

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>
www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 2022 - VOLUMEN 32 (2)

The logo for Editorial UCR, featuring three horizontal white bars above the text "EDITORIAL UCR" in a white, sans-serif font.

EDITORIAL
UCR

Inventario de Humedales para Protección Costera (IHPC): una herramienta para la gestión costera en Costa Rica

Wetland Inventory for Coastal Protection (IHPC): a tool for coastal management in Costa Rica.

Felipe Calleja Apéstegui.

Investigador, Unidad de Ingeniería Marítima, de Ríos y de Estuarios (IMARES-UCR), Universidad de Costa Rica

email: felipe.callejaapestegui@ucr.ac.cr

Código ORCID: 0000-0002-5864-9940

Fernando López-Arias

Investigador, Unidad de Ingeniería Marítima, de Ríos y de Estuarios (IMARES-UCR), Universidad de Costa Rica

email: luis.lopezarias@ucr.ac.cr

Código ORCID: 0000-0002-8688-5713

Recibido: 15 de noviembre de 2021

Aceptado: 12 de mayo de 2022

Resumen

Costa Rica cuenta con aproximadamente 1 500 km de costa en los cuales se localizan humedales que ofrecen una gran variedad de servicios ecosistémicos, entre ellos, la protección costera. La cuantificación de este servicio requiere investigación en estos humedales, siendo necesario tener un inventario que ofrezca tanto su localización como sus características físicas y las de su entorno. Este tipo de inventario no existe específicamente para los humedales costeros del país, por lo que el objetivo de este trabajo es generar la primera versión de un inventario de humedales que ofrecen protección costera en Costa Rica. Se tomó como base el Inventario Nacional de Humedales (INH) y una cartografía de manglares del año 2005. Los humedales costeros no incluidos en esas fuentes fueron identificados con un procedimiento semiautomático, analizando índices de vegetación derivados de imágenes del satélite *Sentinel 2* y una delimitación manual basada en ortofotos del año 2017. El nuevo inventario consiste en 464 humedales costeros de los cuales 180 son zonas nuevas no incluidas en el INH. A estas se les incluyó la información contenida en el INH, de forma que ambas fuentes de información sean compatibles. Unido a esto, se caracterizaron, en los 464 humedales, algunas condiciones naturales y antrópicas que podrían afectar posibles investigaciones relacionadas a la protección costera. El resultado es una base de datos geográfica, accesible a todo público, con la localización y caracterización general de los humedales, que podría usarse en investigaciones tanto de protección costera como del ámbito costero en general.

Palabras clave:

Base de datos, manglares, servicios ecosistémicos, sistema de información geográfica, teledetección.



Abstract

Costa Rica has approximately 1 500 km of coastline, with wetlands that offer a wide variety of ecosystem services, including coastal protection. The quantification of this service requires research in these wetlands, and for this, it is necessary to gather them in an inventory that includes their localization and basic characteristics. This type of inventory does not exist specifically for coastal wetlands in Costa Rica. Thus, the objective of this research is to create the first version of an inventory of wetlands that offers coastal protection in the country. The National Wetland Inventory (INH), and a 2005 mangrove cartography were used as the starting point. The coastal wetlands that were not included in these two sources were identified with a semi-automatic procedure, based on the analysis of vegetation indexes derived from a *Sentinel 2* satellite image, and a manual delimitation using an orthophoto of 2017. The new inventory includes 464 coastal wetlands, from which 180 are not included in the INH. These new areas were characterized with the same information included in the INH to assure the compatibility between both databases. In addition, all 464 wetlands were characterized with some of the natural and anthropic conditions that might affect future research related to coastal protection. The result is a free access geographic database that includes the localization and general characteristics of the Costa Rican wetlands that offer coastal protection and could be used in future research not only in this topic, but in coastal studies in general.

Keywords:

Database, ecosystem services, geographic information systems, mangroves, remote sensing..

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas ofrecen bienes y servicios, derivados de sus funciones y procesos, que benefician al ser humano [1]. Estos bienes y servicios se denominan “servicios ecosistémicos” y pueden dividirse en dos categorías: i) servicios cuyos beneficios pueden medirse directamente y son fáciles de percibir (e.g. comida, materiales, turismo, recreación), y ii) servicios cuyos beneficios solo se miden de forma indirecta y son difíciles de percibir (e.g. protección contra inundaciones, control de enfermedades, hábitat para especies) [2].

A nivel global los ecosistemas costeros, tanto sumergidos como parcialmente emergidos, se ubican en un área de aproximadamente 7 millones de km², donde las macroalgas y manglares tienen la mayor y menor extensión, respectivamente [3]. No obstante, a pesar de su relativa pequeña extensión, los ecosistemas costeros ofrecen gran variedad de servicios ecosistémicos que aportan beneficios a la población mundial y mitigan el cambio climático [3]. Los servicios ofrecidos por praderas de fanerógamas marinas, comunidades de algas, arrecifes coralinos, manglares, marismas, y sistemas dunares, incluyen provisionamiento de materiales, protección costera, soporte a pesquerías, renovación de nutrientes, control de erosión, purificación de agua, secuestro de carbono, turismo, y recreación [4].

La protección que ofrecen los humedales costeros ante oleajes extremos, aumento de nivel del mar por efectos meteorológicos, o erosión costera es uno de los servicios ecosistémicos que se estudia a nivel mundial desde el punto de vista analítico-numérico [3], [5]–[7], mediante ensayos de laboratorio [8]–[10] y campañas de campo [11]–[14]. No obstante, en Costa Rica, a pesar de ser un país con aproximadamente 1 500 km de costa y gran cantidad de población ubicada en ella, la investigación relacionada a protección costera es relativamente poca. Algunos ejemplos que la han considerado de forma indirecta incluyen el análisis de la posible restauración de manglares en el Pacífico Central [15] o, recientemente, la evaluación de los servicios ecosistémicos de los manglares del Golfo de Nicoya [16].

Es importante desarrollar más investigación que caracterice y cuantifique la protección costera ofrecida por los ecosistemas de Costa Rica. Para esto, el primer paso es el mapeo de los servicios ecosistémicos, el cual, a su vez, inicia con el mapeo de los propios ecosistemas [17]. Los mapas permiten entender las interrelaciones de los ecosistemas a diferentes escalas espaciales. Además, sirven como base para ayudar a decidir dónde invertir en proyectos de conservación o restauración, y principalmente, son una herramienta que permite mostrarle a tomadores de decisión y otros actores la relación entre servicios ecosistémicos y biodiversidad [17].

Existen estudios que localizan y caracterizan ecosistemas que ofrecen protección a las costas de Costa Rica, tanto las praderas de fanerógamas marinas [18] como los arrecifes coralinos [19]. En el caso de los humedales boscosos (principalmente manglares) y de marisma, su cartografiado es más disperso y requiere completarse. El Inventario Nacional de Humedales (INH) [20] recoge la mayor parte de los humedales del país, pero presenta faltantes en el ámbito costero. También existe una cartografía de manglares realizada en el año 2005 [21]. Esta se enfoca en este tipo

de humedal específicamente, dejando por fuera posibles zonas de marisma y otros humedales costeros boscosos (no manglares).

Dada la importancia de la protección costera basada en la naturaleza para la adaptación al cambio climático, y la creciente necesidad de cuantificar el valor de los ecosistemas con la intención de conservarlos, es evidente la importancia de generar un inventario que ubique geográficamente los humedales costeros nacionales que pueden ofrecer protección ante oleajes extremos, mareas extremas, o erosión costera. Este nuevo inventario sería un complemento al INH y una actualización a la cartografía de manglares de 2005, ofreciendo una herramienta actualizada para gestores de espacios costeros, investigadores, tomadores de decisión, y población en general.

El objetivo de este trabajo es generar la primera versión de un inventario geográfico de los humedales en Costa Rica que pueden ofrecer protección costera, y que serían sitios de interés en investigaciones relacionadas a dicho servicio ecosistémico. El producto generado se denomina Inventario de Humedales para Protección Costera (IHPC), y no incluye humedales como lagunas costeras o canales fluviales dada su menor capacidad de ofrecer protección ante las amenazas de interés (oleaje extremo, marea extrema, erosión costera). El IHPC se plantea como una herramienta de alto valor para la gestión costera nacional, pero que también puede ser de interés regional o mundial, al ser un ejemplo de un producto a desarrollar en países con condiciones similares a las de Costa Rica.

2. METODOLOGÍA

2.1 Identificación de humedales costeros

El Inventario de Humedales para Protección Costera (IHPC) tomó como base el Inventario Nacional de Humedales (INH) [20], que identifica 2 870 humedales de los cuales 367 se encuentran en las cercanías de la costa, pero no necesariamente podrían ofrecer el servicio de protección costera. Adicionalmente, se identificaron humedales no incluidos en el INH haciendo un análisis de ortofotos del año 2017 e imágenes satelitales del año 2020. Para este análisis, también se utilizó, de forma complementaria, la cartografía de manglares generada a partir de las imágenes de la misión CARTA del año 2005 [21], que recoge la ubicación y extensión geográfica de la mayoría de los manglares de la costa Pacífico de Costa Rica en el año 2005. Tanto el INH, las ortofotos de 2017, y la cartografía de manglares fueron descargadas directamente del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) proyectados en el sistema CRTM05 (EPSG:5367).

La identificación de humedales no incluidos en el INH se realizó utilizando imágenes satelitales y un procedimiento semiautomático basado en índices de vegetación. Se utilizaron imágenes del satélite *Sentinel 2* [22] de la Agencia Espacial Europea (ESA), que cubrían toda la franja costera costarricense. Estas correspondieron a imágenes obtenidas entre enero y mayo de 2020 con cobertura nubosa menor a 5 %, y con resolución espacial de 10 m. Todas las imágenes fueron procesadas con la

herramienta *Sen2cor* [23], para realizar una corrección atmosférica estándar y obtener la reflectancia superficial (“Bottom of Atmosphere”). Las bandas con resolución espacial de 20 m utilizadas se tradujeron a resolución de 10 m al hacer un remuestreo basado en el vecino más cercano.

Las imágenes satelitales permitieron identificar zonas de alta humedad con presencia de vegetación densa a través de los índices de vegetación “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) [24] y “Modified Normalized Difference Water Index” (MNDWI) [25], mostrados en las ecuaciones 1 y 2, respectivamente. Estos fueron seleccionados a partir de un análisis preliminar en que se compararon índices de vegetación utilizados previamente en estudios en humedales [26], y se seleccionaron los que presentaron mayor capacidad de identificar los humedales en la costa de Costa Rica. Los índices fueron calculados para las imágenes disponibles, y se construyó una imagen final de cada índice a partir de los valores máximos en cada píxel (mosaico de valores máximos).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Rojo}}{\text{NIR} + \text{Rojo}} \quad (1)$$

Donde NIR es la banda centrada en los 832.8 nm (banda 8) y Rojo es la banda centrada en los 664.3 nm (banda 4).

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{SWIR1} - \text{Verde}}{\text{SWIR1} + \text{Verde}} \quad (2)$$

Donde SWIR1 es la banda centrada en los 1613.7 nm (banda 11), y Verde es la banda centrada en los 559.8 nm (banda 3).

Las imágenes finales de los índices se utilizaron para hacer una identificación automática preliminar de las posibles zonas de humedal. Para esto, se utilizaron también las ortofotos del año 2017 obtenidas del nodo del Instituto Geográfico Nacional en el SNIT. Se definieron dos categorías: humedal y no humedal. La primera correspondía a las zonas donde la ortofoto mostrara presencia de bosque dentro de polígonos indicados como manglar en la cartografía de 2005. La segunda categoría, no humedal, se definió para todas las zonas en las cercanías de los polígonos de la cartografía de manglares, pero fuera de estos. Se evitó ubicar puntos cerca de los bordes de los humedales para reducir los errores inducidos por tener fuentes de información de años diferentes, y las posibles variaciones interanuales en la extensión de los humedales.

En total, se ubicaron 834 puntos de muestreo en la categoría humedal, y 783 puntos en la categoría no humedal. Se realizó un análisis descriptivo, a partir de gráficas de violines, para determinar los posibles valores de cada índice que podrían separar ambas categorías. La clasificación automática consistió en crear un mapa binario con las categorías humedal y no humedal. La categoría humedal se asignó a los píxeles cuyo valor se encontraba por encima del cuartil 1 de cada índice de forma simultánea. La categoría no humedal se asignó cuando el valor del píxel era menor al cuartil 1 de uno o ambos índices. Los resultados del mapa binario se validaron comparando la categoría

asignada a cada píxel a partir del criterio estadístico descrito y la categoría original de cada punto de muestreo. La calidad del mapa binario se evaluó con los parámetros de precisión (relación entre positivos reales y falsos positivos), exhaustividad (relación entre positivos reales y falsos negativos), el valor F1 (promedio armónico de la precisión y la exhaustividad con ambos parámetros con igual importancia), y el índice Kappa (probabilidad del resultado de ser diferente a un resultado al azar) [27], [28].

El mapa binario de posibles humedales se utilizó como guía para identificar posibles zonas no mostradas en el INH. La delimitación final de los humedales costeros se realizó de forma manual utilizando en conjunto las ortofotos de 2017 y el mapa binario derivado de los índices. En las zonas donde se mostraron parches de píxeles con categoría humedal, se consultó la imagen aérea y se digitalizó el polígono que contendría la masa boscosa asociada a dicho parche identificado en el mapa binario. De ser necesario, se consultaron los mapas de índices NDVI y MNDWI para separar adecuadamente la vegetación en zonas húmedas de la vegetación colindante en zonas más secas y con menor probabilidad de ser humedales. En los casos en que se identificaron humedales ya incluidos en el INH, se comprobó, con la ortofoto, que la delimitación mostrada en esas fuentes fuera coherente con la masa boscosa vista en la imagen aérea.

La delimitación de los nuevos humedales fue validada, preliminarmente, con una imagen aérea de muy alta resolución espacial (< 10 cm), capturada por un dron en setiembre de 2021 en una sección del manglar de Mata Limón (Puntarenas). Para validar el resultado, se delimitó manualmente el límite del manglar mostrado en la imagen del dron, y se extrajo de la delimitación del IHPC la misma sección del humedal, de forma que ambas pudieran ser comparadas directamente. Se compararon el perímetro y área del manglar según ambas delimitaciones, tanto visualmente como calculando el porcentaje de diferencia entre ambos resultados con respecto a la delimitación con la imagen del dron (considerada como la de referencia).

Los procedimientos usados para el tratamiento de imágenes satelitales e índices de vegetación se realizaron a través de *Google Earth Engine*. Todos los procedimientos con capas geográficas, así como el análisis descriptivo y el análisis de exactitud de la clasificación binaria se realizaron con *QGIS 3.14*.

2.2 Caracterización de humedales costeros

El inventario se desarrolló con los mismos atributos del INH, de forma que sea compatible con él en estudios que requieran utilizar ambas fuentes. Además, se agregaron atributos nuevos que contienen información particular que podría ser útil en estudios de protección costera basada en naturaleza. Los detalles de cada atributo se pueden consultar en el CUADRO I. Los nuevos atributos recogen información de las características morfológicas de las cercanías del humedal (e.g. hay elementos como islas, playa, río), si existen mediciones batimétricas, si se cuenta con datos medidos o de modelos numéricos de variables hidrodinámicas, si el humedal tiene dentro o en sus cercanías un núcleo de población considerable, si existen registros de otros ecosistemas que puedan

contribuir a la protección costera en las cercanías del humedal, y si el humedal tiene acceso por carreteras de la red vial nacional.

CUADRO I

ATRIBUTOS DEL INVENTARIO DE HUMEDALES COSTEROS (IHPC). ENTRADAS SOMBREADAS INDICAN ATRIBUTOS INCLUIDOS EN EL INH. ENTRADAS SIN SOMBREAR INDICAN ATRIBUTOS NUEVOS GENERADOS PARA EL IHPC

Atributo	Descripción
nom_hum	Nombre del humedal
per_m	Perímetro del humedal en metros
area_m ²	Área del humedal en metros cuadrados
area_ha	Área del humedal en hectáreas
poblado	Nombre del poblado o caserío más cercano al humedal
nom_pro	Provincia en que se encuentra el humedal
nom_cant	Cantón en que se encuentra el humedal
nom_dist	Distrito en que se encuentra el humedal
nombre_ac	Área de Conservación donde se ubica el Área Silvestre Protegida
regmpln	Región MIDEPLAN en que se encuentra el humedal (o la mayoría de su área)
asp	Indica si el humedal está dentro de un Área Silvestre Protegida
nombre_asp	Nombre del Área Silvestre Protegida donde se encuentra el humedal
cat_manejo	Categoría de manejo del Área Silvestre Protegida donde se ubica el humedal
nom_cuenc	Cuenca hidrográfica donde se encuentra el humedal
nombre_cb	Nombre del Corredor Biológico donde se encuentra el humedal
tipo_hum	Tipo de humedal
clase_hum	Subclase de humedal
nat_art	Condición natural o artificial del humedal
costa	Costa en que se ubica el humedal (Pacífico - Caribe)

Atributo	Descripción
fuelle	Lugar de donde se obtiene la localización del humedal: INH si es un humedal contenido en el Inventario Nacional de Humedales, o IHPC si es un humedal identificado en este trabajo
e_playa	Indica si el humedal se localiza cerca de la playa, basado en si se encuentra total o parcialmente dentro de los 50 metros de zona pública de la Zona Marítimo Terrestre
e_islas	Presencia de islas al frente o en las cercanías del humedal que podrían cambiar el oleaje que llega al humedal
e_rio	Presencia de río o salida fluvial en contacto con el humedal
n_poblacio	Presencia de núcleos poblacionales dentro o en las cercanías del humedal
m_batim	Disponibilidad de batimetrías realizadas por IMARES-UCR en las cercanías del humedal (en costa, no dentro del humedal propiamente)
m_oleaje	Disponibilidad de mediciones o datos modelados de oleaje realizadas por IMARES-UCR en las cercanías del humedal (en costa, no dentro del humedal propiamente)
m_corrient	Disponibilidad de mediciones o datos modelados de corrientes realizadas por IMARES-UCR en las cercanías del humedal (en costa, no dentro del humedal propiamente)
h_coral	Presencia de hábitats coralinos en las cercanías del humedal
h_pastos	Presencia de hábitats de pastos marinos en las cercanías del humedal
f_accesos	Facilidad de acceso al humedal a través de carreteras o caminos

La cercanía a la playa se define a partir de los 50 m de dominio público dentro de la zona marítimo terrestre, dado que en esta área no pueden existir construcciones y, por ende, el humedal podría tener contacto directo con la playa cercana. La información de batimetría, oleaje y corrientes en las cercanías del humedal se definen a partir de los datos disponibles medidos o modelados por IMARES-UCR. La presencia de pastos marinos y corales se evaluó basado en información publicada en revistas científicas [18], [19], [29]–[33]. La facilidad de acceso por carreteras o caminos se definió según la información geográfica ofrecida por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (a través del SNIT). Los atributos de presencia de río, de islas, y de núcleos poblacionales se completaron a partir de la valoración de los autores de este artículo, con el apoyo de imágenes aéreas y uso de sistemas de información geográfica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Inventario de Humedales para Protección Costera (IHPC) se compone de 464 humedales, de los cuales 284 provienen del INH y 180 son identificados en esta investigación. Estos se recogen en un inventario en formato de capa geográfica en formato vectorial, utilizable en cualquier Sistema de Información Geográfica (SIG) y de libre acceso al público en general [34].

Este inventario es similar a otras herramientas de gestión disponibles internacionalmente, las cuales agrupan la localización y características de los humedales de un país entero [35], [36] o una región [37], [38]. En general, estos inventarios (incluyendo el IHPC) ofrecen información en formato de capa geográfica, se han identificado con procedimientos que mezclan el uso de imágenes aéreas y satelitales con delimitaciones manuales y visitas al campo, y se presentan como herramientas para gestores e investigadores que requieren conocer la distribución espacial de estos espacios naturales. No obstante, el IHPC se diferencia de estos otros inventarios en que recoge solamente humedales costeros con potencial para estudios de protección costera, dando información más detallada para una aplicación específica. Esto puede ser una ventaja para usuarios que buscan información relacionada exclusivamente al servicio ecosistémico de protección de la costa, pero puede ser una desventaja para usuarios más generales que buscan datos de los humedales costeros en su totalidad.

La mayor diferencia entre los inventarios mencionados y el IHPC reside en la naturaleza preliminar de este último. El proceso para generar un inventario de humedales oficial es complejo, siendo recomendable seguir pautas establecidas por organismos como la Secretaría de la Convención de Ramsar [39], lo cual aumenta la necesidad de recursos económicos y humanos. En el caso del IHPC, este es una primera versión que aún requiere mejoras en su proceso de identificación de humedales y validación de resultados. Esto no demerita su valor, ya que marca un necesario primer paso en la confección de un inventario de humedales costeros oficial en Costa Rica, pero sí puede limitar su aplicación en estudios próximos. La validación preliminar y la inspección del IHPC sugieren que los resultados son confiables, pero se recomienda utilizar esta herramienta con cautela, considerando su naturaleza preliminar.

3.1 Identificación de humedales costeros

El análisis descriptivo de las categorías humedal y no humedal permite separar dichas categorías con los índices usados (Fig. 1). Tanto para el índice MNDWI como para el NDVI, la categoría humedal presenta valores mayores que la categoría no humedal. En el caso del índice MNDWI, hay una diferencia de 0.087 entre el cuartil 1 de la categoría humedal (-0.172) y el cuartil 3 de la categoría no humedal (-0.259). En el caso del índice NDVI, se aprecia algo similar, con una separación de 0.096 entre el cuartil 1 de la categoría humedal (0.624) y el cuartil 3 de la categoría no humedal (0.528). Es por esta separación que el procedimiento de clasificación define zonas de humedal si el valor del píxel es mayor al valor del cuartil 1 en ambos índices simultáneamente, y considera como no humedal a cualquier píxel con valor menor a dicho umbral en cualquiera de los dos índices.

En la Fig. 2.b y 2.c, se muestra cómo el índice MNDWI permite identificar, con valores más altos, las posibles áreas de humedal, y el NDVI separa zonas con vegetación densa (como la presente en los manglares) de áreas con vegetación menos densa, superficies artificiales, o zonas con agua (ríos, mar, nubes). Así, la combinación de los índices MNDWI y NDVI produce un mapa intermedio con píxeles identificados como humedal por ambos índices, píxeles identificados solo por un índice, y píxeles no identificados como humedal. Para la clasificación final, solo se consideraron como humedal los píxeles en que ambos índices coinciden (Fig. 2.d). Esta definición

se considera aceptable dados los parámetros de calidad que muestran una clasificación buena para la categoría de humedal (CUADRO II), con valores que indican que casi la totalidad de píxeles mostrados como humedal son correctos (precisión=0.99), más de la mitad de píxeles de humedal han sido correctamente identificados (exhaustividad=0.60), y el promedio ponderado de precisión y exhaustividad muestran una clasificación aceptable (valor F=0.75). Además, el índice Kappa de 0.6 muestra una clasificación de ajuste moderado entre los valores reales y los clasificados [28].

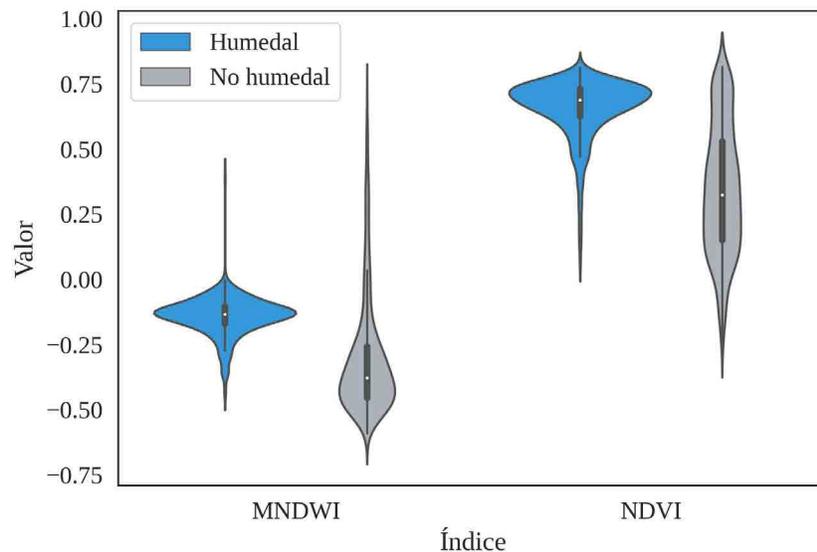


Fig. 1. Gráfica de violines con descripción estadística de las clases humedal y no humedal con cada índice usado. Barra negra muestra los cuartiles (punto blanco marca el percentil 50). Línea negra indica valores a 1.5 veces el rango intercuartil. Áreas sombreadas muestran la distribución de los datos.

CUADRO II

PARÁMETROS DE CALIDAD EN LA CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE LAS CATEGORÍAS HUMEDAL Y NO HUMEDAL. INDICADOS ENTRE PARÉNTESIS LOS NOMBRES EN INGLÉS DE LOS PARÁMETROS

Atributo	Descripción	No humedal
Precisión (Precision)	0.99	0.70
Exhaustividad (Recall)	0.60	1.00
Valor F1 (F1 score)	0.75	0.82
Índice Kappa	0.60	

Los conjuntos de píxeles identificados como humedal (Fig. 2.d) permiten encontrar zonas no incluidas en el INH, y que tienen potencial de ser humedales costeros. El mapa binario hace posible la delimitación manual de los humedales nuevos, identificando zonas de humedal que en

la imagen aérea no se diferencian del bosque circundante. Este mapa binario se presenta como una herramienta de gran utilidad, no obstante, sus parámetros de validación presentan valores posiblemente sobrestimados. Esto porque los puntos de muestreo para hacer el análisis estadístico son los mismos que se usan para validar el mapa, resultando en un planteamiento circular que sobrestima los estadísticos. Esta condición es aceptada, porque la delimitación de los humedales nuevos no depende mayoritariamente del mapa binario, sino de la delimitación manual basada en las ortofotos, por lo que los posibles errores incluidos por el mapa binario tienen una menor injerencia en el resultado final.

La delimitación final de los humedales se considera aceptable dada la validación preliminar realizada en el humedal de Mata Limón (Fig. A1, Anexo 1). La comparación del límite trazado en el IHPC y el límite derivado de la imagen de dron muestra diferencias de 2.3 % y 7.0 % en el perímetro de las masas de manglar delimitadas, y diferencias de 1.3 % y 5.3 % en su área (CUADRO III).

CUADRO III

COMPARACIÓN DE PERÍMETRO Y ÁREA EN DELIMITACIÓN PARCIAL DEL MANGLAR DE MATA LIMÓN (PUNTARENAS) COMO VALIDACIÓN PRELIMINAR DE LOS RESULTADOS

Zona	Área (m ²)			Perímetro (m)		
	IHPC	Dron	Diferencia	IHPC	Dron	Diferencia
1	247 835.5	261 585.7	5.3 %	2 416.8	2 597.9	7.0 %
2	969 306.9	982 502.3	1.3 %	4 450.6	4 553.5	2.3 %

La comparación visual de la delimitación del humedal de Mata Limón (Fig. A1) muestra, de forma preliminar, que ambas delimitaciones tienen formas similares y envuelven las mismas masas de bosque de manglar del sitio. Esta concordancia se refleja también en términos numéricos (CUADRO III), donde la diferencia tanto de área como de perímetro en ambas zonas del manglar no supera el 10 %. Estos resultados son satisfactorios ya que el objetivo de este trabajo es presentar la primera versión del IHPC en la cual se ofrezca una imagen preliminar de la ubicación y características de los humedales que ofrecen protección costera en Costa Rica. Este resultado ofrece una herramienta de exactitud aceptable para trabajos generales, y define un punto de partida para nuevos estudios que busquen el perfeccionamiento de estas delimitaciones con trabajo de campo y nuevas técnicas de teledetección.

Es importante destacar que el análisis con teledetección satelital se realizó únicamente en la costa Pacífico, dado que los puntos de clasificación derivados de la capa de manglares solo se ubican en esta costa. No obstante, esto no afectó los resultados, ya que el INH tiene una cobertura completa en la costa Caribe, siendo innecesario identificar nuevas zonas en dicha costa.

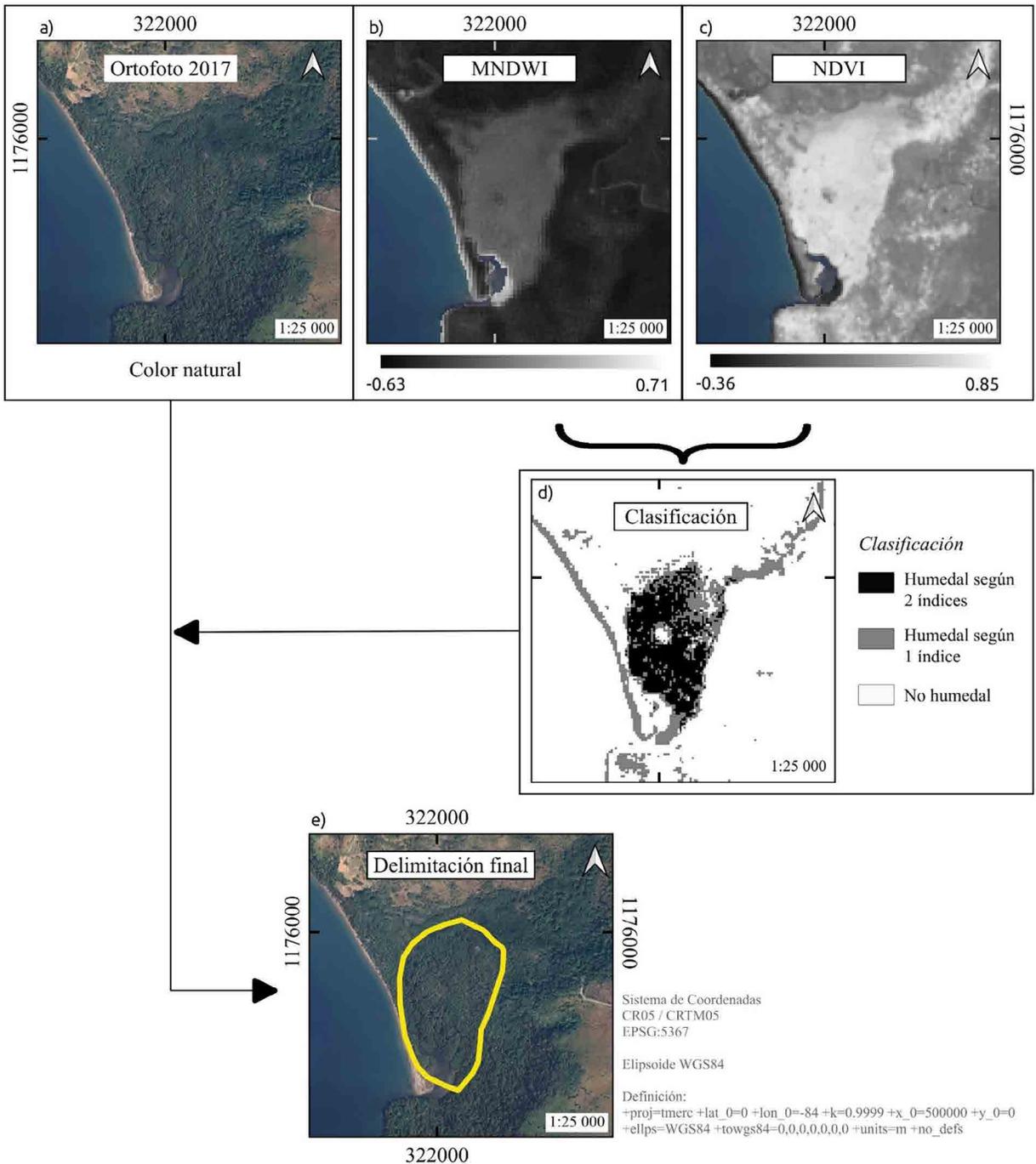


Fig. 2. Ejemplo de identificación de los humedales con el procedimiento semiautomático presentado en este estudio. a) Ortofoto en color real, b) Índice MNDWI, c) Índice NDVI, d) Clasificación automática según índices, e) Delimitación final del humedal.

El procedimiento de identificación de humedales permitió completar el IHPC sin necesidad de recurrir a técnicas estadísticas avanzadas comúnmente usadas en estudios ambientales que interpretan imágenes satelitales [40]–[42]. Esto es posible dada la naturaleza preliminar del estudio, que busca generar un primer inventario de humedales costeros, pero no abarca la validación final de todas las áreas identificadas.

3.2 Caracterización de humedales costeros

El IHPC creado muestra que los humedales costeros en Costa Rica tienen un tamaño promedio de aproximadamente 260 ha, pero que pueden extenderse hasta más de 14 000 ha (Fig. 3.a). La distribución del área de los humedales presenta un sesgo hacia los valores más cercanos a cero (sesgo hacia la izquierda), dado que la mayoría de los humedales presentan un tamaño relativamente pequeño y son pocas las áreas que superan las 1 000 ha.

En términos de división administrativa (Fig. 3.b), la provincia que tiene más humedales es Limón, con 169, seguido de Puntarenas con 161 humedales y Guanacaste con 134 humedales. Dentro de ellas, el cantón que presenta más cantidad de humedales es Pococí en la provincia de Limón, seguido de Puntarenas y Golfito en la provincia de Puntarenas. Los cantones con menor cantidad son Hojancha en Guanacaste y Esparza en Puntarenas, con tres cada uno.

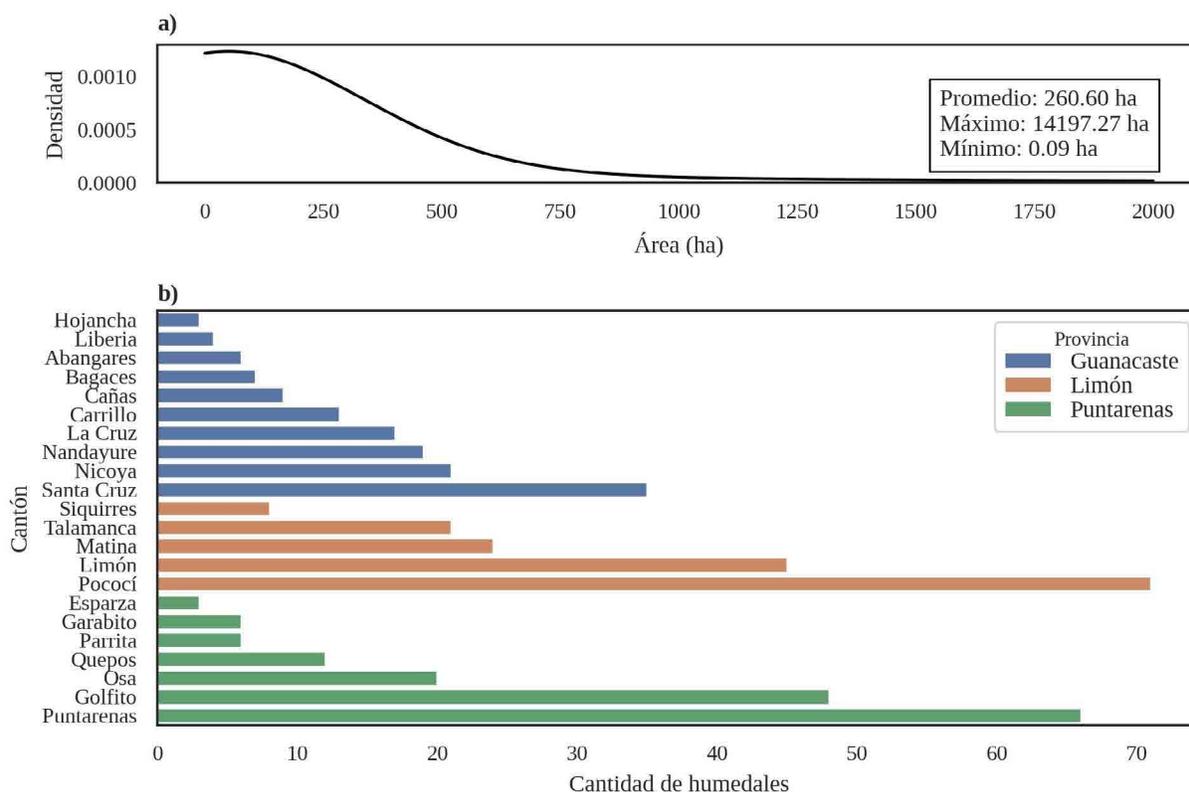


Fig. 3. Características geográficas de los humedales incluidos en el IHPC. a) Distribución y valores máximo, medio y mínimo de la extensión de los humedales (Nota: el eje de las abscisas se trunca aproximadamente en 2 000 ha para facilitar la lectura de la imagen). b) Descripción de la localización administrativa por cantón y provincia de los humedales.

En total, fueron identificados 464 humedales costeros. De estos, 251 humedales se ubican al lado de un río o en la desembocadura de estos (Fig. 4.a), tal y como se esperaría de ecosistemas presentes en zonas húmedas y con protección contra perturbaciones. A su vez, 240 humedales se localizan cercanos a una playa y solamente 81 tienen islas que podrían afectar el oleaje que incide en el humedal (Fig. 4.a).

Del total de humedales costeros identificados, 56 se encuentran en las cercanías de zonas con presencia de corales (presentes en registros actuales o históricos), y 72 humedales se encuentran en las cercanías de praderas de fanerógamas marinas (Fig. 4.b). Así, estas áreas se presentan como posibles sitios para estudios ecológicos de interacción entre comunidades, así como evaluación técnica y económica de los servicios ecosistémicos que ofrecen en conjunto los humedales costeros y los ecosistemas sumergidos cercanos. Estos sitios ofrecen condiciones particulares de protección costera, ya que cada ecosistema (sumergido o emergido) afecta el oleaje, las corrientes y el transporte de sedimentos de formas diferentes. Así, estos sitios se presentan como zonas favorables para estudios de mayor complejidad, donde se puede estudiar la protección costera que ofrecen diversos ecosistemas de forma conjunta.

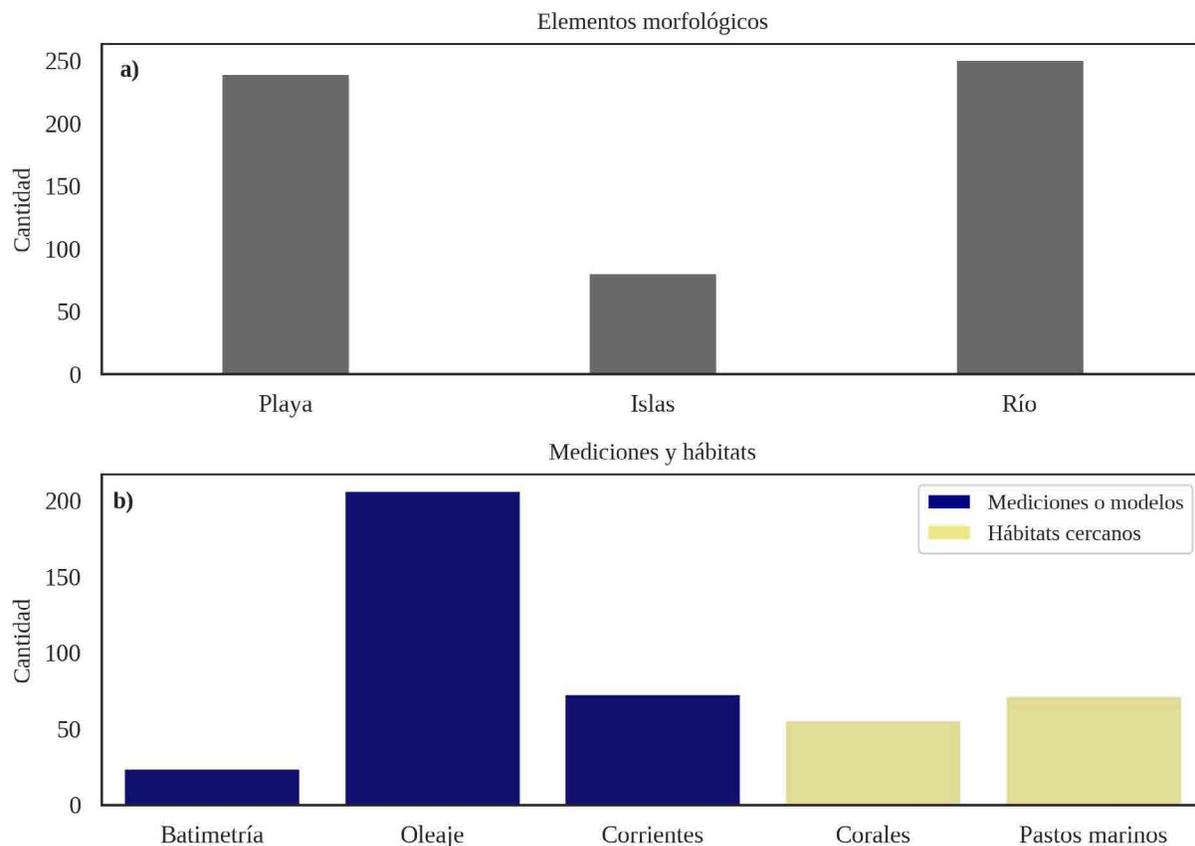


Fig. 4. Propiedades en humedales identificados. a) Elementos morfológicos presentes, b) Datos medidos o modelados y presencia de hábitats marinos.

Con relación a la disponibilidad de información medida o simulada de oleajes, corrientes y batimetría, 207 humedales costeros tienen datos de oleajes, 73 tienen datos de corrientes, y 24 tienen información de la batimetría (Fig. 4.b). Todos estos datos fueron generados en la costa adyacente al humedal (no dentro del propio humedal), y han sido obtenidos por IMARES-UCR a través de proyectos de investigación y consultorías. Este aspecto podría facilitar futuras investigaciones realizadas por otras entidades científicas, ya que los datos medidos y modelados por IMARES-UCR pueden distribuirse bajo licencias favorables para proyectos de investigación.

Finalmente, de los 464 humedales costeros identificados, 159 presentan núcleos poblacionales en sus cercanías, y 286 presentan accesos por carretera. Así, estas áreas presentan condiciones sociales que podrían facilitar el establecimiento de proyectos de investigación, dada la facilidad de acceso, posible colaboración con la comunidad para labores de protección de equipos y toma de muestras, lugares donde hospedarse en campañas de campo de varios días, entre otras. Sin embargo, la presencia de núcleos poblacionales cercanos también puede implicar presiones sobre el humedal, así como tránsito de personas en el posible sitio de estudio. Estos aspectos son importantes, ya que podrían afectar los resultados de cualquier investigación, y es necesario tomarlos en cuenta al plantear el trabajo de campo de los proyectos.

El análisis descriptivo realizado en este documento pretende introducir los aspectos más generales de los humedales identificados en el IHPC, pero no profundiza en el estudio detallado de cada humedal. Esto porque la selección de un sitio de estudio depende de muchos factores que están directamente relacionados al objetivo de cada proyecto, así como a las particularidades que lo hacen requerir un sitio con unas condiciones u otras. No obstante, se insta a los posibles usuarios a descargar el inventario y analizar las características de los humedales identificados en función de los objetivos específicos de cada trabajo. Este proceso de estudio podrá revelar fortalezas y debilidades del IHPC, las cuales podrán nutrir el proceso de perfeccionamiento de la herramienta y las mejoras a incluir en futuras versiones de esta.

4. CONCLUSIONES

El Inventario de Humedales para Protección Costera (IHPC) se desarrolló como una herramienta que puede facilitar futuras investigaciones en el ámbito de la ingeniería o gestión de la costa, al localizar posibles sitios de estudio e iniciar un proceso de cartografiado oficial que contribuya en la toma de decisiones en temas ambientales. No obstante, siendo la primera versión de la base de datos, requiere apoyo para validar las localizaciones y dimensiones de los humedales nuevos identificados.

El producto desarrollado en esta investigación es una base de datos complementaria al INH, y contiene nuevas áreas que no estaban incluidas en el inventario nacional. Además, extiende los datos incluidos al agregar información referida a condiciones geográficas, disponibilidad de datos, facilidad de acceso, y otras características.

El IHPC puede ayudar a investigaciones relacionadas con la búsqueda de soluciones costeras basadas en la naturaleza para la adaptabilidad ante el cambio climático y gestión de la costa.

5. ROLES DE PARTICIPACIÓN

Felipe Calleja Apéstegui: Conceptualización, Curación de datos, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología, administración del proyecto, validación, redacción – borrador original.

Fernando López-Arias: Curación de datos, investigación, validación, redacción – revisión y edición.

6. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, a través del proyecto C1153 “Identificación de zonas potenciales para el estudio de protección costera con soluciones basadas en ecosistemas”.

REFERENCIAS

- [1] R. Costanza et al., “The value of the world’s ecosystem services and natural capital”, *Nature*, vol. 387, no. 6630, pp. 253–260, 1997.
- [2] P. Menéndez et al., “Valuing the protection services of mangroves at national scale: The Philippines”, *Ecosyst. Serv.*, vol. 34, pp. 24–36, Dec. 2018.
- [3] C. M. Duarte, I. J. Losada, I. E. Hendriks, I. Mazarrasa, y N. Marbà, “The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation”, *Nat. Clim. Chang.*, vol. 3, no. 11, pp. 961–968, Nov. 2013.
- [4] E. B. Barbier, S. D. Hacker, C. Kennedy, E. W. Koch, A. C. Stier, y B. R. Silliman, “The value of estuarine and coastal ecosystem services”, *Ecol. Monogr.*, vol. 81, no. 2, pp. 169–193, 2011.
- [5] B. Ondiviela *et al.*, “The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate”, *Coast. Eng.*, vol. 87, pp. 158–168, 2014.
- [6] B. T. van Zanten, P. J. H. van Beukering, y A. J. Wagtendonk, “Coastal protection by coral reefs: A framework for spatial assessment and economic valuation”, *Ocean Coast. Manag.*, vol. 96, pp. 94–103, Aug. 2014.
- [7] A. M. Hashim, S. M. P. Catherine, y H. Takaijudin, “Effectiveness of Mangrove Forests in Surface Wave Attenuation: A Review”, *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 18, pp. 4483–4488, May 2013.
- [8] M. Maza, J. L. Lara, I. J. Losada, B. Ondiviela, J. Trinogga, y T. J. Bouma, “Large-scale 3-D experiments of wave and current interaction with real vegetation. Part 2: Experimental analysis”, *Coast. Eng.*, vol. 106, pp. 73–86, Dec. 2015.
- [9] M. Maza, J. L. Lara, y I. J. Losada, “Solitary wave attenuation by vegetation patches”, *Adv. Water Resour.*, vol. 98, pp. 159–172, Dec. 2016.
- [10] M. Maza, J. L. Lara, y I. J. Losada, “Experimental analysis of wave attenuation and drag forces in a realistic fringe *Rhizophora* mangrove forest”, *Adv. Water Resour.*, vol. 131, p. 103376, Sep. 2019.
- [11] Y. Mazda, M. Magi, M. Kogo, y P. N. Hong, “Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam”, *Mangroves Salt Marshes*, vol. 1, pp. 127–135, 1997.
- [12] D. A. Sánchez-Núñez, G. Bernal, y J. E. Mancera Pineda, “The Relative Role of Mangroves on Wave Erosion Mitigation and Sediment Properties”, *Estuaries and Coasts*, vol. 42, no. 8, pp. 2124–2138, Dec. 2019.
- [13] E. M. Horstman, C. M. Dohmen-Janssen, P. M. F. Narra, N. J. F. van den Berg, M. Siemerink, y S.

- J. M. H. Hulscher, "Wave attenuation in mangroves: A quantitative approach to field observations", *Coast. Eng.*, vol. 94, pp. 47–62, Dec. 2014.
- [14] J. L. Garzon, M. Maza, C. M. Ferreira, J. L. Lara, y I. J. Losada, "Wave Attenuation by *Spartina* Saltmarshes in the Chesapeake Bay Under Storm Surge Conditions", *J. Geophys. Res. Ocean.*, vol. 124, no. 7, pp. 5220–5243, Jul. 2019.
- [15] BIOMARCC-SINAC-GIZ, "Payments for ecosystem services of mangroves: A case study of the Savegre Delta, Costa Rica", BIOMARCC-SINAC-GIZ, San Jose, Costa Rica, 2014.
- [16] M. Hernández-Blanco, R. Costanza, y M. Cifuentes-Jara, "Economic valuation of the ecosystem services provided by the mangroves of the Gulf of Nicoya using a hybrid methodology", *Ecosyst. Serv.*, vol. 49, p. 101258, Jun. 2021.
- [17] European Environment Agency, "Science for Environment Policy. In Depth report - Ecosystem Services and the Environment", European Commission, no. 11. Bristol, 2015.
- [18] J. Samper-Villarreal, B. I. Van Tussenbroek, y J. Cortés, "Seagrasses of Costa Rica: From the mighty caribbean to the dynamic meadows of the eastern tropical pacific", *Rev. Biol. Trop.*, vol. 66, no. April, pp. S53–S65, 2018.
- [19] J. Cortés, C. E. Jiménez, A. C. Fonseca, y J. J. Alvarado, "Status and conservation of coral reefs in Costa Rica", *Rev. Biol. Trop.*, vol. 58, no. 1, p. 33, Jul. 2015.
- [20] Proyecto Humedales de SINAC-PNUD-GEF, *Inventario Nacional de Humedales*. San José: SINAC/PNUD/GEF, 2018.
- [21] M. Mena Young, "Documental sobre la Misión CARTA 2005 en Costa Rica: un ejemplo de producción audiovisual en la divulgación científica", en *X Reunión de la Red de Popularización de la Ciencia y la Tecnología en América Latina y el Caribe* (RED POP-UNESCO), 2007.
- [22] M. Drusch et al., "Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services", *Remote Sens. Environ.*, vol. 120, pp. 25–36, May 2012.
- [23] M. Main-Knorn, B. Pflug, J. Louis, V. Debaecker, U. Müller-Wilm, y F. Gascon, "Sen2Cor for Sentinel-2", en *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*, 2017, p. 3.
- [24] C. J. Tucker, "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation", *Remote Sens. Environ.*, vol. 8, no. 2, pp. 127–150, 1979.
- [25] H. Xu, "Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery", *Int. J. Remote Sens.*, vol. 27, no. 14, pp. 3025–3033, Jul. 2006.
- [26] A. Davranche, G. Lefebvre, y B. Poulin, "Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series", *Remote Sens. Environ.*, vol. 114, no. 3, pp. 552–562, 2010.
- [27] C. Goutte y E. Gaussier, "A Probabilistic Interpretation of Precision, Recall and F-Score, with Implication for Evaluation", en *European Conference on information retrieval*, 2005, pp. 345–359.
- [28] R. Congalton y K. Green, *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data*. Boca Ratón: CRC Press, 2009.
- [29] J. Cortés, "The Caribbean coastal and marine ecosystems.", in *Costa Rican Ecosystems*, M. Kappelle, Ed., Chicago and London: University of Chicago Press, 2016, pp. 591–617.
- [30] J. Cortés, "The Pacific coastal and marine ecosystems", in *Costa Rican Ecosystems*, M. Kappelle, Ed., Chicago and London: University of Chicago Press, 2016, pp. 97–138.
- [31] J. Cortés Nunez, "The coral reefs of Golfo Dulce, Costa Rica: distribution and community structure", *Atoll Res. Bull.*, vol. 344, pp. 1–37, 1990.

- [32] C. Jiménez y J. Cortés, “Growth of seven species of Scleractinian corals in an upwelling environment of the eastern Pacific (Golfo de Papagayo, Costa Rica)”, *Bull. Mar. Sci.*, vol. 72, no. 1, pp. 187–198, 2003.
- [33] J. Cortés y C. E. Jiménez, “Coastal-marine environments of Parque Nacional Corcovado, Puntarenas, Costa Rica”, *Rev. Biol. Trop.*, vol. 44, no. 3, pp. 35–40, 1996.
- [34] F. Calleja, “Inventario de humedales para protección costera en Costa Rica”, Mendeley Data, San José, 2021.
- [35] U.S. Fish y Wildlife Service, “Wetlands Mapper. Documentation and Instructions Manual”, Madison, 2019.
- [36] E. Gamarra, “Elaboración del inventario nacional y clasificación de los humedales costeros con base en la estrategia nacional de humedales para la toma de decisiones para su conservación y protección, 2012-2018”, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2021.
- [37] North Carolina Environmental Quality. “Download Coastal Wetlands Spatial Data”. Download Coastal Wetlands Spatial Data. <https://deq.nc.gov/about/divisions/coastal-management/coastal-management-gis-data/download-coastal-wetlands-spatial> (Accesado en Apr. 21, 2022).
- [38] R. Ginzburg, J. Adámoli, P. Herrera, y S. Torrella, “Los Humedales del Chaco: Clasificación, Inventario y Mapeo a Escala Regional”, *INSUGEO, Miscelánea*, vol. 14, pp. 121–138, 2005.
- [39] Secretaría de la Convención de Ramsar, “Inventario de humedales: Un Marco de Ramsar para el Inventario de humedales,” Gland (Suiza), 2007.
- [40] F. Calleja, C. Galván, A. Silió-Calzada, J. A. Juanes, y B. Ondiviela, “Long-term analysis of *Zostera noltei*: A retrospective approach for understanding seagrasses’ dynamics”, *Mar. Environ. Res.*, vol. 130, pp. 93–105, 2017.
- [41] F. Calleja, B. Ondiviela, C. Galván, M. Recio, y J. A. Juanes, “Mapping estuarine vegetation using satellite imagery: The case of the invasive species *Baccharis halimifolia* at a Natura 2000 site”, *Cont. Shelf Res.*, vol. 174, pp. 35–47, 2019.
- [42] M. Belgiu, y L. Drăguț, “Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions”, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 114, pp. 24–31, Apr. 2016.

Anexo 1. Validación de la delimitación de humedales en el IHPC



Fig. A1. Comparación visual de la delimitación del humedal de Mata Limón (Puntarenas) basada en la imagen aérea de dron (línea roja) y la delimitación del IHPC en las zonas incluidas en la imagen del dron (línea amarilla). Se agrega la delimitación completa del humedal según el IHPC como referencia (línea celeste). La imagen del dron se presenta a color. Imagen en escala de grises corresponde a la imagen de Google Earth más reciente. Coordenadas en sistema proyectado CRTM05 (EPSG: 5367).