

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE CIENCIAS GEOGRÁFICAS

PROGRAMA MAESTRÍA PROFESIONAL EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICAS Y TELEDETECCIÓN

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA DE COBERTURAS
EN EL MANGLAR DEL ESTERO DE PUNTARENAS MEDIANTE LA
TELEDETECCIÓN PARA EL PERÍODO 1974-2024**

Trabajo Final de Graduación sometido a la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en
Geografía para optar por el grado de Magíster en Sistemas de Información Geográfica y
Teledetección

GEANCARLO MELÉNDEZ SALAZAR

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Montes de Oca
Campus Omar Dengo, Heredia

Costa Rica, año 2024

DEDICATORIA

A mi madre, por ser ejemplo de lucha, persona incansable que siempre me ha demostrado el valor de la perseverancia y que nunca debemos claudicar ante las adversidades.

A mi hija, porque eres la inspiración que me motiva a realizar todo. Esto es para ti. ¡Te amo, Taís Luana!

A Yahaira, porque sin esperarlo, llegaste y te convertiste en la persona que necesitaba en este caminar. ¡Gracias por ser esa compañera incondicional!

A mi hermana María José, porque siempre veo en ti el rostro de Dios.

Todo cuanto hacemos debe tender al progreso y al perfeccionamiento.

Baruch Spinoza.

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos al M.Sc. Cristian Brenes Pérez, por su tiempo y dedicación en la elaboración de este trabajo, gracias por la paciencia y por ser una persona orientadora que ha hecho que esta investigación se haya desarrollado con éxito.

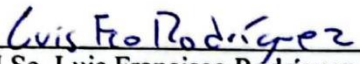
Al M.Sc. Francisco Rodríguez Soto por ser esa persona que siempre apoyó y creyó en este servidor y siempre estuvo dispuesto a colaborar durante toda la génesis, desarrollo y conclusión de este trabajo como profesor guía.

Al M.Sc. Luis Sandoval Murillo, agradezco su apertura y disposición para ser parte de este equipo, ya que desde el primer momento en que lo invité a formar parte de él, nunca dudó en colaborar y estar dispuesto a mejorar este trabajo.


Al Dr. León Javier Saborío Bejarano, mi agradecimiento por su proceso formativo durante esta Maestría y sus valiosos aportes a este trabajo, para mí fue un honor que perteneciera a este equipo de lujo.


A mis compañeros de maestría, a mi familia en general y a todas aquellas personas que de una u otra forma fueron partícipes de este proceso académico. ¡Muchas gracias!


Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por el Comité de Gestión Interinstitucional (CI) del Programa de Maestría en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección de la Universidad de Costa Rica (UCR) y la Universidad Nacional (UNA), como requisito para optar por el grado de Magíster en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.


M.Sc. Luis Francisco Rodríguez Soto
Representante de la Decanatura
Sistema de Estudios de Posgrado


M.Sc. Cristian Brenes Pérez
Profesor Guía


M.Sc. Luis Sandoval Murillo
Lector


Dr. León Javier Saborío Bejarano
Lector


M.Sc. Rubén Martínez Barbáchano
Representante del Director del Programa de Posgrado en Geografía


Lic. Geancarlo Meléndez Salazar
Sustentante

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.3 PROBLEMA	3
1.4 OBJETIVOS.....	5
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.5 DELIMITACIÓN	6
1.6 ALCANCES	7
1.7 LIMITACIONES.....	7
CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL.....	8
2.1 LOS MANGLARES Y SU IMPORTANCIA ECOLÓGICA, ECONÓMICA Y SOCIAL	8
2.2 LA TELEDETECCIÓN Y EL ANÁLISIS ESPACIAL.....	9
2.3 CAMBIOS EN LA COBERTURA DE LA TIERRA Y DINÁMICA TERRITORIAL EN LOS MANGLARES DE PUNTARENAS: ANÁLISIS HISTÓRICO Y PERSPECTIVAS FUTURAS.....	10
2.4 IMPACTOS AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICOS POR LA PÉRDIDA DE MANGLARES.....	12
2.5 MARCO LEGAL Y POLÍTICO DE LA CONSERVACIÓN DE MANGLARES.....	14
2.6 GESTIÓN AMBIENTAL Y PLANIFICACIÓN TERRITORIAL	15
2.7 CAMBIO CLIMÁTICO Y RESILIENCIA COSTERA.....	16
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	18
3.1 DESCARGA DE IMÁGENES.....	20
3.2 CORRECCIÓN DE IMÁGENES.....	21
3.3 ELABORACIÓN DE ÍNDICES ESPECTRALES.....	22
3.3.1 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI).....	22
3.3.2 ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO AL SUELO (SAVI)	22
3.3.3 ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDWI)	23
3.3.4 ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA MODIFICADO (MNDWI)	23
3.3.5 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE MANGLAR (MVI)	24

3.4	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA	24
3.4.1	IMAGEN SEGMENTADA	27
3.4.2	ÁREAS DE ENTRENAMIENTO	28
3.5	VALIDACIÓN	32
3.5.1	MATRIZ DE CONFUSIÓN E ÍNDICE KAPPA	32
3.5.2	MATRICES DE CAMBIO	34
3.6	POSPROCESAMIENTO	36
3.7	ELABORACIÓN Y PRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA	36
3.8	DIAGRAMA METODOLÓGICO	38
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....		39
4.1	ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE ESPECTRALES ESTIMADOS.....	39
4.2	ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA DE LA TIERRA	42
4.3	ANÁLISIS DE PÉRDIDA Y GANANCIA	48
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		58
5.1	CONCLUSIONES.....	58
5.2	RECOMENDACIONES	59
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS		61
6.1	BIBLIOGRAFÍA.....	61
6.2	ANEXOS.....	71
6.2.1	MATRIZ DE CONFUSIÓN E ÍNDICE KAPPA 1979-2019.....	71
6.2.1	MATRIZ DE CAMBIO 1974-2024.....	72



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo Geancarlo Meléndez Salazar, con cédula de identidad 206500661, en mi condición de autor del TFG titulado:

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA DE COBERTURAS EN EL MANGLAR DEL ESTERO DE PUNTARENAS MEDIANTE LA TELEDETECCIÓN PARA EL PERÍODO 1974-2024.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO*

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

RESUMEN

La investigación se enfocó en el análisis multitemporal de la dinámica de cobertura del manglar del estero de Puntarenas, abarcando el periodo 1974-2024 mediante teledetección y el uso de imágenes satelitales. Se emplearon datos de los sensores Landsat 1, 2, 5 y 8, con imágenes tomadas cada 5 años. Se aplicaron índices espectrales (NDVI, SAVI, NDWI, NDWI Modificado y MVI) para identificar el bosque de manglar y analizar su evolución.

La técnica de clasificación Support Vector Machine (SVM), mediante el software ArcGIS Pro, permitió discriminar las coberturas del suelo. Los resultados fueron validados utilizando matrices de confusión y el índice Kappa, junto con otros insumos como fotografías aéreas y consultas a expertos.

Los mapas generados reflejan los cambios en la cobertura del manglar durante 50 años, permitiendo identificar periodos de mayor pérdida de área. Además, se creó un visor cartográfico en ArcGIS Online para visualizar los escenarios de modificación de coberturas, brindando una herramienta de aprendizaje y concientización sobre la transformación de estos ecosistemas.

ABSTRACT

The research focused on the multitemporal analysis of the mangrove cover dynamics in the Puntarenas estuary, covering the period from 1974 to 2024 through remote sensing and the use of satellite images. Data from Landsat 1, 2, 5 y 8 sensors were used, with images taken every 5 years. Spectral indices (NDVI, SAVI, NDWI, Modified NDWI and MVI) were applied to identify the mangrove forest and analyze their evolution.

The Support Vector Machine (SVM) classification technique, implemented through ArcGIS Pro software, was used to discriminate land cover. The results were validated using confusion matrices and the Kappa index, along with other inputs such as aerial photographs and expert consultations.

The generated maps reflect the changes in mangrove cover over 50 years, identifying periods of significant area loss. Additionally, a cartographic viewer was created in ArcGIS Online to visualize the land cover modification scenarios, providing a learning and awareness tool about the transformation of these ecosystems.

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación del área de estudio.....	6
Mapa 2. Identificación del límite del humedal de Puntarenas 1974-2024.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas del procesos metodológico	20
Figura 2. Características de los programas LANDSAT.	21
Figura 3. Listado de imágenes satelitales utilizadas en la investigación	21
Figura 4. SVM y su hiperplano lineal	26
Figura 5. SVM y su hiperplano lineal utilizando Kernel	26
Figura 6. Herramientas para segmentar imágenes en ArcGIS Pro	27
Figura 7. Imagen segmentada en ArcGIS Pro	28
Figura 8. Descripción de categorías de coberturas de la tierra utilizadas en la clasificación supervisada.....	29
Figura 9. Creación de esquema y áreas de entrenamiento para imagen 2024 en ArcGIS.....	31
Figura 10. Herramientas para clasificar e imagen clasificada con SVM en ArcGIS Pro.....	31
Figura 11. Representación básica de la matriz de confusión.....	33
Figura 12. Herramienta para crear matriz de confusión.	34
Figura 13. Modelo de una matriz de cambio de cobertura de la tierra	34
Figura 14. Herramienta matriz de cambios en ArcGIS Pro.....	35
Figura 15. Herramienta para visualizar cambios en ráster para 2 períodos de tiempo	35
Figura 16. Herramienta para reclasificar rásteres clasificados en ArcGIS Pro.....	36
Figura 17. Diagrama de metodología de tesis.	38
Figura 18. Índices NDVI, SAVI, NDWI, MNDWI y MVI en imagen satelital del 2024.....	42
Figura 19. Distribución porcentual durante 50 años de las coberturas de la tierra	43
Figura 20. Clasificación de coberturas para los períodos 1974 y 2024.	45
Figura 21. Índice de Kappa y su grado de concordancia	46
Figura 22. Mosaico de coberturas períodos 2019-1979.....	47
Figura 23. Cambio neto de coberturas para los períodos 2024 y 1974.....	51
Figura 24. Identificación de pérdidas y ganancias de manglar en el período 1974-2024	54
Figura 25. Ejemplos de recursos interactivos disponibles en el Story Maps de la investigación	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad de firmas espectrales utilizadas para clasificar cada imagen.....	30
Tabla 2. Matriz de confusión e índice Kappa para el períodos 2024.....	46
Tabla 3. Matriz de confusión e índice Kappa para el períodos 1974.....	46
Tabla 4. Matriz de cambio para los períodos 2024 y 1974.....	48
Tabla 5. Cambios de cobertura en el manglar para los períodos 1974 y 2024.	50

ACRÓNIMOS

CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

CI: Conservación Internacional

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

ERTS-1: Earth Resources Technology Satellite 1

LANDSAT: LAND=tierra y SAT=satélite

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía

MSS: Multispectral Scanner System

MVI: Mangrove Vegetation Index

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NDWI: Normal Difference Water Index

MNDWI: Modified Normal Difference Water Index

OLI: Operational Land Imager

RBV: Return Beam Vidicon

SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index

SVM: Support Vector Machine

SIG: Sistemas de Información Geográfica

SINAC: Sistema Nacional de Áreas de Conservación

TIRS: Thermal Infrared Sensor

USGS: United States Geological Survey

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Esta investigación se planteó como objetivo realizar un análisis multitemporal de la dinámica de cobertura de la tierra en el manglar del estero de Puntarenas para el período 1974-2024, haciendo uso de la teledetección y específicamente mediante imágenes satelitales. Se analizó una imagen por cada 5 años, aprovechando los datos de los sensores Landsat 1 (1974), Landsat 2 (1979), Landsat 5 (1984, 1989, 1994, 1999, 2004 y 2009) y Landsat 8 (2014, 2019 y 2024).

Se aplicó una serie de índices espectrales (NDVI, SAVI, NDWI, NDWI Modificado y MVI) que sirvieron como apoyo para discriminar la cobertura e identificar el bosque de manglar en cada imagen. Se utilizó la técnica de *Support Vector Machine* (SVM) o Máquinas de Vectores de Soporte, usando las herramientas proporcionadas por el programa ArcGIS Pro de ESRI® versión 3.3.0.

La validación de los resultados que se derivan de la clasificación de las imágenes de satélite se llevó a cabo a partir de matrices de confusión y la estimación del índice estadístico Kappa. Además, se emplearon matrices de cambios para conocer la transformación de coberturas en los distintos periodos, así como insumos adicionales como fotografías aéreas, hojas topográficas y consultas a expertos. Estos métodos garantizan la confiabilidad de los datos y aseguran que se refleje la realidad física.

Se elaboró distintos mapas que representan la evolución histórica del manglar de Puntarenas durante 50 años, lo que permite determinar si hubo una reducción en su área y cuantificarla, tanto a nivel tabular como cartográfico. Además, se identificó en qué periodo sufrió el manglar de Puntarenas una mayor afectación.

Se obtuvo mapas de coberturas para el manglar de Puntarenas desde 1974 hasta el 2024 en periodos de cada 5 años. A partir de esta cartografía, se cuantificaron las áreas de manglar reducidas y se identificaron los nuevos límites según la transformación sufrida en cada periodo.

Finalmente, se creó un visor cartográfico mediante la herramienta Story Maps de ArcGIS Online para permitir la visualización de los distintos escenarios respecto a la modificación de las coberturas, especialmente en el manglar de Puntarenas. Este portal web sirve como un recurso, tanto para la observación de contenido académico como para el aprendizaje y la concientización de la sociedad civil respecto a la transformación que sufrió el manglar y los ecosistemas asociados a través de la modificación de las coberturas de suelo con los años.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los manglares representan un recurso ecosistémico de alto valor para las comunidades costeras. Gracias a su función filtradora de contaminantes, las raíces y suelos de los manglares eliminan contaminantes y sedimentos del agua, mejorando significativamente su calidad. Además, estos ecosistemas contribuyen a la descomposición y reciclaje de materia orgánica, un proceso vital para mantener la calidad del agua (Sánchez, 1986).

Estos bosques ofrecen raíces que ayudan a prevenir la erosión costera y albergan una gran biodiversidad que incluye moluscos, crustáceos, aves y otros animales propios del entorno. Además de la cría de peces y camarones también contribuyen al encadenamiento económico mediante el ecoturismo. Los manglares desempeñan un papel crucial en la protección contra inundaciones, especialmente tsunamis (de la Cruz, 2023).

Los manglares también brindan un servicio ecosistémico esencial para la vida: la captura de carbono. Estos son altamente eficientes en el secuestro de dióxido de carbono (CO₂), lo que ayuda a mitigar el cambio climático al almacenar grandes cantidades de carbono en su biomasa y suelos. Por lo tanto, el mantenimiento y la provisión de los servicios ecosistémicos de los manglares son fundamentales para la salud ambiental y el bienestar humano (Arguedas, 2015).

El mantenimiento de estos servicios ecosistémicos requiere esfuerzos de conservación, restauración y manejo sostenible (Keenleyside et al., 2014). Esto incluye la creación de áreas protegidas, la implementación de leyes contra la deforestación, la reforestación de áreas degradadas y el uso o cobertura de técnicas naturales de restauración. Además, es esencial promover prácticas de pesca sostenible, regular la explotación de recursos, desarrollar programas de educación ambiental, fomentar la participación comunitaria y llevar a cabo investigaciones y monitoreo continuo para asegurar la salud y sostenibilidad de los manglares (Uribe, 2015).

A pesar de la existencia del marco jurídico, entre los que se pueden citar: Ley de Conservación de la Vida Silvestre, Ley Forestal, Ley de Biodiversidad, Ley Orgánica del Ambiente, Ley de Aguas, sin olvidar la convención Ramsar, además de planes de manejo como la Política Nacional de Humedales 2017-2030, Plan General de Manejo de los Ecosistemas de Humedal entre Paquera, Puntarenas y Pochote, la Política Nacional de Humedales y el Plan General de Gestión del Humedal Estero Puntarenas y Manglares Asociados (Sinac, 2019) y en el que se declara el área de estudio como Área Silvestre Protegida con el Decreto Ejecutivo n.º 29277-MINAE, así como otras

disposiciones legales que promueven la conservación de estos ecosistemas, las afectaciones persisten. Por lo tanto, es necesario evidenciarlas y cuantificarlas para que sirvan como insumos en la toma de decisiones que se relacionan con nuevas estrategias de conservación y un manejo óptimo de estos espacios.

Por otro lado, el uso de la teledetección se ha convertido en una herramienta invaluable para la clasificación y cuantificación de coberturas a través de los años (Guadalupe, 2021). En este análisis, se pretende aprovechar su potencial para cuantificar la cantidad de hectáreas perdidas o ganadas en los últimos 50 años debido a procesos invasivos que se relacionan con la agricultura, la camaricultura, las salineras y los asentamientos humanos (Cifuentes et al., 2014). Evidenciar las transformaciones en el manglar permite instar a las autoridades pertinentes a buscar alternativas que fomenten el desarrollo económico y social sin ocasionar mayores impactos en este ecosistema (López, 2021).

1.3 PROBLEMA

Las dinámicas socioeconómicas que se desarrollaron en el entorno de los manglares motivan la necesidad de investigar posibles cambios en estos ecosistemas, especialmente en lo que respecta a la pérdida de área. El crecimiento poblacional en las cercanías de los manglares, junto con los desarrollos agropecuarios, como los cultivos de caña de azúcar y la cría de camarones en piletas (Martínez, 2022), ha ocasionado transformaciones significativas en las coberturas del tierra y en la red hídrica de la zona (Sinac, 2019).

Entre los daños ecológicos ocasionados, se destaca la pérdida de bosques de manglar e importantes servicios ecosistémicos como la protección costera contra tormentas y tsunamis, la mejora de la calidad del agua y la conservación de la biodiversidad marina y terrestre, lo que afecta directamente a especies migratorias, residentes y comerciales, como aves, cocodrilos y bivalvos¹ respectivamente. Esta pérdida no solo implica daños ambientales, sino que también impacta la

¹ Los moluscos con dos conchas se denominan bivalvos y dentro de este grupo se encuentran mejillones, vieiras, ostras, almejas, piangüas, chuchecas, entre otros.

economía local al degradar un hábitat de gran atractivo turístico, generador de empleo y fuentes económicas (Álvarez, 2022).

Además, debido a la acumulación de sedimentos diferentes a los originales de los manglares, como resultado de la actividad agrícola en la zona, es posible que algunos sectores nunca se puedan regenerar, lo que implica una reducción en la huella de carbono y pérdida permanente de este valioso hábitat (Cifuentes et al., 2014).

De acuerdo con Marquet et al. (2021), el carbono azul desempeña un papel crucial en la mitigación del cambio climático al absorber carbono atmosférico a través de la fotosíntesis y almacenarlo en sus suelos y sedimentos durante periodos prolongados. Además, ayuda a regular el clima global. Debido a su importancia, la conservación y restauración de estos ecosistemas se ha convertido en una prioridad mundial, asegurando su capacidad para seguir capturando y almacenando carbono y continuar proporcionando beneficios ambientales esenciales (Cifuentes et al., 2018).

Adicionalmente, los procesos de deforestación aceleran la sedimentación en la zona, lo que disminuye el canal de navegación entre el estero y la ciudad de Puntarenas. Esto puede generar problemas de transporte para la flotilla pesquera de los distritos Chacarita y Puntarenas en el cantón central homónimo (Blanco, 2022). Asimismo, la acumulación sedimentaria está alterando la morfología costera, como se observa en sectores cercanos a los atracaderos de los ferris, donde se han formado nuevas playas debido a la falta de dragado periódico (Braga, 2015).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar mediante el uso de la teledetección la dinámica de la cobertura de la tierra en el área protegida del estero de Puntarenas en el período 1974-2024.

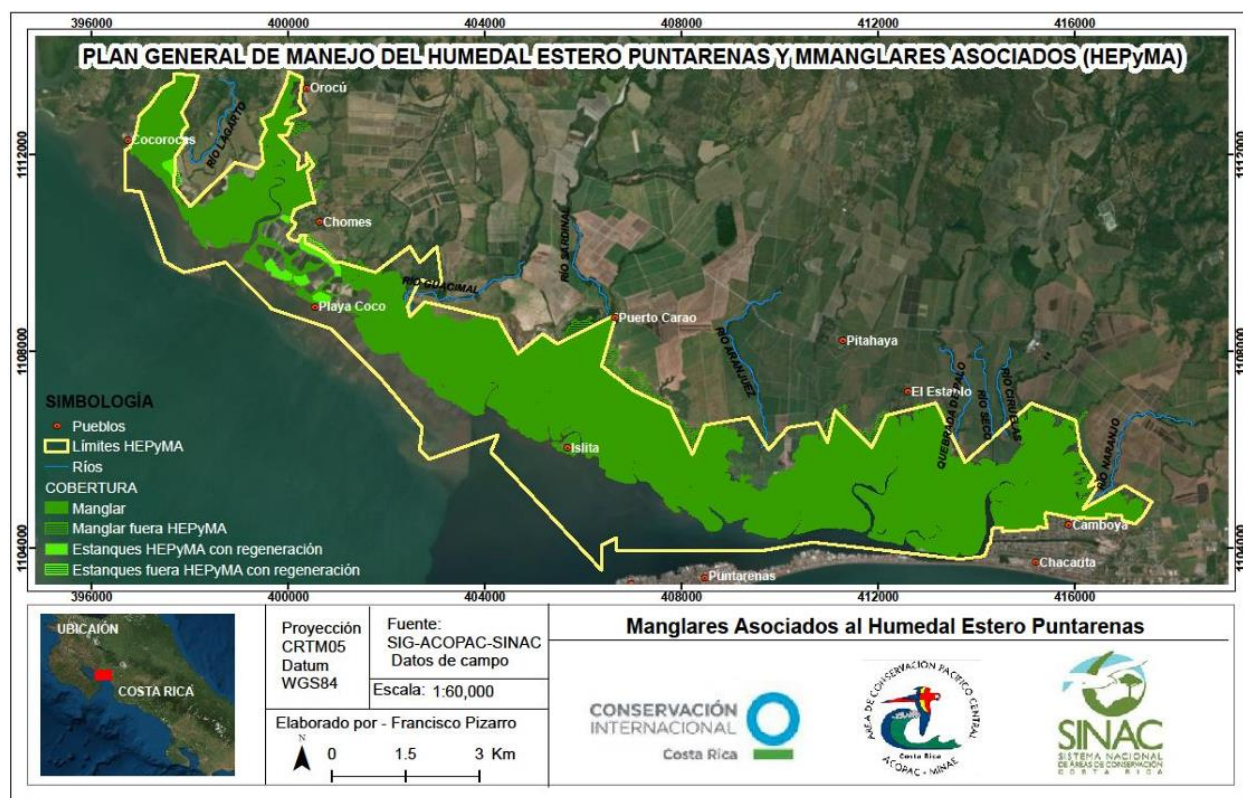
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1- Elaborar mapas de coberturas en el manglar de Puntarenas a partir de imágenes Landsat para el período de 1974 a 2024.
- 2- Realizar un análisis de pérdida y ganancia del manglar en cuanto a coberturas durante 50 años.
- 3- Implementar un visor cartográfico con mapas interactivos de coberturas, utilizando la herramienta *Story Maps* de la plataforma ArcGIS Online, que muestre el proceso de transformación de este ecosistema a lo largo de 5 décadas.

Pregunta de investigación: ¿La expansión de la agricultura, la acuicultura y urbanización ha provocado la deforestación de hectáreas de mangle en la zona delimitada por el Decreto Ejecutivo n.º 29277-MINAE durante el período de 1974 a 2024?

1.5 DELIMITACIÓN

La delimitación espacial comprende la señalada por el Plan General de Manejo del Humedal Estero Puntarenas y Manglares Asociados (HEPyMA) propuesto en el Decreto Ejecutivo n.º 29277-MINAE, ubicados entre las coordenadas geográficas 84° 45' 6.56" O, 84° 56' 33.53" O y 9° 58' 43.9" N, 10° 04' 15.56" N y las coordenadas CRTM05 396677,073 m, 417571,521 m Falso Este y 1103553,667 m, 1113689,883 m Falso Norte, con el objeto de determinar los cambios en la cobertura de la tierra del área silvestre protegida. En cuanto a la escala temporal, corresponde a un periodo de 50 años para valorar el grado de incidencia que pueden tener los factores antrópicos en la degradación del manglar y con base en que, considerando un periodo mayor, no se cuenta con insumos satelitales para analizar imágenes anteriores.



Mapa 1. Ubicación del área de estudio. Fuente: SINAC, 2019.

1.6 ALCANCES

Este estudio se enfoca en un análisis multitemporal de la dinámica de las coberturas en el manglar de Puntarenas, delimitado por el decreto N.º 29277-MINAE, durante el período de 1974 a 2024, empleando teledetección, particularmente imágenes satelitales Landsat. Se aplicó el método de clasificación supervisada *Support Vector Machine* (SVM) para generar mapas de coberturas en intervalos de cinco años, abarcando el período de estudio. Se llevó a cabo un análisis de cambio utilizando matrices de transición para cuantificar la pérdida o ganancia en hectáreas de manglar a lo largo del tiempo. Además, se desarrolló un visor cartográfico interactivo utilizando la herramienta Story Maps de ArcGIS Online para visualizar y analizar los resultados de manera dinámica.

1.7 LIMITACIONES

Se identificaron limitaciones que pueden influir en la precisión y validez de los resultados. Una de estas se relaciona con la calidad y disponibilidad de los datos satelitales que se utilizan, específicamente las imágenes Landsat empleadas en el análisis multitemporal. La variabilidad en la calidad y disponibilidad de estas imágenes, así como las diferencias en su resolución espacial y temporal, pueden incidir en la exactitud de los resultados y la capacidad para detectar cambios en la cobertura terrestre.

Además, se reconoce que la interpretación de las imágenes satelitales y la clasificación supervisada de las coberturas puede verse afectada por errores humanos y sesgos. La presencia de nubes y otras condiciones atmosféricas adversas puede dificultar la detección precisa de cambios en la cobertura terrestre, lo que a la vez puede limitar la precisión del análisis y la interpretación de los resultados.

Otra limitación por considerar se relaciona con la escala espacial y temporal de las imágenes satelitales Landsat que se utilizan en el estudio. La resolución espacial y temporal de estas imágenes puede no ser lo suficientemente detallada para capturar cambios locales o modificaciones rápidas en las coberturas en el manglar de Puntarenas. Esta limitación puede afectar la capacidad para detectar cambios sutiles o cambios a corto plazo en la cobertura terrestre, lo que a la vez puede influir en la precisión del análisis y la interpretación de los resultados.

Finalmente, se reconoce que la validación de los resultados puede ser un desafío, específicamente la falta de datos de campo o información de referencia precisa puede afectar la confiabilidad de los resultados y la interpretación de estos. Es necesario tener en cuenta estas posibles limitaciones durante el desarrollo de la investigación, implementando medidas de control de calidad y tomando precauciones adicionales para mitigar su impacto en la validez y fiabilidad de los resultados.

CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 LOS MANGLARES Y SU IMPORTANCIA ECOLÓGICA, ECONÓMICA Y SOCIAL

Los manglares representan ecosistemas costeros de gran biodiversidad que se desarrollan en las zonas intermareales de las regiones tropicales y subtropicales. Estos constituyen una interfaz crítica entre los ecosistemas terrestres y marinos, caracterizados por la presencia de árboles y arbustos que se adaptan a condiciones de alta salinidad, inundación periódica y suelos anóxicos (Lee *et al.*, 2014). En esta sección se profundiza en la complejidad de los manglares, su relevancia para el equilibrio ambiental y las estrategias necesarias para su conservación.

La estructura y la funcionalidad diversa de los manglares les confieren un alto valor ecológico. Sirven como hábitats esenciales para una amplia gama de especies marinas y terrestres, lo que incluye peces, aves, mamíferos y crustáceos. Además, proporcionan servicios ecosistémicos fundamentales, como la protección costera contra la erosión y las tormentas, la filtración de contaminantes, el almacenamiento de carbono y la provisión de recursos naturales para las comunidades locales (Vides *et al.*, 2012).

A pesar de su importancia, los manglares enfrentan numerosas amenazas, principalmente de origen antropogénico. La deforestación, la transformación para la agricultura y la acuicultura, la urbanización descontrolada, la contaminación y el cambio climático son algunas de las principales causas de su pérdida y degradación en el ámbito mundial (Blanco, 2022). Estas presiones ejercen un impacto significativo en la capacidad de los manglares para adaptarse y sobrevivir a largo plazo (Barnes, 2022).

Para abordar estas amenazas, se requiere una combinación de medidas de protección, restauración y gestión sostenible. Las estrategias efectivas de conservación y manejo incluyen la creación y gestión de áreas protegidas, la promoción de prácticas de uso sostenible de los recursos naturales, la restauración de hábitats degradados, la educación ambiental y la participación comunitaria en la toma de decisiones (Sinac, 2019). La colaboración entre diferentes actores, lo que incluye gobiernos, organizaciones no gubernamentales y comunidades locales, es fundamental para garantizar la preservación de estos valiosos ecosistemas para las generaciones futuras.

2.2 LA TELEDETECCIÓN Y EL ANÁLISIS ESPACIAL

La teledetección, un método no invasivo y remoto, ha emergido como una herramienta vital para el monitoreo y estudio de los manglares a escala global. Mediante sensores remotos como satélites, aviones y drones, se logra capturar datos precisos sobre la cobertura terrestre, la dinámica temporal y los cambios en los ecosistemas de manglares (Chuvieco, 2010). Entre estos destacan el programa Landsat de la NASA, el satélite SPOT francés, los satélites meteorológicos y el programa Sentinel de la Agencia Espacial Europea.

Estos sensores registran información en diversas longitudes de onda del espectro electromagnético, abarcando, desde la luz visible hasta el infrarrojo térmico (Lillesand *et al.*, 2015). Esto permite caracterizar la superficie terrestre y en específico los manglares según sus propiedades espectrales, espaciales y temporales (Torres, 2022).

Las imágenes resultantes se procesan y analizan utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes, lo que facilita la recolecta de información sobre características como la vegetación, el agua y el suelo (Campbell y Wynne, 2007). Además, se emplean para cartografiar la distribución de los manglares, monitorear cambios en su extensión y estructura y evaluar su salud y estado de degradación (Giri *et al.*, 2011).

Entre las aplicaciones específicas de la teledetección en manglares se incluye la clasificación de las coberturas, la estimación de la biomasa vegetal, la detección de cambios en la cobertura terrestre y la evaluación de la salud del ecosistema. Estas aplicaciones proporcionan información valiosa para la gestión y conservación de los manglares, lo que permite la identificación de áreas prioritarias para la protección y restauración (Fatoyinbo *et al.*, 2008).

Para Longley *et al.* (2015), el análisis espacial complementa la teledetección al integrar y analizar datos geoespaciales mediante técnicas como la clasificación supervisada y no supervisada, análisis estadísticos y modelos de simulación. En la teledetección de manglares, se usan índices espectrales como el NDVI y el NDWI para determinar vegetación y cuerpos de agua con alta precisión, sin olvidar el MVI, que es el índice específico para detectar manglares que crearon Baloloy *et al.* (2020), entre muchos otros índices existentes. Estas técnicas avanzadas permiten diferenciar y categorizar diferentes clases de cobertura terrestre, lo que facilita la interpretación y análisis de los datos teledetectados.

Estas herramientas se utilizan para realizar tareas como la segmentación de imágenes, la extracción de características y la modelización de procesos espaciales. En el contexto de los manglares, el análisis espacial se emplea para identificar patrones de cambio, evaluar la conectividad del hábitat y predecir la distribución futura de los manglares como respuesta a cambios ambientales y humanos (Pontius Jr. *et al.*, 2008).

Para llevar a cabo el análisis de imágenes de teledetección y el procesamiento de datos espaciales, se utilizan diversas herramientas y *software* especializado. Entre estos se incluyen los programas de sistemas de información geográfica (SIG) como ArcGIS, QGIS y ENVI, que ofrecen muchas funcionalidades para visualizar, analizar y procesar datos espaciales y de teledetección. Además, existen herramientas específicas para el examen de imágenes satelitales, como Google Earth Engine (GEE) y SNAP, que permiten el acceso y la manipulación eficiente de grandes volúmenes de datos de teledetección (Ehlers *et al.*, 1991).

La teledetección y el análisis espacial representan herramientas poderosas para el estudio de los manglares, lo que proporciona información detallada sobre su distribución, estructura y dinámica a través del tiempo. Al combinar datos teledetectados con análisis espaciales, las personas investigadoras pueden obtener una comprensión más completa de los manglares y su papel en los ecosistemas costeros. Estas herramientas son fundamentales para la gestión y conservación efectiva de los manglares en un contexto de cambio ambiental y humano.

2.3 CAMBIOS EN LA COBERTURA DE LA TIERRA Y DINÁMICA TERRITORIAL EN LOS MANGLARES DE PUNTARENAS: ANÁLISIS HISTÓRICO Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El área de estudio se encuentra dentro del golfo de Nicoya, que es uno de los estuarios más extensos de Centroamérica. Abarca unos 80 km, desde la desembocadura del río Tempisque hasta una línea entre Cabo Blanco y Punta Judas y tiene una superficie de 1530 km² (Wolff *et al.*, 1998). Los manglares del golfo de Nicoya son más densos, pero de menor tamaño que los del Caribe y el Pacífico central de Costa Rica (Cifuentes *et al.*, 2014). Aunque ocupan solo el 1 % del área del golfo, los manglares proporcionan el 76 % de la biomasa del sistema, destacando su importancia ecológica (Sinac, 2019).

El estudio de los cambios en la cobertura de la tierra y la dinámica territorial en los manglares de Puntarenas ofrece una comprensión sobre cómo los procesos antrópicos han moldeado este ecosistema costero a través del tiempo. Este apartado se centra en realizar un análisis de las transformaciones de cobertura de la tierra, identificar los agentes de cambio clave de estas transformaciones y proyectar posibles tendencias futuras, abordando los desafíos y oportunidades para la gestión sostenible de los manglares.

Según Torres (2018), el análisis multitemporal de la evolución de la cobertura terrestre en los manglares de Puntarenas revela transformaciones significativas en el tiempo. Se observa una marcada merma en la extensión de los manglares debido a la expansión urbana y la conversión agrícola en las últimas décadas, principalmente de la caña de azúcar. La investigación de García y Martínez (2020) destaca la pérdida del hábitat natural por la deforestación y la actividad humana no regulada en la región.

El monitoreo de los manglares de Puntarenas implica el uso de imágenes satelitales y datos de teledetección para identificar cambios en la cobertura del suelo. Se emplean técnicas de clasificación de imágenes para mapear coberturas terrestres, como manglares y áreas urbanas, agrícolas y acuícolas. Índices espectrales como NDVI y NDWI se utilizan para evaluar la salud y distribución de la vegetación y el agua. Estos datos se analizan en sistemas de información geográfica para entender las modificaciones a través del tiempo. Modelos de simulación y análisis estadístico ayudan a predecir patrones futuros y valorar el impacto del desarrollo en los manglares (Sinac, 2018).

Los cambios en la cobertura de la tierra en los manglares de Puntarenas tienen importantes repercusiones socioeconómicas y ambientales en el ámbito local y regional. La pérdida del hábitat natural y la degradación de los servicios ecosistémicos afectan directamente a las comunidades locales que dependen de los manglares para su sustento. Además, la disminución de la biodiversidad y la pérdida de servicios ambientales, como la protección contra inundaciones y la filtración de agua, tienen efectos negativos en la resiliencia de los ecosistemas costeros (Arrieta, 2020).

La fragmentación de los manglares puede tener tres efectos importantes: reducción del área, aumento de los efectos de borde y mayor aislamiento de los fragmentos. El grado de fragmentación

se evalúa con métricas como tamaño del fragmento, número de fragmentos y densidad del borde (Romero-Bermy *et al.*, 2016).

Recientemente, estudios han abordado la conectividad, fragmentación y configuración de los manglares, esto muestra su influencia en servicios ecosistémicos como flujos de nutrientes y calidad del agua. Estrategias para mitigar la fragmentación incluyen mantener o aumentar la conectividad entre los fragmentos. Entender estas dinámicas puede guiar hacia mejores prácticas de gestión territorial y conservación de los manglares en Costa Rica (Hernández *et al.*, 2018).

El futuro de los manglares de Puntarenas está marcado por una serie de desafíos y oportunidades para la gestión sostenible de estos valiosos ecosistemas costeros. Es necesario implementar políticas integradas de manejo ambiental que promuevan la conservación de los manglares y mitiguen los impactos negativos del desarrollo humano (FAO, 2019). Además, se requiere una mayor colaboración entre los actores gubernamentales, la sociedad civil y el sector privado para abordar eficazmente las amenazas emergentes y garantizar la preservación de los manglares para las generaciones futuras (PNUD, 2020).

El análisis de los cambios en la cobertura del suelo y la dinámica territorial en los manglares de Puntarenas es vital para comprender la interacción entre los procesos naturales y humanos en este ecosistema costero. Al evaluar las transformaciones históricas y las implicaciones socioeconómicas y ambientales asociadas, se obtiene una perspectiva integral de la dinámica de este ecosistema. Esta comprensión es esencial para la formulación de políticas y estrategias de gestión efectivas, que promuevan la conservación de los manglares y fomenten un desarrollo sostenible a largo plazo en la región.

2.4 IMPACTOS AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICOS POR LA PÉRDIDA DE MANGLARES

Este apartado analiza los impactos ambientales y socioeconómicos de la deforestación de manglares, así como los desafíos y las perspectivas para su conservación y desarrollo sostenible en la zona.

La deforestación de manglares tiene graves consecuencias para el ambiente local y regional. Según estudios de Conabio (2022), la pérdida del hábitat provoca una notable disminución en la

biodiversidad, lo que afecta a especies de flora y fauna que dependen de los manglares para sobrevivir. Además, la degradación de estos ecosistemas reduce su capacidad para brindar servicios ambientales esenciales, como la obtención de carbono, la protección contra la erosión costera, la purificación del agua y la mitigación del cambio climático.

La deforestación de manglares también tiene repercusiones socioeconómicas significativas para las comunidades locales y regionales. Según los datos del Sinac (2018), la pérdida de manglares disminuye las oportunidades de sustento para las poblaciones costeras que dependen de estos ecosistemas para la pesca, el turismo y la agricultura. Además, la pérdida de manglares puede aumentar la vulnerabilidad de estas comunidades ante eventos climáticos extremos, como tormentas e inundaciones.

La conservación de los manglares enfrenta diversos desafíos que deben abordarse para garantizar su sostenibilidad a largo plazo. Uno de los principales retos es la falta de cumplimiento y aplicación efectiva de las leyes y regulaciones ambientales destinadas a proteger los manglares. Además, la continua presión sobre los manglares debido al desarrollo urbano, la agricultura y la acuicultura plantean desafíos adicionales para su conservación (Alongi, 2002).

A pesar de estos desafíos existen perspectivas alentadoras para la conservación y el desarrollo sostenible de los manglares en la región de Puntarenas. La implementación de estrategias de manejo integrado de recursos naturales, que involucre a las comunidades locales en la toma de decisiones y la gestión de los manglares puede ayudar a mitigar los impactos negativos de la deforestación y promover la resiliencia de estos ecosistemas. Además, el reconocimiento del valor económico y ecológico de los manglares puede fomentar la adopción de políticas y programas de conservación más efectivos en el ámbito local, nacional e internacional (ELAW, 2024).

La comprensión de los impactos ambientales y socioeconómicos de la pérdida de manglares en la región de Puntarenas es esencial para la formulación de políticas y acciones de conservación efectivas. La conservación y el manejo sostenible de los manglares requieren un enfoque integrado que considere los aspectos ambientales y socioeconómicos y que involucre a las partes interesadas en la toma de decisiones.

2.5 MARCO LEGAL Y POLÍTICO DE LA CONSERVACIÓN DE MANGLARES

El marco legal y político desempeña un papel importante en la conservación y manejo sostenible de los manglares en Puntarenas. En esta sección se mencionan las principales leyes, políticas y estrategias de gestión en el ámbito nacional e internacional que influyen en la protección y manejo de estos valiosos ecosistemas (Minae, 2024).

Costa Rica cuenta con legislación ambiental que protege los humedales y manglares del país. Entre las leyes más importantes se encuentra la Ley de Conservación de la Vida Silvestre (Ley n.º 7317), la cual promueve la conservación de la flora y fauna. La Ley Forestal (Ley n.º 7575) que establece el manejo sostenible de los bosques, la Ley de Biodiversidad (Ley n.º 7788) y la Ley Orgánica del Ambiente (Ley n.º 7554), que dan marcos generales para proteger la biodiversidad y el ambiente (SCIJ, 2024).

El Decreto Ejecutivo n.º 23214-MIRENEM y la Política Nacional de Humedales 2017-2030 son fundamentales para la declaración y regulación de la protección de los humedales. La Ley de Aguas (Ley n.º 276) regula el uso, cobertura y protección de los recursos hídricos del país. Además, el Decreto Ejecutivo n.º 33601-MINAE y el Reglamento de manejo de Humedales (Decreto Ejecutivo n.º 35803-MINAE) establecen directrices específicas para la gestión y conservación de los manglares (Sinac, 2024), destacando el Decreto Ejecutivo n.º 29277-MINAE, el cual declara Área Silvestre Protegida al Humedal Estero de Puntarenas, así ratificado en el Resumen Ejecutivo del Plan de Manejo Humedal Estero Puntarenas y Manglares Asociados R-SINAC-CONAC-032-2019.

Costa Rica también firmó el Convenio Ramsar, tratado internacional dedicado a la conservación de los humedales. Además, el país cuenta con la Política Nacional de cambio climático y el programa de pago por servicios Ambientales (PSA), que apoya la gestión sostenible de los recursos naturales.

Aparte del marco legal y regulatorio existente, también hay dos instituciones enfocadas en la administración y protección de los recursos naturales, como el Ministerio de Ambiente y Energía (Minae) y el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (Sinac), las principales instituciones que se encargan de implementar y supervisar estas leyes y políticas ambientales. Estas instituciones trabajan en colaboración con organizaciones no gubernamentales y académicas para asegurar la protección efectiva de los ecosistemas críticos de humedales y manglares en Costa Rica.

En el ámbito específico de Puntarenas se proponen acciones y estrategias adicionales, como la implementación de un Plan de Manejo del Humedal y Estero de Puntarenas, destinado a identificar las necesidades y desafíos particulares de este ecosistema.

En resumen, el marco legal y las medidas evidencian el compromiso del país con la protección y conservación de los manglares y esteros, asegurando su relevancia ecológica y su contribución al bienestar humano y ambiental en la región de Puntarenas. Pero, ante las evidencias y denuncias de estos ecosistemas tan frágiles, parece que todas estas regulaciones son insuficientes.

2.6 GESTIÓN AMBIENTAL Y PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

La gestión ambiental y la planificación territorial son pilares primordiales para la conservación y manejo sostenible de los manglares en Puntarenas y están completamente ligados al marco legal vigente, ya que estas estrategias se centran en la protección, restauración y uso sostenible de los recursos naturales, considerando tanto los aspectos ambientales como socioeconómicos para garantizar un desarrollo equitativo y resiliente.

Las estrategias de gestión ambiental para la conservación de los manglares abarcan una variedad de acciones que buscan mitigar las amenazas y presiones sobre estos ecosistemas. Una de las estrategias clave es la creación de áreas protegidas. La designación de áreas protegidas, como reservas naturales y parques nacionales, es una herramienta fundamental para la conservación de los manglares (Sinac, 2024). Estas áreas proporcionan un refugio seguro para la flora y fauna, promueven la regeneración natural y reducen la presión de actividades humanas como la tala y la urbanización (Minae, 2024), tal como lo procura el Decreto Ejecutivo n.º 29277-MINAE que delimita el Humedal del Estero de Puntarenas y Manglares asociados como zona de protección (SCIJ, 2024).

Otra estrategia importante es el monitoreo y seguimiento. La implementación de programas de monitoreo continuo es esencial para evaluar el estado de los manglares y detectar cambios en su cobertura, biodiversidad y calidad ambiental. El monitoreo regular permite identificar amenazas emergentes y valorar la efectividad de las medidas de conservación, lo que facilita la toma de decisiones informada (Sinac, 2024).

La restauración ecológica también es una estrategia clave. La restauración de manglares degradados o destruidos es necesaria para recuperar la función y biodiversidad de estos ecosistemas. Mediante la replantación de especies nativas y la restauración de hábitats, se puede mejorar la resiliencia de los manglares frente a amenazas como la erosión costera y el cambio climático, estrategia que ya aplica el Catie (2022) en la zona del manglar de Puntarenas.

La participación comunitaria desempeña un papel decisivo en el éxito de las estrategias de gestión ambiental (Oikonos, 2023). Involucrar a las comunidades locales en la toma de decisiones, la implementación de los proyectos y la vigilancia de áreas protegidas promueve un sentido de pertenencia y responsabilidad compartida hacia la conservación de los manglares.

Por último, el uso de sistemas de información geográfica (SIG), teledetección, modelización ambiental y herramientas participativas facilitan el monitoreo espacial, la identificación de áreas prioritarias y la evaluación de escenarios futuros, contribuyendo a una gestión más eficiente y adaptativa de los manglares (Lao Ramos y Peláez Hernández, 2018).

2.7 CAMBIO CLIMÁTICO Y RESILIENCIA COSTERA

Esta sección explora cómo el cambio climático afecta los manglares y de qué forma estos ecosistemas pueden contribuir a la resiliencia costera frente a sus impactos. Lo anterior se debe a que esto representa una amenaza significativa para los manglares de Puntarenas y su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos clave y, en general, simboliza una amenaza para todos los ecosistemas del mundo (Ellison y Stoddart, 1991).

El cambio climático está lo que causa transformaciones ambientales que afectan directamente a los manglares. Entre los impactos más significativos está el aumento del nivel del mar por la expansión térmica de los océanos y el derretimiento de los glaciares. Esto puede inundar los manglares costeros, alterando su distribución y salud (Alongi, 2002).

Además, el cambio climático está incrementando la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, como huracanes y tormentas tropicales, que pueden dañar directamente a los manglares. La absorción de dióxido de carbono (CO₂) por los océanos provoca la acidificación del agua, lo que afecta negativamente a los organismos marinos que forman parte de los manglares, como moluscos y crustáceos (Ellison y Stoddart, 1991).

A pesar de estos desafíos, los manglares pueden contribuir a la resiliencia costera frente al cambio climático. Estos actúan como barreras naturales contra la erosión estabilizan el suelo y reducen la fuerza del oleaje, previniendo la pérdida de tierra y la intrusión salina (CAF, 2023). Además, capturan y almacenan grandes cantidades de carbono, lo que ayuda a mitigar el cambio climático. Asimismo, los manglares albergan una gran diversidad de especies adaptadas a condiciones extremas, lo que proporciona resiliencia natural y mantiene su funcionalidad ecológica (Montes de Oca, 2022).

Para asegurar la supervivencia de los manglares frente al cambio climático, es esencial implementar estrategias de adaptación y mitigación. Una medida clave es la restauración y conservación de manglares, lo que incluye proteger las áreas existentes y rehabilitar las degradadas o destruidas (Catie, 2022).

El ordenamiento territorial que considera el cambio climático es vital para reducir los riesgos de pérdida de manglares y degradación costera. Esto implica identificar y proteger áreas críticas y regular actividades humanas que aumentan la vulnerabilidad de las costas (Sinac, 2024).

Fomentar la consciencia pública sobre la importancia de los manglares y su papel en la adaptación al cambio climático es crucial. Involucrar a las comunidades locales en la toma de decisiones y en la implementación de acciones de adaptación es esencial para el éxito a largo plazo (Oikonos, 2023).

El cambio climático representa una amenaza significativa para los manglares del mundo. Pero, también ofrece oportunidades para fortalecer su resiliencia y contribuir a la adaptación de las comunidades costeras (UNEP, 2023). Al implementar estrategias de conservación, restauración y adaptación, Costa Rica puede proteger estos valiosos ecosistemas y aprovechar sus beneficios para las generaciones futuras (Sinac, 2024).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Los manglares son ecosistemas costeros esenciales que brindan numerosos beneficios ecológicos, económicos y sociales. Sin embargo, enfrentan amenazas significativas, principalmente de origen antrópico, como la deforestación, la acuicultura, la urbanización y el cambio climático. La conservación y el manejo sostenible de estos ecosistemas requieren estrategias integrales que consideren tanto las dimensiones ambientales como socioeconómicas.

Esta investigación busca analizar la dinámica de la cobertura del manglar en el estero de Puntarenas y las coberturas asociados durante 50 años (1974-2024), utilizando imágenes satelitales de Landsat 1², 5, 7 y 8. La metodología propuesta se basa en el análisis de series temporales de imágenes satelitales cada 5 años, la aplicación de índices espectrales como NDVI, SAVI, NDWI, MNDWI y MVI y el uso de métodos de clasificación supervisada mediante el algoritmo de Máquinas de Vectores de Soporte (SVM).

Este trabajo sigue lo descrito por Olofsson *et al.* (2014) que establece que una evaluación robusta de la exactitud temática de los mapas de cobertura de suelo requiere diseño de muestreo, diseño de respuesta y diseño de análisis, tal como se describe a continuación. El diseño de muestreo establece cómo se eligen las ubicaciones para obtener datos de referencia, preferiblemente mediante métodos probabilísticos como aleatorio simple, sistemático o estratificado con conglomerados. Este protocolo especifica el tamaño y la ubicación de las muestras, así como las unidades de evaluación (como píxeles o bloques de imágenes).

El diseño de respuesta define los protocolos para determinar clases de referencia y compararlas con clases de mapas, usando datos de alta calidad como los recolectados en campo o mediante sensores remotos de alta resolución. Este se enfoca en asegurar consistencia y compatibilidad en las definiciones y la interpretación de los datos.

El diseño de análisis emplea estimadores estadísticos y procedimientos para estimar y reportar la precisión con base en el diseño de muestreo. Se utilizan para comparar mapas con datos de

² Se configuró la salida a 30m de píxel para normalizar con el resto de los sensores utilizados y se apoyó de imágenes aéreas de la época además de hojas topográficas para afinar los resultados.

referencia, lo que genera estimaciones como matrices de error, exactitud por clase (errores de comisión y omisión) y cambios en áreas, complementados con intervalos de confianza y varianzas.

Para este trabajo se utiliza un muestreo aleatorio para seleccionar ubicaciones de datos de referencia. El diseño de respuesta compara clases del mapa con datos de alta calidad, usando imágenes Landsat categorizadas según el IPCC y el diseño de análisis emplea procedimientos estadísticos para estimar la precisión, lo que incluye matrices de error, índice Kappa y matrices de cambio.

La investigación se fundamenta en estudios previos que han demostrado la efectividad de la teledetección para el mapeo de la cobertura terrestre y el análisis de cambios en la cobertura, destacando el trabajo de Torres (2022) como fuente. Además, se consideran las investigaciones de Uriarte y Orozco (2019), Perea *et al.* (2019), Cifuentes *et al.* (2014), Poveda *et al.* (2022), Unriza (2022) y Pauca *et al.* (2020), quienes coinciden en el uso de la teledetección para clasificar coberturas mediante series temporales.

Los resultados de esta investigación proporcionan mapas de cambios en la cobertura, mapas de transición de ganancia y pérdida de manglar, matrices de cambio y un visor web para la visualización y análisis de los resultados. Esto contribuye a la comprensión de la dinámica del manglar de Puntarenas a lo largo de 50 años y a la identificación de áreas prioritarias para la conservación y el manejo sostenible de este ecosistema.

El mapeo se concentró en el área de manejo que circunscribe la delimitación realizada por el Minae en su Decreto Ejecutivo n.º 29277, por lo que se creó un área de influencia de 1 km a su alrededor para realizar todos los procesos siguientes y, de esta forma, analizar los cambios de cobertura en áreas de manglar que posean influencia directa con el área silvestre protegida, tomando en cuenta que el manglar históricamente desde 1945 no se ha extendido más allá de 1 km “tierra adentro” (Cifuentes *et al.*, 2014).

La investigación se desarrolló en tres etapas principales: preprocesamiento, procesamiento y producción cartográfica. En la etapa de preprocesamiento, se seleccionaron las imágenes satelitales, se descargaron de la plataforma *Earth Explorer* administrada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y se les aplicaron las correcciones necesarias. En la etapa de procesamiento, se

calcularon los índices de vegetación, se aplicó el método de clasificación supervisada, se validaron los resultados mediante matrices de confusión y se analizaron los cambios en la cobertura de la tierra por medio de matrices de transición. En la etapa de producción cartográfica, se elaboró la cartografía temática y un visor web donde se exponen los resultados.

Se espera que esta investigación proporcione información valiosa para la gestión y conservación del manglar de Puntarenas, tanto para el gobierno local como para las entidades de gestión y conservación de los recursos naturales de Costa Rica, contribuyendo al desarrollo de estrategias sostenibles para la protección de este ecosistema vital.

DESGLOSE DE ETAPAS METODOLÓGICAS SEGÚN ACTIVIDADES		
ETAPA	PROCESO	ACTIVIDADES
Etapa 1	Preprocesamiento de imágenes	Elección de imágenes Landsat Descarga de imágenes en plataforma Earth Explorer Corrección de imágenes
Etapa 2	Procesamiento de imágenes	Generación de índices espectrales Creación de áreas de entrenamiento Aplicación de clasificación supervisada (algoritmo SVM) Validación de resultados (matriz de confusión e índice Kappa) Creación de matrices de cambios
Etapa 3	Elaboración de cartografía temática	Creación de mapas de usos de la tierra Creación de gráficos de pérdida y ganancia de manglar Creación de mapas de cambios de manglar Creación de story maps para exponer resultados

Figura 1. Etapas del proceso metodológico. Fuente: Elaboración Propia

3.1 DESCARGA DE IMÁGENES

En este proceso se obtuvo los insumos principales de la investigación, que consisten en imágenes Landsat para los periodos de 1974 a 2024. Estas imágenes se descargaron desde la plataforma *Earth Explorer*, administrada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). La distribución de los años de descarga para cada programa es la siguiente: del *Earth Resources Technology Satellite 1* (ERTS-1), posteriormente denominado Landsat 1, se utilizaron imágenes de 1974 y 1979; de Landsat 5, de 1989, 1994 y 1999 y de Landsat 8, de 2014, 2019 y 2024. A continuación, se presentan las características primordiales de cada programa Landsat y el listado de imágenes que se utilizan.

SENSOR	INSTRUMENTOS PRINCIPALES	BANDAS ESPECTRALES	MICRÓMETROS DE CADA BANDA	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA	COBERTURA DE IMÁGENES	PERIODICIDAD
LANDSAT 1, 2 y 3	Multispectral Scanner System (MSS) Return Beam Vidicon (RBV)	4 bandas	Verde: 0.5-0.6	79 metros por píxel	6 bits	185 km x 185 km (34,225 km ²)	Revisita: 18 días
			Rojo: 0.6-0.7				
			Infrarrojo cercano: 0.7-0.8				
			Infrarrojo medio: 0.8-1.1				
LANDSAT 4 y 5	Thematic Mapper (TM)	7 bandas	Azul: 0.45-0.52	30 metros por píxel (excepto térmica: 120 metros)	8 bits	185 km x 185 km (34,225 km ²)	Revisita: 16 días
			Verde: 0.52-0.60				
			Rojo: 0.63-0.69				
			Infrarrojo cercano: 0.76-0.90				
	Multispectral Scanner (MSS)	4 bandas	Infrarrojo medio: 1.55-1.75	79 metros por píxel	6 bits		
			Térmico: 10.4-12.5				
			Verde: 0.5-0.6				
			Rojo: 0.6-0.7				
LANDSAT 8 y 9	Operational Land Imager (OLI) (LANDSAT8) y OLI-2 (LANDSAT9)	9 bandas	Ultravioleta: 0.43-0.45	30 metros por píxel para bandas espectrales, 15 metros para pancromática	16 bits	185 km x 185 km (34,225 km ²)	Revisita: 16 días
			Azul: 0.45-0.51				
			Verde: 0.53-0.59				
			Rojo: 0.64-0.67				
			Infrarrojo cercano: 0.85-0.88				
			Infrarrojo medio: 1.57-1.65				
			SWIR: 2.11-2.29				
	Pancromática: 0.50-0.68						
	Thermal Infrared Sensor (TIRS) (LANDSAT8) y TIRS-2 (LANDSAT9)	2 bandas	TIRS 1: infrarrojo medio 10.6-11.19	100 metros por píxel			
			TIRS 2: infrarrojo medio 11.5-12.51				

Figura 2. Características de los programas LANDSAT. Fuente: Autor a partir de información de NASA, 2024.

SENSOR	INSTRUMENTO	AÑO	IDENTIFICADOR
LANDSAT 1	MSS	1974	LM01_L1TP_016053_19740317_20200909_02_T2
LANDSAT 2	MSS	1979	LM02_L1TP_016053_19790123_20200906_02_T2
LANDSAT 5	TM	1989	LT05_L2SP_015053_19891231_20240116_02_T1
		1994	LT05_L1TP_015053_19940111_20230523_02_T1
		1999	LT05_L1TP_016053_19990406_20240112_02_T1
LANDSAT 8	OLI	2014	LC08_L1TP_016053_20141125_20200910_02_T1
		2019	LC08_L1TP_016053_20191225_20200824_02_T1
		2024	LC08_L1TP_016053_20240105_20240112_02_T1

Figura 3. Listado de imágenes satelitales utilizadas en la investigación. Fuente: Elaboración propia.

3.2 CORRECCIÓN DE IMÁGENES

La segunda etapa de la investigación consiste en el procesamiento de imágenes, donde se aplican correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas que se requieran. Dentro de la que destaca la corrección atmosférica se enfoca en eliminar nubes y efectos aerosol de la imagen, mejorando la separabilidad espectral de los objetos (Cabrera *et al.*, 2011).

Se utilizó el *software* QGIS 3.30.0 con el Plugin SCP (Semi-Automatic Classification) para el procesamiento digital de las imágenes. La normalización atmosférica de todas las imágenes Landsat se realizó empleando el método DOS1 (Dark Object Subtraction) (Perea *et al.*, 2019) propuesto por Chávez (1996) y parametrizado por Sobrino *et al.* (2004).

Por otro lado, la corrección geométrica aborda los desplazamientos y distorsiones causados por la inclinación del sensor y otros factores (Rodríguez, 2011), mientras que la corrección radiométrica ajusta los niveles digitales para obtener un histograma similar al de la imagen de referencia (García y Willems, 2015). De esta manera, se normalizan los datos para garantizar la consistencia y se asegura la comparabilidad entre las imágenes.

3.3 ELABORACIÓN DE ÍNDICES ESPECTRALES

Durante esta segunda etapa se aplicó una serie de índices espectrales que sirven como parte de los insumos que contribuyen en el proceso de validación de las clasificaciones supervisadas. A partir de este momento y hasta finalizar la metodología, el procesamiento de la información y los resultados obtenidos, fueron realizados mediante el software ArcGIS Pro 3.3.0. A continuación, se mencionan los índices aplicados y sus respectivas combinaciones de bandas para obtenerlos.

3.3.1 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

Es uno de los índices que más se utilizan y sirve para discriminar la vegetación de otro tipo de cobertura (Manrique, 1999). En este caso es útil para diferenciar la vegetación vigorosa del agua y del suelo desnudo (Rueda *et al.*, 2015).

$$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)}$$

Donde: NDVI = índice de diferencia normalizada

R = banda rojo

NIR = banda infrarrojo cercano

3.3.2 ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO AL SUELO (SAVI)

Este índice se utiliza para diferenciar la información proveniente de la vegetación de la que proviene del suelo subyacente. A diferencia del NDVI clásico, el SAVI permite que dos coberturas vegetales con igual actividad fotosintética, pero sobre suelos diferentes, presenten índices similares, lo que evita la distorsión causada por las variaciones en el suelo. Este índice presenta el valor L que es una constante de ajuste de la influencia del suelo que depende de la cobertura de vegetación y que puede tomar un valor comprendido entre 0 y 1. A menudo, se usa “ $L = 0$ ” para zonas con densidad de vegetación muy alta, “ $L = 0.5$ ” para zonas con densidad de vegetación intermedia y “ $L = 1$ ” para zonas con muy poco recubrimiento vegetal. Cuando “ $L = 0$ ”, el SAVI es igual al NDVI (Muñoz, 2013).

$$SAVI = \frac{((1 + L) * (NIR - R))}{(NIR + R + L)}$$

Donde:

SAVI = índice de vegetación ajustado al suelo

R = banda rojo, NIR = banda infrarrojo cercano.

L = Factor de corrección del brillo de suelo, el cual varía por la cantidad de vegetación verde.

3.3.3 ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDWI)

Es un índice que se utiliza para detectar la presencia y el contenido de agua en áreas de vegetación y cuerpos de agua. Además, ayuda a identificar y monitorear la humedad del suelo, la salud de la vegetación y la extensión de cuerpos de agua, lo que proporciona una herramienta útil en la gestión de recursos hídricos y la agricultura (Villatoro, 2021).

$$NDWI = \frac{(\rho_{Green} - \rho_{NIR})}{(\rho_{Green} + \rho_{NIR})}$$

Donde:

NDWI = índice de agua de diferencia normalizada

ρ_{Green} = reflectancia en el verde

ρ_{NIR} = reflectancia en el infrarrojo cercano

3.3.4 ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA MODIFICADO (MNDWI)

Este índice permite aislar los cuerpos de agua de las demás coberturas. Además, es uno de los índices menos sensibles a la influencia de la vegetación o a la presencia de material en suspensión. Entre sus coberturas da la posibilidad de la identificación de masas de agua y zonas con alta saturación de humedad, por lo que se puede medir el estrés hídrico en la vegetación, la saturación de humedad en el suelo y delimitar masas de agua, como lagos y embalses (Da Silva, Insaurralde y Cardozo, 2014).

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{MIR}}{\rho_{Green} + \rho_{MIR}}$$

Donde:

ρ_{MIR} = corresponde a reflectancia de infrarrojo medio

3.3.5 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE MANGLAR (MVI)

El índice MVI combina las bandas del visible e infrarrojo para medir la probabilidad de que un píxel de la imagen sea un manglar, al extraer la información de verdor y la humedad de las bandas verde, NIR y SWIR1. Esto facilita la detección de cambios en la extensión y salud de los manglares, lo que permite un monitoreo más efectivo de la deforestación, la degradación y los esfuerzos de restauración (Baloloy *et al.*, 2020).

$$MVI = \frac{NIR - V}{SWIR1 - V}$$

Donde:

SWIR1 = corresponde a la banda infrarrojo de onda corta

V = corresponde a la banda verde

3.4 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

La clasificación supervisada es un método de aprendizaje automático que utiliza datos etiquetados para entrenar un modelo, donde cada dato de entrenamiento está asociado con una etiqueta que indica su clase o categoría. El objetivo es que el modelo aprenda, mediante algoritmos, la relación entre las características de los datos y sus etiquetas correspondientes, evidenciando patrones o tendencias, para poder clasificar nuevos datos de forma correcta y sin necesidad de etiquetarlos (IBM, 2024).

La clasificación supervisada es esencial para interpretar y analizar datos espaciales capturados por sensores remotos. Esta técnica combina las capacidades de la teledetección para obtener datos de la Tierra desde el espacio con las herramientas analíticas de los SIG, lo que permite procesar y visualizar estos datos en un contexto geoespacial (Poveda *et al.*, 2022).

En el campo del aprendizaje automático, la clasificación supervisada abarca varios métodos poderosos, destacando la regresión logística, que modela la relación entre variables independientes y una dependiente categórica mediante una función logística. Por otro lado, las máquinas de vectores de soporte (SVM) identifican un hiperplano óptimo que separa las clases en el espacio de características.

Por otro lado, los árboles de decisión dividen el espacio de particularidades en regiones simples con base en reglas de resolución. Además, existe el *random forest* (bosque aleatorio), que es un

conjunto de árboles de decisión que mejora la precisión al promediar los resultados de múltiples árboles. Asimismo, las redes neuronales artificiales, inspiradas en el cerebro humano, se utilizan para problemas complejos y no lineales, como el reconocimiento de imágenes o el procesamiento de lenguaje natural (IBM, 2024).

El método de árboles de decisión (DT), visto como un método independiente utiliza la técnica CART³ para crear diagramas lógicos a partir de una base de datos, dividiendo nodos en dos ramas. Este enfoque complementa otras técnicas estadísticas como la regresión múltiple y el análisis de varianza. Finalmente, la clasificación de Bayes (BC, por sus siglas en inglés), conocida por su simplicidad y rapidez computacional, permite predecir la probabilidad de diferentes resultados con base en el Teorema de Bayes (Poveda *et al.*, 2022).

En síntesis, estos algoritmos de clasificación supervisada permiten medir el cambio de cobertura del suelo, dirigidos a la interpretación de la pérdida o ganancia de cobertura vegetal, que se puede ver reflejada en la fragmentación de bosques, pérdida de biodiversidad, disminución de la conectividad ecológica o, por el contrario, la recuperación a través de la sucesión y la resiliencia ecosistémica (Lozada, 2007).

Para esta investigación, se eligió el método de clasificación de máquinas de vectores de soporte (SVM), un enfoque de clasificación supervisada que se utiliza, tanto para la clasificación como para la regresión (Burges, 1998). El objetivo de las SVM es encontrar el hiperplano óptimo que separa las clases en el espacio de características, maximizando el margen entre ellas. Los vectores de soporte, que son los puntos de datos más cercanos al hiperplano, son fundamentales para definir este margen (Cortes y Vapnik, 1995).

Un hiperplano es una superficie de separación crucial que divide un conjunto de datos multidimensionales en diferentes categorías. Matemáticamente, se representa como $w^T x + b = 0$, donde w es el vector normal al hiperplano y b es el sesgo. La posición de cada dato x con respecto al hiperplano determina su clasificación (Pérez, 2023).

³ El algoritmo CART (por sus siglas en inglés Classification and Regression Trees o árboles de clasificación y regresión), el más usado en la actualidad para implementar árboles de decisión.

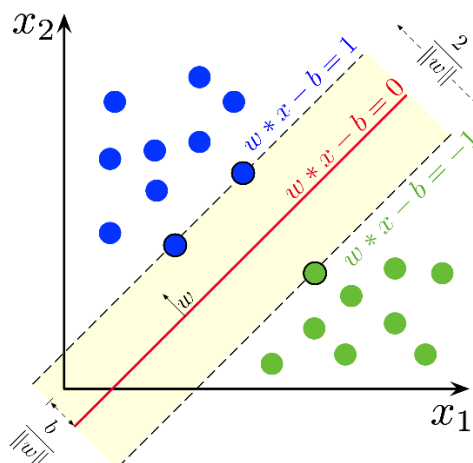


Figura 4. SVM y su hiperplano lineal. Fuente: Torres, A. (2019).

Cuando las clases no son separables de manera lineal, las SVM recurren a técnicas de Kernel, que es una función matemática que calcula el producto escalar entre dos vectores en un espacio de características de alta dimensión, lo cual hace que las SVM sean más flexibles y capaces de gestionar problemas no lineales (Scholkopf y Smola, 2002).

Existen los Kernel lineal, polinómico, radial (RBF) y sigmoideal, que sirven para proyectar los datos a un espacio de mayor dimensión donde un hiperplano lineal pueda separar las clases. Además, las SVM incorporan un parámetro de regularización que busca equilibrar entre maximizar el margen y minimizar los errores de clasificación, lo que ayuda a gestionar el sobreajuste (Vapnik, 1995). En resumen, las SVM representan una técnica poderosa y versátil y son efectivas, tanto en problemas con clases claramente definidas y separables linealmente como en aquellos que requieren separación no lineal (Bishop, 2006).

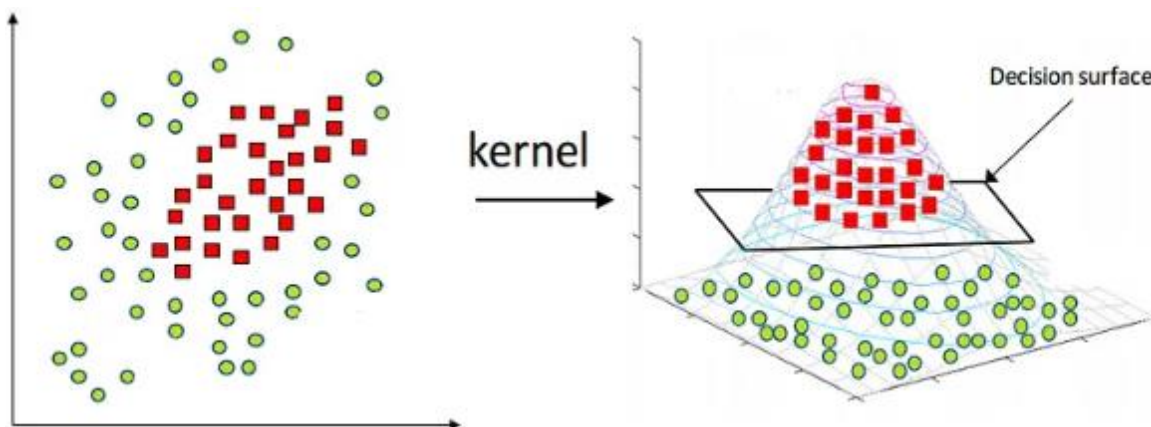


Figura 5. SVM y su hiperplano lineal utilizando Kernel. Fuente: Yadav, S. (2023).

3.4.1 IMAGEN SEGMENTADA

Después del preprocesamiento de las imágenes, se realizó una preparación previa para mejorar la aplicación del método SVM, ya que se usaron como parámetros para resolver mejor el resultado de la clasificación, usando la herramienta *Segmentación de módulo de clasificación de imágenes* de ArcGIS Pro, que agrupa las imágenes compuestas (preferiblemente en RGB) por píxeles vecinos con similitud en color y espectralmente, además del tamaño mínimo de segmentos agrupados en píxeles vecinos con similitud en color y espectro.

La escala de asignación de los detalles espaciales (agrupación por tonalidades de color) y espectrales (agrupación por similitud de las características espectrales) es de 1 a 20, 1 es el de menos peso y 20 el de mayor peso. Por lo tanto, cuanto más valor posean, más compatibilidad espacial o espectral tienen. En esta investigación se utilizó un detalle espectral con valor de 20, un detalle espacial de 19 y una agrupación de 50 píxeles, lo que indica que no habrá segmentos con menos de esa cantidad (9999 es el valor máximo). Lo anterior se decidió por el criterio de experto basado en la prueba y el error.

Con la asignación de los parámetros mencionados se garantiza que la imagen segmentada poseerá la mayor compatibilidad espectral posible y una muy alta compatibilidad en coloración. Además, se agruparán en segmentos no menores que 50 píxeles de 30 m, lo que respalda segmentos no menores que 150 m². Como resultado, se obtiene una imagen con aproximaciones reales de la que puede ser una futura clasificación supervisada y que la herramienta de clasificación utiliza después como una variable auxiliar al aplicar el método SVM.

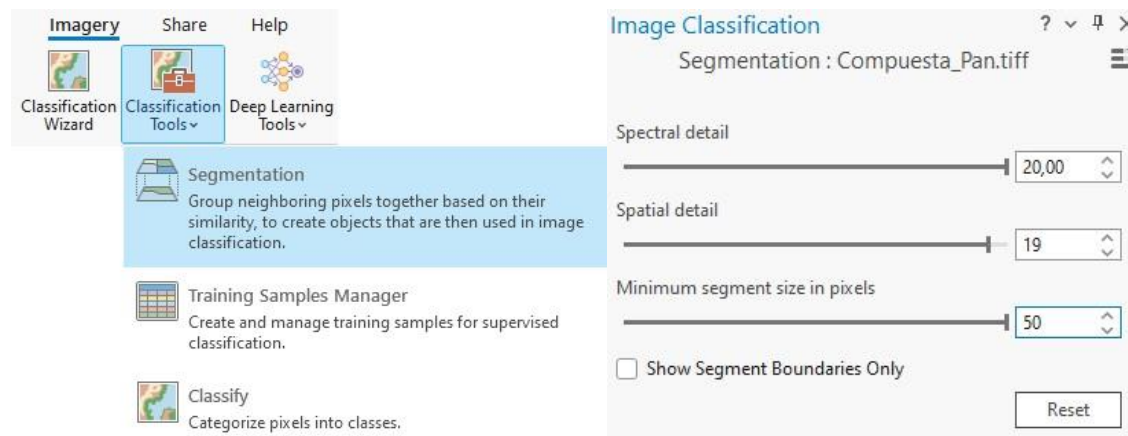


Figura 6. Herramientas para segmentar imágenes en ArcGIS Pro. Fuente: Elaboración Propia.



Figura 7. Imagen segmentada en ArcGIS Pro. Fuente: Elaboración Propia.

3.4.2 ÁREAS DE ENTRENAMIENTO

Este procedimiento es muy importante, ya que eligió las áreas que se le indicaron al clasificador como muestras para considerar áreas similares y las etiquetó como muestras respectivas. Por lo tanto, se debió entrenar al clasificador (SVM) para que asignara píxeles u objetos a una clase determinada utilizando muestras de entrenamiento (ver tabla 1). El esquema de clasificación se determina por su clase, que se define en la asignación de categorías que utiliza el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y que se describe a continuación.

CATEGORÍA IPCC	DESCRIPCIÓN	IMAGEN DE EJEMPLO
Tierras forestales	Incluye tierras con vegetación boscosa según los umbrales del inventario nacional de gases de efecto invernadero. También incluye sistemas cuya vegetación podría alcanzar los umbrales para definir tierras forestales.	
Tierras de cultivo	Incluye tierras cultivadas, arrozales y sistemas de agro-silvicultura cuya vegetación está por debajo de los umbrales de tierras forestales.	
Pastizales	Incluye tierras de pastoreo y pastizales no considerados tierras de cultivo. Incluye vegetación boscosa y no herbórea (hierbas y maleza) bajo los umbrales de tierras forestales, y sistemas silvopastoriles según definiciones nacionales.	
Humedales	Incluye zonas de extracción de turba y tierras cubiertas o saturadas de agua durante todo o parte del año, no incluidas en tierras forestales, de cultivo, pastizales o asentamientos. Incluye reservorios (gestión) y ríos y lagos (no gestionados).	
Asentamientos	Incluye tierra desarrollada, infraestructuras de transporte y asentamientos humanos no incluidos en otras categorías, coherente con las definiciones nacionales.	
Otras tierras	Incluye suelo desnudo, roca, hielo y zonas no incluidas en las otras cinco categorías, asegurando que el total de superficies identificadas coincida con la superficie nacional de la que se tienen datos.	

Figura 8. Descripción de categorías de coberturas de la tierra utilizadas en la clasificación supervisada. Fuente: IPCC (2006).

Con el objetivo de simplificar el etiquetado de las clasificaciones, se renombró la categoría Tierras forestales como Bosques, a las Tierras de cultivos como Cultivos y dentro de la categoría Otras tierras, se decidió incluir de forma separada la categoría Tierras desnudas y la categoría Agua. Lo anterior, con el fin de evidenciar las dos coberturas de la zona de estudio que se necesita evidenciar en la cartografía. Se debe destacar que esta clasificación (IPCC), también se utiliza como categorización para representar los mapas finales. Por lo tanto, a partir de ahora, estas categorías sirven como áreas de entrenamiento, y también como simbología de la cartografía resultante.

Estas categorías forman la base de la estimación y declaración de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero, derivadas del uso de la tierra y de las conversiones de la cobertura de la tierra.

Estas coberturas pueden considerarse como categorías de primer nivel que representan todas las zonas de cobertura de la tierra y se seleccionaron porque son sólidas como base para la estimación de las emisiones y absorciones, aplicables y completas, en el sentido de que todas las superficies de tierra de un país tienen la posibilidad de clasificarse en estas categorías sin que se dupliquen y se aceptan internacionalmente (IPCC, 2006).

Para crear el esquema que asigna las categorías definidas por el IPCC, este se realizó mediante la herramienta del *Administrador de muestras de capacitación* de ArcGIS Pro, que también sirvió para elaborar las áreas de entrenamiento de todas las imágenes compuestas que se clasificaron. Este esquema sirvió de plantilla para los restantes procesos, pero las áreas de entrenamiento aplicadas a cada imagen fueron independientes e individualizadas. Por lo tanto, se eligieron distintas áreas de entrenamiento para cada imagen bajo el mismo esquema.

Entre las ventajas de haber creado una imagen segmentada previamente está que esta también se utilizó como insumo para elegir las muestras por segmentos (sirviendo de banda auxiliar), sin olvidar que también las áreas de entrenamiento se pueden escoger de forma libre creando los polígonos a conveniencia del analista. En este mismo proceso (creación de áreas de entrenamiento) se recolectaron y gestionaron por parte de la herramienta *Administrador de muestras de capacitación* las firmas espectrales de cada área de entrenamiento creada.

AÑO	CATEGORÍA	BOSQUES	PASTOS	CULTIVOS	HUMEDALES	ASENTAMIENTOS	AGUA	TIERRADESNUDA	TOTAL
1974	Cantidad	35	23	15	9	4	25	35	146
	Porcentaje	4,93%	6,93%	8,73%	13,98%	2,65%	43,30%	19,48%	100,00%
1979	Cantidad	28	8	3	6	3	11	22	81
	Porcentaje	4,32%	4,45%	3,02%	18,77%	3,83%	56,54%	9,07%	100,00%
1989	Cantidad	23	34	29	28	13	37	28	192
	Porcentaje	1,19%	6,52%	2,25%	6,80%	4,88%	73,63%	4,73%	100,00%
1994	Cantidad	16	11	16	114	9	14	28	208
	Porcentaje	2,12%	1,17%	11,49%	5,29%	1,47%	73,94%	4,52%	100,00%
1999	Cantidad	35	30	41	114	19	76	47	362
	Porcentaje	3,91%	3,55%	20,66%	12,26%	7,50%	37,21%	14,91%	100,00%
2009	Cantidad	17	11	40	3	14	3	29	117
	Porcentaje	9,94%	2,64%	14,64%	7,48%	1,99%	59,57%	3,74%	100,00%
2014	Cantidad	31	13	16	114	9	14	28	225
	Porcentaje	1,66%	0,74%	2,66%	9,50%	3,58%	77,18%	4,68%	100,00%
2019	Cantidad	43	12	28	98	4	24	35	244
	Porcentaje	2,58%	2,03%	1,84%	15,10%	4,65%	65,14%	8,66%	100,00%
2024	Cantidad	188	68	118	46	46	40	168	674
	Porcentaje	5,65%	1,63%	9,87%	10,82%	2,39%	64,08%	5,56%	100,00%

Tabla 1. Cantidad de firmas espectrales y áreas de entrenamiento utilizadas para clasificar cada imagen. Fuente:

Elaboración Propia.

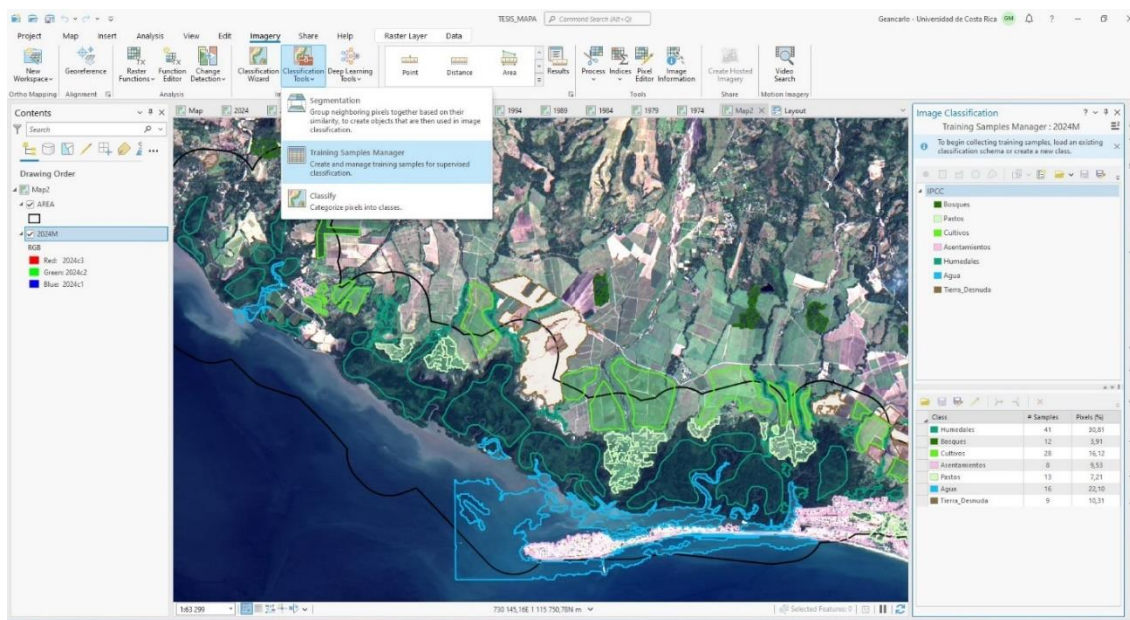


Figura 9. Creación de esquema y áreas de entrenamiento para imagen 2024 en ArcGIS. Fuente: Elaboración Propia.

Las áreas de entrenamiento se guardaron individualmente para que, junto con las imágenes segmentadas, fueran parámetros de clasificación al realizar la clasificación supervisada por el método SVM. Esto se ejecutó con la herramienta *Clasificar* del módulo *Herramientas de clasificación* de ArcGIS Pro. Se estableció un número máximo de muestras por clase con un valor de 500 (valor predeterminado) para garantizar que la imagen segmentada también se tome en cuenta en la clasificación. Además, se siguió la recomendación predeterminada del programa de considerar el valor de cromaticidad (coincidencias en color) y número digital medio (coincidencias espectrales) aprovechando que existe la imagen segmentada como un insumo auxiliar en la clasificación.

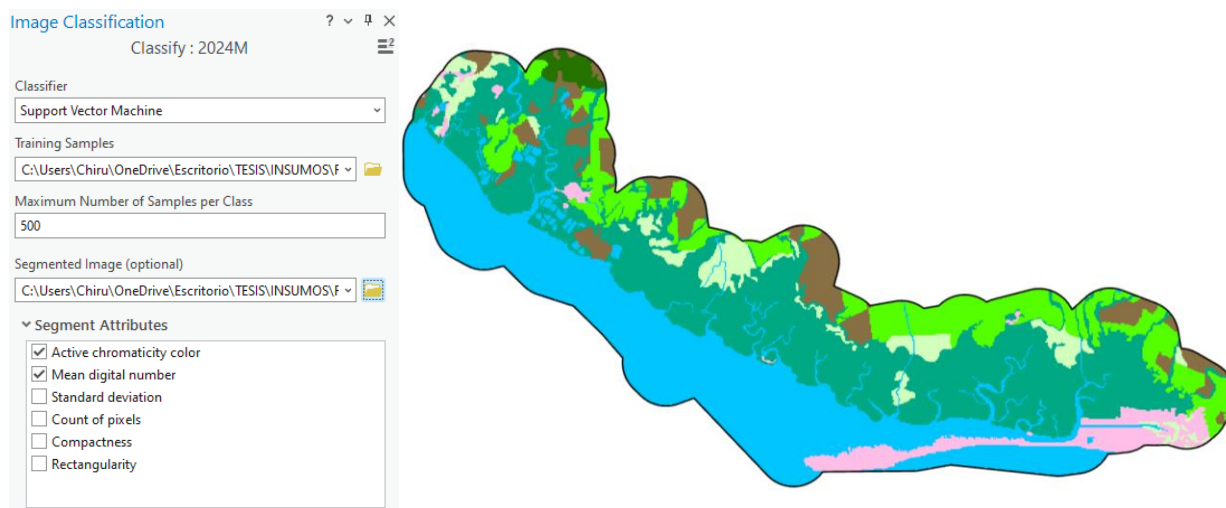


Figura 10. Herramientas para clasificar e imagen clasificada con SVM en ArcGIS Pro. Fuente: Elaboración Propia.

3.5 VALIDACIÓN

El análisis de precisión en la clasificación de datos que se obtienen por sensores remotos es necesario para asegurar la confiabilidad de los resultados. Para esto, se utilizan varias herramientas y métodos, como la matriz de confusión, el índice Kappa y las matrices de cambio. La matriz de desconcierto permite evaluar la exactitud al comparar la clasificación obtenida con las imágenes de referencia (Cohen, 1960). Por otro lado, las matrices de cambio son esenciales en el examen temporal, lo que da la posibilidad de identificar y cuantificar las transiciones entre diferentes clases a través del tiempo, lo cual es esencial para estudios de dinámica de cobertura del suelo y cambio ambiental (Congalton y Green, 1999).

3.5.1 MATRIZ DE CONFUSIÓN E ÍNDICE KAPPA

La matriz de confusión, también llamada matriz de error o tabla de contingencia, es una herramienta primordial para validar las clasificaciones realizadas en imágenes satelitales al compararlas con datos de referencia que se obtienen del terreno. Este proceso minimiza los errores por omisión (aquellos que el modelo no detecta) y por comisión (aquellos que el modelo detecta incorrectamente) (Barrios, 2019). Este es un arreglo tabular que compara la clasificación temática (estimada) con las verdades de terreno (observadas). Muestra la cantidad de píxeles correctamente clasificados (diagonal) y los incorrectamente clasificados en diferentes clases de coberturas.

Los errores de comisión ocurren cuando se asigna incorrectamente un área a una categoría. Por ejemplo, clasificar áreas de bosque como no bosque. Los errores de omisión suceden cuando se excluye un área de su categoría correcta, como clasificar áreas de humedales como no humedales. La exactitud del productor es el porcentaje de verdades de terreno clasificadas correctamente. La precisión del usuario es el porcentaje de píxeles correctamente asignados a la categoría correcta en el mapa. La exactitud global es la proporción total de píxeles clasificados correctamente.

Los totales verdaderos son las verdades de terreno, como puntos de humedales y no humedales extraídos de las imágenes de referencia. Los totales clasificados son los píxeles de bosque y no bosque de las clasificaciones de cobertura. Los correctos representan la diferencia entre los totales verdaderos y los clasificados.

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c}$$

P_o se define como la proporción de concordancia observada realmente.

P_c es la proporción esperada por azar.

j = Columnas (Referencia)

	1	2	K	Total filas N_{j+}
1	N_{11}	N_{12}	N_{1K}	N_{1+}
2	N_{21}	N_{22}	N_{2K}	N_{2+}
K	N_{K1}	N_{K2}	N_{KK}	N_{k+}
Total columnas N_{+1}	N_{+1}	N_{+2}	N_{+k}	N

i = Filas (Clasificación)

Figura 11. Representación básica de la matriz de confusión. Fuente: Elaboración propia, modificado de Congalton et al. (2009).

Además, el índice estadístico Kappa se puede aplicar para evaluar la confianza y precisión de la clasificación, cuantificando la exactitud y articulación entre las diferentes clases. Este índice mide la concordancia entre el mapa clasificado y la realidad física del terreno, lo que proporciona una medida robusta de la calidad del modelo de clasificación (Cruz *et al.*, 2022).

Se utilizó la herramienta *Crear puntos de evaluación de precisión* de ArcGIS Pro, que crea los puntos aleatorios y estratificados dentro del área de estudio, garantizando que se colocan al azar y se ubican proporcionalmente al área de cada cobertura. Luego se validó la columna con los valores del terreno en función de las fuentes primarias y, finalmente, se elaboró la matriz de confusión con la herramienta *Computar matriz de desconcierto* de ArcGIS Pro, que generó el índice Kappa. Todo esto se realiza individualmente para todas las imágenes analizadas.

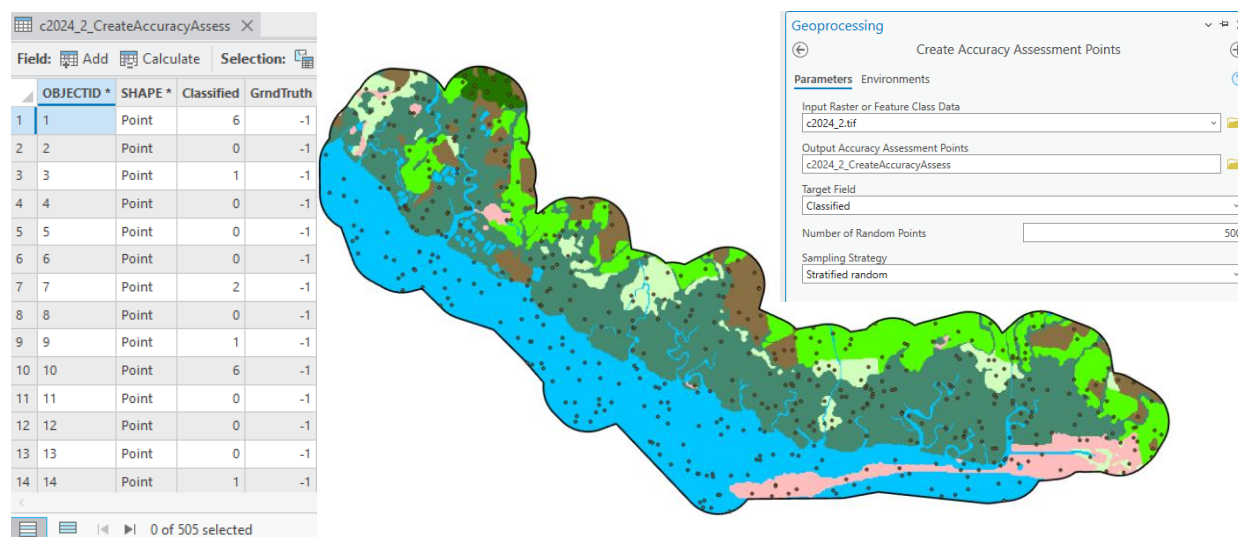


Figura 12. Herramienta para crear puntos aleatorios para clasificar valores de terreno. Fuente: Elaboración Propia.

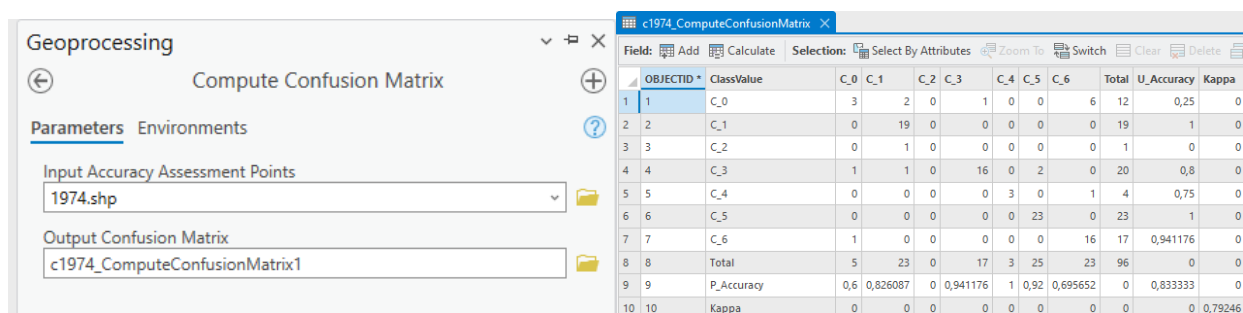


Figura 12. Herramienta para crear matriz de confusión. Fuente: Elaboración Propia.

3.5.2 MATRICES DE CAMBIO

Se procede a aplicar otro elemento de verificación: las matrices de cambio. Estas son una herramienta esencial en el análisis de imágenes satelitales para validar y cuantificar los cambios temporales en el paisaje terrestre. Estas matrices permiten comparar dos o más imágenes capturadas en diferentes momentos y evaluar cómo han evolucionado las características del terreno, como el uso de la tierra, la vegetación o la urbanización (Granja, 2024).

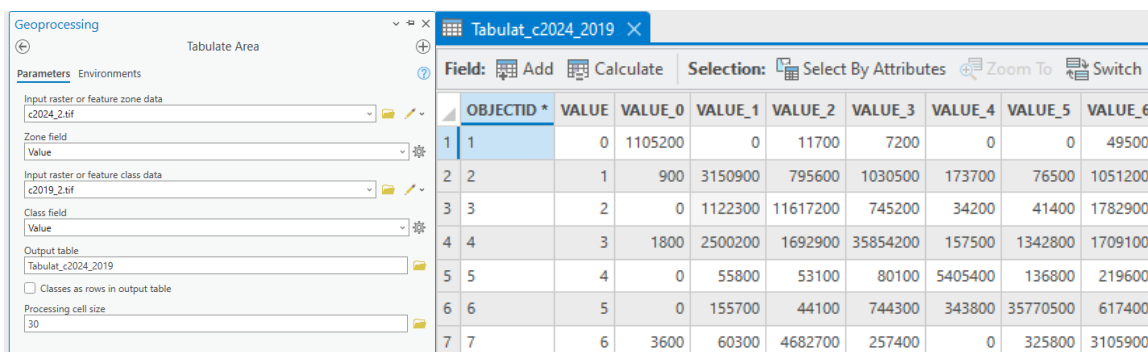
Los análisis multitemporales buscan estimar tres componentes esenciales para comprender la dinámica de las transiciones en la cobertura del suelo o la cobertura de un territorio o paisaje: la dirección, la magnitud y la localización espacial de los cambios. La dirección se refiere a las trayectorias de cambio entre diferentes clases, como el cambio de humedal a pasto o de humedal a agua. La magnitud cuantifica las transiciones en términos absolutos o porcentuales, por ejemplo, indica que 100 ha pasaron de ser humedal a ser pasto. Finalmente, la localización específica espacialmente dónde ocurrieron estas modificaciones en el paisaje. La manera más práctica de visualizar la dirección y la magnitud de los cambios es mediante la matriz de cambios y representarlos posteriormente por medio de la cartografía (Pontius *et al.*, 2004).

PERÍODO 1	PERÍODO 2				TOTAL PERÍODO 1	PÉRDIDA
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3	CLASE 4		
CLASE 1	P ₁₁	P ₂₁	P ₃₁	P ₄₁	P ₁₊	P ₁₊ - P ₁₁
CLASE 2	P ₁₂	P ₂₂	P ₃₂	P ₄₂	P ₂₊	P ₂₊ - P ₂₂
CLASE 3	P ₁₃	P ₂₃	P ₃₃	P ₄₃	P ₃₊	P ₃₊ - P ₃₃
CLASE 4	P ₁₄	P ₂₄	P ₃₄	P ₄₄	P ₄₊	P ₄₊ - P ₄₄
TOTAL PERÍODO 2	P ₊₁	P ₊₂	P ₊₃	P ₊₄	1	
GANANCIA	P ₊₁ - P ₁₁	P ₊₂ - P ₂₂	P ₊₃ - P ₃₃	P ₊₄ - P ₄₄		

Figura 13. Modelo de una matriz de cambio de cobertura de la tierra. Fuente: Elaboración propia, modificado Pontius *et al.* (2004).

Al dividir el área en unidades discretas y clasificar los cambios entre las diferentes clases, las matrices de cambio ofrecen una perspectiva sistemática y cuantitativa de las transformaciones en el paisaje a través del tiempo. Este enfoque es fundamental para vigilar el impacto ambiental y planificar el uso de la tierra y también es crucial en la gestión de recursos naturales y en la detección de modificaciones importantes en el entorno terrestre (Pabón y Senna, 2017).

El proceso se lleva a cabo utilizando la herramienta *Área tabular*, la cual genera la matriz de cambio. De esta forma, se obtiene la información necesaria para validar ganancias y pérdidas de las distintas coberturas, especialmente del manglar. Además, hay que evidenciar estos cambios cartográficamente con la herramienta *Calcular ráster de cambio*, que indica las transiciones efectuadas en los periodos analizados expresándolas mediante polígonos en el mapa clarifica dónde se ubican esas transiciones en el terreno.



Field:	Add	Calculate	Selection:	Select By Attributes	Zoom To	Switch			
OBJECTID *	VALUE	VALUE_0	VALUE_1	VALUE_2	VALUE_3	VALUE_4	VALUE_5	VALUE_6	
1	1	0	1105200	0	11700	7200	0	0	49500
2	2	1	900	3150900	795600	1030500	173700	76500	1051200
3	3	2	0	1122300	11617200	745200	34200	41400	1782900
4	4	3	1800	2500200	1692900	35854200	157500	1342800	1709100
5	5	4	0	55800	53100	80100	5405400	136800	219600
6	6	5	0	155700	44100	744300	343800	35770500	617400
7	7	6	3600	60300	4682700	257400	0	325800	3105900

Figura 14. Herramienta matriz de cambios en ArcGIS Pro. Fuente: Elaboración Propia.

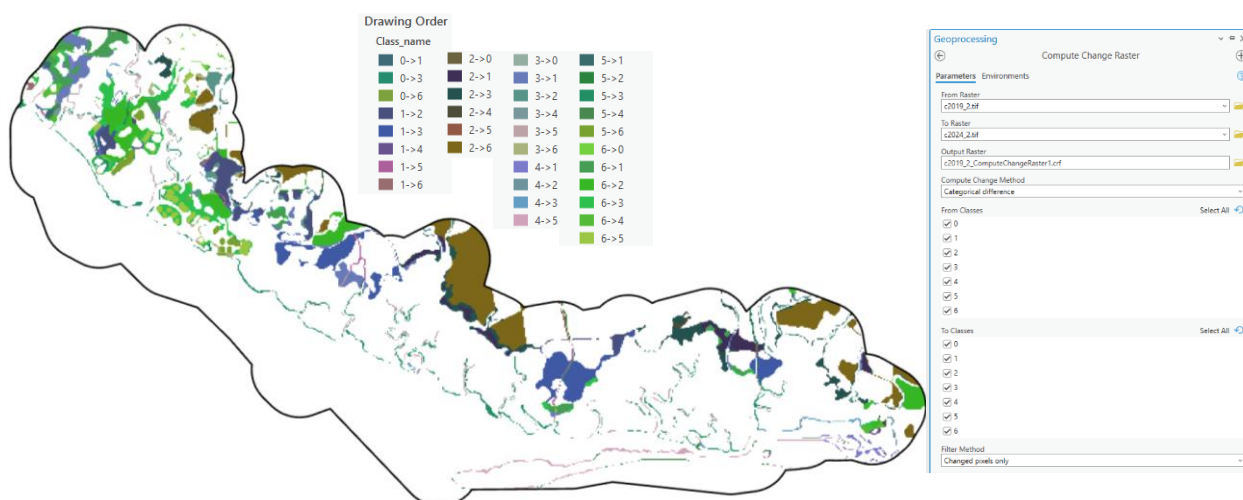


Figura 15. Herramienta para visualizar cambios en ráster para 2 períodos de tiempo. Fuente: Elaboración Propia.

3.6 POSPROCESAMIENTO

Los procesos de clasificación de imágenes, por el método que se utilice, no están exentos de posibles mejoras. Por este motivo, es necesario aplicar un último ajuste final a la clasificación siguiendo la guía que las validaciones, tanto de la matriz de confusión como de la matriz de cambios, puedan sugerir. Por eso, resulta muy útil (y necesario) realizar un refinado del resultado, mediante reclasificaciones puntuales donde se requiera ajustar la clasificación. De esta forma, se suavizan los resultados y se elimina el ruido (Barrios, 2019). En este caso, se utiliza la herramienta *Reclasificador* para lograrlo y mejorar todas las clasificaciones realizadas.

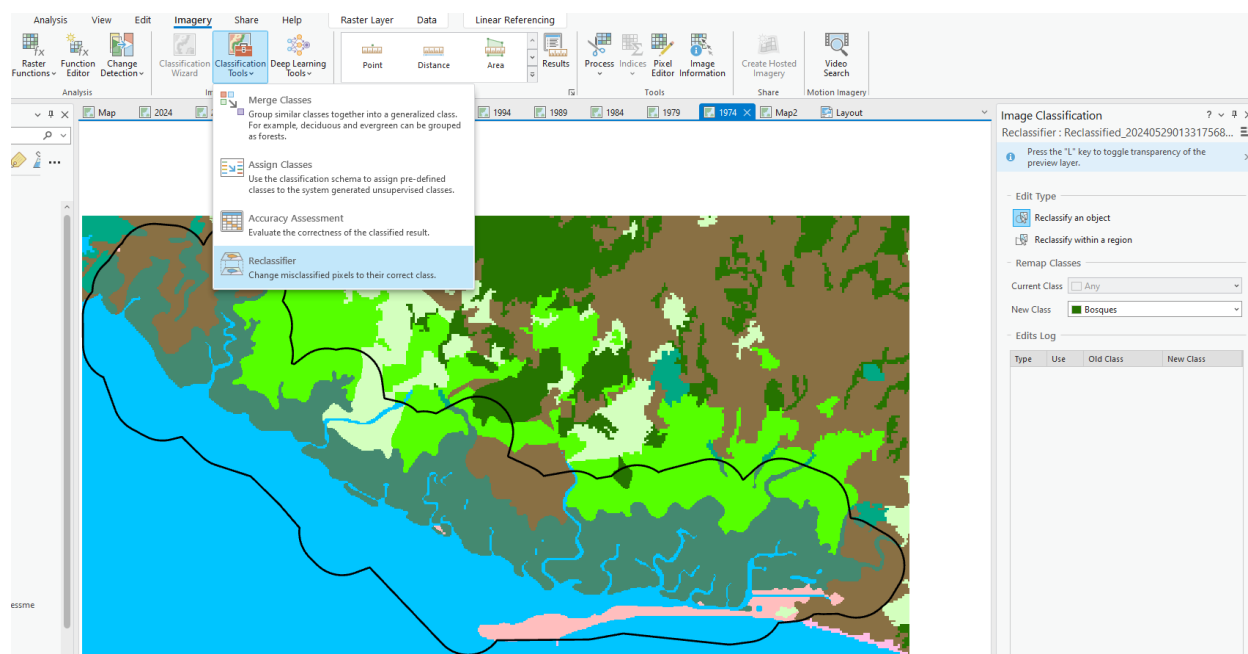


Figura 16. Herramienta para reclasificar rásteres clasificados en ArcGIS Pro. Fuente: Elaboración Propia.

3.7 ELABORACIÓN Y PRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA

Los estudios de las dinámicas espaciales y temporales se basan en la geografía cuantitativa y utilizan un enfoque lógico-matemático y deductivo, como los métodos de clasificación, ya sea supervisada o no (Padrón, 2007). Estas investigaciones se centran en el territorio, considerado un espacio en continua transformación debido a la acción humana, que debe ser mapeado (Poveda *et al.*, 2022).

Estos cambios se detectan mediante herramientas de teledetección y se representan cartográficamente gracias al uso de los SIG. Lo anterior ofrece varias ventajas: permiten obtener información de la superficie terrestre a través de sensores en plataformas espaciales utilizando energía electromagnética, facilitan el análisis multitemporal para identificar modificaciones espaciales provocadas por actividades agrícolas y pecuarias y proporcionan una visión de la evolución del territorio, lo que ayuda a comprender el paisaje actual y sus posibles desarrollos futuros (GISSER, 2024).

En esta etapa del proyecto se realiza la elaboración cartográfica derivada de los cambios en las coberturas evidenciados durante 50 años. Se puede cuantificar la cantidad de manglar para cada periodo analizado, determinar si este ha crecido o decrecido e identificar los momentos en los que mayor dinámica existe al respecto.

Finalmente, los resultados se exponen mediante una plataforma SIG en formato digital, en la que se alojará la cartografía dinámica, para que sea consultada por medio de un visor web diseñado con Story Maps de ArcGIS Online. Se espera que todo el compendio de mapas quede plasmado en este repositorio para que sirva de consulta y sea una herramienta que facilite la toma de decisiones.

3.8 DIAGRAMA METODOLÓGICO

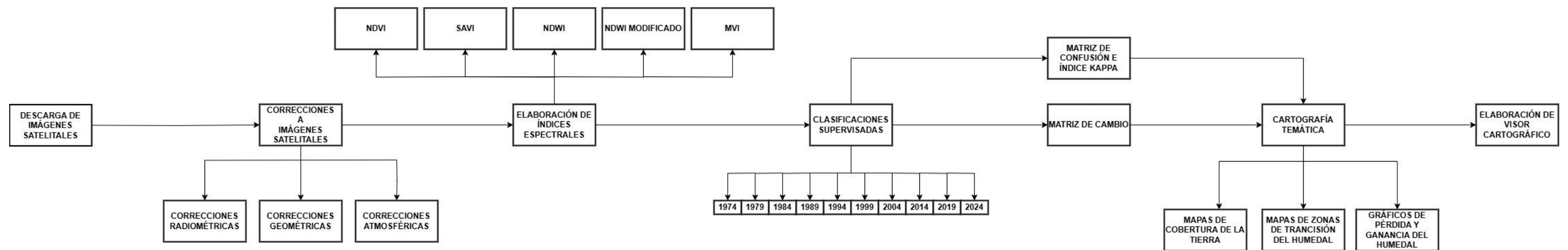


Figura 17. Diagrama de metodología de tesis. Fuente: Elaboración propia basado en metodología de Torres (2022).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del análisis multitemporal de cambio de cobertura en el manglar de Puntarenas, enmarcado en el área de estudio definida por el Decreto Ejecutivo n.º 29277-MINAE, realizado mediante teledetección y procesado con Sistemas de Información Geográfica (SIG), durante el periodo 1974 a 2024. Este trabajo se llevó a cabo dando un seguimiento detallado de la dinámica de este ecosistema utilizando imágenes satelitales Landsat y el método de clasificación supervisada *Support Vector Machine* (SVM). Los resultados se validaron por medio de matrices de confusión e índice Kappa, además de matrices de cambio. Asimismo, los resultados se muestran a través de un visor web elaborado en Story Maps de ArcGIS Online.

Los resultados se aplican a la mayoría de los periodos establecidos excepto para 1984, 2004 y 2009, ya que no se pudo obtener por los siguientes motivos: altas nubosidades, bandedo de las imágenes y la falta de disponibilidad de las imágenes en algunos casos. Por lo tanto, estos periodos no se consideraron en este apartado y se continuó trabajando con las imágenes restantes.

En algunas secciones se divide el análisis de los índices de vegetación, generando la cartografía temática con los mapas de coberturas donde se valida la información mediante las matrices de confusión e índice Kappa y en los productos cartográficos se presentan las matrices de cambio y la identificación de zonas de mayores dinámicas. Por último, se analiza la pérdida y la ganancia enfocadas en el humedal-estero de Puntarenas.

Finalmente, los productos cartográficos se presentan en una herramienta interactiva desarrollada para visualizar estos cambios a través de un visor web creado mediante Story Maps en la plataforma ArcGIS Online. Por último, se discuten las limitaciones del estudio y las implicaciones ecológicas y socioeconómicas de los hallazgos que se obtienen.

4.1 ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE ESPECTRALES ESTIMADOS

Los primeros resultados que se observaron son los índices espectrales NDVI, SAVI, NDWI, MNDWI y MVI, calculados para todos los periodos propuestos. A modo de síntesis, en este apartado se presentan los índices correspondientes que se obtienen de la imagen satelital del año 2024 (ver la Figura 18), como ejemplo resultante de la aplicación metodológica.

El índice NDVI varía entre -1.0 y 1.0. Los valores negativos corresponden a nubes, cuerpos de agua, mientras que valores cercanos a cero indican rocas y suelo descubierto. Por otro lado, los valores muy bajos (0.1 o menos) denotan áreas sin vegetación, como rocas o arena, los valores moderados (0.2 a 0.3) representan arbustos y los valores altos (0.6 a 0.8) sugieren bosques. Los valores más positivos del índice proponen vegetación más vigorosa (Manrique, 1999). Para efectos de la investigación fue útil para discriminar la vegetación respecto al agua.

El índice SAVI se interpreta de manera similar al NDVI, donde los valores negativos indican escasez de vegetación y los valores positivos representan su presencia. En el caso de esta investigación, la constante L tiene el valor de 0,5 y dentro de las utilidades del índice están: el control de maleza, ya que identifica estas áreas, algo que puede ser complicado con el NDVI debido a la falta de corrección del efecto del suelo. En el caso de este trabajo, aparte de permitir diferenciar el agua de la vegetación, también identificó bancos de arena (Rueda *et al.*, 2015).

El índice NDWI se utiliza para resaltar masas de agua en imágenes satelitales, lo que reduce la reflectancia del suelo y la vegetación. Esto permite detectar y monitorear cambios leves en la cantidad de agua, aunque su sensibilidad a estructuras construidas puede sobreestimar el tamaño de las masas de agua. Sus valores varían de -1 a 1, donde los valores negativos indican superficies sin vegetación o agua, los valores cercanos a 0 sugieren baja cobertura vegetal o alto estrés hídrico y valores positivos proponen zonas con creciente cobertura e hidratación (Segura, 2020). En este trabajo, el índice fue útil no solamente para identificar cuerpos de agua, sino también suelo desnudo o vegetación con estrés hídrico.

Después se realiza el índice MNDWI; los valores entre -1 y 1, donde los valores positivos del MNDWI indican agua y disminuyen las entidades de área construida que se correlacionan con el mar abierto en otros índices (Muñoz, 2013). En este trabajo, este índice es muy útil para definir la hidrología que no se había discriminado con los índices anteriores.

En la Figura 18 se observa cómo la aplicación del NDVI en el área de estudio diferencia las cubiertas vegetales del agua y de la infraestructura. Pero, es hasta en la aplicación del SAVI en su constante L de 0.5 donde se discriminan con claridad algunos cuerpos de agua, barras arenosas de baja profundidad e infraestructura en la zona estudiada. Por otro lado, en los índices de agua como el NDWI y el MNDWI se aprecia de forma contundente los cuerpos de agua, destacando las zonas

intermareales, ríos, lagos y áreas de inundación en la frontera norte del humedal, sin olvidar las evidenciadas piletas de cultivos de camarón, observadas desde los índices vegetales.

Por último, se estimó el MVI, que captura el verdor y el contenido de humedad distintivos de los manglares discriminándolos de otras coberturas vegetales y no vegetales como el suelo desnudo, el agua y las áreas urbanizadas. Este índice es eficaz para evaluar la extensión y salud de los manglares, lo que facilita la evaluación de la deforestación, degradación y esfuerzos de restauración de este ecosistema (Baloloy *et al.*, 2020).

Este índice fue un insumo valioso que sirvió como medio comprobatorio para las coberturas clasificadas por el método SVM. Se convirtió en un elemento fundamental para ofrecer control de calidad en los procesos posteriores, siempre que las imágenes contaran con las bandas necesarias para su combinación, es decir, la aplicación de este índice se realizó en el periodo de 1984 a 2024, esto se debe a que Landsat 1 no cuenta con la banda SWIR1, necesaria para obtener el MVI. Por lo tanto, no fue posible aplicarlo para los años 1974 y 1979.

A continuación, se muestran tanto los índices de vegetación (NDVI y SAVI) como los de agua (NDWI y MNDWI), además del índice de manglar (MVI), en el que se puede constatar los contrastes en cuanto a cobertura terrestre y acuática, lo que evidencia la utilidad de cada uno en el desarrollo de la investigación y, específicamente de los resultados, en los que fueron insumos clave para contar con recursos adicionales que apoyaran el proceso de las clasificaciones supervisadas. Con esto se logran identificar coberturas como vegetación vigorosa, suelo con estrés hídrico, hidrografía, bancos de arenas y otras que, superpuestas con las clasificaciones realizadas, permitieron comprobar información que posteriormente pudo ser depurada.

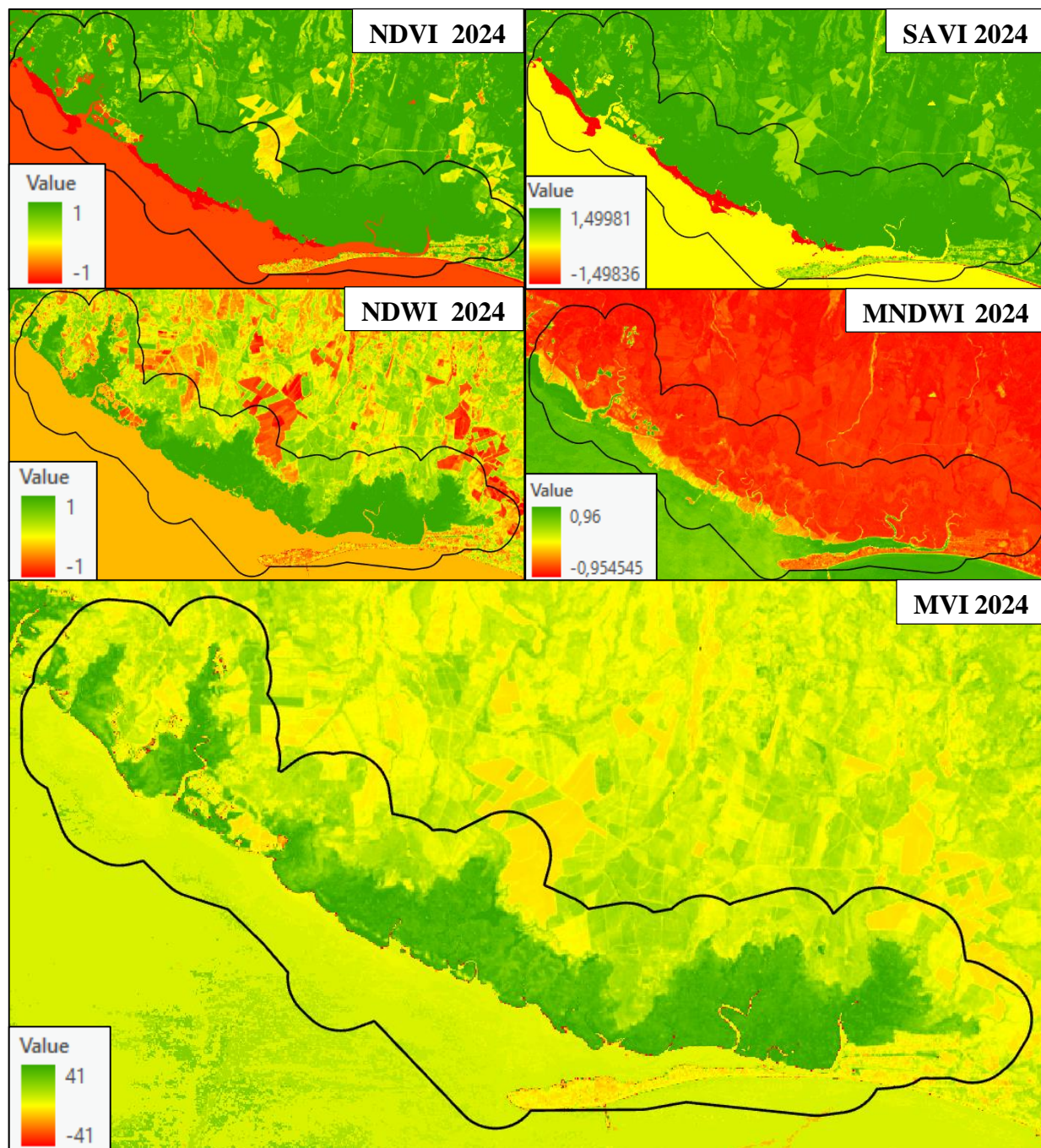


Figura 18. Índices NDVI, SAVI, NDWI, MNDWI y MVI en imagen satelital del 2024. Fuente: Elaboración propia.

4.2 ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA DE LA TIERRA

El análisis multitemporal de las imágenes satelitales en el manglar-estero de Puntarenas durante 50 años permitió observar las dinámicas de transformación en los diferentes tipos de coberturas y su evolución a través del tiempo. Este estudio ayudó a comprender cómo las actividades humanas

y las políticas de conservación han influido en el paisaje (Cifuentes *et al.*, 2014), lo que proporciona una base para futuras estrategias de manejo sostenible del ecosistema. De seguido, se presenta una descripción de los cambios observados en cada categoría de cobertura de la tierra a lo largo del periodo de 1974 a 2024.

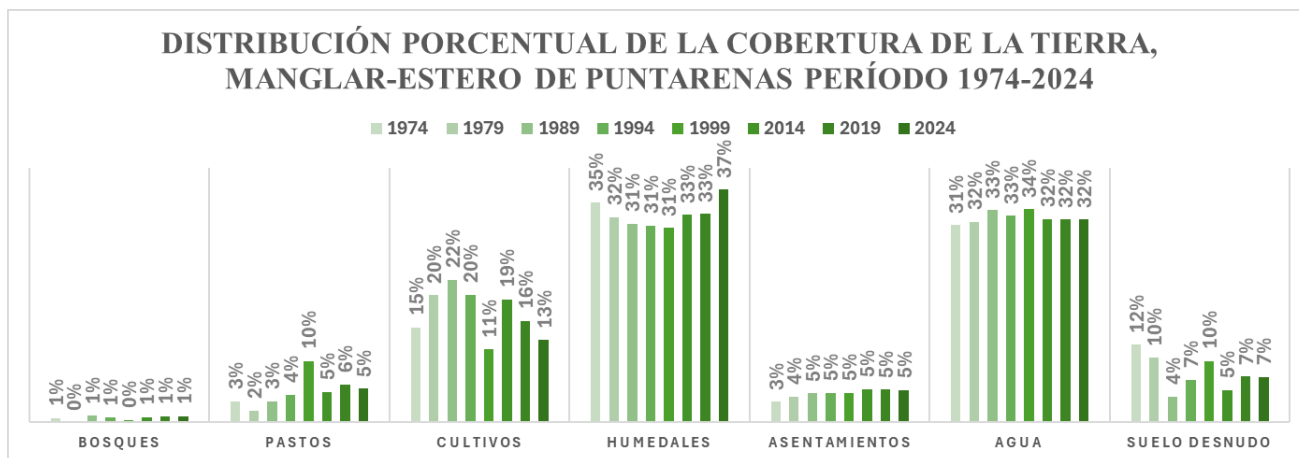


Figura 19. Distribución porcentual durante 50 años de las coberturas de la tierra. Fuente: Elaboración Propia.

La evolución porcentual de las diferentes coberturas en el área de estudio observadas en la Figura 19 revela algunas tendencias. Por ejemplo, los bosques se mantuvieron en niveles muy bajos, fluctuando entre el 0 % y el 1 % en los 50 años. Como el área de estudio es una zona de alta intrusión marina, el humedal es el ecosistema más representativo del lugar (Arrieta, 2020).

Por otro lado, los pastos se incrementaron significativamente, pasaron del 3 % en 1974 al 10 % en 1999, aunque disminuyeron al 5 % en 2024, lo que puede estar asociado a actividades productivas como la agricultura, especialmente a la incursión del cultivo de la caña de azúcar. Según la fecha de adquisición de las imágenes analizadas y la etapa de crecimiento del cultivo, este puede encontrarse en etapas tempranas de desarrollo. Por lo tanto, el sensor posiblemente lo clasificó como pasto por su baja altura y no como cultivo (Villatoro, 2021).

Además, los cultivos alcanzaron su máximo del 22 % en 1989. Pero, luego experimentaron una disminución constante hasta llegar al 13 % en 2024, motivados por los esfuerzos institucionales en cuanto a estrategias de conservación e iniciativas de recuperación del manglar (Sinac, 2019).

Las áreas destinadas a asentamientos crecieron ligeramente del 3 % en 1974 % al 5 % en 1979 y se estabilizaron en este nivel hasta 2024. Pese a que el crecimiento poblacional en el área de estudio

es una realidad (INEC, 2024), factores como el tamaño del píxel procesado y la ausencia de bandas auxiliares para mejorar la resolución espacial en la mayoría de los casos inciden en que el sensor no discrimine con facilidad las edificaciones en zonas que no son densamente pobladas (Guadalupe, 2021).

Mientras, las superficies de agua se mantienen constantes alrededor del 31 % al 34 % durante todo el periodo. Estos cambios pueden motivarse por la transformación o eliminación de cursos fluviales (Segura, 2020), aunque posteriormente los esfuerzos de conservación pueden haber rendido frutos en la recuperación de cauces de agua (Sinac, 2018).

Por otro lado, el suelo desnudo ha mostrado fluctuaciones, alcanzó un mínimo del 4 % en 1989 y terminó en un 7 % en 2024. “Esta clasificación podría tener consecuencias directas según la dinámica de los cultivos de la zona y su época de crecimiento y temporada de cosecha” (Rueda *et al.*, 2015, s. p.).

Entre 1974 y 2024, la cobertura de humedales en Puntarenas experimentó fluctuaciones debido a la expansión agrícola y urbana. Inicialmente, los humedales disminuyeron del 35 % en 1974 al 31 % en 1989. Entre 1989 y 1999, la cobertura se mantuvo constante. Pero, a partir de 1999, con la implementación de políticas de conservación comenzó a aumentar, alcanzando el 37 % en 2024 (Sinac, 2024).

Este incremento se debe a esfuerzos puntuales como la Estrategia Regional para el Manejo y Conservación de los Manglares en el Golfo de Nicoya y la participación de entidades como Sinac y Catie mediante trabajos conjuntos de recuperación del Humedal (Sinac-Catie-CI, 2023). Por lo tanto, la conservación de estos hábitats es vital por todos los beneficios de los servicios ecosistémicos que ofrecen (Hernández *et al.*, 2018).

A continuación, como ejemplo, se muestran los mapas de cobertura para los años 1974⁴ y 2024⁵, ya que demuestran los contrastes en las dinámicas observadas en 50 años, destacando los cambios antes y después del inicio de actividades comerciales como el cultivo de camarón, la intensificación del cultivo de la caña de azúcar y el crecimiento poblacional (Sinac, 2019).

⁴ Elaborado con el sensor Earth Resources Technology Satellite (ERTS) posteriormente llamado Landsat 1.

⁵ Elaborado con el sensor Landsat 8

Seguidamente, se muestra un mosaico de imágenes que ilustra los periodos restantes, lo que permite valorar la transición de las coberturas en una secuencia temporal.

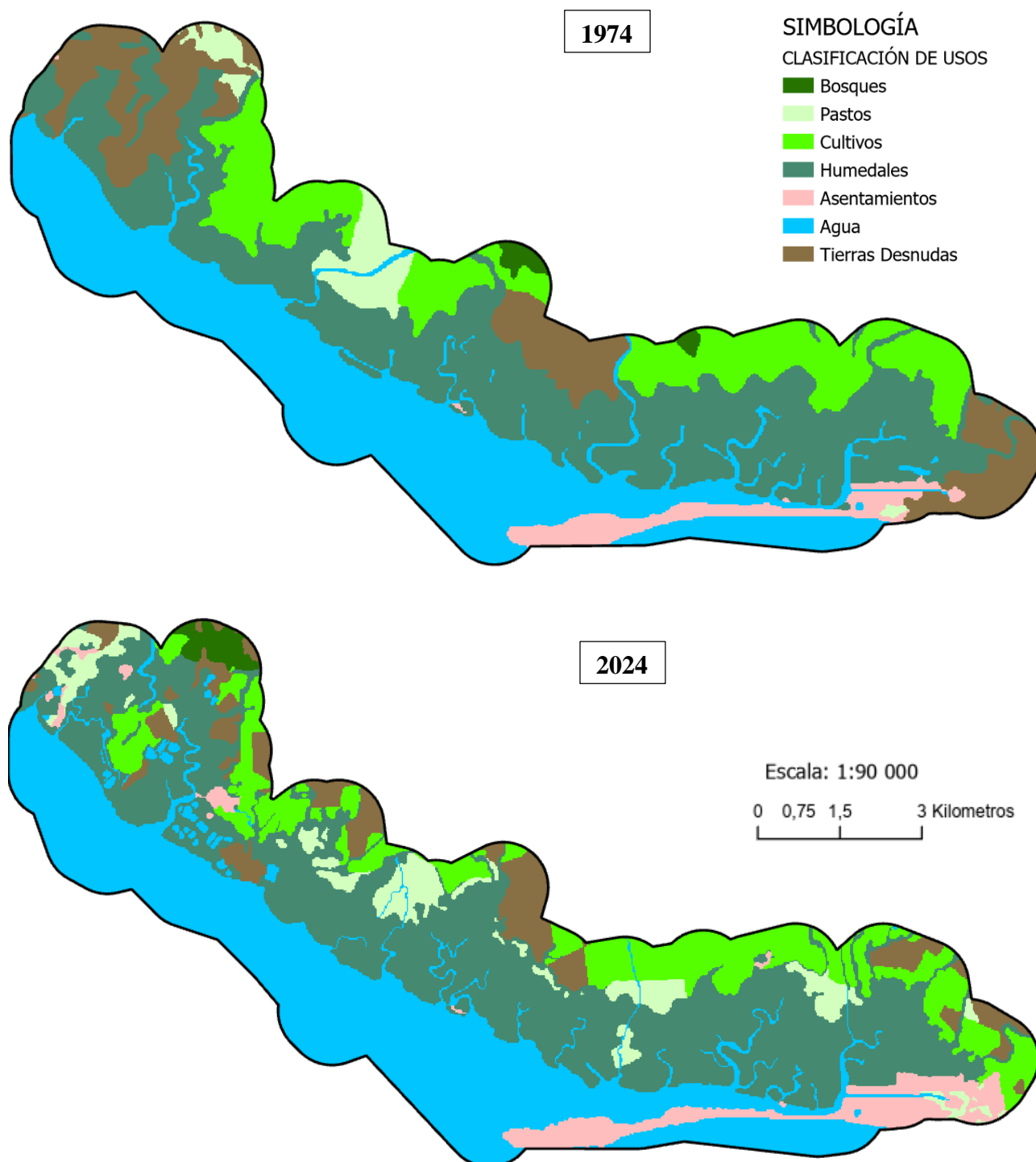


Figura 20. Clasificación de coberturas para los periodos 1974 y 2024. Fuente: Elaboración propia.

Las matrices de confusión de los mapas de 1974 y 2024, con base en el grado de concordancia según la clasificación de López de Ulibarri y Fernández (1999), son considerables, sustancial o buena, lo que indica que están dentro de los parámetros de aceptación y las clasificaciones tienen un grado de certeza alto y confiable, como muestra la Figura 21.

ÍNDICE KAPPA	
Clasificación	Concordancia
0 - 0,2	Ínfima
0,2 - 0,4	Escasa
0,4 - 0,6	Moderada
0,6 - 0,8	Buena
0,8 - 1	Muy Buena

Figura 21. Índice de Kappa y su grado de concordancia. Fuente: Perea, Oviedo, y Leal (2019).

Los cambios en las coberturas se validaron mediante la matriz de confusión y el índice Kappa, que se puede analizar por medio de la precisión del usuario que indica la proporción de píxeles correctamente clasificados para cada categoría, dentro de la que destacan los humedales que tienen una alta exactitud de 0.80 para 1974 y de 0.787 en el 2024, mientras que el índice Kappa general de 1974 es de 0.792 y el de 2024 es de 0.680.

MATRÍZ DE CONFUSIÓN E ÍNDICE KAPPA PARA IMAGEN ANALIZADA DE 1974										
CLASE	BOSQUES	PASTOS	CULTIVOS	HUMEDALES	ASENTAMIENTOS	AGUA	TIERRA DESNUDA	TOTAL	PRECISIÓN DEL USUARIO	KAPPA
BOSQUES	3	2	0	1	0	0	6	12	0,25	0
PASTOS	0	19	0	0	0	0	0	19	1	0
CULTIVOS	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
HUMEDALES	1	1	0	16	0	2	0	20	0,8	0
ASENTAMIENTOS	0	0	0	0	3	0	1	4	0,75	0
AGUA	0	0	0	0	0	23	0	23	1	0
TIERRA DESNUDA	1	0	0	0	0	0	16	17	0,941176	0
TOTAL	5	23	0	17	3	25	23	96	0	0
PRECISIÓN DEL PRODUCTOR	0,6	0,826087	0	0,941176	1	0,92	0,695652	0	0,833333	0
KAPPA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,79246

Tabla 2. Matriz de confusión e índice Kappa para el período 1974. Fuente: Elaboración propia.

MATRÍZ DE CONFUSIÓN E ÍNDICE KAPPA PARA IMAGEN ANALIZADA DE 2024										
CLASE	BOSQUES	PASTOS	CULTIVOS	HUMEDALES	ASENTAMIENTOS	AGUA	TIERRA DESNUDA	TOTAL	PRECISIÓN DEL USUARIO	KAPPA
BOSQUES	11	2	0	3	0	4	1	21	0,52381	0
PASTOS	1	9	3	0	0	0	0	13	0,692308	0
CULTIVOS	4	11	44	0	0	0	2	61	0,721311	0
HUMEDALES	4	2	0	37	0	4	0	47	0,787234	0
ASENTAMIENTOS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGUA	1	2	0	1	0	20	0	24	0,833333	0
TIERRA DESNUDA	2	2	7	0	0	0	39	50	0,78	0
TOTAL	23	28	54	41	0	28	42	216	0	0
PRECISIÓN DEL PRODUCTOR	0,478261	0,321429	0,814815	0,902439	0	0,714286	0,928571	0	0,740741	0
KAPPA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,680135

Tabla 3. Matriz de confusión e índice Kappa para el período 2024. Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura 19 y lo comentado en los párrafos siguientes, se puede observar la distribución de las coberturas no solo representada en un gráfico donde se interpreta de forma porcentual, sino que también se puede visualizar de manera cartográfica. La Figura 22 presenta un mosaico de imágenes que da continuidad a la figura comparativa entre 1974 y 2024, para completar todo el panorama de imágenes clasificadas en 50 años.

Este compuesto de imágenes clasificadas refleja los procesos de evolución agrícola y acuícola en el área de estudio y evidencia que la frontera norte del humedal-estero de Puntarenas ha sufrido constantes modificaciones en cuanto a su límite, donde los momentos reflejan distintas coyunturas incididas en el paisaje.

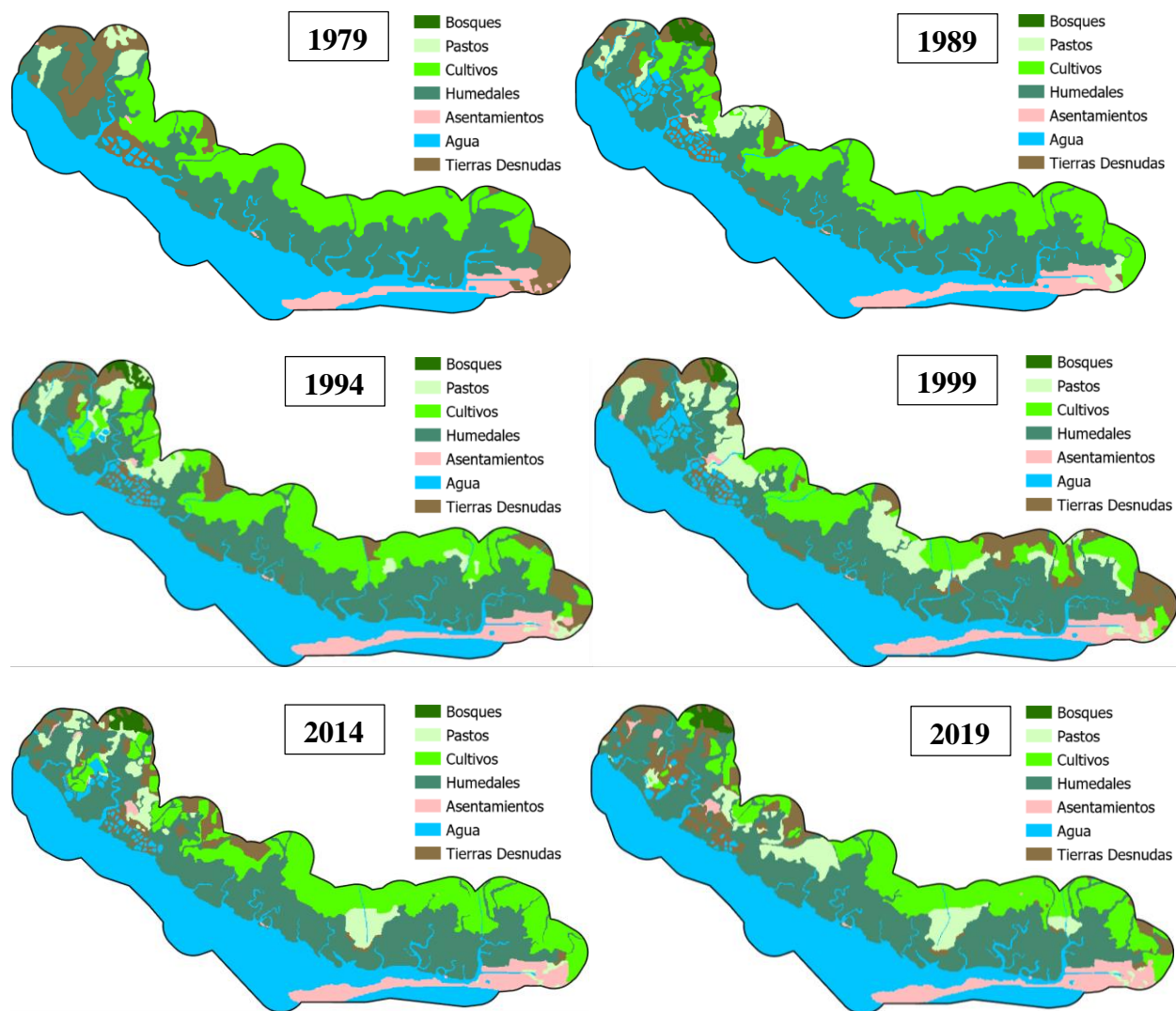


Figura 22. Mosaico de coberturas períodos 2019-1979. Fuente: Elaboración propia.

4.3 ANÁLISIS DE PÉRDIDA Y GANANCIA

Las actividades antrópicas, como el crecimiento poblacional y tareas económicas, tales como la creación de camaroneras, salineras y, especialmente, el desarrollo agrícola de la caña de azúcar, han afectado estos humedales (Sinac, 2019). Sin embargo, los datos reflejan el impacto de las políticas de conservación y restauración que se implementan en los últimos años (Sinac, 2018), creando la necesidad de mantener y reforzar estos esfuerzos para asegurar la sostenibilidad a largo plazo de los humedales en Puntarenas.

Para comprender mejor la cantidad de área reportada como pérdida o ganancia y los sitios específicos donde se observan cambios, se realizó la matriz de modificaciones y la identificación cartográfica de esas zonas. En la matriz de cambio se muestran los datos respecto a las áreas de coberturas para el periodo de 1974, mostradas mediante filas y las áreas para el año 2024, observadas por medio de columnas.

Las celdas que forman diagonales que cruzan ambas coberturas similares reflejan las persistencias o el área que se ha mantenido de la categoría sin variaciones. Además, se representa mediante una fila la ganancia que resta la persistencia menos el total para esa categoría para el año 2024, mientras que la pérdida se presenta por medio de una columna que resta la persistencia menos el total del año 2019. Finalmente, se expresa el cambio neto que resta la ganancia menos la pérdida. Si el cambio neto es positivo, entonces hay incremento real de la cobertura indicada, mientras que si el cambio neto es negativo, significa que la cobertura más bien disminuyó.

Los datos de la Tabla 4 presentan los resultados del cambio en la cobertura en el humedal-estero de Puntarenas entre 1974 y 2024. A continuación, se muestran esos resultados.

	BOSQUES	PASTOS	CULTIVOS	HUMEDALES	ASENTAMIENTOS	AGUA	TIERRA DESNUDA	TOTAL 1974	PÉRDIDA	CAMBIO NETO
BOSQUES	0,0	0,0	37,7	3,0	0,0	0,0	35,8	76,5	76,5	40,9
PASTOS	71,6	72,9	64,2	93,0	12,2	3,2	78,1	395,0	322,1	232,9
CULTIVOS	0,0	211,6	957,7	262,6	32,8	14,0	289,4	1768,1	810,4	-233,7
HUMEDALES	0,0	153,4	72,3	3464,9	38,8	252,1	99,3	4080,7	615,8	245,2
ASENTAMIENTOS	0,0	4,1	0,0	1,0	338,2	41,1	0,0	384,5	46,3	210,6
AGUA	0,0	10,3	12,4	195,8	14,8	3429,5	0,0	3662,7	233,3	104,8
TIERRA DESNUDA	45,8	175,7	390,1	305,6	158,4	27,7	341,0	1444,2	1103,2	-600,7
TOTAL 2024	117,4	627,9	1534,3	4325,9	595,1	3767,6	843,6	11811,7	3207,5	
GANANCIA	117,4	555,0	576,6	860,9	256,9	338,1	502,6	3207,5		

*TODAS LAS MEDIDAS SON EN HECTÁREAS

Tabla 4. Matriz de cambio para los períodos 1974 y 2024. Fuente: Elaboración propia.

Este compuesto de imágenes clasificadas refleja los procesos de evolución agrícola y acuícola en el área de estudio y evidencia que la frontera norte del humedal-estero de Puntarenas ha sufrido constantes modificaciones en cuanto a su límite, donde los momentos reflejan distintas coyunturas que inciden en el paisaje.

El área dedicada al pasto en 1974 era de 395.01 ha, de las cuales se perdieron 322.11 ha, transformándose prácticamente a todas las coberturas analizadas en esta investigación. Pese a esta pérdida, para el año 2024 los pastos ganaron 627.9 ha, por lo tanto, el cambio neto es positivo, aumentando a 232.92 ha.

Los cultivos, por otro lado, mostraron una disminución significativa. De las 1768.05 ha registradas en 1974, se perdieron 810.36 ha, lo que ocasiona 957.69 ha en 2024. El cambio neto en esta categoría fue negativo, con una reducción de 233.73 ha, las tierras desnudas, seguidas de los humedales, fueron las coberturas que más transformaron los cultivos.

Los humedales, una categoría crítica para el ecosistema del manglar, tenían un área de 4080.69 ha en 1974, perdiendo 615.78 ha. A pesar de esta pérdida hubo un aumento neto de 245.16 ha, alcanzando un total de 4325.85 ha en 2024. La recuperación del humedal-estero de Puntarenas se debe principalmente a los cambios de cobertura de tierra desnuda y cultivos, lo que evidencia avances en las políticas de conservación y los esfuerzos en la regeneración del mangle por distintas entidades nacionales e internacionales.

En cuanto a los asentamientos, había 384.48 ha en 1974, mientras que para el año 2024 se reportan 595.1 ha. Haciendo la relación de pérdida y ganancia se reporta un crecimiento de 210.6 ha que se puede visualizar no solamente en la matriz de cambios, sino también en la cartografía que se muestra en párrafos anteriores.

El área de agua también mostró un cambio significativo. En 1974 había 3662.73 ha de agua, se perdieron 233.28 ha, pero con un aumento neto de 104.85 ha alcanza un total de 3767.58 ha en 2024. Esto puede motivar cambios en las mareas respecto a los momentos de adquisición de las imágenes satelitales, no obstante, también puede indicar recuperación en cuanto a la hidrografía de la zona, coincidiendo con el crecimiento del humedal, lo que puede señalar que el manglar y el ecosistema del humedal-estero de Puntarenas, se está recuperando.

La tierra desnuda tuvo una reducción considerable, con 1444.23 ha en 1974 y una pérdida de 1103.22 ha. El cambio neto fue negativo, con una disminución de 600.66 ha, dejando 341.01 ha en 2024. Esto está asociado principalmente a la dinámica agrícola de la zona, especialmente a factores como la época de adquisición de las imágenes, en las que se encuentran los periodos de zafra, particularmente por quema, y que en otros posibles momentos esas mismas áreas ya se encuentran cultivadas, de ahí que las transiciones a cultivos, humedales y asentamientos sean las más significativas.

En resumen, los datos indican decrecimiento en las coberturas de las tierras desnudas y los cultivos, con un cambio neto del 19 % y 7 % respectivamente, mientras que el bosque crece 1 %, los pastos y los asentamientos crecen 7 % cada uno y la cubierta de agua crece 3 %. Destaca el crecimiento de los humedales en un 8 %, lo que evidencia recuperación y crecimiento de su área perdida.

La Tabla 5 analiza las transiciones desde y hacia los humedales. Esta muestra desde cuáles coberturas provino el manglar actual y por qué se modificó el humedal en el pasado. Así se analizó el área de transición y el balance que indica si hubo pérdida o ganancia de mangle, según su uso y cobertura de proveniencia.

MATRIZ DE CAMBIO 1974-2024				
TRANSICIÓN	DESDE	HACIA	HECTÁREAS	BALANCE
Bosques->Humedales	Bosques	Humedales	2,97	Ganancia
Pastos->Humedales	Pastos	Humedales	92,97	Ganancia
Cultivos->Humedales	Cultivos	Humedales	262,62	Ganancia
Humedales->Pastos	Humedales	Pastos	153,36	Pérdida
Humedales->Cultivos	Humedales	Cultivos	72,27	Pérdida
Humedales->Asentamientos	Humedales	Asentamientos	38,79	Pérdida
Humedales->Agua	Humedales	Agua	252,09	Pérdida
Humedales->Tierra Desnuda	Humedales	Tierra Desnuda	99,27	Pérdida
Asentamientos->Humedales	Asentamientos	Humedales	0,99	Ganancia
Agua->Humedales	Agua	Humedales	195,84	Ganancia
Tierra Desnuda->Humedales	Tierra Desnuda	Humedales	305,55	Ganancia
TOTAL			1476,72	

Tabla 5. Cambios de coberturas en el manglar para los períodos 1974 y 2024. Fuente: Elaboración propia.

En términos de ganancias, se observa que 2,97 ha (0,2%) de bosques, 92,97 ha (6,3%) de pastos, 262,62 ha (17,8%) de cultivos, 0,99 ha (0,1%) de asentamientos, 195,84 ha (13,3%) de agua y 305,55 ha (20,7%) de tierra desnuda se convirtieron en humedales. En contraste, las pérdidas de humedales se distribuyen en 153,36 ha (10,4%) hacia pastos, 72,27 ha (4,9%) hacia cultivos,

38,79 ha (2,6%) hacia asentamientos, 252,09 ha (17,1%) hacia agua y 99,27 ha (6,7%) hacia tierra desnuda. Las transiciones en las que la cobertura del humedal participa representan el 46 % del total de los datos de todas las transiciones presentes en la zona, donde la ganancia supera a la pérdida en un 58 %, lo que evidencia que la conversión de áreas ocupadas por otras coberturas hacia los humedales supera las pérdidas de humedales hacia otras coberturas.

Con un abordaje específico respecto a los cambios del humedal en la zona de estudio. Estas dinámicas se pueden observar mediante el análisis del cambio neto en su cobertura en los periodos de análisis de 1974 a 2024, observados en la Figura 23 a continuación.

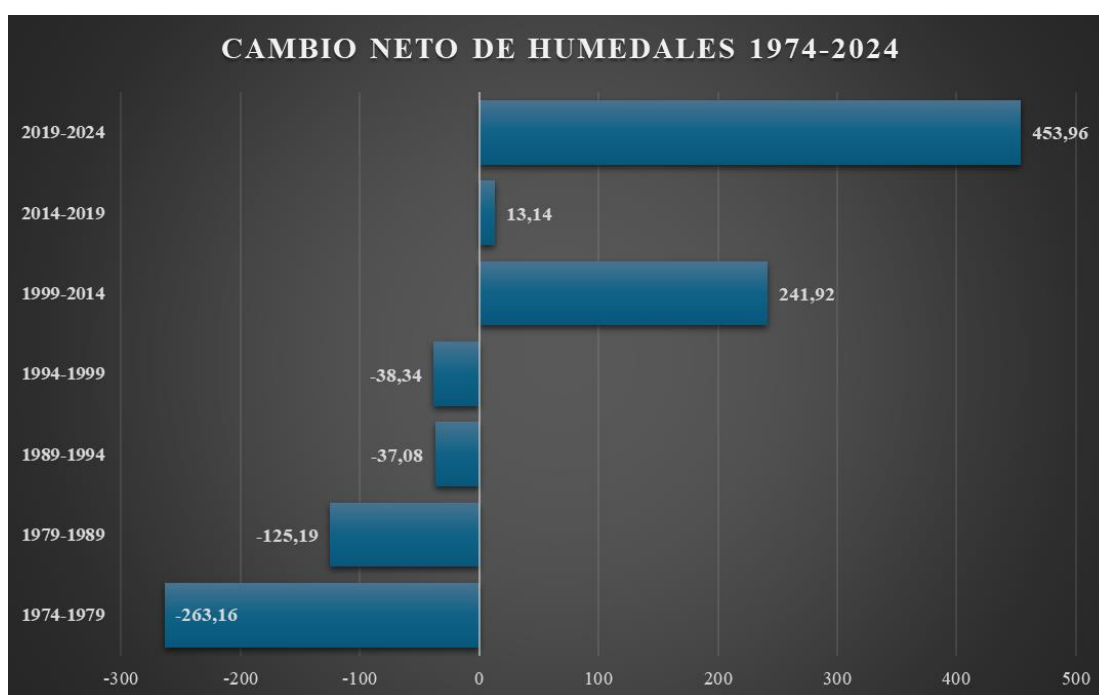


Figura 23. Cambio neto de coberturas para los periodos 2024 y 1974. Fuente: Elaboración propia.

Entre 1974 y 1979, los humedales sufrieron una pérdida significativa de 263.16 ha. Esto indica una pérdida considerable de cobertura del 8 %, posiblemente por la deforestación para convertir las coberturas en actividades agrícolas, sin mencionar la incursión de camaricultura y salineras (Mena, 2022).

Esta reducción continuó, aunque en menor grado, con una pérdida de 125.19 ha (4 %) entre 1979 y 1989 y de 37.08 ha (1 %) entre 1989 y 1994. De 1994 a 1999, la pérdida fue similar, alcanzando las 38.34 ha (1 %). Esta tendencia sugiere la continuidad de la transformación del paisaje. Pero,

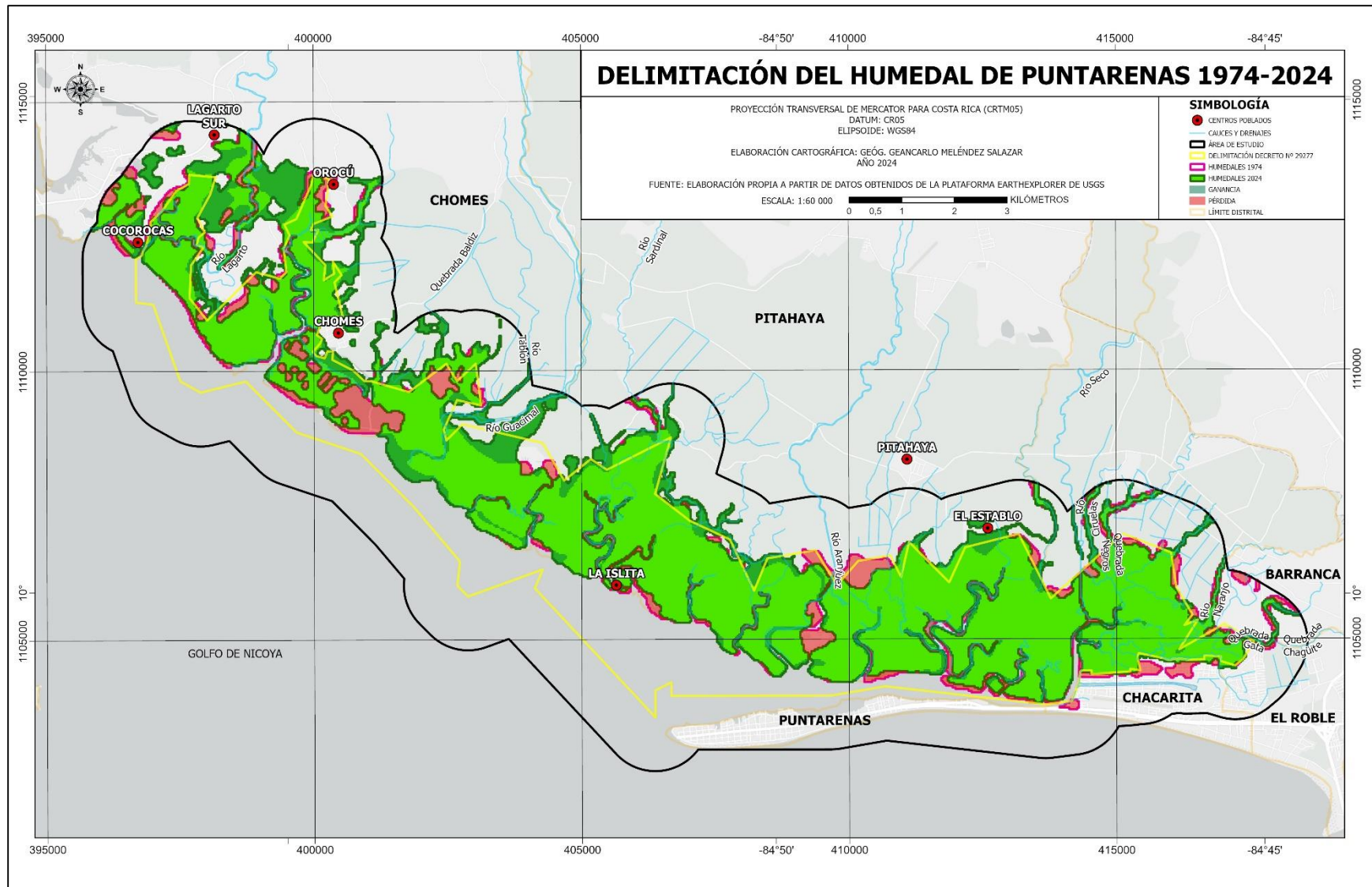
con menor intensidad, lo que demuestra que los procesos antrópicos continúan incidiendo en los cambios señalados.

Sin embargo, a partir de 1999 se observa una recuperación, con un aumento de 241.92 ha hasta 2014, equivalente al 8 %. Esto puede deberse a cambios en las políticas de coberturas de la tierra y a la implementación de medidas de conservación como la reforestación, la restauración de manglares y modificaciones en las prácticas de cobertura que favorecieron la regeneración natural, por ejemplo, la declaratoria del área en estudio como refugio nacional de vida silvestre y la suspensión de licencias de camaroneras (Sinac, 2018).

Este incremento continuó, pero en muy poca medida entre 2014 y 2019, con una ganancia de 13.14 ha. Sin embargo, para el periodo de 2019 a 2024, muestra una recuperación aún mayor, con un aumento de 453.96 ha, lo que equivale al 14 % en la cobertura del humedal-estero de Puntarenas.

Lo anterior puede deberse a la implementación de estrategias de conservación y restauración más efectivas, así como un incremento en las acciones de protección ambiental. Muestra de esto se puede mencionar la estrategia regional para el manejo y conservación de los manglares en el golfo de Nicoya (2019-2030), los esfuerzos de regeneración del mangle liderados por el Sinac, el Catie y CI (Sinac, 2019). En resumen, los datos reflejan una tendencia inicial de pérdida significativa de cobertura del humedal que disminuye con el tiempo, seguida por una recuperación que comienza a partir de 1999, culminando en un cambio neto positivo en el periodo de 2019-2024.

Se evidenciaron estos cambios cartográficamente (ver Mapa 2), en el que se puede visualizar en cuáles sitios ha sido la transformación del límite del manglar durante 50 años, en el que se reporta un aumento neto del 8 % comparando el límite de 1974 con el de 2024, respaldando positivamente las acciones de conservación en favor del humedal. Además, se identifican a lo largo de los restantes periodos en cuáles lugares se dieron las mayores dinámicas para este ecosistema, para concluir con el panorama general de todos los periodos de transición del humedal (ver la Figura 24).



Mapa 2. Identificación del límite del humedal de Puntarenas 1974-2024. Fuente: Elaboración propia.

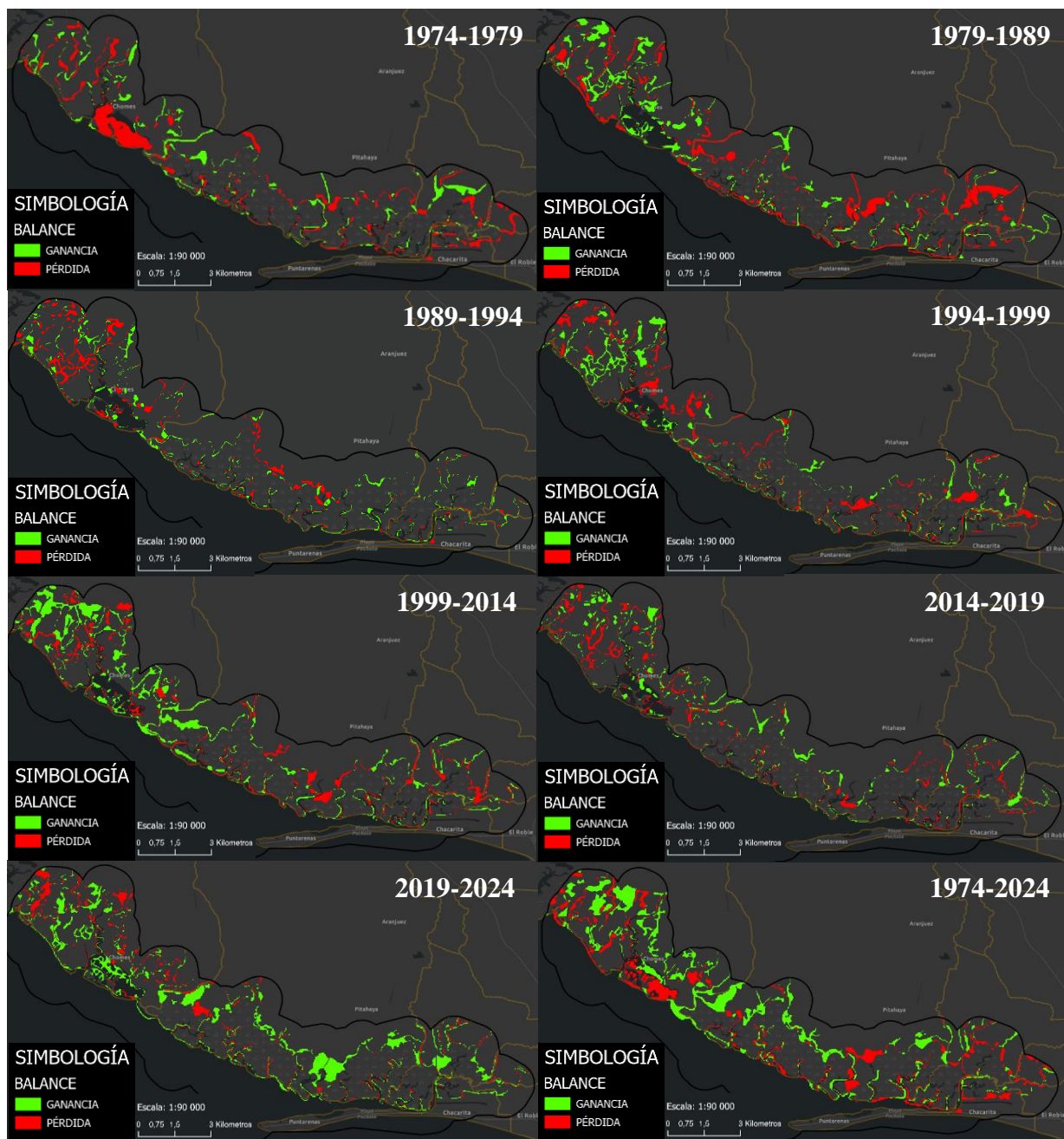


Figura 24. Identificación de pérdidas y ganancias de manglar en el período 1974-2024. Fuente: Elaboración propia.

Los cambios en las coberturas del humedal en el manglar-estero de Puntarenas tienen implicaciones significativas para los servicios ecosistémicos y las comunidades locales, ya que estos ecosistemas desempeñan un papel importante en la captura y almacenamiento de carbono. Lo anterior ayuda a mitigar el cambio climático (Arguedas, 2015).

La pérdida de humedales observada entre 1974 y 1999 no solo redujo la capacidad de secuestro de carbono, sino que también afectó negativamente la biodiversidad, lo que disminuye la disponibilidad de hábitats críticos para muchas especies acuáticas y terrestres. Esta degradación tuvo un impacto directo en la provisión de alimentos, ya que los manglares son áreas de cría y alimentación para peces y mariscos, recursos vitales para las comunidades locales (Arrieta, 2020).

Por otro lado, la recuperación de los humedales desde 1999 y especialmente entre 2019 y 2024, ha revertido parte de estos efectos negativos, ya que la restauración de los humedales contribuye a la mejora de la calidad del agua, lo que proporciona un entorno más saludable para la vida marina y, por ende, beneficia a las comunidades que dependen de la pesca y la acuicultura (Barbier, 2017). Además, los manglares actúan como barreras naturales contra las tormentas y la erosión costera, protegiendo a las comunidades locales de desastres naturales y reduciendo los costos asociados con los daños (Hernández *et al.*, 2018).

Por último, el impacto de estas transformaciones se extiende más allá de los beneficios ecológicos. La mejora en los servicios ecosistémicos repercute positivamente en la calidad de vida de las comunidades locales, lo que proporciona ingresos adicionales y seguridad alimentaria, ya que la pesca ve un aumento en las capturas y el ecoturismo atrae a más visitantes, también se genera empleo y se fomenta el desarrollo económico local (Marquet *et al.*, 2021).

Por lo anterior, es necesario continuar con las políticas de conservación y restauración, asegurando que estos beneficios se mantengan y amplíen, considerando la participación comunitaria y el apoyo continuo a través de financiamiento y tecnologías avanzadas, que son esenciales para la sostenibilidad a largo plazo del manglar y sus beneficios asociados (Minae, 2018).

Para finalizar este apartado, los resultados se exponen mediante la aplicación Story Maps en la plataforma web del sitio de ArcGIS Online de la Municipalidad de Puntarenas, disponible en el siguiente enlace: <https://arcg.is/0WvzCO>. En esta plataforma se puede visualizar la cartografía temática resultante de esta investigación y una serie de herramientas interactivas. Este recurso está a disposición del público en general y ofrecerá datos visibles para personas interesadas en el aprendizaje sobre humedales. Además, permite observar la dinámica de coberturas de este ecosistema a lo largo de 50 años, lo que evidencia, por medio de cartografía digital, tablas y gráficos adicionales, la necesidad de proteger y conservar este valioso ecosistema.

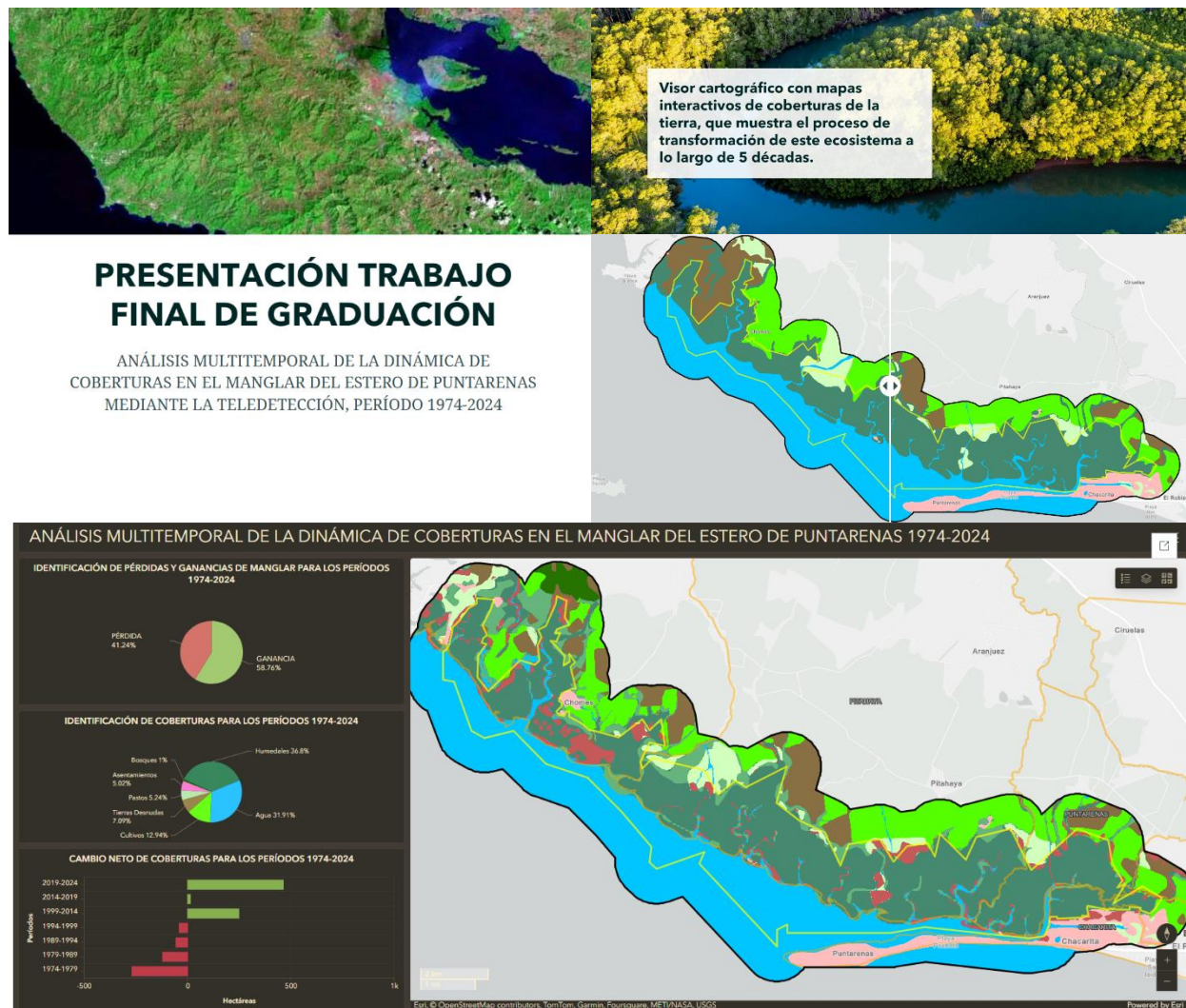


Figura 25. Ejemplos de recursos interactivos disponibles en el Story Maps de la investigación. Fuente: Elaboración Propia

El análisis multitemporal de las coberturas en el manglar de Puntarenas revela una dinámica compleja y variada en los 50 años de estudio, ya que se han demostrado pérdidas del humedal estero en los primeros 25 años, revertidos por procesos de recuperación y regeneración del manglar en la segunda mitad del periodo en análisis. Los factores antrópicos como la agricultura, acuicultura y crecimiento poblacional fueron los factores incidentes para su disminución, mientras que cambios en políticas de conservación, creación de áreas protegidas y planes de manejo, algunos de los factores que han favorecido la recuperación del mangle.

En esta investigación, a través del uso de la teledetección y los SIG, se identificaron tanto pérdidas significativas como recuperaciones importantes en distintas categorías de coberturas de la tierra. Por ejemplo, entre tierras desnudas, pastos y cultivos, transicionaron hacia el manglar más de

660 ha, lo que significa el 45 % de área respecto al total de los cambios hechos donde tuvo participación el humedal y el 77 % sobre el total de las ganancias que el humedal obtuvo a lo largo de todo el periodo de estudio.

La implementación de índices espectrales y la clasificación supervisada SVM permitió evaluar los cambios de las coberturas en el manglar-estero de Puntarenas en 50 años, demostrando que en el periodo de mayor recuperación de este ecosistema (1999-2024) los resultados coinciden con los esfuerzos de entidades públicas y privadas que resaltan la importancia de las estrategias de conservación y restauración que se implementan desde el 2001 (creación del área silvestre protegida y suspensión de licencias de camaricultura). Los resultados de esta investigación nos llevan a pensar sobre la necesidad de continuar con estos esfuerzos para asegurar la preservación y recuperación de este ecosistema vital. Esto refleja una tendencia positiva reciente que, sin embargo, debe ser mantenida y reforzada mediante políticas y acciones sostenibles, involucrando la participación ciudadana.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El uso de la técnica de clasificación supervisada con Support Vector Machine (SVM), combinando índices espectrales (NDVI, SAVI, NDWI, NDWI Modificado y MVI), permitió una discriminación de las coberturas (Torres, 2022) presentes en el área de estudio del humedal-estero de Puntarenas. Esta combinación de métodos facilitó una evaluación de la vegetación por categorías de uso y cambios en su cobertura (Granja, 2024) para analizar las variaciones en el ecosistema del manglar principalmente, durante un periodo de 50 años.

El proyecto demuestra que la expansión agrícola, la acuicultura y el desarrollo urbano son los principales impulsores de la pérdida de manglares en el área de estudio (Sancho, 2020), coincidiendo con periodos de intensificación del cultivo de la caña y expansión de la industria del cultivo de camarón (Sinac, 2019). Esto destaca la urgencia de revisar estas actividades desde una perspectiva de conservación ambiental (Marquet *et al.*, 2021).

Este análisis muestra que el mayor periodo de expansión de cultivos como la caña de azúcar y la acuicultura de camarón fue entre 1974 y 1994. Además, refleja que a partir de 1999 se observó una recuperación del manglar, impulsada por políticas de conservación como la designación del área de estudio como refugio nacional de vida silvestre y la suspensión de licencias para el cultivo de camarón, ambas en el año 2001, además de la Estrategia Regional para el Manejo y Conservación de los Manglares en el Golfo de Nicoya (2019-2030), junto con los esfuerzos del Sinac, Catie y Conservación Internacional entre los años 2019 y 2024, que han sido esenciales en la regeneración de humedales (Sinac, 2024).

La dinámica de las coberturas en el manglar de Puntarenas tiene implicaciones significativas, tanto ecológicas como socioeconómicas. Es fundamental continuar implementando políticas sostenibles que equilibren el desarrollo económico con la conservación ambiental. Estas conclusiones destacan la importancia de mantener y fortalecer las estrategias de conservación y manejo del manglar de Puntarenas, resaltando el papel indispensable de las políticas públicas y la participación comunitaria en la preservación de estos ecosistemas.

Finalmente, el visor cartográfico interactivo elaborado mediante Story Maps de ArcGIS Online es una herramienta innovadora que facilita la visualización y concientización sobre la transformación del manglar. Esto no solo proporciona acceso a información para investigadores y autoridades, sino también para la sociedad civil. Este recurso apoya a formular un criterio sobre la importancia de los humedales y puede colaborar en la toma de decisiones estratégicas que apoyen la gestión ambiental sostenible en el manglar de Puntarenas.

5.2 RECOMENDACIONES

Se sugiere que, para mejorar la precisión de los análisis multitemporales, se utilicen imágenes satelitales de mayor resolución espacial y temporal, además del uso de tecnologías emergentes como drones, LIDAR y Radar. Esto se debe a que, a pesar de los avances en teledetección y SIG, es importante considerar las limitaciones técnicas actuales en la calidad y resolución de las imágenes satelitales, las cuales pueden influir en la exactitud de la clasificación y el análisis de cambios.

Además, se recomienda realizar estudios que evalúen los beneficios socioeconómicos de conservar el manglar, como la mejora de la calidad de vida local, oportunidades económicas sostenibles y la protección frente a desastres naturales. Asimismo, se deben investigar los efectos del cambio climático en el manglar, lo que incluye el aumento del nivel del mar y la variabilidad climática, para desarrollar estrategias de adaptación más efectivas.

Se sugiere el uso de metodologías adaptativas para el análisis de dinámicas antrópicas en los manglares, tal y como se llevó a cabo en esta investigación. Se adaptó la metodología de Torres (2022) para incorporar otros aportes metodológicos en cuanto al uso de índices espectrales y clasificaciones supervisadas. Incluso este trabajo también puede servir como punto de partida para futuras investigaciones destinadas a la conservación de manglares en diversas regiones.

Se recomienda en investigaciones futuras ampliar los análisis valorando los enfoques de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos del manglar para comprender su valor integral y respaldar la inversión en su conservación. Esto implica evaluar no solo la cobertura del suelo, sino también indicadores como la calidad del agua, la diversidad de especies y la conectividad ecológica del ecosistema.

Se sugiere apoyar con financiamiento e insumos técnicos a futuras investigaciones sobre la conservación del manglar para lograr resultados como los que se observaron con los trabajos entre entidades como Sinac, Catie y CI y la coordinación efectiva entre gobierno, las ONG y la comunidad local, para implementar estrategias de conservación y restauración.

La recuperación del manglar en Puntarenas puede evidenciar la efectividad de las estrategias vigentes. Por lo tanto, se recomienda continuar con estas investigaciones para consolidar estos esfuerzos y asegurar su sostenibilidad a largo plazo. Es esencial mantener y expandir las políticas de protección y restauración del manglar, mediante programas de reforestación y regulación de actividades económicas que pueden impactar negativamente en este ecosistema.

Si bien es cierto que existe un protocolo para el monitoreo ecológico de manglares en Costa Rica (Sinac-UNA, 2020) esta investigación puede brindar aportes en cuanto a la inclusión de nuevos insumos para la validación con respecto a la zonificación de los humedales utilizando el índice MVI de Baloloy *et al.* (2020). Por lo tanto, este trabajo puede servir como una fuente de consulta para implementar actualizaciones a dicho protocolo.

Se sugiere crear programas de educación ambiental y participación comunitaria como elementos fundamentales para involucrar a las partes interesadas locales en la conservación y gestión sostenible del manglar y estero de Puntarenas. El gobierno local, Sinac y las asociaciones de desarrollo, entre otros, son actores clave para lograrlo.

Para mejorar la precisión de los análisis multitemporales del manglar, es fundamental utilizar imágenes satelitales de mayor resolución y tecnologías como drones, LIDAR y Radar. Además, es importante investigar los beneficios socioeconómicos de conservar el manglar y los efectos del cambio climático para desarrollar adaptaciones efectivas. Por otro lado, la metodología empleada puede guiar futuras investigaciones de conservación en diferentes regiones, ampliando el enfoque hacia la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Sin embargo, es necesario apoyar con financiamiento y recursos técnicos continuos para consolidar esfuerzos de protección y restauración, asegurando la sostenibilidad a largo plazo. Finalmente, establecer un monitoreo continuo y fomentar la educación ambiental y participación comunitaria es esencial para la gestión sostenible del manglar y estero de Puntarenas.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

6.1 BIBLIOGRAFÍA

- Alianza de Derecho Ambiental Mundial (ELAW). (s. f.). *Amenazas a los manglares*. Blog Eviromental Law Alliance Worldwide. <https://elaw.org/es/mangroves-threats>
- Alongi, D. M. (2002). Estado actual y futuro de los bosques de manglares del mundo. *Conservación del medio ambiente*, 29, 331-349. <https://www.cambridge.org/core/journals/environmental-conservation/article/abs/present-state-and-future-of-the-worlds-mangrove-forests/0E3D6B0DF6EE2E9DBD48582964AD492A>
- Álvarez Torres, B. (2022). *El manglar como elemento de resiliencia sistémica en la comunidad de puerto San Carlos, Baja California sur: un análisis de microescala*. (Tesis para optar por el grado de Maestría en Ciencias, Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. <https://bit.ly/4bVPQZu>
- Arguedas Marín, M. (2015). *Valoración económica de servicios ecosistémicos brindados por el manglar del Golfo de Nicoya, Costa Rica*. Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado como requisito para optar por el grado de Magister Scientiae en Socioeconomía Ambiental. Catie. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7202>
- Arrieta Sancho, A. L. (2020). *Caracterización del manglar de Jicaral, Puntarenas, como insumo básico para la elaboración de un plan de recuperación del ecosistema*. Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Biología con Énfasis en Manejo de Recursos Marinos y Dulceacuícolas. Universidad Nacional. <https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/19925>
- Baloloy, A. B.; Blanco, A. C.; Ana, R. R. C. S. y Nadaoka, K. (2020). Development and application of a new mangrove vegetation index (MVI) for rapid and accurate mangrove mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, 95-117. <https://bit.ly/2Tw2dcq>
- Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe CAF. (2023). *Manglares, barreras naturales en la lucha contra el cambio climático*. Blog digital CAF. <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2023/12/manglares-barreras-naturales-en-la-lucha-contra-el-cambio-climatico/>
- Barbier, E. B. *et al.* (2017). Evaluación económica de los servicios ecosistémicos de los manglares: implicaciones para la gestión sostenible. *Ecología Aplicada*, 25(1), 67-78.

- Barnes, E. (2022). *Manglares: una solución ante la crisis climática*. World Wildlife Fund. <https://bit.ly/3wZQTZS>
- Barrios, J. (2019). *La matriz de confusión y sus métricas-Inteligencia Artificial*. Blog Interactivo JuanBarrios.com. <https://www.juanbarrios.com/la-matriz-de-confusion-y-sus-metricas/>
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
- Blanco Manley, B. (2022). *Destrucción de manglares deja a Puntarenas sin su mejor escudo contra el cambio climático*. Blog de información Punto y Aparte. <https://bit.ly/4e6VXft>
- Braga Rocha, U. (2015). *El cambio en la morfología costera, los problemas y recomendaciones para una gestión integrada en Playa Azul, distrito de Tárcoles, Costa Rica*. (Tesis Maestría Académica en Gestión Integrada de Áreas Costeras Tropicales). Universidad de Costa Rica. Sistema de Estudios de Posgrado. <https://bit.ly/4dZyxbT>
- Burges, C. J. C. (1998). *A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition*. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2), 121-167. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1009715923555>
- Cabrera, E.; Galindo, G. y Vargas, C. (2011). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia, Ámbito nacional escalas gruesas y escala fina*. Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales. <https://observatorio.epacartagena.gov.co/protocolo-de-procesamiento-digital-de-imagenes-para-la-cuantificacion-de-la-deforestacion-en-colombia-v-2-0/>
- Campbell, J. B. y Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford press.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza Catie. (2022). *Manglares*. <https://www.catie.ac.cr/tag/manglares/>
- Chávez, P. S. J. (1996). Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.
- Chuvieco Salinero, E. (2010). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Editorial Ariel.
- Cifuentes, M.; Brenes, C.; Manrow, M. y Torres, D. (2014). *Dinámica de uso de la tierra y potencial de mitigación de los manglares del Golfo de Nicoya*. Conservación Internacional. <https://bit.ly/3wXWkIz>
- Cifuentes-Jara, M.; Brenes, C.; Leandro, P.; Molina, O.; Romero, T. E.; Torres, D. y Velásquez, S. (2018). *Manual centroamericano para la medición de carbono azul en manglares*. Catie. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8719>
- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37-46. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/001316446002000104>

- Conabio. (2022). *¿Por qué se pierde la biodiversidad?* Blog Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/biodiversidad/porque.html>
- Congalton, R.G. y Green, K. (1999). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Lewis Publishers. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780429052729/assessing-accuracy-remotely-sensed-data-russell-congalton-kass-green>
- Cortes, C. y Vapnik, V. (1995). Support-Vector Networks. *Machine Learning*, 20, 273-297.
- Cruz, E.; González, M. y Rangel, J. C. (2022). Técnicas de machine learning aplicadas a la evaluación del rendimiento ya la predicción de la deserción de estudiantes universitarios, una revisión. *Prisma Tecnológico*, 13(1), 77-87.
- Da Silva, C. J.; Insaurralde, J. A. y Cardozo, O. D. (2014). *Cartografía de coberturas del suelo mediante sensores remotos, de la ciudad de Resistencia, Argentina*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/21825>
- Da Silva, C. J.; Insaurralde, J. A. y Cardozo, O. D. (2014). Cartografía de coberturas del suelo mediante sensores remotos, de la ciudad de Resistencia. *Revista Geográfica Digital IGUNNE*. Facultad de Humanidades. <https://bit.ly/3UWWdFe>
- De la Cruz Burelo, F. (2023). *Procesos de cambio de la cobertura del ecosistema de manglar en la llanura costera del Golfo de México*. (Tesis para optar por el grado de Doctor en Filosofía). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. <https://bit.ly/4e1M7M2>
- Ehlers, M.; Greenlee, D.; Smith, T. y Star, J. (1991). Integration of remote sensing and GIS- Data and data access. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(6), 669-675.
- Ellison, J. C. y Stoddart, D. R. (1991). Mangrove Ecosystem Collapse during Predicted Sea-Level Rise: Holocene Analogues and Implications. *Journal of Coastal Research*, 7(1), 151-165. <https://journals.flvc.org/jcr/article/view/78431/75841>
- Fatoyinbo, T. E.; Simard, M. y Washington-Allen, R. A. (2008). Landscape-scale extent, height, biomass, and carbon estimation of Mozambique's mangrove forests with Landsat ETM+ and Shuttle Radar Topography Mission elevation data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G2). <https://bit.ly/4aHZbDd>
- García, E. y Martínez, A. (2020). Deforestación y fragmentación del hábitat en los manglares de Puntarenas: una evaluación retrospectiva. *Investigación Ambiental de Costa Rica*, 25(3), 78-89.
- García, J. y Willems, B. L. (2015). *Metodología para el Estudio de Bofedales en Cabeceras de Cuenca Usando Datos Imágenes de los Sensores TM, OLI a bordo de los Satélites Landsat - Caso Estudio: Bofedal*

Chunal, Cuenca Alta del río Chillón.

<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/fisica/article/view/20385/16899>

- Giri, C.; Ochieng, E.; Tieszen, L. L.; Zhu, Z.; Singh, A.; Loveland, T. y Masek, J. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154-159. <https://bit.ly/3R9HuFI>
- GISSER. (2024). *¿Qué es la teledetección?*. Blog interactivo GISSER. <https://gisser.tech/que-es-teledeteccion/>
- Granja Hidalgo, F. N. (2024). *Análisis multitemporal de los cambios de cobertura vegetal en el cantón Latacunga durante el periodo 2015-2023*. Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniera Ambiental. Universidad Técnica de Cotopaxi. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11905>
- Guadalupe, A. O. B. (2021). *Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal y usos mediante herramientas SIG y Teledetección en la Reserva Ecológica Mache Chindul (REMACH), 1996-2019 (Doctoral dissertation, Ecuador-PUCESE-Escuela de Gestión Ambiental)*. <https://bit.ly/3VnUc6o>
- Hernández-Blanco, M.; Costanza, R.; Cifuentes-Jara, M. (2018). *Valoración económica de los servicios ecosistémicos provistos por los manglares del Golfo de Nicoya*. Conservación Internacional. chrome-extension://efaidnbmnribpcajpcglclefindmkaj/https://www.sinac.go.cr/ES/docu/Inventario%20Nacional%20Humedales/Servicios%20Ecosist%C3%A9micos%20Manglar_2018.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2024). *Estadísticas y fuentes: Censos*. <https://inec.cr/estadisticas-fuentes/censos>
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Volumen 4, Agricultura, silvicultura y otros usos*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol4.html>
- International Business Machines Corporation (IBM). (2024). *¿Qué es el aprendizaje supervisado? Página Oficial*. <https://www.ibm.com/mx-es/topics/supervised-learning>
- Keenleyside, K. A.; Dudley, N.; Cairns, S. Hall, C. M. y Stolton, S. (2014). *restauración ecológica para áreas protegidas: Principios, directrices y buenas prácticas*. UICN. <https://www.iucn.org/es/resources/publicacion/restauracion-ecologica-para-areas-protegidas-principios-directrices-y-buenas>
- Lao Ramos, B. y Peláez Hernández, D. (2018). La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica para el manejo de las tierras. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(1), 54-65. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542018000100006

- Lee, S y., Primavera, J. H.; Dahdouh-Guebas, F., McKee, K.; Bosire, J. O.; Cannicci, S.; Diele, K.; Fromarf, F.; Koedman, N.; Marchard, C.; Mendelssohn, I.; Mukherjee, N. y Record, S. (2014). *Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment*. Global ecology and biogeography. <https://on.doi.gov/4c4ZlWF>
- Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W. y Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Longley, P. A.; Goodchild, M. F.; Maguire, D. J. y Rhind, D. W. (2015). *Geographic information systems and science*. John Wiley & Sons.
- López Soler, S. (2021). *Desplazamiento forzado y manglar en el Pacífico colombiano (Tumaco-Nariño) una valoración integral de la biodiversidad*. (Trabajo de Grado en la Modalidad de Tesis para optar al título de administrador ambiental). <http://hdl.handle.net/11349/25990>
- López-de-Ullibarri, I. y Fernández, S. P. (1999). Medidas de concordancia: el índice Kappa. *Cadernos de atención Primaria*, 6(4), 223-226. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2332301>
- Lozada, J. (2007). Situación actual y perspectivas del manejo de recursos forestales en Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 51(2), 195-218. https://www.researchgate.net/publication/32937551_Situacion_Actual_y_Perspectivas_del_Manejo_de_Recurso_Forestales_en_Venezuela
- Manrique, E. G. (1999). Índice de vegetación. Aplicación del NDVI. En *Teledetección. Avances y Aplicaciones. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España* (pp. 217-219).
- Marquet, P. A.; Rojas, M.; Stehr, A.; Farías, L.; González, H.; Muñoz, J. C.; Wagemann, E.; Rojas, C.; Rodríguez, I. y Hoyos, J. (2021). *Soluciones basadas en la naturaleza*. Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. <https://zenodo.org/records/5736938>
- Martínez Anguizola, M. A. (2019). *Análisis multi-temporal del uso de la tierra y sus efectos en el nivel de resiliencia en comunidades en la cuenca baja del Río Chico, Chiriquí, Panamá*. (Tesis para optar por el grado de Magister Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Martínez Martínez, M. A. (2022). *Caracterización del cambio global en los trópicos entre 1992 y 2015*. (Tesis para optar al grado y título de Maestría Académica en Geografía). Universidad de Costa Rica.
- Mena, M. (2012). *Análisis retrospectivo de la cobertura en los manglares Estero Morales y Cocoroca, en el Golfo de Nicoya, Puntarenas, Costa Rica*. Tesis Lic. en Ciencias geográficas con énfasis en Ordenamiento del Territorio. Heredia, Costa Rica. Universidad Nacional.

- Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (Minae). (2018). *Informe del estado del ambiente*. Capítulo 4. Políticas y acciones para el desarrollo sostenible. <https://ceniga.go.cr/informe-del-estado-ambiente/>
- Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (Minae). (2021). *Informe sobre el estado del ambiente en Puntarenas: tendencias y desafíos*.
- Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (Minae). (2024). *Sitio web oficial*. <https://www.minae.go.cr/>
- Montes de Oca, J. (2022). *Los manglares, primera línea de defensa contra el cambio climático*. Blog digital de Audubon. <https://www.audubon.org/es/news/los-manglares-primera-linea-de-defensa-contr-el-cambio-climatico>
- Muñoz Aguayo, P. (2013). *Apuntes de teledetección: índices de vegetación*. Biblioteca digital del Centro de Información de Recursos Naturales CIREN (Chile). <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26389>
- Nova-Bustos, N.; Guzmán-Sánchez, Y. y Guevara-Mora, M. (2022). *Estructura y cuantificación de basura acumulada en la zona interna del manglar de Puntarenas, Costa Rica*. Revista Forestal Mesoamericana Kurú.
- Oikos. (2023). *La importancia de la participación comunitaria en la conservación*. <https://www.oikonos.org/es/blog/la-importancia-de-la-participacion-comunitaria-en-la-conservacion>
- Olofsson, P.; Foody, G. M.; Herold, M.; Stehman, S. V.; Woodcock, C. E. y Wulder, M. A. (2014). *Good practices for assessing accuracy and estimating area of land change*. Remote Sensing of Environment, 148, 42-57. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425714000704>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). *Directrices para la gestión sostenible de los manglares en América Central y México*. Roma.
- Organización de las Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2020). *Estrategias para la conservación de los manglares y el desarrollo sostenible en Puntarenas: lecciones aprendidas y próximos pasos*.
- Pabón, J. A. R. y Senna, D. C. (2017). *Análisis de unidades de paisaje y evaluación de impacto ambiental como herramientas para la gestión ambiental municipal*. Caso de aplicación: Municipio de Tona, España. Luna Azul. <https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/3896/3608>
- Pauca-Tanco, A.; Ramos-Mamani, C.; Luque-Fernández, C. R.; Talavera-Delgado, C.; Villasante-Benavides, J. F.; Quispe-Turpo, J. P. y Villegas-Paredes, L. (2020). Análisis espacio temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el periodo 1986-2016. *Revista de Teledetección*, (55), 105-118. <https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/13325>

- Perea-Ardila, MA, Oviedo-Barrero, F. y Leal-Villamil, J. (2019). Cartografía de bosques de manglar mediante imágenes de sensores remotos: estudio de caso Buenaventura, Colombia. *Revista de Teledetección*, (53), 73-86. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-85962021000200027
- Pérez, D. M. (2023). *Metodología para determinar la turbiedad en el agua utilizando imágenes digitales*. (Proyecto de grado presentado como requisito parcial para aspirar al título de Magíster en Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira). <https://repositorio.utp.edu.co/items/9ec41982-5d62-46b0-ae3d-ca17f406eabd>
- Pontius, R. G.; Shusas, E. y McEachern, M. (2008). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 127(3-4), 144-165.
- Pontius, R.; Shusas, E. y McEachern, M. (2004). *Agriculture, Ecosystems and Enviroments*.
- Poveda-Sotelo, Y.; Bermúdez-Cella, M. A. y Gil-Leguizamón, P. (2022). Evaluación de métodos de clasificación supervisada para la estimación de cambios espacio-temporales de cobertura en los páramos de Merchán y Telecom, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 44(2), 51-72. https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-02832022000200051&script=sci_arttext
- Presidencia de la República de Costa Rica. (2021). *Arranca recuperación de humedal estero Puntarenas y manglares asociados*. Comunicado. <https://presidencia.gobiernocarlosalvarado.cr/comunicados/2021/09/arranca-recuperacion-de-humedal-estero-puntarenas-y-manglares-asociados/>
- Rodríguez, A. F. (2011). *Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos, estudio de caso piedemonte de Villavicencio, Meta*. (Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Geomática. Facultad de Ingeniería Agronómica). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8573>
- Rodríguez, S. (2022). Comunidad pesquera en Costa Rica restauró más de 140 hectáreas de manglar. En *Mongobay, Periodismo Ambiental Independiente de Latinoamérica*. <https://es.mongabay.com/2022/06/comunidad-pesquera-en-costa-rica-restaura-manglares-conservacion/>
- Romero-Berny, E. I.; Acosta-Velázquez, J.; Tovilla-Hernández, C.; Schmook, B. y Gómez-Ortega, R. (2016). Cambios de cobertura y fragmentación de manglares en la región del soconusco, Chiapas, México, 1994-2011. *Revista Geográfica De América Central*, 1(54), 153-169. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/7466>
- Rueda Calier, F.; Peñaranda Mallungo, L. A.; Velásquez Vargas, W. L. y Díaz Báez, S. A. (2015). Aplicación de una metodología de análisis de datos obtenidos por percepción remota orientados a la estimación de la productividad de caña para panela al cuantificar el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16(1), 25-40.

- Salazar Leiva, K. (2022). *Costa Rica rehabilita manglares de su Golfo de Nicoya*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. <https://www.catie.ac.cr/2022/10/11/costa-rica-rehabilita-manglares-de-su-golfo-de-nicoya/>
- Sánchez Peña, R. O. (1986). *Metodología descriptiva para determinar los posibles usos de las áreas de manglares y su aplicación en Coronado-Sierpe, Costa Rica*. (Tesis para optar por el grado de Magister Scientiae).
- Sánchez, R. *et al.* (2020). Impactos socioeconómicos de la pérdida de manglares en la región de Puntarenas. *Revista de Economía y Desarrollo*, 15(2), 112-125.
- Scholkopf, B. y Smola, A. J. (2002). *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. MIT Press.
- Segura Herrera, M. (2020). *Correlación entre la humedad del suelo y los índices NDVI y NDWI como indicativo del estrés hídrico en el cultivo de caña de azúcar (Saccharum Officinarum) en la variedad BC 001220, Ingenio Taboga 2019*. Ingeniería Agronómica con Énfasis en Riego y Drenaje, Universidad Técnica Nacional.
- Sinac-UNA. (2020). *Protocolo PRONAMEC: Protocolo para el Monitoreo Ecológico de Manglares en Costa Rica*. <https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/24918>
- Sistema Costarricense de Información Jurídica (SCIJ). (2024). *Sitio web oficial*. <https://www.pgrweb.go.cr/scij/>
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación (Sinac). (2018). *Plan General de Manejo del Humedal Estero Puntarenas y Manglares Asociados*. Puntarenas. Sistema Nacional de Áreas de Conservación, Área de Conservación Pacífico Central, Puntarenas, Costa Rica.
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación (Sinac). (2019). *Estrategia Regional para el Manejo y Conservación de los Manglares en el Golfo de Nicoya-Costa Rica-2019-2030*.
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación (Sinac). (2024). *Sitio web oficial*. <https://www.sinac.go.cr/ES/Paginas/default.aspx>
- Sistema Nacional de áreas de Conservación Sinac, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie) y Conservación Internacional. (2023). *Costa Rica: Mapa de Ecosistemas de Manglar 2021*. <https://bit.ly/3x1unzJ>
- Sobrino, J. A.; Jiménez-Muñoz, J. C. y Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434- 440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>

- Torres Aguirre, E. (2022). *Análisis temporal y espacial del dosel de bosque de manglar (Avicennia germinans, Laguncularia racemosa, Rhizophora mangle) en una laguna costera semiárida por medio de herramientas emergentes de teledetección y algoritmos de aprendizaje automático*. (Tesis para optar por el grado de Maestro en Ciencias. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Torres Barrán, A. (2019). *Support Vector Machines, Curso de aprendizaje automático para el INE*. <https://albertotb.com/curso-ml-R/Rmd/07-svm/07-svm.html#1>
- Torres Obregón, O. E. (2022). *Diseño de una metodología para el mapeo de la concentración de manglar en la bahía del distrito de Buenaventura del Valle del Cauca a partir de imágenes satelitales*. (Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería). Universidad del Valle, Colombia.
- Torres, J.; Pérez, L. y Gutiérrez, M. (2018). Impacto de la expansión urbana en los manglares de Puntarenas. *Revista de Ecología Costarricense*, 41(2), 45-56.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). *Decades of Mangrove Forest Change: What Does it Mean for Nature, People and the Climate?* <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/42254>
- Unriza Vargas, J. A. (2022). *Un modelo basado en sensores remotos e inteligencia artificial para la estimación de la degradación del bosque*. <http://hdl.handle.net/11349/33155>
- Uriarte Blake, C. N. y Orozco González, M. A. (2019). *Análisis de la dinámica de usos del suelo de la Reserva Natural Estero Real, mediante el uso de teledetección*. (Tesis para optar por el grado de Licenciada en Biología). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/handle/123456789/7683>
- Uribe Botero, E. (2015). *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*. Cepal. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/d969ecac-e7df-439a-8afb-6ce9cd3f5b93>
- Vapnik, V. N. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer-Verlag.
- Vides, M.; Sierra-Correa, P. C. y Cortés, L. (2012). *Gestión costera como respuesta al ascenso del nivel del mar: guía para administradores de la zona costera del Caribe*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-Invemar.
- Villatoro, B. (2021). *Uso de índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat 8 para monitoreo de humedad, como indicador de momento óptimo de cosecha en caña de azúcar*. Memoria presentación de resultados de investigación Zafra 2020 - 2021.
- Wolff, M.; Koch, V.; Chavarría, J. y Vargas, J. (1998). A trophic flow model of the Golfo de Nicoya, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 46. Supl., 6, 63-79.

- Yadav, S. (2023). *¿Qué es el truco del kernel en SVM? Preguntas de la entrevista que se relacionan con Kernel Trick*. Blog interactivo Medium. https://medium.com/@Suraj_Yadav/what-is-kernel-trick-in-svm-interview-questions-related-to-kernel-trick-97674401c48d
- Yoma, R.; Francke, S.; Carnieletto, C.; Rivera, H. y Nakagawa, M. (2008). *Informe técnico de la contribución de CONAF a la estrategia nacional de cuencas*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147702>

MATRIZ DE CONFUSIÓN E ÍNDICE KAPPA PARA IMAGEN ANALIZADA DE 2019											
CLASE	BOSQUES	PASTOS	CULTIVOS	HUMEDALES	ASENTAMIENTOS	AGUA	TIERRA DESNUDA	TOTAL	PRECISIÓN DEL USUARIO	KAPPA	
BOSQUES	11	0	0	0	0	0	1	12	0,916667	0	
PASTOS	1	14	0	0	1	0	0	16	0,875	0	
CULTIVOS	5	0	60	1	0	1	7	74	0,810811	0	
HUMEDALES	3	0	0	36	0	0	0	39	0,923077	0	
ASENTAMIENTOS	0	0	0	0	3	0	0	3	1	0	
AGUA	0	0	0	0	0	15	0	15	1	0	
TIERRA DESNUDA	10	1	2	1	1	0	24	39	0,615385	0	
TOTAL	30	15	62	38	5	16	32	198	0	0	
PRECISIÓN DEL PRODUCTOR	0,366667	0,933333	0,967742	0,947368	0,6	0,9375	0,75	0	0,823232	0	
KAPPA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,776675	

6.2.1 MATRIZ DE CAMBIO 1974-2024

MATRIZ DE CAMBIO 1974-1978					MATRIZ DE CAMBIO 1979-1989				
TRANSICIÓN	DESDE	HACIA	HECTÁREAS	BALANCE	TRANSICIÓN	DESDE	HACIA	HECTÁREAS	BALANCE
Pastos->Humedales	Pastos	Humedales	37,71	Ganancia	Pastos->Humedales	Pastos	Humedales	37,53	Ganancia
Cultivos->Humedales	Cultivos	Humedales	138,06	Ganancia	Cultivos->Humedales	Cultivos	Humedales	145,98	Ganancia
Humedales->Pastos	Humedales	Pastos	29,61	Pérdida	Humedales->Pastos	Humedales	Pastos	24,84	Pérdida
Humedales->Cultivos	Humedales	Cultivos	145,17	Pérdida	Humedales->Cultivos	Humedales	Cultivos	283,59	Pérdida
Humedales->Asentamientos	Humedales	Asentamientos	24,66	Pérdida	Humedales->Asentamientos	Humedales	Asentamientos	14,31	Pérdida
Humedales->Agua	Humedales	Agua	183,69	Pérdida	Humedales->Agua	Humedales	Agua	207	Pérdida
Humedales->Tierra Desnuda	Humedales	Tierra Desnuda	230,58	Pérdida	Humedales->Tierra Desnuda	Humedales	Tierra Desnuda	71,91	Pérdida
Asentamientos->Humedales	Asentamientos	Humedales	0,45	Ganancia	Asentamientos->Humedales	Asentamientos	Humedales	4,59	Ganancia
Agua->Humedales	Agua	Humedales	109,26	Ganancia	Agua->Humedales	Agua	Humedales	113,13	Ganancia
Tierra Desnuda->Humedales	Tierra Desnuda	Humedales	65,07	Ganancia	Tierra Desnuda->Humedales	Tierra Desnuda	Humedales	175,23	Ganancia
TOTAL				964,26	TOTAL				1078,11
MATRIZ DE CAMBIO 1989-1994					MATRIZ DE CAMBIO 1994-1999				
TRANSICIÓN	DESDE	HACIA	HECTÁREAS	BALANCE	TRANSICIÓN	DESDE	HACIA	HECTÁREAS	BALANCE
Bosques->Humedales	Bosques	Humedales	0,09	Ganancia	Bosques->Humedales	Bosques	Humedales	14,58	Ganancia
Pastos->Humedales	Pastos	Humedales	20,88	Ganancia	Pastos->Humedales	Pastos	Humedales	37,35	Ganancia
Cultivos->Humedales	Cultivos	Humedales	99	Ganancia	Cultivos->Humedales	Cultivos	Humedales	147,42	Ganancia
Humedales->Pastos	Humedales	Pastos	49,23	Pérdida	Humedales->Pastos	Humedales	Pastos	93,78	Pérdida
Humedales->Cultivos	Humedales	Cultivos	115,38	Pérdida	Humedales->Cultivos	Humedales	Cultivos	40,77	Pérdida
Humedales->Asentamientos	Humedales	Asentamientos	8,82	Pérdida	Humedales->Asentamientos	Humedales	Asentamientos	14,31	Pérdida
Humedales->Agua	Humedales	Agua	79,56	Pérdida	Humedales->Agua	Humedales	Agua	92,97	Pérdida
Humedales->Tierra Desnuda	Humedales	Tierra Desnuda	65,16	Pérdida	Humedales->Tierra Desnuda	Humedales	Tierra Desnuda	171,18	Pérdida
Asentamientos->Humedales	Asentamientos	Humedales	3,6	Ganancia	Asentamientos->Humedales	Asentamientos	Humedales	3,24	Ganancia
Agua->Humedales	Agua	Humedales	105,21	Ganancia	Agua->Humedales	Agua	Humedales	127,71	Ganancia
Tierra Desnuda->Humedales	Tierra Desnuda	Humedales	52,29	Ganancia	Tierra Desnuda->Humedales	Tierra Desnuda	Humedales	44,37	Ganancia
TOTAL				599,22	TOTAL				787,68
MATRIZ DE CAMBIO 1999-2014					MATRIZ DE CAMBIO 2014-2019				
TRANSICIÓN	DESDE	HACIA	HECTÁREAS	BALANCE	TRANSICIÓN	DESDE	HACIA	HECTÁREAS	BALANCE
Pastos->Humedales	Pastos	Humedales	209,34	Ganancia	Pastos->Humedales	Pastos	Humedales	64,35	Ganancia
Cultivos->Humedales	Cultivos	Humedales	118,89	Ganancia	Cultivos->Humedales	Cultivos	Humedales	149,31	Ganancia
Humedales->Bosques	Humedales	Bosques	7,74	Pérdida	Humedales->Bosques	Humedales	Bosques	0,45	Pérdida
Humedales->Pastos	Humedales	Pastos	73,53	Pérdida	Humedales->Pastos	Humedales	Pastos	49,77	Pérdida
Humedales->Cultivos	Humedales	Cultivos	128,34	Pérdida	Humedales->Cultivos	Humedales	Cultivos	62,19	Pérdida
Humedales->Asentamientos	Humedales	Asentamientos	2,52	Pérdida	Humedales->Asentamientos	Humedales	Asentamientos	10,08	Pérdida
Humedales->Agua	Humedales	Agua	113,4	Pérdida	Humedales->Agua	Humedales	Agua	80,19	Pérdida
Humedales->Tierra Desnuda	Humedales	Tierra Desnuda	68,58	Pérdida	Humedales->Tierra Desnuda	Humedales	Tierra Desnuda	111,6	Pérdida
Asentamientos->Humedales	Asentamientos	Humedales	8,73	Ganancia	Asentamientos->Humedales	Asentamientos	Humedales	2,7	Ganancia
Agua->Humedales	Agua	Humedales	140,58	Ganancia	Agua->Humedales	Agua	Humedales	55,17	Ganancia
Tierra Desnuda->Humedales	Tierra Desnuda	Humedales	158,49	Ganancia	Tierra Desnuda->Humedales	Tierra Desnuda	Humedales	55,89	Ganancia
TOTAL				1030,14	TOTAL				641,7
MATRIZ DE CAMBIO 2019-2024									
TRANSICIÓN	DESDE	HACIA	HECTÁREAS	BALANCE					
Bosques->Humedales	Bosques	Humedales	0,18	Ganancia					
Pastos->Humedales	Pastos	Humedales	250,02	Ganancia					
Cultivos->Humedales	Cultivos	Humedales	169,29	Ganancia					
Humedales->Bosques	Humedales	Bosques	0,72	Pérdida					
Humedales->Pastos	Humedales	Pastos	103,05	Pérdida					
Humedales->Cultivos	Humedales	Cultivos	74,52	Pérdida					
Humedales->Asentamientos	Humedales	Asentamientos	8,01	Pérdida					
Humedales->Agua	Humedales	Agua	74,43	Pérdida					
Humedales->Tierra Desnuda	Humedales	Tierra Desnuda	25,74	Pérdida					
Asentamientos->Humedales	Asentamientos	Humedales	15,75	Ganancia					
Agua->Humedales	Agua	Humedales	134,28	Ganancia					
Tierra Desnuda->Humedales	Tierra Desnuda	Humedales	170,91	Ganancia					
TOTAL			1026,9						