



Análisis de procesos hidrodinámicos en ecosistemas acuáticos para la gestión del recurso hídrico: enfoque desde una modalidad piloto de Trabajo de Grado con cursos de posgrado en Ingeniería

Katherine González Ossa

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera civil

Modalidad de Práctica

Trabajo de Grado

Asesor

Carlos Alberto Palacio Tobón, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería civil

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	(González, 2025)
Referencia	González, K. (2025). <i>Análisis de procesos hidrodinámicos en ecosistemas acuáticos para la gestión del recurso hídrico: enfoque desde una modalidad piloto de Trabajo de Grado con cursos de posgrado en Ingeniería</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de la autora y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. La autora asume la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Este trabajo representa para mí mucho más que el cierre de un semestre: es la culminación de un proceso largo y profundamente significativo al que he dedicado años de esfuerzo, aprendizaje y crecimiento. Aunque se presenta como el informe final de mi práctica académica, en realidad encierra todo el camino recorrido en mi formación como ingeniera civil, con sus desafíos, logros, dudas, aciertos y las muchas lecciones que han forjado la persona que soy hoy.

Quiero comenzar expresando mi gratitud a los docentes de los cursos de posgrado por compartir con tanta generosidad y vocación sus conocimientos, por su paciencia y comprensión. Agradezco de manera muy especial al profesor Carlos Alberto Palacio Tobón, asesor de mi práctica académica, por su cercanía, su orientación, su disposición y, sobre todo, por siempre creer en mí y en mis capacidades.

A la profesora María Cristina Cardona, al profesor Guillermo Sepúlveda, a la vicedecana Diana Catalina Rodríguez y al decano Julio César Saldarriaga, gracias por acompañar este proceso y por confiar en mi participación. También agradezco a mis compañeros de los cursos de posgrado por construir un entorno de aprendizaje colaborativo. A mis amigos del pregrado, gracias por compartir este viaje, por estar presentes y por no soltarme en los momentos difíciles. A cada uno de mis profesores del pregrado, mi sincero agradecimiento: cada curso aportó algo valioso a este resultado.

A mi familia, gracias por su amor incondicional, por su paciencia, por sostenerme en silencio tantas veces, y por su fe constante en mí durante tantos años. Finalmente, a Santiago Garcés Moncada, mi compañero de vida: gracias infinitas. Gracias por acompañarme con tanta generosidad, por apoyarme en cada etapa y por involucrarte de corazón en cada uno de mis sueños. Gracias por animarme y por ser parte esencial de este logro, que también es tuyo.

A quienes me escucharon, me alentaron, me acompañaron o simplemente estuvieron. Gracias, de todo corazón.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Objetivos	11
2.1 Objetivo general	11
2.2 Objetivos específicos	11
3. Marco teórico	12
4. Metodología	17
4.1 Procesos costeros	17
4.2 Limnología	19
5. Análisis de resultados	22
5.1 Evidencias del curso Procesos costeros	22
5.2 Evidencias del curso Limnología	59
6. Conclusiones y recomendaciones	94
Referencias	98
Anexos	106

Lista de tablas

Tabla 1 Mediciones morfológicas de tres muestras de <i>Eichhornia crassipes</i>	62
Tabla 2 Metodología para el análisis de pigmentos totales	75
Tabla 3 Estado trófico de Vollenweider	79
Tabla 4 Índice de estado trófico de Carlson	79
Tabla 5 Coeficiente a	80
Tabla 6 Cotejo de parámetros fisicoquímicos con normas de calidad de agua superficial	87
Tabla 7 Indicadores del estado trófico	89
Tabla 8 Datos estadísticos de producción primaria	90
Tabla 9 Biota acuática presente en el lago	90

Lista de figuras

Figura 1 Soluciones para la protección de la línea de costa	42
Figura 2 Vista en planta, antes y después de la instalación del arrecife artificial	49
Figura 3 Vista del perfil longitudinal, antes y después de la instalación del arrecife artificial	50
Figura 4 Vista de corte transversal, antes y después de la instalación del arrecife artificial	50
Figura 5 Metodología resumida	61
Figura 6 Ubicación de la microcuenca de la quebrada la Vega	73
Figura 7. A. Predicción del estado trófico. B. Distribución de probabilidad a partir del fósforo total. C. A partir de la clorofila-a	77
Figura 8 A. Pendientes. B. Clasificación climática de la microcuenca	81
Figura 9 Cambio de cobertura terrestre del año 2000 al 2016	82
Figura 10 Ciclo anual de precipitación, estación Granja Experimental el Nus, periodo 2010-2025	83
Figura 11 Componentes del balance hídrico	83
Figura 12 Variables fisicoquímicas medidas <i>in situ</i> a tres profundidades	85
Figura 13 Floración de algas en el lago	85
Figura 14 Limnocorrales de peces en el lago	86
Figura 15 Resultados del modelo para estimar pigmentos totales	88
Figura 16 Biota y red trófica en el lago	91

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AISI	American Iron and Steel Institute
B&J	Battjes and Janssen
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
et al.	<i>et alii</i> (y otros)
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans
GLI	Green Leaf Index
LACAT	Lagos Cálidos Tropicales
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
p.	página
PEG	Polietilenglicol
pp.	páginas
RGB	Red, Green, Blue
S.A.S.	Sociedad por Acciones Simplificada
s.f	sin fecha
TSI	Trophic State Index
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

Resumen

Este informe presenta los resultados obtenidos a través de la implementación de la modalidad coterminal de Trabajo de Grado, constituyéndose como evidencia de un caso exitoso dentro del plan piloto impulsado por la Facultad de Ingeniería para articular el pregrado y el posgrado mediante un enfoque metodológico mixto. El objetivo principal fue abordar fenómenos limnológicos y costeros empleando herramientas cuantitativas y cualitativas, con el propósito de fortalecer capacidades técnicas a través de una formación teórico-práctica.

El curso “Procesos Costeros” se desarrolló mediante la ejecución de cuatro proyectos. Inicialmente, se recopiló y analizó información oceanográfica de la Bahía de Turbo como zona de estudio. Posteriormente, se modelaron sus procesos hidrodinámicos utilizando Delft3D, se diseñaron soluciones basadas en infraestructura verde para la protección costera y, finalmente, se evaluó una de estas soluciones con el software XBeach para estimar su impacto. Por su parte, el curso de “Limnología” incluyó actividades de laboratorio y campo centradas en la caracterización biológica y fisicoquímica de ecosistemas acuáticos. Se estudiaron especies como la planta *Eichhornia crassipes*, se desarrollaron seminarios sobre fenómenos como la eutrofización y se realizó una salida de campo a la Estación Piscícola San José del Nus para la recolección y análisis de muestras hídricas, cuyos resultados se integraron en un informe colaborativo con enfoque interdisciplinario y científico.

Este trabajo consolidó conocimientos teóricos y prácticos en modelación ambiental, diseño de soluciones costeras, análisis ecológico y gestión del recurso hídrico, aportando a mi formación profesional para enfrentar problemáticas reales desde una perspectiva técnica, ambiental y sostenible.

Palabras clave: procesos costeros, limnología, articulación, gestión sostenible, ecosistemas acuáticos.

Abstract

This report presents the results obtained through the implementation of the coterminal thesis modality, serving as evidence of a successful case within the pilot program led by the Faculty of Engineering to integrate undergraduate and graduate studies through a mixed methodological approach. The main objective was to address limnological and coastal phenomena using both quantitative and qualitative tools, with the aim of strengthening technical skills through a theoretical-practical education.

The course “Coastal Processes” was developed through the execution of four interconnected projects. Initially, oceanographic and environmental data from the Bay of Turbo were collected and analyzed as the selected study area. Subsequently, hydrodynamic processes were modeled using the Delft3D software; nature-based solutions for coastal protection were designed; and finally, one of these solutions was evaluated using XBeach to assess its potential impact.

Meanwhile, the “Limnology” course included both laboratory and fieldwork activities focused on the biological and physicochemical characterization of aquatic ecosystems. Studies were conducted on species such as the aquatic plant *Eichhornia crassipes*, seminars were developed on phenomena such as eutrophication, and a field visit was carried out to the San José del Nus Fish Farming Station for the collection and analysis of water samples. These results were integrated into a collaborative report with an interdisciplinary and scientific approach.

This work consolidated theoretical and practical knowledge in environmental modeling, coastal solution design, ecological analysis, and water resource management, contributing to my professional training in addressing real-world challenges from a technical, environmental, and sustainable perspective.

Keywords: coastal processes, limnology, articulation, sustainable management, aquatic ecosystems.

1. Introducción

Este Trabajo de Grado se enmarca en la nueva modalidad coterminal de articulación entre pregrado y posgrado que, para el semestre 2025-1, es impulsada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia como un plan piloto. La estructura de este texto partirá de la definición de los objetivos del proyecto, tanto los específicos como el objetivo general del mismo, esto desde la articulación del pregrado en Ingeniería civil con dos cursos del banco de posgrado afines a la línea de Recursos Hídricos, teniendo que, para este caso particular, se matricularon los cursos de “Procesos costeros” y “Limnología”.

En este trabajo final, se presenta la metodología aplicada a la realización de esta práctica académica y una descripción detallada sobre las actividades realizadas durante el semestre. Así mismo, en el análisis de los resultados se tendrán dos secciones de desarrollo donde, por un lado, se unificarán las actividades realizadas en el curso de Limnología durante el semestre, mientras que, por el otro, se abordarán en conjunto los cuatro proyectos del curso Procesos costeros, realizados de forma conectada y progresiva en el aprendizaje de clase bajo un caso de estudio común. También se tendrá un espacio de conclusiones en el que se analizarán los resultados de dichos proyectos, confirmando allí las proyecciones acertadas que se hicieron, los ajustes que se requirieron para la culminación de los procesos, los hallazgos particulares de relevancia y la pertinencia de esta modalidad como alternativa válida para el cumplimiento de las prácticas académicas en la Facultad de Ingeniería.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar las dinámicas hidráulicas en ecosistemas acuáticos con el fin de comprender su impacto ambiental y aportar herramientas para su gestión sostenible. Este análisis se desarrollará en el marco de la nueva modalidad de Trabajo de Grado, integrando los cursos de posgrado “Procesos costeros” y “Limnología” como base metodológica y conceptual.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar y analizar los principales procesos físicos que afectan los ecosistemas costeros y su relación con el desarrollo ambiental, a partir de los conocimientos adquiridos en el curso de “Procesos Costeros”.
- Comprender la dinámica de los ecosistemas acuáticos lénticos, considerando sus características físicas, químicas y biológicas, con base en los contenidos del curso de “Limnología”.
- Proponer estrategias de manejo sostenible del recurso hídrico basadas en el análisis de los procesos hidrodinámicos estudiados, integrando los aprendizajes obtenidos en ambos cursos de posgrado.

3. Marco teórico

La articulación universitaria entre programas de pregrado y posgrado se ha convertido en un tema de interés para la educación superior en Latinoamérica, representando así una innovación como modalidad de prácticas académicas. Según Molina (2022), docente e investigador de la Universidad de Antioquia: “El tema de la articulación del pregrado y el posgrado ha sido objeto de estudio e investigación, en especial para comprender los procesos organizativos e institucionales que inciden en la transición de un nivel a otro. Sin embargo, no son muchas las referencias de ejercicios en esa dirección” (p. 3); así mismo el autor menciona que en Colombia solo se cuenta con tres instituciones de educación superior que implementan este tipo de articulación en sus currículos oficiales (Ibidem, p. 5). Teniendo en cuenta lo anterior, es importante que la Universidad de Antioquia, desde la Facultad de Ingeniería, lance para el 2025-1 el proyecto pionero de prácticas académicas en modalidad coterminal, articulando los diferentes programas de pregrado con sus respectivos cursos compatibles en el banco de posgrados de la facultad, como una iniciativa que busca fortalecer y elevar la tasa de continuación de estudios posgraduales en los recién graduados de pregrado en las múltiples ingenierías ofertadas.

Esta propuesta de Trabajo de Grado, para aspirar al título de Ingeniera civil, se enmarca en dicha modalidad coterminal entre pregrado y posgrado, la cual consiste puntualmente en reconocer como práctica académica la aprobación de dos (2) cursos del banco de posgrado, afines al programa base del estudiante. Para mi caso particular, como estudiante de la Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería, de los ocho cursos optativos que se me ofertaron, elegí los cursos de “Procesos costeros” y “Limnología”, que forman parte de los cursos avanzados de la línea de Recursos Hídricos.

El programa oficial del curso de posgrado con código 2574037, realizado por Palacio et al. (2024), asociado a la materia de “Procesos costeros”, define que el curso:

Está diseñado para profundizar en el estudio de los fenómenos físicos que afectan nuestros océanos y costas. Este curso se enfoca en la modelación numérica y en la protección de costas mediante obras adaptativas a la naturaleza, proporcionando a los estudiantes las herramientas y conocimientos necesarios para abordar los desafíos actuales y futuros en la gestión costera. (p. 2)

Ofreciendo el siguiente contenido para el semestre 2025-1:

Unidad 1. Hidrología oceánica

- Generalidades oceánicas.
- El efecto Coriolis.
- La circulación atmosférica.
- La circulación oceánica.
- El fenómeno de la marea.

Unidad 2. Modelación

- Modelos de circulación oceánica.
- Introducción al Delft3D.
- Generación de la malla computacional.
- Generación de la batimetría.
- El módulo de corrientes.
- El módulo de olas.
- Acoplamiento olas-corrientes.
- Anidamiento corrientes-corrientes.
- El Dashboard.
- Estructuras con Delft3D.
- El modelo XBeach.

Unidad 3. Procesos costeros

- Procesos costeros: concepto playa.
- Erosión costera: factores antrópicos.
- Erosión costera: factores naturales.
- Modelo conceptual de equilibrio.

- Obras duras.
- Soluciones adaptativas. Soluciones basadas en la naturaleza.

Por otro lado, el programa oficial del curso de posgrado con código 2528209, realizado por Aguirre (2025), asociado a la materia de “Limnología”, define que el curso busca:

Ofrecer al estudiante de posgrado y doctorado en ingeniería del área ambiental los elementos conceptuales, metodológicos y las últimas tendencias en tanto la investigación de las aguas continentales para el aprovechamiento sostenible del recurso agua. (...) En este curso, se abordan algunos aspectos relevantes para el entendimiento del funcionamiento, desde la perspectiva ambiental, de los ecosistemas de agua dulce naturales y artificiales. (pp. 2-3)

Ofreciendo el siguiente contenido para el semestre 2025-1:

Unidad 1. Introducción a la limnología

- Presentación y justificación del contenido del curso.
- Contexto histórico de la limnología e importancia de la limnología en la ingeniería.

Unidad 2. Características morfométricas de un sistema lenítico

- La biogeografía de las aguas continentales.
- La geomática.
- La georreferenciación.
- Construcción de mapas batimétricos y los parámetros batimétricos.

Unidad 3. Características físicas del agua

- Luz y calor
- Los pigmentos en el agua.

- Factores abióticos.

Unidad 4. Ciclos de nutrientes

- Ciclos de gases en el agua.
- Ciclo del carbono en el agua.
- Ciclo del nitrógeno en el agua.
- Ciclo del fósforo en el agua.
- Ciclo del hierro en el agua.

Unidad 5. Métodos de campo y de laboratorio

- Fitoplancton.
- Zooplancton.
- Perifiton.
- Pleuston.
- Invertebrados.

Unidad 6. Aplicaciones ambientales

- Productividad en el agua y eutrofización.
- Contaminación acuática.
- Indicadores de deterioro ambiental.

Como se consigna en el Acuerdo Superior 1 de 1994, la investigación es uno de los ejes temáticos que componen la estructura dogmática de los procesos educativos bajo la filosofía de la Universidad de Antioquia. Además, el artículo 61 del Acuerdo Superior 418 del 2014 designa que el Comité Central de Prácticas y las vicerrectorías, en su rol de cogestoras, contarán con criterios claros para evaluar el proceso institucional de las prácticas en la universidad, y con instrumentos en los que quede consignada dicha evaluación, para que de esta forma se determine el cumplimiento del espíritu, del propósito y de los objetivos de la práctica académica como

requisito de grado. Dentro de estos criterios se define la elaboración de un informe o proyecto final y de la sustentación o socialización del mismo, siendo este un factor formal y de rigurosidad académica que le da la condición favorable como práctica académica para optar a algún título universitario.

Así, esta modalidad de práctica también busca que este informe sea un informe de gestión y un trabajo investigativo que se nutra de los aprendizajes obtenidos en ambos cursos de posgrado como una apuesta por la profesionalización y profundización teórico-práctica en los estudiantes de pregrado para fortalecer, por un lado, las capacidades profesionales y académicas, y, por otro lado, motivar la investigación y la continuación de estudios posgraduales. Puntualmente, en este caso particular se busca abordar los contenidos de los cursos “Procesos Costeros” y “Limnología”, los cuales, aunque tradicionalmente se han abordado de manera separada, comparten principios comunes de la línea de Recursos Hídricos.

Con ello, se espera no solo fortalecer las competencias profesionales, sino también aportar elementos relevantes para la discusión académica sobre las dinámicas ecológicas en cuerpos de agua.

4. Metodología

El desarrollo de esta práctica académica, bajo el proyecto piloto de la modalidad coterminal de Trabajo de Grado, se plantea desde un enfoque metodológico mixto, es decir que, para analizar el estudio cualitativo de los fenómenos limnológicos y costeros es necesario hacer uso de las herramientas cuantitativas de modelación y caracterización de procesos hidrodinámicos. Es gracias a esa necesidad conceptual y práctica que este proyecto sienta sus bases en la participación personal dentro de los cursos de posgrado matriculados, los cuales brindan todas las herramientas técnicas necesarias para abordar el problema de estudio desde distintas dimensiones.

De esta manera, la metodología desarrollada durante esta modalidad de práctica académica consiste en el cumplimiento de las actividades propias de cada curso, tales como prácticas de laboratorio, elaboración de artículos, realización de proyectos de modelación, exposiciones temáticas, lectura de material académico, salidas de campo, entre otras. Las actividades evaluativas de cada curso se detallarán a continuación para una mayor comprensión de las dinámicas de aprendizaje:

4.1 Procesos costeros

Proyecto 1

Esta actividad consistió en la elaboración de un informe y una presentación, con el objetivo de recopilar la información base necesaria para realizar una futura modelación hidrodinámica de corrientes y oleaje en una zona costera. Así, este proyecto abarcó la selección justificada de un área de estudio, obteniendo sus datos batimétricos y buscando antecedentes relevantes sobre la erosión y la sedimentación en la zona, además de obras de protección costera existentes. A partir de allí, se abordó la caracterización climática de la zona, incluyendo datos sobre precipitación, vientos y caudales de ríos cercanos. Adicionalmente, se incluyó un análisis de la dinámica oceánica, enfatizando en el oleaje, las corrientes, la salinidad y la temperatura. Finalmente, se consultaron los componentes armónicos de marea y los niveles del mar.

Proyecto 2

El segundo proyecto tuvo como propósito realizar la modelación numérica de procesos hidrodinámicos costeros con el software Delft3D, utilizando como base el área de estudio y la información recopilada en el Proyecto 1, dejando ver con esto la continuidad del proceso de aprendizaje en el curso. La actividad se dividió en tres módulos principales: El primero fue el módulo de corrientes, que incluyó una modelación forzada por viento y marea, una calibración de parámetros, un anidamiento entre un dominio amplio y otro de mayor resolución, y una modelación tridimensional del subdominio. El segundo módulo abordó la modelación del oleaje, primero en estado estacionario cambiando parámetros de calibración, y luego considerando variaciones temporales. Finalmente, el tercer módulo integró el acoplamiento entre olas y corrientes, mediante una modelación de las corrientes inducidas por el oleaje. Los resultados de todas las modelaciones fueron presentados en un informe y en una exposición.

Proyecto 3

En el tercer proyecto del curso se propuso una investigación de ingeniería conceptual orientada al diseño de soluciones innovadoras para la protección de la línea de costa, priorizando las alternativas verdes o las basadas en la naturaleza. Inicialmente, se seleccionaron tres soluciones representativas, las cuales fueron descritas detalladamente. Después, se eligió una de estas soluciones para ser adaptada al área de estudio, justificando su selección con base en las características geomorfológicas, condiciones de erosión, presencia de comunidades o ecosistemas sensibles, entre otros criterios. A partir de lo anterior, se planteó la intervención sobre un tramo definido de la línea de costa, incluyendo esquemas ilustrativos en planta, perfil y corte transversal que representaran tanto la situación actual como el escenario esperado. Además, se definieron dimensiones realistas para la obra, seleccionando materiales apropiados con base en la disponibilidad local de insumos, y se proyectó su realización teniendo en cuenta el personal necesario, la accesibilidad al sitio y los tiempos de ejecución. Este ejercicio permitió sentar las bases para su modelación en el Proyecto 4, donde se daría fin a la etapa de aprendizaje desde un ejercicio académico simulado de aplicación para un caso real de estudio con una problemática y una alternativa de solución.

Proyecto 4

Este proyecto se centró en la modelación numérica de la solución de protección costera desarrollada previamente en el Proyecto 3 mediante el uso del software XBeach. Para ello, se retomó la modelación hidrodinámica en Delft3D realizada en el Proyecto 2. A partir de la modelación del acoplamiento de oleaje y corrientes para una semana, se extrajeron datos específicos de altura de ola, periodo y dirección del oleaje, los cuales se utilizaron como condiciones de frontera en el modelo XBeach. En un primer momento, se realizó una simulación sin la intervención de la obra, incorporando procesos de transporte de sedimentos y evolución morfológica. Posteriormente, se implementó la solución propuesta, definiendo su ubicación y dimensiones. Por último, se compararon los resultados de ambas simulaciones en términos de altura de ola, campos de corrientes, transporte de sedimentos y dinámica morfológica, permitiendo evaluar el impacto de la solución costera sobre el área de estudio.

4.2 Limnología

Proyecto 1

Durante la primera parte del curso se desarrollaron una serie de prácticas de laboratorio orientadas a la caracterización biológica de especies acuáticas, enfatizando en el estudio del pleuston. La actividad central consistió en la observación detallada de la planta acuática *Eichhornia crassipes*, a partir de muestras suministradas en el laboratorio de hidrobiología sanitaria. Con estas plantas se realizaron descripciones morfológicas mediante observaciones macroscópicas, estereoscópicas y microscópicas, integrando fotografías, dibujos y registros de los datos. Como producto final de este proceso investigativo, se elaboró en equipos un artículo científico que abordó la morfología de la planta *Eichhornia crassipes*, así como la discusión sobre su posible conceptualización como un ecosistema en sí misma.

Proyecto 2

Esta actividad consistió en la preparación y presentación individual de un seminario académico, centrado en temas de investigación actuales y relevantes para el estudio de las aguas continentales. En este contexto, se me asignó el tema de la eutrofización, por tratarse de un fenómeno ecológico crítico que afecta tanto a sistemas lénticos como a ambientes marinos, y cuya comprensión es fundamental para la gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos. Finalizada la exposición, se llevó a cabo un conversatorio académico entre los asistentes, complementado con la redacción de un protocolo sobre la discusión, estando este texto a cargo de uno de los compañeros asistentes.

Proyecto 3

Otra de las actividades desarrolladas fue la redacción de un protocolo correspondiente al conversatorio posterior al seminario presentado por alguno de los compañeros, como un trabajo colaborativo entre pares académicos. Esta tarea tuvo como propósito fortalecer las habilidades de escucha activa, síntesis crítica y comunicación escrita en tiempo real. Para esta actividad fue necesario asistir al seminario, participar del diálogo posterior y, simultáneamente, elaborar un registro estructurado del conversatorio, a modo de relatoría. El protocolo debía consignar las principales aclaraciones y los aportes del expositor, las intervenciones de los participantes y las reflexiones generales que emergieron durante la discusión. Una vez finalizado el conversatorio, se debía leer el protocolo en voz alta frente al grupo y enviarlo de inmediato como evidencia de la actividad.

Proyecto 4

Como parte fundamental del curso, se realizó una salida de campo a la Estación Piscícola San José del Nus, con el propósito de recolectar datos que permitieran evaluar la calidad del agua y caracterizar el ecosistema acuático presente en el área de estudio. Durante esta jornada, cada equipo de 3 integrantes tomó 10 muestras del lago, para un total de 20 muestras recolectadas en el límite de la zona fótica, con el fin de estudiar la distribución de clorofila. Además, se midió la

transparencia del agua utilizando el disco Secchi, y en una estación adicional se registraron parámetros como conductividad, oxígeno disuelto, pH, radiación, temperatura, potencial óxido-reducción y concentración de dióxido de carbono, en distintos niveles de profundidad.

La salida fue precedida por una etapa de preparación metodológica rigurosa, en la que se capacitó a los estudiantes en el uso de los instrumentos de medición, se diseñaron las plantillas de registro y se calibraron los equipos de muestreo. Posteriormente, en el laboratorio, se llevó a cabo el análisis físico-químico de las muestras de agua y la observación microscópica de organismos vivos recolectados en el ecosistema visitado.

Toda esta experiencia culminó en la elaboración colaborativa de un informe grupal, el cual integró los datos recolectados en campo y los resultados de laboratorio, junto con aportes individuales derivados de los temas investigativos abordados por cada estudiante en su seminario académico. Dicho informe incluyó secciones sobre biogeografía, calidad del agua, análisis de clorofila, eutrofización, producción primaria, caracterización climática e hidráulica, contaminación, entre otros tópicos. La entrega final del informe se complementó con una exposición colectiva con invitados especializados, en la que se discutieron los hallazgos y se integraron las perspectivas de todos los participantes, consolidando así una visión amplia e interdisciplinaria del ecosistema analizado.

5. Análisis de resultados

Para el desarrollo de esta modalidad de práctica académica se había proyectado como resultado de aprendizaje una comprensión profunda y sólida de los procesos hidrodinámicos que ocurren en diversos ecosistemas acuáticos, los cuales hacen parte de mi línea de interés profesional como ingeniera civil. Este aprendizaje se consolidó a partir del trabajo académico realizado en los cursos de posgrado “Procesos costeros” y “Limnología”, los cuales ofrecen herramientas tanto teóricas como prácticas para abordar fenómenos ambientales desde distintos enfoques. Como resultado de esta experiencia, se elaboró el presente informe técnico en donde se pueden evidenciar todos los aprendizajes adquiridos en la calidad de las actividades realizadas en ambos cursos, demostrando la utilidad o pertinencia de esta experiencia como nueva modalidad de práctica académica. Es por eso que a continuación se presentarán detalladamente los resultados alcanzados en dichos cursos al aplicar la metodología definida previamente en este informe.

5.1 Evidencias del curso Procesos costeros

De acuerdo con la metodología de evaluación establecida por los docentes del curso, a lo largo del semestre se desarrollaron cuatro entregables calificables, orientados al análisis de procesos hidrodinámicos en un ecosistema costero. Estos productos incluyeron la caracterización de la zona de estudio, una modelación inicial de las condiciones hidrodinámicas, un ejercicio investigativo de ingeniería conceptual y una modelación enfocada en la implementación de soluciones de protección costera. En ese sentido, se seleccionó el Golfo de Urabá como lugar de interés para el desarrollo de los proyectos, específicamente la zona correspondiente a la Bahía de Turbo.

Proyecto 1. Bahía de Turbo

Selección del área de estudio

La Bahía de Turbo fue seleccionada como zona de estudio debido a su relevancia oceanográfica dentro del Golfo de Urabá. La razón inicial de escoger este sitio se debe a su proximidad al caño El Waffe, un cuerpo de agua que, según Chico (2024), está afectado por organismos que generan eutrofización, siendo este un tema de mi interés. Esta zona también destaca por la abundancia de estudios previos y datos disponibles, lo que facilita la caracterización del área.

El área escogida tiene una línea de costa de aproximadamente 10 kilómetros, al igual que su distancia mar adentro.

Datos batimétricos

Utilizando las cartas náuticas proporcionadas por el profesor Víctor Saavedra y los datos de batimetría descargados de GEBCO, se creó un modelo de elevación digital de la zona, el cual llega a 23 metros de profundidad oceánica aproximadamente.

Erosión

“La línea de costa que define la bahía de Turbo ha retrocedido 400 metros en los últimos 40 años, considerándose una tasa muy alta para este lapso de tiempo” (Duarte & Gómez, 2016, p. 3). En este sector, la erosión litoral ha afectado principalmente a los terrenos de la espiga de Punta las Vacas (20 metros por año), sobre los cuales se encuentran las playas e instalaciones turísticas de la ciudad, el aeropuerto y las instalaciones de la Armada Nacional (Correa & Vernet, 2004).

Estudios más recientes, como el de Paniagua (2013), muestran que en el costado de Punta las Vacas la tasa de erosión entre los años 1938 y 2009 es de 1,45 metros por año, mientras que en la punta se ha dado un proceso de acreción entre estos mismos años con una tasa de 3,49

metros por año. Por otro lado, Bustamante (2021) presenta unas tasas de erosión y acreción para Punta las Vacas (en estas mismas zonas) de 1,3 y 6,7 metros por año respectivamente.

Obras de protección costera

“Aunque se realizaron obras correctivas como muros y espolones para controlar la erosión de la línea de costa al norte de la espiga Punta las Vacas, estas estructuras no han probado ser eficaces para resolver el problema erosivo” (Duarte & Gómez, 2016, p. 3). Esto se debe a un análisis previo deficiente y a la falta de mantenimiento de las mismas (Correa & Vernet, 2004).

Sin embargo, actualmente hay un proyecto en curso que se trata de la creación de un puerto automatizado y multipropósito ubicado en la Bahía de Turbo. El Puerto Pisisí es un proyecto comprometido con el medio ambiente y el desarrollo socioeconómico, cuya zona de ubicación fue elegida por su bajo oleaje con el propósito de que las embarcaciones se protejan de los vientos alisios en temporada alta, garantizando la operación diaria, independiente y eficiente (Puerto Pisisí, s.f).

Sedimentación

Todas las áreas con manglar en el Golfo de Urabá se encuentran asociadas a deltas y a geoformas sedimentarias intermareales (Blanco et al., 2015). En el año 2016, Blanco nos presenta un mapa de coberturas vegetales en el sector Punta las Vacas en 2009, en el cual se aprecian varias zonas de manglar que pueden ser un indicador de la sedimentación, ya que “es posible que los sedimentos sean atrapados por las raíces de los mangles” (Blanco et al., 2013, p. 29).

Por otro lado, cercana a la Bahía de Turbo se encuentra la Bahía El Uno, la cual sí muestra un proceso de sedimentación debido a la formación del delta del río Turbo (Hernández et al., 2021). Según Duarte & Gómez (2016), este delta “constituye una barrera que impide la deriva litoral normal de sedimentos en sentido N-S hacia la bahía” (p. 3).

Ríos cercanos

Los ríos más cercanos a la Bahía de Turbo son el río Turbo y el río Guadualito, aunque no desembocan directamente en la zona escogida. Posada & Henao (2008) muestran que la descarga anual de sedimentos de estos ríos es de 0,73 metros por año y 0,31 metros por año respectivamente.

Para determinar sus valores de caudal se revisaron varios estudios. Lonin & Vásquez (2005) presentan valores de caudal de 2,3 metros cúbicos por segundo para el río Guadualito y de 5,5 metros cúbicos por segundo para el río Turbo. El Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas de la Universidad del Tolima [UT POMCA] Río Turbo Currulao, para el año 2017, indica que el río Guadualito tiene valores de caudal que fluctúan entre 7,93 litros por segundo para la época seca y 194,24 litros por segundo para la húmeda, mientras que el río Turbo tiene valores entre 64,72 litros por segundo y 194,24 litros por segundo para las mismas épocas. Un año después, UT POMCA Río Turbo Currulao actualiza los valores de caudal de estos ríos mostrando que el río Guadualito tiene un caudal mínimo de 0,001 metros cúbicos por segundo y máximo de 29,62 metros cúbicos por segundo, mientras que el río Turbo tiene un caudal mínimo de 0,27 metros cúbicos por segundo y uno máximo de 15,59 metros cúbicos por segundo.

Lonin & Vásquez (2005) mencionan además que el río Turbo tuvo una variación de caudal de 3,66 metros cúbicos por segundo multianual para un período de registro entre 1966 y 1993, variando alrededor de este valor con un mínimo multianual de 0,1 a 0,4 metros cúbicos por segundo debido a que, en la época seca, la boca del río está tapada por los sedimentos; y un máximo de 10 a 20 metros cúbicos por segundo, presentando los valores extremos hasta de 60, 70 o hasta 100 metros cúbicos por segundo.

Gómez et al. (2007) también mencionan que el caudal promedio multianual para el río Guadualito es de 2,73 metros cúbicos por segundo, con un caudal mínimo de 1 metro cúbico por segundo, el cual se presenta en los meses de febrero y marzo, mientras que los caudales en el período lluvioso varían entre 3 y 5 metros cúbicos por segundo, exceptuando el mes de septiembre en el cual los caudales se reducen a 2,5 metros cúbicos por segundo.

Descripción climática de la zona de estudio

“En el Golfo de Urabá se diferencian una época climática húmeda de abril a diciembre, y una media de enero a marzo” (Garizábal, 2007, como se citó en Nieto, 2011, p. 32). Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 24 grados Celsius a 32 grados Celsius en Turbo, donde la temperatura máxima promedio diaria es mayor de 31 grados Celsius en temporada seca y menor de 29 grados Celsius en temporada húmeda (Weather Spark, s.f).

Precipitación

El mes más nublado del año en Turbo es julio y el más despejado es enero. Sin embargo, el mes con más lluvia en Turbo es mayo alcanzando los 233 milímetros y el menos lluvioso es febrero, teniendo solo 66 milímetros (Weather Spark, s.f). Meteoblue (s.f) coincide con estos meses, mostrando que en mayo se alcanzan los 265 milímetros y en febrero apenas 40 milímetros. No obstante, Nieto (2011) afirma que las precipitaciones alcanzan los 271,3 milímetros en abril, siendo este el mes más lluvioso.

Vale la pena resaltar también lo expuesto por Invemar (2003), como se citó en Hernández et al. (2021):

Respecto a su clima, el golfo de Urabá se encuentra bajo la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual se desplaza hacia el sur, entre diciembre y abril, presentando la época de poca lluvia, cuando los promedios mensuales de precipitación se encuentran por debajo de 80 mm/mes, caracterizada por fuertes vientos alisios del nororiente; entre (...) mayo y noviembre, la ZCIT se desplaza al norte y se presenta la época de mucha lluvia, con valores por encima de 150 mm/mes, con vientos del sur y suroccidente de menor intensidad. (p. 13)

Vientos

Molina et al. (1992) y Montoya et al. (2008), como se citaron en Escobar (2011), mencionan que en el Golfo de Urabá “la época seca se caracteriza por vientos fuertes del noroeste

principalmente y en la época húmeda predominan los vientos del sur” (p. 331). Toro et al. (2019) confirman lo anterior ilustrando la velocidad y la dirección del viento en el Golfo de Urabá para los años 2011, 2013 y 2015. En su estudio se demuestra que en el primer trimestre del año se presentan los vientos de mayor magnitud, los cuales provienen del norte y del noroeste debido al paso de los vientos alisios; en el segundo trimestre se empiezan a registrar vientos del sur, en el tercero se evidencian los vientos de menor intensidad en dirección sur-norte y en el cuarto, estos vientos alcanzan su mayor intensidad. En la zona de la Bahía de Turbo, parecen mantener una intensidad de 3 metros por segundo durante todo el año.

Ahora bien, el mes más ventoso del año en Turbo es febrero, con una velocidad del viento de 6,6 kilómetros por hora; y el más calmado del año es julio, con una velocidad de 3,9 kilómetros por hora (Weather Spark, s.f). Meteoblue (s.f) muestra que las direcciones más predominantes del viento en esta zona son del suroeste y del norte.

Corrientes

Hernández et al. (2021) aportan lo siguiente:

Se han observado cambios en la dirección de la corriente con la profundidad, que sugieren la existencia de un patrón de circulación estuarino, con aguas superficiales que se dirigen hacia el norte del Golfo y aguas más profundas que se dirigen desde el mar Caribe hacia el sur del mismo. (p. 13)

“Las aguas superficiales siguen un patrón de circulación en la misma dirección de las manecillas del reloj, bordeando el costado oriental del golfo, y devolviéndose por el extremo opuesto una vez alcanzan el extremo sur del mismo” (Chevillot et al., 1993, como se citaron en Nieto, 2011, pp. 32-33). Sin embargo, según Báez et al. (2023), esto puede variar según si es temporada seca o húmeda.

Así lo confirman Cardona & Gutiérrez (2021): “Las corrientes en superficie son fuertemente moduladas por la época climática” (p. 170). Según su estudio, en el sector de Punta las Vacas las corrientes se dirigen al norte y noreste en la época húmeda y al sureste en la época seca. Además, las magnitudes de su velocidad son en promedio de 0,12 metros por segundo y

máximas de hasta 0,31 metros por segundo. También mencionan que las velocidades de las corrientes en el fondo tienen una magnitud promedio de 0,02 metros por segundo con una dirección predominante este-sureste.

Cabe agregar que Mosquera & Barrientos (2019) presentaron gráficas de dirección y magnitud de las corrientes superficiales para el Golfo de Urabá durante periodos afectados por el fenómeno del Niño y de la Niña, en ellas se muestra que la zona de la Bahía de Turbo no se ve muy diferente comparando ambos fenómenos, manteniendo una velocidad de 0,1 metros por segundo.

Temperatura

Bernal et al. (2005) presentan un mapa de temperaturas superficiales en el Golfo de Urabá para el año 2004, donde se ve que la temperatura en la Bahía de Turbo llega a los 29 grados Celsius. Rojas et al. (2023) también afirman que, en general, “las aguas de la bahía de Turbo son cálidas y turbias” (p. 15), mostrando valores entre 29,5 y 29,9 grados Celsius, tanto para el agua superficial como para la profunda. Zambrano (2021) muestra las temperaturas superficiales en Punta las Vacas durante varios meses, siendo el más bajo de 27 grados Celsius registrados en el mes de marzo.

Salinidad

Bernal et al. (2005) presentan un mapa de salinidad superficial en el Golfo de Urabá para el año 2004, donde se ve que la salinidad en la Bahía de Turbo varía entre 22 y 24 unidades prácticas de salinidad. Por su parte, Rojas et al. (2023) grafican valores máximos de salinidad de 7,4 unidades prácticas de salinidad para la profundidad y 7,1 unidades prácticas de salinidad para la superficie. Salamanca & Schneider (2013) y Werlinger et al. (2004), como se citaron en Zambrano (2021), muestran valores de salinidad superficial en Punta las Vacas muy bajos durante los diferentes meses, aproximándose en promedio a 4,35 unidades prácticas de salinidad, explicando que en zonas costeras “la concentración superficial de sales decrece progresivamente en muchas localidades, especialmente por los aportes de agua dulce” (p. 107).

Mosquera & Barrientos (2019) también presentan gráficas de salinidad para el Golfo de Urabá durante periodos del Niño y de la Niña, donde se pueden apreciar cambios de salinidad en la Bahía de Turbo según el fenómeno presente y también según su trimestre del año. Durante el Niño, la salinidad varía entre 15 y 20 unidades prácticas de salinidad, mientras que durante la Niña, varía entre 15 y 25 unidades prácticas de salinidad.

Un estudio adicional hecho por Correa & Palacio (2008) muestra valores de salinidad en distintos puntos de la Bahía de Turbo durante diferentes meses del año, concluyendo que el “comportamiento de la salinidad en la línea costera de la Bahía de Turbo indica un incremento general de los valores de septiembre a noviembre” (p. 48) con valores de hasta 32 unidades prácticas de salinidad. Además, según los resultados, la parte más interna de la Bahía de Turbo parece experimentar los cambios más amplios de salinidad en el tiempo.

Oleaje

Según Báez et al. (2023), en el Golfo de Urabá el “oleaje responde a la dinámica de los vientos alisios del noreste” (p. 34) teniendo dos períodos de vientos y oleaje máximos de diciembre a febrero, y de junio a agosto. Así, el oleaje “se puede caracterizar de acuerdo con su ubicación espacial y a la época climática, con alturas medias significativas alrededor de 0,75 y 1,5 metros durante las épocas de poca y mucha lluvia, respectivamente” (Escobar et al., 2015, como se citaron en Hernández et al., 2021, p. 13). Para Turbo, la altura de los oleajes varía entre 0,38 metros y 1,1 metros (Correa & Vernet, 2004), y se puede presentar en sentido noroeste-sureste golpeando constantemente la línea de costa, aumentando así el impacto erosivo (Duarte & Gómez, 2016).

Osorio et al. (2021) presentan gráficas de altura de ola significativa en el Golfo de Urabá para cada mes durante periodos normales o afectados por el fenómeno del Niño y de la Niña. Sin embargo, para la zona de la Bahía de Turbo no se ve mucha diferencia entre estos tres periodos, obteniendo valores máximos de altura de ola de 0,5 metros.

Características de la marea

El IDEAM (2019) como se citó en Hernández et al. (2021) explica que la “marea es semidiurna mixta, con una amplitud media de 0,28 metros y con valores promedios de 0,09 metros en cuadratura y de 0,50 metros en sicigia” (p. 13), datos que concluyeron de un análisis de marea cercano en épocas de sicigia y cuadratura. Además, según Lonin & Vásquez (2005), la marea en la región es semidiurna, con pleamares cada 11,5 horas. “La diferencia entre la marea alta y baja no supera los 50 centímetros” (Garizábal, 2007, como se citó en Nieto, 2011, p. 32).

Higuita & Quintana (2020) presentan una serie de marea en Turbo la cual posee 548 días de registro cada 5 minutos, donde el nivel del mar en la zona baja 0,4 metros y sube 0,6, aproximadamente.

Armónicos

Según Hernández et al. (2021), los principales componentes de la marea son dos armónicos semidiurnos (M2 con 0,09 metros y N2 con 0,03 metros) y dos armónicos diurnos (K1 con 0,10 metros y O1 con 0,06 metros). Lonin & Vásquez (2005) destacan estos mismos armónicos con valores muy similares (S2 con 0,02 metros; M2 con 0,08 metros; N2 con 0,02 metros; K1 con 0,09 metros; P1 con 0,03 metros y O1 con 0,06 metros). Quintana et al. (2021) presentan armónicos con valores semejantes a los anteriores (K1 con 0,09 metros; M2 con 0,08 metros; O1 con 0,06 metros; S2 con 0,04 metros; P1 con 0,03 metros; K2 con 0,03 metros; N2 con 0,02 metros y Q1 con 0,02 metros). Por último, Higuita & Quintana (2020) se extienden un poco más con los armónicos, obteniendo resultados parecidos (K1 con 0,12 metros; M2 con 0,08 metros; K2 con 0,06 metros; N2 con 0,04 metros; Q1 con 0,04 metros; S2 con 0,03 metros; O1 con 0,02 metros; Mf con 0,01 metros; Mm con 0,01 metros y P1 con 0,001 metros).

Sustentación 1. [Haz clic aquí para ver](#)

La sustentación de este proyecto se realizó en formato audiovisual. Este video, de carácter personal y académico, tiene como objetivo dejar la evidencia de los aprendizajes obtenidos. La grabación se encuentra de manera pública en YouTube bajo el nombre “Bahía de Turbo -

Proyecto 1 de Procesos costeros” (Katherine González, 2025) y puede ser consultada como fuente de referencia.

Proyecto 2. Modelación en Delft3D de la Bahía de Turbo

A partir de la investigación realizada para la caracterización de la Bahía de Turbo, la cual fue presentada en el primer proyecto, se desarrolló la modelación hidrodinámica de la zona utilizando el software Delft3D como ejercicio académico. Para ello, se emplearon los módulos de corrientes (*Flow*), olas (*Wave*) y el acoplamiento entre ambos. En este informe se busca presentar de forma concisa los resultados de las diferentes modelaciones realizadas.

El proceso comenzó con el diseño de la malla, la cual se elaboró con base en el archivo de batimetría del área de estudio utilizando la herramienta *Spline*. Posteriormente, se comprobó que su ortogonalidad estuviera adecuada, es decir, con desviaciones menores a 10 grados, y que su resolución tuviera variaciones suavizadas. Con esta malla se creó el archivo de batimetría usando la interpolación triangular y la difusión interna, y se calculó el paso de tiempo adecuado para las condiciones de la malla y de la batimetría generadas, teniendo en cuenta los números de Courant y utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \frac{CFL}{2\sqrt{gH}\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- Δt = Paso de tiempo (segundos).
- CFL = Número de Courant que debe ser inferior a 10.
- g = Gravedad (metros por segundo cuadrado).
- H = Profundidad (metros).
- Δx = Longitud horizontal de una celda de la malla (metros).
- Δy = Longitud vertical de una celda de la malla (metros).

Reemplazando los valores propios se obtiene el siguiente paso de tiempo.

$$\Delta t = \frac{10}{2\sqrt{9,81*23}\sqrt{\frac{1}{120^2} + \frac{1}{35^2}}} = 11,2 \text{ segundos} = 0,18 \text{ metros} = 10,8 \text{ segundos.}$$

Cabe mencionar que todos los modelos se establecieron para un periodo de 7 días, desde el 15 de abril de 2025 a las 00:00, hasta el 22 de abril de 2025 a la misma hora.

Módulo de corrientes

Para este primer módulo se mantuvieron casi todos los parámetros por defecto que ofrece la herramienta *Flow* de Delft3D, a excepción de los siguientes datos: La densidad del agua se estableció de 1027 kilogramos por metro cúbico. Se definieron tres fronteras abiertas: La frontera Oeste, forzada por condiciones astronómicas, y las fronteras Norte y Sur forzadas por series de tiempo de Neumann.

Para las condiciones astronómicas se propusieron los armónicos K1, M2, O1 y N2, debido a que, según Hernández et al. (2021), estos son los principales para la zona de estudio. Los valores de fase y amplitud de estos armónicos fueron tomados del estudio de Quintana et al. (2021) por ser los datos más recientes y completos encontrados en la investigación.

Por último, se establecieron 13 puntos de monitoreo, cinco de los cuales se ubicaron alrededor de la bahía, y los restantes hacia mar adentro.

Calibración del modelo. Los parámetros de calibración considerados fueron: la viscosidad turbulenta, la rugosidad y el efecto del viento. En una primera modelación se utilizaron los valores por defecto:

- Viscosidad = 1 metro cuadrado por segundo.
- Rugosidad Chezy = 65.
- Viento = Sin datos de viento.

A partir de allí se dejaron constantes todos los parámetros y se comenzó a variar únicamente la viscosidad turbulenta, teniendo en cuenta la siguiente ecuación vista en clase:

$$V_t = k \frac{\Delta y^2}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- V_t = Viscosidad turbulenta (metros cuadrados por segundo).
- k = Intervalo [0,01 - 0,06].
- Δy = Longitud más corta de una celda de la malla (metros).
- Δt = Paso de tiempo (segundos).

Reemplazando los valores propios en la Ecuación 2 se obtuvieron los dos parámetros de calibración que se utilizaron en la viscosidad turbulenta:

$$V_t = [0,01 - 0,06] \frac{35^2}{10,8} = [1,13 - 6,81] \text{ metros cuadrados por segundo.}$$

En los resultados se puede observar que la variación de este parámetro no afecta tanto a la velocidad promediada en la vertical, ya que las 3 modelaciones mantienen la misma tendencia general. Sin embargo, se puede observar que los dos puntos de monitoreo más alejados de la costa sí varían mucho al cambiar este parámetro, y esto puede ser debido a las condiciones de frontera que se encuentran tan cercanas a estos puntos. Ahora bien, viendo las gráficas en detalle, se puede observar que tomando una viscosidad turbulenta de 6,81 metros cuadrados por segundo se suaviza demasiado la velocidad, mientras que los valores de 1 metro cuadrado por segundo y 1,13 metros cuadrados por segundo presentan un mayor ruido en la gráfica. Por otro lado, el valor de 6,81 metros cuadrados por segundo muestra unas direcciones de las corrientes muy diferentes de las de los otros dos, especialmente dentro de la bahía.

Después de esto, se dejó constante el parámetro de viscosidad turbulenta en 1,13 metros cuadrados por segundo, y se comenzó a variar el valor de rugosidad de Chezy. Para obtener el segundo valor de calibración se utilizó la siguiente ecuación vista en clase:

$$\text{Chezy} = 25 + H \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- Chezy = Rugosidad.
- H = Profundidad.

Utilizando la mayor profundidad se obtuvo el siguiente valor:

$$\text{Chezy} = 25 + 23 = 48.$$

Con esta misma Ecuación 3 se definió el tercer valor de calibración de la rugosidad, esta vez en función de la profundidad en cada celda, y para esto se hizo una modificación en la batimetría, sumándole 25 metros a cada una de las coordenadas, obteniendo así un dato variable.

Los resultados muestran que la variación de este parámetro tampoco afecta significativamente a la velocidad promediada en la vertical, a excepción de los últimos dos puntos de monitoreo como en el caso anterior. Se puede observar que el Chezy variable suaviza las oscilaciones de la velocidad, sin llegar a ser muy extremo, logrando también estabilizarse más rápido; los otros dos valores sí presentan mayor ruido en todos los puntos. También se observa que los tres valores de rugosidad varían las direcciones de las corrientes en la zona dentro de la bahía.

Por último, se dejó constante el valor de Chezy variando en función de la profundidad, y se investigaron datos de viento para la zona de estudio en el periodo de tiempo analizado. Se obtuvieron los datos de magnitud y dirección de la velocidad del viento cada 3 horas gracias a la aplicación Windy.app. Así, el segundo valor de calibración, esta vez usando datos de viento variable en el tiempo, es el que viene por defecto en el coeficiente A, es decir, 0,00063. El tercer valor de calibración para el coeficiente A es el utilizado por Velásquez (2013) como valor de calibración para su modelo en el Golfo de Urabá, el cual es 0,001.

Los resultados muestran unas notables diferencias en la velocidad promediada en la vertical entre los valores con viento y el valor sin viento, demostrando que el viento puede afectar mucho esta velocidad, incrementando su magnitud, especialmente para el valor de 0,001 en el

coeficiente A. En cuanto a la dirección de las corrientes, se observan diferencias mínimas entre los valores con viento, mientras que el contraste con el escenario sin viento es más marcado.

Anidamiento. Para realizar el anidamiento tipo corrientes-corrientes, se generó una malla hija, enfocando principalmente la zona que comprende a la Bahía de Turbo y a Punta las Vacas. Esta malla tiene un refinamiento de 1:3 respecto a la malla madre, es decir, la longitud de las celdas tanto en dirección horizontal como vertical es de $\frac{1}{3}$ de la longitud de la malla madre. Para esta nueva malla se hicieron las verificaciones correspondientes, así como también se recalculó el paso de tiempo utilizando la Ecuación 1.

$$\Delta t = \frac{10}{2\sqrt{9,81*8}\sqrt{\frac{1}{40^2} + \frac{1}{10^2}}} = 5,5 \text{ segundos} = 0,09 \text{ metros} = 5,4 \text{ segundos.}$$

Se observa que el paso de tiempo se redujo a la mitad.

Para esta malla hija se crearon 53 tramos de frontera Oeste, 7 de frontera Sur y 4 de frontera Norte. Además, se mantuvieron los mismos 5 puntos de monitoreo alrededor de la bahía, para esto se ajustaron sus posiciones teniendo en cuenta las coordenadas espaciales originales.

Los resultados muestran leves variaciones en la velocidad promediada en la vertical al comparar la malla madre con la malla hija, siendo el punto de monitoreo 5 el que más se ve afectado por el cambio de resolución, lo cual puede deberse a su cercanía con los tramos de frontera Oeste de la malla hija.

Modelado en 3D. Utilizando el dominio de la malla hija se realizó un modelado en 3D, utilizando las cinco capas que propone el software por defecto.

Inicialmente, se compararon los resultados de la velocidad promediada en la vertical entre la modelación en 2D y la modelación en 3D, y a pesar de que se notaron leves cambios, en general se presentan resultados muy similares, lo que demuestra que la modelación en 2D es bastante acertada. Cabe mencionar que la modelación 3D duró 5 veces más tiempo que la modelación 2D. Después, se analizó la velocidad horizontal comparando la capa superficial, la capa media y la capa del fondo, donde se evidenciaron importantes variaciones de estas capas en todos los puntos de monitoreo, aunque manteniendo el orden lógico de magnitud. En cuanto a las

direcciones de las corrientes, se notaron grandes diferencias entre la capa superficial y las otras dos, coincidiendo con lo encontrado en la literatura, en especial con lo comentado por Hernández et al. (2021):

Se han observado cambios en la dirección de la corriente con la profundidad, que sugieren la existencia de un patrón de circulación estuarino, con aguas superficiales que se dirigen hacia el norte del Golfo y aguas más profundas que se dirigen desde el mar Caribe hacia el sur del mismo. (p. 13)

Módulo de olas

Para la modelación del oleaje en la herramienta *Wave* de Delft3D se crearon unas nuevas mallas madre e hija, debido a que las originales habían sido recortadas por la línea de costa, por lo que se hizo necesario completar las mallas para que quedaran con la misma cantidad de celdas en ambos ejes.

En cuanto a los parámetros del modelo, se conservaron constantes los valores por defecto que ofrece el *Wave*, variando solo los siguientes datos: Nuevamente, la densidad del agua se estableció de 1027 kilogramos por metro cúbico. Las fronteras se orientaron completamente en los bordes Oeste, Sur y Norte, y las condiciones del oleaje se definieron según las gráficas presentadas por Osorio et al. (2021) para el mes de abril en un escenario normal (sin afectación del fenómeno del Niño o de la Niña). De allí se extrajeron los valores de altura significativa de ola, la cual es de 1,1 metros coincidiendo con lo mencionado por Correa & Vernet (2004), quienes señalan que la altura de los oleajes en Turbo varía entre 0,38 metros y 1,1 metros. También se definió el periodo pico igual a 6 segundos, y una dirección náutica de 315 grados, esta última estimada a partir de la aproximación visual de los vectores en la gráfica, y respaldada por lo señalado por Duarte & Gómez (2016), quienes indican que el oleaje se puede presentar en sentido noroeste-sureste, golpeando constantemente la línea de costa.

Anidamiento. El anidamiento tipo olas-olas se realiza de forma automática en el *Wave*. Para este modelo estacionario se escogió la fecha del 22 de abril a las 00:00 debido a que este es el tiempo final, con el objetivo de facilitar después la comparación con el módulo de corrientes.

Los resultados muestran un mejor nivel de detalle en la malla hija aunque con valores muy aproximados entre ambas mallas, tanto para la magnitud de la altura significativa como para la del periodo pico. Las direcciones del oleaje sí se ven demasiado iguales, tanto la media como la pico. Se destaca también que con la malla hija se presenta una fracción de rompimiento muchísimo mayor que con la malla madre, pero sin llegar a romper la ola.

Calibración del modelo. Los parámetros de calibración considerados para el oleaje fueron: la ruptura por profundidad, la fricción del fondo y la propagación direccional. En la modelación de anidamiento anterior se utilizaron los valores por defecto:

- Coeficiente de ruptura $\Gamma = 0,73$.
- Coeficiente de fricción de Jonswap = $0,067$ metros cuadrados por segundo cúbico.
- Propagación direccional = 4 .

Para la calibración, inicialmente se mantuvieron constantes los parámetros y se procedió a variar el coeficiente Γ del modelo B&J de acuerdo con la Universitat Politècnica de Catalunya, que si bien no menciona valores concretos para este coeficiente, sí indica que Battjes trabajó en otro modelo similar que también involucra el coeficiente Γ , recomendando valores de $0,6$ a $0,83$. Al no encontrar otros datos se optó por utilizar estos valores para calibrar el modelo.

Los resultados muestran que las direcciones del oleaje, tanto la media como la pico, no se ven realmente afectadas por el cambio del coeficiente de ruptura Γ . Por otro lado, se observa que a medida que el valor de Γ incrementa, también lo hace la altura de ola significativa, y a su vez disminuye la fracción de rompimiento.

Una vez fijado el valor del coeficiente de ruptura Γ en $0,6$, se comenzó a variar el coeficiente de fricción de fondo de Jonswap a partir de la información de una modelación realizada por Gambin (2024) dentro del Golfo de Urabá, donde menciona que “el valor por defecto del coeficiente de fricción para fondos arenosos típicos es de $0,038$ ” (p. 34) metros cuadrados por segundo cúbico, y que su modelo se calibró con un valor de $0,0304$ metros cuadrados por segundo cúbico. Estos últimos dos coeficientes fueron los valores de calibración que se utilizaron.

Se observa en los resultados que las direcciones media y pico del oleaje no varían casi nada con el cambio del coeficiente Jonswap. Al observar la altura de ola significativa se puede notar que disminuye a medida que se aumenta el coeficiente Jonswap, al igual que la fracción de rompimiento.

Por último, se dejó constante el valor de 0,0304 metros cuadrados por segundo cúbico para el coeficiente Jonswap y se variaron los valores de propagación direccional. La primera variación se estableció con un valor de 3 debido a que así se estima en el estudio de Lin et al. (2022). La segunda variación se estableció con un valor de 20 ya que es el dato que sugiere la herramienta de Delft Dashboard para la zona de la bahía.

Se puede ver en los resultados que las direcciones de oleaje media y pico tampoco varían mucho con los cambios en la propagación direccional, aunque sí se nota mayor similitud en los vectores entre los dos valores más bajos. Por otro lado, la altura de ola significativa aumenta a medida que aumenta esta variable, pero la fracción de rompimiento queda casi intacta a pesar de las variaciones.

Variación en el tiempo. Para el modelamiento de oleaje no estacionario se recopilieron los datos de altura significativa, periodo pico y dirección de oleaje cada 3 horas para la zona de estudio mediante la aplicación Windy.app. La propagación direccional se estableció con un valor de 20. Posteriormente, se compararon los resultados con los de la modelación estacionaria para la misma fecha.

Debido a estos cambios, se puede observar en los resultados que la magnitud del periodo pico aumenta bastante ya que los datos registrados en estas fechas son superiores al valor fijo establecido para el modelo estacionario. La dirección del oleaje, tanto la media como la pico, también muestra una variación importante, ya que en el modelo no estacionario el oleaje se dirige hacia el noreste mientras que en el estacionario se había definido una dirección hacia el sureste. Por último, tanto la altura de ola significativa como la fracción de rompimiento son mayores en la modelación no estacionaria, llegando incluso a presentarse la ruptura de la ola.

Adicionalmente se compararon los resultados del modelo no estacionario a las 00:00 horas de cada día, desde el 15 hasta el 22 de abril. En ellos se observa que la magnitud del periodo pico se mantiene prácticamente constante. Lo que más se resalta al comparar la variación diaria es que las direcciones de oleaje pico y media van hacia el sureste los cinco primeros días,

pero en los últimos dos se genera el cambio hacia el noreste. Así mismo, se muestra que la altura de ola significativa presenta un comportamiento oscilatorio, con aumentos y disminuciones a lo largo del tiempo, especialmente en las zonas cercanas a las fronteras ya que se observa mayor estabilidad dentro de la bahía, salvo durante los últimos dos días, donde se presenta un aumento considerable en dicha variable. Por último, la fracción de rompimiento es muy similar en todos los días pero mayor en los últimos dos, alcanzando incluso el rompimiento de la ola en el último día, como se había mencionado anteriormente.

Acoplamiento de olas y corrientes

Para realizar el acoplamiento entre los módulos de corrientes (*Flow*) y oleaje (*Wave*) se utilizaron las últimas versiones de cada uno de los modelos, previamente calibrados, con el fin de obtener resultados lo más representativos y realistas posibles del comportamiento hidrodinámico en la zona de estudio.

El modelo de corrientes empleado para el acoplamiento incluyó los siguientes parámetros de calibración:

- Viscosidad turbulenta = 1,13 metros cuadrados por segundo.
- Rugosidad Chezy = Variable en función de la profundidad.
- Viento = Coeficiente A igual a 0,001.

Por su parte, el modelo de oleaje, con condiciones no estacionarias en el tiempo, fue calibrado con los siguientes parámetros:

- Coeficiente de ruptura Gamma = 0,6.
- Coeficiente de fricción de Jonswap = 0,0304 metros cuadrados por segundo cúbico.
- Propagación direccional = 20.

Aunque se realizó una modelación no estacionaria para una semana completa, los resultados no se generaron correctamente para todo el periodo. Por causas no identificadas durante el proceso de simulación, los datos útiles del acoplamiento solo estuvieron disponibles

para tres momentos puntuales: el 15 de abril a las 6:00 para el oleaje, y el 20 y 22 de abril a las 00:00 para las corrientes. A pesar de esta limitación, fue posible realizar algunos análisis comparativos con los modelos originales.

En cuanto al comportamiento de las corrientes, se observó que la inclusión del oleaje genera variaciones significativas en la dirección de las corrientes, con vectores que apuntan en múltiples direcciones, aunque siguen siendo predominantes hacia el oeste, como en el modelo sin acoplar. La velocidad promediada en la vertical también mostró diferencias ya que, aunque inicialmente sigue una tendencia similar a la del modelo base, su magnitud es mayor al incluir el oleaje. Sin embargo, a partir del 20 de abril, se presenta un cambio abrupto en el comportamiento de las corrientes, con patrones que se invierten en la mayoría de los puntos de monitoreo, lo cual podría estar relacionado con la falla del modelo. En cuanto al nivel del agua, este se mantiene prácticamente igual entre el modelo acoplado y el modelo base, aunque con un mayor nivel de detalle en los resultados.

Al comparar los resultados del módulo de oleaje sin acoplar con los del modelo acoplado a datos de marea y viento, se observa que tanto la altura de ola significativa como las direcciones media y pico presentan muy poca variación, posiblemente debido a que los resultados disponibles se presentan a solo seis horas desde el inicio de la simulación. No obstante, la fracción de rompimiento sí evidencia cambios importantes, con un incremento marcado en una zona específica del dominio y una disminución total en otra.

En conclusión, aunque algunas variables no se ven muy afectadas por los cambios en la calibración de los parámetros, otras como la magnitud de la velocidad o la fracción de rompimiento del oleaje sí pueden ser más sensibles, por lo que se hace necesario comparar los resultados con el comportamiento real en la zona y así establecer correctamente los datos del modelo.

Sustentación 2. [Haz clic aquí para ver](#)

La sustentación de este proyecto se realizó en formato audiovisual. Este video, de carácter personal y académico, tiene como objetivo dejar la evidencia de los aprendizajes obtenidos. La grabación se encuentra de manera pública en YouTube bajo el nombre “Bahía de Turbo

(modelación con Delft 3D) - Proyecto 2 de Procesos Costeros” (Katherine González, 2025) y puede ser consultada como fuente de referencia.

Proyecto 3. Protección de la línea de costa de la Bahía de Turbo

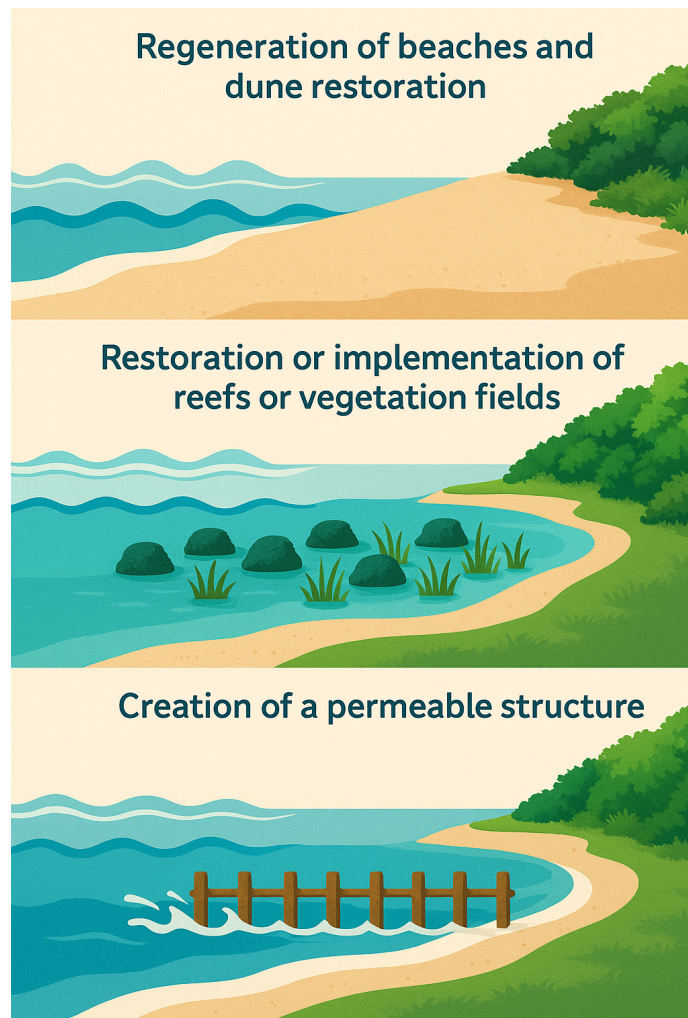
A lo largo de este tercer proyecto se presentarán los resultados de la investigación de ingeniería conceptual, la cual busca profundizar en alternativas innovadoras de solución (especialmente de tipo verde) para la protección o restauración de la línea de costa. A nivel metodológico, esta investigación parte de una búsqueda general donde se recopila la información encontrada sobre el tema desde diferentes autores que proponen una amplia gama de soluciones, que pueden ser empleadas en contextos más específicos de línea de costa. A partir de esta revisión se seleccionarán tres soluciones que serán explicadas en detalle por su potencial de aplicación, de las cuales se elegirá una para su implementación conceptual en la línea de costa de la Bahía de Turbo, definida como mi zona de estudio en proyectos anteriores.

Desde nuestra formación como ingenieros, se nos prepara para enfrentar los grandes retos de la actualidad, siendo el cambio climático uno de los más urgentes y complejos. En particular, la transformación de los entornos costeros y la creciente vulnerabilidad de sus comunidades exigen respuestas técnicas que integren sostenibilidad y adaptación. En este contexto, Klein et al. (1999), como se citaron en Gutiérrez et al. (2016), mencionan que: “Evitar el avance de la línea de costa ha sido, históricamente, la medida de adaptación al cambio climático que se ha adoptado más frecuentemente” (p. 88). Si bien muchas de estas soluciones han estado basadas en enfoques tradicionales de ingeniería dura o infraestructura gris, se ha encontrado que existen diversas alternativas que pueden implementarse en la costa mediante soluciones naturales, encaminadas principalmente a prevenir, mitigar o adecuarse al retroceso de la línea de costa (Ibidem). Las soluciones basadas en la naturaleza aplicadas en zonas costeras, también llamadas costas vivas, se proponen como una alternativa innovadora, siendo efectivas al reducir o incluso revertir la erosión, modificando la energía de las olas y la dinámica de sedimentación (Barry et al., 2025). Estos enfoques verdes tienen grandes ventajas de aplicación, ya que trabajan con la naturaleza en lugar de contra ella, favoreciendo la geodiversidad costera, la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y el equilibrio sedimentario (Knight, 2024).

Entre estas soluciones, podemos encontrar, por ejemplo, la nutrición de arena en las playas, la vegetación y el cercado en las dunas, la restauración hidrológica de marismas y humedales, la plantación de manglares, el trasplante de pastos marinos, de algas, de rocas o de corales, entre otros enfoques más híbridos (Morris et al., 2024) “e incluso combinaciones de los anteriores” (Riol, 2017, p. 14). También se han incorporado materiales blandos como la fibra de coco o la concha de ostra en el diseño de costas restauradas (Smith et al., 2020), buscando un equilibrio entre protección costera y restauración ecológica. A continuación, se explicarán tres de estas soluciones de una manera más detallada:

Figura 1

Soluciones para la protección de la línea de costa



Nota. Fuente <https://chatgpt.com/> (Chat GPT, 2025).

Regeneración de playas y restauración de dunas

Una de las consecuencias producidas por la erosión en la línea de costa es la reducción en las dimensiones de las playas, algo que puede afectar el turismo, la habitabilidad y las dinámicas sociales; además, dicha erosión causa también el deterioro en las dunas, las cuales son un soporte para los ecosistemas costeros. Della et al. (2024) explican que los ecosistemas de dunas costeras son entornos frágiles que, sin embargo, proporcionan servicios ecosistémicos cruciales, como la defensa de las zonas interiores cercanas, dada al disipar la energía de las olas, retener sedimentos y prevenir inundaciones. Además, los “humedales costeros, como los pantanos, las dunas y los manglares, son fundamentales para reducir la vulnerabilidad a los peligros de las zonas costeras densamente pobladas” (Lochner et al., 2019, p. 10).

Se hace necesario entonces recuperar el espacio perdido en la línea de costa, para restaurar las condiciones propias del ecosistema costero a intervenir. En este sentido, una solución basada en la naturaleza cada vez más adoptada para mitigar las amenazas que plantea el cambio climático es la regeneración de playas y restauración de dunas costeras, ya que permite la recuperación de los procesos naturales y el funcionamiento de los ecosistemas, mejorando así sus funciones ecológicas y utilitarias (Della et al., 2024). Esta estrategia muestra varias formas de aplicación, como rellenos artificiales, revestimientos dinámicos, vegetalización de las dunas, entre otras.

Profundizando en lo anterior, podemos decir que una de las posibles soluciones con infraestructura verde para la protección de la línea de costa es utilizar un relleno artificial en las playas (Berrío, 2018). Este relleno de playa consiste en la “colocación de arena en una playa o duna con el fin de restaurarla o construirla” (Galindo & Salgado, 2020, p. 16). Cabe mencionar nuevamente que a esta solución verde también se han incorporado materiales blandos como la fibra de coco o la concha de ostra en el diseño de costas restauradas. La estrategia de relleno también es nombrada por Gutiérrez et al. (2016) como retroceso controlado o gestionado, el cual “consiste en la creación de zonas de transición o amortiguamiento mediante la deposición de material sedimentario para estabilizar la costa y mitigar el efecto del retroceso” (p. 88), dando como resultado la restauración de dunas y la regeneración de playas, como las acciones de adaptación más comunes bajo esta estrategia.

Por su lado, los revestimientos dinámicos también se dan mediante relleno, con la diferencia de que el material a emplear no es arena o fibras blandas, sino gravas. Foss et al. (2023) los definen como bermas construidas artificialmente de guijarros y otros sedimentos de grava, colocadas en la berma de una playa de arena; dichos revestimientos son adecuados para su implementación en entornos costeros abiertos y energéticos y representan una de las pocas soluciones basadas en la naturaleza para estas áreas, protegiendo su zona interior y reduciendo la erosión de la cara superior de la playa. Finalmente, en “el caso de los sistemas dunares, la vegetalización permite que se fije la arena, estabilizándola frente a la erosión y el desplazamiento” (Peña et al., 2020, p. 71), algo que también aporta a la biodiversidad y la resiliencia climática en las costas.

Restauración o implementación de arrecifes o campos de vegetación

Diversos ecosistemas costeros cumplen funciones clave en la protección de la línea de costa al disipar la energía del oleaje mediante mecanismos como la fricción, la rotura de las olas y la retención de sedimentos. En ese sentido, las praderas submarinas reducen la energía del oleaje y favorecen el transporte de sedimentos y nutrientes. Así mismo, los humedales actúan como diques naturales frente a eventos extremos gracias a sus raíces entrelazadas que aumentan la fricción, estabilizan el terreno y reducen el *fetch*. Un ejemplo de esto son los manglares, ubicados en zonas tranquilas, cuyas raíces disipan el oleaje y retienen sedimentos. Por su parte, los arrecifes de coral funcionan como barreras sumergidas que filtran las olas más fuertes y disminuyen su impacto antes de que lleguen a la costa (Riol, 2017).

Para fines prácticos, vale la pena analizar esta solución desde dos puntos de implementación diferentes: El uso de campos de vegetación y el uso de arrecifes. Por un lado, los campos de vegetación en zonas costeras proveen múltiples beneficios: “Disipan altura de ola, reducen la velocidad del flujo, disminuyen la turbulencia, atrapan sedimento limitando la resuspensión del mismo y reducen la erosión de la línea costa” (Maza et al., 2013, como se citaron en Alfaro, 2021). Por el otro, los arrecifes de coral son vitales, ya que proporcionan hábitat y protección a la vida marina (Martins et al., 2025).

Sin embargo, la degradación de los corales debido al cambio climático, el desarrollo costero y la exploración marina requiere alternativas como los arrecifes artificiales. Se ha

explorado entonces el uso de geopolímeros basados en residuos industriales, específicamente cenizas volantes de biomasa y lodo rojo, para crear arrecifes artificiales. Estos geopolímeros ofrecen una solución ecológica al reutilizar materiales desechados y brindar resistencia a factores de estrés ambiental como el agua salina. Los geopolímeros son materiales potenciales para producir arrecifes artificiales, ya que presentan propiedades que incluyen resistencia al ataque ácido, a altas temperaturas, al ciclo de congelación y descongelación, y buena trabajabilidad. Estos arrecifes artificiales basados en geopolímeros se han producido previamente mediante impresión 3D (Ibidem).

La restauración o implementación de los arrecifes artificiales, de coral o de ostras como solución verde para la protección de la línea de costa es una buena alternativa, ya que estos se convierten en “escolleras naturales que pueden mitigar las inundaciones y los efectos erosivos de las tormentas a lo largo de las costas bajas, formando una barrera natural. Los arrecifes son la primera línea de defensa costera contra los impactos dañinos” (Lochner et al., 2019, p. 9). Aunque la capacidad de un arrecife artificial para disipar la energía de las olas depende de su porosidad, forma y orientación, vale la pena considerarlos como solución a implementar, ya que estos ofrecen varias ventajas en términos de costo, protección costera e impacto ambiental (Dinu et al., 2025).

Creación de una estructura permeable

La última de estas tres soluciones para la protección o restauración de la línea de costa es la creación e implementación de estructuras permeables, las cuales “se componen de elementos verticales unidos horizontalmente (generalmente de guadua), que reducen la energía del oleaje” (Vargas, 2022, p. 15).

Es una solución de tipo verde (green solution) que permite reducir la perturbación al transporte de sedimentos producida por las estructuras convencionales. Estas estructuras usan un enfoque basado en la naturaleza, el cual consiste en construir con materiales degradables con un periodo de vida útil suficiente que permita reconstruir los ambientes marinos degradados, pero sin afectar a largo plazo la hidrodinámica de la zona. (Ibidem)

Su objetivo es “mantener el balance neto de sedimentos, y disminuir la energía de las olas, reduciendo la erosión inducida por estas. Al mismo tiempo que mejora las tasas netas de sedimentación cerca de la línea de costa” (Winterwerp et al., 2020, como se citaron en Vargas, 2022, p. 13). Entre las ventajas de esta solución se encuentra que “son estructuras de bajo costo, que tienen sencilla instalación y mantenimiento. Los resultados sugieren que estas estructuras pueden servir como moduladores de la energía del oleaje, modificación de la intensidad de las corrientes y reducción de las tasas de erosión” (Vargas, 2022, p. 36).

Esta estrategia comparte similitudes funcionales con otras intervenciones costeras implementadas en zonas cercanas al estudio, como el hincamiento de troncos, e incluso con obras más convencionales de ingeniería costera dura, tales como los espolones y los rompeolas, ya que todas buscan disipar la energía del oleaje y controlar la dinámica sedimentaria. Sin embargo, la estructura permeable presenta importantes ventajas comparativas al tratarse de una solución sencilla, que permite el flujo parcial de agua y sedimentos, evitando alteraciones drásticas en la morfología costera o en los procesos naturales. Su diseño abierto y su uso de materiales biodegradables o de bajo impacto ambiental, como la guadua u otras maderas locales, la convierten en una alternativa ecológica y sostenible frente a estructuras convencionales.

Además, esta solución facilita la participación activa de las comunidades locales en su construcción, mantenimiento y monitoreo, fomentando un enfoque de manejo costero basado en la apropiación territorial. Gracias a su sencillez constructiva, bajo costo y adaptabilidad, las estructuras permeables pueden utilizarse como complemento de otras intervenciones mayores, como los arrecifes artificiales o la restauración de dunas, reforzando su efectividad en el control de la erosión y en la recuperación de zonas costeras deterioradas. Por estas razones, su implementación representa una herramienta valiosa dentro de un enfoque integral y adaptativo de infraestructura verde y protección costera comunitaria.

Selección

La solución seleccionada para la protección de la línea de costa en la zona de estudio corresponde a la implementación de un arrecife artificial, una alternativa que ha demostrado ser eficaz en la reducción del oleaje y de la erosión costera. En el caso específico de la Bahía de

Turbo no se tiene una playa como tal, lo cual limita la viabilidad de soluciones que dependen de la retención de sedimentos sueltos, como la nutrición de playas.

Si bien no se encontraron registros de formaciones coralinas presentes en la Bahía de Turbo, el Golfo de Urabá sí alberga ecosistemas de arrecife, por lo que esta solución podría fomentar procesos de colonización biológica compatibles con la región. Adicionalmente, los arrecifes artificiales han demostrado ser efectivos a profundidades similares a las presentes en la zona de estudio. Por ejemplo, Dinu et al. (2025) documentan que estructuras ubicadas a 5 metros de profundidad brindan una protección significativa frente a la energía del oleaje, actuando como barreras sumergidas que disipan la energía antes de que alcance la línea de costa. Esto sugiere que las bajas profundidades, como las existentes en la zona de estudio, son adecuadas para la instalación de estos sistemas, permitiendo además su modelación en XBeach y en Delft3D.

Así mismo, estudios de caso como el de Silva et al. (2020) en Puerto Morelos, Quintana Roo, México, respaldan la eficacia de estas estructuras en tramos relativamente cortos de costa, similares a la escala de este proyecto, y destacan su capacidad para integrarse ecológicamente al medio marino circundante al utilizar materiales ambientalmente compatibles:

La playa fue asistida a través de la construcción de un arrecife artificial. El objetivo fue disminuir la energía del oleaje y permitir la acumulación de arena en la playa. El diseño fue determinado a través de modelos numéricos y pruebas de laboratorio. La obra fue construida con materiales que no causan daño al medio ambiente. Esto permitió la colonización por especies provenientes del Sistema Arrecifal Mesoamericano (350-1600 m). (p. 53)

De esta manera, el tramo seleccionado para la implementación del arrecife artificial corresponde a la zona externa de Punta las Vacas. Esta decisión se fundamenta en que dicho sector ha mostrado mayores evidencias de retroceso costero, como fue identificado en el Proyecto 1. Además, los resultados de la modelación hidrodinámica realizados en el Proyecto 2, junto con los datos de dirección y altura significativa del oleaje obtenidos previamente, indican que esta zona está directamente expuesta a la acción constante de las olas. Aunque se trata de un oleaje de baja energía, la repetitividad del impacto en este tramo ha favorecido la pérdida progresiva de la línea de costa. En este contexto, la implementación de un arrecife artificial sumergido,

estratégicamente ubicado mar adentro en este sector, permitirá disipar parte de la energía del oleaje incidente antes de que alcance la línea costera, reduciendo así los procesos erosivos. Adicionalmente, este tramo ofrece condiciones batimétricas adecuadas y es un sector importante desde el punto de vista de la conservación, ya que se encuentra próximo a zonas de manglar que podrían verse afectadas por un avance continuo de la erosión.

La distancia sobre la que se implementará la solución será aproximadamente de 900 metros de la línea de costa, exactamente el tramo en Punta las Vacas con la erosión más marcada, y se plantea extenderla hasta 200 metros hacia mar adentro, es decir, a una profundidad aproximada de 3 a 5 metros.

En cuanto a las dimensiones de cada unidad del arrecife artificial, inicialmente se pensó en un diseño de forma cúbica por facilidad en la modelación, con medidas de 4x4x3 metros, ya que las celdas de la malla en Delft3D tienen una medida aproximada de 40x12 metros. Sin embargo, hacer las unidades de este tamaño implicaría una gran dificultad logística en términos de transporte e instalación, por lo que después de evaluar diferentes dimensiones posibles, se llegó a la conclusión de que la opción más viable es la de bloques cúbicos de 2 metros de lado (2x2x2 metros). Con esta medida se facilita el transporte de las unidades, así como su manipulación e instalación, sin llegar a afectar su funcionalidad puesto que otros corales tienen dimensiones muy aproximadas.

Profundizando en el diseño de las unidades del arrecife artificial, se encontró que, según Pham & Huang (2024), la tecnología de impresión 3D permite la creación de formas y diseños complejos, aumentando la diversidad del hábitat y la riqueza de especies. Las investigaciones indican que las diferentes especies suelen mostrar preferencias distintas por diseños específicos. Además, las estructuras complejas son esenciales, ya que una mayor complejidad se correlaciona directamente con una mayor biodiversidad, lo que permitiría albergar diversos organismos. En términos de relación ecosistémica, la forma y el tamaño de un arrecife artificial pueden mejorar su atractivo visual y servir de referencia para especies específicas. Otro aspecto a considerar es que se deben incluir pequeñas aberturas en las estructuras de los arrecifes artificiales, ya que es vital para la supervivencia de los peces jóvenes, pues prefieren tamaños que coincidan con los suyos.

Así mismo, una mayor superficie para el asentamiento de algas e invertebrados aumenta las fuentes de alimento, lo que mejora la productividad general; la superficie total disponible es

más crucial que el tamaño del arrecife. Gracias a la tecnología de impresión avanzada, las superficies de los arrecifes artificiales presentarán una textura rugosa, proporcionando importantes beneficios para las plantas marinas como las algas y el musgo y mejorando la absorción de las olas. Finalmente, los arrecifes artificiales deben construirse para resistir el desplazamiento o el volcamiento causado por pesca, olas, corrientes o erosión (Ibidem).

A continuación, se presentan los esquemas diseñados con el fin de mostrar lo que se espera al implementar esta solución. En estas imágenes se intenta representar de forma conceptual la disipación del oleaje después de la instalación del arrecife artificial. Para los diseños del perfil longitudinal y del corte transversal se utilizó la batimetría real de la zona obtenida mediante el *Quickplot*, aunque exagerando la escala para facilitar la visualización, por lo que no se deben interpretar como planos técnicos o reales sino como un prototipo.

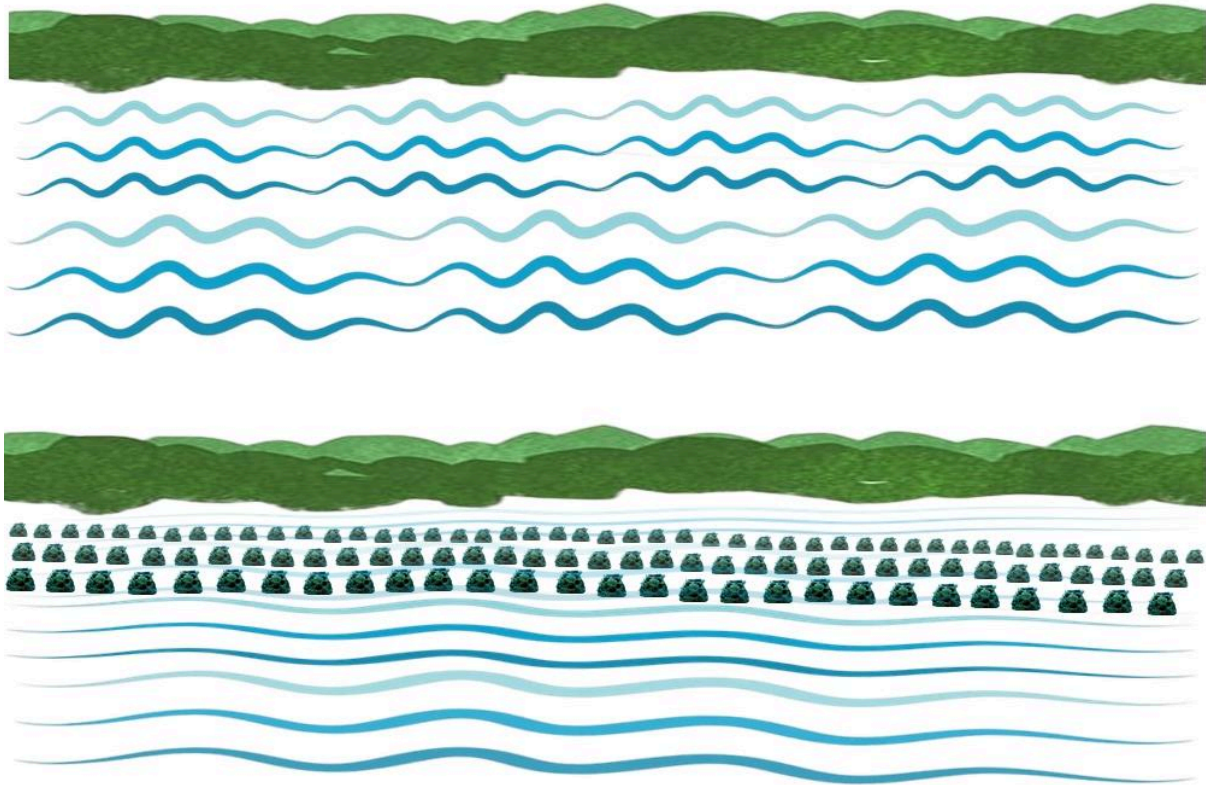
Figura 2

Vista en planta, antes y después de la instalación del arrecife artificial

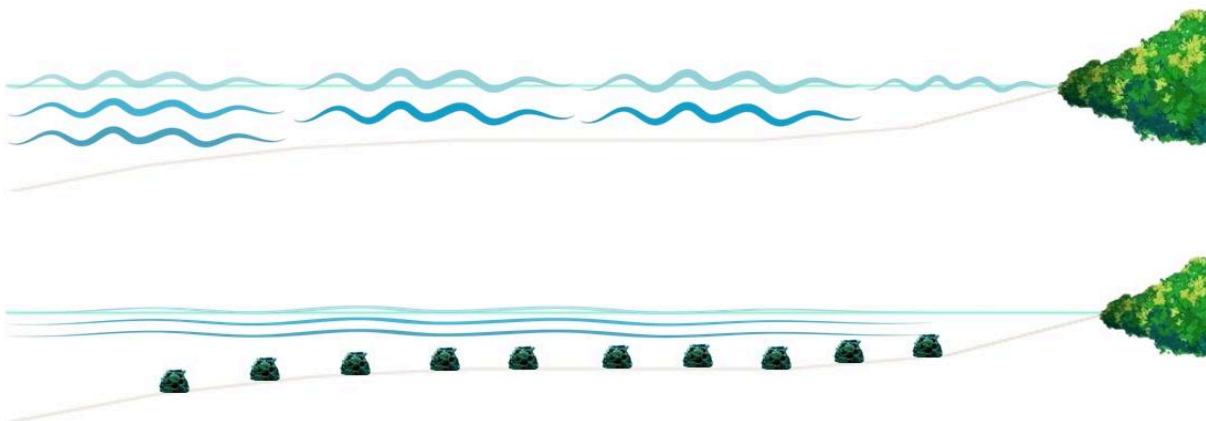


Figura 3

Vista del perfil longitudinal, antes y después de la instalación del arrecife artificial

**Figura 4**

Vista de corte transversal, antes y después de la instalación del arrecife artificial



Para la elección de los materiales se tuvo en cuenta su pertinencia ecológica, su cercanía a las soluciones basadas en la naturaleza, a las soluciones verdes o a las híbridas, la disponibilidad de las materias primas a nivel local, departamental o nacional, la compatibilidad del material con las máquinas dispuestas para la creación de los arrecifes artificiales, su resistencia y durabilidad en entornos costeros, entre otros aspectos. Inicialmente, se encontró información sobre el análisis de seis materiales con posible implementación en la solución propuesta, los cuales fueron: El acero inoxidable AISI 304, el polivinil cloruro (PVC) rígido, el polipropileno (PP), la cerámica blanca, el concreto y el coral *agaricia tenuifolia* (Díaz et al., 2014). Este estudio concluye “que los materiales aptos para la construcción de arrecifes artificiales son el acero inoxidable AISI 304, el polipropileno, la cerámica y el concreto” (Ibidem, p. 1). Sin embargo, se puede notar que algunos de estos elementos no cumplen con los factores ambientales al acercarse más a las soluciones de tipo gris.

En ese sentido, se hace necesario encontrar alternativas a dichos materiales para que logren superar su limitante para este proyecto, pasando de constituir soluciones que tienden a lo gris a las soluciones verdes-grises o verdes. Por ejemplo, el uso de materiales sostenibles como la cerámica o el hormigón bajo en carbono hecho de materiales reciclados mejora los beneficios de los arrecifes y atienden a la demanda de material y de soluciones basadas en la naturaleza. De acuerdo con lo anterior, los investigadores abogan firmemente por el uso de cenizas volantes como un componente crítico en la optimización del cemento. Este subproducto de las calderas de carbón mejora el hormigón al mejorar la trabajabilidad, la colocación, el bombeo y la eficiencia del acabado, además de que reduce la demanda de agua y la contracción por secado, aumenta significativamente la resistencia a la compresión a largo plazo y aumenta la durabilidad, ofreciendo resistencia a las reacciones de sulfato, cloruro y álcali-sílice (Pham & Huang, 2024).

Continuando con el análisis de dichos materiales, vale la pena añadir que las fases mineralógicas identificadas en los geopolímeros de cenizas volantes y lodo rojo son compatibles con la vida marina, lo que reduce el riesgo de contaminación ambiental y enfermedades en las especies. Además, las propiedades físicas y químicas de los geopolímeros son adecuadas para aplicaciones subacuáticas, ya que estos materiales son resistentes a aguas salobres. La posibilidad de moldearlos mediante impresión 3D proporciona a los geopolímeros una mayor interacción con la vida marina, facilitando el alojamiento y la protección de las especies. Finalmente, la resistencia mecánica se encuentra dentro del rango de valores de resistencia que presentan los

corales naturales (Martins et al., 2025). De esta manera, los materiales que se utilizarán para la composición de las unidades del arrecife artificial serán los mismos del estudio de Martins et al. (2025): El metacaolín, las cenizas volantes, el barro rojo, el activador alcalino, el agua y el PEG-600.

Analizando las metodologías, los posibles materiales a usar en el ámbito local y la distancia a recorrer, se logró encontrar a la empresa Sika Colombia S.A.S. como posible proveedora en el diseño y elaboración de las unidades del arrecife artificial, ya que dicha entidad, con una de sus sedes en Rionegro, tiene vía de acceso que conecta sus instalaciones con la zona de estudio; también dispone de la capacidad instalada y los requerimientos técnicos para imprimir en 3D este tipo de estructuras. Además, Sika ofrece como insumos el metacaolín y las cenizas volantes, lo cual facilita la adquisición de parte de la mezcla base para la fabricación. Los demás componentes se podrían conseguir en el municipio de Turbo, en el de Rionegro, o bien, se podrían comprar de manera virtual a domicilio.

Sika (2014) también recomienda estos materiales para la elaboración de los arrecifes artificiales: “Las adiciones minerales naturales (puzolanas naturales) o artificiales (ceniza volante, metacaolín, escoria de alto horno, humo de sílice), pueden sustituir el cemento con múltiples ventajas que trascienden largamente los argumentos económicos” (p. 26), obteniendo así los criterios de sostenibilidad que buscamos. Debido a que Sika utiliza un brazo robótico como impresora 3D y una bomba alimentadora para transportar continuamente la mezcla, según Prieto (2020), una impresora 3D de estas características puede fabricar una sola unidad de arrecife artificial grande (con dimensiones muy cercanas a las planteadas en este proyecto) en 20 horas aproximadamente. Una vez impresos los elementos, el “fraguado inmediato permite mover los objetos en poco tiempo tras la impresión” (Sika, s.f).

Para la logística de transporte e instalación del arrecife artificial, se proyecta contratar camiones con capacidad para cargar y movilizar seis unidades por viaje. Para esto, la intención es que puedan trabajar seis impresoras 3D de forma simultánea, permitiendo así fabricar las seis unidades diarias. Estas podrían ser transportadas al día siguiente para proceder con su instalación inmediata con el objetivo de optimizar tiempos y recursos. Los recorridos de estos camiones desde la oficina en la Autotécnica de Colombia de la empresa Sika, en Rionegro, hasta el aeropuerto Gonzalo Mejía, en Punta las Vacas, Turbo (punto de referencia en las cercanías del área de estudio), tienen una duración aproximada de entre 7 y 8 horas. Así mismo, para delimitar

el tiempo de duración de este proceso se debe tener en cuenta que, según los cálculos, se requieren 1920 unidades del arrecife artificial, las cuales tardarán 320 días hábiles en ser fabricadas si se logra trabajar con seis impresoras al mismo tiempo. Por lo tanto, se estima que el desarrollo de este proyecto tardaría alrededor de un año y medio en completarse, sin incluir los tiempos de obtención de licencias y permisos para la intervención en la zona costera.

Dicho lo anterior, se hace preciso entender que existe una normativa para la intervención costera, incluyendo la instalación de arrecifes artificiales. Dentro de esa normativa es fundamental definir una metodología óptima para que el estrés ecosistémico sea mínimo, el uso de los recursos sea eficiente y que la estrategia sea precisa, respetando los diferentes factores, como lo social, lo económico, lo ambiental, entre otros. En este sentido, uno de los requisitos técnicos más relevantes es asegurar una colocación precisa de las unidades en el lugar proyectado (Comisión Interministerial de Estrategias Marinas [CIEM], 2024). Al ser este un proyecto de gran magnitud es necesario definir también estrategias de monitoreo y control, por lo que “cada módulo individual deberá ser identificado con una marca indeleble y visible en el agua del mar (por ejemplo, numerado) de manera que se facilite el seguimiento del mismo y la evaluación de posibles desplazamientos” (Ibidem, p. 15).

Según la CIEM (2024): “La colocación de cada estructura individual deberá realizarse mediante descenso guiado desde superficie hasta su posición de colocación sobre el fondo marino, evitando su arrastre sobre el mismo” (p. 15). Esta metodología permite proteger la biodiversidad de los suelos marinos y los ecosistemas costeros. Después de completar la instalación del arrecife artificial, “se deberá comprobar la posición y orientación de todas las estructuras que lo componen según lo indicado en el proyecto. Tales controles se realizarán mediante observación directa con buceadores o filmación submarina para conocer la integridad estructural” (Ibidem). Teniendo claro lo anterior, otro requerimiento técnico que se necesita es el talento humano capacitado para la inmersión en la zona a intervenir. Al investigar se pudo encontrar que cerca a la zona de estudio, en Capurganá es posible encontrar buceadores profesionales e instructores. Según Procolombia (s.f): “Este destino cuenta con las condiciones ideales para aprender a bucear o certificarse como buzo”.

Con base en lo anterior, se podría concluir que, desde un primer acercamiento, la solución seleccionada es viable, factible y pertinente para la protección de la línea de costa de la Bahía de Turbo, en el área específica de Puntas las Vacas. Esto, dado que, como proyecto, esta

investigación de ingeniería conceptual explora diversas soluciones innovadoras de tipo verde y basadas en la naturaleza, abordando en profundidad la que se considera más adecuada para el contexto específico de la zona, desde diversas variables presentes como la normatividad costera, la optimización de las dimensiones, formas y texturas del arrecife artificial, la sostenibilidad de los materiales a emplear, la adaptabilidad de las especies de fauna y flora del ecosistema costero, la efectividad como estrategia, la fabricación, transporte y metodología de instalación, los requerimientos técnicos y de talento humano, entre otros. Todo lo anterior demuestra la relevancia que esta intervención puede llegar a tener.

Sustentación 3. [Haz clic aquí para ver](#)

La sustentación de este proyecto se realizó en formato audiovisual. Este video, de carácter personal y académico, tiene como objetivo dejar la evidencia de los aprendizajes obtenidos. La grabación se encuentra de manera pública en YouTube bajo el nombre “Bahía de Turbo (protección de la línea de costa) - Proyecto 3 de Procesos Costeros” (Katherine González, 2025) y puede ser consultada como fuente de referencia.

Proyecto 4. Modelación en XBeach de arrecife artificial para la protección de la línea de costa en la Bahía de Turbo

Este cuarto proyecto tuvo como objetivo evaluar, mediante una modelación numérica en XBeach, la efectividad de un arrecife artificial como medida de protección costera frente a la erosión inducida por el oleaje en el sector de Punta las Vacas, ubicado en la Bahía de Turbo. A través de esta modelación se buscó analizar el comportamiento hidrodinámico y morfológico de la zona con y sin la presencia del arrecife, con el fin de determinar el potencial de esta solución verde.

Para empezar, se retomó la modelación hidrodinámica desarrollada previamente en Delft3D, empleando el acoplamiento entre los módulos de corrientes y oleaje. En el proyecto 2, esta modelación no arrojó correctamente los resultados debido a un error en la configuración del intervalo de tiempo para la salida de resultados que pide el software Delft3D. Por ello, fue necesario ejecutar nuevamente la simulación, manteniendo exactamente los mismos parámetros

de calibración pero corrigiendo dicho intervalo. A partir de esta nueva modelación se seleccionó un punto representativo cercano al área de intervención prevista, desde el cual se extrajo una serie de tiempo mostrando resultados cada 24 horas durante un periodo de siete días. Esta serie incluyó datos de altura de ola significativa, periodo pico, dirección media del oleaje y nivel del agua, los cuales se utilizaron como condiciones de frontera para el modelo XBeach.

Con los datos obtenidos, se procedió a construir los archivos necesarios para ejecutar el modelo en XBeach. En primer lugar, se configuró el archivo *jonswap* incluyendo los valores correspondientes a la altura de ola, periodo y dirección del oleaje para cada uno de los siete días, con un espacio de tiempo de 86400 segundos, es decir, de 24 horas, generando así siete filas en el archivo. De manera similar, en el archivo *tide* se incluyeron los niveles del agua registrados durante ese mismo periodo, y en el archivo *params* se estableció el modelo de oleaje *surfbeat*, se activaron los procesos de transporte de sedimentos y de cambios morfológicos, especificando los diámetros granulométricos D50 y D90 igual a 0,0002 y 0,0003 respectivamente, manteniendo los mismos del ejemplo visto en clase.

Inicialmente, la modelación se configuró para una duración de una semana completa, sin embargo, no fue posible ejecutarla debido al elevado costo computacional que generaba. Ante esta dificultad, se implementaron ajustes progresivos para optimizar el modelo. En primer lugar, se recortó la malla original para enfocarla únicamente en el área de interés, específicamente frente a Punta las Vacas, donde se planteaba instalar la obra. A pesar de esta reducción espacial, el tiempo de simulación seguía siendo excesivo, por lo que se decidió acortar también el periodo de modelación. Finalmente, al no obtener resultados favorables se optó por generar una nueva malla, esta vez estructurada, centrada en la misma zona recortada, y se simplificaron también los archivos de entrada *jonswap* y *tide*, conservando únicamente los dos últimos registros correspondientes a las 24 horas finales del periodo inicial. Con estos ajustes, la modelación se limitó a un solo día, configurando una salida de resultados cada 4 horas, lo que permitió reducir significativamente el tiempo de procesamiento.

Gracias a la última configuración implementada, el rendimiento del modelo mejoró considerablemente. A diferencia de los intentos anteriores en los que el computador colapsaba por la alta demanda de procesamiento y se apagaba inesperadamente, interrumpiendo todo el proceso, esta vez la simulación se ejecutó satisfactoriamente en un tiempo aproximado de 24 horas.

La implementación del arrecife artificial se pensó de muchas maneras, pero con el fin de simplificar el proceso, se optó por representarlo como una modificación en la batimetría. Para ello, se siguió el siguiente procedimiento:

Partiendo de la nueva malla estructurada que se estableció con celdas de exactamente 40x12 metros, se realizó un refinamiento local en el área destinada al arrecife, refinando con un factor de 10 en el eje M y de 3 en el eje N. Esto permitió obtener celdas de 4x4 metros en la zona intervenida, modificando así 5 columnas y 80 filas originales. Después de esto se definió un patrón de distribución para las unidades del arrecife artificial, dejando aproximadamente cuatro celdas de separación entre ellas, con una disposición personalizada similar a un ajedrez. Cada celda que conceptualmente representaba una agrupación de 4 unidades reales (considerando que cada unidad mide 2x2 metros, como se explicó en el proyecto anterior) fue modificada manualmente en la batimetría, disminuyendo 2 metros su valor para simular la elevación de las unidades desde el fondo. Este procedimiento se realizó de forma manual con la herramienta de polígonos y se aplicó a 480 celdas exactamente, lo que representa un total de 1920 unidades de arrecife artificial, tal como se había proyectado.

Una vez generada esta batimetría modificada, se exportó en formato *sample* (o archivo xyz), y se interpoló nuevamente sobre la malla estructurada sin refinar, con el fin de crear la nueva batimetría que representara de una forma más simplificada el arrecife artificial. Esta fue la única modificación aplicada para la segunda modelación, la cual tuvo una duración aproximada de 15 horas. Es importante resaltar que se piensa que esta reducción del tiempo de modelación no se debió a la modificación de la batimetría, puesto que esta era más compleja, sino a la implementación de un ventilador externo que evitó el sobrecalentamiento del computador.

Al analizar los resultados del modelo, se evidencia una reducción en la altura de ola en la zona donde se implementó el arrecife artificial, lo que indica un efecto positivo en la disipación de energía. No obstante, también se observa un aumento en la altura de ola hacia el sector sur, donde no se instaló la obra. Sin embargo, esta zona corresponde a la entrada natural de la bahía, por lo que el incremento no representa un riesgo considerable de erosión costera.

En cuanto a los vectores de corrientes, no se observan diferencias significativas, aunque sí se identifica un leve incremento en la velocidad en la zona donde se implementó el arrecife. Este comportamiento podría explicarse por el paso más acelerado del flujo entre los espacios generados por la disposición de las unidades del arrecife. Así mismo se evidencian ligeros

cambios en las direcciones, donde las corrientes al norte del área intervenida tienden a orientarse un poco más hacia el norte que hacia el noreste, mientras que en la zona sur (por la entrada hacia la bahía) comienzan a desplazarse un poco más hacia el este, casi ingresando a la bahía, en lugar de continuar su trayectoria hacia el sureste.

Los niveles del agua sí presentan cambios más evidentes tras la implementación del arrecife artificial. Específicamente, se observa un aumento del nivel del agua tanto en la zona norte como en el área intervenida, mientras que en la zona sur, donde ya no se encuentra la obra, el nivel del agua disminuye. Adicionalmente, se identificó que con la presencia del arrecife artificial algunas celdas que anteriormente mostraban riesgo de inundación desaparecen, lo que representa una consecuencia positiva.

En relación con los procesos de erosión y sedimentación, se observa una disminución general de ambos fenómenos en el área ubicada al norte del arrecife artificial. No obstante, dentro de la zona intervenida aparecen pequeñas áreas localizadas de sedimentación y erosión, posiblemente asociadas a la interacción del flujo con las unidades del arrecife. En contraste, en la zona ubicada al sur de la obra, se mantienen condiciones similares a las del modelo sin intervención.

Al analizar para el último instante de modelación (a las 24 horas) una sección transversal ubicada en el límite norte del arrecife artificial se puede observar que, aunque el nivel del agua presenta un leve aumento con la implementación de la obra, la altura de ola disminuye, lo cual es relevante considerando que la batimetría también se hace menor. Por su parte, las secciones transversales en la zona central del arrecife y en su límite sur muestran un comportamiento muy similar del nivel del agua entre los escenarios de antes y después del arrecife. Sin embargo, en estas secciones se observa que, con la instalación de la obra, la ruptura de las olas tiende a ocurrir a mayor distancia de la línea de costa, lo que sugiere una disipación más temprana de la energía del oleaje gracias a la presencia de las unidades del arrecife artificial.

También se observa que, en el límite norte, la implementación de la obra genera un incremento tanto en los procesos de erosión como en los de sedimentación, lo cual indica una mayor dinámica morfológica en esa zona. En la parte central del arrecife artificial, el comportamiento de estos procesos es más estable y presenta pocas variaciones entre los escenarios sin y con intervención, aunque se evidencia una ligera tendencia hacia una mayor sedimentación cuando el arrecife está presente. Por otro lado, en el límite sur, se tiene un

comportamiento muy parecido pero con cambios menos estables, puesto que se evidencia una intensidad mayor tanto en la erosión como en la sedimentación, predominando levemente los procesos erosivos en el escenario con la obra implementada.

A partir de los resultados, se concluye que la implementación del arrecife artificial muestra un potencial significativo como estrategia de protección costera para la zona de Punta las Vacas, contribuyendo a la reducción de la altura de ola y a la disminución del riesgo de inundación en el sector intervenido. Así mismo, se evidencian cambios favorables en los procesos de transporte de sedimentos y en la morfodinámica costera dentro del área protegida por la obra.

No obstante, también se identificaron posibles efectos secundarios en sectores adyacentes, como aumentos en la altura de ola y variaciones en la dirección y velocidad de las corrientes, especialmente en la entrada de la bahía. Estos efectos podrían desencadenar nuevos focos de erosión o redistribución de sedimentos en zonas no contempladas inicialmente, lo que indica la necesidad de realizar un análisis más detallado del comportamiento regional del sistema costero ante la implementación de este tipo de soluciones.

Finalmente, estos proyectos evidencian la utilidad de la modelación numérica como herramienta para anticipar el comportamiento de soluciones de infraestructura verde para la protección costera. Cabe resaltar que este trabajo corresponde a un ejercicio académico con limitaciones técnicas importantes, como la simplificación de la obra a través de modificaciones en la batimetría, la modelación establecida para solo 24 horas y las restricciones computacionales que impidieron explorar diferentes configuraciones. Por lo tanto, valdría la pena complementar este estudio con simulaciones más prolongadas, el uso de equipos con mayor capacidad de procesamiento, y la implementación de otras variables como la rugosidad del fondo, la de las unidades del arrecife, la vegetación costera o quizá también otras combinaciones de soluciones verdes y basadas en la naturaleza.

Sustentación 4. [Haz clic aquí para ver](#)

La sustentación de este proyecto se realizó en formato audiovisual. Este video, de carácter personal y académico, tiene como objetivo dejar la evidencia de los aprendizajes obtenidos. La grabación se encuentra de manera pública en YouTube bajo el nombre “Bahía de Turbo

(modelación con XBeach) - Proyecto 4 de Procesos costeros” (Katherine González, 2025) y puede ser consultada como fuente de referencia.

5.2 Evidencias del curso Limnología

De la misma forma que se dio en el curso de “Procesos Costeros”, la metodología de evaluación establecida por el docente del curso estuvo definida también desde cuatro actividades principales, las cuales estuvieron orientadas al análisis de procesos hidrodinámicos en ecosistemas acuáticos lénticos. Estos productos incluyeron la caracterización y evaluación del pleuston, tomando como especie de análisis la planta *Eichhornia crassipes* como microecosistema, esto a través de diferentes pruebas de laboratorio. Así mismo, fue necesaria la creación y ejecución de un seminario académico y de un protocolo a modo de relatoría con respecto a las intervenciones de otro de los seminarios y, finalmente, se tuvo que hacer un informe con respecto a la salida de campo a la Estación Piscícola San José del Nus que se realizó con el propósito de recolectar datos que permitieran evaluar la calidad del agua y caracterizar el ecosistema acuático presente en el área de estudio. Teniendo esto en cuenta, esta sección de desarrollo describe a detalle los resultados de los proyectos.

Proyecto 1. Caracterización y evaluación de *Eichhornia crassipes* como microecosistema

Introducción

Las plantas acuáticas desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas de humedales, ya que contribuyen a la estabilidad ecológica, la purificación del agua y la provisión de hábitats para diversas especies. Entre estas plantas, el buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) destaca por su capacidad para modificar las condiciones ambientales y estructurar las comunidades acuáticas. Esta especie, originaria de América del Sur, ha sido ampliamente estudiada debido a su rápido crecimiento y su potencial invasor, que puede alterar la dinámica de los ecosistemas acuáticos (Esteves, 1998).

El buchón de agua ha sido objeto de numerosas investigaciones que han explorado su ecología, su impacto en la calidad del agua y su interacción con otros organismos. Estudios han

demostrado que esta planta flotante puede afectar parámetros fisicoquímicos del agua, como el oxígeno disuelto y la temperatura, además de albergar una gran diversidad de microorganismos en sus raíces y hojas. Estas investigaciones han utilizado técnicas como la microscopía y el análisis de parámetros fisicoquímicos para comprender mejor su rol en los ecosistemas acuáticos y su capacidad para colonizar nuevos ambientes (Aguirre & Caicedo, 2013).

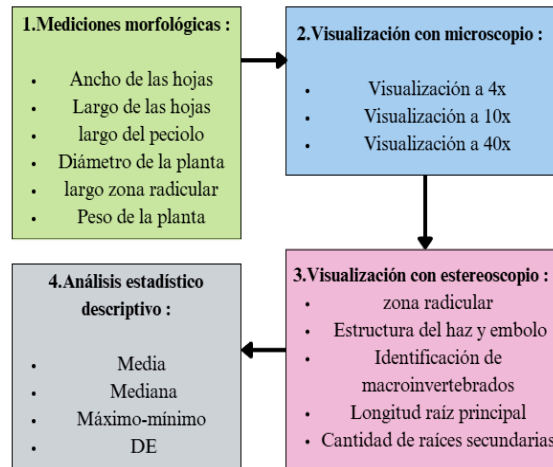
En este contexto, surge la pregunta de investigación: ¿Es el buchón de agua un microecosistema? La hipótesis propuesta es que sí, ya que esta planta no solo modifica las condiciones fisicoquímicas del agua, sino que también alberga una gran diversidad de microorganismos en sus raíces y hojas, creando un entorno único que sustenta una comunidad biológica específica.

Para comprobar esta hipótesis, se realizó una práctica de laboratorio para caracterizar morfológicamente el buchón de agua recolectado en un ecosistema local, identificar los microorganismos asociados a esta planta y evaluar los parámetros fisicoquímicos del agua en relación con su presencia. Para ello, se midieron variables como la temperatura, el pH, la conductividad y el oxígeno disuelto, con el fin de comprender cómo esta especie influye en las condiciones del agua y en la biota acuática. Estos resultados no solo permiten validar la hipótesis planteada, sino que también son esenciales para desarrollar estrategias de manejo y conservación de los ecosistemas afectados por esta especie (Wetzel, 2001).

Metodología

La metodología empleada en este estudio se resume en la Figura 5, la cual describe el proceso para analizar el buchón de agua y su entorno acuático. En primer lugar, se recolectaron muestras de la planta y del agua en un humedal urbano local. Posteriormente, se realizó una caracterización morfológica de la planta, midiendo dimensiones y peso. Simultáneamente, se identificaron los microorganismos asociados a las raíces y hojas mediante técnicas de microscopía. Finalmente, se evaluaron parámetros fisicoquímicos del agua, como temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad, para comprender su relación con la presencia del buchón de agua.

Figura 5
Metodología resumida



Resultados

En la Tabla 1 se presentan las mediciones morfológicas de tres muestras de *Eichhornia crassipes*. En términos generales, se observa una variación en varios parámetros. Por ejemplo, la parte aérea tiene una media de 10,37 centímetros, pero con una amplia dispersión, que se evidencia en la desviación estándar de 9,27 centímetros y un valor máximo de 21,00 centímetros. En contraste, la parte sumergida presenta una media de 8,10 centímetros y una desviación estándar de 3,77 centímetros, mostrando menor variabilidad. El diámetro de la planta tiene un valor promedio de 30,60 centímetros, indicando una distribución más estable. En cuanto al peso, la media es de 142,43 gramos, pero la desviación estándar de 73,50 gramos denota una gran variabilidad entre las muestras, lo que refleja diferencias considerables en el peso de las plantas analizadas. Cabe aclarar que las muestras tenían diferentes tamaños.

Tabla 1*Mediciones morfológicas de tres muestras de Eichhornia crassipes*

Mediciones	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	X	Mediana	DE
Parte sumergida (cm)	12,30	7,00	5,00	8,10	7,00	3,77
Parte aérea (cm)	6,10	4,00	21,00	10,37	6,10	9,27
Diámetro planta (cm)	35,80	24,00	32,00	30,60	32,00	6,02
Peso (g)	215,80	68,80	142,68	142,43	142,68	73,50
No. de hojas	12,00	12,00	10,00	11,33	12,00	1,15
Diámetro hojas (cm)	6,80	7,50	6,80	7,03	6,80	0,40
Largo hojas (cm)	6,10	6,50	8,50	7,03	6,50	1,29
Longitud de pecíolo (cm)	13,50	14,00	15,90	14,47	14,00	1,27

Nota. X: media, DE: desviación estándar.

En cuanto a otras características, el número de hojas tiene una media de 11,33 y una desviación estándar de 1,15, señalando una pequeña variabilidad en el número de hojas entre las muestras. Las hojas presentan un diámetro promedio de 7,03 centímetros con una baja desviación estándar de 0,40 centímetros, lo que expresa una mayor uniformidad en este parámetro. El largo de las hojas tiene una media de 7,03 centímetros, con una desviación estándar de 1,29 centímetros, mientras que la longitud del pecíolo es de 14,47 centímetros, con una desviación estándar de 1,27 centímetros. En general, las mediciones muestran variabilidad en algunas características morfológicas, mientras que otros parámetros son más consistentes entre las muestras.

En la visualización al microscopio se identificaron varios microorganismos acuáticos con características diversas. Se observaron ostrácodos generalmente de menos de 1 milímetro (microcrustáceos relacionados con los cangrejos y presentes en casi cualquier ambiente acuático). También se encontraron nematodos, conocidos como “gusanos redondos”, que tienen un aparato digestivo completo, desde la boca hasta el ano, o cloaca en los machos. Además, se identificaron nauplios (la primera fase larval de los crustáceos), caracterizados por una estructura simple con pocas partes desarrolladas. Los platelmintos (gusanos planos) también estuvieron presentes; estos organismos invertebrados habitan en ambientes marinos, fluviales y terrestres, jugando roles importantes como depredadores o parásitos.

Por otro lado, se observaron protozoos, organismos unicelulares que viven en medios acuáticos, ya sean salados o dulces, y que se alimentan de otros organismos o materia orgánica.

Entre ellos se destacó la aspidisca, un protozoo que se desplaza sobre superficies y flóculos de fangos, alimentándose de las bacterias que encuentra en su camino. Estos protozoos poseen estructuras ciliares especializadas, conocidas como cirros, que les permiten moverse y alimentarse eficazmente en su entorno acuático.

Con las visualizaciones al estereoscopio se observaron detalladamente el haz y el envés de la planta, así como algunos cortes transversales. El haz presentó una textura lisa y homogénea, mientras que el envés mostró una textura más rugosa, lo que destacó las diferencias entre ambas caras de la planta. Además, se examinaron las raíces, revelando su estructura y organización. Los cortes transversales de la planta permitieron apreciar mejor sus características internas, proporcionando una visión más completa de su morfología.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian variabilidad en las características morfológicas del buchón de agua, coincidiendo con hallazgos de investigaciones previas. Por ejemplo, estudios como los de Malik (2007) han documentado que las dimensiones y el peso de esta especie pueden variar considerablemente dependiendo de las condiciones ambientales, como la disponibilidad de nutrientes y la calidad del agua. La amplia dispersión observada en la parte aérea y el peso de las plantas analizadas indican que el buchón de agua tiene una alta plasticidad fenotípica, lo que le permite adaptarse a diferentes entornos acuáticos. Además, la presencia de microorganismos como ostrácodos, nematodos, protozoos y platelmintos en las raíces y hojas de la planta respalda la idea de que esta especie actúa como un hábitat para una comunidad biológica diversa, tal como lo han señalado Gopal (1987) y Sculthorpe (1967).

Por otro lado, al entender que las raíces del buchón de agua sirven como estructura para estas especies, se puede inferir que determinar su área superficial es fundamental para estimar el espacio disponible para que puedan ser habitadas. Como señalan Claassen & Steingrobe (1999), un sistema de raíces más delgado tiene un área superficial mayor, lo que indica que la morfología radicular influye directamente en la superficie de contacto con el entorno. Dado que las raíces secundarias del buchón de agua son estructuras delgadas y abundantes, su contribución al área superficial total es significativa, favoreciendo una mayor capacidad de colonización microbiana.

Sin embargo, calcular con precisión el área superficial de un conjunto de raíces es complejo debido a la variabilidad en su forma, longitud y volumen de raíces secundarias, por lo que el cálculo de este valor tiende a ser siempre una aproximación. Algunos métodos, como aproximar las raíces a cilindros, presentan un alto margen de error y resultan poco prácticos. En cambio, técnicas más precisas incluyen el uso de programas de análisis de imágenes, que permiten medir el área proyectada de las raíces a partir de imágenes digitales obtenidas con un escáner. Como mencionan Equiza & Tognetti (2002), herramientas como WinRhizo™ han demostrado ser efectivas para calcular la superficie radical, proporcionando estimaciones más confiables y menos invasivas.

Conclusión

A partir de estos hallazgos, se puede concluir que el buchón de agua podría funcionar como un microecosistema. Según la definición clásica, un ecosistema es un sistema formado por organismos vivos y su entorno físico, donde interactúan como una unidad funcional (Wetzel, 2001). En este sentido, el buchón de agua no solo modifica las condiciones fisicoquímicas del agua, como se evidenció en las mediciones de pH, oxígeno disuelto y conductividad, sino que también sostiene una comunidad de microorganismos que dependen de la planta para su supervivencia. Esta interacción entre la planta, los microorganismos y el entorno acuático sugiere que el buchón de agua podría actuar como un microecosistema, aunque se requieren más estudios para confirmar esta hipótesis y explorar en detalle las dinámicas ecológicas que ocurren en su entorno.

Finalmente, estos hallazgos tienen implicaciones importantes para el manejo y conservación de los humedales. La capacidad del buchón de agua para actuar como un microecosistema resalta su papel ecológico en la estructuración de comunidades acuáticas y en la modificación de las condiciones ambientales. Sin embargo, su potencial invasor y su rápido crecimiento también representan un desafío para la gestión de ecosistemas acuáticos, especialmente en humedales urbanos. Futuras investigaciones podrían profundizar en cómo estas interacciones afectan la biodiversidad y la funcionalidad de los ecosistemas a largo plazo, proporcionando bases científicas para estrategias de control y conservación más efectivas, tal como lo sugieren Lugo et al. (1990).

Autores del Proyecto 1

Este artículo fue realizado en equipo por: Katherine González Ossa, Wilfer David Guzmán López y Kateryn Peña Mejía, estudiantes del curso de Limnología.

Proyecto 2. Seminario sobre eutrofización, presentado por la estudiante de pregrado Katherine González Ossa

Es cierto que, aunque todo seminario parte de una planeación y unas temáticas a desarrollar frente a un público, el dinamismo propio de las relaciones pedagógicas que se dan en los procesos de enseñanza y aprendizaje hace que los resultados de una intervención en clase sean únicos, contextualizados a un espacio y tiempo, y a un acontecer de hechos que son imposibles de controlar o de prever en su totalidad; por eso, es necesario para este proyecto abordar el seminario no desde su planeación sino desde el protocolo realizado por el estudiante del curso de Limnología, Walter Córdoba, pues es allí donde se ve reflejado el verdadero alcance de lo desarrollado, ya que se da justo en el momento de las discusiones finales; además de que, como actividad evaluativa, la realización de dicho protocolo estaba estipulada en la agenda del curso, siendo esta una evidencia oficial del seminario realizado.

Sin embargo, desde un punto de vista más personal como expositora de este tema, considero que es fundamental introducir brevemente los principales contenidos tratados en este seminario con el fin de contextualizar adecuadamente el protocolo de discusiones finales. Así, es necesario entender que, durante el seminario, se presentó de manera clara y estructurada el tema de la eutrofización, un proceso ambiental que ocurre cuando los cuerpos de agua reciben una carga excesiva de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo. Se explicó que este fenómeno favorece la proliferación de algas y plantas acuáticas, especialmente en aguas poco profundas y tranquilas. Además, se describieron las causas antrópicas (como aguas residuales, fertilizantes agrícolas y urbanización) y naturales (como erosión, lluvia ácida y envejecimiento del cuerpo de agua) que contribuyen a este proceso.

También se detalló cómo el exceso de nutrientes desencadena una serie de eventos negativos: crecimiento descontrolado de algas, bloqueo de la luz, muerte de la vegetación

sumergida, consumo de oxígeno por bacterias y, finalmente, zonas de hipoxia o anoxia que afectan gravemente la biodiversidad. Se señalaron las consecuencias ecológicas, sanitarias y económicas como la pérdida de fauna acuática, aparición de toxinas, disminución de la calidad del agua, acidificación, y aumento en los costos de tratamiento. Se explicó que revertir este proceso es difícil debido a la persistencia de los nutrientes, especialmente del fósforo.

Finalmente, se abordó la clasificación trófica de los cuerpos de agua (de ultraoligotróficos a hipereutróficos) y los principales modelos de evaluación, como el de Vollenweider (OCDE), el índice de Carlson y el modelo LACAT, adaptado para lagos tropicales. También se presentaron modelos cuantitativos como el balance de masa y la regresión *Stepwise*.

Con esta contextualización, se da paso entonces a la evidencia de coevaluación desarrollada en el protocolo del seminario:

Protocolo

Entre los asistentes a este seminario se encuentran el profesor Néstor Aguirre, así como los estudiantes Juan Daniel Ríos Arboleda, Kateryn Peña Mejía, Wilfer David Guzmán López, Jane Estacy Herrera Mendoza y Walter Smith Córdoba Valencia, siendo este último el encargado de levantar el presente protocolo.

Wilfer. Respecto a los nutrientes, por lo general el fósforo suele ser el elemento limitante. ¿Qué sucede cuando el nitrógeno es el limitante? ¿Tiene importancia? ¿Qué pasaría en el sistema?

Profesor. (Aporta) En general, los organismos requieren alrededor de 40 elementos para producir biomasa, como carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, fósforo, calcio, sodio, cloro, hierro, entre otros elementos biogénicos. En ingeniería se utilizan más los modelos simplificados y empíricos, donde se miden variables físicas y químicas del agua, como cantidades, clorofila, transparencia, colores, etcétera.

Esos modelos empíricos han identificado al fósforo como el nutriente de mayor peso. Se requiere meteorizar la roca para que el fósforo, después de un proceso, llegue al agua. Es difícil de obtener, en el país la mayoría de los cuerpos acuáticos están limitados por el fósforo. El

problema no radica tanto en la disponibilidad de elementos, porque muchos pueden encontrarse en el agua. Por lo general, 1 fósforo = 9 nitrógeno.

Profesor. (Pregunta al público) ¿Teniendo el balance de masas, podríamos aplicar un modelo de eutrofización LACAT?

González. Considero que es complicado, ya que no contamos con datos del fósforo.

Profesor. Se podría hacer una aproximación.

Wilfer. El fósforo se midió solo del centro en el lago, y como lo que se requiere es la carga de entrada, podríamos hacer una aproximación teniendo en cuenta los polígonos de Thiessen, pero puede ser difícil debido a que la muestra se tomó solo en un lugar central y no en las entradas o salidas.

González. (Menciona que hubo una muestra que se tomó en un punto cercano al canal).

Profesor. (Sugiere que se puede utilizar una muestra que se tomó cercana a la entrada (punto 16) para la clorofila. También ofrece su tiempo para realizar un viaje y tomar una nueva muestra. Además, indica que se cuenta con los datos de profundidad media del cuerpo de agua y la carga superficial de fósforo).

Profesor. (Pregunta) ¿Cómo podemos hallar el tiempo de retención hidráulica?

Peña. El volumen se puede hallar con la batimetría.

González. (Sugiere multiplicar el caudal por el volumen para hallar el tiempo de retención hidráulica).

Wilfer. (Corrige diciendo que es el volumen dividido sobre el caudal. $\text{Tiempo} = \text{Volumen}/\text{Caudal}$ [metros cúbicos/(metros cúbicos/segundo)]).

Profesor. (Propone hacer una regresión).

Peña. (Hace un aporte hablando del turismo, dice que los cuerpos de agua tienen una prestación de servicios ecosistémicos, donde se puede evaluar que los cuerpos tengan la capacidad de generar servicios paisajísticos para la población. Aclara que esto no implica que un lago eutrofizado no pueda tener valor turístico. Como ejemplo habla del río Medellín, que a pesar de su contaminación sigue siendo importante para el turismo de la ciudad).

González. (Agradece el comentario y aclara que había pensado en ese aspecto al considerar el baño en el cuerpo de agua).

Profesor. La eutrofización presenta cargas antrópicas, culturales y naturales. (Habla de que el inconveniente se encuentra en el exceso de aportes de nutrientes por fuentes puntuales como tal, pues revertir esos impactos es complejo y costoso. Sugiere buscar primero la fuente de los nutrientes, como por ejemplo, alcantarilla, plantas de tratamiento, etcétera).

Lo primero para controlar la eutrofización es cortar la entrada del exceso de nutrientes. El lago del Parque Norte antes era un basurero y después se hizo un trabajo de ingeniería para convertirlo en lo que es ahora. En los 70 se podía navegar en él tranquilamente, y debido a que al lago han ingresado aguas del río Medellín, se empezó en él un proceso de eutrofización, donde crecieron excesivamente las algas y por ende las bacterias, por lo cual la entidad Metrosalud tomó la decisión de no permitir el acceso al agua debido a las posibles infecciones al cuerpo humano. (Pone de ejemplo también el embalse Porce 2 que está totalmente eutrofizado, lo que le genera tristeza, ya que piensa que en el país hay suficiente conocimiento para evitar que esto pase).

Juan Daniel. (Dice haber escuchado que el permanganato de potasio ayuda a controlar el crecimiento descontrolado en un cuerpo de agua).

Profesor. (Sugiere que lo primero es identificar las fuentes de nutrientes e intervenir para que no ingresen más. Menciona que en la Estación Piscícola de San José del Nus se introducen

muchos alimentos para los peces, aunque todavía no se ha determinado si este lago está eutrofizado. En el ejemplo del Parque Norte indica que lo primero debió haber sido cortar el ingreso del alcantarillado en su tiempo. Añade que en cuerpos pequeños se puede succionar el fondo buscando eliminar este exceso. También sugiere asperjar bicarbonato de calcio o cal con flautas, para que junto al fósforo forme fosfato de calcio, el cual se precipita fácilmente. Finalmente, indica que en un ambiente eutrofizado hay que sacar los peces, evitando que estos se contaminen para que sirvan para el consumo).

Proyecto 3. Protocolo del seminario sobre el potencial óxido-reducción, presentado por el estudiante de maestría Wilfer David Guzmán López

Este proyecto se hace complejo de describir, ya que este seminario fue realizado por un compañero de clase cuya preparación y planeación no fueron de conocimiento público, por lo que la contextualización de la temática presentada en el seminario no puede ser introducida en este texto, puesto que sería imprecisa al tratar de reconstruir de forma escrita algo cuya esencia es una expresión oral sujeta a interpretaciones. Es por eso que el desarrollo del protocolo como evidencia de este seminario buscó sintetizar, a través de las discusiones finales, lo que fue mencionado a lo largo del seminario, dando como resultado el siguiente texto:

Protocolo

Entre los asistentes a este seminario se encuentran el profesor Néstor Aguirre, así como también los estudiantes Juan Daniel Ríos Arboleda, Walter Smith Córdoba Valencia y Katherine González Ossa, siendo esta última la encargada de levantar el presente protocolo:

- El potencial óxido-reducción abarca partes físicas, biológicas y ambientales. ¿Es una variable respuesta o una variable independiente?

El potencial óxido-reducción puede ser una variable independiente, ya que es muy volátil, muy difícilmente es constante. Se debe medir muchas veces para reducir el error. Se puede complementar su análisis con otras variables.

- ¿Por qué los humedales son los riñones del mundo?

Debido a la ubicación y a sus funciones internas, los humedales actúan como filtros naturales, permiten que los ríos que llegan con materia orgánica o contaminantes recalcitrantes se puedan sedimentar, purificar o degradar dentro de estos ecosistemas. Como consecuencia, el agua llega con mejores condiciones al océano.

- ¿A partir de la medición del potencial óxido-reducción se puede determinar la especiación química en el agua?

En el caso del oxígeno, valores muy positivos pueden indicar liberación de dióxido de carbono en el agua. Sin embargo, los sensores a veces tienen problemas al dar una medida puntual y hay otros métodos más precisos.

La reducción de sulfato a sulfito muestra valores muy negativos en los sedimentos, mientras que la transformación de amoníaco a nitrato implica una ganancia de oxígeno.

Se puede determinar la presencia de amonio en el agua con la medición del pH (se mide este por facilidad).

Algunas bacterias liberan amoníaco en vez de amonio, y algunas convierten el amoníaco en amonio.

El nitrógeno llega al sistema de dos formas:

- Por fijación, las cianobacterias toman de la atmósfera el nitrógeno y lo fijan como amonio. A pHs muy alcalinos (altos), el amonio se convierte en amoníaco (este predominará).
- Cuando llega materia orgánica disuelta o escorrentía (nitrógeno orgánico disuelto), los hongos y las bacterias lo degradan y excretan formas más simples: amonio. Algunas lo convierten posteriormente en nitrato (este es el más consumible) y otras en nitrito.

¿A qué niveles se puede el amoníaco generar la muerte de peces?

El amoníaco es un gas (no disuelto) que mientras sale de la masa de agua puede ser potencialmente tóxico para la vida acuática. Esto es mucho más grave entre más grande sea el organismo (como los peces).

El carbono azul no es solo secuestro de carbono sino que se asocia más a la vegetación presente en los humedales. Este concepto se mide en humedales naturales en vez de artificiales.

Algunas formas solubles se desprenden como sedimentos a la lámina de agua, mientras que algunas formas insolubles son fuente de la biomasa en el agua.

Proyecto 4. Caracterización limnológica del lago en la Estación Piscícola de la Universidad de Antioquia en San José del Nus en Antioquia, Colombia

Introducción

Los lagos tropicales son ecosistemas megadiversos que proveen servicios esenciales como abastecimiento de agua, regulación climática y sustento para actividades humanas; son definidos como depresiones naturales que retienen agua, presentan gran variabilidad en tamaño, profundidad y dinámicas ecológicas, determinadas por factores geográficos e hidrológicos (Roldán & Ramírez, 2008). En este contexto, la limnología resulta clave para estudiar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y entender cómo interactúan y modelan su productividad y estructura ecológica. Esta comprensión teórica permite analizar cómo los factores geográficos y las condiciones hidráulicas moldean el comportamiento ecológico de los lagos. La ubicación tropical los expone a un clima cálido y a una alta radiación solar, modulados también por la altitud, mientras que la precipitación y el tiempo de residencia regulan la circulación y la disponibilidad de nutrientes.

Las condiciones geográficas e hidráulicas impactan variables limnológicas como la temperatura, el oxígeno disuelto, la transparencia y la productividad. Muchos lagos tropicales destinados a acuicultura enfrentan alteraciones por la introducción de especies como la tilapia (*Oreochromis sp.*) o el enriquecimiento por residuos, lo que eleva la carga de nutrientes, fomenta la eutrofización y reduce el oxígeno, afectando comunidades biológicas y la calidad del agua (Tundisi et al., 2008). Además, el manejo inadecuado de la piscicultura agrava estos impactos,

alterando variables clave como pH, nutrientes y compuestos orgánicos e inorgánicos (Bohnes & Laurent, 2020).

Como marco conceptual, se consideran términos como producción primaria y eutrofización, claves en el comportamiento del lago. La producción primaria mide la tasa a la que los organismos fotosintéticos convierten energía solar en materia orgánica. Por su parte, el estado trófico describe el nivel de productividad biológica del ecosistema, determinado principalmente por la disponibilidad de nutrientes, especialmente fósforo y nitrógeno.

Así, este trabajo se guía por la pregunta: ¿Cómo afectan las condiciones geográficas e hidráulicas de un lago tropical sus características limnológicas? Se plantea que estos factores, incluyendo las prácticas acuícolas como la alimentación de peces, determinan la dinámica térmica, los nutrientes y el estado trófico del sistema, definiendo su identidad ecológica. Teniendo así como objetivo caracterizar integralmente el lago tropical de la Estación Piscícola de la Universidad de Antioquia en San José del Nus y analizar sus interacciones para generar conocimiento que respalde su gestión sostenible frente a desafíos como el cambio climático y la intervención humana.

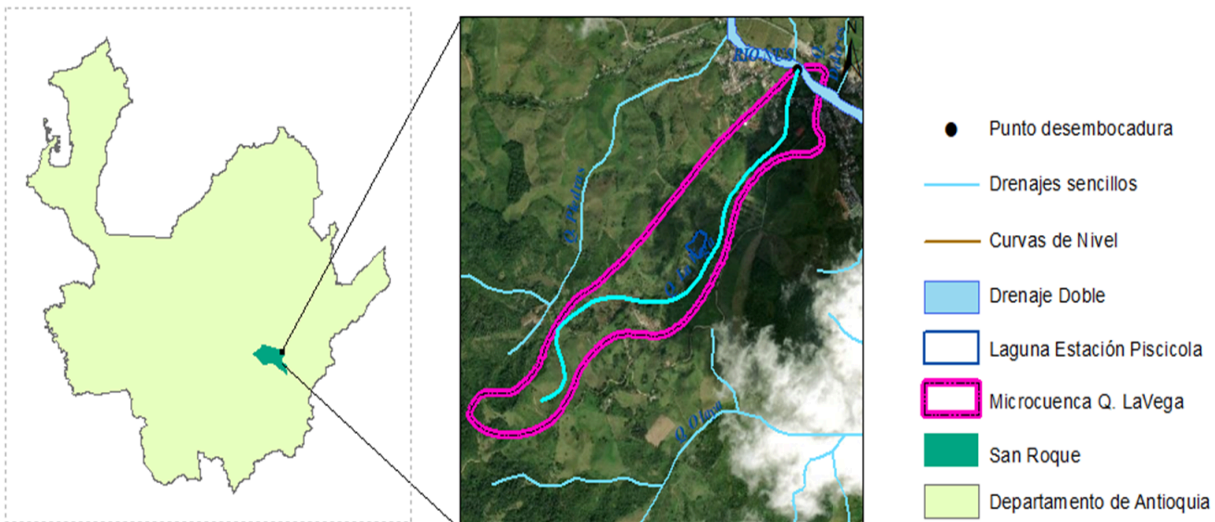
Materiales y métodos

Área de estudio. La microcuenca de la quebrada La Vega se encuentra ubicada al nororiente del municipio de San Roque en el departamento de Antioquia, Colombia (Figura 6), el cual a su vez pertenece a la subregión nordeste de dicho departamento. La microcuenca posee un área total de 77,9 hectáreas, su drenaje principal posee una extensión de 2,48 kilómetros aproximadamente y su flujo va en dirección suroccidente-nororiente. Esta quebrada nace en el punto 6,482355, -74,841289 y desemboca en 6,496603, -74,828231 siendo una de las quebradas tributarias del Río Nus.

Algunas de sus quebradas aledañas son: al sur la quebrada La Olaya, al noroccidente la quebrada Piedras y, cerca de su desembocadura en el río Nus, la quebrada Dolores.

Figura 6

Ubicación de la microcuenca de la quebrada la Vega



Geografía. La caracterización geomorfológica se realizó utilizando el software ArcGIS. Inicialmente, se creó un modelo de elevación digital a partir de curvas de nivel con cotas de 100 metros. Este modelo de elevación digital fue la base para la delimitación de la cuenca, la cual se llevó a cabo empleando las herramientas de la extensión *Spatial Analyst*, específicamente las del conjunto de herramientas de Hidrología, como *Fill* (para corregir sumideros), *Flow Direction* (para determinar la dirección del flujo) y *Watershed* (para delinear la cuenca a partir de un punto de desembocadura). Posteriormente, para la generación del ráster de pendientes, se usó la herramienta *Slope* (o *Surface Parameters*) del conjunto de herramientas de *Surface* (dentro de *Spatial Analyst* o *3D Analyst*) a partir del modelo de elevación digital. En cuanto a la evaluación de los cambios en la cobertura terrestre, se emplearon las bases de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia [IDEAM]. Mediante el geoprocésamiento de ArcGIS, se realizaron los cortes específicos de las coberturas para los años 2000, 2005 y 2016. Finalmente, se efectuó un análisis cuantitativo de las variaciones por categoría, basándose en el nivel 3 de la metodología *CORINE Land Cover* para Colombia, lo que permitió identificar los cambios en cada tipo de cobertura a lo largo del periodo de estudio.

Climatología e hidráulica. Para caracterizar la precipitación en la cuenca de la quebrada la Vega se utilizó la información de la estación Granja Experimental el Nus, código 23085080, operada por el IDEAM.

Para el cálculo de la evaporación promedio multianual (1293,34 milímetros por año) se empleó el método de *Turc* descrito por Vélez et al. (1999). Esta ecuación mide la evaporación real basándose en un balance de masas, en función de elementos meteorológicos simples como temperatura y precipitación de la cuenca, aplicadas a medidas de largo plazo. *Turc*, en 1954, adapta a la familia de las curvas Evapotranspiración = función (Precipitación, Temperatura) a partir de observaciones hechas en 254 cuencas situadas en todos los climas de la tierra (Remenieras, 1974; Brutsaert, 1982).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \text{ para } \frac{P}{L} > 0,316 \quad ETR = P \text{ para } \frac{P}{L} < 0,316 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- ETR = Evaporación real (milímetros por año).
- P = Precipitación anual (milímetros).
- $L = 300 + 25T + 0,05T^3$.
- T = Temperatura media anual (grados Celsius).

El parámetro L fue hallado por medio de regresiones hechas en las 254 cuencas y T se estimó usando la relación propuesta por Chaves & Jaramillo (1998) para la zona andina:

$$T = 29,42 - 0,0061 * H \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- H = Elevación media (metros sobre el nivel del mar).

Para estimar el caudal de entrada, se realizó un aforo siguiendo el protocolo del IDEAM (2021), se levantó la sección transversal rectangular del canal de entrada, se midió la velocidad superficial de la corriente y se estimó el caudal por el método área-velocidad (Caudal = Velocidad*Área).

Por otro lado, para evaluar la cantidad de agua que sale del cuerpo de agua se empleó la ecuación de vertedero rectangular:

$$Q = 1,84 * B * H^{\frac{3}{2}}$$

Ecuación 6

Donde:

- B = Base (metros).
- H = Altura (metros).

Biología. El estudio se llevó a cabo en la estación piscícola de la Universidad de Antioquia, ubicada en el corregimiento San José del Nus. La metodología se estructuró en cuatro fases:

Tabla 2

Metodología para el análisis de pigmentos totales

1. Adquisición de datos mediante muestreo físico de agua e imágenes aéreas.	2. Procesamiento de imágenes para generar ortomosaicos de alta resolución.	3. Extracción de variables espectrales con cálculo de índices RGB.	4. Evaluación de modelos predictivos para espacializar pigmentos totales (Aguirre, 2013).
---	--	--	---

En la primera fase se tomaron muestras aleatorias en 20 puntos del lago a tres profundidades (superficie, centro y fondo). Esta estrategia de muestreo vertical nos permitió obtener un perfil detallado y comprender la variabilidad de los procesos físicos, químicos y

biológicos en la columna de agua, información importante para el diagnóstico y manejo de la calidad del agua (Kalff, 2002). Las muestras fueron posteriormente analizadas en el laboratorio para determinar variables como conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH, potencial óxido-reducción, temperatura del agua, dureza, fosfatos (PO_4^{3-}), alcalinidad y nitritos (NO_2^-), entre otros.

Paralelamente, se realizó un vuelo aerofotogramétrico (con *UAV Phantom 4 Pro V2*, sensor *CMOS* de 20 megapíxeles) a 100 metros de altura, obteniendo imágenes con una resolución espacial aproximada de 3 centímetros por píxel, que se procesaron mediante el software Agisoft Metashape para generar un ortomosaico georreferenciado de alta precisión.

Las muestras de agua recolectadas para pigmentos totales se tomaron a una profundidad de 10 centímetros y se analizaron siguiendo la metodología propuesta por Aguirre (2013), que incluye filtración, extracción con acetona, centrifugación y determinación espectrofotométrica de la concentración de clorofila-a. El cálculo de nitratos, nitritos, dureza y alcalinidad se realizó mediante técnicas colorimétricas, lo que facilitó la evaluación del nivel de contaminación.

Para relacionar los pigmentos totales con los valores de número digital se usó el algoritmo de *Random Forest*, el cual pertenece al grupo de métodos de aprendizaje automático supervisado y se basa en la construcción de múltiples árboles de decisión (conocidos como “árboles aleatorios”). El modelo *Random Forest* opera mediante el muestreo aleatorio con reemplazo de los datos (técnica conocida como *bootstrap*), generando múltiples subconjuntos de entrenamiento a partir del conjunto original y construyendo para cada uno un árbol de decisión independiente. El resultado final se obtiene a partir de todos los árboles, mediante votación en el caso de clasificación o promedio en el caso de regresión.

Estado trófico. Para determinar el estado trófico del lago se aplicó la metodología propuesta por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS] (1990) para lagos cálidos tropicales, la cual se basa en el cálculo del fósforo total, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$P = \frac{L(P)*TW}{3z} \quad L(P) = \frac{Q_{ent} * P_{ent} * 31536000}{A} \quad TW = \frac{Q_{ent} * P_{ent} * 31536000}{A} \quad \text{Ecuación 7}$$

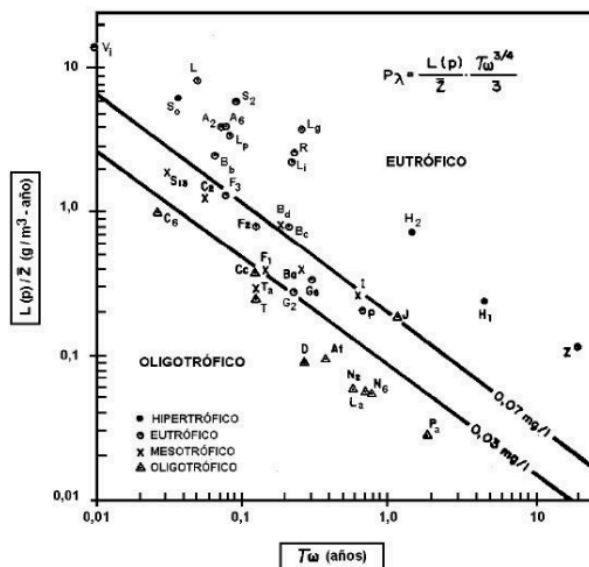
Donde:

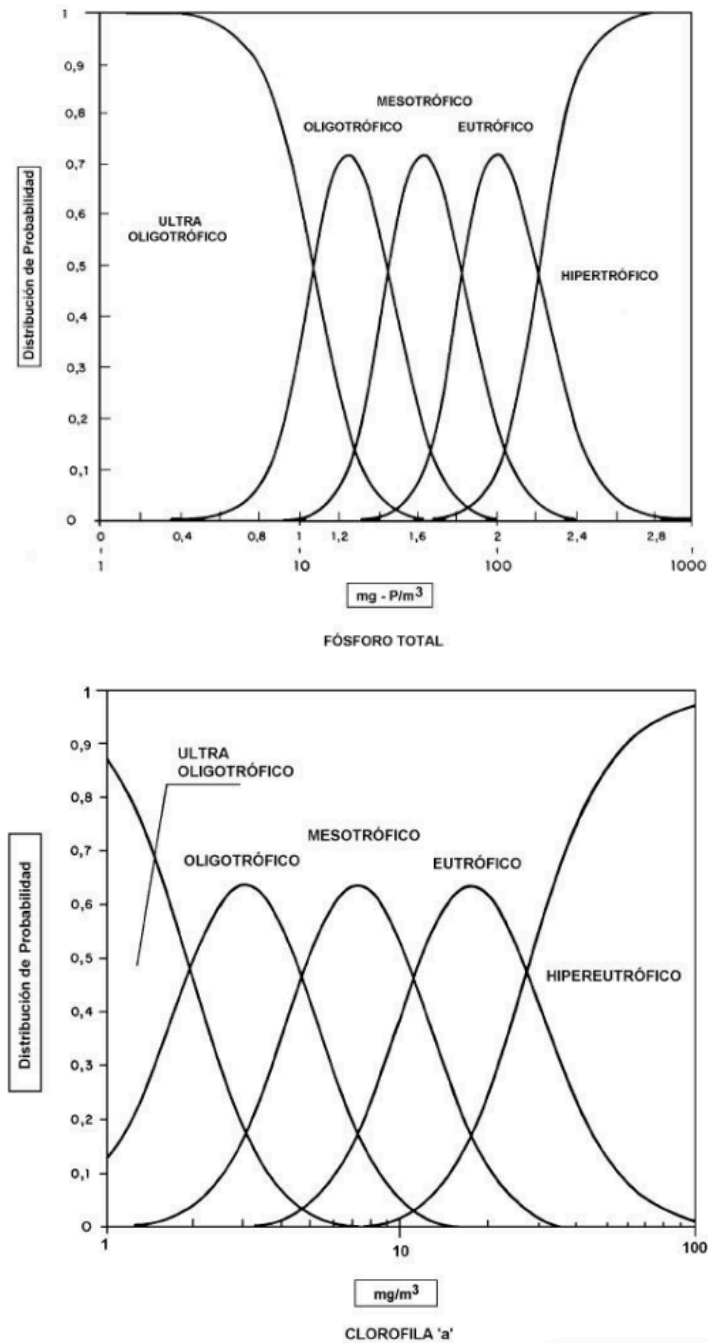
- P = Fósforo total (miligramos por litro).
- Tw = Tiempo de retención hidráulica (años).
- z = Profundidad media (metros).
- L(P) = Carga de fósforo por unidad de área (gramos por metro cuadrado al año).
- Qent = Caudal de entrada (metros cúbicos por segundo).
- Pent = Fósforo de entrada (miligramos por litro).
- A = Área (metros cuadrados).
- 31536000 = Factor de conversión (segundos/año).

A partir de estos parámetros, y del valor estimado de pigmentos totales de clorofila-a, se puede predecir el estado trófico usando las gráficas de referencia del CEPIS (1990) mostradas en la Figura 7:

Figura 7

A. Predicción del estado trófico. B. Distribución de probabilidad a partir del fósforo total. C. A partir de la clorofila-a





Nota. Fuente (CEPIS, 1990).

Adicionalmente, se empleó la clasificación de Vollenweider (1966) integrando los datos de concentración de ortofosfatos (TP), pigmentos totales de clorofila-a (Chl) y transparencia medida con el disco Secchi SD:

Tabla 3*Estado trófico de Vollenweider*

Trophic category	TP [ug/L] [mg/m3]	Medium Chl [ug/L] [mg/m3]	Maximum Chl [ug/L] [mg/m3]	Medium Secchi [m]	Minimum Secchi [m]
Ultraoligotrophic	<4	<1	<2,5	>12	>6
Oligotrophic	<10	<2,5	<8	>6	>3
Mesotrophic	10 - 35	2,8 - 8	8 - 25	6 - 3	3 - 1,5
Eutrophic	35 - 100	8 - 25	25 - 75	3 - 1,5	1,5 - 0,7
Hypereutrophic	>100	>25	>75	<1,5	<0,7

Nota. Fuente (Vollenweider, 1966).

Finalmente, se aplicó el índice TSI de Carlson (1977), que permite determinar el estado trófico a partir de las mismas variables previas, siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$TSI = \frac{TSI(SD)+TSI(Chl)+TSI(TP)}{3} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$TSI(SD) = 60 - 14,41 * \ln(SD)$$

$$TSI(Chl) = 9,81 * \ln(Chl) + 30,6$$

$$TSI(TP) = 14,42 * \ln(TP) + 4,15$$

El valor obtenido del TSI se interpreta según los siguientes rangos propuestos por Carlson (1977):

Tabla 4*Índice de estado trófico de Carlson*

Ultraoligotrophic	Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic	Hypereutrophic
<30	30 - 40	40 - 50	50 - 70	>70

Nota. Fuente (Carlson, 1977).

Producción primaria. La producción primaria puede estimarse por diversos métodos. En este estudio, debido a la disponibilidad de datos sobre pigmentos totales, se utilizó un indicador indirecto: la clorofila-a. Estos pigmentos están presentes en todas las algas fotosintéticas y se correlacionan con la biomasa generada por fitoplancton. La relación entre clorofila-a y producción primaria ha sido bastante documentada en la literatura. En esta investigación se aplicó un modelo empírico basado en los trabajos de Ryther & Yentsch (1957), Behrenfeld & Falkowski (2003) y Vollenweider (1966).

Este modelo combina datos de clorofila-a (Vollenweider, 1966) con factores ambientales como la irradiancia, la temperatura y la profundidad fótica (Ryther & Yentsch, 1957) para estimar la producción primaria. Además, incorpora el coeficiente “a” propuesto por Behrenfeld & Falkowski (2003), que representa la eficiencia fotosintética según la temperatura y el estado trófico del lago:

Tabla 5
Coeficiente a

Coeficiente "a"	Límites	Valor
Lagos oligotróficos	1 - 2	5
Lagos mesotróficos	2 - 5	
Lagos eutróficos	4 - 8	

Nota. Fuente (Behrenfeld & Falkowski, 2003).

De todo lo anterior, se presenta la siguiente ecuación:

$$PP = a * Chl * I(rel) * T * Zfo \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

- PP = Producción primaria (miligramos de carbono por metro cuadrado al día).
- Chl = Concentración de clorofila-a (miligramos de clorofila por metro cúbico).

- a = Coeficiente empírico de eficiencia fotosintética (miligramos de carbono por miligramos de clorofila al día).
- $I(\text{rel})$ = Irradiancia relativa (Lux o vatios por metro cuadrado).
- T = Temperatura (grados Celsius).
- Z_{fo} = Profundidad de la zona fótica (metros).

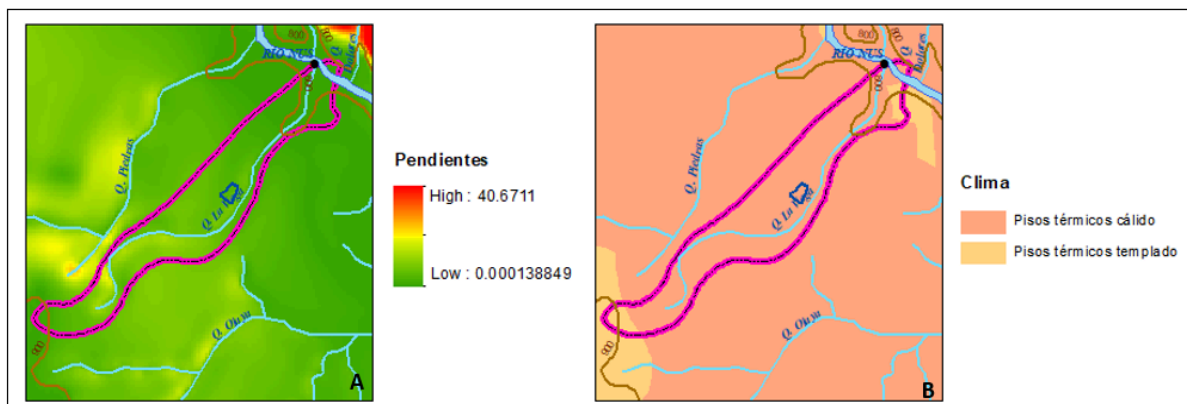
Esta ecuación permite cuantificar la producción de miligramos de carbono por metro cuadrado de superficie al día.

Resultados

Geomorfología. El área de la cuenca se distribuye desde los 900 metros sobre el nivel del mar en la parte alta, hasta los 800 metros sobre el nivel del mar en la baja, con pendientes internas que varían desde los 0 grados hasta los 9 grados. En sus alrededores aumentan hasta los 13 grados, mientras que después de su desembocadura en el río Nus llegan hasta los 40 grados (Figura 8. A). Geológicamente, la cuenca pertenece al batolito antioqueño, formado en el cretácico superior, con predominio de granodioritas, tonalitas y cuarzdioritas.

Figura 8

A. Pendientes. B. Clasificación climática de la microcuenca

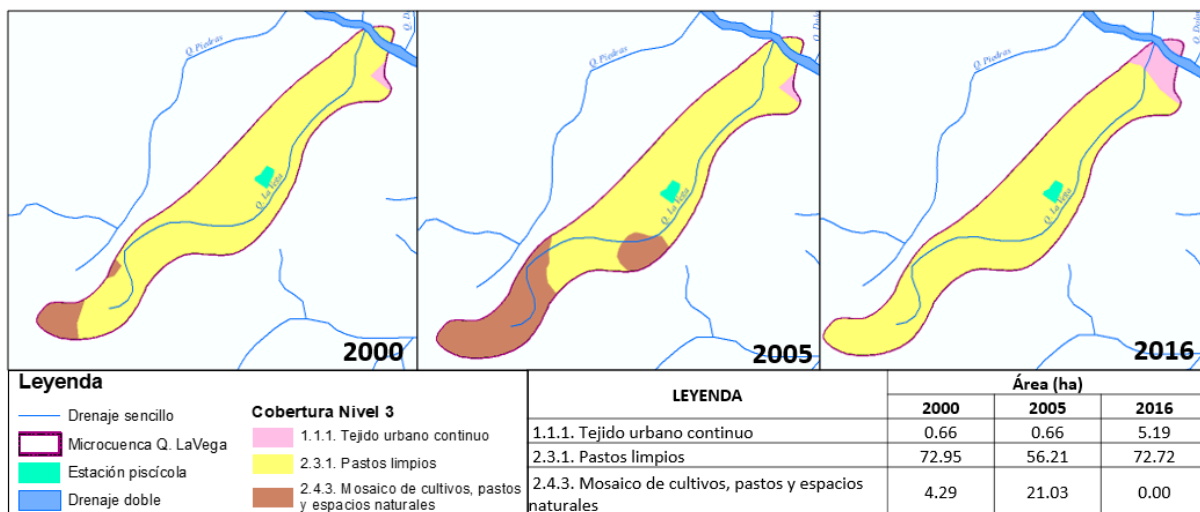


En cuanto a la composición climática, más del 90% del área se ubica en el piso térmico cálido, con temperaturas entre 20 grados Celsius y 25 grados Celsius tanto en partes altas como bajas. Por las elevaciones y pendientes circundantes, también se encuentran zonas pequeñas de piso térmico templado, con temperaturas inferiores a 20 grados Celsius (Figura 8. B). Estas condiciones clasifican la zona de vida tipo “Bosque húmedo tropical”.

Cobertura terrestre y usos del suelo. En el año 2000, la cuenca mostraba una clara predominancia de pastos limpios que cubrían unas 72,95 hectáreas (Figura 9). Le seguían en extensión los mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales, con 4,29 hectáreas en 2000, aumentando a 21,03 hectáreas en 2005. Sin embargo, para 2016, esta cobertura desapareció por completo, siendo reemplazada totalmente por pastos limpios. En cuanto al área de tejido urbano continuo, pasó de 0,66 hectáreas en 2000 a 5,19 hectáreas en 2005, manteniéndose como una de las coberturas predominantes en 2016.

Figura 9

Cambio de cobertura terrestre del año 2000 al 2016

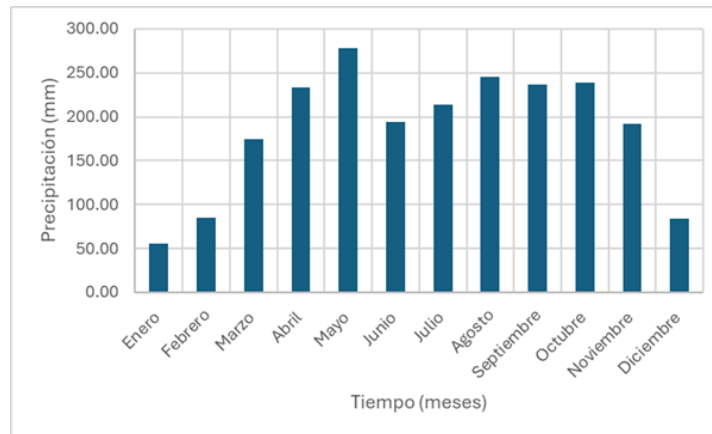


Nota. Fuente (Sistema de Información Ambiental de Colombia [SIAC], 2018).

Precipitación, evaporación y escorrentía. La precipitación promedio multianual es de 1974,03 milímetros por año con un ciclo anual de patrón bimodal (Figura 10). El valor máximo se da en mayo (278,32 milímetros) y el mínimo en enero (55,22 milímetros).

Figura 10

Ciclo anual de precipitación, estación Granja Experimental el Nus, periodo 2010-2025



La evaporación real estimada es de 1293,34 milímetros por año, es decir, 65% de la precipitación multianual registrada en la zona del humedal. Finalmente, a partir del balance hídrico de largo plazo (Figura 11), y considerando la precipitación (PRE) y la evaporación (EVA), la escorrentía (E) se estimó: $E = PRE - EVA = 680,68$ milímetros por año.

Figura 11

Componentes del balance hídrico



Nota. Fuente (Ochoa et al., 2022).

Hidráulica. El canal rectangular de ingreso al lago tiene un área de 0,013 metros cuadrados, con una velocidad de flujo de 2,158 metros por segundo, lo que da un caudal de entrada de 28,489 litros por segundo. Por su parte, el caudal de salida por la estructura de vertedero se estimó en 0,003 metros cúbicos por segundo (2,854 litros por segundo). Considerando el balance hídrico de largo plazo y el área del lago (7941 metros cuadrados), la evaporación real se calculó en 0,33 litros por segundo. Además, se estimó que, sin recarga, el lago podría secarse en 435 días (1,192 años).

Descripción fisicoquímica y de contaminantes. A continuación se presentan los resultados de las mediciones de las variables fisicoquímicas del agua en función de la profundidad (Figura 12).

El análisis de los perfiles fisicoquímicos reveló una clara estratificación en la columna de agua: temperatura y oxígeno disuelto disminuyen hacia el fondo, mientras que conductividad eléctrica, dureza y dióxido de carbono aumentan. El bajo oxígeno refleja menor fotosíntesis y mayor consumo por descomposición. Se detectaron altos niveles de ortofosfatos (4,0 miligramos por litro) y nitritos (0,05 miligramos por litro), evidenciando una carga significativa de nutrientes. El pH se mantuvo ligeramente ácido (6,69) y la baja alcalinidad (1,2 milimoles por litro) indica una capacidad limitada de amortiguación, lo que hace al sistema susceptible a cambios de pH.

Figura 12
VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS MEDIDAS IN SITU A TRES PROFUNDIDADES

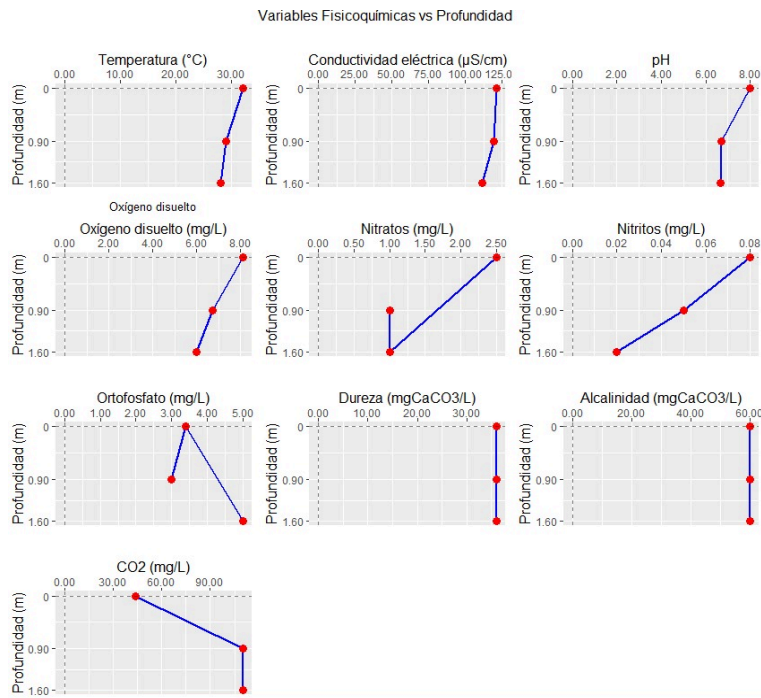


Figura 13
Floración de algas en el lago



Se evidenciaron floraciones algales (Figura 13), signo claro de acumulación de materia orgánica y de alteración en la composición de microorganismos (Zhang et al., 2024). Además, el ingreso de material vegetal, como hojas y plantas acuáticas, libera nutrientes (nitrógeno y

fósforo) elevando la demanda bioquímica de oxígeno y reduciendo los niveles de oxígeno disuelto, lo que afecta negativamente a peces y otros organismos acuáticos (Burbano et al. 2021). Aunque especies como *Brachiaria mutica* y otras gramíneas pueden remover carga orgánica, su descomposición también contribuye a liberar materia orgánica y alterar parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (Palta & Morales, 2015).

La intensificación de la piscicultura en limnocorrales (Figura 14), agrava la acumulación de materia orgánica en el fondo debido al exceso de alimento no consumido y excretas. Esto incrementa los riesgos para la producción, ya que favorece la presencia de contaminantes biológicos, reduce el oxígeno disuelto y provoca la acumulación de compuestos nitrogenados tóxicos para los peces (Luna, 2011).

Figura 14

Limnocorrales de peces en el lago



Las variables fisicoquímicas del agua se compararon con los valores recomendados por las normas de calidad para aguas superficiales naturales en Colombia, específicamente la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1594 de 1984, así como con referencias internacionales pertinentes, como las directrices de la Organización Mundial de la Salud [OMS]. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Los resultados promediados de las mediciones fisicoquímicas muestran que la mayoría de las variables del agua cumplen con las normas nacionales e internacionales de calidad para aguas

superficiales. Sin embargo, se detectaron concentraciones de fosfato y ortofosfato que exceden ampliamente los límites permitidos, lo que representa un riesgo considerable de eutrofización.

Tabla 6

Cotejo de parámetros fisicoquímicos con normas de calidad de agua superficial

Parámetro	Valores Medidos (Promedio)	Norma de Calidad (Referencia)	Cumplimiento / Observación
Conductividad eléctrica	116,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$	< 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (OMS)	Cumple. Valor bajo, típico de aguas naturales.
Oxígeno disuelto	6,4 mg/L	> 5 mg/L (Decreto 1594/84, Clase II)	Cumple. Adecuado para vida acuática.
pH	6,69	6,5 – 9,0 (Decreto 1594/84)	Cumple. Ligeramente ácido, pero dentro del rango.
ORP (mV)	67	No especificado en norma local	Valor bajo, indica baja oxidación.
Temperatura	30°C	< 32°C (Decreto 1594/84)	Cumple, aunque es un valor alto.
Nitratos (NO_3^-)	1,4 mg/L	< 10 mg/L (OMS, Decreto 1594/84)	Cumple ampliamente.
Dureza (mg/L CaCO_3)	53,7 mg/L	< 300 mg/L (OMS)	Cumple. Agua blanda a moderada.
Fosfato (PO_4^{3-})	4,0 mg/L	< 0,1 mg/L (eutrofización)	No cumple. Muy alto, riesgo de eutrofización.
Alcalinidad (mg/L CaCO_3)	60 mg/L	20 – 200 mg/L (OMS)	Cumple. Nivel adecuado.
Nitrito (NO_2^-)	0,05 mg/L	< 0,1 mg/L (OMS)	Cumple. Valor bajo.
Ortofosfato	3,5 mg/L	< 0,1 mg/L (eutrofización)	No cumple. Muy elevado.

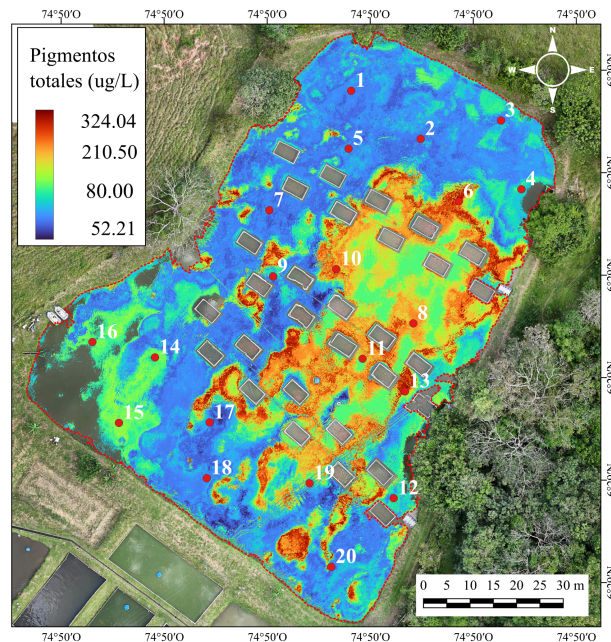
Pigmentos totales. En este estudio se compararon tres configuraciones de modelos para determinar el enfoque más eficaz: un *Random Forest* utilizando características seleccionadas mediante algoritmos de optimización, otro *Random Forest* usando únicamente las bandas RGB, y un modelo de *Gradient Boosting* también basado en las bandas RGB. Esta comparación permitió identificar las limitaciones y ventajas de cada enfoque en el contexto específico de la estimación de pigmentos fotosintéticos en cuerpos de agua.

La selección se realizó mediante el algoritmo de Eliminación Recursiva de Características (RFE), el cual permitió identificar como variables óptimas la banda roja, la verde, el índice NDVI adaptado a RGB y el GLI. Este conjunto se destacó por ofrecer la mejor combinación entre capacidad predictiva y simplicidad del modelo, logrando un equilibrio ideal entre precisión y eficiencia computacional.

Los resultados de la comparación revelaron diferencias notables entre los tres modelos evaluados. El modelo de *Random Forest* con las cuatro características seleccionadas presentó el

mejor desempeño, alcanzando un coeficiente R^2 de determinación de 0,84 y un error cuadrático medio de 1511,09. El modelo de *Random Forest* basado solo en bandas RGB arrojó un R^2 de 0,83, obteniéndose un rendimiento ligeramente inferior pero competitivo. Por su parte, el modelo de *Gradient Boosting* presentó un R^2 de 0,99, aunque este resultado sugería un posible sobreajuste. La robustez del modelo fue validada mediante la técnica de *bootstrap* con 1000 remuestreos, obteniendo un R^2 promedio de 0,808 con un intervalo de confianza del 95% entre 0,629 y 0,907, lo que confirmó su consistencia y capacidad para generalizar.

Figura 15
Resultados del modelo para estimar pigmentos totales



El análisis espacial reveló patrones en la distribución de pigmentos fotosintéticos. Al aplicar el modelo desarrollado sobre el ortomosaico, se generó un mapa de distribución espacial con valores predichos entre 52,21 y 324,04 microgramos por litro. Los resultados mostraron una distribución heterogénea, con concentraciones notablemente más altas en la zona central del lago y una disminución gradual hacia los bordes. El análisis de importancia de características demostró que el NDVI adaptado a RGB fue la variable más influyente en la estimación de pigmentos totales, seguido por la banda verde, la banda roja y el GLI. Esta jerarquía es coherente con el comportamiento espectral de la clorofila-a, que absorbe principalmente en la banda roja

mientras refleja más en la verde a medida que aumenta la densidad de algas. Se presenta la distribución espacial de los pigmentos totales en el lago (Figura 15).

Eutrofización. La Tabla 7 resume los resultados de los parámetros que analizan el estado trófico:

Tabla 7

Indicadores del estado trófico

P [mg/L]	L(P) [g/m ² /año]	Tw [años]	Chl [µg/L]	SD [m]
2,237	260,217	0,014	152,68	0,3345

Todos los resultados superan los rangos de los modelos del CEPIS, indicando un nivel hipereutrófico. Esta clasificación coincide tanto con el modelo de Vollenweider como con el valor del índice de Carlson, reforzando el diagnóstico de hipereutrofización para todos los casos.

Producción primaria a partir de la clorofila-a. Como se mencionó anteriormente, para estimar la producción primaria se tomaron como base modelos que establecen una relación entre la clorofila-a y otros parámetros. En este análisis, es fundamental aplicar las diferenciaciones propuestas por Behrenfeld & Falkowski (2003), quienes introducen el coeficiente “a”, con valores entre 4 y 8 cuando se trata de cuerpos de agua eutróficos y temperaturas elevadas. Los cálculos requieren considerar una irradiancia relativa, obtenida como el cociente entre la irradiancia medida y una irradiancia de referencia, correspondiente a “un sol al mediodía” (entre 100–200 vatios por metro cuadrado, equivalentes a 120000–240000 lux). Para tener un panorama amplio se calcularon valores mínimos y máximos, ajustando estos parámetros para observar cómo varía la producción primaria en el lago. Los resultados de estos cálculos se presentan en la Tabla 8.

La clasificación trófica de un lago depende de su productividad primaria, determinada por la disponibilidad de nutrientes, la biomasa y la penetración de luz. Según Vollenweider (1966), los rangos de producción primaria (PP) bruta permiten identificar el estado trófico.

Tabla 8*Datos estadísticos de producción primaria*

P. Primaria	PP mínima	PP media	PP máxima
Promedio	5671.71	11343.42	22686.83
Mediana	4157.06	8314.12	16628.24
Valor mínimo	237.55	475.09	950.19
Valor máximo	13899.85	27799.71	55599.42

Con base en los valores promedio de producción primaria, que rondan aproximadamente entre 4000 y 16000 miligramos de carbono por metro cuadrado al día, el lago se clasifica como hipereutrófico, con zonas que alcanzan condiciones extremas y potencialmente alarmantes.

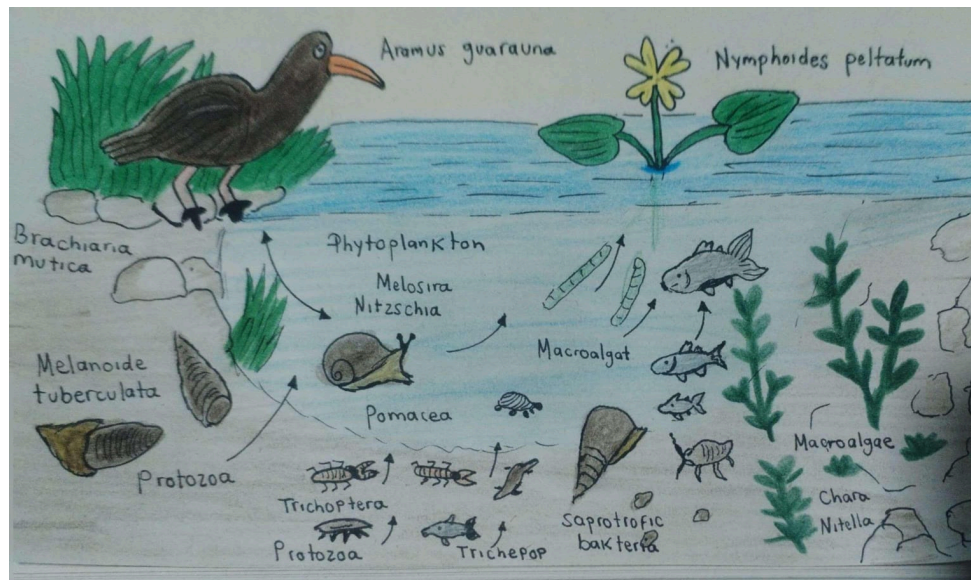
Biota acuática. Un análisis biológico del lago reveló una biota acuática diversa, conformada por descomponedores, productores primarios y consumidores, organizados y ubicados en distintas zonas ecológicas del lago, los cuales se presentan en la Tabla 9:

Tabla 9*Biota acuática presente en el lago*

Productores primarios	Fitoplancton: <i>Melosira, Nitzschia</i> . Perifiton (algas bentónicas): <i>Navicula, Fragilaria, Gomphonema, Cocconeis</i> . Macroalgas: <i>Chara, Nitella (Charophyta)</i> . Plantas flotantes: <i>Nymphoides peltatum</i> .
Consumidores	Macroinvertebrados bentónicos: <i>Smicridea (Trichoptera), Baetodes (Ephemeroptera), Psephenops (Coleoptera)</i> . Caracoles: <i>Pomacea, Melanoides tuberculata</i> .
Depredadores	Ave: <i>Aramus guarauna (Carrao, depredadora de moluscos)</i> .
Descomponedores	Protozoos (<i>ciliados</i>), bacterias saprófitas en sedimentos.

La diversidad registrada (Figura 16) refleja un ecosistema con alta carga orgánica, procesos intensos de mineralización y presencia de especies indicadoras de eutrofización:

Figura 16
Biota y red trófica en el lago



Discusión

El análisis de la microcuenca muestra cómo las características geomorfológicas y climáticas han sido alteradas por los cambios en el uso y cobertura del suelo. Las transformaciones recientes han impactado directamente las dinámicas naturales del ecosistema. La expansión de pastos limpios y el crecimiento urbano reflejan una intensificación antrópica que impacta los procesos hidrológicos y ecológicos de la quebrada. Estos cambios afectan directamente la dinámica del ecosistema acuático y sus servicios, incluyendo los que sostienen la estación piscícola.

La alteración de la cobertura vegetal modifica la esorrentía, afectando caudales y transporte de sedimentos (Gonzales & Llanos, 2021). Los resultados sobre calidad del agua son preocupantes, con altos niveles de pigmentos fitoplanctónicos y fósforo que ubican al sistema en un estado hipereutrófico, reflejando una elevada productividad primaria (Palta & Morales, 2015). Aunque podrían existir inexactitudes en las mediciones, los valores obtenidos superan ampliamente los umbrales para sistemas eutróficos, evidenciando la gravedad del problema. Esta clasificación coincide con los elevados niveles de nitratos y ortofosfatos, junto con las evidentes floraciones algales. El exceso de alimento y excretas actúa como fuente constante de nutrientes,

intensificando la productividad primaria y agravando el estado trófico del lago (Vollenweider, 1966).

El análisis climatológico muestra un balance hídrico positivo, confirmando una escorrentía superficial en el humedal (Vélez et al., 1999). Aunque la radiación solar es alta, la evaporación no supera el 66% de la precipitación. Hidráulicamente, el lago está en fase de llenado, con un caudal de ingreso mucho mayor que el de salida; además, la estación piscícola capta el 28,5% del caudal medio de 99,84 litros por segundo, registrado por Aguirre et al. (2004) en la quebrada.

El análisis espacial revela una distribución heterogénea de clorofila, ligada a la presencia desigual de nutrientes. Las concentraciones promedio de nitrógeno (2,3 miligramos por litro) y fósforo (4,5 miligramos por litro) son significativamente altas, superando los rangos típicos de cuerpos de agua dulce no eutrofizados (Kalff, 2002). La acumulación de nutrientes se debe principalmente a la sobrealimentación de los peces, donde el alimento no consumido se sedimenta o disuelve, liberando compuestos nitrogenados y fosfatados (Bohnes & Laurent, 2020). Estos nutrientes actúan como fertilizantes, impulsando el crecimiento acelerado de fitoplancton y explicando los altos niveles de clorofila registrados (Liang et al., 2025). Estas condiciones favorecen *blooms* algales, reducen la transparencia, alteran los niveles de oxígeno y, en casos extremos, provocan anoxia y mortalidades masivas (Palta & Morales, 2015). Además, deterioran la calidad del agua, limitando sus usos recreativos, domésticos e industriales (Burbano et al., 2021).

La heterogeneidad en la distribución de clorofila refleja diferencias locales en nutrientes, influenciadas por la profundidad, corrientes, puntos de alimentación y mezcla vertical del agua (Briceño & Gallego, 2025). Estos microhábitats con distinta productividad deben considerarse al diseñar estrategias de manejo (Zhang et al., 2024). En comparación con estudios previos, los niveles observados son consistentes con sistemas bajo alta presión antrópica y mala gestión acuícola. Investigaciones en lagos urbanos colombianos (Roldán & Ramírez, 2008) reportan relaciones Nitrógeno/Fósforo > 10:1 en ambientes sobrealimentados, coincidiendo con los patrones hallados.

El hallazgo más preocupante es el exceso de fósforo: fosfato (4,0 miligramos por litro) y ortofosfato (3,5 miligramos por litro), muy por encima del umbral de riesgo de eutrofización. Este exceso es clave de la eutrofización en ecosistemas de agua dulce (Schindler, 1974). Aunque

la escorrentía agrícola, las descargas residuales y la morfología del lago también influyen, los datos sugieren que la mala gestión del alimento acuícola es el principal impulsor del exceso de nutrientes y del estado hipereutrófico del sistema (Zhang et al., 2024). Si bien algunas variables fisicoquímicas cumplen con la normativa vigente, otras muestran niveles saturados o cercanos a los límites. Esto subraya la necesidad de un manejo adecuado de la carga orgánica en los ecosistemas piscícolas y de mantener un monitoreo bacteriológico.

Para garantizar la sostenibilidad de la piscicultura y proteger el ecosistema, es esencial un monitoreo continuo de las variables fisicoquímicas y biológicas, junto con una gestión sanitaria eficiente (Burbano et al., 2021). Las medidas para mitigar la contaminación incluyen mejorar la gestión de residuos orgánicos, controlar el ingreso de material vegetal, regular la densidad de peces, aplicar sistemas de tratamiento como filtración y humedales, y realizar análisis periódicos (Luna, 2011). Estas acciones son fundamentales para preservar la calidad del agua, la salud de los peces y la viabilidad a largo plazo.

Conclusión

La geomorfología, la ganadería intensiva y el alimento no consumido de los peces generan que el lago sea hipereutrófico, productivo y afectado por contaminación biológica. El lago revela una eutrofización avanzada, reflejada en floraciones algales superficiales y concentraciones de fósforo que superan los límites normativos. Aunque varias variables se mantienen dentro de la norma, la estratificación térmica y el elevado dióxido de carbono indican una gran descomposición de materia orgánica. Esta situación, junto con la entrada de material vegetal, los contaminantes de escorrentía y el exceso de nutrientes, son los factores que impulsan la degradación del sistema. Es urgente implementar estrategias de restauración que optimicen la alimentación, controlen la materia orgánica y la liberación de nutrientes.

Autores del Proyecto 4

Este artículo fue realizado en equipo por: Katherine González Ossa, Wilfer David Guzmán López, Kateryn Peña Mejía, Juan Daniel Ríos Arboleda, Jane Estacy Herrera Mendoza y Walter Smith Córdoba Valencia, estudiantes del curso de Limnología.

6. Conclusiones y recomendaciones

La experiencia desarrollada en el marco de esta práctica académica para optar al título de pregrado demuestra que es viable y pertinente que la Facultad de Ingeniería adopte oficialmente la modalidad coterminal de Trabajo de Grado como parte de su oferta de prácticas académicas. Esta modalidad, basada en la articulación entre pregrado y posgrado a través de un enfoque metodológico mixto, permitió integrar la formación avanzada con la investigación aplicada, generando resultados académicos y formativos significativos. Los logros alcanzados, descritos en este informe, constituyen un caso exitoso que respalda la implementación del piloto en esta primera cohorte de estudiantes, sirviendo como referencia positiva y punto de partida para futuras generaciones de estudiantes.

Se determinó que esta es una iniciativa innovadora de gran potencial, la cual ha logrado su cometido de fortalecer los saberes profesionales de los estudiantes del pregrado de ingeniería y de motivar en ellos el interés por la continuación de estudios posgraduales, pues, en lo personal, esta experiencia ha hecho crecer mis expectativas en la posibilidad de estudiar una especialización o una maestría en la línea de Recursos Hídricos, esto gracias a que pude reconocer el nivel de exigencia que tienen los cursos de posgrado, a la habilidad desarrollada para la resolución de problemas complejos y a que experimenté los grandes aprendizajes que se pueden obtener de la continuación formativa en el área de la ingeniería.

En general, se puede concluir de la práctica que es alta la afinidad de los cursos de posgrado con los múltiples programas de pregrado ofrecidos por la Facultad de Ingeniería, teniendo un buen proceso de curaduría para la selección de cursos a ofertar en el banco habilitado para esta modalidad. Se percibe que hubo una buena gestión por parte de las dependencias académicas encargadas de los trámites administrativos, algo que hizo muy cómodo para los estudiantes el proceso de matrícula de los cursos. Es destacable por parte de los docentes la metodología colaborativa empleada en el desarrollo de los proyectos, dando lugar a que los estudiantes de doctorado y de maestría formaran equipos horizontales de trabajo con los estudiantes de pregrado, siendo así pares académicos y aportando desde su saber especializado un soporte a la formación y los objetivos de esta práctica.

Uno de los aprendizajes más significativos que aportaron al cumplimiento del objetivo general definido al inicio de esta propuesta fue la síntesis de experiencias de ambos cursos que

derivaron en una conciencia ambiental adquirida en cuanto a la importancia del recurso hídrico para el desarrollo social de una comunidad y para la preservación de los ecosistemas. El programa académico de Ingeniería civil pertenece a la Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería, algo que en nuestra profesionalización marca no solo una normativa a seguir sino una ética y un compromiso con la sostenibilidad ambiental. El hecho de poder profundizar en las dinámicas hidráulicas presentes en ecosistemas acuáticos introduce a la perspectiva del estudiante un gran número de variables climáticas, antrópicas, ecológicas, entre otras, que amplían el horizonte referencial desde el cual se puede comprender el impacto ambiental de las obras civiles y el rol que la ingeniería cumple al aportar herramientas para su gestión sostenible.

En ese mismo sentido, el curso de “Procesos Costeros” logró visibilizar la importancia que tiene a nivel formativo el hecho de que los estudiantes se enfrenten a problemas reales de aplicación de sus conocimientos aprendidos, siendo esta una metodología modelo que podría ser aplicada en otros cursos del pregrado, ya que de esta manera también se pueden ver reflejadas problemáticas de carácter ético, económico, social, ambiental, político, entre otros. Además, el hecho de que se buscara llegar a alternativas de solución lo más cercanas a soluciones verdes o basadas en la naturaleza reafirma el compromiso de la facultad y de los mismos docentes en reforzar el factor de protección, conservación y sostenibilidad que se alinean con los programas académicos de la Escuela Ambiental, que en esencia son transversales al resto de ingenierías.

Otro aspecto importante a resaltar en estas conclusiones finales es que el uso de las herramientas Delft3D y XBeach se hace fundamental para el análisis y la modelación de los procesos hidrodinámicos en ecosistemas acuáticos, especialmente en entornos costeros, pues su gran número de variables, funciones, y posibilidades aplicativas permiten entender con mayor profundidad las características propias de las zonas de estudio, motivando a que se aborden casos reales de aplicación para el desarrollo de la ingeniería conceptual y para las etapas de preinversión en la formulación de proyectos de ingeniería, encontrando que, para la profesionalización en el área de la ingeniería civil, el uso de estas herramientas para un estudiante de pregrado puede marcar una ruta de especialización o maestría centrada en la línea de Recursos hídricos, siendo este un conocimiento técnico de alta calidad que la articulación entre el pregrado y el posgrado ha posibilitado para generar este impacto en mi camino formativo.

Sin embargo, es necesario considerar también que estas herramientas consumen una gran capacidad computacional para la modelación, por lo cual sería pertinente que en el banco de

cursos a ofertar se puedan añadir este tipo de requerimientos técnicos y que los estudiantes lo puedan tener en cuenta a la hora de matricular los cursos de posgrado, ya que, aunque la Universidad de Antioquia ofrece servicios gratuitos para el préstamo de implementos tecnológicos como los computadores, algunos de esos procesos de modelación pueden superar las 24 horas continuas de proceso. Muchos de los equipos personales no poseen procesadores potentes ni sistemas de refrigeración adecuados, lo cual puede provocar sobrecalentamientos, apagones inesperados y pérdida total de los datos, como sucedió en mi caso. Este tipo de situaciones puede afectar gravemente el desarrollo del proyecto, por lo que valdría la pena anticipar y mitigar dichas dificultades desde la planeación académica.

Finalmente, del curso de “Procesos costeros” se puede concluir que son muchas las ventajas ofrecidas cuando la ingeniería busca resolver los problemas por medio de alternativas de solución verdes o basadas en la naturaleza; entre esas ventajas está la reducción en el costo de las materias primas, ya que estas pueden ser obtenidas a partir de residuos de otros procesos industriales, y en muchos casos pueden ser compradas o rescatadas en las cercanías de las zonas a intervenir, como pasa con la guadua y otros materiales orgánicos como el barro rojo y las cenizas volantes. Esto afecta positivamente la economía local al poder involucrar a las comunidades cercanas y sus unidades económicas, permitiendo el aprovechamiento de los recursos naturales propios del sector, lo que causa también que dichos materiales sean más compatibles con los ecosistemas en los que se desarrollarán las obras civiles, reduciendo el estrés ecosistémico, potenciando la adaptación de la fauna y flora local y fortaleciendo las estructuras al ser materiales acostumbrados a las condiciones climáticas y químicas del entorno, siendo materias primas eficaces y resistentes con una vida útil lo suficientemente larga para hacer viables los proyectos.

En el curso de “Limnología”, se logró expandir a nivel conceptual el número de variables y condiciones que definen lo que es un ecosistema acuático. Esto se alinea con el propósito de relacionamiento positivo entre la ingeniería y la sostenibilidad ambiental que desarrolla la Escuela Ambiental, ya que para un estudiante de ingeniería civil comprender los ecosistemas desde sus parámetros fisicoquímicos y sus dinámicas biológicas permite reconocer con mayor claridad el impacto que pueden tener las intervenciones antrópicas y el cambio climático, esto es algo muy potente y un impulso ético al compromiso de responsabilidad social que debe desarrollar todo ingeniero.

Lo anterior podría tomarse como una premisa clara y ampliamente desarrollada a lo largo de los programas de pregrado pero, en términos generales, el desarrollo conceptual de la sostenibilidad termina por no profundizar tan detalladamente en los componentes biológicos y los procesos hidrodinámicos propios de la línea de Recursos hídricos, menos aún al nivel que lo hace la materia de Limnología. Así, se logró entender cómo el exceso de nutrientes que resultan de la agricultura, la industria y las aguas residuales, se convierten en el detonante de una cadena de impactos ecológicos adversos que pueden llevar a la reducción de la biodiversidad, la contaminación y destrucción de ecosistemas, entre otras consecuencias ecológicas, sanitarias y económicas como la pérdida de fauna acuática, la aparición de toxinas, la disminución de la calidad del agua, la acidificación y el aumento en los costos de tratamiento, entre otros.

Otro aspecto indirecto que se puede concluir de este curso, es que la Universidad de Antioquia cuenta con valiosos espacios para la investigación. Gracias al uso de los laboratorios como parte de la evaluación del curso se pudo desarrollar una habilidad técnica en la aplicación de metodologías de investigación en campo y en laboratorio, algo que podría replicarse no solo en otros cursos de posgrado, sino también en algunos cursos del pregrado, con la intención de hacer más integral la formación en la facultad. Existe un gran desconocimiento por parte de la comunidad académica con respecto a la riqueza de lugares que dispone la Universidad de Antioquia, algo que quedó claro con la salida de campo a la Estación Piscícola de San José del Nus, un lugar de enorme potencial para el estudio en campo que puede ser aprovechado por muchos otros cursos prácticos de la línea de Recursos hídricos. En ese sentido, se puede concluir que se debería fortalecer la divulgación de estos espacios para que sean considerados en el desarrollo formativo de los estudiantes, con el fin de fomentar la integralidad de saberes entre el conocimiento teórico y su aplicación en contextos reales.

Referencias

- Aguirre, N. (2013). *Hidrobiología sanitaria*. Universidad de Antioquia.
- Aguirre, N. (2025). *Limnología*. [Programa oficial de curso de posgrado]. Universidad de Antioquia.
- Aguirre, N. & Caicedo, O. (2013). *Métodos de campo y de laboratorio para hidrobiología sanitaria*. Reimpresos Universidad de Antioquia.
- Aguirre, N., Wills, A & Palacio, J. (2004). *Caracterización de los principales aspectos fisicobióticos de la microcuenca de la quebrada La Vega, municipio de San Roque, Antioquia*. Universidad de Antioquia.
- Alfaro, L. (2021). *Soluciones híbridas como medidas de protección costera*. Universidad de Cantabria. <https://acortar.link/cbNWDU>
- Báez, D., Herrera, E. & Comba, N. (2023). *Reporte de alertas de análisis regional*. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. <https://www.anla.gov.co/images/documentos/reportes-alertas/reportes-alertas-offshore.pdf>
- Barry, S., Hernández, E. & Clark, M. (2025). Performance assessment of three living shorelines in Cedar Key, Florida, USA. *Estuaries and Coasts*, 48, 7. <https://doi.org/10.1007/s12237-024-01440-w>
- Behrenfeld, M. & Falkowski, P. (2003). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 42(1), 1-20. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.1.0001>
- Bernal, G., Montoya, L., Garizábal, C. & Toro, M. (2005). La complejidad de la dimensión física en la problemática costera del Golfo de Urabá, Colombia. *Gestión y Ambiente* 8(1), 123-135. <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169421171009.pdf>
- Berrío, Y. (2018). *Evaluación morfodinámica con esquemas de protección costera en las playas de Riohacha, La Guajira*. Universidad del Norte. <http://hdl.handle.net/10584/8206>
- Blanco J. (2016). *Expedición Caribe sur*. Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Océano. <http://bit.ly/4eSEYOS>
- Blanco, J., Estrada, E., Pérez, R. & Taborda, A. (2015). Influencia antrópica en el paisaje de las poblaciones de *Pelliciera rhizophorae* (Ericales: Tetrameristaceae) del extremo sur del Caribe (Turbo, Colombia). *Revista de Biología Tropical* 63(4), 927-942. <https://www.redalyc.org/pdf/449/44943437008.pdf>

- Blanco, J., Taborda, A., Amortegui, V., Arroyave, A., Sandoval, A., Estrada, E., Leal, J., Vásquez, J. & Vivas, A. (2013). Deforestación y sedimentación en los manglares del Golfo de Urabá. *Gestión y Ambiente* 16(2), 19-36. <http://hdl.handle.net/10495/8375>
- Bohnes, F. & Laurent, A. (2020). Environmental impacts of existing and future aquaculture production. *Aquaculture*, 532. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736001>
- Briceño, G. & Gallego, J. (2025). Heterogeneidad espacial y oferta de hábitats en tres ecosistemas lóticos de la Serranía de La Lindosa, Amazonía colombiana. *Geográfica Digital*, 20(39), 20–33. <https://doi.org/10.30972/geo.20396615>
- Brutsaert, W. (1982). Evaporation into the atmosphere. *Environmental Fluid Mechanics*, 1. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-1497-6>
- Burbano, E., Nivia, G., Imues, M., González, E., Gómez, M. & Pantoja, J. (2021). Efecto de cultivos piscícolas en los sedimentos y la proliferación de comunidades bacterianas nitrificantes en el lago Guamuez, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(2), 1581. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1581
- Bustamante, A. (2021). Componente geología y geotecnia. En V. Toro, C. Palacio, & M. Correa (Eds.), *Erosión costera en el litoral antioqueño* (81-89). Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/10495/26757>
- Cardona, Y. & Gutiérrez, L. (2021). Subcomponente modelación circulación oceánica. En V. Toro, C. Palacio, & M. Correa (Eds.), *Erosión costera en el litoral antioqueño* (162-172). Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/10495/26757>
- Carlson, R. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS]. (1990). *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales*. Organización Panamericana de la Salud. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55330>
- Chaves, C. & Jaramillo, R. (1998) Regionalización de temperatura del aire en Colombia. *Cenicafé*, 49(3), 224-230. <http://hdl.handle.net/10778/860>
- Chico, L. (2024). *Análisis de las concentraciones de nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal y ortofosfato y su relación con los géneros fitoplanctónicos más abundantes reportados en el caño Waffé durante las épocas climáticas de los años 2019 a 2023*. Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/43034>
- Claassen, N. & Steingrobe, B. (1999). Mechanistic simulation models for a better understanding of nutrient uptake from soil. *Mineral Nutrition of Crops 1*, 41. <https://acortar.link/MPMn7p>
- Comisión Interministerial de Estrategias Marinas [CIEM]. (2024). *Directrices para la instalación y gestión de arrecifes artificiales en el dominio público marítimo-terrestre*. Gobierno de España. <https://acortar.link/YpkOy9>
- Correa, I. & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes - Turbo) costa caribe colombiana. *Instituto de Investigaciones Marinas y*

- Costeras*, 33(1), 7-28.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-97612004000100001
- Correa, J. & Palacio, J. (2008). Ictiofauna de las áreas de manglar en las bahías Turbo y El Uno, Golfo de Urabá. *Gestión y Ambiente* 11(3), 43-54. <http://hdl.handle.net/10495/7984>
- Decreto 1594 de 1984. [Presidencia de la República] Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. 26 de junio de 1984.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18617>
- Della, A., Del, S., Fantinato, E., & Buffa, G. (2024). Coastal dune restoration. *Land*, 13(2), 135.
<https://doi.org/10.3390/land13020135>
- Díaz, M., Pérez, L., Álvarez, F., Vásquez, L., Romero, D. A., Henao, A. & Romero, D. (2014). *Selección de materiales para la construcción de arrecifes artificiales*. XXVII Congreso Iberoamericano y Colombiano De Ingeniería Química, Cartagena de Indias.
<https://acortar.link/FGVwxG>
- Dinu, I., Grácia, V., García, M., Lin, J., Stănică, A. & Sánchez, A. (2025). Feasibility of artificial reefs as coastal protection measures at the Danube Delta coast, Romania. *Frontiers in Environmental Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1568364>
- Duarte, R & Gómez, J. (2016). *Evolución geomorfológica de la línea de costa en la Bahía de Turbo por erosión y sedimentación durante los últimos 40 años*. XII Semana Técnica de Geología e Ingeniería Geológica, Medellín. <https://acortar.link/TnHGcn>
- Escobar, C. (2011). Relevancia de procesos costeros en la hidrodinámica del Golfo de Urabá (caribe colombiano). *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras*, 40(2), 327-346.
<http://www.scielo.org.co/pdf/mar/v40n2/v40n2a06.pdf>
- Esteves, F. (1998) *Fundamentos de Limnología*. Interciência. <https://acortar.link/KYoPOa>
- Equiza, M. & Tognetti, J. (2002). Morphological plasticity of spring and winter wheats under changing temperatures. *Functional Plant Biology* 29(12), 1427-1436.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002FunPB..29.1427E/abstract>
- Foss, O., Blenkinsopp, C., Bayle, P., Martins, K., Schimmels, S. & Almeida, L. (2023). Comparison of dynamic cobble berm revetments with differing gravel characteristics. *Coastal Engineering*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104312>
- Galindo, C. & Salgado, K. (2020). *Desarrollo de una metodología para el diseño de un relleno artificial de arena en una costa aplicando la tecnología "Sand Motor"*. Universidad de Cartagena. <https://acortar.link/yciTJE>
- Gambin, F. (2024). *Determinación de los procesos de difracción y refracción del oleaje en la zona de Puerto Rey (Arboletes)*. Universidad de Antioquia.
<https://hdl.handle.net/10495/40118>

- Gómez, J., Ortiz, E. & Correa, J. (2007). *Establecimiento de los objetivos de calidad*. Corpourabá. <https://corpouraba.gov.co/sites/default/files/020objetivoscalidadrioatrato.pdf>
- Gonzales, C. & Llanos, R. (2015). *Evaluación y efectos de la deforestación en la hidrología y pérdida lateral de carbono orgánico del suelo de la cuenca del Alto Mayo*. International Conservation. <https://acortar.link/jM1ytk>
- Gopal, B. (1987). Water hyacinth. *Journal of Tropical Ecology*, 4(1), 92–93. <https://doi.org/10.1017/S0266467400002571>
- Gutiérrez, L., García, G. & García, I. (2016). 'Soluciones naturales' para la adaptación al cambio climático en el ámbito local de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Ihobe. <https://acortar.link/Fz3x6a>
- Hernández, D., Romaña, Y., Jaramillo, A., Pelegrí, J. & Toro, V. (2021). Patrones de circulación superficial sobre la plataforma costera entre bahía El Uno y Punta de Las Vacas, Golfo de Urabá, Caribe colombiano. *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50(2), 9-30. <https://boletin.invemar.org.co/ojs/index.php/boletin/article/view/993/874>
- Higuita, M. & Quintana, R. (2020). *Modulación de las corrientes oceánicas en el Golfo de Urabá a partir de la onda de marea*. Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/10495/15302>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia [IDEAM]. (2021). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. <https://acortar.link/nL7RRP>
- Kalff, J. (2002). *Limnology*. Prentice Hall. <https://livresbioapp.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/03/limnology-kalff.pdf>
- Katherine González. (2025). *Bahía de Turbo - Proyecto 1 de Procesos costeros* [Video]. YouTube. <https://youtu.be/IHOFXEYGPAAE>
- Katherine González. (2025). *Bahía de Turbo (modelación con Delft 3D) - Proyecto 2 de Procesos Costeros* [Video]. YouTube. <https://youtu.be/QHLROuOmCpc>
- Katherine González. (2025). *Bahía de Turbo (modelación con XBeach) - Proyecto 4 de Procesos costeros* [Video]. Youtube. https://youtu.be/Z_ocsDQarL0
- Katherine González. (2025). *Bahía de Turbo (protección de la línea de costa) - Proyecto 3 de Procesos costeros* [Video]. Youtube. <https://youtu.be/JTSHu1dvYrQ>
- Knight, J. (2024). The green infrastructure of sandy coastlines. *Sustainability*, 16(3), 1056. <https://doi.org/10.3390/su16031056>
- Liang, Q., Liu, G., Luan, Y., Niu, J., Li, Y., Chen, H., Liu, Y., & Zhu, S. (2025). Impact of feeding frequency on growth performance and antioxidant capacity of *Litopenaeus vannamei* in recirculating aquaculture systems. *Animals*, 15(2), 192. <https://doi.org/10.3390/ani15020192>
- Lin, Z., Adcock, T. & McAllister, M. (2022). Estimating ocean wave directional spreading using wave following buoys: a comparison of experimental buoy and gauge data. *Ocean*

- Engineering and Marine Energy* 8(1), 83-97.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40722-021-00218-7>
- Lochner, A., Sorolla, A., Mota, B., Rueda, I. & Sorolla, G. (2019). *Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS) como una nueva manera inteligente de gestionar el urbanismo y la ingeniería clásica*. Naturalea.
https://naturalea.eu/docs/2019/04/Informe_tecnico_NBS_es.pdf
- Lonin, S. & Vásquez, J. (2005). Hidrodinámica y distribución de coliformes en el Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, 23, 76-89.
<https://ojs.dimar.mil.co/index.php/CIOH/article/view/140/98>
- Lugo, A., Brown, S., & Brinson, M. (1990). Forested wetlands. *Ecosystems of the World*, 15.
<https://acortar.link/X0miOm>
- Luna, M. (2011). Efluentes piscícolas. *Ciencia e Ingeniería*, 3(1), 12-15.
<https://jci.uniautonoma.edu.co/2011/2011-2.pdf>
- Malik, A. (2007). Environmental challenge vis a vis opportunity. *Environment International*, 33(1), 122-138. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.08.004>
- Martins, J., Novais, R., Hotza, D. & Senff, L. (2025). Waste-derived geopolymers for artificial coral development by 3D printing. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 11, 114–125.
<https://doi.org/10.1007/s40831-025-01016-3>
- Meteoblue. (s.f). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Turbo*. Meteoblue.
<https://acortar.link/zWlziO>
- Molina, V. (2022). Articulación de pregrado y posgrado. Interconectar la educación para una actitud científica colectiva en Colombia. *Revista Cubana de Educación Superior*, 41(3).
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0257-43142022000300016
- Morris, L., Campbell, E., Waters, E., Bishop, M., Lovelock, C., Lowe, R., Strain, E., Boon, P., Boxshall, A., Browne, N., Carley, J., Fest, B., Fraser, M., Ghisalberti, M., Gillanders, B., Kendrick, G., Konlechner, T., Mayer, M., Pomeroy, A., Rogers, A., Simpson, V., Van, A., Waltham, N. & Swearer, S. (2024). Current extent and future opportunities for living shorelines in Australia. *Science of The Total Environment*, 917.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170363>
- Mosquera, W. & Barrientos, N. (2019). *Modulación a la circulación oceánica en el Golfo de Urabá por la ocurrencia de eventos atmosféricos de baja y alta frecuencia*. Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/10495/17039>
- Nieto, M. (2011). *El nuevo delta del Río Turbo*. Universidad de los Andes.
<https://hdl.handle.net/1992/11718>
- Ochoa, B., Cuadros, J., Bonnesoeur, V. Román, F. & Gammie, G. (2022). *CUBHIC 2.0*. United States Agency for International Development. <https://acortar.link/BG9XZO>

- Osorio, A., Montoya, R. & Saavedra, V. (2021). Subcomponente modelación oleaje. En V. Toro, C. Palacio, & M. Correa (Eds.), *Erosión costera en el litoral antioqueño* (147-160). Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/10495/26757>
- Palacio, C., Toro, V. & Saavedra, V. (2024). *Procesos costeros*. [Programa oficial de curso de posgrado]. Universidad de Antioquia.
- Palta, G. & Morales, S. (2015). Fitodepuración de aguas residuales domésticas con poaceas. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(2), 57–65. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/298>
- Paniagua, J. (2013). *Migración histórica actualizada y predicción de la posición de la línea de costa en sectores acantilados críticos del litoral antioqueño, considerando escenarios de ascenso del nivel del mar*. Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico. <https://hdl.handle.net/10784/1266>
- Peña, L., Onaindia, M., Muñoz, O., Amaya, A., Fernández, B. & Ametzaga, I. (2020). Soluciones basadas en la naturaleza frente al cambio climático. *Revista de Investigación Marina*, 27(1), 69-72. https://www.ehu.es/cdsea/web/wp-content/uploads/2017/03/Articulos_Uhina_bea2020.pdf
- Pham, L. & Huang, J. (2024). 3D printed artificial coral reefs. *Low-carbon Materials and Green Construction*, 2, 23. <https://doi.org/10.1007/s44242-024-00056-4>
- Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas de la Universidad del Tolima [UT POMCA] Río Turbo Currulao. (2017). *Fase de diagnóstico*. Formulación POMCA Río Turbo y Currulao. <https://acortar.link/ullL85>
- Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas de la Universidad del Tolima [UT POMCA] Río Turbo Currulao. (2018). *Fase de formulación*. Formulación POMCA Río Turbo y Currulao. <https://acortar.link/FctIJH>
- Posada, B & Henao, W. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras*, 13. <https://acortar.link/gtUj5S>
- Prieto, D. (2020). *Fabricación de arrecifes artificiales con morteros sostenibles mediante impresión 3D*. Universidad de Cantabria. <http://hdl.handle.net/10902/19041>
- Procolombia. (s.f). *Buceo en Chocó*. Procolombia. <https://colombia.travel/es/choco/buceo-en-choco-destinos-ocultos#debes-saber>
- Puerto Pisisí. (s.f). Inicio. Puerto Pisisí. <https://puertopisisi.com/>
- Quintana, R., Higueta, M, Gutiérrez, L. & Toro, V. (2021). Evaluación de las principales características de la onda de marea al interior del Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, 40(2), 35-46. <https://ojs.dimar.mil.co/index.php/CIOH/article/view/574/508>
- Remenieras, G. (1974) *Tratado de hidrología aplicada*. Editores Técnicos Asociados. <https://acortar.link/qVfzgb>

- Resolución 2115 de 2007. [Ministerio de la Protección Social]. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. 4 de julio de 2007. <https://acortar.link/Joskyl>
- Riol, M. (2017). *Análisis y caracterización de los sistemas de protección costera de los arrecifes de coral*. Universidad de Cantabria. <http://hdl.handle.net/10902/11891>
- Rojas, D., De la Hoz, L., Alvarado, D. & Cortés, N. (2023). *Reconocimiento biológico portuario de referencia*. Dirección General Marítima. <https://acortar.link/7C4hVE>
- Roldán, G. & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/71>
- Ryther, J. & Yentsch, C. (1957). The estimation of phytoplankton production in the ocean from chlorophyll and light data. *Limnology and Oceanography*, 2(3), 161-297. <https://doi.org/10.1002%2Flno.1957.2.3.0281>
- Schindler, D. (1974). Eutrophication and recovery in experimental lakes. *Science*, 184, 897-899. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.184.4139.897>
- Sculthorpe, C. (1967). The biology of aquatic vascular plants. *International Review of Hydrobiology* 53(2), 353-354. <https://doi.org/10.1002/iroh.19680530207>
- Sika. (2014). Aditivos para concreto. Sika. <https://acortar.link/G9GfpX>
- Sika. (s.f). Impresión 3D de concreto. Sika. <https://col.sika.com/es/construccion/concreto/impresion-de-concreto-3d.html>
- Silva, R., Chávez, V., Lithgow, D., & Hori, T. (2020). *Evaluación de la efectividad de la infraestructura verde para la mitigación del riesgo costero en América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0002442>
- Sistema de Información Ambiental de Colombia [SIAC]. (2018). *Catálogo de mapas*. Sistema de Información Ambiental de Colombia. <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- Smith, C., Rudd, M., Gittman, R., Melvin, E., Patterson, V., Renzi, J., Wellman, E. & Silliman, B. (2020). Coming to terms with living shorelines. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00434>
- Toro, V., Mosquera, W., Barrientos, N. & Bedoya, Y. (2019). Circulación oceánica del Golfo de Urabá usando campos de viento de alta resolución temporal. *Boletín Científico CIOH*, 38(2) 41-56. <https://ojs.dimar.mil.co/index.php/CIOH/article/view/516/467>
- Tundisi, J., Matsumura, T. & Tundisi, J. E. (2008). Reservoirs and human well being. *Brazilian Journal of Biology*, 68, 1133-1135. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842008000500020>
- Universitat Politècnica de Catalunya. (s.f). *Hidrodinámica costera*. UPCommons. <https://acortar.link/KZxuyA>
- Vargas, K. (2022). *Propuesta de ubicación de una estructura permeable para la mitigación de la erosión costera*. Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/31622>

- Velásquez, L. (2013). *Modelación del transporte de sedimentos en el Golfo de Urabá, Colombia*. Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico. <https://hdl.handle.net/10784/1268>
- Vélez, J., Poveda, G. & Mesa, O. (1999). *Balances hidrológicos de Colombia*. Academia. https://www.academia.edu/835883/Balances_Hidrol%C3%B3gicos_de_Colombia
- Vollenweider, R. (1966). *Calculation models of photosynthesis-depth curves and some implications regarding day rate estimates in primary production measurements*. Primary Productivity in Aquatic Environments. <https://doi.org/10.1525/9780520318182-030>
- Weather Spark. (s.f). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Turbo*. Weather Spark. <https://acortar.link/aJIaw0>
- Wetzel, R. (2001). *Limnology*. Academic Press. <https://acortar.link/eKY5G3>
- Zambrano, M. (2021). Componente ambiental. En V. Toro, C. Palacio, & M. Correa (Eds.), *Erosión costera en el litoral antioqueño* (105-116). Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/10495/26757>
- Zhang, J., Chen, M., Hao, Z., Zhong, H., He, H. & Lei, P. (2024). Dynamic changes of dissolved organic matter derived from algal decomposition and the environmental effects in eutrophic lakes. *Huan Jing Ke Xue*, 45(3), 1539-1552. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38471868/>
- Zhang, W., Huang, R., Deng, S., Wang, W. & Wang, Y. (2024). Spatio-temporal distribution of sea surface chlorophyll-a in coral reefs of the South China Sea over the past decade based on Landsat-8 Operational Land Images. *Science of The Total Environment*, 935. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173433>

Anexos

Escuela Ambiental

Análisis de procesos hidrodinámicos en ecosistemas acuáticos para la gestión del recurso hídrico: enfoque desde una modalidad piloto de Trabajo de Grado con cursos de posgrado en Ingeniería



ESTUDIANTE: Katherine González Ossa

PROGRAMA: Ingeniería civil

ASESOR: Carlos Alberto Palacio Tobón

SEMESTRE: 2025-1






Introducción

Esta práctica académica se enmarcó en la nueva modalidad coterminal de articulación entre pregrado y posgrado que, para el semestre 2025-1, es impulsada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia como un plan piloto. A través de los cursos de posgrado "Procesos costeros" y "Limnología" se abordó el análisis de procesos hidrodinámicos en ecosistemas acuáticos costeros y lénticos, fortaleciendo competencias técnicas mediante una formación integrada teórico-práctica en la línea de Recurso hídrico.



Objetivos

Evaluar las dinámicas hidráulicas en ecosistemas acuáticos con el fin de comprender su impacto ambiental y aportar herramientas para su gestión sostenible. Este análisis se desarrollará en el marco de la nueva modalidad de Trabajo de Grado, integrando los cursos de posgrado "Procesos costeros" y "Limnología" como base metodológica y conceptual.

-  Identificar y analizar los principales procesos físicos que afectan los ecosistemas costeros y su relación con el desarrollo ambiental, a partir de los conocimientos adquiridos en el curso de "Procesos costeros".
-  Comprender la dinámica de los ecosistemas acuáticos lénticos, considerando sus características físicas, químicas y biológicas, con base en los contenidos del curso de "Limnología".
-  Proponer estrategias de manejo sostenible del recurso hídrico basadas en el análisis de los procesos hidrodinámicos estudiados, integrando los aprendizajes obtenidos en ambos cursos de posgrado.



Metodología

El curso "Procesos costeros" se desarrolló mediante la ejecución de cuatro proyectos. Inicialmente, se recopiló y analizó información oceanográfica de una zona de estudio. Posteriormente, se modelaron sus procesos hidrodinámicos utilizando Delft3D, se diseñaron soluciones basadas en infraestructura verde para la protección costera y, finalmente, se evaluó una de estas soluciones con el software XBeach para estimar su impacto. Por su parte, el curso de "Limnología" incluyó actividades de laboratorio y campo centradas en la caracterización biológica y fisicoquímica de ecosistemas acuáticos lénticos. Se desarrollaron seminarios, discusiones académicas y protocolos. Por último, se realizó una salida de campo para la recolección y análisis de muestras hídricas, cuyos resultados se integraron en un informe colaborativo con enfoque interdisciplinario y científico.



Resultados

En la zona de estudio de "Procesos costeros" se evidenció un retroceso de la línea de costa. Se modeló la implementación de un arrecife artificial como solución verde para la protección costera, empleando materiales compatibles con la vida marina. La modelación evidenció una disminución en la altura de ola y, en consecuencia, una reducción del proceso erosivo.









En la zona de estudio de "Limnología", se identificó un estado hipereutrófico del lago, evidenciado por una elevada carga orgánica, altas concentraciones de fósforo y clorofila, floraciones algales y déficit de oxígeno en el fondo. Aunque algunos de estos elementos son esenciales para la biodiversidad, su proliferación descontrolada intensifican el deterioro ecológico.



Esta práctica demostró que las actividades humanas pueden destruir los ecosistemas acuáticos a través de intervenciones inadecuadas y de la contaminación, o bien, favorecer su conservación mediante acciones como el manejo ecológico, la restauración y el monitoreo ambiental.



Conclusiones y recomendaciones

-  Modalidad viable y pertinente para la continuidad académica.
-  Las soluciones verdes son alternativas eficientes, éticas y sostenibles.
-  Un ecosistema necesita equilibrio: lo excesivo es perjudicial.
-  La vida y la muerte de los ecosistemas acuáticos está en nuestras manos.
-  Modelar con precisión requiere herramientas poderosas.
-  Se debe promover el uso de los recursos y de las instalaciones de la UdeA.

DATOS DE CONTACTO DE LA AUTORA



katherine.gonzalez@udea.edu.co



Escanea este QR para conocer más sobre el proyecto