

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**CRONOSECUENCIA DE MANGLARES EN LOS
HUMEDALES NÍSPERO Y SAN BUENAVENTURA-
COLORADO, GOLFO DE NICOYA, COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON
ÉNFASIS EN CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS
FORESTALES CON EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

ANA LUCÍA CORDERO MURILLO

CARTAGO, COSTA RICA

ENERO, 2022

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**CRONOSECUENCIA DE MANGLARES EN LOS
HUMEDALES NÍSPERO Y SAN BUENAVENTURA-
COLORADO, GOLFO DE NICOYA, COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON
ÉNFASIS EN CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS
FORESTALES CON EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

ANA LUCÍA CORDERO MURILLO

CARTAGO, COSTA RICA

ENERO, 2022

Cronosecuencia de manglares en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica

Mangrove chronosequence in Níspero and San Buenaventura-Colorado Wetlands, Gulf of Nicoya, Costa Rica

Ana Lucía Cordero Murillo*

RESUMEN

El ecosistema de manglar es uno de los más productivos en biomasa en todo el mundo. Los manglares tienen un gran valor ambiental y económico y brindan importantes servicios ecosistémicos. El presente estudio evaluó en una cronosecuencia la diversidad, estructura, composición florística y contenido de carbono en los componentes de árboles, regeneración, madera caída, raíces y suelo de los manglares, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, ubicados en el Golfo de Nicoya, Costa Rica. Además, se relacionó las edades de los sitios con la estructura, la composición florística y los parámetros fisicoquímicos del agua intersticial de pH, salinidad y potencial redox, utilizando análisis multivariados. En el manglar de referencia la especie más importante fue *Rhizophora mangle*, mientras que en los rangos de edad de 1 a 10 años y de 11 a 20 años fue *Laguncularia racemosa*. El área basal promedio en el manglar de referencia fue de 19,01 m²/ha, en el rango de edad de 1 a 10 años de 0,35 m²/ha y de 11 a 20 años fue de 0,16 m²/ha. El contenido de carbono fue considerablemente mayor en el manglar de referencia y el componente que más cantidad de carbono aporta al ecosistema es el suelo. El manglar de referencia se relaciona de forma negativa con la variable del potencial redox y de forma positiva con los valores de pH. Además, la salinidad y pH se correlacionan de forma negativa y positiva respectivamente, con los sitios en restauración. Los resultados obtenidos indican que la regeneración de estos sitios está ocurriendo de forma distinta en cada uno de ellos y la edad de abandono de estos no determina su composición, si no las condiciones de degradación en las que quedan estos sitios.

Palabras clave: manglares, cronosecuencia, almacenamiento de carbono, Golfo de Nicoya, servicios ecosistémicos.

ABSTRACT

The mangrove ecosystem is one of the most productive on Earth. Mangrove forests environmental and economic value is very high, and they provide important environmental services. The present study assessed in a chronosequence, the diversity, structure, composition and carbon storage (in trees, saplings, woody debris, roots and soil) of mangroves, in Nispero and San Buenaventura-Colorado Wetlands, Gulf of Nicoya, Costa Rica. In addition, the age of the sites was related to the structure, floristic composition, and interstitial water physico-chemical parameters of pH, salinity and oxidation-reduction potential (ORP), using multivariate analysis. In the intact mangrove the most important specie was *Rhizophora mangle*, while in the age ranges of 1 to 10 years and 11 to 20 years was *Laguncularia racemosa*. Mean basal area in the intact mangrove was 19,01 m²/ha, from 1 to 10 years was 0,35 m²/ha and from 11 to 20 this value was 0,16 m²/ha. Carbon stocks were considerably higher in the intact mangrove and soil was the component with more carbon storage. According to the multivariate analysis, the intact mangrove was related in a negative way with ORP and in a positive way with pH. Salinity and pH were correlated in a negative and positive way respectively, with restoration sites. The results in this study indicate that recovery in these sites is happening in a very different way in each one of them and the lapse of time since they were abandoned, doesn't determine their composition, but the conditions of degradation in which these places were after the land-cover changes.

Keywords: mangroves, chronosequence, carbon storage, Golfo de Nicoya, environmental services.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

*A.L. Cordero Murillo, “Cronosecuencia de manglares en los Humedales Nispero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica”, Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2021.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo Final de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador integrado por MAP. Luis Acosta Vargas, Ing. Danilo Torres Gómez y M. Sc. Jorge Arturo Pineda Gómez, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal con énfasis en Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Luis Guillermo Acosta Vargas MAP.

Director de tesis

Ing. Danilo Torres Gómez

Lector

Jorge Arturo Pineda Gómez M. Sc

Lector

Dorian Carvajal Vanegas

Coordinador Trabajos Finales de
Graduación



Ana Lucía Cordero Murillo

Estudiante

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, especialmente a mi madre Ana Patricia, una de las personas más valientes que conozco, quien siempre me ha brindado su amor y me ha enseñado a dar mi mayor esfuerzo incluso cuando las circunstancias son difíciles.

A abuelita Lucía y abuelito Juanra, a abuelita Flory y abuelito Lalo. Ellos han sido una gran fuente de inspiración en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, mis hermanos y toda mi familia, por siempre apoyarme y darme motivación hasta este momento.

A mi tutor, el profesor Luis Acosta Vargas, por todo su apoyo, paciencia y conocimiento brindado, no solo durante este proceso, sino también durante mis años en la universidad; y por confiar en mis capacidades para realizar este trabajo.

A Jorge Pineda Gómez y Danilo Torres Gómez, por darme la oportunidad de realizar este trabajo con ellos y brindarme las condiciones necesarias para llevarlo a cabo. Por la guía y ayuda necesaria durante el trabajo de campo, por todo el conocimiento que me compartieron y los consejos que me dieron.

A Jair Granados, por toda su ayuda durante el trabajo de campo y en el análisis de los datos. Su apoyo fue sumamente valioso para mí.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Forestal que fueron parte de mi formación y me dieron las herramientas y el conocimiento necesario para poder llegar hasta esta etapa.

A cada uno de mis amigos, por ser tan especiales. A Valeria, Marlon y Raquel por todos los momentos únicos que hemos compartido a lo largo de estos años. A Maureen, por su compañía y apoyo, por su disposición a siempre escucharme. Y muy especialmente a Adriana, por estar siempre conmigo en los buenos y malos momentos, por darme los consejos y la motivación necesaria para seguir adelante, por tantos momentos lindos y divertidos que vivimos juntas.

A todas aquellas personas que de una u otra forma han sido de ayuda durante este proceso.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
MATERIAL Y MÉTODOS	4
Área de estudio	4
Diseño de muestreo	5
Estructura del manglar, diversidad y composición florística	6
Estimación de contenido de carbono almacenado	7
Parámetros fisicoquímicos del agua intersticial	11
Análisis de los datos	12
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
Estructura del manglar, diversidad y composición florística	13
Estimación de contenido de carbono almacenado	21
Relación de las edades con la estructura, la composición florística y los parámetros fisicoquímicos del agua intersticial	24
Acciones para la restauración del manglar de Humedales Níspero y San Buenaventura- Colorado, Golfo de Nicoya	30
CONCLUSIONES	31
RECOMENDACIONES	32
REFERENCIAS	33

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Año de cierre de las actividades de aprovechamiento de cada uno de los sitios en estudio, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.....	6
Cuadro 2. Ecuaciones alométricas utilizadas para calcular las existencias de carbono a nivel de ecosistema en manglares del Golfo de Nicoya, Costa Rica.	9
Cuadro 3. Densidades de madera reportadas para especies comunes de mangle y otras especies encontradas.	10
Cuadro 4. Índice de Valor de Importancia (IVI) para las especies presentes por rango de edad en una cronosecuencia, de los árboles con diámetro mayor a 5 cm, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	14
Cuadro 5. Índice de Valor de Importancia (IVI) para las especies presentes por rango de edad en una cronosecuencia, para la regeneración ($d < 5$ cm), en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	15
Cuadro 6. Número de individuos (N/ha) promedio por rango de edad en una cronosecuencia, para los árboles mayores a 5 cm y para la regeneración, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	16
Cuadro 7. Número de individuos por especie (N/ha) por pisos de altura presentes en el manglar de referencia, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	21
Cuadro 8. Valores de las variables fisicoquímicas del agua intersticial en cada una de las parcelas en cada rango de edad, para los sitios de los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	28
Cuadro 9. Salidas del análisis estadístico en R de los modelos generales lineales simplificados de la influencia de las variables ambientales en el área basal de la regeneración para los sitios de los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	28

Cuadro 10. Salidas del análisis estadístico en R de los modelos generales lineales 1simplificados de la influencia de las variables ambientales en el área basal de árboles con diámetros mayores a 5 cm para los sitios de los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	29
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado y de las parcelas de muestreo utilizadas en este estudio. Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	4
Figura 2. Diseño de las parcelas de medición anidadas utilizados en el estudio. Fuente: (Cifuentes-Jara et al., 2018).	8
Figura 3. Representación del plano de intersección de 12 m de largo utilizado para medir madera caída en bosques de manglar. Fuente: (Cifuentes-Jara et al., 2018).	8
Figura 4. Medidor multiparámetro portátil HI98194 con sonda utilizado en los muestreos de agua intersticial en los humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	11
Figura 5. Número de individuos promedio (N/ha) según categoría diamétrica, por rango edad en una cronosecuencia, para los árboles con diámetro mayor a 5 cm, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	17
Figura 6. Área basal (m ² /ha) de los árboles mayores a 5 cm de diámetro, según los diferentes rangos de edad en una cronosecuencia, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	18
Figura 7. Número de individuos (N/ha) por pisos de altura y según rango de edad en una cronosecuencia, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	20
Figura 8. Existencias de carbono (Mg/ha) en el manglar de referencia y rangos de edad para una cronosecuencia evaluando los componentes de madera caída, regeneración, árboles, raíces y sedimento, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.	23

Figura 9. Relación de las variables fisicoquímicas del agua intersticial y de la edad para los sitios en estudio por medio de un análisis de componentes principales, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021. Los colores representan: Azul: manglar de referencia, Rojo: 1-5 años, Fucsia: 6-10 años, Amarillo: 11-15 años, Verde claro: 16-20 años.....24

Figura 10. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) según los rangos de edad, tomando en cuenta la abundancia de regeneración de especies presentes en cada uno y las variables fisicoquímicas del agua intersticial, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021. Los colores representan: Azul: manglar de referencia, Rojo: 1-5 años, Fucsia: 6-10 años, Amarillo: 11-15 años, Verde claro: 16-20 años.....26

INTRODUCCIÓN

Los manglares son ecosistemas que se ubican en las zonas intermareales de las costas tropicales y subtropicales. Poseen una vegetación que presenta adaptaciones morfológicas, fisiológicas y reproductivas que les permiten adaptarse y sobrevivir en condiciones de salinidad, inundación, fuertes vientos y altas temperaturas (Zaldívar-Jiménez et al., 2010). Asimismo, son uno de los ecosistemas más productivos (biomasa) en el mundo y poseen un gran valor ambiental y económico. Algunos de estos servicios son: ser barreras naturales contra tsunamis e inundaciones, evitan la erosión de la costa, sirven de refugio para la biodiversidad, entre otros (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013). Además de esto, forman parte importante para los ingresos económicos de los pueblos cercanos a la costa, ya que proveen alimento como los peces y algunos invertebrados, materia prima como leña y madera, entre otros (Hernández-Blanco et al., 2018).

Uno de los servicios ambientales más importante es su gran potencial para secuestrar y almacenar carbono (Cifuentes-Jara et al., 2018) y pueden almacenarlo con una de las densidades más altas, en comparación con otros bosques en el mundo (Donato et al., 2011; Sidik et al., 2019). Manrow (2011), menciona que las reservas de biomasa y carbono presentes en los manglares de Gandoca y Moín, superan las reservas reportadas para bosques secundarios y primarios de Costa Rica, por lo que cumplen un importante papel en la adaptación y mitigación contra el cambio climático.

Sin embargo, gran cantidad de área de manglares en el mundo se ha ido perdiendo debido al desarrollo de la acuicultura, la deforestación, la desviación de los cauces de agua dulce, entre otros (Hernández-Blanco et al., 2018). Lo anterior ha ocasionado que la estabilidad de estos ecosistemas se encuentre amenazada por la actividad del ser humano y generalmente, no son tomados en cuenta a la hora de realizar esfuerzos de ordenamiento territorial o restauración de ambientes naturales (Cifuentes-Jara et al., 2014). En Costa Rica, los manglares están protegidos por la Ley Forestal N° 7575. Sin embargo, existen comunidades que dependen del aprovechamiento de los servicios de estos ecosistemas. La Política Nacional de Humedales 2017-2030 procura desarrollar procesos de gestión local participativa de estos ecosistemas para lograr su conservación y a la vez un uso sostenible con una distribución

justa de sus beneficios, que permita el funcionamiento ecológico de los ecosistemas de manglar (SINAC, 2017).

Para Costa Rica, los manglares del Golfo de Nicoya representan el 36% del área de manglares del país (BIOMARCC, 2012). El Golfo de Nicoya es un sitio importante para el cultivo de camarón al punto que, es considerado uno de los más eficientes para la producción de esta especie (Valverde-Moya y Alfaro-Montoya, 2013). Aunado a esta actividad, la producción de sal que se desarrolla en la zona también ha modificado y alterado este ecosistema a lo largo de los años (SINAC, 2019).

El Área de Conservación Arenal Tempisque, otorgó permisos de uso para la producción camaronera y salinera. No obstante, algunos ya vencieron o incurrieron en actos que ocasionaron el cierre de estos, por lo cual, el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) no amplió su vigencia (Pineda y Vega, 2018). Esto ha ocasionado que los sitios hayan sido abandonados después de realizadas las actividades de aprovechamiento y se han ido recuperando o regenerando de forma distinta de acuerdo con las condiciones antropogénicas en las que quedaron.

De acuerdo con lo anterior, se esperaría que conforme aumente la edad de abandono de los sitios, se propicie un desarrollo mayor de la vegetación, la cual a su vez va a repercutir en una mayor composición florística, diversidad y almacenamiento de carbono. Por esta razón, se propone el presente estudio, que tiene como objetivo evaluar en una cronosecuencia la diversidad, estructura, composición florística y contenido de carbono de los manglares, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, ubicados en el Golfo de Nicoya, Costa Rica, con el fin de buscar y proponer acciones que ayuden a la regeneración de estos sitios y a la recuperación de los servicios ecosistémicos y beneficios que brindan.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar en una cronosecuencia la diversidad, la estructura, la composición florística y el contenido de carbono de los bosques de manglar en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica.

Objetivos específicos

1. Analizar la diversidad, estructura y composición florística de los bosques de manglar según su edad en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado.
2. Analizar el contenido de carbono en árboles, regeneración, madera caída, raíces y suelo, según edad en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado.
3. Relacionar las edades de los bosques de manglar con la diversidad, la estructura, la composición y los parámetros fisicoquímicos del agua intersticial en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en los manglares que se encuentran en los Humedales Nispero y San Buenaventura-Colorado, localizados en la costa noreste de la parte interna del Golfo de Nicoya, Costa Rica, entre la desembocadura del Río Tempisque y el Río Abangares (Figura 1). Las comunidades de Colorado y San Buenaventura del cantón de Abangares y la comunidad de Nispero del cantón de Cañas de la provincia de Guanacaste, son las principales dependientes de los recursos que brindan estos ecosistemas (SINAC, 2019). Es por esta razón, que el SINAC mediante las oficinas administrativas del Refugio Nacional de Vida Silvestre Cipancí (RNVSC) del Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT), administra el manejo y conservación de estos humedales (Pineda y Vega, 2018; SINAC, 2019).

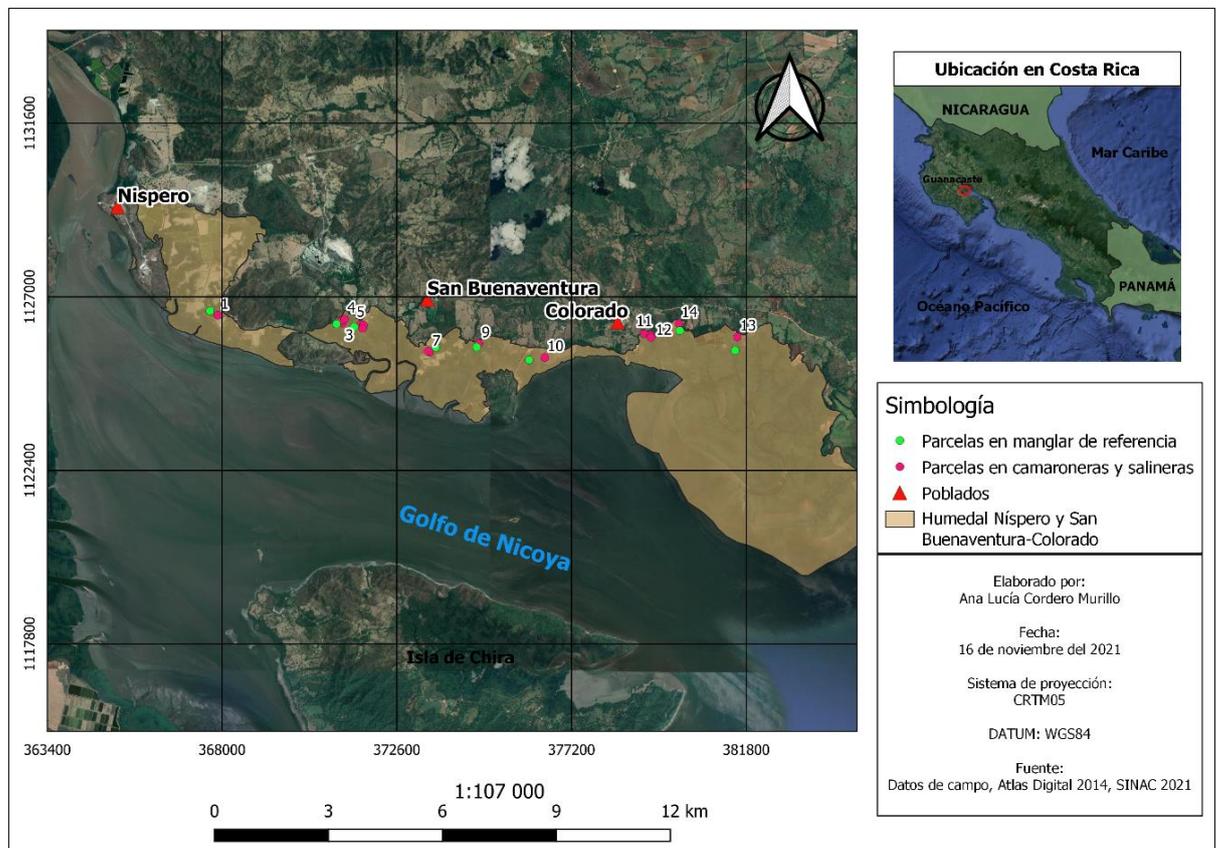


Figura 1. Ubicación de los Humedales Nispero y San Buenaventura-Colorado y de las parcelas de muestreo utilizadas en este estudio. Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

En la región predominan las zonas de vida del Bosque Seco Tropical (bs-T) y Bosque Húmedo Premontano Bajo (bh-PB) (INDER, 2016). La temperatura media anual oscila entre los 26 y 28 °C (SINAC, 2013) y se encuentra entre los 0 y 300 msnm (INDER, 2015). El lugar se caracteriza por presentar una estación seca con precipitaciones anuales entre 1400 y 2000 mm (SINAC, 2019).

En estos ecosistemas se pueden encontrar rodales puros de una sola especie de mangle y parches con una mezcla de especies a su alrededor (SINAC, 2019). Las especies de mangle reportadas para el sitio son *Rhizophora mangle*, *Rhizophora racemosa*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus*, *Pelliciera racemosa*, *Avicennia bicolor* y *Avicennia germinans* (SINAC, 2013; SINAC, 2019). En estos sitios, cuando se crea un claro debido a la caída natural o la corta de un árbol, las especies del género *Rhizophora* y *Avicennia* son las que colonizan, ya que tienen gran capacidad para producir propágulos (Pineda y Vega, 2018).

Diseño de muestreo

Se utilizó la metodología descrita en el Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares de Kauffman et al. (2013) y el Manual centroamericano para inventarios de Carbono Azul de Cifuentes-Jara et al. (2018). Además, se utilizaron datos ya existentes del trabajo realizado por Pineda (2021).

Se realizaron muestreos en 11 sitios que anteriormente eran utilizados para la producción de camarón y sal y que actualmente se encuentran cerrados. Además, para conocer el estado del manglar antes de las perturbaciones, se muestreó el manglar intacto o de referencia en ocho sitios. En los sitios se establecieron parcelas de muestreo circulares anidadas de 7 m de radio (153,94 m²) de forma aleatoria. La información de las parcelas se utilizó para determinar la diversidad, la estructura del manglar, la composición florística y el carbono almacenado. Para su análisis en una cronosecuencia, las parcelas establecidas en estos sitios se agruparon por rangos de edad de la siguiente manera: de 1 a 10 años: 8 parcelas, de 11 a 20 años: 9 parcelas y en el manglar de referencia: 8 parcelas. (Cuadro 1). Además, se midieron los parámetros fisicoquímicos de salinidad, pH y potencial redox del agua intersticial.

Cuadro 1. Año de cierre de las actividades de aprovechamiento de cada uno de los sitios en estudio, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

Sitio	Año de cierre
Sitio 1	2008
Sitio 3	2010
Sitio 4	2004
Sitio 5	2016
Sitio 7	2021
Sitio 9	2004
Sitio 10	2004
Sitio 11	2009
Sitio 12	2014
Sitio 13	2015
Sitio 14	2009

El Cuadro 1 resume los sitios estudiados y el año en el que se cerró el aprovechamiento en cada uno. La numeración de los sitios se hizo de forma consecutiva para efectos del presente estudio. Sin embargo, algunos de los sitios, por diversos motivos, se decidió no tomarlos en cuenta en el muestreo, razón por la cual no están representados en este cuadro ni en la demás información que se refiera a los sitios evaluados en este estudio.

Estructura del manglar, diversidad y composición florística

En cada parcela circular anidada (Figura 2), se midieron los árboles con un diámetro mayor o igual a 5 cm. El diámetro se midió a 1,30 m de altura sobre el suelo y en caso de que existiera presencia de raíz fulcrea o alguna irregularidad en el fuste, la medición se realizó a 30 cm por encima de estas. Se tomó datos de altura total y se hizo la identificación taxonómica de cada individuo para los cálculos de estructura y composición florística

Para la estructura horizontal, se realizó el cálculo del área basal (G) y número de individuos (N) por hectárea, la distribución diamétrica por hectárea del número total de individuos y el Índice de Valor de Importancia (IVI) de las especies presentes en cada estrato establecido por rango de edad. Para la estructura vertical, se realizó la distribución de clases de altura

definidas de acuerdo con las categorías de la Unión Internacional de Organizaciones Forestales (IUFRO), la cual define tres estratos de altura a partir de la altura superior del dosel de cada sitio, siendo el piso superior: altura $\geq 2/3$ de la altura superior; piso medio: $2/3 > \text{altura} \geq 1/3$ de la altura superior; piso inferior: altura $< 1/3$ de la altura superior del vuelo.

Estimación de contenido de carbono almacenado

Para la estimación del contenido de carbono almacenado, se evaluaron los componentes de árboles, regeneración, madera caída, raíces y suelo/sedimento. A continuación, se detalla la forma en la que se recolectaron los datos en campo para cada uno de estos componentes.

Árboles: en cada parcela circular anidada (Figura 2), se midieron los árboles con un diámetro mayor o igual a 5 cm. El diámetro se midió a 1,30 m de altura sobre el suelo y en caso de que existiera presencia de raíz fulcrea o alguna irregularidad en el fuste, la medición se realizó a 30 cm por encima de estas. Se determinó si el árbol estaba vivo o muerto y se clasificó en tres categorías, según el estado de descomposición de cada árbol: estado 1 (97,5 %): el árbol asemeja a un árbol vivo sin hojas; estado 2 (80 %): árbol con ramas secundarias y primarias; estado 3 (50 %): el árbol no tiene ramas. (Cifuentes-Jara et al., 2018).

Regeneración: para recolectar los datos de regeneración, se utilizaron subparcelas de 2 m de radio ($12,56 \text{ m}^2$) (Figura 2). Se midió e identificó todos los individuos con una altura mayor a 1,3 m y con diámetros menores a 5 cm.

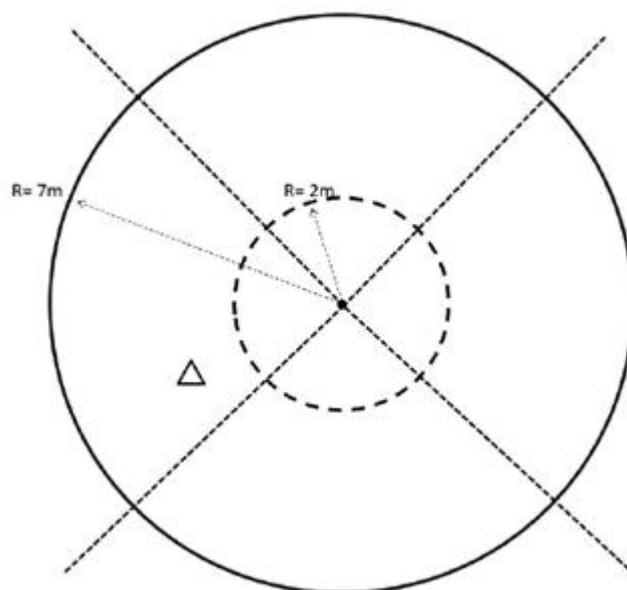


Figura 2. Diseño de las parcelas de medición anidadas utilizados en el estudio. Fuente: (Cifuentes-Jara et al., 2018).

Madera caída: para la medición de la madera caída se utilizó la metodología de plano de intersección. A lo largo de cuatro transectos de medición de 12 m de longitud y hasta 2 m de altura, se caracterizó la madera en dos categorías de diámetro: desde los 2 hasta los 5 m del transecto se midieron las piezas con diámetro $\geq 2,5$ cm a diámetro $< 7,5$ cm (piezas medianas) y a lo largo de todo el transecto, se midieron piezas con $d \geq 7,5$ cm (piezas grandes) (Figura 3). Los planos de intersección estuvieron orientados hacia los puntos NE, NO, SE y SO e iniciaron en el centro de cada parcela circular (Figura 3). A cada pieza de madera con diámetro mayor o igual a 2,5 cm se le asignó una categoría de descomposición: sólida, cuando al golpear la madera con un machete esta permanece intacta; intermedia, cuando el machete se hunde ligeramente y podrida; al hundirse o deshacer al contacto.



Figura 3. Representación del plano de intersección de 12 m de largo utilizado para medir madera caída en bosques de manglar. Fuente: (Cifuentes-Jara et al., 2018).

Sedimento/suelo: para realizar los análisis de carbono correspondientes, se tomaron muestras de suelo utilizando un barreno para suelo no consolidado, en un punto de muestreo ubicado de forma aleatoria dentro de cada parcela circular. Estas muestras se extrajeron en intervalos de 0-15, 15-30, 30-50, 50-100 y 100-200 cm de profundidad. Para determinar la densidad aparente del suelo, se tomó una muestra del centro de cada intervalo de profundidad. Luego, el material restante se homogenizó y se tomó una submuestra entre 100 y 200 g, que se llevó al laboratorio y fue secada en horno durante 24 horas a 105°C, para determinar el carbono por medio el método de combustión seca total.

Para calcular la biomasa de los árboles, la regeneración y las raíces, se utilizaron ecuaciones alométricas por especie (Cuadro 2), las cuales consisten en un método no destructivo que utiliza los datos de diámetro tomados en las parcelas de 2 y 7 m de radio para relacionar matemáticamente estas dimensiones de los árboles con sus valores equivalentes de biomasa, valores que fueron extrapolados a hectárea. Para calcular la biomasa de árboles muertos en pie se utilizó un factor de corrección, según su estado de descomposición (íntacto; 97,5 %; 80 % y 50%)

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas utilizadas para calcular las existencias de carbono a nivel de ecosistema en manglares del Golfo de Nicoya, Costa Rica.

Especie	Ecuación	Fuente
<i>Avicennia germinans</i> y <i>A. bicolor</i>	$B = 0.0942 * D^{2.54}$	Imbert y Rollet (1989)
<i>Pelliciera rhizophorae</i>	$B = 0.0942 * D^{2.54}$	Imbert y Rollet (1989)
<i>Rhizophora racemosa</i>	$B = 0.128 * D^{2.6}$	Fromard et al. (1998)
<i>Rhizophora mangle</i>	$B = 0.722 * D^{1.731}$	Smith y Whelan (2006)
<i>Laguncularia racemosa</i> y otras especies	$B = \rho * \text{Exp}(-1.349 + 1.98 * \text{Ln}(D) + 0.207 * \text{Ln}(D)^2 - 0.0281 * \text{Ln}(D)^3)$	Chave et al. (2005)
Raíces manglares	$B_{\text{raíces}} = 0.199 * \rho^{0.899} * D^{2.22}$	Komiyama et al. (2008)

D: diámetro (cm); ρ : gravedad específica de la madera (g/cm³); B: biomasa sobre el suelo (kg/árbol).

Cuadro 3. Densidades de madera reportadas para especies comunes de mangle y otras especies encontradas.

Especie	Densidad de la madera (g/cm ³)			
	Zanne et al., 2009.	Chave et al., 2006.	Monsalve y Ramírez 2015	Promedio
<i>R. mangle</i>	1,05; 0,89; 0,84; 0,904; 0,88; 0,81; 0,91	0,91		0,899
<i>R. racemosa</i>	0,88; 0,999; 0,92	0,88		0,920
<i>A. germinans</i>	0,9; 0,75; 0,67; 0,77; 0,792	---		0,776
<i>L. racemosa</i>	0,60; 0,62	0,61		0,610
<i>C. erectus</i>	1,00; 0,69	1,00		0,897
<i>P. rhizophorae</i>	----	----	0,54	
<i>Avicennia sp.</i>	----	0,578		
<i>Tabebuia sp.</i>	----	0,772		

La biomasa de la madera caída se calculó con las fórmulas consideradas por Cifuentes-Jara et al. (2018), que toman en cuenta la gravedad específica de la madera en descomposición (sólido: 0,5 g/cm³; intermedio: 0,35 g/cm³ y podrido: 0,20 g/cm³) y el largo de los transectos.

Para realizar el cálculo del carbono en el suelo, se utilizaron los datos químicos obtenidos a partir de los análisis realizados en el laboratorio, multiplicando el porcentaje de carbono por el intervalo de profundidad (cm) y por la densidad aparente (g*cm³). Para obtener la existencia total de carbono en el suelo hasta la profundidad muestreada, se realizó la sumatoria de los contenidos de carbono por intervalo de profundidad para cada punto de muestreo.

Para calcular el carbono total del ecosistema de manglar, lo primero que se hizo fue convertir los datos de biomasa a carbono de cada uno de los componentes (que fueron convertidos a Mg/ha), y luego, multiplicando este dato de biomasa por la concentración de carbono de cada componente del ecosistema. La información más reciente sugiere que el contenido de carbono en la biomasa ronda alrededor de 0,47 y varía por especie y componente del ecosistema (Cifuentes-Jara et al., 2018). Para la especie *R. mangle* se utilizó un factor de conversión de 47,52%; para *Pelliciera rhizophorae* de 46,67%; para otras especies de 47% y para las raíces un factor de 39%. Luego de hacer esta conversión, se hizo la sumatoria del carbono almacenado en cada componente.

Parámetros fisicoquímicos del agua intersticial

Se utilizó un medidor multiparámetro portátil HI98194 (Figura 4) para la medición de datos de salinidad, pH y potencial redox. Esta medición se hizo tomando una muestra de agua intersticial en un punto de forma aleatoria dentro de cada una de las parcelas de muestreo, a aproximadamente 40 cm de profundidad y cuando la marea estaba baja. Por las condiciones de compactación del suelo en las que se encuentran estos sitios, no fue posible obtener muestra de agua intersticial en la parcela 1 del sitio 1 y en la parcela 1 del sitio 5.



Figura 4. Medidor multiparámetro portátil HI98194 con sonda utilizado en los muestreos de agua intersticial en los humedales Nispero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

Análisis de los datos

Para analizar la estructura del manglar y su composición florística, además del contenido carbono almacenado, se aplicó estadística descriptiva y se generaron gráficos para determinar el comportamiento de las variables en estudio. La diversidad se analizó por medio de los índices de diversidad de Shannon-Wiener para diversidad alfa y Bray-Curtis para diversidad beta.

Para analizar y conocer la influencia de las variables ambientales de salinidad, pH y potencial redox del agua intersticial en la estructura y composición de los sitios de acuerdo con la edad de abandono de estos, se llevó a cabo algunos análisis multivariados. Se realizó un análisis multivariado de correspondencia canónica (CCA) y un análisis de componentes principales (PCA) para relacionar la composición florística de los manglares con la edad y las variables fisicoquímicas del agua intersticial. Además, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple por medio de un Modelo Lineal General (GLM) para relacionar el área basal con las variables ambientales correspondientes al pH y la salinidad, para determinar si hay una correspondencia con los estados de madurez de los sitios en estudio. Estos análisis se realizaron utilizando el software Past 4.03 (Hammer et al., 2001) y R 4.0.5 (R Development Core Team, 2021).

Es importante mencionar que, en un principio, la presente investigación se planeó realizarla con rangos de edad de cada cinco años, pero al aplicar algunas pruebas de medias para la variable del área basal y no encontrar diferencias significativas entre los rangos de edad de los sitios en restauración, se decidió ampliar este rango a 10 años. Sin embargo, no se contó con datos disponibles de los parámetros fisicoquímicos del agua intersticial para ciertas parcelas, por lo que los análisis correspondientes a esta sección se realizaron con rangos de edad de cada cinco años, y no cada diez años como se hizo en las demás secciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estructura del manglar, diversidad y composición florística

En los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, se encontró un total de cinco de las siete especies de mangle presentes en los manglares de Costa Rica (Aguilar, 2019), *Rhizophora mangle*, *Rhizophora racemosa* (Rhizophoraceae), *Laguncularia racemosa* (Combretaceae), *Avicennia germinans* y *Avicennia bicolor* (Acanthaceae). La especie *R. racemosa* solo está presente en el manglar de referencia, al igual que *A. bicolor*, que solamente presentó un individuo en este estrato. Por su parte, *A. germinans* se encuentra presente en todos los rangos de edad, mientras que *L. racemosa* y *R. mangle* están presentes en los rangos de edad de manglar de referencia y de 1 a 10 años.

La mayoría de las especies de mangle crecen en un estrecho rango de hábitat y cualquier cambio en las condiciones de este puede hacer que se produzca un cambio en la composición de las especies (Barrantes y Cerdas, 2015). Además, los patrones de distribución de las especies que componen el manglar se relacionan con factores ambientales como el hidroperiodo, la topografía, la salinidad, la granulometría, entre otros (Barrantes y Cerdas, 2015; Rincón-Pérez et al., 2020). Según Jiménez y Soto (1985), en la costa del pacífico de Costa Rica los factores climáticos e hidrológicos del sitio, determinan tanto la composición florística, como la estructura de los manglares.

El Cuadro 4 muestra el Índice de Valor de Importancia (IVI) para cada especie en cada uno de los rangos de edad, para los árboles mayores a 5 cm de diámetro. En el manglar de referencia, la especie con mayor peso ecológico fue *R. mangle* con un IVI de 173,53 %, seguida por *R. racemosa* con 69,77%. Con respecto a los sitios, en el rango de edad de 1 a 10 años, la especie con mayor IVI corresponde a *L. racemosa* con un 227,44% y luego de esta se encuentran *R. mangle* y *A. germinans* con 45,37 % y 27,29 %, respectivamente. En el rango de edad de 11 a 20 años, solo se encontró presente la especie *A. germinans*.

Cuadro 4. Índice de Valor de Importancia (IVI) para las especies presentes por rango de edad en una cronosecuencia, de los árboles con diámetro mayor a 5 cm, en los Humedales Nispero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

Rango de edad (años)	Especie	Dominancia		Abundancia		Frecuencia		IVI (300%)
		Abs	%	Abs	%	Abs	%	
Manglar de referencia	<i>Rhizophora mangle</i>	1,2768	54,5285	110	72,8477	6	46,1538	173,5300
	<i>Rhizophora racemosa</i>	0,8704	37,1700	26	17,2185	2	15,3846	69,7732
	<i>Laguncularia racemosa</i>	0,0619	2,6450	8	5,2980	3	23,0769	31,0199
	<i>Avicennia germinans</i>	0,0900	3,8455	6	3,9735	1	7,6923	15,5113
	<i>Avicennia bicolor</i>	0,0424	1,8110	1	0,6623	1	7,6923	10,1656
	Total	2,3416	100	151	100	13	100	300
1-10	<i>Laguncularia racemosa</i>	0,0908	83,4731	26	83,8710	3	60	227,3441
	<i>Rhizophora mangle</i>	0,0136	12,4663	4	12,9032	1	20	45,3695
	<i>Avicennia germinans</i>	0,0044	4,0606	1	3,2258	1	20	27,2864
	Total	0,1088	100	31	100	5	100	300

En un estudio realizado por Alfaro-Sibaja et al. (2015), en el manglar Palo Seco, Quepos, Costa Rica, determinó que la abundancia de *R. mangle* se atribuye a que es una especie que se adapta a climas tanto lluviosos como secos y que se caracteriza por estar en ambientes expuestos a fuerte oleaje, lo cual propicia el establecimiento de esta especie. Además, en estos ecosistemas existe un gradiente ambiental que hace que ocurra un cambio en la estructura y composición de la vegetación a medida que se aleja de la costa (Rincón-Pérez et al., 2020). En el Manglar de Tamarindo, Costa Rica, *R. mangle* se ubicó en la franja más cercana al canal, donde se encuentran las menores salinidades, y se mezcló con *R. racemosa* tierra adentro (Zamora-Trejos y Cortés, 2009).

El Índice de Valor de Importancia (IVI) para las especies presentes en la regeneración, muestra que la especie *L. racemosa* es la de mayor peso ecológico en ambos estratos, con un 220,54 % en el rango de 1 a 10 años y un 213,94 % en el rango de 11 a 20 años (Cuadro 5). En el estrato del manglar de referencia, solamente se encontró presente la especie *R. mangle*. Estos resultados se pueden explicar debido a que *L. racemosa* corresponde a una especie indicadora de un dosel más abierto, originado por alteraciones (Agudelo et al., 2015). La dominancia de *L. racemosa* en ambos rangos de edad, seguida por *A. germinans* en el rango de 1 a 10 años, puede explicarse por la gran producción de propágulos de estas especies

(Hoyos et al., 2013), además de ser especies pioneras y colonizadoras en áreas donde se han presentado disturbios (Teutli-Hernández et al., 2019).

Cuadro 5. Índice de Valor de Importancia (IVI) para las especies presentes por rango de edad en una cronosecuencia, para la regeneración ($d < 5$ cm), en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

Rango de edad (años)	Especie	Dominancia		Abundancia		Frecuencia		IVI (300%)
		Abs	%	Abs	%	Abs	%	
1-10	<i>Laguncularia racemosa</i>	0,0527	90,1272	147	85,9649	8	44,4444	220,5366
	<i>Avicennia germinans</i>	0,0042	7,1792	19	11,1111	6	33,3333	51,6237
	<i>Rhizophora mangle</i>	0,0015	2,6076	4	2,3392	3	16,6667	21,6134
	<i>Rhizophora racemosa</i>	0,0001	0,0859	1	0,5848	1	5,5556	6,2263
	Total	0,0585	100	171	100	18	100	300
11-20	<i>Laguncularia racemosa</i>	0,0097	79,8704	67	87,0130	8	47,0588	213,9422
	<i>Rhizophora mangle</i>	0,0017	14,1383	5	6,4935	4	23,5294	44,1612
	<i>Avicennia germinans</i>	0,0007	5,9913	5	6,4935	5	29,4118	41,8966
	Total	0,0122	100	77	100	17	100	300

El índice de Shannon-Wiener para el manglar de referencia fue de 0,85. Manrow (2011) reportó valores de 0,33 y 0,6 para los manglares de Gandoca y Moín, respectivamente. Valores como el obtenido en el presente estudio son de esperarse, ya que en general la diversidad de los ecosistemas de manglar es baja y dominada por algunas especies que son las que presentan las adaptaciones morfológicas y fisiológicas necesarias para crecer en zonas inundadas y tolerar la salinidad (Rincón-Pérez et al., 2020).

Se evidenció muy poca cantidad de individuos mayores a 5 cm en los rangos de edad de 1-10 y de 11-20 años, siendo este último rango el que presenta la densidad de individuos más baja, con solamente 36 N/ha (Cuadro 6). Con respecto a la regeneración, se puede observar una gran cantidad de individuos en el rango de edad de 1 a 10 años (17009 N/ha). Este valor es 59,9 % más bajo, en comparación con el rango de 1 a 10 años, en el rango de edad de 11-20 años y disminuye aún más en el manglar de referencia.

Cuadro 6. Número de individuos (N/ha) promedio por rango de edad en una cronosecuencia, para los árboles mayores a 5 cm y para la regeneración, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

Rango de edad	Árboles (d > 5 cm)	Regeneración (d < 5 cm)
	N/ha	N/ha
Manglar de referencia	1226 ± 287	1691 ± 1142
1-10 años	251 ± 322	17009 ± 5800
11-20 años	36 ± 49	6808 ± 5991

En el manglar de Gandoca se reportó un promedio de 687 árboles/ha y en el de Moín 708 árboles/ha (Manrow, 2011). Estos valores son bastante diferentes a los obtenidos en la presente investigación, sin embargo, el promedio para el Golfo de Nicoya es de 1154 árboles/ha (Cifuentes-Jara et al., 2014), valor que se asemeja a lo obtenido en este estudio. Según Cifuentes-Jara et al. (2014) los manglares del Golfo de Nicoya son más densos, pero de menor tamaño en comparación con los del Caribe de Costa Rica.

La diferencia en los valores encontrados en los rangos de 1-10 y de 11-20 años con respecto al manglar de referencia, se debe a que no hubo presencia de árboles con diámetro mayor a 5 cm. Esto se debe al proceso de extracción y procesamiento de sal y el cultivo de camarones que se realiza desde aproximadamente 60 años en las comunidades de Colorado de Abangares y San Buenaventura (SINAC, 2019), lo cual ocasionó un cambio en las condiciones necesarias para el establecimiento de las especies de mangle.

Los manglares en general son sitios que permanecen inundados debido a la influencia mareal y fluvial, lo cual hace que presenten alta salinidad que regula el crecimiento, altura y sobrevivencia de los individuos (Alfaro-Sibaja et al., 2015; Barrantes y Cerdas, 2015). Estas condiciones típicas de estos sitios se han visto afectadas por las actividades de aprovechamiento y limitan el establecimiento y desarrollo de los individuos.

El rango de edad del manglar de referencia presenta un comportamiento de J invertida, donde el 50,33 % de los árboles se encuentra en la categoría de 5-10 cm, mientras que el 16,24 % se ubica en la última categoría (d > 40 cm), la cual presentó un pequeño incremento de los individuos con respecto al comportamiento decreciente que se da en todas las categorías anteriores (Figura 5). El estrato de edad de 1-10 años solo presenta árboles en las dos primeras categorías y en la primera de ellas (5-10 cm) se concentra el 96,77 % de los

individuos. Con respecto al estrato de 11-20 años, ocurre de igual forma que con el estrato anterior, solo presenta árboles en las dos primeras categorías; sin embargo, la cantidad de individuos por hectárea es mucho menor.

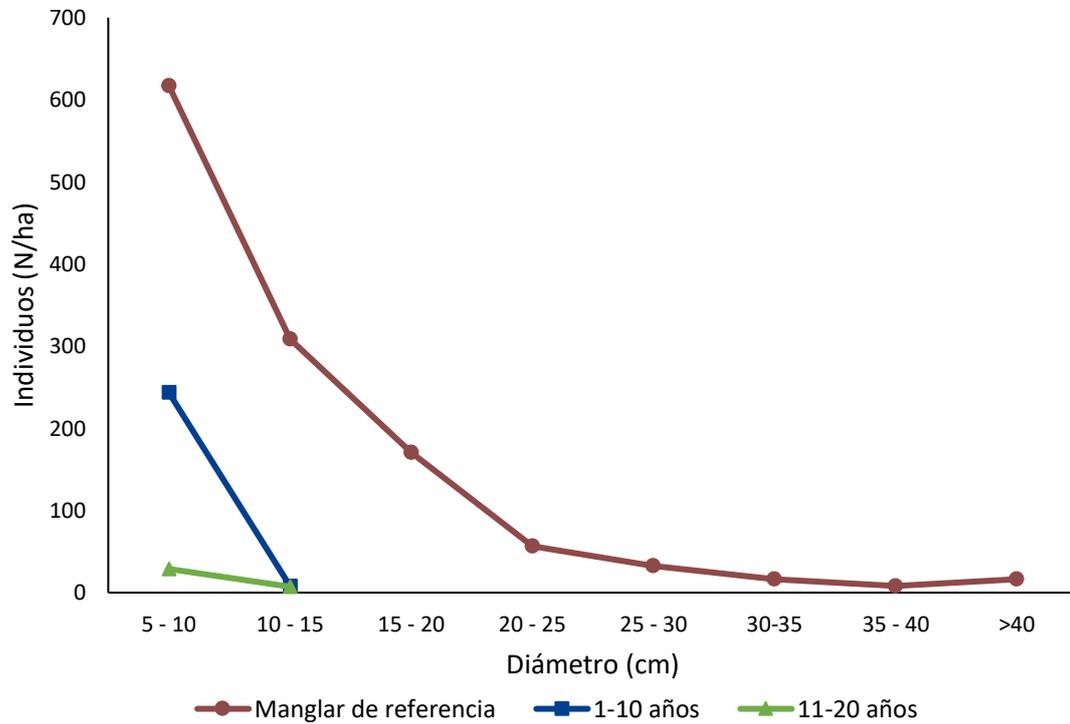


Figura 5. Número de individuos promedio (N/ha) según categoría diamétrica, por rango edad en una cronosecuencia, para los árboles con diámetro mayor a 5 cm, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

Esta distribución obtenida de J invertida es típica de los bosques secundarios y bosques maduros saludables, donde el número de individuos es mayor en las clases diamétricas más pequeñas y disminuye conforme el diámetro es mayor (Álvarez, 2018). Merecí (2017) también observó un patrón de J invertida, obteniendo la mayor presencia árboles entre 5 y 20 cm y una baja presencia de individuos de 36-50 cm de diámetro, similar a lo obtenido en este estudio. Lo anterior sugiere que, los manglares podrían no estar siendo intervenidos para extracción de leña, o al menos de forma significativa, y que su regeneración no se está viendo tan afectada (Cifuentes-Jara et al., 2014).

El proceso de regeneración natural en los manglares se puede ver afectado por factores como la salinidad, la precipitación, la sedimentación, la frecuencia, el nivel y la duración de las inundaciones, entre otros (Echeverría-Ávila et al., 2019; Hoyos et al., 2013) y posterior al establecimiento de las plántulas, la supervivencia y el crecimiento de estas, está influenciado por el estrés fisicoquímico dado por la intensidad lumínica (Alfaro-Sibaja et al., 2015). Esto puede ser una de las posibles explicaciones a lo que ocurre en los rangos de edad de 1-10 años y de 11-20 años, donde se observa un patrón muy distinto al manglar de referencia, ya que en estos estratos no hay una distribución de J invertida y solo presenta individuos en las dos primeras clases diamétricas.

El área basal promedio de los árboles con diámetro mayor a 5 cm en el estrato del manglar de referencia fue de $19,01 \pm 6,75$ (n=8) m^2/ha , mientras que en el rango de edad de 1-10 años el área basal promedio fue de $0,35 \pm 1,30$ (n=9) m^2/ha y en el de 11-20 años se obtuvo un valor de $0,16 \pm 0,21$ (n=8) m^2/ha (Figura 6). No hubo diferencias significativas entre las medias de los rangos de edad de 1-10 años y de 11-20 años, pero sí las hubo entre estos y el manglar de referencia.

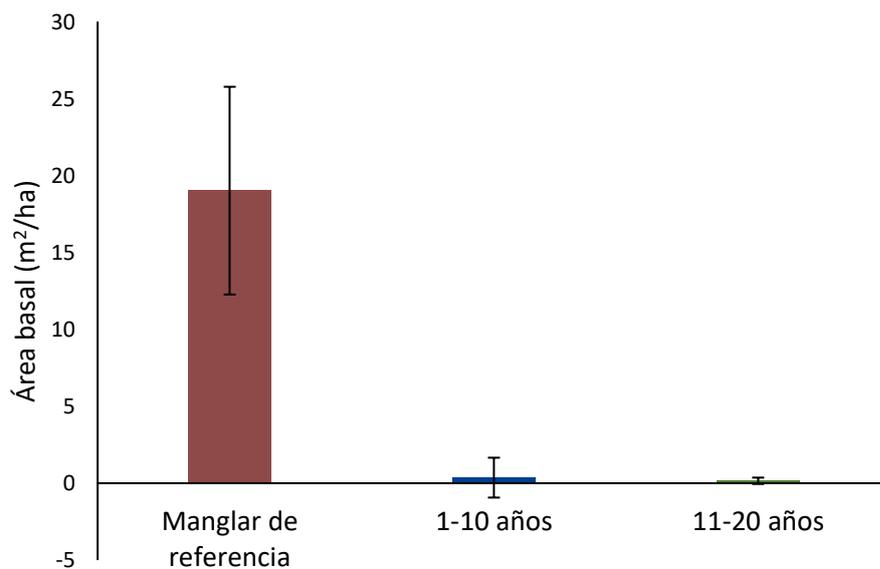


Figura 6. Área basal (m^2/ha) de los árboles mayores a 5 cm de diámetro, según los diferentes rangos de edad en una cronosecuencia, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

Flores (2018), reportó un área basal de 44,42 m²/ha en un manglar en Honduras, mientras que Manrow (2011) reportó áreas basales de 26,35 m²/ha en Gandoca y 26,37 m²/ha en Moín, y Cifuentes-Jara et al. (2014) reportó un promedio de 12,61 m²/ha para el Golfo de Nicoya. De estos valores, el obtenido para el Golfo de Nicoya es el que más se acerca a lo obtenido en este estudio para el manglar de referencia. Lo anterior podría estar ocurriendo debido a que en el Pacífico Norte de Costa Rica las lluvias son menores y estacionales, lo que ocasiona que los manglares presenten desarrollos estructurales reducidos (Jiménez y Soto, 1985), además de que los manglares del Caribe se distinguen por ser de mayor porte (Cifuentes-Jara et al., 2014).

En los rangos de 1-10 y de 11-20 años el área basal obtenida representó 1,84 % y 0,84 % respectivamente, del valor obtenido para el manglar de referencia, debido a la poca presencia de árboles e incluso a la no presencia de estos en algunos de los sitios. Además, los diámetros de los árboles en estos sitios son mucho menores a los de los individuos presentes en el manglar de referencia. Cifuentes-Jara et al. (2014), encontraron que los manglares que presentaron una estructura con mayor porte fueron los que se encontraban expuestos a aguas menos saladas. Además, Jiménez y Soto (1985), encontraron que las mayores alturas y áreas basales coinciden con sitios que presentan un suministro abundante de agua dulce, lo cual no está ocurriendo en ciertos sitios presentes en estos rangos de edad, debido a la existencia de muros o barreras que impiden que ocurra este suministro de agua.

La altura total promedio para el manglar de referencia fue de 10 ± 1,73 (n=8) m. En los rangos de edad de 1-10 y de 11-20, la altura total promedio fue de 5,91 ± 2,20 (n=9) m y 5,88 ± 1,75 (n=8) m respectivamente. En el manglar de referencia los pisos de altura son de 5, 10 y 16 m para los pisos inferior, medio y superior, respectivamente. En este rango, aproximadamente el 59 % de los individuos se encuentra en el piso medio y el 38 % en el piso superior. En el rango de edad de 1 a 10 años, el piso inferior fue de 2 m, el medio de 4 m y el superior de 7 m. Aquí los individuos se comportan de forma distinta al rango anterior, ya que más del 80 % se encuentra en el piso superior y aproximadamente el 19 %, en el piso medio, sin presencia de individuos en el piso inferior. En el rango de 11 a 20 años los pisos de altura son 2, 4 y 6 m, para los pisos inferior, medio y superior, respectivamente. En este último rango de edad la totalidad de los individuos se concentra en el piso superior (Figura 7).

La altura promedio de los árboles en los manglares rara vez sobrepasa los 20 m (Alfaro-Sibaja et al., 2015; Álvarez, 2018; Flores, 2018; Manrow, 2011; Mecerí, 2017). Además, el reclutamiento, establecimiento y crecimiento de los propágulos y de las plantas en el manglar se ve afectado, principalmente por la tolerancia a inundaciones, la salinidad y la sombra (Monroy-Torres et al., 2014). Álvarez (2018), reportó en su estudio que el 70 % de los individuos del manglar se encontraron en el piso medio, mientras que en este estudio ese porcentaje fue del 59 %. En los otros dos rangos de edad la altura promedio fue mucho menor en comparación con el manglar de referencia, debido a ser sitios en recuperación y con condiciones muy distintas a las de un manglar maduro.

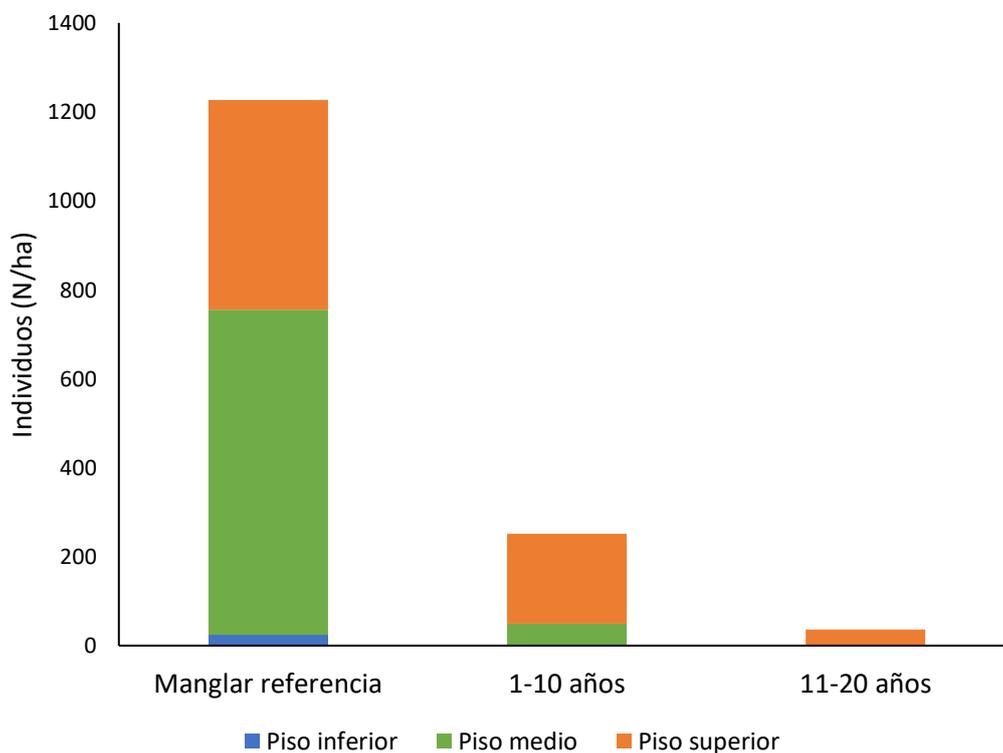


Figura 7. Número de individuos (N/ha) por pisos de altura y según rango de edad en una cronosecuencia, en los Humedales Nispero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

La estructura vertical de un sitio se encuentra delimitada por la distribución de los individuos a lo alto del perfil y responde a las características propias de cada especie que lo componen (Álvarez, 2018). El Cuadro 7 resume la cantidad de individuos (N/ha) por pisos de altura por especie para el manglar de referencia. Se puede observar que la especie *R. racemosa* es la única que se encuentra presente en todas las clases de altura, mientras que *A. germinans* y *L. racemosa* solamente se encuentran en la primera clase y *R. mangle* en las dos primeras. Relacionado con lo anterior Ellison y Farnsworth (1993), registraron rápido crecimiento en altura, diámetro, producción de hojas y biomasa en las plántulas de *R. mangle* en lugares con periodos de inundación muy amplios en comparación con los lugares en que los periodos de inundación son cortos.

Cuadro 7. Número de individuos por especie (N/ha) por pisos de altura presentes en el manglar de referencia, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

Especie	Altura (m)		
	3-10	10-17	17-24
<i>Avicennia bicolor</i>	0	64,9612	0
<i>Avicennia germinans</i>	389,7672	0	0
<i>Laguncularia racemosa</i>	519,6896	0	0
<i>Rhizophora mangle</i>	4872,0901	2273,6420	0
<i>Rhizophora racemosa</i>	454,7284	779,5344	454,7284

Estimación de contenido de carbono almacenado

En el presente estudio, el promedio de las reservas de carbono de la biomasa total de los árboles (arriba del suelo) para el manglar de referencia es de $106,60 \pm 63,34$ (n=8) Mg/ha. Este valor fue menor a lo obtenido en otros estudios: Flores (2018), reportó reservas de carbono de $145,84 \pm 48,52$ Mg/ha, mientras que Bhomia et al. (2016), reportaron 147 Mg/ha, ambos para un manglar en Honduras. Por otro lado, Adame et al. (2015), reportaron 215 Mg/ha en Laguna Nichupté en la Península de Yucatán, México. El valor promedio para el Golfo de Nicoya fue de 76,75 Mg/ha (Cifuentes-Jara et al., 2014), lo cual corresponde a

aproximadamente un 71 % del valor obtenido en este trabajo. Con respecto al rango de edad de 1-10 años, el valor obtenido fue de $13,25 \pm 9,51$ Mg/ha y en el de 11-20 años de $2,87 \pm 3,47$ Mg/ha. Esto significa que el manglar de referencia tiene 87,57 % más de carbono almacenado que el rango de 1 a 10 años y 97,31 % más que el rango de 11-20 años, lo anterior debido al tipo de manejo que recibieron estos sitios en el pasado cuando fueron camaronerías y salineras.

El aporte de la madera caída representa 0,071 % del total de las existencias de carbono del manglar de referencia y es inexistente en los sitios evaluados (Figura 8). Esto se explica debido a que los almacenes de carbono en estos ecosistemas se encuentran principalmente en el componente aéreo (biomasa de árboles vivos y muertos) y subterráneo (sedimento y biomasa de raíces) (Kauffman et al., 2013).

El componente que más cantidad de carbono representa en ambos rangos de edad, es el del suelo. Las existencias promedio de carbono bajo el suelo a 2 m de profundidad para el manglar de referencia son de $414,95 \pm 47,84$ Mg/ha y para el rango de edad de 11-20 años son de $159,89 \pm 131,71$ Mg/ha, es decir, este valor en el manglar de referencia es casi tres veces mayor a lo obtenido en el rango de edad de 11-20 años (Figura 8). En el manglar de referencia este valor corresponde a aproximadamente el 80 % de las existencias totales. Lo anterior evidencia que un gran porcentaje de este carbono almacenado en el suelo se pierde como resultado de la conversión del manglar a camaronerías y salineras (Kauffman et al., 2017), condición que fue confirmada en este estudio.

Para el rango de edad de 1-10 años, debido a inconvenientes de financiamiento, no fue posible obtener datos de carbono en el suelo; sin embargo, se pueden encontrar valores similares o menores al rango de 10-20 años. Lo anterior, ya que las reservas de carbono del suelo dependen del aporte de materia orgánica, la necromasa, la actividad de micro y macroorganismos, las especies de árboles presentes y la composición de la hojarasca, entre otros (Merecí-Guamán et al., 2021). Es decir, el manglar maduro es un ecosistema donde se lleva a cabo un intenso procesamiento de materia orgánica, debido a que presentan flujos de caída y descomposición de hojarasca, exportación e importación de carbono orgánico particulado y disuelto por efecto del hidroperiodo (Herrera et al., 2016).

La principal consecuencia de la deforestación en manglares es la liberación de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) (Troxler et al., 2015). Los resultados obtenidos por Merecí (2017), para el manglar maduro, triplican lo obtenido en los suelos bajo camaronerías, por lo que se evidencia el potencial y la importancia de los suelos de manglar, en comparación con los de uso acuícola, como sumideros de carbono.



Figura 8. Existencias de carbono (Mg/ha) en el manglar de referencia y rangos de edad para una cronosecuencia evaluando los componentes de madera caída, regeneración, árboles, raíces y sedimento, en los Humedales Nispero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

Relación de las edades con la estructura, la composición florística y los parámetros fisicoquímicos del agua intersticial

El Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés), en sus dos primeros componentes explican un 81 % de la variabilidad total de los datos (PC1= 51,13 % y PC2= 30,32 %) (Figura 9). Según este análisis, el manglar de referencia se relaciona de forma negativa con la variable del potencial redox y de forma positiva con los valores de pH. La salinidad es la variable que mejor explica la variabilidad de los sitios en restauración.

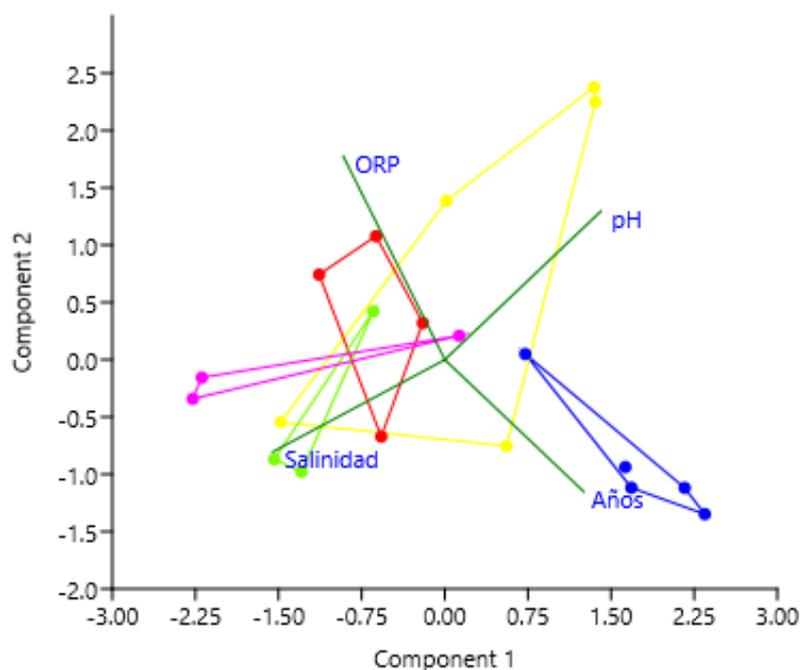


Figura 9. Relación de las variables fisicoquímicas del agua intersticial y de la edad para los sitios en estudio por medio de un análisis de componentes principales, en los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021. Los colores representan: Azul: manglar de referencia, Rojo: 1-5 años, Fucsia: 6-10 años, Amarillo: 11-15 años, Verde claro: 16-20 años.

Para identificar el patrón de distribución de las especies de acuerdo con las variables físicoquímicas del agua intersticial, se realizó un Análisis de Correspondencia Canónica (CCA, por sus siglas en inglés; Figura 10). En este análisis se puede observar que el ORP se correlaciona negativamente con el manglar de referencia y esto concuerda con los valores negativos observados en estos sitios, que van desde -369, 9 mV hasta -239, 8 mV (Anexo 1). Estos valores de ORP también se encuentran correlacionados con los valores de salinidad, es decir, cuando los valores de ORP son más negativos, los valores de salinidad son más bajos.

Por otra parte, la salinidad y pH se correlacionan de forma negativa y positiva respectivamente, con los sitios en restauración (considerando que el eje X explica el 80,07 % de la variabilidad del conjunto de datos). Es importante mencionar que los puntos pertenecientes al manglar de referencia se encuentran bajo el punto correspondiente a la especie *R. mangle*, mientras que algunas de las parcelas pertenecientes a los sitios en restauración, se encuentran bajo la especie *L. racemosa* debido a su abundancia y carácter colonizador. Además, se puede observar que los sitios en recuperación presentan similitudes entre ellos al estar agrupados de forma cercana, pero alejados del manglar de referencia, mostrando la diferencia entre estos y el manglar maduro.

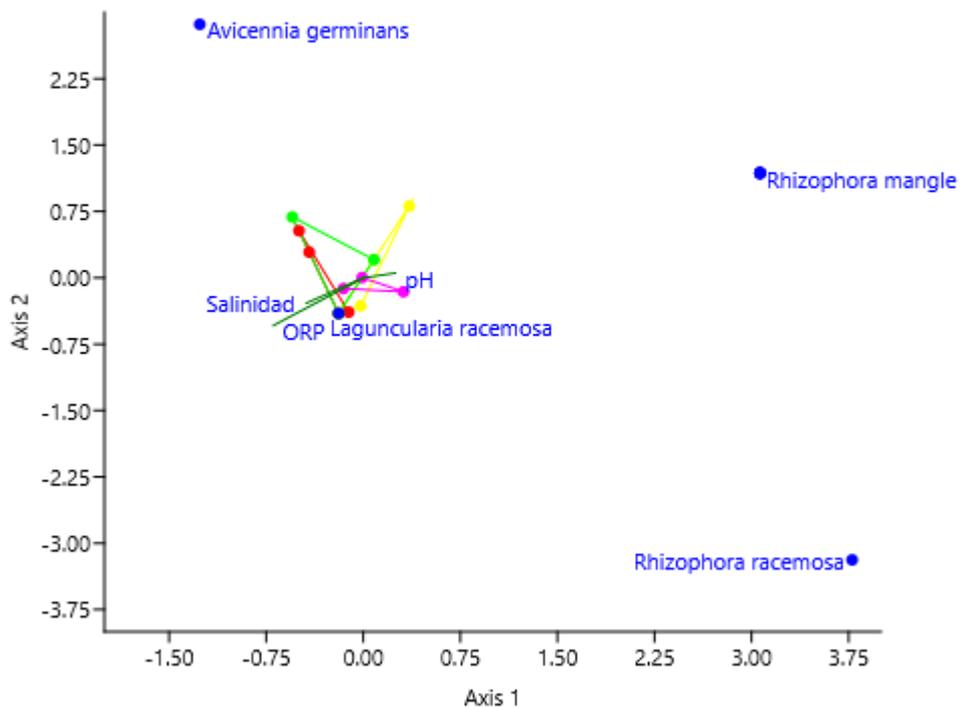


Figura 10. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) según los rangos de edad, tomando en cuenta la abundancia de regeneración de especies presentes en cada uno y las variables fisicoquímicas del agua intersticial, en los Humedales Nispero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021. Los colores representan: Azul: manglar de referencia, Rojo: 1-5 años, Fucsia: 6-10 años, Amarillo: 11-15 años, Verde claro: 16-20 años.

Al realizar los análisis anteriores, se explica un poco la influencia que tienen las variables fisicoquímicas del agua intersticial en la regeneración y recuperación que estos sitios están teniendo. Con respecto a la salinidad, en general se presentan valores más altos en los sitios que han sido perturbados, llegando a cifras de 70 usp (Cuadro 8). La salinidad y la inundación son dos factores que se consideran determinantes en la composición, estructura y diversidad del manglar (Rincón-Pérez et al., 2020). Además, la distribución de las especies, el reclutamiento de los individuos y el desarrollo del manglar tienen una relación estrecha con el gradiente de salinidad (Pérez-Ceballos et al., 2017; Zamora-Trejos y Cortés, 2009). En diversos estudios, la especie *A. germinans* ha mostrado soportar altas salinidades y se

encuentra dominante en sitios donde estos valores de salinidad son más altos (Agudelo et al., 2015; Conde, 2014; Torres et al., 2017; Zamora-Trejos y Cortés, 2009).

El potencial redox en los manglares es sumamente bajo y en general disminuye cuando aumenta la salinidad (García, 2015). Los valores de potencial redox obtenidos en este estudio para el manglar de referencia se clasifican como hipóxicos con tendencia a anóxicos (Conde, 2014), con valores que van desde -369, 9 mV hasta -239, 8 mV (Cuadro 8). Torres et al. (2017), reportó que los valores de potencial redox (ORP) presentaron correlación alta con la salinidad de agua intersticial, similar a lo encontrado en la presente investigación. Las condiciones anóxicas previenen la oxidación y ayudan al almacenamiento de carbono (Donato et al., 2011).; Además, de que se ha visto que el establecimiento de *R. mangle* se ve favorecido por la anoxia, mayores rangos de inundación y predomina donde la salinidad es similar a la del mar (Agudelo et al., 2015)

Los suelos de los manglares por lo general presentan condiciones con tendencias ácidas (Conde, 2014; Marín, 2009). Esto se debe a que el agua de mar contiene una alta concentración de sulfato y al entrar al ecosistema de manglar, con las condiciones reducidas que presentan los suelos, el azufre se acumula en forma de sulfitos. Cuando los suelos están en períodos de exposición y se encuentran en contacto con el aire, los sulfitos son oxidados a sulfatos por la acción de microorganismos y estos, en contacto con el agua, reaccionan produciendo ácido sulfúrico creando consigo una disminución del pH de los suelos (Marín, 2009). En este estudio, los valores de pH para el manglar de referencia tendieron a ser neutros (Cuadro 7). Se ha determinado que el pH del suelo depende mucho de las características específicas de cada suelo y de la hidrodinámica de cada sitio (Sánchez-Arias et al., 2010), lo cual podría explicar los valores obtenidos en este estudio.

Cuadro 8. Valores de las variables fisicoquímicas del agua intersticial en cada una de las parcelas en cada rango de edad, para los sitios de los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

Tipo	Años	Sitio	Parcela	pH (0-14)	ORP (mV)	Salinidad (psu)
Manglar de referencia	-	5	1	6,92	4,8	49,43
Manglar de referencia	-	7	1	6,96	-239,8	44,33
Manglar de referencia	-	10	1	6,97	-369,9	35,52
Manglar de referencia	-	13	1	6,79	-251,7	35,75
Manglar de referencia	-	14	1	6,92	-309,9	33,97
Sitio de interés	13	1	1	NA	NA	NA
Sitio de interés	11	3	1	7,4	32,9	32,06
Sitio de interés	11	3	2	7,31	22,8	28,14
Sitio de interés	12	11	1	6,62	-97,7	70
Sitio de interés	12	13	1	6,76	-324,4	41,92
Sitio de interés	12	14	1	6,88	58,2	38,07
Sitio de interés	5	5	1	NA	NA	NA
Sitio de interés	5	5	2	6,66	36,5	51,7
Sitio de interés	5	5	3	6,75	36	43,9
Sitio de interés	1	7	1	6,75	-149,2	42,32
Sitio de interés	1	7	2	6,61	-261,9	51,1
Sitio de interés	17	4	1	6,54	-143,7	67,55
Sitio de interés	17	9	1	6,52	-102,3	70
Sitio de interés	17	10	1	6,97	-25,8	65,71
Sitio de interés	7	12	1	6,26	20,4	61,86
Sitio de interés	7	12	2	6,87	-174,7	45,38
Sitio de interés	7	12	3	6,47	16,1	70

Cuadro 9. Salidas del análisis estadístico en R de los modelos generales lineales simplificados de la influencia de las variables ambientales en el área basal de la regeneración para los sitios de los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021

Variables	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Salinidad	1,359e-05	7,829e-05	0,174	0,864
pH	-0,00252	0,00395	-0,638	0,531

Cuadro 10. Salidas del análisis estadístico en R de los modelos generales lineales simplificados de la influencia de las variables ambientales en el área basal de árboles con diámetros mayores a 5 cm para los sitios de los Humedales Níspero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2021.

Variables	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Salinidad	-0,003310	0,001759	-1,882	0,0752
pH	0,10608	0,09453	1,122	0,276

Como se ha mencionado anteriormente, la estructura y la composición de los manglares se encuentra influenciada por varios gradientes ambientales (Barrantes y Cerdas, 2015). Tomando en cuenta esto, se realizó un Modelo Lineal General para analizar la influencia que tienen las variables ambientales del pH y la salinidad en el área basal en los sitios; sin embargo, no se encontró que existiera tal influencia (Cuadro 9 y Cuadro 10). De acuerdo con el resultado anterior, se podría pensar que existen otras variables ambientales que no se analizaron en este estudio que podrían estar afectando la regeneración de los sitios y en el crecimiento del mangle de los sitios, tales como la frecuencia de inundación o características del suelo como la densidad aparente y la disponibilidad de nutrientes (Teutli-Hernández et al., 2019)

Acciones para la restauración del manglar de Humedales Nispero y San Buenaventura-Colorado, Golfo de Nicoya

Según los resultados obtenidos y lo observado a lo largo del presente estudio, la regeneración de los sitios se está dando, sin embargo, no al mismo tiempo ni de la misma forma en cada uno. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo acciones que asistan la recuperación de estos sitios que han sido degradados de distintas formas, teniendo en cuenta que debe existir coordinación con el SINAC y además se deben buscar las respectivas fuentes de financiamiento.

Una acción de restauración que se puede implementar en varios de los sitios estudiados es la restauración/rehabilitación hidrológica de estos, derribando muros o barreras existentes producto de las antiguas actividades de aprovechamiento, para lograr recuperar el flujo de agua en algunos de los sitios en los que esto no está ocurriendo.

Si luego de realizar monitoreos y después de realizar un análisis, se han identificado los canales de marea naturales de los sitios, se puede proceder al desazolve de estos. También, si se detecta que debido a la perturbación del sitio y al cambio en su topografía es necesaria la habilitación de canales nuevos, se puede realizar esta acción.

Para acciones de restauración, es importante considerar hacer uso de la siembra de propágulos de plántulas colectadas o cultivadas, después de determinar que el reclutamiento natural no garantizará la cantidad de plántulas exitosamente establecidas.

CONCLUSIONES

Las actividades previas de extracción de camarón y producción de sal en algunos de los sitios en estudio han limitado el desarrollo del manglar, ya que se evidencia una estructura y composición muy distinta a la del manglar de referencia.

Es evidente que un gran porcentaje del carbono almacenado por los manglares en todos sus componentes, pero especialmente en el suelo, se pierde como resultado de la conversión del manglar a camaroneras y salineras; por lo que se evidencia el potencial y la importancia de los suelos de manglar, en comparación con los de uso acuícola, como sumideros de carbono.

El pH, la salinidad y potencial redox son variables que se han visto modificadas por el cambio de uso de suelo y esto ha ocasionado que en algunos de los sitios no se encuentren las condiciones necesarias para la regeneración.

La colonización y desarrollo de los manglares que han sido perturbados puede ser lenta e impredecible, lo cual se evidencia en los sitios en los que ha transcurrido más tiempo desde que se dejó el aprovechamiento, que deberían estarse acercando a un estado similar al manglar de referencia, pero algunos no lo están haciendo e incluso ciertos sitios más jóvenes están teniendo mayor cantidad de regeneración.

La edad de abandono de los sitios no determina la composición de estos, si no las condiciones en las que quedan estos sitios después de que se deja de realizar la actividad de aprovechamiento. Es decir, que se esperaría que un sitio con mayor cantidad de años en recuperación tenga condiciones, estructura y composición similares a las de un manglar maduro, sin embargo, esto no está ocurriendo ya que, según los resultados obtenidos y las observaciones en campo, existen barreras físicas que impiden que la hidrología de algunos de estos sitios sea la apta.

RECOMENDACIONES

Para futuros estudios, se sugiere aumentar el número de parcelas por sitio para tener una mejor representación de las condiciones en la que estos se encuentran con respecto a su recuperación.

Evaluar otras variables ambientales que no se tomaron en cuenta en este estudio, como la densidad aparente del suelo o la disponibilidad de nutrientes, para lograr comprender de una mejor manera la recuperación que se está dando en estos sitios

Para futuros proyectos o acciones de restauración, tomar en cuenta el involucramiento de las comunidades locales en estos procesos, ya que estas personas son las que se benefician de forma directa de estos ecosistemas. Además, de esta forma se puede sensibilizar a cerca de la importancia que representan los ecosistemas de manglar.

REFERENCIAS

- Adame, M. F., Hermoso, V., Perhans, K., Lovelock, C. E. y Herrera-Silveira, J. A. (2015). Selecting cost-effective areas for restoration of ecosystem services. *Conservation Biology*, 29(2), 493–502. <https://doi.org/10.1111/cobi.12391>
- Agudelo, C. M., Bolívar, J., Polanía, J., Urrego, L. E., Yepes, A. y Sierra, A. (2015). Estructura y composición florística de los manglares de la bahía de Cispatá, Caribe colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 63(4), 1137–1147.
- Aguilar, D. (2019). *Manglares y mangles de Costa Rica*. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/36385/37042>
- Alfaro-Sibaja, L., Barquero-Salgado, D., Fonseca, A., Montoya-Solano, R. A., Morales-Cerdas, V. y Ramírez-Arce, D. (2015). Estructura y composición vegetal del manglar Palo Seco, Quepos, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 7(2), 325–332.
- Álvarez, L. (2018). *Comparación de los bosques de manglar y catival en la fijación de carbono en el Caribe Sur, Costa Rica* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Costa Rica].
- Barrantes, R. y Cerdas, A. (2015). Distribución espacial de las especies de mangle y su asociación con los tipos de sedimentos del sustrato, en el sector estuarino del Humedal Nacional Térraba-Sierpe, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 63(1), 47–60.
- Bhomia, R. K., Kauffman, J. B. y McFadden, T. N. (2016). Ecosystem carbon stocks of mangrove forests along the Pacific and Caribbean coasts of Honduras. *Wetlands Ecology and Management*, 24(2), 187–201. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9483-1>
- BIOMARCC, SINAC, GIZ. (2012). *Evaluación de carbono a nivel de ecosistema en el área silvestre protegida Humedal Térraba-Sierpe*. http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/biomarcc_et_al_2012-_evaluaci_n_de_c_en_el_humedal_nacional_t_rraba-sierpe.pdf
- Cifuentes-Jara, M., Rivera, C. G., Magaña, J., Velásquez, S. y Torres, D. (2018). *Dinámica de la cobertura del suelo y las existencias de carbono en los manglares de El Salvador*. <http://hdl.handle.net/11554/8718>
- 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*. <http://hdl.handle.net/11554/8719>
- Cifuentes-Jara, 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*.

- Conde, K. P. (2014). *Evaluación estacional de los parámetros ecológicos en hábitats críticos de la Reserva de la Biósfera Los Petenes, Campeche* [Tesis de maestría, El Colegio de la Frontera Sur].
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M. y Kanninen, M. (2011a). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M. y Kanninen, M. (2011b). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Echeverría-Ávila, S., Pérez-Ceballos, R., Zaldívar-Jiménez, A., Canales-Delgadillo, J., Brito-Pérez, R., Merino-Ibarra, M. y Vovides, A. (2019). Regeneración natural de sitios de manglar degradado en respuesta a la restauración hidrológica. *Madera y Bosques*, 25(1), 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511754>
- Ellison, A. M. y Farnsworth, E. J. (1993). Seedling survivorship, growth, and response to disturbance in Belizean Mangal. *American Journal of Botany*, 80(10), 1137–1145. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1993.tb15345.x>
- Flores, A. F. (2018). *Optimización espacial para la restauración ecológica de manglares en el Parque Nacional Blanca Jeannette Kawas Fernández, Honduras* [Tesis de maestría, CATIE].
- García, P. J. (2015). *Componentes ecosistémicos y modelo de gestión de los manglares achaparrados del río Sarstún en el caribe de Guatemala* [Tesis de doctorado, UNED].
- Hernández-Blanco, M., Costanza, R. y Cifuentes-Jara, M. (2018). *Valoración Económica de los Servicios Ecosistémicos Provistos por los Manglares del Golfo de Nicoya*.
- Herrera, J. A., Camacho, A., Pech, E., Pech, M., Ramírez, J. y Teutli, C. (2016). Dinámica del carbono (almacenes y flujos) en manglares de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 61–72.
- Hoyos, R., Urrego, L. y Lema, Á. (2013). Respuesta de la regeneración natural en manglares del Golfo de Urabá (Colombia) a la variabilidad ambiental y climática intra-anual. *Revista de Biología Tropical*, 61(3), 1445–1461.
- INDER. (2015). *Informe de Caracterización Básica Territorio Abangares-Cañas-Bagaces-Tilarán*. <https://www.inder.go.cr/acbt/Caracterizacion-Abangares-Canas-Bagaces-Tilaran.pdf>
- INDER. (2016). *Plan de Desarrollo Rural Territorial Abangares-Cañas-Bagaces-Tilarán*. <https://www.inder.go.cr/acbt/PDRT-Abangares-Canas-Bagaces-Tilaran.pdf>
- Jiménez, J. A. y Soto, R. (1985). Patrones regionales en la estructura y composición florística de los manglares de la Costa Pacífica de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 33(1), 25–37.
- Kauffman, J. B., Donato María, D. C. y Adame, M. F. (2013). *Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares*.

- Kauffman, J. Boone., Arifanti, V. B., Hernández Trejo, H., Jesús García, M. del C., Norfolk, J., Cifuentes, M., Hadriyanto, D. y Murdiyarso, D. (2017). The jumbo carbon footprint of a shrimp: carbon losses from mangrove deforestation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(4), 183–188. <https://doi.org/10.1002/fee.1482>
- Manrow, M. (2011). *Estrucutra, composición florística, biomasa y carbono arriba del suelo en los manglares Laguna de Gandoca y Estero Moín, Limón, Costa Rica* [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica].
- Marín, J. L. (2009). *Efecto de la frecuencia de inundación y adición de nutrientes en la degradación de hidrocarburos en microcosmos de manglar* [Tesis de maestría, Universidad Veracruzana].
- Merecí, J. (2017). *Evaluación de la dinámica del uso de la tierra y cuatificación de carbono azul en bosques de manglar del Golfo de Guayaquil, Ecuador* [Tesis de maestría, CATIE].
- Merecí-Guamán, J., Casanoves, F., Delgado-Rodríguez, D., Ochoa, P. y Cifuentes-Jara, M. (2021). Impact of shrimp ponds on mangrove blue carbon stocks in Ecuador. *Forests*, 12(7), 1–14. <https://doi.org/10.3390/f12070816>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Avances en la conservación y restauración inclusiva de manglares: estrategias de adaptación al cambio climático*. <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-de-el-salvador/aprovechamiento-industrial-de-recursos-naturales/memoria-foro-de-manglares-2013/20150945>
- Monroy-Torres, M., Flores-Verdugo, F. y Flores-de-Santiago, F. (2014). Crecimiento de tres especies de mangle subtropical en respuesta a la variabilidad en el hidropериodo en un tanque experimental. *Ciencias Marinas*, 40(4), 263–275. <https://doi.org/10.7773/cm.v40i4.2455>
- Pérez-Ceballos, R., Echeverría-Ávila, S., Zaldívar-Jiménez, A., Zaldívar-Jiménez, T. y Herrera-Silveira, J. (2017). Contribución del hidropериodo y la microtopografía a la regeneración natural de *Avicennia germinans* en un sitio de restauración ecológica. *Ciencias Marinas*, 43(1), 55–67. <https://doi.org/10.7773/cm.v43i1.2683>
- Pineda, J. A. (2021). *Potencial de almacenamiento de carbono en manglares en diferentes estadios de restauración en el Golfo de Nicoya, Costa Rica* [Tesis de maestría, CATIE].
- Pineda, J. A. y Vega, A. S. (2018). *Rehabilitación y restauración ecosistémica mediante gestión colaborativa en áreas de manglar que fueron anteriormente utilizadas para la producción de camarón y sal en sitios Patrimonio Natural del Estado del Área de Conservación Arenal Tempisque*.
- Rincón-Pérez, M., Infante-Mata, D., Moreno-Casasola, P., Hernández, M. E., Barba, E. y García-Alfaro, J. R. (2020). Patrones de distribución y estructura de la vegetación en el gradiente de humedales costeros El Castaño, Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*, 68(1), 242–259.

- Sánchez-Arias, L. E., Paolini, J. y Rodríguez, J. P. (2010). Dinámica de las propiedades del suelo en bosques de *Rhizophora mangle* L. (Rhizophoraceae) en Isla de Margarita, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 58(2), 547–564.
- Sidik, F., Adame, M. F. y Lovelock, C. E. (2019). Carbon sequestration and fluxes of restored mangroves in abandoned aquaculture ponds. *Journal of the Indian Ocean Region*, 15(2), 177–192. <https://doi.org/10.1080/19480881.2019.1605659>
- SINAC. (2013). *Plan de Manejo Refugio Nacional de Vida Silvestre Cipancí 2013-2023. Volumen I: Diagnóstico. Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT) y Área de Conservación Tempisque (ACT)*. [http://www.sinac.go.cr/ES/planmanejo/Plan%20Manejo%20ACAT/RN%20Vida%20Silvestre%20Cipanc%C3%AD\(2014\)/PM%20Cipanci%20Volumen%20I-%20Diagn%C3%B3stico.pdf](http://www.sinac.go.cr/ES/planmanejo/Plan%20Manejo%20ACAT/RN%20Vida%20Silvestre%20Cipanc%C3%AD(2014)/PM%20Cipanci%20Volumen%20I-%20Diagn%C3%B3stico.pdf)
- SINAC. (2017). *Política Nacional de Humedales*.
- SINAC. (2019a). *Estrategia Regional para el Manejo y Conservación de los Manglares en el Golfo de Nicoya-Costa Rica-2019-2030*.
- SINAC. (2019b). *Plan General de Manejo (PGM) de los Humedales de Manglares de Colorado y San Buenaventura, Cantón Abangares, Provincia Guanacaste*.
- Teutli-Hernández, C., Herrera-Silveira, J. A., Comín, F. A. y Menéndez, M. (2019). Nurse species could facilitate the recruitment of mangrove seedlings after hydrological rehabilitation. *Ecological Engineering*, 130(2019), 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.030>
- Torres, J. R., Infante-Mata, D., Sánchez, A. J., Espinoza-Tenorio, A. y Barba, E. (2017). Atributos estructurales, productividad (hojarasca) y fenología del manglar en la Laguna Mecoacán, Golfo de México. *Revista de Biología Tropical*, 65(4), 1592–1608.
- Troxler, T. G., Barr, J. G., Fuentes, J. D., Engel, V., Anderson, G., Sanchez, C., Lagomasino, D., Price, R. y Davis, S. E. (2015). Component-specific dynamics of riverine mangrove CO₂ efflux in the Florida coastal Everglades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.012>
- Valverde-Moya, J. A. y Alfaro-Montoya, J. (2013). La experiencia del cultivo comercial de camarones marinos en estanques de producción en Costa Rica. *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, 5, 87–105. <https://doi.org/10.15359/revmar.5.6>
- Zaldívar-Jiménez, M. A., Herrera-Silveira, J. A., Teutli-Hernández, C., Comín, F. A., Andrade, J. L., Molina, C. C. y Ceballos, R. P. (2010). Conceptual framework for mangrove restoration in the Yucatán Peninsula. *Ecological Restoration*, 28(3), 333–342. <https://doi.org/10.3368/er.28.3.333>
- Zamora-Trejos, P. y Cortés, J. (2009). Los manglares de Costa Rica: el Pacífico norte. *Revista de Biología Tropical*, 57(3), 473–488

