorece procesos de bioacumulación en peces, con posibles efectos asociados al estrés oxidativo, al daño tisular, a alteraciones metabólicas y a afectaciones del crecimiento y de la reproducción.

Lixiviados

El río Sinú ha sido objeto de alteraciones causadas por agentes contaminantes, provenientes del vertimiento de desechos tóxicos arrastrados por las lluvias. Estudios realizados por Cavadia et al. (2019), a la altura de la ciudad de Montería (Jaraquiel, Avenida Primera y Los Garzones), mostraron la presencia de agentes contaminantes con potencial citotóxico y genotóxico, que producen daños al ADN y fallas en la segregación cromosómica, y pueden afectar procesos fisiológicos críticos en peces migradores del río Sinú, como la gametogénesis, la

viabilidad de embriones y el éxito reproductivo de los peces migratorios. Garzones es el punto con mayor grado de contaminación genotóxica, evidenciando un índice mitótico reducido (7,73) una reducción del 17% respecto al control (9,36), mayores alteraciones celulares (DS=10,07), incluyendo micronúcleos (14) que reflejan daño irreversible al ADN. Todo esto sugiere que los organismos acuáticos expuestos crónicamente a estas aguas podrían presentar alteraciones reproductivas y en las etapas tempranas del ciclo de vida (gametogénesis, fecundación, desarrollo embrionario y supervivencia de larvas), lo que afectaría el éxito reproductivo y el reclutamiento poblacional de las especies.

Agroquímicos

Un estudio en la quebrada Jui (Tierralta; Córdoba), registró un índice de calidad del agua (ICA) promedio de 74,1 clasificando el agua como de buena calidad, excepto en dos sectores del perímetro urbano durante el periodo húmedo, mostraron calidad media del agua debido a la presencia de coliformes fecales y al aumento de la turbidez (96 veces mayor que en el periodo seco). Los plaguicidas organoclorados y organofosforados se encontraron por debajo del límite de detección. El análisis multivariado indicó contaminación por aguas residuales domésticas, escorrentía agrícola, excretas porcinas y minería de arena (Hernández-Álvarez et al., 2021). Este tipo de condiciones ambientales, junto con la regulación hidrológica por la hidroeléctrica Urrá, indica que los patrones hidrológicos y las descargas controladas o por crecientes pueden movilizar sedimentos y sustancias disueltas, incluidos residuos de actividades agrícolas que contaminan el río aguas abajo (Urrá S.A. ESP, 2021).

En la Ciénaga Grande del río Sinú se analizaron 96 muestras de sedimento y se detectaron cinco pesticidas organoclorados, la mayoría de los cuales eran contaminantes

orgánicos persistentes (OCP). Los resultados mostraron que, en los sedimentos, varios pesticidas se encontraban en el rango de 2.85–7.05 ng/g para α -hexaclorociclohexano (α -HCH), 0.26–2.31 ng/g para β -HCH, 0.59–7.57 ng/g para γ -HCH (lindano), 0.69–1.72 ng/g para aldrin y 1.55–2.25 ng/g para heptacloro epóxido. Entre los OCP, el Σ -HCH (isómeros posicionales totales de HCH) fue el compuesto dominante en los sedimentos de la Ciénaga Grande, donde predominaron los isómeros de HCH. La mayoría de los sitios presentaron contaminación asociada a la actividad agrícola y a la persistencia de estos compuestos en el ambiente. Además, se han identificado residuos históricos de plaguicidas que aún persisten y pueden movilizarse en el sistema hídrico, lo que evidencia la necesidad de un monitoreo continuo (Lans-Ceballos et al., 2023).

Hidroeléctrica

La operación de la hidroeléctrica URRÁ en el año 2000 provocó transformaciones importantes en la dinámica ecológica y pesquera del sistema fluvial. La presa provocó la fragmentación del río y bloqueó las rutas naturales de migración reproductiva de especies reofílicas como el bocachico, la dorada y el bagre blanco, que dependen de las fluctuaciones del río para desplazarse hacia las áreas de desove durante la subienda. Esta interrupción de la conectividad del río, junto con las modificaciones en el régimen hidrológico, ha contribuido a una reducción cercana al 50 % del potencial reproductivo de los peces migratorios de la cuenca del Sinú (Atencio-García, 2000; Acosta, 2013).

Estas alteraciones también se evidencian en la actividad pesquera; el bocachico representó entre el 28% y el 32% del total de capturas entre 2006 y 2008; sin embargo, para el año 2009 su participación disminuyó a 11,9 %, lo que refleja cambios en la abundancia relativa de esta especie (Acosta, 2013). A pesar de esta disminución, el bocachico continúa siendo una de

las especies predominantes en las pesquerías; por ejemplo, en 2019 representó el 27,9 % de las capturas del embalse, equivalentes a aproximadamente 22 toneladas (URRÁ S.A., 2020).

Durante el periodo de subienda, la captura de ejemplares adultos en fase reproductiva reduce la biomasa disponible para la reproducción y disminuye la producción de huevos y larvas, lo que limita el proceso natural de renovación de las poblaciones (AUNAP & PNUD, 2021). Asimismo, investigaciones sobre la dinámica pesquera del río Sinú han identificado modificaciones en la estructura poblacional de las especies y en las tallas de los individuos capturados, asociadas a la presión ejercida por la pesca (Olaya-Nieto et al., 2004). A pesar de la reducción de las poblaciones naturales, el bocachico sigue siendo la especie más representativa en algunas asociaciones de pescadores, con registros que representan aproximadamente el 95,7% de las capturas, lo que evidencia su alta relevancia ecológica y socioeconómica. En respuesta a esta situación, se han desarrollado programas de repoblamiento mediante la liberación de alevinos de especies nativas, con el objetivo de contribuir a la recuperación de las poblaciones y a la sostenibilidad de la pesca artesanal en la región (URRÁ S.A., 2024).

Sobrepesca y pesca ilegal

La Ciénaga Grande del Bajo Sinú es un ecosistema estratégico para la seguridad alimentaria y la economía local, ya que la pesca artesanal sustenta a numerosas comunidades ribereñas (Salazar, 2021). Sin embargo, la creciente presión pesquera y el deterioro ambiental han intensificado la pesca indiscriminada, incluida la captura de peces por debajo de la talla mínima reglamentaria (longitud estándar) para bocachico (25 cm), dorada (35 cm) y bagre blanco (45 cm). Esta situación ha provocado una disminución de la abundancia y el tamaño

promedio de las poblaciones ícticas, comprometiendo la sostenibilidad ecológica del humedal y el bienestar de la población local (AUNAP, 2023).

La captura de juveniles interrumpe los ciclos reproductivos y disminuye la capacidad de recuperación del ecosistema frente a presiones como la contaminación y la alteración hidrológica. Aunque la AUNAP (2023) señala que se han implementado vedas y controles de comercialización para proteger los periodos reproductivos, persiste el incumplimiento normativo y el uso de artes no selectivas. Por su parte, la CVS desarrolla acciones de control ambiental y programas de repoblamiento íctico para recuperar especies nativas (CVS, 2022). En consecuencia, la pesca de juveniles (bocachico, dorada y bagre blanco) y la sobrepesca en la Ciénaga Grande de Lorica, sumadas a factores ambientales, han reducido las poblaciones ícticas en aproximadamente un 50% y comprometido la sostenibilidad del sistema (Albonis et al., 2025).

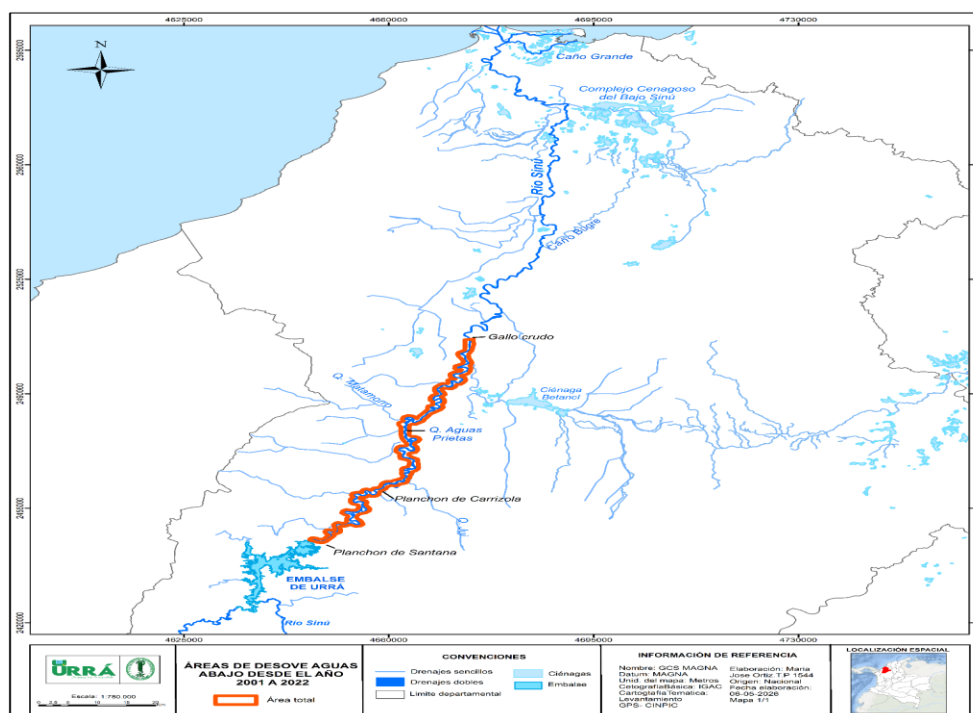
En ese mismo sentido, se evidenciaron afectaciones en el sector pesquero del Sinú, reflejadas en una disminución sustancial del recurso, asociada a la interrupción del ciclo reproductivo de especies migratorias como el bocachico. Entre 1984 y 1992, por ejemplo, se registró una reducción del 70% en las capturas anuales de especies comerciales. Estas afectaciones resultan especialmente relevantes, dado que esta actividad constituye una de las principales fuentes de ingreso para las comunidades ribereñas (Barrera, 2017).

CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ESPACIAL DE LA ZONA DE DESOVE

Distribución espacial de los desoves

La zona de desoves está comprendida entre el dique de la represa, en el punto conocido como Hidroeléctrica Urrá, a 0.0 km, y el punto más distal aguas abajo de la zona de desove, conocido como Gallo Crudo a 125.2 km (figura 3), la zona de desove está conformada por 37 tramos (Tabla 2), en los que se observa el comportamiento reproductivo de las especies estudiadas (bocachico, dorada, bagre blanco y barbul) en cada uno de ellos (figura 6). La distribución de los registros de desove, evidenció una variación espacial en la actividad reproductiva entre los diferentes tramos de la zona de estudio, con sectores que presentaron una mayor concentración de desoves respecto a otros.

Figura 6. Área de desove de las principales especies migradoras aguas abajo de la Hidroeléctrica Urrá hasta Gallo Crudo, durante el periodo 2001-2022.



Fuente: Elaboración autores.

Tabla 1. Área de desove de las principales especies migradoras de la cuenca aguas abajo de la HU periodo 2001 a 2022.

Zona de desoves	Distancia entre puntos(km)	Número de desoves				Total desoves
		Bocachico	Dorada	Bagre blanco	Barbul	
Urrá – Pasacaballos	0.0–11.0	464	56	654	460	1634
Pte. Pacheco – Q. Quimari	0.7–12.3	33	4	6	5	48
Pte. Pacheco – Planchón Santana	0.9–8.8	17	1	1	1	20
Urrá – El Toro	5.0–29.0	2	1	1	1	5
Planchón Santana – Q. Puerto Niño	5.2–24.8	17	1	1	1	20
Pasacaballos – El Toro	5.4–29.5	592	88	168	547	1395
Pasacaballos	7.0–10.5	13	13	95	61	182
Santana – Q. Tai	7.9–19.7	23	0	0	3	26
El Paraíso – Q. Tai	9.2–18.2	9	0	0	0	9
Q. Quimari – El Toro	10.8–30.9	14	4	1	2	21
Pasacaballos – Q. Tuis Tuis	13.7–31.3	12	5	0	5	22
Pasacaballos – Q. Tai	14.2–18.3	5	1	0	0	6

Q. Tai – Q. Tuis Tuis	15.1–36.5	11	1	4	0	16
Pasacaballos – Carrizola	15.2–36.9	30	0	4	3	37
El Toro – Carrizola	17.9–51.9	932	350	598	829	2709
Nueva Platanera – Carrizola	20.3–50.1	74	0	39	36	149
Planchón Nueva Platanera – Q. El Pirú	21.4–38.0	4	2	0	3	9
Planchón Nuevo Tai – Carrizola	25.3–57.6	33	6	7	8	54
El Toro – Río Nuevo	26.4–52.3	53	10	19	10	92
Carrizola – Tierralta	32.2–51.0	40	10	9	6	65
Carrizola – Río Nuevo	32.9–54.6	27	9	10	3	49
Carrizola	33.0–34.3	103	51	63	69	286
El Toro – Q. Aguas Prietas	38.8–88.2	3	4	2	4	13
Tierralta – Volador	41.0–56.3	12	2	1	0	15
Tierralta – Las Palomas	43.0– 103.0	24	4	3	3	34

Río Nuevo – Bellavista	45.8–77.8	57	7	13	8	85
Carrizola – Manzanares	48.9–61.7	7	5	3	1	16
Río Nuevo – Las Palomas	56.0–87.0	23	0	17	82	122
Río Nuevo	56.2	12	0	0	0	12
Caño N°2 – Río Nuevo	59.9–70.6	11	3	1	4	19
Manzanares – Río Nuevo	62.4–72.0	7	3	0	0	10
Volador – Q. Aguas Prietas	69.9–84.3	0	15	0	0	15
Bellavista – Las Palomas	71.2– 103.8	28	9	44	59	140
Las Palomas – Nueva Colombia	95.5– 102.5	5	3	0	6	14
Las Palomas – Gallo Crudo	95.7– 125.2	51	7	16	5	79
Nueva Colombia	106.2	2	0	0	0	2
Nueva Colombia – Gallo Crudo	109.8– 116.1	0	3	0	4	7

Nota. Los valores corresponden al número de desoves registrados por especie en distintos tramos del río Sinú.

En la zona de desove, entre la hidroeléctrica Urrá y Gallo crudo, se identificaron cinco sectores de relevancia:

Sector Urrá – Pasacaballos

Este sector corresponde al primer tramo de la zona de desoves y tiene una longitud aproximada de 11 km. En esta zona, entre 2001 y 2022, se registró un total de 1634 desoves (26.8 %), lo que evidencia una alta concentración de eventos reproductivos durante este periodo. Este tramo puede considerarse de alto valor hidromorfológico por su cercanía a la Hidroeléctrica Urrá, lo que lo convierte en un sector crítico para evaluar la estabilidad del cauce y la gestión del riesgo de conservación (tabla 2, figura 7).

Sector Pasacaballo - El Toro

Este sector corresponde al tramo comprendido entre 5.4 y 29.5 km aguas abajo de la HU, que conforma la segunda zona de desoves de importancia histórica (2001-2022), con un total de 1395 desoves (22.9 %) durante el período. Este valor muestra una disminución del 14.6 % en el proceso reproductivo (239 desoves menos) a lo largo de la temporada evaluada, en comparación con el tramo anterior (tabla 2, figura 7).

Sector El Toro – Carrizola

Durante el período del estudio (2001 a 2022), se registró una marcada concentración de desoves en el tramo comprendido entre los 26 y los 36 km aguas abajo de la represa. Este tramo del río Sinú presentó la mayor recurrencia interanual, con un total de 2709 desoves (44.4 %), y la mayor cantidad de desoves de tres de las cuatro especies estudiadas: bocachico, bagre blanco y barbul. Por todas estas características, este tramo del río Sinú es considerado un núcleo

reproductivo, al ser uno de los sectores más dinámicos y críticos del sistema fluvial (tabla 2, figura 7).

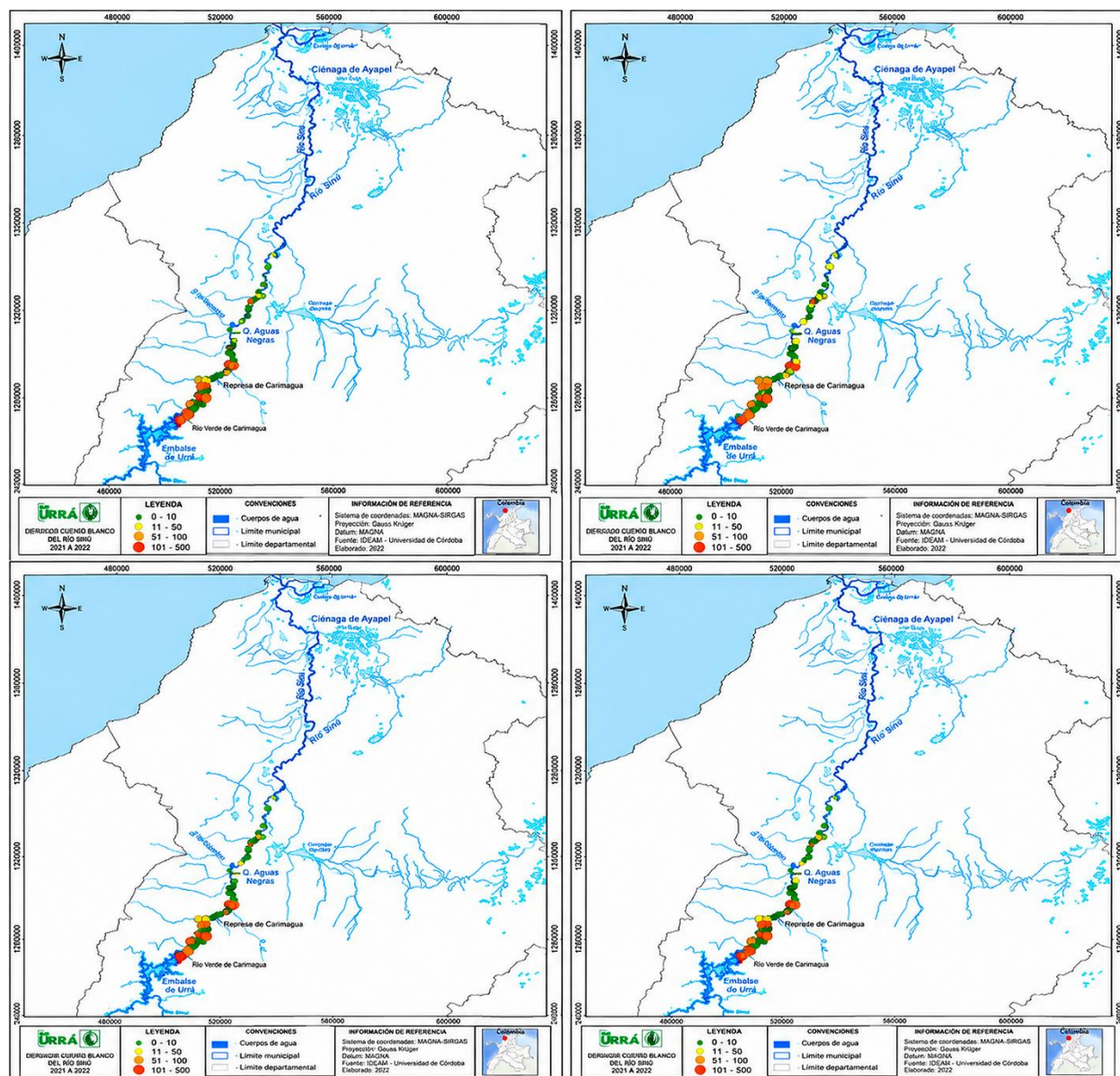
Sector Carrizola

Este tramo del río representa una zona de transición hidromorfológica, ubicada entre los 33.0 y los 34.3 km, donde la energía hidráulica de los tramos anteriores comienza a disiparse, lo que favorece la sedimentación. En esta zona se registró un total de 286 desoves (4.7 %) entre 2001 y 2022, lo que muestra valores similares para las cuatro especies estudiadas y una dinámica más estable dentro del sistema, aunque la cantidad de desoves es baja con respecto a los sectores anteriores (tabla 2, figura 7).

Sector Pasacaballos

Este sector de desoves es uno de los más relevantes, ya que presenta incrementos de velocidad debido a la variación de los caudales. Está ubicada en el tramo medio, entre la represa Urrá y aguas abajo de El Toro (7.0-10.5 km); este sector integra subsectores como Urrá-Pasacaballos, Pasacaballos-El Toro y sectores adyacentes, que, en conjunto, conforman un corredor reproductivo continuo. Este sector presentó un total de 182 desoves (2.4%) durante el periodo de 2001 a 2022 (tabla 2, figura 7).

Figura 7. Principales puntos de desove de las especies migradoras del río Sinú aguas abajo, desde la HU hasta Gallo crudo.



Nota: En la figura se observa la mayor concentración de desoves entre la HU y Pasacaballos y una disminución hacia Gallo Crudo.

Distribución temporal de los desoves (2001-2022)

Para entender la dinámica temporal general de los desoves durante el periodo de estudio, se identificaron tres fases claras en las que se evaluó el índice de concentración espacial del núcleo reproductivo (HHI).

Fase I

Esta etapa inicial presentó una alta concentración de desoves (6.660) en la zona conocida como El Toro-Carrizola, con valores máximos entre 2001 y 2006. En esta fase se observó una alta sincronía entre las cuatro especies en estudio, identificándose como el núcleo reproductivo de la zona de desove (tabla 3, figura 7).

Fase II

Esta etapa de expansión marcó el inicio de la disminución progresiva del número de desoves (1024). En esta fase se observó una mayor dispersión espacial de las áreas de desove entre 2007 y 2014; aparecieron zonas de desove adicionales, como Pasacaballos, Río Nuevo y Tierralta, lo que evidencia una extensión espacial de la zona de desove en comparación con el periodo anterior. El HHI mostró una dispersión leve de los desoves, junto con un aumento de los eventos reproductivos aguas abajo (tabla 3, figura 7).

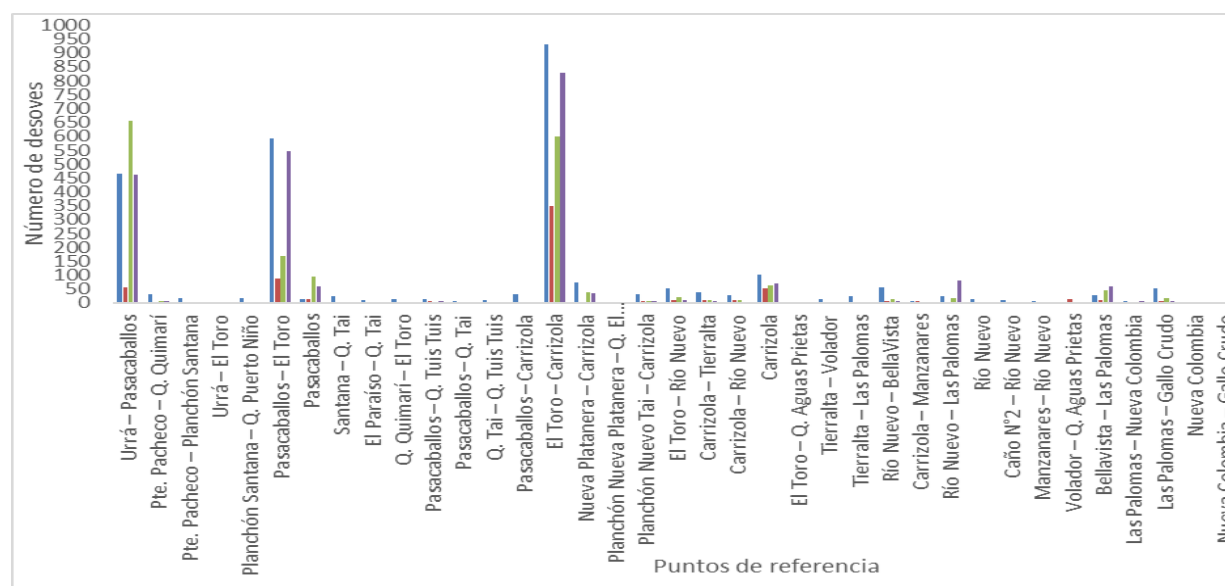
Fase III

Esta fase reciente se desarrolló entre 2015 y 2022 y presentó valores de desoves significativamente menores (517), así como la mayor fragmentación espacial de toda la zona. Esta fase permitió observar el mayor peso relativo de los tramos medio y alto de la zona de desoves. El HHI evidenció un aumento marcado de la concentración espacial, lo que indica que el núcleo reproductivo se reduce y permite la ampliación de la zona de desoves (tabla 3, figura

7). Todo esto sugiere que esta zona de desoves forma parte del proceso de adaptación de los peces a las condiciones de fragmentación del río y a la pérdida de área de desoves aguas arriba de la presa.

El HHI de los cinco sectores de desoves de mayor importancia fue ≈ 0.323 . Este valor mostró una alta concentración espacial del esfuerzo reproductivo en el sector El Toro-Carrizola, concentrando el 44.4% del total de los desoves en los años 2001 y 2022. Esta zona fue identificada como el núcleo reproductivo principal (hotspot), lo que indica que el sistema depende de pocos tramos dominantes. En cambio, el HHI para todos los puntos de referencia resultó ser ≈ 0.196 , lo que indica una mayor dispersión de los puntos de desove. El centroide espacial de la zona de desove (C) hallado para esta zona fue de 27 km aguas abajo de la HU, lo que sugiere un retorno y estabilización de los puntos de desove (tabla 3).

Figura 8. Distribución espacial del número de desoves de las cuatro especies migradoras de importancia comercial aguas abajo de la Hidroeléctrica Urrá.



Nota. La gráfica muestra los sectores de desove de mayor importancia dentro de la zona de desove de peces migradores.

Tabla 2. Comportamiento espacial de la zona de desoves en las tres fases temporales identificadas entre 2001 y 2022.

Fase	Periodo	HHI	Centroide (km desde Urrá)	Interpretación
I	2001–2006	0.323	≈ 26	Núcleo reproductivo en el tramo medio de la zona de desove
II	2007–2014	0.287	≈ 28	Desplazamiento moderado aguas abajo
III	2015–2022	0.352	≈ 27	Retorno y estabilización de los puntos desoves

Nota. En esta tabla se observa que no hay una diferencia marcada en el desplazamiento de la zona de desoves.

TENDENCIA MULTIANUAL POR ESPECIE

Bocachico

Esta especie presentó los valores más altos de desove durante el periodo 2001-2004, con predominio en el sector El Toro-Carrizola (26-36 km aguas abajo); luego, la especie mostró una disminución progresiva en el número de desoves y una mayor dispersión espacial de estos, a lo largo de la zona de desove (figuras 7 y 9). El bocachico es la especie que, durante los 22 años de estudio, presentó el mayor número de desoves, con un total de 2750.

Dorada

La dorada mostró una distribución más dispersa, lo que indica que en los tramos superiores a 50 km registró un incremento relativo del número de desoves durante el periodo 2018-2022 (figuras 7 y 9).

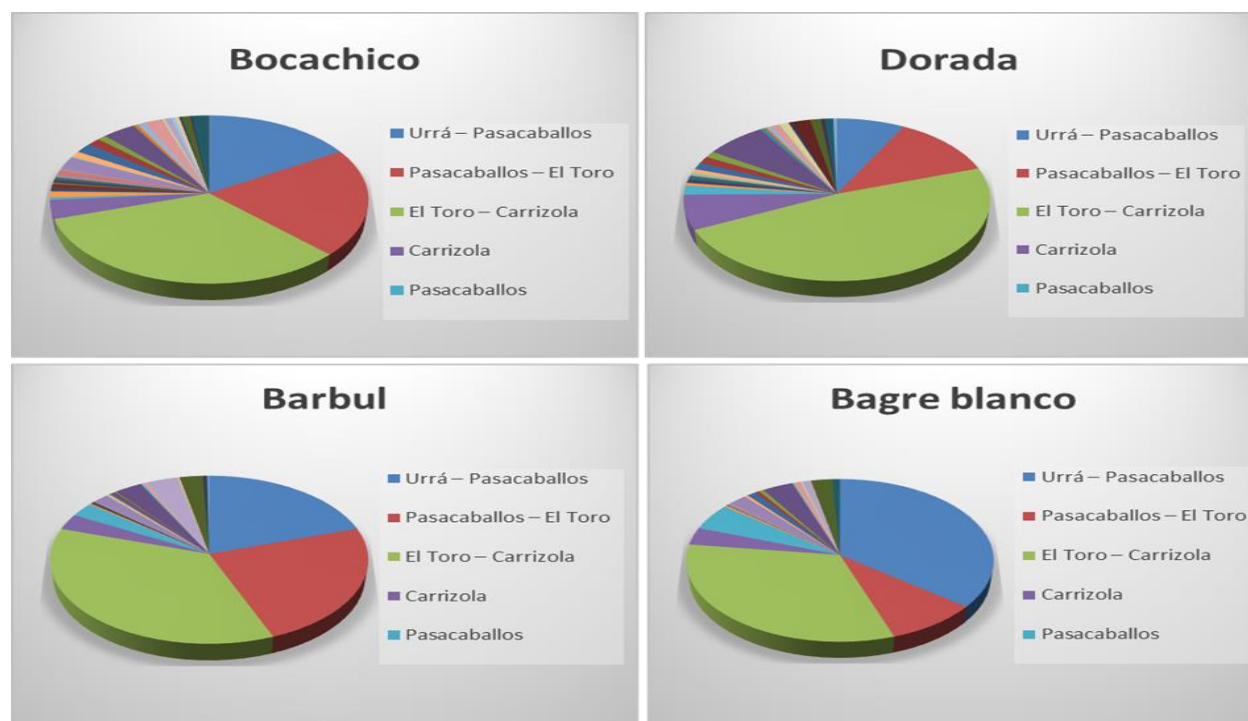
Bagre blanco

Esta especie mostró una alta incidencia de desoves durante el periodo 2001-2004 y una disminución sostenida a partir de 2010 (figuras 7 y 9).

Barbul

El barbul presentó una asociación con el núcleo reproductivo (26-36 km), pero registró una disminución marcada en el número de desoves a partir de 2014 (figuras 7 y 9).

Figura 9. Áreas de desove para cuatro peces migradores aguas abajo de la HU desde Urrá hasta Gallo Crudo.



Nota. Las gráficas muestran el número de desoves de cada uno de los peces migradores por subáreas de desove.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados muestran que la abundancia larval de los peces migradores del río Sinú está controlada por la relación entre los factores hidroclimáticos y las presiones antropogénicas. La variación del clima, ligada a fenómenos naturales como el ENSO, incide directamente en el caudal y en la temperatura (ambiente y del río), que actúan como detonantes del inicio y la finalización del proceso reproductivo de las cuatro especies neotropicales analizadas en el presente estudio. Sin embargo, también otros factores afectan el ciclo reproductivo de los peces, como la contaminación orgánica e inorgánica, la pérdida de conectividad lateral y la sobrepesca (Duponchelle et al., 2021).

INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA SOBRE LA ABUNDANCIA LARVAL

El comportamiento de los patrones de abundancia larval observados sugiere una fuerte dependencia de las variaciones del caudal, reconocidas como pulso de inundación, y constituye el principal estímulo para la finalización del ciclo reproductivo (Kerguelén-Durango & Atencio-García, 2015; Šmejkal et al., 2023). En presencia de eventos asociados al fenómeno La Niña, con el aumento de las precipitaciones que ello conlleva, se observó un incremento en la magnitud de los desoves y, por ende, de la abundancia larval.

FRAGMENTACIÓN Y PÉRDIDA DE CONECTIVIDAD ECOLÓGICA

El embalsamiento de los ríos para la generación de energía eléctrica ocasiona fragmentación y alteraciones en la hidrología que pueden afectar las migraciones y la reproducción de los peces (Chen et al., 2023; Arratíbel, 2022). La fragmentación del río Sinú, con la construcción de la Hidroeléctrica Urrá, redujo la conectividad longitudinal, afectando el ciclo reproductivo de las poblaciones de peces migradores que desovaban arriba de la presa, (Atencio-García, 2000; Mojica-Corzo et al., 2012), en particular de las poblaciones que salían de la ciénaga de Betancí.

La dinámica poblacional de los peces migratorios está estrechamente ligada a las características del río donde se reproducen y a la disponibilidad de hábitats conectados, como ciénagas o planos inundables, donde se alimentan y crecen. La conectividad lateral y la heterogeneidad de hábitats entre el cauce principal y las zonas inundables son clave para completar su ciclo de vida, propiciando el reclutamiento y la supervivencia de los juveniles en muchas especies de peces (Solano et al., 1986; Atencio-García, 2000; Van Looy et al., 2022; Farò & Wolter, 2024).

Los resultados muestran que la zona de desove, aguas abajo de HU, se extiende por un tramo del río Sinú que va desde la presa (0,0 km) hasta Gallo Crudo (125,2 km), lo que aumenta la vulnerabilidad de las especies a la pesca indiscriminada y a la degradación ambiental de dicha zona. Van Looy et al. (2022) y Faró & Wolter (2024) señalan que la pérdida de conectividad entre el río y los planos inundables o ciénagas limita el acceso del ictioplancton a su hábitat de crianza, reduciendo la disponibilidad de alimento y refugio para larvas y juveniles.

REDUCCIÓN DE CIÉNAGAS Y PLANOS INUNDABLES

La reducción significativa del CCBS, constituye uno de los impactos más visibles que ha sufrido la cuenca aguas abajo de la HU, sobre la abundancia larval de los peces migradores con una reducción de hasta un 40 % aproximadamente (Mejía et al., 2018), junto con un 51% de pérdida de humedales cercanos a Montería aproximadamente, han agravado la disponibilidad de espacios cuya función es garantizar el desarrollo de las etapas tempranas (Salas, 2019). Estas reducciones progresivas afectan las funciones ecológicas de las ciénagas como la producción de alimento, el refugio y la regulación hidrológica ante inundaciones (Acosta, 2013; Vargas, 2015).

Según Mejía et al. (2018). Los análisis geográficos evidencian una tendencia a la disminución de la superficie inundable del CCBS, atribuida no solo a la operación de la hidroeléctrica Urrá, sino también a la expansión de la frontera agropecuaria, la construcción de vías, diques, camellones y jarillones, pasando de 38.000 ha a 23.000 ha, lo que refleja una disminución durante los periodos 1991, 2003 y 2015 (figura 3) en los cuales se evidenció una reducción acumulada del 40 % de su área.

CONTAMINACIÓN Y SUS EFECTOS SOBRE LA REPRODUCCIÓN DE PECES MIGRADORES

La presencia de metales pesados y agentes contaminantes, como los pesticidas, podría afectar la reproducción de peces migradores como el bocachico, la dorada, el bagre blanco y el barbul. Los altos niveles de arsénico, plomo y mercurio detectados en sedimentos evidencian un riesgo ecológico, con efectos potenciales sobre la fisiología reproductiva de los peces (Del Carmen, 2023; Vega, 2024). Según el Instituto Nacional de Salud (2017), estos altos niveles

podrían provocar alteraciones endocrinas, así como la disminución de la fertilidad y de la viabilidad de los huevos. Asimismo, este tipo de agentes genotóxicos ocasionaría daños al ADN, con afectaciones en la gametogénesis y en el desarrollo embrionario (Cavadia et al., 2019).

METALES PESADOS

Según Marrugo et al. (2015), en peces migradores como el bocachico, se registraron concentraciones de mercurio de 0,21 µg/g en tejido muscular, ligeramente inferiores a los valores permisibles propuestos por la OMS (0,5 µg/g). Sin embargo, el 31,5 % de los estudios realizados en Colombia señalan que los valores observados superan los límites permisibles. Por otro lado, Madariaga-Mendoza et al. (2023) señalan que el bocachico es una especie altamente sensible a la exposición al mercurio inorgánico, la cual afecta la calidad espermática y el desarrollo larval.

Los análisis realizados por Del Carmen (2023) en la Ciénaga Grande de Loricá evidenciaron la presencia de arsénico (As), plomo (pb), mercurio (Hg) y cadmio (Cd) en los sedimentos, con concentraciones que superaron los valores de referencia para ambientes acuáticos no contaminados. El índice de riesgo ecológico total (RI) hallado en los sedimentos de la CGBS ubicó al ecosistema en una categoría de riesgo ecológico global alto, según la escala de clasificación propuesta por Hakanson (1980); lo cual indica una alta presión ambiental acumulada sobre la ciénaga. Este RI alto sugiere que dicha presión podría afectar a los peces del río Sinú, al tiempo que favorece la bioacumulación de metales pesados.

las alteraciones en la fisiología y los posibles impactos en los procesos reproductivos de los peces. En especial a aquellas especies directamente ligadas al fondo (Tabla 1).

Tabla 3. *Análisis de metales pesados y del índice de riesgo ecológico del CCBS.*

Metales pesados	Concentración $\mu\text{g/kg}$	Índice de Riesgo ecológico Total	
		RI	Clasificación
Arsénico (As)	4458,39	>600	Muy alto
Plomo (Pb)	3859,21	>600	Muy alto
Mercurio (Hg)	108,41	<150	Bajo
Cadmio (Cd)	30,70	<150	Bajo

Nota. Datos tomados de Del Carmen (2023).

En esta misma línea, se ha documentado que exposiciones a mercurio inorgánico superiores a $0,025 \mu\text{g/g}$, como una de las fracciones que componen el mercurio total, generan efectos adversos sobre la calidad espermática y el desarrollo embrionario, mientras que concentraciones por encima de $0,05 \mu\text{g/g}$ disminuyen significativamente las tasas de fertilización y eclosión y pueden ser tóxicas durante las primeras etapas ontogénicas (Madariaga-Mendoza et al., 2023).

En ese mismo sentido, la evaluación mediante índices ambientales evidenció un alto grado de contaminación en los sedimentos. El índice de geoacumulación (Igeo) y el factor de contaminación (CF) clasificaron al arsénico en categorías de contaminación de fuerte a muy fuerte, mientras que el mercurio presentó contaminación de moderada a severa. El índice de riesgo ecológico potencial (RI) identificó al arsénico como el metal de riesgo extremadamente

alto, mientras que el mercurio y el cadmio representaron un riesgo considerable y el plomo un riesgo moderado.

SOBREPESCA

La sobrepesca constituye uno de los factores antrópicos más relevantes en la disminución del stock de peces migradores, ya que la captura de individuos con tallas por debajo de lo permitido durante los periodos reproductivos reduce la biomasa desovante y limita la producción de huevos y larvas (Mojica-Corzo et al., 2012; AUNAP, 2023).

Según Mojica (2021), la presión pesquera altera la estructura poblacional; en ese mismo sentido, Barrera (2017) afirmó que la pérdida del hábitat y la contaminación propician la disminución progresiva de los peces en la cuenca del río Sinú.

INTERACCIÓN ENTRE FACTORES

Durante eventos de El Niño, la alteración del régimen hidrológico modifica los estímulos reproductivos de los peces, lo que provoca cambios en la frecuencia de desove y en la densidad larvaria. En sistemas neotropicales, estos eventos suelen asociarse con reducciones en la abundancia de huevos y larvas, lo que afecta el reclutamiento de especies migradoras (Cataldo et al., 2022).

El fenómeno ENSO influye en la reproducción de peces, particularmente en la de aquellos cuyo ciclo reproductivo está asociado al ciclo hidrológico, como los peces migradores. En el río Sinú, estos efectos se observan a los seis meses, pero de manera más marcada entre uno y dos años después de que ocurra el fenómeno climático. Durante episodios de El Niño, se altera significativamente el régimen hidrológico, lo que provoca una disminución de las precipitaciones

y, en consecuencia, de los caudales; todo ello reduce el número de desoves y la densidad de ictioplancton en el río Sinú (Díaz, 2022). Este patrón coincide con lo reportado por Kerguelen-Durango & Atencio-García (2015) para el río Sinú, quienes señalan una reducción de los picos reproductivos durante eventos de El Niño y una intensificación de los desoves en periodos asociados a La Niña, lo que sugiere respuestas reproductivas dependientes del contexto hidrológico regional y de la conectividad río-ciénaga.

CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA

El análisis geográfico comparativo, aguas abajo de la HU, de las áreas de desove permite sugerir al sector El Toro-Carrizola como el tramo del río con mayor concentración de la actividad reproductiva, mientras que los tramos anteriores y posteriores muestran dinámicas distintas, con funciones de zonas de transición o compensación espacial asociadas a factores estructurales, hidráulicos y geomorfológicos.

Los resultados obtenidos en este estudio sugieren una contracción del núcleo reproductivo histórico y una extensión secundaria hacia el tramo medio de la zona de desove. Este comportamiento podría obedecer a variaciones hidrológicas, a modificaciones de la conectividad longitudinal o a cambios en la calidad del hábitat.

La distribución de los desoves a lo largo de los 125,2 km de la zona de estudio y su presencia en 37 tramos muestran que la reproducción de las especies migradoras se desarrolla en diferentes sectores del río aguas abajo de la hidroeléctrica. Este comportamiento evidencia la importancia de considerar el río como un sistema conectado a lo largo de toda la cuenca, en el que las condiciones de los distintos tramos pueden estar relacionadas con el desarrollo de los procesos reproductivos. Por tanto, esta distribución espacial constituye un elemento relevante

para orientar acciones de monitoreo, conservación y manejo de los sectores que presentan actividad reproductiva.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la evaluación de los efectos de la variabilidad climática y factores antrópicos sobre la abundancia larval de los peces migradores del río Sinú entre 2001-2022, permiten concluir que:

La dinámica reproductiva de los peces migradores del río Sinú es alterada por factores climáticos presentes en toda la cuenca. Los efectos del fenómeno ENSO sobre el aumento o la disminución de la abundancia larval solo se reflejan entre uno y dos años después del evento climático.

Cada una de las especies enfrentan de manera distinta las variables ambientales, los Characiformes (bocachico y dorada) muestran patrones reproductivos (picos reproductivos) muy parecidos, pero distintos de los Siluriformes (bagre blanco y barbul), provocados por los estímulos finales como los pulsos de agua, el día del pico reproductivo para bocachico es el día 134 (calendario), para dorada es el día 136, para bagre blanco es el día 141, igual que para barbul.

La temperatura del río adecuada para el desove de los peces migradores es 24.2°C , mientras que el caudal adecuado para la reproducción de bocachico es de $347\text{ m}^3/\text{s}$, para dorada de $209\text{ m}^3/\text{s}$, para bagre blanco de $680\text{ m}^3/\text{s}$ y para barbul de $501\text{ m}^3/\text{s}$.

El mayor número de desoves ocurre entre abril y mayo y se considera que el comportamiento reproductivo de los peces migradores del río Sinú es monomodal. Los desoves

ocurren, aguas abajo, entre el dique de la represa (0.0 km) y Gallo Crudo (125.2 km); siendo el sector entre el tramo El Toro (17.9 km) y Carrizola (50.1 km), donde se registró el 44.4% de los desoves en el periodo evaluado.

El análisis de la variación espacial de los desoves mediante el índice de Herfindahl-Hirschman mostró cambios en la distribución del núcleo reproductivo del río Sinú durante el periodo 2001–2022. Durante la fase inicial (2001–2006) y la fase intermedia (2007–2014), los desoves mostraron una distribución relativamente más dispersa ($HHI = 0.304$ y 0.287 , respectivamente), mientras que en la fase actual (2015–2022) se observó un incremento en la concentración espacial ($HHI = 0.352$). Este comportamiento sugiere una contracción del núcleo reproductivo hacia el tramo El Toro – Carrizola, que sigue concentrando la mayor proporción de eventos reproductivos de las especies migradoras evaluadas; aun así, el centroide de la zona de desoves no muestra un desplazamiento significativo (26 a 28 km aguas abajo).

Desde 1991 hasta 2015, el área promedio de la superficie del agua de la CCBS se redujo en más de 15.000 ha (40%), mientras que los humedales de Montería perdieron el 51% de su área entre 1985 y 2011. De manera contraria a estas pérdidas, la ciénaga de Betancí aumentó su área pasando a tener 1695,3 ha, lo cual refleja un incremento del 341 % entre 1985 a 2020, debido a que la ciénaga se comporta como una represa artificial.

La Hidroeléctrica Urrá es uno de los factores más relevantes en la alteración de la dinámica reproductiva de los peces migratorios, debido a la modificación del régimen

hidrológico de la cuenca, lo que se agrava con la contaminación, la pérdida de áreas inundables y la sobrepesca.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la necesidad de implementar estrategias integrales que permitan alcanzar la conectividad ecológica y mitigar los impactos causados sobre la ictiofauna del río Sinú.

Recuperar la conectividad entre el río Sinú y las ciénagas o planos inundables mediante la eliminación de barreras artificiales, como diques y jarillones, dentro de las mismas.

Aumentar el número de Box Culvert en el tramo de la vía Lorica-Cotocá Arriba, ya que en la margen izquierda de la vía quedan represados alevinos que terminan siendo capturados por lugareños y depredados por aves.

Declarar la zona de desove como área protegida, con el fin de evitar la sobrepesca, la degradación de la ronda hídrica y el vertimiento de agentes contaminantes (agrícolas y mineros), sobre los afluentes a esta zona.

Promover la gobernanza y la gestión integrada de la cuenca, articulando a las autoridades ambientales (CVS), al sector energético (Urrá), al sector agropecuario y a las comunidades locales.

REFERENCIAS

- Acosta, K. (2013). La economía de las aguas del río Sinú.
- Albonis Pastrana, D. A., Tamayo Avilés, M. C., Aguilar Jiménez, T. I., & Torres Ospino, J. L. (2025). Afectaciones ambientales y dinámicas socioeconómicas en el contexto de la Ciénaga Grande del Bajo Sinú: municipio de Momil, Córdoba, Colombia. Luna Azul.
- Arantes, C. C., Fitzgerald, D. B., Hoeinghaus, D. J., & Winemiller, K. O. (2019). Impacts of hydroelectric dams on fishes and fisheries in tropical rivers through the lens of functional traits. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 37, 28-40.
- Argel Petro, S. M. (2022). Análisis de la pérdida del caudal de Caño Bugre, un estudio local natural de la influencia ambiental y territorial, contexto histórico y aporte al manejo ambiental.
- Arratíbel González, P. (2022). Efecto del calentamiento global sobre la reproducción de los peces (Trabajo de Grado, Universidad de León). Repositorio Institucional de la Universidad de León.
- Atencio-García, V. (2000). Impactos de la Hidroeléctrica Urrá en los peces migratorios del río Sinú. *Temas agrarios*, 9, 29-40.
- Atencio, V. (2001). Producción de alevinos de especies nativas. *Revista MVZ Córdoba*, 6(1), 9-14.
- Atencio-García V, Mercado-Fernández T, Kerguelén-Durango E. (2004). Evaluación del desempeño reproductivo de las principales especies reofílicas del río Sinú. En: *Memorias*

Neolimnos; 2004 Sep 6-9; Montería, Córdoba. Neolimnos/Universidad Pontificia Bolivariana.

Atencio-García, V. J., Hernández-Muñoz, J., & Pardo-Carrasco, S. C. (2008). Descripción morfológica del tubo digestivo de juveniles de rubio *Salminus affinis* (Pisces: Characidae). *Acta Biológica Colombiana*, 13(3), 99-111.

Atencio-García V, Mercado-Fernández T, Kerguelén-Durango E. (2011). Desempeño reproductivo de los peces reofílicos del río Sinú post-operación de la hidroeléctrica Urrá: 2000-2010. En: Memorias XI Congreso Colombiano de Ictiología, II Encuentro Suramericano de Ictiólogos; 2011 May 8-13; Ibagué, Colombia. Acictios7 Universidad del Tolima.

Atencio, V., Kerguelén, E., Naar, E., & Petro, R. (2013). Desempeño reproductivo del bocachico *Prochilodus magdalenae* inducido dos veces en un mismo año. *Revista MVZ Córdoba*, 18(1), 3304-3310.

Atencio-García, V., Pertuz-Buelvas, V., Kerguelen-Durango, E., Espinosa-Araujo, J., Cano-Cuello, R., y Mercado-Fernández, T. (2022). Evaluación de la temporada reproductiva de los peces reofílicos aguas arriba y abajo de la Hidroeléctrica Urrá en el río Sinú, rescate de larvas de peces reofílicos en el medio natural y adquisición de alevinos de bagre blanco *Sorubim cuspicaudus* y dorada *Brycon sinuensis*.

Baleta-Anaya, W., Garay-Román, Y., Consuegra-Solorzano, A., Vidal-Durango, J., Buelvas-Soto, J., & Marrugo-Negrete, J. (2022). Methylmercury (MeHg) in the most consumed

- fish in a municipality of La Mojana, Colombia. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 25(2).
- Banco de la República - CCI. (2025). *La economía de las aguas del departamento de Córdoba: capturas desembarcadas por especie en la cuenca del río Sinú entre 2006 y 2009*.
- Barrera Villalba, Y. (2017). Evaluación del impacto socio económico de la construcción y operatividad del embalse Urrá I en los pescadores de Tierra Alta, Córdoba.
- Biran, J., Golan, M., & Levavi-Sivan, B. (2024). Endocrine control of reproduction, fish.
- Camacho Cubillos, X. (2020). Análisis de las dinámicas socioambientales que influyen en la transformación de la cobertura terrestre-Ciénaga Grande del Bajo Sinú.
- Cataldo, D., Leites, V., Bordet, F., & Paolucci, E. (2022). Effects of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on the reproduction of migratory fishes in a large South American reservoir. *Hydrobiologia*, 849(15), 3259-3274.
- Chen, Q., Li, Q., Lin, Y., Zhang, J., Xia, J., Ni, J., et al. (2023). Impactos de la construcción de represas fluviales en el hábitat de los peces y medidas de conservación asociadas. *Reseñas de Geofísica*, 61, e2023RG000819.
- Clavijo-Bernal, O. F. (2021). El agua y la participación como ejes articuladores del territorio. Consideraciones a partir de Urrá y su incidencia sobre la cuenca del río Sinú. *Gestión y Ambiente*, 24.

Cordy, P., Veiga, M. M., Salih, I., Al-Saadi, S., Console, S., Garcia, O., ... & Roeser, M. (2011).

Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Science of the Total Environment*, 410, 154-160.

Corte Constitucional de Colombia. (1999). Sentencia T-194/99, 28 de abril de 1999. Acción de

tutela contra la Corporación Eléctrica de la Costa Atlántica CORELCA y la Empresa

Multipropósito Urrá S.A. Recuperado de

<https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/1999/t-194-99.htm>

CVS. (2022). Interactúa con la información y el contenido de las Áreas Protegidas en Córdoba.

de León Otero, F. A., & Llain Torrado, N. A. (2017). Evaluación de alteración de la conectividad

hidráulica entre el río Sinú y el complejo de ciénagas de Lorica a través del caño Bugre por medio de un modelamiento en Hec-Ras.

Del Carmen, V. M. L. (2023). Evaluación de la contaminación y riesgo ecológico potencial por

metales pesados en sedimentos de la Ciénaga Grande del Bajo Sinú, transecto Lorica–

Purísima, departamento de Córdoba.

Díaz Barrios, R. D. J. (2024). Estado y desempeño de *Pimelodus yuma* (Villa-Navarro & Acero,

2017) en el embalse de Urrá y su área de influencia (alto Sinú, Colombia).

Díaz Carvajal, AD (2022). Variabilidad hidroclimática en la cuenca del río Sinú 1981-2020.

Duponchelle, F., Isaac, V. J., Rodrigues Da Costa Doria, C., Van Damme, P. A., Herrera-R, G.

A., Anderson, E. P., ... & Castello, L. (2021). Conservation of migratory fishes in the

Amazon basin. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 31(5), 1087-1105.

DoNascimento C, Herrera-Collazos EE, Herrera-R GA, Ortega-Lara A, Villa-Navarro FA, Usma-Oviedo JS, Maldonado-Ocampo JA. (2017). Checklist of the freshwater fishes of Colombia: a Darwin Core alternative to the updating problem. *ZooKeys* 708: 25-138.
<https://doi.org/10.3897/zookeys.708.13897>

El Tiempo. (2001). Un Atentado Ecológico Contra Ciénaga De Betancí.
<https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-438295>

FAO. (2024). Influencia del cambio climático en los recursos pesqueros de la región árabe
<https://www.fao.org/in-action/globefish/fishery-information/resource-detail/es/c/412140/>

Farò, D., & Wolter, C. (2024). *Linking functional habitat and fish population dynamics modeling to improve river rehabilitation planning and assessment. Journal of Environmental Management*, 2024.

Galeano, C. A. B., Álvarez, K. L., & Palencia, P. A. E. (2017). Análisis comparativo de indicadores de la calidad del agua del río Sinú municipio de Montería, Córdoba. *Revista MODUM*, 1, 55-64.

González, J. D. B., Lucero, G. F., Núñez, L. G., & Rodríguez, A. Á. (2024). Aspectos reproductivos en peces. *Inventio*, 1-8.

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2019). Resumen para responsables de políticas en Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P. et al. (eds.) El océano y la criosfera en un clima cambiante del IPCC. Mónaco: IPCC.
- Hernández-Álvarez, U., Pinedo-Hernández, J., Paternina-Urbe, R., & Marrugo-Negrete, J. L. (2021). Evaluación de la calidad del agua en la Quebrada Jui, afluente del río Sinú, Colombia. SciELO Colombia.
- IDEAM. (s. f.). Conceptos básicos de cambio climático. Ministerio de Ambiente de Colombia.
- Instituto Nacional de Salud. (2017). Evaluación de mercurio en peces de consumo humano en la región de la Mojana. Recuperado de <https://www.ins.gov.co>
- Jiménez-Segura, L. F., & Palacio, M. E. (2020). Fragmentación del hábitat y sus efectos en la migración de peces reofílicos del río Magdalena. *Acta Biológica Colombiana*, 25(3), 27-35.
- Kerguelén-Durango, E., & Atencio-García, V. (2013). Evaluación del desempeño reproductivo de las principales especies reofílicas del río Sinú bajo los efectos de la operación de la hidroeléctrica Urrá
- Kerguelén-Durango, E., & Atencio-García, V. (2015). Environmental characterization of the reproductive season of migratory fish of the Sinú river (Córdoba, Colombia). *Revista MVZ Córdoba*, 20(3), 4766-4778.

- Lans, E., Negrete, J. L. M., & Díaz, B. (2008). Estudio de la contaminación por pesticidas organoclorados en aguas de la Ciénaga Grande del Valle Bajo del río Sinú. *Temas Agrarios*, 13(1), 49-56.
- Lans-Ceballos, E., Lans-Cuesta, E. S., Doria, O. F., Jofré, L. G. (2023). Water quality and heavy metal levels in the Sinú River, a drinking water source in the Colombian Caribbean. *Universitas Scientiarum*, 28(2), 165-182.
- Lorduy González, J. F., & Vellojín Muñoz, K. E. (2023). Índice de idoneidad de hábitat del bocachico (*Prochilodus magdalenae*; Steindachner 1879) en la ciénaga grande del Bajo Sinú y Ciénaga de Betancí, Córdoba, mediante la implementación de un modelo hidrodinámico y de calidad del agua.
- Madariaga-Mendoza, D., Marrugo-Negrete, J., & Atencio-García, V. (2023). Effect of inorganic mercury on semen quality, embryo and larval development of bocachico *Prochilodus magdalenae*. *Fishes*, 8(9), 445.
- Mahecha-Jiménez, O. J., Dumar-Rodríguez, J. C., & Pyrcz, T. W. (2011). Efecto de la fragmentación del hábitat sobre las comunidades de Lepidoptera de la tribu Pronophilini a lo largo de un gradiente altitudinal en un bosque andino en Bogotá (Colombia)(Lepidoptera: Nymphalidae, Satyrinae). *SHILAP Revista de lepidopterología*, 39(153), 117-126.
- Marrugo-Negrete, J., Navarro-Frómeta, A., & Ruiz-Guzmán, J. (2015). Concentraciones de mercurio total en peces del embalse Urrá (río Sinú, Colombia). Seis años de monitoreo. *Revista MVZ Córdoba*, 20(3), 4754-4765.

- Martínez-Acosta, L., Medrano-Barboza, J. P., López-Ramos, Á., Remolina López, J. F., & López-Lambraño, Á. A. (2020). SARIMA approach to generating synthetic monthly rainfall in the Sinú river watershed in Colombia. *Atmosphere*, 11(6), 602.
- Mejía, D., Soto, V. C., Martínez, Z. Y., Torres, A., & Yances, A. (2018). Efectos ambientales ocasionados por la reducción de la superficie inundable del complejo cenagoso del bajo Sinú. Córdoba-Colombia. Miembros Activos Invawet, 389.
- Mejía Ávila, D., Soto Barrera, V., & Martínez Lara, Z. (2019). Spatio-temporal modelling of wetland ecosystems using Landsat time series: case of the Bajo Sinú Wetlands Complex (BSWC) – Córdoba – Colombia. *Annals of GIS. Spatio-temporal modelling of wetland ecosystems using Landsat time series: case of the Bajo Sinú Wetlands Complex (BSWC) – Córdoba – Colombia. Annals of GIS.*
- Mittal, N., Bhawe, A. G., Mishra, A., & Singh, R. (2016). Impact of human intervention and climate change on natural flow regime. *Water resources management*, 30(2), 685-699.
- Mojica-Corzo, J. I., Usma-Oviedo, J. S., Álvarez-León, R., & Lasso-Alcalá, C. A. (2012). Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia. *Bogotá DC: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.*
- Mojica, J. I., Castellanos, C., Usma, J. S., & Álvarez, R. (2021). Impacto de las aguas residuales en la biodiversidad de peces del Magdalena. Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales.
- Olaya-Nieto, C. W., Brú-Cordero, S. B., Segura-Guevara, F., & Tordecilla-Petro, G. (2004). Estimación de los parámetros biológicos básicos de peces comerciales del río Sinú-Fase

- I. Informe final. Lorica (Colombia): Laboratorio de Investigación Biológico Pesquera (LIBP). Departamento de Acuicultura, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de Córdoba.
- Patiño, J. E. (2016). Análisis espacial cuantitativo de la transformación de humedales continentales en Colombia. *Biota Colombiana*, 17, 86-105.
- Ruiz-Guzmán, J. A., Marrugo-Negrete, J. L., & Díez, S. (2014). Human exposure to mercury through fish consumption: Risk assessment of riverside inhabitants of the Urrá reservoir, Colombia. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 20(5), 1151-1163.
- Ruiz-Guerra, C., & Cifuentes-Sarmiento, Y. (2021). Aves acuáticas de la cuenca baja del río Sinú, Córdoba, Caribe Colombiano. *Biota colombiana*, 22(2), 88-107.
- Salas Padilla, E. S. (2019). Caracterización de los ecosistemas fundamentales y los servicios ecológicos y ecosistémicos que proveen a la ciudad de Montería.
- Santhakumar, K. (2024). Neuroendocrine regulation of reproduction in fish—Mini review. *Aquaculture and Fisheries*, 9(3), 437-446.
- Šmejkal, M., Bartoň, D., Blabolil, P., Kolařík, T., Kubečka, J., Sajdlová, Z., ... & Brabec, M. (2023). Diverse environmental cues drive the size of reproductive aggregation in a rheophilic fish. *Movement Ecology*, 11(1), 16.
- Solano JM, Otero R, González A, Zappa F. (1986). Migración de peces del Río Sinú. Informe final. Montería (Col.). Universidad de Córdoba, Corelca.

Sousa, T. P. de, Bialetzki, A., & Mateus, L. A. F. (2023). Dynamics of fish larvae recruitment in the hydrographic basin of the Paraguay River in western Brazil. *Neotropical Ichthyology*, 21(1), e220034.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2026). Reporte de afectación temporada de lluvias – Departamento de Córdoba.
<https://www.gestiondelriesgo.gov.co>

URRÁ S.A. E.S.P. (2020). *Monitoreo pesquero del embalse Urrá I*.

URRÁ S. A. E. S. P. (2021). *Plan de manejo ambiental y plan de monitoreo y seguimiento de la Central Hidroeléctrica Urrá*. Documento técnico presentado ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

URRÁ S.A. E.S.P. (2024). *Informe de sostenibilidad y programas de repoblamiento pesquero*.

Valderrama Nitola, H. D. (2021). Identificación de impactos del cambio climático en cuerpos superficiales de agua dulce de la Región Caribe colombiana.

Van Looy, K. et al. (2022). *Freshwater fish biodiversity restoration in floodplain rivers requires connectivity and habitat heterogeneity at multiple spatial scales*. *Science of the Total Environment*, 838, 156509.

Vargas Licon, S. P., & Marrugo Negrete, J. L. (2019). Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 232-242.

- Vargas, R. D. S. (2015). Conflictos Socioambientales En La Cuenca Baja Del Río Sinú, Colombia. *Revista Direitos Emergentes Na Sociedade Global*, 4(1), 23-43.
- Vélez Flórez, A. J. (2009). Propuesta metodológica para la evaluación y cuantificación de la alteración del régimen de caudales de corrientes alteradas antrópicamente, caso Urrá I (Doctoral dissertation).