



ENVIRONMENT &
TECHNOLOGY
FOUNDATION

ENVIRONMENT & TECHNOLOGY

REVISTA SEMESTRAL
JULIO-DICIEMBRE 2021
VOL.2,N.º2
ISSN: 2711-4422

PROPIEDAD Y EDITORIAL

Environment & Technology Foundation

DIRECCIÓN EDITORIAL

PhD. Liliana Piedra Castro, Costa Rica
PhD. Jaime Ernesto Rivera Hernández, México

COMITÉ EDITORIAL

MSc. Natalia García Corrales, Colombia
PhD. Fernando Ramírez Muñoz, Costa Rica
PhD. Rubén Darío Sepúlveda Vargas, Colombia
PhD. Jorge Rafael Villadiego Lorduy, Colombia
PhD. Graciela Alcántara Salinas, México
PhD. Gustavo Barrantes Castillo, Costa Rica
PhD. Giovanni Saenz Arce, Costa Rica
PhD. Carlos Sabater Piqueres, España
PhD. Tomás Guzmán Hernández, Costa Rica
Msc. Yuri Morales López, Costa Rica
PhD. Massimo Leserri, Italia
MSc. Alfredo Esquivel Acosta, Colombia
MSc. Javier Ricardo Sánchez Castillo, Colombia
PhD. Josemanuel Luna Nemecio, México
PhD. Elkin Quiñonez Agámez, Colombia
PhD. Arleth Franco Peñata, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

PhD. Cristian Morerira Segura, Costa Rica
PhD. Joaquín Durán Mora, Costa Rica
PhD. María Fernanda Garrido Rubiano, Colombia
PhD. Merwan Chaverra Suárez, España
PhD. Napoleón Blanco Orozco, Nicaragua
PhD. Salvatore Barba, España
PhD. Elena Rustrian Portilla, México
PhD. Lina García Corrales, Colombia
PhD. Juan Antonio Pérez Sato, México
PhD. Eric Pascal Houbron, México
MSc. Omar Díaz Hernández, Colombia
PhD. Carmen Pérez Cervera, Colombia
MSc. Stalyn Guerrero Gómez, Colombia
MSc. Nydia Valencia Jimenez, Colombia
Msc. Concepción Amador Ahumada, Colombia
MSc. Luis López Duarte, Nicaragua
MSc. Orlando Tordecilla Correa, Colombia
ESP. Jairo Vélez Vargas, Colombia
MSc. Yhonattan Méndez Nobles, Colombia
MSc. Daniel Espinosa Corrales, Colombia
MSc. Adolfo Cortecero Bossio, Colombia
MSc. Oscar Tuiran Polo, Colombia
ESP. Pabel López Jimenez, Colombia
MSc. Jhoan Pérez Benitez, Colombia
MSc. Edgar Manotas Olascoaga, Colombia
MSc. Abel Felipe Vargas Rueda, México
PhD. Diana Carolina Zambrano Moreno, Colombia
MSc. Natalia Real Luna, México
PhD. Rafael Arturo Muñoz-Márquez Trujillo, México
PhD Rooel Campos Rodríguez, Costa Rica
M BA. Daniel Francisco Pérez Murillo, Costa Rica

E&T Foundation no asume responsabilidad por posiciones presentadas por los autores de los artículos



Los artículos de Environment & Technology se comparten con Licencia Creative Commons CC BY-NC-ND

COLABORADORES

Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre

Universidad Nacional de Costa Rica
(Costa Rica)

Grupo de investigación en calidad de aguas, modelamiento hídrico y ambiental. Programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad Pontificia Bolivariana, sede Montería (Colombia)

Asociación de Geógrafos del Caribe Colombiano (Colombia)

Programa de Doctorado de Ciencias Naturales para el Desarrollo. Instituto Tecnológico, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia (Costa Rica)

Grupo de investigación, ambiente y tecnología adscrito a Environment & Technology Foundation (Colombia)

Grupo de investigación, sostenibilidad y competitividad adscrito a Environment & Technology Foundation (Colombia)

Grupo de investigación DIMMANO (Diseño, materiales, manufacturas y optimización) adscrito a Environment & Technology Foundation (Colombia)

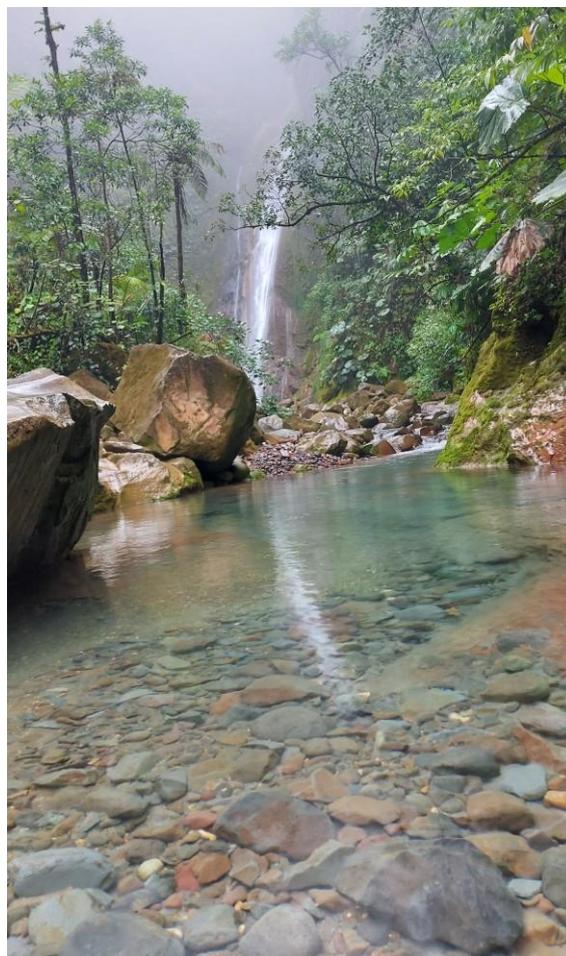
Centro de Estudios Geográficos, Biológicos y Comunitarios, S.C. (México)

Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas. Universidad Nacional de Costa Rica (Costa Rica)

Programa de Maestría en Salud Pública, Universidad de Córdoba (Colombia)

Grupo de Investigación, Huellas Calidad de Vida, adscrito a la maestría en Salud Pública. Universidad de Córdoba (Colombia)

Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba (México)



ASISTENTE EDITORIAL

Ing. Ana María Ramírez Milanés, Colombia
Ing. Pedro Payares Ramos, Colombia

FOTOGRAFÍAS

Fernando Ramírez Muñoz

DISEÑO

DG. Andrea González
DG. María Hoyos
DG. Johana Espinosa

Artículos científicos

- Valoración energética de bio-aceite (bio-oil) producto de la gasificación de tusa de maíz recuperado vía húmeda 1
Energy evaluation of bio-oil product of the gasification of corn cob recovered wet way
Julio Daniel Chaverra Herrera, Diego Alejandro Camargo Trillos.
- Evaluación del rendimiento del gas de síntesis en la gasificación de tusa de maíz con adición de carbonato de calcio (CaCO₃) en un reactor comercial de corriente descendente 17
Syngas performance evaluation on the gasification of corncob with the addition of calcium carbonate (CaCO₃) in a commercial downdraft reactor
Carlos Marengo Porto, Diego Camargo Trillos, Rafael Gómez Vásquez, David Restán Páez, David Sáenz Mejía.
- Valoración ambiental del transecto del Río Hacha en la comuna norte de la ciudad de Florencia Caquetá 35
Environmental assessment of the Hacha River transect in the northern commune of the city of Florencia Caquetá
Alexander Perdomo Perafan, Denis Lorena Alvarez Guayara.
- Modelos de predicción para la fase fenológica de maduración de frutos de manglillo (*Aspidosperma cruentum* Woodson, Apocynaceae) en bosques intervenidos de la Península de Osa, Costa Rica..... 55
Prediction models for the phenological phase of manglillo fruits ripening (Aspidosperma cruentum Woodson, Apocynaceae) in logged-over forests of the Osa Peninsula, Costa Rica.
Mónica Lizbeth Cortés Cortés, Rafael Murillo Cruz, Carlos Ávila Arias, Juan Pablo Villegas Espinoza, David Antonio Carvajal-Arroyo, Ana Isabel Barquero Elizondo, Gustavo Vargas-Rojas.
- Comunidad de peces arrecifales: posibles afectaciones del cambio climático 73
Reef fish community: possible effects of climate change
Humberto López-Ríos Lilliana María Piedra-Castro.

Cobertura de pastos marinos asociado a factores ambientales, Parque Nacional Cahuita, Costa Rica..... 102
Seagrass cover associated to environmental factors, Cahuita National Park, Costa Rica
Lilliana María Álvarez-Sánchez, Beatriz Martínez-Daranas,
Lilliana María Piedra-Castro

El Agua en la COP26

En el mes de noviembre de 2021, líderes mundiales y los responsables de negociación de cada país se reunieron en Escocia durante dos semanas para debatir qué acciones se pueden tomar para hacer frente al cambio climático. Se trata de un proceso complejo que puede resultar difícil de entender desde fuera, pero en esencia, todo se reduce al modo en que las leyes y las instituciones internacionales pueden ayudar a combatir unos problemas que ningún país puede solucionar por separado.

En 1992 una serie de países suscribieron un tratado internacional, la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés), que estableció las normas y expectativas fundamentales para la cooperación global en materia de cambio climático. Fue la primera vez que una mayoría de países reconoció de manera formal la necesidad de controlar las emisiones de efecto invernadero, que son las que provocan el calentamiento global que está detrás del cambio climático.

Este tratado ha conocido, desde entonces, algunas actualizaciones incluida la de 2015, cuando se firmó el Acuerdo del Clima de París. Dicho documento fijó el objetivo de limitar el calentamiento global “muy por debajo” de los dos grados Celsius, llegando incluso a 1.5 grados, para evitar un cambio climático catastrófico.

El último informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de la ONU (IPCC, por sus siglas en inglés), publicado en agosto de 2021, advertía, en los términos más duros utilizados hasta ahora, que la actividad humana está provocando el ascenso de las temperaturas de forma inequívoca y que el cambio climático se está acelerando, intensificando y extendiéndose a todas las regiones del planeta.

Los expertos del IPCC han explicado que el cambio climático ha provocado que se intensifiquen fenómenos extremos como inundaciones, sequías, olas de calor severas, reducción y extinción de especies o el derretimiento de la capa de hielo de los polos, con la consecuente subida del nivel del mar. El Secretario General de la ONU, António Guterres, ha descrito el informe como “un código rojo para la humanidad”.

Los líderes de la coalición Agua y Clima, presentes en la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26), en Glasgow, lanzaron un llamado urgente y unido para una acción integrada por el agua y el clima, con el fin de reemplazar el enfoque actual, fragmentado y orientado hacia la crisis.

El cambio climático agrava tanto la escasez de agua como los riesgos relacionados con el agua, ya que el aumento de las temperaturas interrumpe el régimen de lluvias y todo el ciclo del agua. Actualmente, 3600 millones de personas no tienen acceso al agua durante, al menos, un mes al año y se espera que esta cifra aumente a más de 5000 millones para 2050.

Es claro que solo el 0.5% del agua de la Tierra se puede utilizar y está disponible como agua dulce, pero durante los últimos 20 años el almacenamiento de agua terrestre, tanto en la superficie del suelo como en el subsuelo, incluida la humedad del suelo, la nieve y el hielo, ha disminuido en 1 cm por año. Esto tiene enormes implicaciones para la seguridad hídrica en el futuro, dada la creciente población y la degradación ambiental.

Si bien el Pacto Climático de Glasgow, acordado el 13 de noviembre en la COP26, reafirma el compromiso global de acelerar las acciones a favor del clima durante esta década, dejó a muchos preguntándose si basta con este acuerdo para limitar el calentamiento global en un aumento de 1.5°C con respecto a los niveles preindustriales. "Es un paso importante, pero insuficiente", dijo el Secretario General de las Naciones Unidas, António Guterres, en el balance que realizó sobre la conferencia. "Nuestro frágil planeta pende de un hilo. Seguimos tocando la puerta de la catástrofe climática. Es hora de entrar en modo de emergencia o nuestra posibilidad de alcanzar las cero emisiones netas será, prácticamente, nula".

A pesar de estas preocupaciones, sin duda hubo algunos progresos. Se trazó una hoja de ruta para actualizar las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés), que aún no alcanzan el objetivo de los 1.5°C, según un reciente informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

Por otro lado, la palabra "carbón" se utilizó en un documento oficial de la COP por primera vez, aunque hubo decepción por el hecho de que la frase "eliminación de la energía de carbono" se cambiara por "reducción progresiva", aunque sí se fijó el compromiso de la eliminación gradual de los subsidios ineficientes a los combustibles fósiles. No obstante, es importante resaltar que la COP26 de Glasgow se está centrando exclusivamente en las emisiones de efecto invernadero, olvidando la importancia del agua en el desarrollo sostenible y el impacto actual del calentamiento global en las regiones con estrés hídrico. El agua debe jugar un papel fundamental en la lucha contra el cambio climático y en el diseño de las políticas de adaptación en los próximos años. No puede haber una solución de cambio climático sin agua.

La forma en la que el cambio climático afecta a los seres humanos es casi en su totalidad a través del agua, ya sea por exceso o por defecto. Algunos consideran que la crisis climática es esencialmente una crisis del agua, ya que el aumento de las temperaturas ha llevado a profundos cambios en los patrones de precipitación de muchas partes del mundo. Las inundaciones más intensas y frecuentes contaminan las fuentes de agua y destruyen los cultivos y los hogares, mientras que las sequías más prolongadas y frecuentes secan los manantiales que muchas personas necesitan para sobrevivir.

De acuerdo con un informe reciente publicado por la Organización Meteorológica Mundial, en los últimos 20 años se ha incrementado la frecuencia de los peligros hidrológicos. Desde el año 2000, se ha observado un aumento del 134% de los desastres relacionados con las crecidas, en comparación con las dos décadas anteriores. El número de sequías y su duración también aumentaron en un 29% durante este mismo período, sin embargo, se están tomando

muy pocas medidas para ayudar a las comunidades afectadas: un análisis de WaterAid demuestra que en 2020 el agua recibió menos del 3% de la financiación climática en general. “El agua es fundamental para la vida, por lo que la inversión en la gestión del suministro de agua debería concentrarse en estas áreas. Hasta ahora el enfoque preferente de las conversaciones para abordar la crisis climática ha sido la mitigación, olvidándose de la adaptación y del impacto actual del clima en algunas de las partes del mundo más afectadas por los fenómenos extremos hídricos. ¿Vamos a seguir otorgando mayor atención a los fenómenos extremos de gran cobertura mediática (por su intensidad, duración, frecuencia y trayectoria), en lugar de a los eventos graduales (nivel de mar, patrones de lluvia, cambios fenológicos, etc.) que son más peligrosos y permanentes?”

En conclusión, se requiere una revolución que nos lleve a cero carbono y otra que nos lleve a adaptar los recursos hídricos del mundo para hacer frente al cambio climático. No obstante, nos queda como reflexión que, a pesar de la omnipresencia del agua en los componentes del cambio climático, en las negociaciones del COP26 en Glasgow, el agua estuvo casi ausente.

Eric Houbron
Laboratorio de Gestión y Control Ambiental
Facultad de Ciencias Químicas Orizaba
Universidad Veracruzana

Valoración energética de bio-aceite (bio-oil) producto de la gasificación de tusa de maíz recuperado vía húmeda

Energy evaluation of bio-oil product of the gasification of corn cob recovered wet way

Julio Daniel Chaverra Herrera

Estudiante de Ingeniería Mecánica

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería

julio.chaverrah@upb.edu.co

0000-0002-4530-891X

Colombia

Diego Alejandro Camargo Trillos

Docente de Ingeniería Mecánica

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería

diego.camargo@upb.edu.co

0000-0002-2698-2749

Colombia

Resumen

En este trabajo se evaluó la recuperación y valoración energética del bio-aceite producto de la gasificación de tusa de maíz en un reactor de flujo descendiente y lecho fijo, obtenido por sistemas de lavado con agua (vía húmeda) en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana. A este subproducto se le caracterizaron las propiedades físicas y químicas a partir de una composición química teórica, se correlacionan propiedades como composición química elemental, poder calorífico superior y las fracciones que tiene este bio-aceite para su valoración energética. Primero se llevó a cabo el diseño del sistema de recuperación del bio-aceite mediante decantadores y un sistema de destilación para separarlo. Se valoró la distribución de compuestos orgánicos del bio-aceite en función de ligero, medio y pesado, para temperaturas de destilación 115°C y 215°C. El cálculo de la composición química elemental CHON y el poder calorífico se realizó para dos puntos de operación: por decantado del sistema de lavado y condensación directa, obteniendo C41.0540%, H5.8588%, O35.6199%; N0%, con HHV de 21.2621 MJ/kg y C76.0071%, H 8.4019%, O%, N% con HHV 23.8563 MJ/kg, respectivamente.

Palabras clave: caracterización composicional; compuestos orgánicos; composición elemental; destilación; poder calorífico

Abstract

In this work was evaluated the recovery and energetic valuation of the bio-oil product of the gasification of corncob in a fixed-bed downdraft reactor, obtained by washing systems with water (wet route) in the renewable energy laboratory of the Bolivarian Pontifical University. The physical and chemical properties of this by-product were characterized from a theoretical chemical composition, properties such as elemental chemical composition, higher calorific value, and the fractions that this bio-oil has for its energy evaluation are correlated.

Recibido: 23/06/2021

1 Revisado: 19/11/2021

Aprobado: 23/03/2022



Los artículos de Environment & Technology se comparten con Licencia Creative Commons: CC BY-NC-ND

First, the design of the bio-oil recovery system was carried out using decanters and a distillation system to separate it. The distribution of organic compounds of the bio-oil was evaluated as light, medium and heavy for distilled temperature of 115°C y 215°C. The calculation of the elemental chemical composition CHON and the calorific power was carried out for two operating points: By decanting the washing system and direct condensation, obtaining C41.0540%, H5.8588%, O35.6199%; N0%, with HHV of 21.2621 MJ/kg and C76.0071%, H 8.4019%, O%, N% with HHV 23.8563 MJ/kg respectively.

Key words: compositional characterization; organic compounds; elemental composition; distillation; heating value

Introducción

La generación de energía a partir de biomasa en Colombia es un campo relativamente nuevo; no fue hasta el 2012 cuando se empezó a ver un ligero aumento de cerca del 8%, gracias a pequeñas plantas usadas generalmente en zonas rurales, donde hay difícil acceso al fluido eléctrico (Semana, 2017). Para el 2016, se generaron aproximadamente 65900 GWh de energía eléctrica donde cerca de 590 GWh fueron producidos a partir de biomasa, lo cual equivale solo al 0.9% del total de la energía eléctrica producida nacionalmente (Cleanenergybrief, 2018).

En el departamento de Córdoba se producen anualmente cerca de 2, 261,839T de biomasa residual (Ministerio de agricultura y FNCE, 2010). La gran mayoría de estos desechos simplemente son descartados, por lo que se estima que el departamento tiene un gran potencial energético en cuanto a biomasa se refiere. Teniendo en cuenta los datos anteriores, el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Montería, viene desarrollando investigaciones referentes a la optimización y producción de energía en ese campo.

La biomasa, con el gran auge de fuentes de energía renovables, ha venido tomando un gran papel a partir de su procesamiento para la generación de energía (Semana, 2017). En Colombia, según el Ministerio de Minas y Energía, se producen aproximadamente 71,943,162T al año de biomasa residual, de las cuales 492,738T son de cascarilla de arroz y 369.505T son de tusa de maíz (Ministerio de agricultura y FNCE, 2010) que es un residuo en la obtención de maíz producto de la agricultura. Estos residuos, mediante procesos termoquímicos, se transforman en biocombustible. Entre estos procesos están la gasificación y la pirólisis, principalmente producen tres grandes elementos, gases (syngas), líquidos (bio-oil) y carbón (biochar). Los rendimientos obtenidos en la pirólisis son aproximadamente de

47.3% para bio-oil, 28.7% para syngas, 24% para bio-char; en la gasificación son del 20% para bio-oil, 70% para syngas y 10% para bio-char (Bridgwater, 2003).

El bio-aceite resultante de biomasa lignocelulósica, como la tusa de maíz, proveniente de los procesos de gasificación y pirólisis, tiene propiedades como combustible líquido y abre una gran oportunidad de almacenarlo para usarlo en la generación de energía, sustituyendo potencialmente al combustible fósil, siempre y cuando el sector de la energía pueda adaptarse a las propiedades especiales que posee (Buffi, Cappelletti, Rizzo, Martelli y Chiaramonti, 2018), ofrece un HHV (higher heating value) de hasta 24MJ/kg (Channiwala y Parikh, 2002) por tal, en el futuro no sería raro que el comercio automotor modifique las normas respecto al uso y mejoramiento de las propiedades de ese combustible .

El objetivo principal en este trabajo es evaluar el proceso de recuperación de bio-aceite producto de la gasificación y pirólisis de tusa de maíz, condensado vía húmeda por lavado del gas en scrubber, para su posterior caracterización de la composición **CHONS** y valoración energética **HHV**.

Metodología

Origen del bio-aceite

El proceso inicia con la tusa de maíz previamente seca, que en el proceso de gasificación en un microgasificador de biomasa tipo downdraft se obtiene un bio-aceite bruto, el cual tiene una parte soluble y que está inmerso en agua, que proviene de un proceso de gasificación (**Figura 1**), que es un residuo de la agricultura del departamento de Córdoba, Colombia.

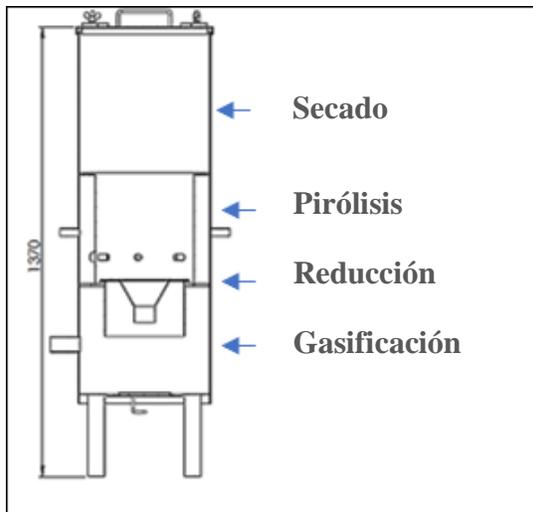


Figura 1. Diagrama de un reactor de gasificación tipo downdraft. Fuente: Elaboración propia

Funcionamiento básico del microgasificador

Este equipo tiene un reactor o cámara de combustión, cuenta con 6 tubos de alimentación de aire, en la parte inferior hay una malla con su respectiva granulometría para el paso del biochar. El gas producido viaja por las tuberías hasta el intercambiador donde se enfría el syngas y se condensa el bio-aceite, gracias al agua que es movida por la electrobomba, a su vez, esta hace que el syngas viaje al tanque debido a una caída de presión, donde se sigue enfriando y se termina de condensar el bio-aceite. Finalmente, el gas se lleva desde la parte superior del tanque por tuberías para hacer pruebas cromatográficas (Restán, 2019) (**Figura 3**).

Sistemas de recuperación de bio-aceite

Para la recuperación del bio-aceite se empleó un sistema sencillo de decantación, usado para una separación macro, que, por la acción de la gravedad sobre los líquidos, envía a los de mayor densidad hacia abajo, como el agua (Raffino, 2018). Se usaron dos decantadores, el primero fabricado en PVC y el segundo una “jirafa” comúnmente usada para el dispendio de líquidos (**Figura 2**).

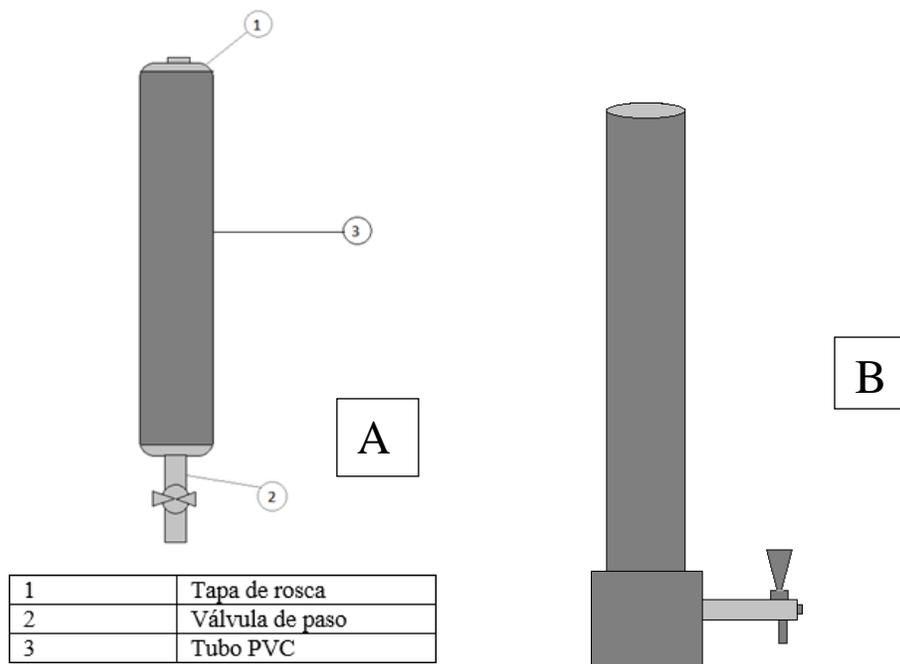


Figura 2. Diagramas de los decantadores. Fuente: Elaboración propia

El aceite siempre quedará en la parte superior, tanto del depósito como del decantador, donde se acciona la pequeña llave y se hace bajar el nivel de agua, permitiendo acumular una columna de aceite.

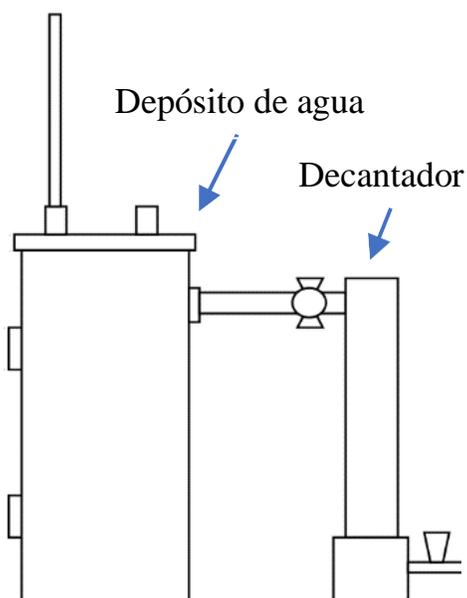


Figura 3. Diagrama del sistema de recuperación vía húmeda. Fuente: Elaboración propia

Separación del bio-aceite

El bio-aceite tiene varias fracciones o productos, entre las principales está el TAR, la cual es una fracción alquitranosa y otra parte menos viscosa que se puede separar en ligero, medio o pesado. Estos productos se obtienen mediante un sistema de destilación, donde se separan a diferentes temperaturas de acuerdo a sus puntos de ebullición; la temperatura a la que se destila el bio-aceite ligero es 115°C y la fracción media a 215° (Omar y Robinson, 2014).

El producto remanente es el bio-aceite pesado, en este caso se lleva a cabo un montaje que nos permite calentar y burbujear nitrógeno (gas) como se muestra en la **Figura 4**. Se comienza tomando datos de pesos de las muestras de bio-aceite a separar y se pone en un tubo de ensayo para luego calentarlo mediante una malla calentadora, aumentando de 2 grados por minuto, al alcanzar los 115° se deja allí 15min y luego lo mismo en 215°.

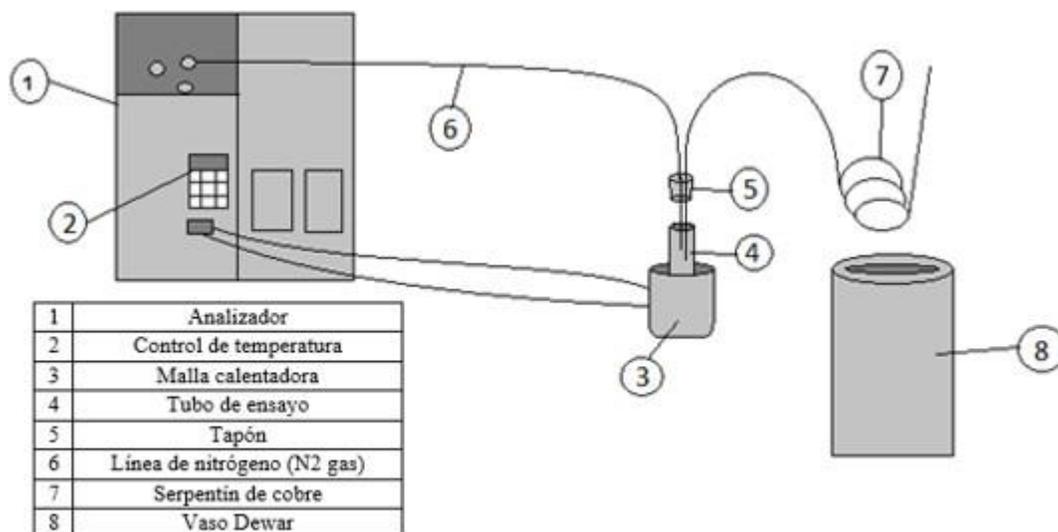


Figura 4. Diagrama del montaje para separación de bio-aceite. Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se montó una vía de escape de los gases hacia un serpentín de cobre que se encuentra inmerso en un vaso Dewar lleno de nitrógeno líquido que se iba llenando a medida que bajaba el nivel. En este serpentín se condensan y recuperan los productos, es decir, este montaje cuenta con una fase de evaporación y otra de condensación de bio-aceite.

Caracterización teórica del bio-aceite

Para esta caracterización partimos de una lista de compuestos plenamente identificados y caracterizados de bio-aceite de tusa de maíz (Mullen et al., 2010) que se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. *Compuestos del bio-aceite*

Método	Compuestos	(wt% de bio-oil)
Compuestos derivados Celulosa/hemicelulosa		
HPLC	Levoglucosan (1)	5.31
HPLC	Hidroxiacetaldehido (2)	1.44
HPLC	Ácido Acético (3)	6.43
HPLC	Acetol (4)	10.14
GC	Furfural (5)	1.2
GC	Furfuril alcohol (6)	0.3
GC	3-Metil-2-ciclopentano-1-uno (7)	0.38
GC	4-Hidroxi-4-metil-2-pentanona (8)	0.12
Compuestos derivados Lignina		
GC	Fenol (9)	0.79
GC	o-Cresol (10)	0.17
GC	p-Cresol (11)	0.19
GC	m-Cresol (12)	0.17
GC	2,4-Dimetil fenol (13)	0.05
GC	3,5-Dimetilfenol (14)	0.02
GC	4-Etil fenol (15)	0.54
GC	3-Etilfenol (16)	0.02
GC	2-Etilfenol (17)	0.01
GC	Guaiacol (18)	0.61
GC	2-Metoxi-4-metil fenol (19)	0.31
GC	Isoeugenol (20)	0.28
GC	2,6-Dimetoxifenol (21)	0.63

Fuente: (Mullen et al., 2010)

Lo siguiente fue calcular la composición de cada elemento (CHONS en función del número de átomos) clasificándolos por su peso molecular, fracción molar y carga térmica (kJ/kg) con las fórmulas 1, 2, 3 y 4, que se presentan a continuación:

$$PM = (C)(12.0107) + (H)(1.00784) + (O)(15.999) + (N)(14.0067) + (S)(2.065) \quad (1)$$

$$Moles = \frac{\left(\frac{(1)(\%peso)}{100}\right)}{PM} \quad (2)$$

$$Fracción\ molar = \frac{Moles}{\sum Moles} \quad (3)$$

$$Carga\ térmica = \frac{\%peso(\Delta h\ vap)}{100} \quad (4)$$

Con los cálculos anteriores se hizo una corrección multiplicando la composición inicial por su fracción molar y se hace una sumatoria para obtener el porcentaje elemental (CHONS) pasado a masa y luego se calcula la fracción másica con las siguientes fórmulas (5, 6 y 7):

$$Corrección\ composición = \#átomos(fracción\ molar) \quad (5)$$

$$Masa = (\sum\ corrección\ composición) (masa\ atómica) \quad (6)$$

$$Fracción\ másica\ (i) = \frac{Masa}{\sum\ Masa} \quad (7)$$

Bio-aceite por condensación directa

Los cálculos se realizaron para dos puntos de operación: condensación directa y por decantado del sistema de lavado. La primera simulando un bio-aceite obtenido directamente de un condensador, por lo que se tomaron todos los componentes como en “Caracterización teórica del bio-aceite”. Para el poder calorífico se usa una correlación (8) de Channiwala y Parikh (2002), que es específicamente para biomasa:

$$HHV = (0.349C_i + 1.1783H_i - 0.1034O_i - 0.0151N_i)(100) \quad (8)$$

Bio-aceite por decantado del sistema de lavado

Para este caso se quitan los compuestos solubles en agua para simular que el bio-aceite pasa por este proceso, ya que la decantación separa de forma macro el agua del aceite. Para el poder calorífico se usó la misma correlación (8).

Resultado y discusión

Recuperación del bio-aceite vía húmeda

Para la recuperación del bio-aceite por este método, se modificó una parte del sistema de lavado del microgasificador, se agregó una llave de paso y se conectó el decantador a esta, con el fin de semi-automatizar el proceso. El bio-aceite yace en la parte superior del tanque y mediante la válvula de paso se logra que pase solo la fracción superior del contenido del tanque, reduciendo considerablemente la cantidad de agua y haciendo más eficiente el proceso de recuperación (**Figura 3**)

Caracterización teórica del bio-aceite

Para el poder calorífico se usó una fórmula de correlación (8) de Channiwala y Parikh (2002) y se calculó la fracción másica de CHON. Esta correlación se aplica para los dos puntos de operación, tanto por condensación directa como por decantado del sistema de lavado.

$$HHV = (0.349C_i + 1.1783H_i - 0.1034O_i - 0.0151N_i)(100) \quad (8)$$

Bio-aceite por condensación directa

Los datos obtenidos con el procedimiento de condensación directa se presentan en la **Tabla 2**, donde se destaca la obtención de un HHV con valor de 21.2621609 MJ/kg.

Tabla 2. Hoja de cálculo del bio-aceite por condensación directa

	Porcentaje de peso	Temp. de ebullición (K)	Δh vap	PM	Kmol-1kg	Fración molar	Carga Térmica (kJ/kg)	C	H	O	N	S
1	5.31	657	92.2	162.1376	0.0003275	0.092853	4.89582	0.55712	0.92853	0.46426	0	0
2	1.44	404.4	70.5	60.05076	0.0002398	0.067987	1.0152	0.13597	0.27195	0.13597	0	0
3	6.43	391.2	23.7	60.05076	0.0010708	0.303583	1.52391	0.60717	1.21433	0.60717	0	0
4	10.14	418	42	74.07714	0.0013688	0.388096	4.2588	1.16429	2.32857	0.77619	0	0
5	1.2	236.5	149.6	96.08286	0.0001249	0.03541	1.7952	0.17705	0.14164	0.07082	0	0
6	0.3	443	53.6	98.09854	0.0000306	0.00867	0.1608	0.04335	0.05202	0.01734	0	0
7	0.38	430.65	39.42	96.12592	0.0000395	0.011208	0.149796	0.06725	0.08966	0.01121	0	0
8	0.12	441.05	52.13	116.15628	0.0000103	0.002929	0.062556	0.01757	0.03515	0.00586	0	0
9	0.79	633.15	58.8	94.11024	0.0000839	0.0238	0.46452	0.1428	0.1428	0.0238	0	0
10	0.17	464.15	44.89	108.13662	0.0000157	0.004457	0.076313	0.0312	0.03566	0.00446	0	0
11	0.19	474.9	46.61	108.13662	0.0000176	0.004982	0.088559	0.03487	0.03985	0.00498	0	0
12	0.17	475.92	60.6	108.13662	0.0000157	0.004457	0.10302	0.0312	0.03566	0.00446	0	0
13	0.05	485.37	51.8	122.163	0.0000041	0.00116	0.0259	0.00928	0.0116	0.00116	0	0
14	0.02	492.65	55.3	122.163	0.0000016	0.000464	0.01106	0.00371	0.00464	0.00046	0	0
15	0.54	491.05	53.2	122.163	0.0000442	0.012533	0.28728	0.10026	0.12533	0.01253	0	0
16	0.02	491.55	68.1	122.163	0.0000016	0.000464	0.01362	0.00371	0.00464	0.00046	0	0
17	0.01	477.67	64.5	122.163	0.0000008	0.000232	0.00645	0.00186	0.00232	0.00023	0	0
18	0.61	478.15	62.6	124.13562	0.0000491	0.013932	0.38186	0.09753	0.11146	0.02786	0	0
19	0.31	494.15	70.9	138.162	0.0000224	0.006361	0.21979	0.05089	0.06361	0.01272	0	0
20	0.28	539.15	56.17	164.19908	0.0000171	0.004835	0.157276	0.04835	0.05802	0.00967	0	0
21	0.63	534.15	54.17	154.161	0.0000409	0.011586	0.341271	0.09269	0.11586	0.03476	0	0
					0.0035271	1	16.039001	3.41812	5.81331	2.22639	0	0
								Masa				
								41.054	5.85889	35.62	0	0
								Fración másica				
								0.49743	0.07099	0.43159	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Fracción peso a peso de las fracciones de bio-aceite separado por destilación

Fracción	P1	P2	P3
% w/w F1	2%	15%	17%
% w/w F2	24%	22%	25%
% w/w F3	74%	63%	58%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la separación del bio-aceite se muestran en la **Tabla 4**, en donde P1 corresponde a la primera prueba de separación realizada, P2 a la segunda y P3 a la tercera y las fracciones se refieren, en el caso de F1, a la fracción separada a los 115°C, F2 a la fracción separada a los 215°C y F3 a la fracción remanente del proceso. Según la teoría (Omar y Robinson, 2014) esta última fracción (F3) corresponde a la fracción de bio-aceite pesado, lo cual sorprendió bastante, ya que visualmente se observaba la muestra completa como bio-aceite ligero. Las fracciones medias del bio-aceite contienen $6\% \pm 0.4$ de compuestos ligeros, $23\% \pm 0.5$ de compuestos medianos y $65\% \pm 5.2$ de compuestos pesados (**Figura 5**).

Visualmente las muestras separadas permiten analizar muy poco, aunque levemente es visible un color más claro en las fracciones F1 de cada prueba. Cabe mencionar que F0 (**Figura 5**) son muestras del bio-aceite original o sin separar.

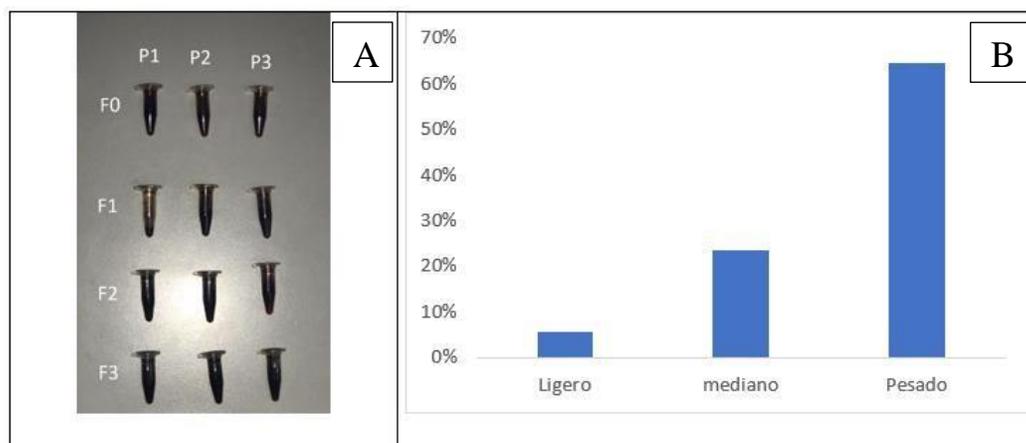


Figura 5. Muestras de bio-aceite separado (A) y porcentajes (B). Fuente: Elaboración propia

Se utilizó un picnómetro de 5cm³ para el cálculo del volumen (**Tabla 5**) y la densidad (**Tabla 6**) del bio-aceite; la masa se midió en una balanza de precisión.

Tabla 5. *Datos para calcular el volumen*

Picnómetro (g)	Picnómetro con aceite original (g)	Picnómetro con aceite remanente (g)	Volumen (cm ³)
7.6558	12.3116	12.3086	5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. *Datos de densidad*

	Aceite original (g)	Aceite remanente (g)
Masa (g)	4.6558	4.6528
Volumen (cm ³)	5	5
Densidad (g/ cm ³)	0.93116	0.93056

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Se validó la facilidad de recuperación de bio-aceite producto de gasificación y pirólisis de tusa de maíz condensado vía húmeda, con la implementación de sistemas simples tipo decantadores, que permitieron la recuperación de subproductos con un bajo costo de inversión.

El bio-aceite recuperado de la transformación termoquímica de la biomasa en microgasificador de lecho fijo descendente, se caracterizó por una fuerte participación de compuestos orgánicos pesados (temperatura ebullición $> 215^{\circ}\text{C}$), que representaron un 65% de sus componentes orgánicos.

Una comparación del poder calorífico superior **HHV** del bio-aceite obtenido de la decantación (vía húmeda) y directa condensación con valores de 21.26216087 (MJ/kg) y 23.85632707 (MJ/kg) respectivamente, muestra una reducción de la energía potencial del bio-aceite no mayor a 12.20%, cuando se implementan sistemas de lavado con agua.

Referencias

- Bridgwater, A. V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91(2–3), 87–102. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)
- Buffi, M., Cappelletti, A., Rizzo, A. M., Martelli, F., & Chiaramonti, D. (2018). Combustion of fast pyrolysis bio-oil and blends in a micro gas turbine. *Biomass and Bioenergy*, 115(April), 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.020>
- Channiwala, S., & Parikh, P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 81(8), 1051–1063. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)
- Energía limpia XXI. (28 de abril de 2017). Biomasa: Caña de azúcar y energía biomasa en Colombia. Recuperado de <https://energialimpiaparatodos.com/2017/04/28/cana-de-azucar-y-energia-biomasa-en-colombia/comment-page-1/>
- Ministerio de Agricultura y Fuentes No Convencionales de Energía FNCE. (2010). Potencial energético de la biomasa residual del sector agrícola en Colombia. Recuperado de <http://www.si3ea.gov.co/Home/Biomasa/tabid/76/language/es-ES/Default.aspx>
- Mullen, C., Boateng, A., Goldberg, N., Lima, I., Laird, D., & Hicks, K. (2010). Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 34(1), 67–74. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.012>
- Omar, R., & Robinson, J. (2014). Conventional and microwave-assisted pyrolysis of rapeseed oil for bio-fuel production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.012>
- Raffino, M.(2018, December 18). Concepto de Decantación. Recuperado de <https://concepto.de/decantacion/>

Restán D. (2019). Estudio de Sensibilidad del Syngas Producto de la Gasificación de Tusa de Maíz con la Modificación del Campo CO₂ Durante la Gasificación. Universidad Pontificia Bolivariana.

Semana, S. (2017, septiembre 26). Los secretos ocultos de la biomasa. Recuperado de <https://sostenibilidad.semana.com/negocios-verdes/articulo/la-biomasa-genera-energia-para-llevar-electricidad-a-zonas-apartadas/38697>



Evaluación del rendimiento del gas de síntesis en la gasificación de tusa de maíz con adición de carbonato de calcio (CaCO₃) en un reactor comercial de corriente descendente

Syngas performance evaluation on the gasification of corncob with the addition of calcium carbonate (CaCO₃) in a commercial downdraft reactor

Carlos Marengo Porto

Ingeniero Mecánico

Universidad Pontificia Bolivariana

carlos.manrecop@upb.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-2969-5040>

Córdoba - Colombia

Diego Camargo Trillos

PhD Ingeniería Mecánica

Universidad Pontificia Bolivariana

diego.camargo@upb.edu.co

<http://orcid.org/0000-0002-2698-2749>

Córdoba - Colombia

Rafael Gómez Vásquez

MSc. Ingeniería Mecánica

Universidad Pontificia Bolivariana

rafael.gomezv@upb.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-2240-4642>

Córdoba - Colombia

David Restán Páez

Ingeniero Mecánico

Universidad Pontificia Bolivariana

<https://orcid.org/0000-0003-3671-2192>

david.restanp@upb.edu.co

Córdoba – Colombia



Resumen

En esta investigación se realizó una evaluación de la gasificación catalítica de tusa de maíz con CaCO_3 . Esta evaluación se ejecutó en dos etapas. La primera etapa consistió en analizar la respuesta de la temperatura de gasificación en un microgasificador de lecho fijo de flujo descendente ante la variación de la relación $w\text{CaCO}_3/w\text{Biomasa}$, esto para determinar experimentalmente los límites máximos de esta relación que permitan una temperatura apta para la gasificación superior a 850°C . Como resultado de esta etapa se determinó que con una relación de 1% la temperatura de la gasificación estaría por debajo del límite planteado anteriormente. Una segunda etapa consistió en la valoración experimental del efecto del uso de CaCO_3 en el rendimiento operativo de planta piloto de gasificación con capacidad para generar 40kWe. Para este propósito se realizó una caracterización operativa y composición química del syngas producto de gasificación directa de tusa de maíz sin pretratamiento llamada una prueba base (B) y gasificación de tusa de maíz con presencia de CaCO_3 con una relación peso/peso 1% $\text{CaCO}_3/\text{Biomasa}$ (BC). Los resultados obtenidos mostraron un incremento de 4% y 5% en los campos de CO y H_2 respectivamente, ninguna variación en el campo de CH_4 y una reducción de un 9% en el campo de CO_2 producto de la gasificación con catálisis *in situ* del gasificador.

Palabras clave: Catalizador; alquitranes; lecho fijo; biomasa; craqueo.

Abstract

In this research, an evaluation of the catalytic gasification of corncob with CaCO_3 was carried out. This evaluation was carried out in two stages. The first stage consisted of analyzing the response of the gasification temperature in a downflow fixed-bed microgasifier to the variation of the $w\text{CaCO}_3/w\text{Biomass}$ ratio, this to experimentally determine the maximum limits of this relationship that allow a suitable temperature for gasification. above 850°C . As a result of this stage, it was determined that with a ratio of 1% the gasification temperature would be below the limit set out above. A second stage consisted of the experimental assessment of the effect of the use of CaCO_3 on the operating performance of a pilot gasification plant with the capacity to generate 40kWe. For this purpose, an operational characterization and chemical composition of the syngas product of direct gasification of corncob without pretreatment was carried out, called a base test (B), and gasification of corncob with the presence of CaCO_3 with a weight / weight ratio of 1% $\text{CaCO}_3/\text{Biomass}$ (BC). The results obtained showed an increase of 4% and 5% in the CO and H_2 fields respectively, no variation in the CH_4 field and a reduction of 9% in the CO_2 field because of gasification with *in-situ* catalysis of the gasifier.

Key words: Catalyst; tars; fixed bed; biomass; cracking.

Introducción

La transformación termoquímica de la biomasa a través de procesos de oxidación total o parcial permite la obtención de energía en diferentes formas como térmica, eléctrica y mecánica. La gasificación de la biomasa se ha convertido en una tecnología emergente con un alto potencial para el aprovechamiento de las biomásas residuales, ya que a través de esta tecnología es posible la obtención simultánea de distintas formas de energía y la generación

de biochar, el cual es un subproducto de la transformación termoquímica de biomasa con un reconocido potencial para la reducción de emisiones de CO₂ en el planeta (Pehl et al., 2017). Sin embargo, este tipo de tecnología todavía debe enfrentar una serie de dificultades técnicas, que impiden su implementación. Estas dificultades están asociadas a una alta generación de alquitranes (Chan & Tanksale, 2014), el cual es un subproducto de la transformación termoquímica de la biomasa, que ocasiona una reducción de la energía potencial generada, un incremento en el costo de mantenimiento y un control ambiental estricto de los efluentes de las plantas de gasificación para dar un correcto manejo de estos compuestos (Liu et al., 2019).

Una alternativa innovadora para sobrellevar estas dificultades técnicas es la evaluación del efecto de catalizadores para el reformado de los alquitranes, que permitan el aumento de la composición de hidrógeno en el Syngas (Yan et al., 2019) y, así mismo, el incremento de la energía obtenida entre un 25 a 43% a través de la gasificación (Udomsirichakorn, Basu, Salam, & Acharya, 2013). Por lo anterior, el desarrollo de sistemas de reformado de alquitranes es un paso crítico para la adopción tecnológica de la gasificación y uso de la biomasa residual.

En estudios de gasificación se ha demostrado que las fracciones molares de hidrógeno aumentan con el aumento de la temperatura de reacción (Nipattummakul, Ahmed II, Gupta, & Kerdsuwan, 2011). Además, se ha reportado que el precalentamiento del aire aumenta el porcentaje de hidrógeno y monóxido de carbono en el gas producido (Guangul, Sulaiman, & Ramli, 2012); estos beneficios descritos son producto del craqueo térmico de alquitranes y moléculas que favorecen el campo de H₂ en el Syngas (Surjosatyo et al., 2019). Por otro lado, Kannaiyan, Ramanan, Rajagopal, & Jayabalan (2016) muestran que, a temperaturas superiores a 750 °C, los alquitranes se craquean produciendo H₂ bajo catálisis.

También se ha demostrado que el uso de catalizadores, como la dolomita dentro del gasificador, promueve la reducción de alquitranes y aumenta el rendimiento del gas (Richardson, Blin, & Julbe, 2012; Xie, Kong, Liu, & Zeng, 2012). Ahora bien, conociendo que el hidrógeno es el elemento que tiene el más elevado poder calorífico (141.86 MJ/kg) (Guervós-Sanchez, 2003), que en comparación con el gas natural que está entre 38.6 MJ/kg y 42.7 MJ/kg (INCOMBUSTION-NATURA, 2016), un pequeño incremento en la cantidad de hidrógeno en los Syngas puede representar un incremento significativo en el poder calorífico de los mismos.

Autores como Guan Hu, Li, Xiao, & Liu (2006) han evidenciado que el olivino y la dolomita se activan en la gasificación con catalizador y vapor, lo cual produce el craqueo y reformado de alquitranes para la producción un gas más rico en H₂. Además, la actividad catalítica es mejor cuando la gasificación tiene valores de temperatura cercanos a los 900 °C. Entre los catalizadores probados, la dolomita calcinada fue el más efectivo, sin embargo, este se transforma en partículas finas después de la calcinación, lo que da como resultado el bloqueo y la obstrucción de los filtros, por lo que recomiendan que sea utilizada aguas abajo del reactor. La dolomita es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio CaMg(CO₃)₂ que, a temperaturas mayores de 825 °C, sufre un proceso de descarbonatación produciendo CO₂, óxidos de magnesio y calcio.

Consecuentemente, con el proceso de gasificación existen reacciones básicas, como lo son las reacciones de carbono, reacciones de oxidación, shift reacción y la reacción de craqueo de alquitranes. Estas reacciones se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Reacciones de gasificación

Tipo de reacción	Reacción
Reacciones de carbono	
1. R1	$C + CO_2 \leftrightarrow 2 CO + 172 \text{ kJ/mol}$
2. R2	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131 \text{ kJ/mol}$
3. R3	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 - 74.8 \text{ kJ/mol}$
4. R4	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO - 111 \text{ kJ/mol}$
Reacciones de oxidación	
5. R5	$C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394 \text{ kJ/mol}$
6. R6	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 - 284 \text{ kJ/mol}$
7. R7	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O - 803 \text{ kJ/mol}$
8. R8	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O - 242 \text{ kJ/mol}$
Shift reaction	
9. R9	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2 \text{ kJ/mol}$
Reacciones de metanación	
10. R10	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247 \text{ kJ/mol}$
11. R11	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O - 206 \text{ kJ/mol}$
12. R12	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O - 165 \text{ kJ/mol}$
Reacciones de reformado de alquitranes	
13. R13	$\frac{C}{n} \frac{H}{x} + nCO \xrightarrow[2_{Cat}]{2} \left(\frac{x}{2}\right) \frac{H}{2} + 2nCO$

Tipo de reacción	Reacción
14. R14	$C_nH_x + nH_2O \xrightarrow[cat]{\rightarrow} (n+x)H_2 + nCO$
Reacción de descarbonatación del CaCO₃	
15. R15	$Ca(CO_3)_2 \xrightarrow{\rightarrow} CaO + 2CO_2 - 178 \text{ kJ/kg}$

Fuente: Tomado de (Dahou et al., 2021; Kumar & Paul, 2020)

El efecto positivo de la adición de la dolomita en procesos de gasificación está asociado a distintos mecanismos, entre ellos se pueden resaltar el incremento del campo del CO₂ que puede afectar las reacciones de gasificación (Narendra, Adhikari, & Eden, 2016) y generar la catálisis de procesos de reformado y gasificación por la presencia de óxidos de calcio y magnesio (CaO).

Con la adición de CaCO₃ *in situ* se espera un efecto positivo en la gasificación en lecho fijo, pues producto de la descarbonatación en la zona de pirólisis, se espera un incremento del campo del CO₂ que puede afectar las reacciones de gasificación (R1, R9, R10) (Narendra, Adhikari, & Eden, 2016) y disponibilidad de CaO como agente catalítico del reformado y craqueo de alquitranes en zonas de pirólisis y oxidación (R13, R14) (Richardson, Blin, & Julbe, 2012; Xie, Kong, Liu, & Zeng, 2012).

Sin embargo, la reacción de descarbonatación (**R15**) es endotérmica y reversible con un requerimiento energético estimado de -178 kJ/kg (Detchusananard et al., 2018). Lo que supone una carga térmica adicional a los reactores de gasificación poniendo en riesgo su estabilidad operativa.

En este trabajo se buscó evaluar los rendimientos y composición del gas de síntesis a partir de la gasificación de tusa de maíz proveniente del proceso de desgrane con adición *in situ* de carbonato de calcio (CaCO₃) como agente catalítico. Inicialmente se realizó una evaluación de la estabilidad térmica de la gasificación a escala de laboratorio. Por último, se empleó un reactor a escala industrial para la valoración de los efectos catalíticos directos, siguiendo los cambios en la composición del gas de síntesis, así como la valoración del desempeño a través del enriquecimiento de especies combustibles de H₂ y CO.

Metodología

Caracterización de materia prima

La biomasa se caracterizó mediante un análisis elemental y próximo para determinar la composición de contenidos de C, H, N mediante la Norma ASTM D 5373 para la muestra de tusa de maíz de la zona (Córdoba - Colombia) y las siguientes Normas: ASTM D 3173 para la humedad, ASTM D 3175 para contenido en volátiles y ASTM D 3174 para cenizas. Los ensayos fueron llevados a cabo en el laboratorio de carbones de la Universidad Nacional de Colombia.

Evaluación de la gasificación

La evaluación de la gasificación se realizó en dos etapas. Como primera etapa se efectúa un análisis de la estabilidad térmica del proceso a escala de laboratorio, enfocado en determinar el efecto de la adición de CaCO_3 como catalizador *in situ* durante la gasificación de biomasa. Puesto que con este proceso se adiciona una reacción endotérmica de alta demanda energética para la descarbonatación del CaCO_3 (Ver R14), se ocasiona una inestabilidad térmica de la operación reduciendo la temperatura por debajo de $850\text{ }^\circ\text{C}$, condición que desfavorece las reacciones de la gasificación del carbono (Duman et al., 2018).

El límite experimental de la relación $w\text{CaCO}_3/w\text{Biomasa}$ se determinó verificando el efecto de la temperatura de gasificación asociada a la demanda endotérmica de las reacciones de CaCO_3 . Se realizó un balance de masa y energía para calcular la temperatura final de la gasificación y se validó realizando pruebas en microgasificador de corriente descendente (Downdraft) autotérmico con aire, para composiciones de mezcla $w\text{CaCO}_3/w\text{Biomasa}$ de 0.5%, 1.0% y 1.5%. El syngas producto de la gasificación del equipo fue caracterizado por cromatografía de gases.

En una segunda etapa se evaluó el efecto de CaCO_3 como catalizador *in situ* con la biomasa, sobre el rendimiento y composición del Syngas producido en una planta piloto de gasificación. En esta fase se realizó un ANOVA de la composición del syngas sobre la adición de CaCO_3 . Se realizaron dos pruebas de gasificación a escala piloto, una con una relación $w\text{CaCO}_3/w\text{Biomasa}$ de 0% y otra con una relación de $w\text{CaCO}_3/w\text{Biomasa}$ de 1%. Para asegurar una estabilidad del proceso, antes de iniciar cada prueba se adicionó la mezcla de biomasa hasta ocupar $1/4$ de la capacidad máxima del reactor hasta que las temperaturas

del cuello y los gases de salida estuvieran en los rangos de operación promedio (850 °C y 310 °C, respectivamente); una vez estabilizados estos parámetros se depositó la biomasa en el reactor llenándolo con su máxima capacidad; en el instante que se cierra el reactor se inicia con la recolección de datos de composición volumétrica del Syngas (x_{H_2} , x_{CH_4} , x_{CO} , x_{CO_2} , x_{N_2}) durante una hora.

La medición del campo de gases se realiza en un cromatógrafo de gases de inyección por loop modelo AMGC 606 con un detector de gases tipo TCD que permite la medición de gases elementales como H_2 , CO , CH_4 y N_2 en columna de tamiz molecular marca Agilent y composición de CO_2 .

Variables y parámetros de desempeño de la gasificación

El Flujo másico de biomasa \dot{m}_{Bio} y flujo másico de biochar \dot{m}_{Char} fueron calculados a partir de las expresiones:

$$\dot{m}_{Bio} = \frac{m_{bio}}{t} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{Char} = \frac{m_{Char}}{t} \quad (2)$$

Donde m_{bio} es la masa total de biomasa agregada al inicio de cada prueba, m_{Char} es la masa de biochar generado durante la prueba y t es el tiempo de gasificación.

El flujo másico de gas \dot{m}_{Gas} fue calculado a partir de la ecuación:

$$\dot{m}_{Gas} = \rho_{Gas} * V_{Gas} \quad (3)$$

Donde V_{Gas} es el flujo volumétrico de gas, el cual fue medido con un medidor de flujo de placa orificio y ρ_{Gas} es la densidad del gas calculada a partir de su composición.

El flujo másico de aire \dot{m}_{Aire} fue estimado a partir de la fracción de masa de nitrógeno y_{N_2} y el flujo másico de gas:

$$\dot{m}_{Aire} = \frac{y_{N_2} * \dot{m}_{Gas}}{0.765} \quad (4)$$

El *ER* o equivalente ratio es una relación entre el oxígeno que ingresa a la zona de oxidación xO y el oxígeno estequiométrico $A_{th}O$. Matemáticamente se define como:

$$ER = \frac{\text{Oxígeno actual}}{\text{Oxígeno estequiométrico}} = \frac{xO}{A_{th}O} \quad (5)$$

El rendimiento de hidrógeno H_2 yield(ml/g_{bio}) es el volumen normalizado de hidrógeno por gramo de biomasa gasificada determinado a partir de la fracción de masa de hidrógeno.

$$H_2 \text{ yield} = \left(\frac{1000}{\rho_{H_2}}\right) \left(\frac{\dot{m}_{gas} x_{H_2}}{\dot{m}_{Bio}}\right) \quad (6)$$

Donde ρ_{H_2} es la densidad del hidrógeno.

Descripción de equipos escala de laboratorio y escala piloto

La gasificación se realizó en dos reactores de lecho fijo de flujo descendente autotérmicos (Escala de laboratorio y Piloto). En la

Figura 1 se muestran los componentes y zonas importantes de los equipos de gasificación utilizados: Zona de ingreso de biomasa **(1)**, tubos de alimentación de aire **(2)**, los cuales llevan el aire a la zona de oxidación **(3)**, que es donde se produce la combustión parcial de la biomasa y la energía necesaria para que tengan lugar las reacciones endotérmicas. Debajo de la zona de oxidación se encuentra la zona de reducción **(4)**. En este punto se produce una disminución del tamaño de la biomasa debido a las reacciones heterogéneas sólido-gas. Ambos reactores cuentan con un cuello en forma de cono **(5)** para la recepción y direccionamiento del biochar hacia la zona de reducción. Los subproductos sólidos de la gasificación son almacenados en **6**. En el caso del microgasificador **(a)** la zona **6** queda dentro del reactor, mientras que en el gasificador a escala piloto **(b)**, la zona **6** es una caja que queda por fuera del reactor. Finalmente, el gas de síntesis producido sale por el ducto **(7)** para luego pasar por un sistema de lavado con agua y filtrado de gases como se describió en trabajos previos (Gómez et al., 2019).

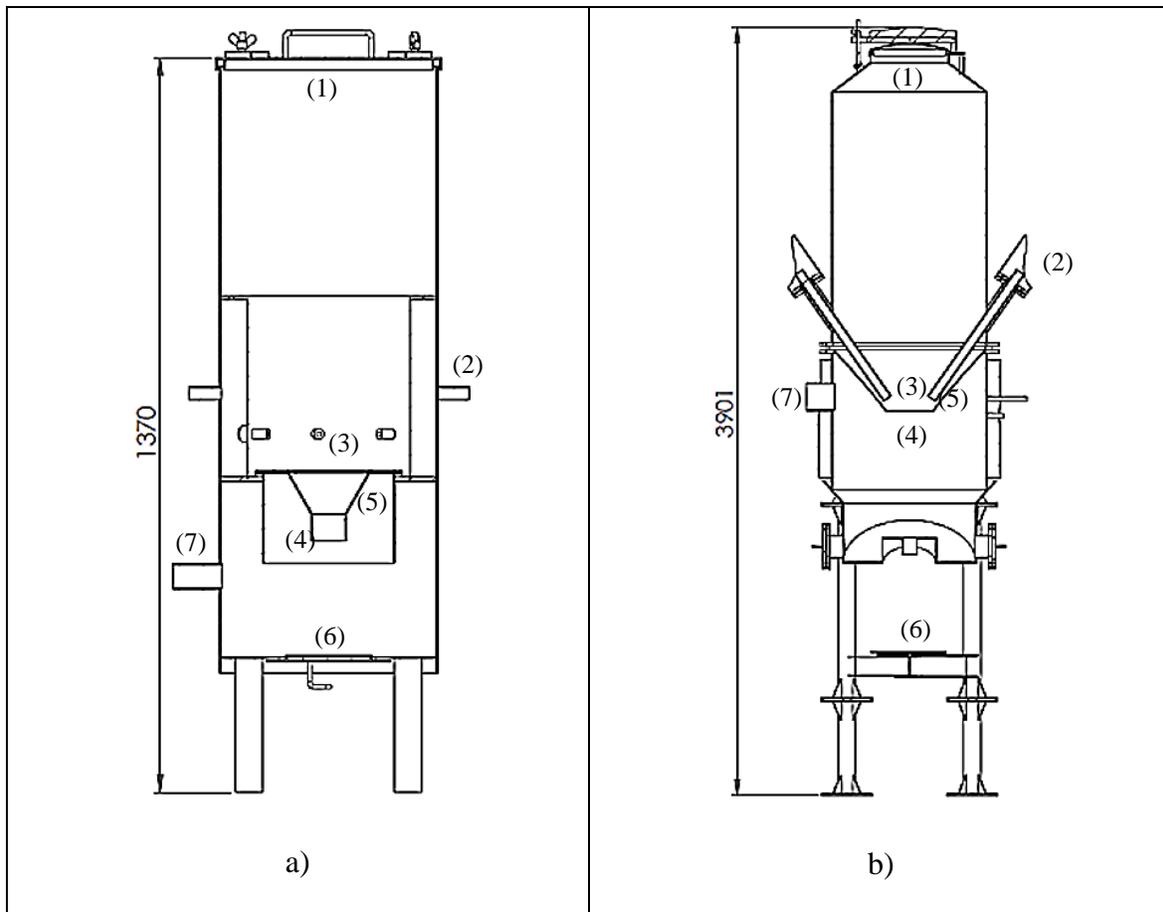


Figura 1. Gasificador (a) escala de laboratorio; (b): gasificador escala piloto. Fuente: Elaboración propia

Resultado y discusión

Caracterización de materias primas

El análisis elemental y próximo de la muestra de tusa de maíz realizados en el laboratorio de carbones de la Universidad Nacional de Colombia arrojó los resultados descritos en la Tabla 2, lo cual muestra que la tusa de maíz tiene un gran potencial energético asociado al alto contenido de carbón que presenta. Otras investigaciones como la de Muhammad, Anjum, Manzoor, & Asif (2017) han reportado contenidos de carbono de 43.2. Estas diferencias están asociadas a la variedad vegetal y la región.

Tabla 2. Resultados de análisis elemental y próximo de la tusa de maíz

Análisis Elemental (%w daf)		Análisis Próximo	
C: Carbón	42.35	H (%) Humedad	10.25
H: Hidrógeno	5.53	MV (%) Material Volátil	72.90
N: Nitrógeno	0.42	CF (%) Carbono Fijo	18.48
S: Azufre	0.09	ASH (%) Cenizas	7.58
O: Oxígeno	46.81	HHV (MJ/kg)	15.44

Fuente: Elaboración propia

Pruebas de micro gasificación

La Figura 2 muestra el comportamiento de la temperatura a la altura de la garganta del microgasificador para varias dosificaciones de catalizador (0.5%, 1% y 1.5%). Adicionalmente se muestra la composición del gas eliminando la base de nitrógeno para resaltar los campos y tener un mejor seguimiento del cambio en función de los procesos químicos y no de la proporción de aire que ingresa al reactor, ya que se considera el aire como la única fuente de nitrógeno, debido a que la cantidad de este en la biomasa es despreciable.

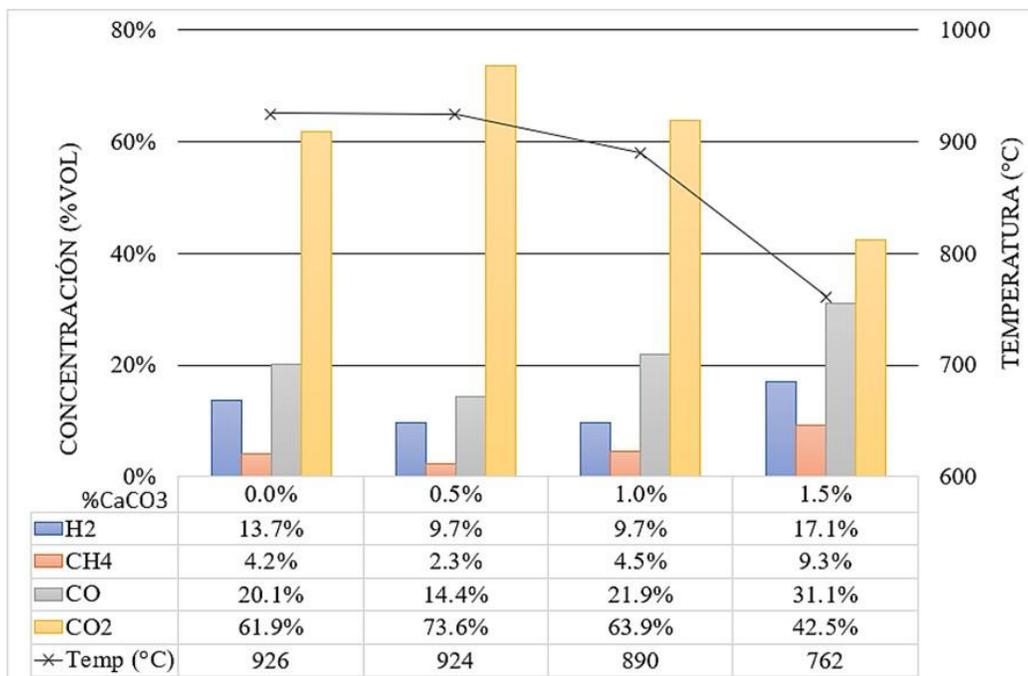


Figura 2. Temperatura y campo de gases libres de N₂ de la garganta en microgasificador descendente. Fuente: Elaboración propia

Es notable que el mayor descenso de la temperatura se da para concentraciones de CaCO_3 mayores a 1% ($w\text{CaCO}_3/w\text{Biomasa}$). A concentraciones superiores a esta, la temperatura de gasificación desciende por debajo de los 850°C . Esta condición desfavorece las reacciones de la gasificación del carbono (Duman et al., 2018). Con base a este resultado se limita la concentración de catalizador a un 1% ($w\text{CaCO}_3/w\text{Biomasa}$). Adicionalmente se muestra el campo de gases registrado en cada una de las pruebas, los campos de H_2 y CO en este equipo muestran una tendencia positiva, mientras que los campos de CO_2 muestran una tendencia negativa, el mismo comportamiento es reportado por Zhang et al. (2018) al gasificar cascarilla de arroz agregando dolomita calcinada como catalizador. Existe una elevada variabilidad en el proceso con respecto a la prueba base que le quita confiabilidad a cualquier análisis estadístico hecho sobre este. Por lo tanto, la evaluación del campo de gases se realizó en el equipo a escala piloto que presentó campos mucho más estables.

Pruebas de reactor a escala piloto

En la Tabla 3 se muestran las condiciones de operación de las pruebas a escala piloto.

Tabla 3. *Condiciones de operación a escala piloto*

Parámetro	Configuración	
	B	BC
\dot{m}_{Bio} (kg/h)	32.95	30.34
\dot{m}_{Aire} (kg/h)	48.97	56.50
\dot{m}_{Gas} (kg/h)	72.92	69.65
\dot{m}_{Char} (kg/h)	1.34	1.27
x_{N_2} (v/v)	0.49 ± 0.02	0.57 ± 0.02
ER	0.27 ± 0.01	0.34 ± 0.01
Temperatura de gasificación ($^\circ\text{C}$)	952 ± 12	940 ± 13
Rendimiento y_{H_2} (ml/g)	238.085	279.17

Fuente: Elaboración propia

Los campos de gases de las pruebas de gasificación de las composiciones B (biomasa en estado básico), BC (biomasa con adición de CaCO_3) se muestran en la **Figura 3**.

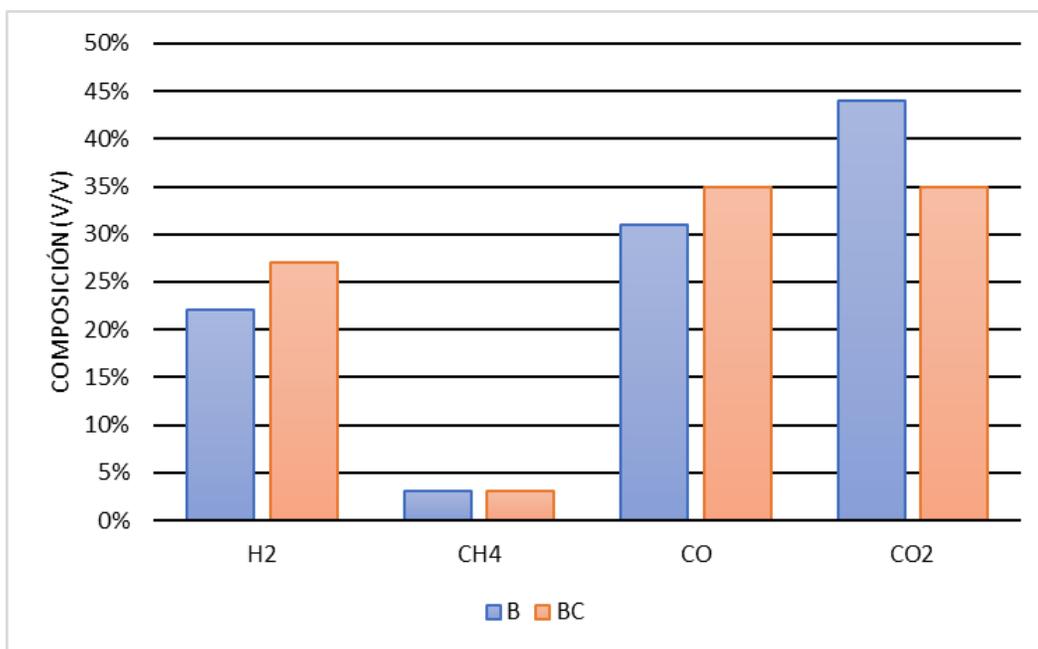


Figura 3. Pruebas de gasificación Componentes libres de N₂. Fuente: Elaboración propia

Se observa que la prueba BC presentó mayor aumento en el volumen de concentración de las especies combustibles (H₂, CO, CH₄) del Syngas respecto a la prueba base, se alcanzaron concentraciones de 27%, 35% y 3% respectivamente, siendo la composición de H₂ la que presentó mayor aumento en la concentración del Syngas con un incremento de un 22.7% seguido por el CO con un incremento de un 12.9%, lo cual evidenció un efecto positivo de la adición de CaCO₃ como catalizador en la producción de las especies combustibles generadas. Estos resultados fueron contrastados por los reportados por Zhang et al. (2018), quienes obtuvieron incrementos en la composición de H₂ y CO de 21.5% y 18.9% respectivamente, después de agregar dolomita calcinada como catalizador. Entre todas las especies, la que registró una disminución importante fue la concentración de CO₂ que pasó de una concentración de 44% a un 35%, lo que corresponde a una disminución de un 20.5%. Zhang et al. (2018) también reportan un cambio negativo de un 30.1%. Esta reducción puede estar asociada a la reacción reversible de descarbonatación (R15) y la reacción de craqueo de alquitranes con CO₂ (R13) (Koido et al., 2021).

Análisis de varianza de H₂

La **Tabla 4** (ANOVA) descompone la varianza de H₂ en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F que, en este caso es igual a 100.932, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado intra-grupos.

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de H₂ entre un nivel de Grupo y otro, con un nivel del 5% de significancia.

Tabla 4. ANOVA para H₂ por grupo

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0.0162754	1	0.0162754	100.93	0.0000
Intra grupos	0.0040313	25	0.0001613		
Total (Corr.)	0.0203067	26			

Fuente: Elaboración propia

La **Figura 4** muestra la media de %H₂ para cada uno de los niveles de Grupo. También muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95.0% de las veces. Cualquier par de intervalos que no se traslapen verticalmente corresponden a pares de medias que tienen una diferencia estadísticamente significativa. Se puede ver claramente que los intervalos no se traslapan, lo que indica una diferencia estadística entre los niveles de grupo B y BC con un 95% de confianza. Esta diferencia significativa es claramente producida por el efecto catalítico del CaCO₃ en la reacción de craqueo de alquitranes (13.R13).

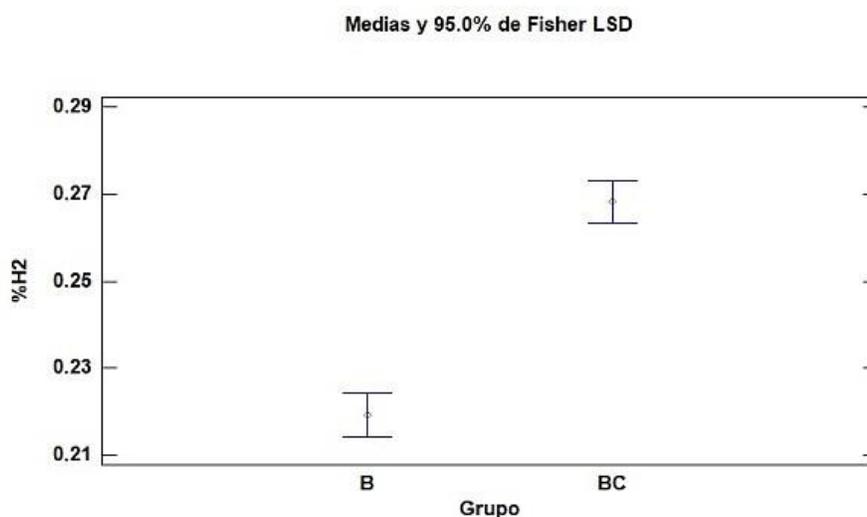


Figura 4. Gráfico de medias para % de H₂. Fuente: Elaboración propia

Análisis de varianza de CO

La **Tabla 5** (ANOVA) descompone la varianza de %CO en dos componentes: un componente entre grupos y un componente intra-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 36.4514, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado intra-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de %CO entre un nivel de Grupo y otro, con un nivel del 5% de significación.

Tabla 5. ANOVA para CO por grupo

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0.00992554	1	0.00992554	36.45	0.0000
Intra grupos	0.00653508	24	0.000272295		
Total (Corr.)	0.0164606	25			

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 5** se muestra la media de %CO para cada uno de los niveles de Grupo. También muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95.0% de las veces. Cualquier par de intervalos que no se traslapan verticalmente corresponden a pares de medias que tienen una diferencia estadísticamente significativa. Se puede ver claramente que los intervalos no se traslapan, lo que indica una diferencia estadística entre los niveles de grupo B y BC con un 95% de confianza. Aunque en el caso del hidrógeno se puede asegurar que su incremento fue debido al craqueo del alquitrán, en el caso del CO no se puede asumir lo mismo por la existencia de la reacción de descarbonatación del CaCO_3 (**R15**) que también libera CO. Por lo tanto, se puede decir que el incremento del CO se debe tanto al craqueo de alquitranes como a la reacción de descarbonatación.

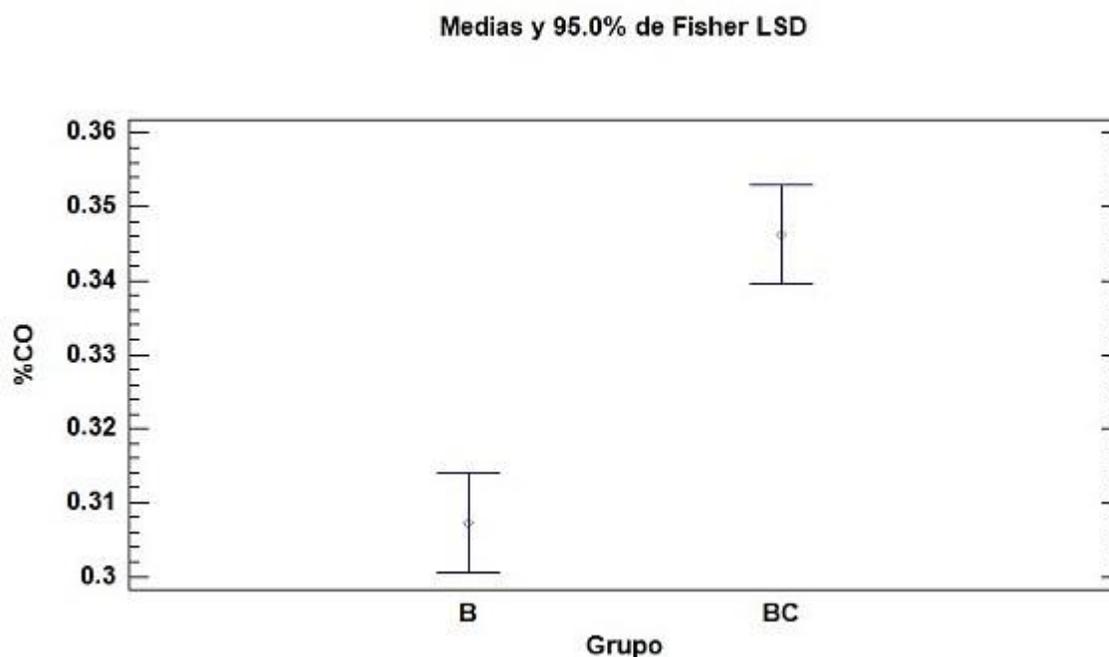
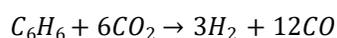


Figura 5. Gráfico de medias para CO. Fuente: Elaboración propia

Análisis de proporciones de los campos de H₂ y CO

Para efectos de análisis de las proporciones se tomará el benceno (C₆H₆) como molécula representativa del TAR (Gao et al., 2016). Al reemplazar los coeficientes estequiométricos del benceno en 13.R13 la reacción toma la siguiente forma:



Por lo anterior, debería esperarse un incremento en el campo de CO a una razón de 4:1 con respecto al H₂. Esto es algo que no se cumple porque el incremento de los campos fue de 4% para el CO y de 5% para el H₂. El motivo por el cual no se cumple esta relación será estudiado en trabajos futuros, ya que es necesario hacer una inferencia más profunda a partir de la composición de los gases, lo que requiere el acople de resultados experimentales y el uso de modelos de conversión que permitan bajo condiciones de equilibrio, estimar la dirección de las reacciones y la conversión de alquitranes a través del craqueo y reformado.

Conclusiones

Entre los gases combustibles, el H₂ y CO presentaron incrementos en la composición de 22.7% y 12.9% respectivamente, al utilizar CaCO₃ como catalizador. El CH₄ se mantuvo sin cambios. Esto indica un incremento en la mayoría de los gases combustibles, lo que se traduce en un incremento en la calidad del gas.

Entre todas las especies, la que registró una disminución importante en la composición fue el CO₂ que pasó de 44% a un 35% al utilizar CaCO₃ como catalizador. Lo anterior corresponde a una disminución de un 20.5%. Esta reducción puede estar asociada a la reacción reversible de descarbonatación (**R15**) y la reacción de craqueo de alquitranes con CO₂ (13.R13). La adición de carbonato de calcio se presenta como una posible estrategia para la producción de gas enriquecido con hidrógeno.

Referencias

- Chan, F. L., & Tanksale, A. (2014). Review of recent developments in Ni-based catalysts for biomass gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.011>
- Detchusananard, T., Im-orb, K., Ponpesh, P., & Arpornwichanop, A. (2018). Biomass gasification integrated with CO₂ capture processes for high-purity hydrogen production: Process performance and energy analysis. *Energy Conversion and Management*, 171(June), 1560–1572. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.072>
- Duman, G., Akarsu, K., Yilmazer, A., Keskin Gundogdu, T., Azbar, N., & Yanik, J. (2018). Sustainable hydrogen production options from food wastes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(23), 10595-10604. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.146>
- Gao, N., Wang, X., Li, A., Wu, C., & Yin, Z. (2016). Hydrogen production from catalytic steam reforming of benzene as tar model compound of biomass gasification. *Fuel Processing Technology*, 148, 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.03.019>
- Gómez, R. D., Camargo, D. A., Soto, C. C., & Bula, A. J. (2019). Synergistic evaluation of residual biomass gasification in mixtures of corn and cotton. *Informacion Tecnológica*, 30(6), 11–20. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600011>
- INCOMBUSTION-NATURA. (2016). Consultoría técnica para la fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles colombianos-FECOC. Informe final de Proyecto. Universidad del Valle, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Institución Universitaria (ITM), Universidad de Antioquía y Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). 52 pp. http://www.upme.gov.co/Calculadora_Emisiones/aplicacion/Informe_Final_FECOC_Correcciones_UPME_FunNatura.pdf
- Koido, K., Ogura, T., Matsumoto, R., Endo, K., & Sato, M. (2021). Spent mushroom substrate performance for pyrolysis, steam co-gasification, and ash melting. *Biomass and Bioenergy*, 145(July 2020), 105954. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105954>

- Liu, L., Zhang, Z., Das, S., & Kawi, S. (2019). Reforming of tar from biomass gasification in a hybrid catalysis-plasma system: A review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 250(January), 250–272. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.03.039>
- Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E. G., & Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy*, 2(12), 939–945. <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0032-9>
- Richardson, Y., Blin, J., & Julbe, A. (2012). A short overview on purification and conditioning of syngas produced by biomass gasification: Catalytic strategies, process intensification and new concepts. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(6), 765–781.
- Surjosatyo, A., Anggriawan, M. B., Hermawan, A. A., & Dafiqurrohman, H. (2019). Comparison between secondary thermal cracking methods and venturi scrubber filtering in order to reduce tar in biomass gasification. *Energy Procedia*, 158, 749–754. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.200>
- Xie, Q., Kong, S., Liu, Y., & Zeng, H. (2012). Syngas production by two-stage method of biomass catalytic pyrolysis and gasification. *Bioresource Technology*, 110, 603–609.
- Yan, M., Liu, J., Hantoko, D., Kanchanatip, E., Grisdanurak, N., Cai, Y., & Gao, Z. (2019). Hydrogen-rich syngas production by catalytic cracking of tar in wastewater under supercritical condition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(36), 19908–19919. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.234>
- Zhang, G., Liu, H., Wang, J., & Wu, B. (2018). Catalytic gasification characteristics of rice husk with calcined dolomite. *Energy*, 165, 1173–1177. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.030>

Valoración ambiental del transecto del Río Hacha en la comuna norte de la ciudad de Florencia Caquetá

Environmental assessment of the Hacha River transect in the northern commune of the city of Florencia Caquetá

Alexander Perdomo Perafan

Doctorando en Educación y Cultura Ambiental

Universidad de la Amazonia, Facultad de Ciencias de la Educación

al.perdomo@udla.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-1417-260X>

Colombia

Denis Lorena Alvarez Guayara

Doctoranda en Educación y Cultura Ambiental

Universidad de la Amazonia, Facultad de Ciencias de la Educación

d.alvarez@udla.edu.co

<https://orcid.org/0000-0001-8939-8139>

Colombia

Resumen

El objetivo de este artículo fue realizar la valoración ambiental del transecto del río Hacha Comuna Norte del Municipio de Florencia Caquetá. La metodología del estudio fue de carácter analítico-descriptivo, a partir del análisis de información primaria obtenida en trabajo de campo y de la respectiva validación y aplicación de un cuestionario socioambiental a una muestra de los habitantes del sector, además se empleó información complementaria de estudios ambientales a la cual se les aplicó el método de Análisis de Contenido (ADC), con el fin de identificar aspectos relevantes para el proyecto. Los resultados obtenidos de la indagación y la realización de la matriz de problemática ambiental evidencian que la contaminación de la fuente hídrica y las alteraciones en la biodiversidad son los problemas ambientales del sector. Las condiciones socioeconómicas generales de la población los ubica por fuera del rango de pobreza, siendo notorio que la principal actividad económica es la ganadería y la prestación de la fuerza de trabajo en el sector privado. Las mayores presiones que se generan sobre las fuentes hídricas se centran en el vertimiento de aguas residuales generadas por las zonas urbanas, debido a las condiciones sanitarias ineficientes por falta de plantas de tratamiento y la acumulación de residuos sólidos. Finalmente, el programa propuesto está constituido por cuatro elementos: económico, saneamiento básico, gestión ambiental y mejora continua.

Palabras clave: Cuenca hidrográfica; contaminación hídrica; desarrollo sostenible; pérdida de biodiversidad; cultura ambiental.

Abstract

The aim of this article was to carry out the environmental assessment of the Hacha Comuna Norte river transect of the Municipality of Florencia Caquetá. The study methodology was of an analytical-descriptive nature, based on the analysis of primary information obtained in field work and the respective validation and application of a socio-environmental questionnaire to a sample of the inhabitants of the sector, in addition, complementary information from studies was used. environmental conditions to which the Content Analysis method (CAM) was applied, in order to identify relevant aspects for the project. The results obtained from the investigation and the realization of the matrix of environmental problems show that the contamination of the water source and the alterations in biodiversity are the environmental problems of the sector. The general socioeconomic conditions of the population place them outside the poverty range, and it is well known that the main economic activity is cattle ranching and the provision of the workforce in the private sector. The greatest pressures generated on water sources are centered on the discharge of wastewater generated by urban areas, due to inefficient sanitary conditions due to the lack of treatment plants and the accumulation of solid waste. Finally, the proposed program is made up of four elements: economic, basic sanitation, environmental management and continuous improvement.

Key words: Hydrographic basin; water pollution; sustainable development; loss of biodiversity; environmental culture.

Introducción

La problemática ambiental no había sido priorizada en la agenda de las más poderosas organizaciones económicas, políticas y de medios de comunicación masiva a nivel global, hasta finales del siglo XX y comienzo del siglo XXI, dada su agudización; según Meira Cartea (2013), la crisis ambiental se constituye por una serie de “...problemas extremadamente intrincados desde el punto de vista científico. Su génesis es multicausal y en su desarrollo se producen sinergias difíciles de evaluar y predecir” (Pág. 12).

El estudio de la problemática ambiental, se constituye en una práctica social que debe movilizar diferentes agentes, actores e instituciones en procura del desarrollo de un conocimiento interiorizado a gran escala y, que repercuta en los imaginarios, representaciones y prácticas sociales del ser humano frente a su relación con el medio ambiente, para ello, la formalización del proceso y la conformación de comunidades de estudio, se constituyen el camino apropiado para enfrentar la actual crisis ambiental global. Frente a dicha problemática, Orellana (2005), plantea que la “red de relaciones que el ser humano teje con el medio de vida compartido es producto de una multiplicidad y diversidad de factores, ecológicos, culturales, espirituales, afectivos...Sin embargo, sobre todos ellos cada vez se imponen más los factores económicos, determinando las tendencias dominantes de estas relaciones” (pág. 2), lo cual está colocando en riesgo el equilibrio de la naturaleza y

la supervivencia de todas la especies, incluyendo a la especie humana como principal generador de dicha crisis ambiental.

El crecimiento acelerado de la población en el municipio de Florencia, debido en gran medida al fenómeno de desplazamiento de la población rural del Departamento al sector urbano, ha generado la aparición de asentamientos subnormales, violencia, pobreza y falta de condiciones básicas de salubridad para dicha población desplazada, afectando el equilibrio social, urbanístico y ambiental, especialmente en lo relacionado con el entorno natural, hídrico y climático de la zona, principalmente por la deforestación y afectación a las fuentes hídricas del municipio.

Para la formulación de una valoración integral de la problemática ambiental asociada con la contaminación de las fuentes hídricas y la pérdida de la biodiversidad en la zona del transecto del río Hacha Comuna Norte de la ciudad de Florencia Caquetá, se realizó la caracterización sociodemográfica del sector y la posterior elaboración de la matriz de problemas ambientales y aplicación del Modelo PER para el análisis de la información, los cuales se constituyeron en insumos fundamentales para la construcción de un programa de desarrollo sostenible para el sector.

Metodología

El método utilizado en el estudio sobre las condiciones ambientales del transecto del Río Hacha en la comuna norte de la ciudad de Florencia, se fundamentó en el análisis de información primaria y secundaria; primero se identificó las características del área y su estado actual. Como información secundaria, se recopilaron datos sobre estudios ambientales realizados previamente. En el diagnóstico, se aplicó un instrumento, con el propósito de recopilar datos sobre variables socioeconómicas, los problemas y conflictos ambientales, para contrastarlos con la información secundaria y lo observado en las visitas en campo al área objeto de estudio.

Tamaño de la muestra: se utilizó un método de muestreo sistemático, aplicado a los habitantes de los barrios de la comuna norte, de la zona aledaña al Río Hacha, de los barrios: Torasso, La Libertad, La Atalaya y Las Américas, considerando los siguientes aspectos: a). 46 barrios, que corresponde al total de la comuna norte, b). 4 barrios seleccionados de la zona de influencia, c), 256 viviendas ubicadas en el área de estudio, d). 10% de representatividad

de la muestra (26) viviendas, seleccionadas aleatoriamente, con una constante aleatoria igual a 9.

Instrumento de Diagnóstico: El instrumento aplicado permitió recopilar información relacionada con: I. Perfil del encuestado, II. Caracterización socioeconómica del encuestado y su núcleo familiar cercano, III. Caracterización de la vivienda del encuestado, y IV. Percepción y cultura ambiental del encuestado.

También, se aplicó el modelo PER (presión-estado-respuesta), con el fin de analizar la problemática ambiental del territorio, a partir de la presión antrópica en el territorio, el estado actual de las condiciones socioambientales y las formas de respuesta a las situaciones problemáticas presentadas.

Resultado y discusión

Localización espacial del área de estudio

El Río Hacha, es la principal fuente hídrica del municipio de Florencia, Capital del Departamento de Caquetá, es el mayor proveedor de agua potable para consumo de los habitantes de su área de influencia, sustento de biodiversidad, bienes y servicios ambientales que sustentan el desarrollo socioeconómico de la región (Corpoamazonia, Universidad de la Amazonia , 2004). El Transecto del Río Hacha en la comuna norte, comprende los barrios Atalaya, Américas, la Libertad y el Torasso, localizado en ($1^{\circ}37'35.79''$ N y $75^{\circ}36'25.18''$ O) ($1^{\circ}37'33.69''$ N y $75^{\circ}36'23.39''$ O) ($1^{\circ}37'29.15''$ N y $75^{\circ}36'36.95''$ O) ($1^{\circ}37'25.71''$ N y $75^{\circ}36'44.57''$ O), respectivamente, con una longitud de transecto de 0.85 km (ver **Figura 1**).



Figura 1. Transecto Río Hacha Comuna Norte Florencia Caquetá. Tomado de: Google Earth Pro

Estudios acerca de las fuentes hidrográficas, han identificado las características de los diferentes entornos naturales y la importancia del agua para el desarrollo de los territorios, entre ellos, Moreira Braz, Mirandola Garcia, Luiz Pinto, Salinas Chavez, y de Oliveira (2020), plantean que la “cuenca hidrográfica debe ser entendida como una unidad básica para el análisis ambiental, ya que permite conocer y evaluar sus diversos componentes y los procesos e interacciones que en ella ocurren” (pág. 72), es decir, que para comprender las dinámicas naturales, sociales y económicas que se generan en un espacio geográfico determinado, es necesario trascender la percepción en torno a ella como una simple unidad territorial y, abordarla como un sistema dinámico en el cual se generan tensiones entre el medio ambiente y los procesos de desarrollo humano, especialmente a partir de los procesos de transformación de los usos del suelo y el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos que el medio provee. Para el caso en particular, la cuenca del río Hacha se constituye como la principal fuente que irriga con sus aguas al municipio de Florencia, siendo éste la capital del Departamento de Caquetá, reconocido como entidad territorial certificada.

La cuenca del río Hacha se constituye en el mayor colector de las aguas del Río Caraño y las Quebradas La Magola, La Ruidosa, Tarqui, Sucre, Santa Elena, El Paraíso y el Palmichal, las cuales no solamente surten el alcantarillado en su parte media, sino que en el transecto de la Comuna Norte, entendido como “una banda de muestreo diseñada y dimensionada en función de cada masa, sobre la que se procede a la toma de los datos que se han definido previamente” (Garitacelaya Saldise, Gómez Corral, Martín López, & Rodriguez Alvarez, 2006, pág. 2), también es el mayor colector de aguas residuales, escorrentías y de residuos sólidos producto del crecimiento desordenado de la zona urbana y, de la falta de políticas de saneamiento ambiental pertinentes que frenen dicho proceso de deterioro progresivo del medio ambiente.

La zona urbana de la ciudad de Florencia está constituida 189 barrios distribuidos en cuatro comunas; la Norte con un total de 46 barrios, la comuna occidental con 19 barrios, la comuna sur con 39 barrios y la comuna oriental con 80 barrios (Gobernación del Caqueta, 2021). Para el caso particular del estudio exploratorio, se tomaron los barrios Torasso, La Libertad, La Atalaya y Las Américas ubicados en la comuna norte, dado que se constituyen en los asentamientos humanos de mayor cercanía a las riberas del Río Hacha y a su vez, las

comunidades que aportan mayor cantidad de aguas residuales y de desechos orgánicos a dicha fuente hídrica.

Perfil poblacional de los habitantes del sector

La población del sector se caracteriza por tener un arraigo con el territorio de más de 10 años de residencia (34,6%) (ver **Figura 2**), lo cual permite deducir que han sido testigos y/o partícipes del proceso de expansión de la frontera urbana en las riberas del transecto del río Hacha Comuna Norte en los barrios La libertad, Torasso, Atalaya y las Américas, especialmente en la última década, la cual dio origen al asentamiento subnormal ubicado sobre la Troncal del Hacha, constituida inicialmente como propiedad privada rural y hoy, se ha convertido en uno de los sectores de mayor impacto sobre el equilibrio del medio ambiente, dado que el proceso de constitución como expansión de la zona urbana, no se desarrolló de manera planeada y con el cumplimiento de requisitos de exigidos por parte de Planeación y ordenamiento territorial, al igual que de Corpoamazonia, entre ellos, la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales y manejo de desechos sólidos. Para el caso particular, se entiende como asentamiento subnormal el crecimiento urbano generado bajo la modalidad de invasión “la cual se tipifica como aquellos desarrollos progresivos de vivienda en predios fuera del control de los propietarios. Este se registra con frecuencia en el asentamiento de las familias víctimas del desplazamiento forzado.” (Corporación Opción Legal, 2018, pág. 25)

La población asentada en el sector se ubica principalmente en el rango de edad comprendido entre los 36 y 45 años (42,3%) (ver **Figura 3**), lo cual permite identificar que hacen parte de los diversos sectores económicos del municipio y contribuyen de manera directa e indirecta en la generación de riqueza, bienes y servicios en la comunidad. Según el DANE (2021), en el “trimestre enero - marzo 2021, el 39,3% del total de la población en edad de trabajar se encontraba inactiva, presentando un aumento de 0,9 p.p. frente al trimestre enero - marzo 2020. Desagregado por sexo, para los hombres esta proporción fue 27,9% y para las mujeres fue 50,3%, aumentando 0,6 p.p. y 1,2 p.p. respectivamente, frente al mismo trimestre de 2020”.

¿Hace cuánto tiempo reside en el barrio/sector donde tiene su domicilio?

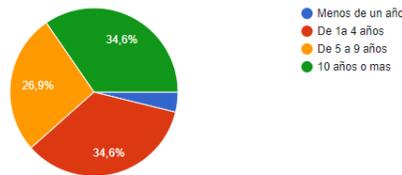


Figura 2. Tiempo de residencia del encuestado en el barrio. Elaboración propia

¿Cuál es su rango de edad actualmente?

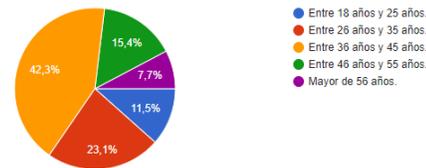


Figura 3. Rango de edad de los encuestados. Elaboración propia

En la actualidad, Florencia como entidad territorial certificada, a través de la Secretaría de Educación Municipal, durante el cierre del año lectivo 2020, atendió a una población escolar constituida por 44.502 estudiantes tanto en el Sector Oficial y No Oficial a nivel rural y urbano, población que representa un incremento del 24,8% con relación al año 2002, año en el cual se hizo responsable de la administración del sector educativo (ver **Figura 4**). Dicho crecimiento poblacional preocupa significativamente al gremio magisterial, dado que, a pesar del incremento en cobertura, no se han liderado acciones que amplíen la infraestructura disponible para atender a dicha población y, por el contrario, se está presentando problemáticas asociadas con el hacinamiento en las aulas y mayor número de estudiantes por espacios áulicos preexistentes.



Figura 4. Cobertura escolar en Florencia 2020. Fuente: Oficina de Calidad Secretaría de Educación de Florencia

De igual manera, las familias establecidas en el sector, tienen hijos en proceso de escolarización en diferentes niveles de la educación formal ofrecidos en el municipio (76,9%) (ver **Figura 5**), siendo notorio que en su gran mayoría hacen parte de las instituciones de educación formal de naturaleza estatal, como la I.E Los Pinos, I.E Los Andes, I.E Instituto Técnico Industrial y Nacional La Salle; como caso particular, la I.E Privada Liceo Superior,

acoge a la población en edad escolar de aquellos individuos con algunos privilegios socioeconómicos.

La población menor de edad, se encuentra desarrollando procesos formativos en el nivel de Educación Básica con un 73.15 (ver **Figura 6**), con una variedad de ofertas curriculares de índole académica, técnica y técnica industrial para el caso de los estudiantes vinculados con la I.E Instituto Técnico Industrial, el cual ofrece formación para el trabajo y desarrollo humano en las especialidades de Ebanistería, Dibujo Técnico, Sistemas y Computación, Metalmecánica y Electricidad.

¿Tiene hijos en el núcleo familiar?

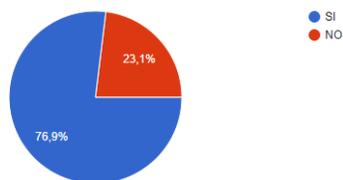


Figura 5. Familias con hijos en edad escolar. Elaboración propia

¿Número de hijos en Educación Básica Secundaria (de sexto a noveno)?

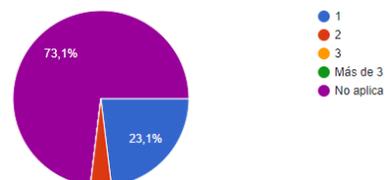


Figura 6. Familias con hijos en formación básica. Elaboración propia

En cuanto al nivel de escolaridad, es notorio que un porcentaje significativo de la población (34,6%) tienen primaria incompleta (ver **Figura 7**), sin embargo, se resalta que las principales fuentes de ingreso para los hogares están relacionadas con el sector comercio formales e informales y como empleados del sector privado que por lo general se evidencia en cargos con contratos a término fijo (ver **Figura 8**).

Indique su nivel de escolarización actual.

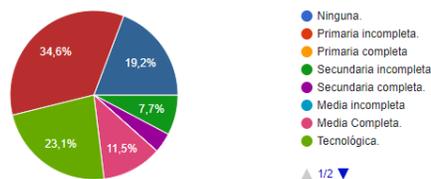


Figura 7. Nivel de escolaridad de encuestados. Elaboración propia

¿Cuál es la principal actividad económica de la familia?

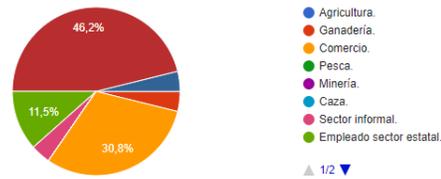


Figura 8. Actividad productiva de los encuestados. Elaboración propia

Según el reporte del Mincomercio (2021), la principal fuente de ocupación en Florencia durante el primer trimestre del año en curso la ejecución de actividades de comercio

y reparación de vehículos lo cual representaron el 26,5% del nivel de ocupación. De igual manera, la tasa de desempleo de Florencia se ubicó 1,4 por debajo de la registrada en las 23 ciudades, según el DANE (2021).

El 46,2% de los hogares están integrados por más de cuatro integrantes, los cuales se encuentran ubicadas en un 69,2% en estrato social 2, con unos ingresos mensuales con los cuales logran cubrir parcialmente (53.8%) los gastos de manutención, educación y demás necesidades propias del hogar (ver **Figura 9** y **Figura 10**).

¿Cuál es su estrato?

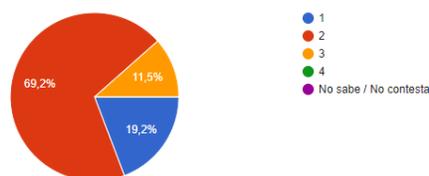


Figura 9. Estrato del encuestado.
Elaboración propia

¿Es suficiente el ingreso familiar para satisfacer las necesidades básicas (alimentación, vestido, calzado y educación de sus hijos)?

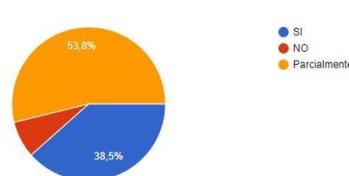


Figura 10. Nivel de satisfacción de necesidades.
Elaboración propia

Importancia ecológica y problemática ambiental

La vegetación de la Cuenca del Río Hacha se caracteriza por ser de bosque húmedo tropical, característico del piedemonte andino-amazónico, lo cual permite que la zona sea un resguardo de diversidad de especies maderables y de fauna, los cuales vienen siendo sometidos a procesos intensivos de extracción y comercio destinados a la construcción y tráfico de especies exóticas. de igual manera, la zona se constituye en un territorio de gran interés para la explotación minera y de hidrocarburos, lo cual ha dinamizado la elaboración de permanentes estudios para el levantamiento cartográfico y geológico

La deforestación en la zona se constituye en uno de las causas que está afectando radicalmente el ecosistema forestal y el hábitat de las especies nativas, dado que además de alterar su estructura biofísica afecta el funcionamiento de la misma y las condiciones de vida no solamente de los asentamientos humanos sino de los demás seres vivos, altera el ciclo del agua, el flujo de nutrientes, las cadenas tróficas y la capacidad del ecosistema para generar los recursos necesarios para sustentar la calidad de vida de todos los residentes de la cuenca. Frente a dicha problemática, Mateus Guerrero (2019) plantea que la “... deforestación puede

tener graves consecuencias socioeconómicas: por ejemplo, puede amenazar los medios de vida, la cultura y la supervivencia de las poblaciones que dependen de los bosques, incluidos los pueblos indígenas; debilitar las economías locales y nacionales; provocar conflictos sociales por los recursos naturales; aumentar el impacto de los desastres naturales; y producir desplazamientos de la población”. (Pág. 8).

La erosión es uno de los efectos más preocupantes que enfrenta la cuenca del Río Hacha, dado el desgaste y alteración del paisaje terrestre. Las causas que generan dicho deterioro se deben entre otros a la escorrentía de aguas lluvias, los vientos secantes y especialmente por las actividades humanas asociadas a prácticas de ganadería, agricultura y expansión de la frontera urbana. Vale la pena resaltar que dichas prácticas afectan la composición de los suelos, la estructura y el funcionamiento del ecosistema. Frente a dicha problemática Galilea Salvador (2015), plantea que “es uno de los principales indicadores de la degradación de los ecosistemas, con importantes implicaciones ambientales y socioeconómicas que pueden conducir a la desertificación de las zonas más vulnerables” (Pág. 23).

Finalmente, el principal problema ambiental que enfrenta la Cuenca del Río Hacha es la contaminación, siendo el principal agente contaminante los vertimientos de aguas residuales del sistema de alcantarillado urbano, el cual es administrado por la Empresa SERVAF del municipio de Florencia, lo que evidencia la deficiente planeación, administración y mitigación del impacto de dicho servicio. La Empresa SERVAF posee en la actualidad trece puntos de vertimientos, de los cuales siete descolan sobre el Río Hacha aportando una carga contaminante de DBO estimada en 126.383 kg/sem y 192.621 kg/sem de SST.

Las familias ubicadas en el sector no identifican plenamente las implicaciones teóricas y metodológicas en torno a la cultura ambiental, entendida ésta como “el conjunto de procesos complejos como los seres humanos comprenden y se relacionan con el medio ambiente, es la interacción social con la Naturaleza, se podría asumir como el conjunto y/o sistema general de creencias, valores, actitudes y comportamientos de los integrantes de una sociedad que inciden en la transformación de la relación entre la sociedad y la Naturaleza, asumiendo la responsabilidad social presente y futura”. (Perevochtchikova, 2010).

En síntesis, la problemática ambiental que enfrenta la cuenca del río Hacha transecto de la comuna norte de la ciudad de Florencia, se traduce en la contaminación de la fuente hídrica y de la pérdida de la biodiversidad por factores asociados a la deforestación, contaminación por residuos sólidos y expansión de la frontera urbana no planificada, lo cual se evidencia en la matriz de problemas ambientales (ver **Tabla 1**).

Tabla 1. *Matriz de problemas ambientales del transecto del Río Hacha en la Comuna Norte*

Problemática	Causa	Efecto	Actores	Nivel de prioridad
Contaminación de la fuente hídrica del Río Hacha	Poco control y monitoreo por parte de la autoridad ambiental en los vertimientos de la ronda hídrica	Cambios en la calidad del agua	AS: Comunidad, Alcaldía AE: Empresas de aseo AI: Secretaría de planeación y ordenamiento, Comunidad, Corpoamazonia	Alto
	Ausencia de una planta de tratamiento de aguas residuales	Proliferación de vectores por acumulación de aguas no tratadas Vertimiento de aguas residuales a la fuente hídrica Generación de malos olores		
	Falta de cultura ambiental para el manejo de los residuos	Ausencia de apropiación y empoderamiento del territorio Acumulación de residuos sólidos en la rivera de Río		
	Rutas insuficientes en el servicio de recolección de basura	Contaminación del aire por malos olores		
Alteraciones ecológicas y pérdida de biodiversidad	Procesos de crecimiento urbano no planificados	Descontrol en el avance de la frontera urbanística Pérdida de nichos y hábitats Procesos migratorios de especies	Comunidad, Corpoamazonia	Medio
	Deforestación	Erosión de la rivera del río		
		Transformación del paisaje		
		Aumento de la sedimentación		

Fuente: Elaboración propia

Modelo Presión-Estado-Respuesta (PER)

El transecto del Río Hacha en la Comuna Norte de la Ciudad de Florencia que comprende los barrios, Las Américas, Atalaya, Libertad y Torasso, evidencia unos problemas ambientales derivados de la actividad humana en la zona, para realizar un análisis causal de la situación se utilizó el modelo PER (Presión-Estado-Respuesta), el cual permitió identificar, como se presentan las acciones humanas que hacen presión en el ambiente provocando alteraciones en el estado del medio, y como se proponen alternativas para mitigar los impactos negativos tal como se describe a continuación (ver **Figura 11**).

Presión

Se identificaron como presiones ejercidas en el sitio de estudio las siguientes: a). Poco control y monitoreo por parte de la autoridad ambiental en los vertimientos de la ronda hídrica y ausencia de una planta de tratamiento de aguas residuales, b). falta de cultura ambiental para el manejo de los residuos sólidos y rutas insuficientes en el servicio de recolección de basura, c). procesos de crecimiento urbano no planificados, y d). deforestación. Los aspectos anteriormente enunciados son considerados como la raíz de la problemática ambiental actual, que se refleja en el desequilibrio de los ecosistemas característicos de la ribera del río, y de la disminución de las condiciones ambientales adecuadas tanto para los seres humanos como para la fauna y la flora.

Estado

De acuerdo con el 61.5% de los habitantes del sector objeto de estudio, la contaminación del agua es uno de los principales problemas de su territorio, cuyas causas se derivan del poco control y monitoreo que realizan las autoridades ambientales a los vertimientos de la ronda hídrica, sumado a la inexistencia en el municipio de una planta de tratamiento de aguas residuales que soporte la demanda de la población. En consecuencia, es evidente, los cambios en la calidad del agua, la proliferación de vectores y plagas y la generación de malos olores, los cuales son más perceptibles en épocas de verano

Otros aspectos que contribuyen a la contaminación del agua son claramente identificados por los habitantes del sector, y se relacionan con el manejo de los residuos sólidos, en este sentido, un 61.5% de la población, consideran que las rutas en el servicio de recolección de basura es insuficiente, además un 46.2% , se refiere a la falta de cultura ambiental con respecto a la gestión de los residuos sólidos, lo cual se confirma visualmente en la alta acumulación de residuos sólidos en la ribera del río y la contaminación del aire debido a los malos olores.

El 42.3% de la población considera que la deforestación dada por los procesos de crecimiento urbano no planificados y los asentamientos humanos subnormales son problemáticas que son cada vez más evidentes en la ribera del río, esto sin lugar a duda, ha conllevado a la transformación del paisaje dada la erosión del terreno, al aumento en la

sedimentación del río, lo cual ha tenido repercusiones ecológicas, como la migración de especies por la pérdida de sus nichos y hábitats.

Respuesta

La formulación de propuestas de intervención en las comunidades para contrarrestar las problemáticas ambientales, implican realizar un análisis sobre las causas, los efectos y los actores implicados, bajo estas consideraciones se formulan las acciones: a). la formulación de un modelo integral de la gestión de los residuos sólidos, b). Proyección de la expansión urbana en equilibrio con los ecosistemas naturales y c). Implementación de programas de educación ambiental en comunidades.

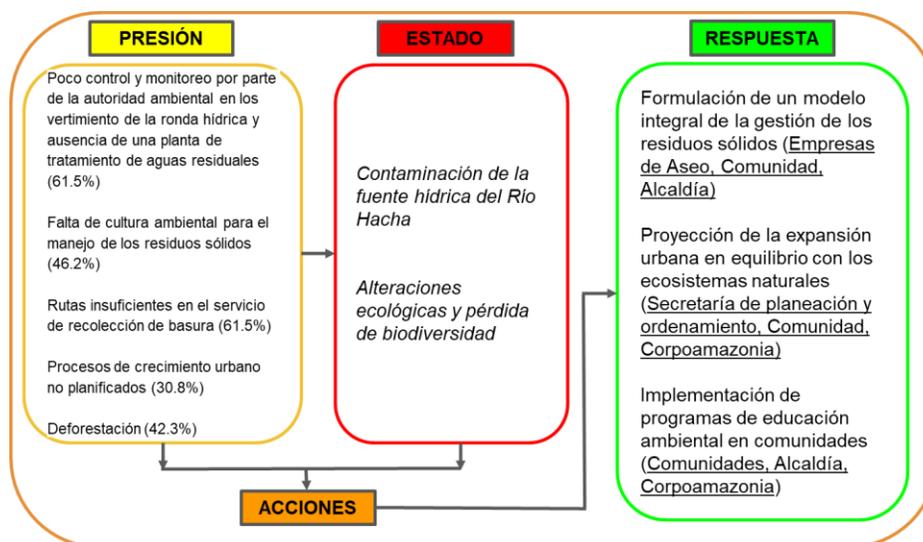


Figura 11. Esquema del modelo PER (Presión-Estado-Respuesta) transecto del Río Hacha en la Comuna Norte. Fuente: Elaboración propia

Construcción de escenarios

Análisis DOFA

Con el fin de realizar un diagnóstico ambiental del área de estudio, se utilizó una matriz DOFA en la cual se abordaron las problemáticas evidenciadas en el análisis causal, siendo estas: 1. La contaminación de la fuente hídrica del Río Hacha, y 2. Las alteraciones ecológicas y pérdida de la biodiversidad. De acuerdo con lo anterior, se plasmaron en la matriz las debilidades – fortalezas, y las oportunidades – amenazas (**Tabla 2**), mediante un análisis crítico, que contemplo, condiciones normativas, institucionales, ambientales y de la

comunidad, como aspectos prioritarios a ser tratados, en pro del establecimiento de acciones y estrategias que permitan mitigar los efectos de las problemáticas identificadas.

Tabla 2. Matriz DOFA de la cuenca del Rio Hacha transecto Comuna Norte

Debilidades	Oportunidades
Baja presencia de autoridades y organizaciones no gubernamentales relacionadas con lo ambiental	Plan de gobierno departamental con líneas estratégicas con un enfoque socio ambiental
Bajo nivel de apropiación y empoderamiento de la comunidad frente al territorio.	Ecoturismo
Inexistencia de un diagnóstico sobre las condiciones ambientales actuales del territorio	Construcción colectiva de un plan de gestión ambiental para la conservación del rio
Fortalezas	Amenazas
Ecosistema estratégico que ayuda a la conservación del clima y a la conservación de especies	Contaminación de la ronda del Rio
Existencia de un plan de ordenación y manejo de la cuenca del Rio Hacha 2006-2025	Expansión urbanística que destruye la ronda del rio
Reconocimiento de la importancia de los recursos naturales presentes en la rivera del Río Hacha por parte de la comunidad	Falta de aplicación y seguimiento al régimen sancionatorio ambiental

Fuente: Elaboración propia

Bajo las consideraciones estimadas en las problemáticas, en la **Figura 12**, se presentan los escenarios a los que se podría enfrentar el área de estudio en el caso de tomar o no acciones para el mejoramiento de la situación actual.



Figura 12: Construcción de escenarios para el área de estudio. Elaboración propia.

Programa de Desarrollo Sostenibles la cuenca del Río Hacha transecto Comuna Norte de la Ciudad de Florencia

Para formular un programa de desarrollo sostenible en comunidades, es necesario conocer las condiciones sociales, económicas y ambientales de los territorios, en miras de realizar intervenciones que sean efectivas y que aporten al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2021).

Este programa se construyó con base en los resultados obtenidos por el análisis del instrumento de caracterización socio ambiental aplicado a 26 familias de los barrios Torasso, La Libertad, La Atalaya y Las Américas ubicados en la comuna norte, ya que estos constituyen los asentamientos humanos de mayor cercanía a las riberas del Río Hacha; la matriz de problemas ambientales, y la aplicación del modelo PER, como herramientas de diagnóstico sobre el estado actual de las problemáticas existentes y la proyección de acciones que mitiguen los impactos negativos actuales.

A partir del análisis anterior se estableció el perfil de la calidad ambiental y el modelo PER (presión, estado, respuesta), lo cual permitió definir el programa de desarrollo sostenible para la población, en términos de tres componentes: a). contexto socioeconómico, b). problemas ambientales y c). gestión ambiental (**Tabla 3**).

Tabla 3. Componentes y objetos

COMPONENTE	OBJETO
Problemas ambientales	Proporcionar herramientas a la comunidad, con el fin de mitigar los problemas y conflictos ambientales. Lo anterior soportado en un diagnóstico territorial.
Contexto socioeconómico	Generar proyectos de orden productivo, educativo, salud y de oportunidades de empleo, que contribuya a mejorar las condiciones sociales y económicas en el sector.
Gestión ambiental	Formular un plan de formación ambiental enfocado al manejo integral de residuos sólidos y líquidos que garanticen la recuperación del transecto del Río Hacha Comuna Norte y la recuperación de la biodiversidad del sector.

Fuente: Elaboración propia

Los componentes del programa se conforman de proyectos, los cuales contienen objetivos, actividades, estrategias, metas e indicadores (**Figura 13**). Igualmente, el programa cuenta con una metodología definida en tres fases: 1) diagnóstico de la necesidad, 2) planificación de proyectos y 3) implementación de proyectos (**Figura 14**). Los proyectos propuestos en el programa se pueden apreciar en la **Tabla 4**.



Figura 13. Esquema de desarrollo sostenible. Fuente: Elaboración propia, adaptado de (Villadiego Lorduy, y otros, 2019)



Figura 14. Metodología del programa de desarrollo sostenible. Elaboración propia.

Tabla 4. Matriz de proyectos para el programa de desarrollo del sostenible transecto del río hacha en la comuna norte de la ciudad de Florencia Caquetá

OBJETIVO							
COMPONENTES	GENERAL DEL COMPONENTE	PROBLEMAS	PROYECTOS	ACTIVIDADES	ESTRATEGIAS	METAS	INDICADOR
Problemas ambientales	Mitigar los problemas y conflictos ambientales en el territorio	Contaminación y pérdida de la biodiversidad de la fuente hídrica	Estrategias para la gestión integral de residuos	Dar orientaciones a la comunidad sobre el manejo adecuado de los residuos y la clasificación en la fuente de los mismos	Capacitación sobre manejo adecuado de residuos sólidos	Capacitar al menos al 75% de la población	$\frac{\text{No. de personas capacitadas}}{\text{No. de habitantes del area}} \times 100$
				Realizar jornadas de limpieza en la ribera de río y en los sectores aledaños los barrios que comprenden la comuna norte en el transecto del Río Hacha			
Contexto socioeconómico	Generar proyectos que contribuyan a mejorar las condiciones sociales y económicas en el sector.	Pocas oportunidades laborales	Generación de oportunidades de empleo para los habitantes de la población	Gestionar convenios con el SENA, para ofrecer cursos de emprendimiento.	Ofrecer cursos de emprendimiento empresarial por el SENA	Asistencia por lo menos del 40% de los habitantes de la comunidad a los cursos de <u>emprendimiento</u>	$\frac{\text{No. de personas capacitadas con ideas de negocio}}{\text{No. total de asistentes}} \times 100$
				Creación de Unidades productivas mediante capital semilla	Promover la participación en convocatorias para obtención de capital semilla para la creación de unidades productivas	Participación en al menos 4 convocatorias para obtención de capital semilla	No. De unidades productivas creadas en proceso de convocatoria para obtención de capital semilla
Gestión ambiental	Formular un plan de formación ambiental enfocado al manejo integral de residuos sólidos y líquidos	Bajo nivel de apropiación y empoderamiento de la comunidad frente al territorio.	Capacitación en gestión ambiental comunitaria	Reconocer las capacidades locales existentes a fin de elaborar un diagnóstico y establecer acciones específicas de <u>capacitación</u> implementar talleres socioambientales con ayudas <u>audiovisuales</u> Capacitar con técnicas didacticas y metodos pedagogicos no formales	Fortalecimiento de las capacidades de gestión de las comunidades a traves de capacitaciones	Capacitar al 100% de los integrantes de la Junta de Acción Comunal (JAC)	$\frac{\text{No. de personas capacitadas}}{\text{No. de integrantes de la JAC}} \times 100$

Fuente: Elaboración propia, adaptado de (Villadiego Lorduy, y otros, 2019)

Conclusiones

La caracterización de la población a partir de la aplicación del instrumento diagnóstico y las visitas de campo, fueron fundamentales para generar un perfil de calidad ambiental que apoyado con la realización del modelo PER, fueron esenciales para determinar en qué medida se presentan las problemáticas ambientales, cual es el estado actual y como se pueden proponer acciones encaminadas a mitigar los efectos negativos de dichas problemáticas.

Gracias a la aplicación del modelo PER del análisis DOFA, derivado de la problemática ambiental relacionada con la contaminación de la fuente hídrica y las alteraciones de la biodiversidad de la cuenca del Rio Hacha fue posible la valoración ambiental, sobre la cual fue posible diseñar un programa de desarrollo sostenible para ser implementado en la población de la comuna norte, de tal forma que se puedan llevar a cabo estrategias y actividades concretas para el mejoramiento de las condiciones ambientales, sociales y económicas de esta población.

Referencias

- Congreso de la República de Colombia. (1994). Ley 115 de Febrero 8 de 1994. *ley general de educación*. Santafé de Bogotá, D.C., Colombia.
- Corpoamazonia, Universidad de la Amazonia . (2004). Plan de ordenación y manejo de la Cuenca del Rio Hacha 2006-205. *Convenio 051 de 2004*. Florencia, Caqueta, Colombia. Obtenido de https://www.corpoamazonia.gov.co/files/Ordenamiento/POMCA/POM_Hacha.pdf
- Corporación Opción Legal. (2018). *Legalización de asentamientos informales: Contribuciones para una política pública que beneficie a la población desplazada*. Obtenido de Centro de estudios de la Construcción y el desarrollo urbano y regional CENAC: https://opcionlegal.org/sites/default/files/legalizacion_de_asentamientos_informales.pdf
- DANE. (2021). *Gran encuesta integrada a hogares (GEIH) Enero - Marzo 2021*. Obtenido de Boletín Técnico.
- Galilea Salvador, I. (2015). Erosión de suelos y laderas en el espacio agrícola de La Rioja. Aplicación y cartografía del modelo Rusle. *Tesis Doctoral*, 431. Logroño, España. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=48476>
- Garitacelaya Saldise, J., Gómez Corral, N., Martín López, F., & Rodriguez Alvarez, C. (2006). *Teoría de la práctica del transecto como método de inventario para el sabinar (Juniperus thurifera)*. Obtenido de Academia.edu
- Gobernación del Caqueta. (2021). *Relación de barrios por comunas de la Ciudad de Florencia*. Recuperado el mayo de 2021, de <http://www.caqueta.gov.co/datos-abiertos/relacion-de-barrios-por-comunas-de-la-ciudad-de-florencia-154045>
- Mateus Guerrero, Y. S. (2019). *La deforestación en Colombia - Propuesta para la mitigación de sus efectos*. Obtenido de Repositorio Universidad Militar Nueva Granada: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/35851>
- Meira Cartea, P. (2013). Problemas ambientales globales y educación. *Integra Educativa*, VI(3), 29-64. Obtenido de <http://www.scielo.org.bo/pdf/rieiii/v6n3/n6a03.pdf>
- Mincomercio. (2021). *Oficina de estudios economicos*. Obtenido de Perfil económico: Departamento del Caqueta.
- Moreira Braz, A., Mirandola Garcia, P. H., Luiz Pinto, A., Salinas Chavez, E., & de Oliveira, I. J. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 69-85. doi:<https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232>

- Naciones Unidas. (2021). *Ojbetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 2021, de Bosques, desertificación y diversidad biológica.
- Orellana, I. (2005). *La estrategia Pedagógica de la comunidad de aprendizaje en educación ambiental: aprendiendo a construir un saber-vivir-juntos en un medio de vida compartido*. (CENEAM, Ed.) Recuperado el 2021, de Articulos de Opinion : https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/articulos-de-opinion/2005_05orellana_tcm30-163422.pdf
- Perevochtchikova, M. (2010). Nueva cultura del agua en México: avances, limitaciones y retos. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6(2), 77-92.
- Villadiego Lorduy, J. R., Garcia Corrales, N., Perez Patron, Y., Guerrero Gomez, S., Lopez Martinez, C., & Payares Ramos, P. (2019). Programa de Desarrollo Sostenible Urbanos: El caso del Barrio Villa Jimenez de la ciudad de Monteria. En A. Varios, *La competitividad empresarial: Aporte al crecimiento económico y al desarrollo sostenible* (págs. 200-218). Barranquilla: Sello Editorial Coruniamericana.

Modelos de predicción para la fase fenológica de maduración de frutos de manglillo (*Aspidosperma cruentum* Woodson, Apocynaceae) en bosques intervenidos de la Península de Osa, Costa Rica

Prediction models for the phenological phase of manglillo fruits ripening (*Aspidosperma cruentum* Woodson, Apocynaceae) in logged-over forests of the Osa Peninsula, Costa Rica.

Mónica Lizbeth Cortés Cortés

Ingeniera en Ciencias Forestales

Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica

monicacortes360@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7261-340X>

Heredia, Costa Rica

Rafael Murillo Cruz

M. Sc. en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales

Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional de Costa Rica

rafael.murillo.cruz@una.cr

<https://orcid.org/0000-0002-5326-3563>

Heredia, Costa Rica

Juan Pablo Villegas Espinoza

Lic. en Manejo Forestal

Vivero Forestal, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica

juan.villegas.espinoza@una.cr

<https://orcid.org/0000-0002-3855-897X>

Heredia, Costa Rica

Ana Isabel Barquero Elizondo

M. Sc. en Gestión Ambiental

Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional de Costa Rica

ana.barquero.elizondo@una.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0001-9670-128X>

Heredia, Costa Rica

Carlos Ávila Arias
M. Sc. en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción
Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional de Costa Rica
carlosenriquea79@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4592-2637>
Heredia, Costa Rica

Gustavo Vargas-Rojas
M. Sc. en Botánica
Vivero Forestal, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica
gustavo.vargas.rojas@una.cr
<https://orcid.org/0000-0002-2389-4938>
Heredia, Costa Rica

David Antonio Carvajal-Arroyo
Ingeniero en Ciencias Forestales
Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica
davidcarpio.daca@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4090-2485>
Heredia, Costa Rica

Resumen

Los estudios sobre la morfología de los frutos funcionan como herramienta para la planificación de la producción en viveros forestales de especies con alto potencial. El objetivo de la presente investigación fue medir el desarrollo de los frutos de *Aspidosperma cruentum* para generar modelos de regresión simple. El estudio se realizó en bosques intervenidos de la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica. Se seleccionaron 11 árboles con características sobresalientes, de los cuales se colectaron 325 frutos que abarcaron la muestra en un ámbito entre 15 y 205 días. A los frutos se les midió la longitud, ancho, grosor y peso con relación a días de maduración. A partir de los datos del desarrollo del fruto se generaron modelos de regresión simple con el tiempo de maduración como variable predictora. Se tomó una muestra de 40 frutos al día 205, los cuales fueron medidos durante un periodo de 27 días para conocer la dehiscencia. Los modelos de predicción registraron un coeficiente de determinación superior al 0.91 para la longitud, ancho y peso mientras que en grosor fue de 0.68. A los 205 días el fruto presentó un peso promedio 208.9 g, una longitud de 18.15 cm y un ancho de 10.33 cm. La relación de crecimiento de las variables longitud, peso y ancho fueron superiores hasta en un 65 % con respecto al grosor. Se obtuvo una dehiscencia a los ocho días. Los modelos generados permiten planificar la recolección de frutos de manglillo considerando las variables analizadas.

Palabras clave: Dehiscencia; morfología; regresión simple; relación de crecimiento

Abstract

Studies on fruit morphology serve as a tool for production planning in forest nurseries for species with high potential. The objective of the present research was to measure the development of *Aspidosperma cruentum* fruits to generate simple regression models. The study was conducted in logged forests of the Osa Peninsula, Puntarenas, Costa Rica. Eleven trees with outstanding characteristics were selected from which 325 fruits were collected, covering the sample from 15 to 205 days. The fruits were measured for length, width, thickness, and weight in relation to days of ripening. From the fruit development data, simple regression models were generated with ripening time as the predictor variable. A sample of 40 fruits was taken on day 205 and measured over a period of 27 days to determine dehiscence. The prediction models recorded a coefficient of determination greater than 0.91 for length, width, and weight, while the coefficient of determination for thickness was 0.68.

At 205 days the fruit presented an average weight of 208.9 g, a length of 18.15 cm and a width of 10.33 cm. The growth ratio of the variable's length, weight and width were higher by up to 65 % with respect to thickness. Dehiscence was obtained after eight days. The models generated allow planning the harvesting of manglillo fruits considering the variables analyzed.

Key words: Dehiscence; morphology; simple regression; growth ratio

Introducción

En Costa Rica se informa la presencia de cinco especies del género *Aspidosperma* perteneciente a la familia Apocynaceae (Morales, 2005). Morales y Zamora (2017) validan a *Aspidosperma cruentum* Woodson (manglillo) como una especie presente en Centroamérica, la cual fue erróneamente identificada como *Aspidosperma spruceanum* Benth. ex Müll. Arg. La especie *A. cruentum* se distribuye desde México hasta Colombia y en Costa Rica se encuentra ampliamente distribuida en ambas costas (Morales y Zamora, 2017), con mayor frecuencia en la parte central y sur de la vertiente Pacífica (Zamora, Jiménez y Poveda, 2000). Se desarrolla en bosques muy húmedos y en áreas de vegetación secundaria o acantilados costeros, a una elevación menor a los 1 000 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) (Morales, 2005; Zamora et al., 2000). Es un árbol que puede alcanzar hasta 45 metros de altura total, presenta tronco recto; es de tipo perennifolio y heliófilo; en Costa Rica es conocido como manglillo, amargo y amargo colorado, entre otros nombres comunes (Morales, 2005; Zamora, 2014).

La madera es dura, de textura media, con buena resistencia, caracterizada por presentar un duramen que se torna de color rojo pálido al secarse al aire y una albura de color amarillo pálido, con un brillo opaco (Araya, 2012; Grandtner, 2005; Días de Freitas, 2008). Según la categoría de Standard terms for describing Wood del U.S. Forest Products Laboratory (U.S. FPL) esta es una especie pesada en exceso, considerada como dura y fina (Zúñiga, 2016), con una densidad específica entre 0.70 y 0.82 g*cm⁻³ con un promedio de 0.76 g*cm⁻³ (Araya, 2012; Flores y Obando, 2003; Moya, Rodríguez y Olivares, 2014; Sousa-Farias et al., 2020; Zanne et al., 2009). Por sus características se utiliza en la construcción, principalmente en vigas y horcones, en otros países es utilizada en construcción naval, pisos, durmientes de ferrocarril, carpintería, postes y muebles (Román, Liones, Sautu, Deago y Hall, 2012; Días de Freitas, 2008; Zamora, 2000).

Estudios fenológicos realizados en Costa Rica señalan que la especie florece esporádicamente (Morales, 2005). Los frutos son de tipo folículo, estipulados, obovoides,

densamente tomentulosos y, por lo general, con costillas longitudinales conspicuas (Morales, 2005; Morales y Zamora, 2017; Zamora, 2014). Cada fruto contiene entre 9 y 24 semillas aladas con diámetro de 7.4 a 9.3 cm (Carvajal-Arroyo et al., 2021), de dispersión anemocórica (Román et al., 2012) lo cual, aunado al tamaño de los árboles dificultan la colecta.

El análisis morfológico y la creación de modelos de predicción que consideren variables relacionadas al desarrollo de los frutos sirven como herramienta para la recolección, manejo y estudios biológicos que mejoren la planificación de la producción en viveros forestales. Por esta razón, el presente estudio tuvo como objetivo medir el desarrollo de los frutos de *Aspidosperma cruentum* en la fase fenológica de maduración.

Metodología

Descripción del sitio

El estudio se realizó en bosques intervenidos de fincas privadas ubicados en la Península de Osa, costa suroeste de la provincia de Puntarenas, Costa Rica. La zona presenta un clima tropical húmedo, con una temperatura media de 25°C, la cual tiene variaciones locales producto de la topografía y accidentes geográficos. La precipitación registrada varía entre 2 500 y 6 000 mm anuales, con una estación seca de enero a marzo y lluviosa de abril a diciembre (Amador, 2016; INDER, 2017). Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge, la zona de estudio se ubica en un bosque muy húmedo tropical (Quesada-Monge, 2007).

Muestreo

Se seleccionaron once árboles de manglillo que presentaban características de rectitud y sanidad en el fuste. En cada árbol se midieron las variables dasométricas de altura comercial, diámetro a 1.3 m del suelo y diámetro a la altura comercial (**Tabla 1**). La recolección de frutos se basó en la observación previa de flores en los árboles durante el mes de julio de 2016, a partir de la cual se identificó el inicio de la fructificación que se dio en la cuarta semana del mes de agosto. Cada colecta se realizó en pares de árboles seleccionados al azar, excepto las dos últimas, donde se visitó un árbol por colecta. En el momento de observar la fructificación en los árboles se realizó la primera colecta a los 15 días y posterior

a ello a los 51, 87, 108, 150, 164, 169, 185 y 205 días. La maduración de la mayoría de los frutos ocurrió durante el mes de marzo de 2017.

Tabla 1. Características dasométricas de los árboles seleccionados de *Aspidosperma cruentum* en la Península de Osa, Costa Rica

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio
Diámetro a 1.3 m (cm)	40.6	94.8	59.1
Diámetro comercial (cm)	20	58	35.6
Altura comercial (m)	15	38	25.1
Volumen comercial (m ³)	0.78	19.4	7.1
Factor de forma	0.54	0.80	0.67

Fuente: Elaboración propia

Los frutos fueron cortados directamente de las ramas por medio del escalado. En total se cortaron al azar 325 frutos de diversos tamaños, con un promedio de 29 frutos por árbol. El mismo día de la colecta, los frutos se pesaron mediante una balanza electrónica con precisión de 0.1 gramos. Posteriormente, se midió su ancho, longitud y grosor (cm) con un calibrador digital (pie de rey). El grosor y la longitud fueron medidos desde el extremo superior del fruto hasta la base de este y el ancho en el punto de mayor anchura del fruto. No se registraron mediciones de ancho y grosor en la primera visita realizada a los 15 días de observarse el inicio de la fructificación.

En la última visita de colecta se obtuvieron 40 frutos de un árbol, los cuales fueron llevados al laboratorio y colocados bajo condiciones ambientales para la realización de 11 mediciones del peso durante 27 días. Se registró el peso inicial (PI) al día cero de corta, peso de dehiscencia (PD) obtenido el día en el que el fruto abrió y el peso secado al aire (PSA), registrado el día en el que el último fruto abrió. Lo anterior se realizó con el objetivo de identificar el tiempo promedio de la dehiscencia de los frutos obtenidos a partir de este árbol.

Análisis de datos y modelación

Con los datos obtenidos se generaron modelos de regresión simple para predecir la longitud, grosor, ancho y peso de los frutos, tomando como variable independiente los días (15, 51, 87, 108, 150, 164, 169, 185 y 205). Además, se generaron sus respectivos gráficos de residuos con base en los observados versus predichos. La selección del mejor modelo se realizó mediante la comparación de los parámetros estadísticos de coeficiente de determinación (R^2), error estándar del estimado (EEE), error medio absoluto (EMA), número de unidades de muestreo (n), error cuadrático medio (ECM), diferencia agregada (DA), Índice de Furnival (IF), suma de cuadrados del error (PRESS), Error % de la estimación (E%) y Coeficiente de información de Akaike (AIC). Para todos los parámetros se buscó el menor valor excepto para el R^2 (mayor valor). Los parámetros estadísticos fueron estandarizados en una escala de 0 a 1 con el fin de hacer una sumatoria absoluta positiva, cuyo valor máximo representa la mejor ecuación de ese conjunto. Los modelos se desarrollaron en el programa Statgraphics Centurion XVI versión 16.1.18. Para determinar la relación entre las variables estudiadas se realizaron correlaciones de Spearman.

Se realizaron relaciones entre las variables para conocer el comportamiento en crecimiento de estas según el número de días. De esta manera, se relacionó el peso con longitud, grosor y ancho; el ancho con largo y grosor; y la longitud con el grosor. Finalmente, con los registros de dehiscencia se determinó un promedio para los 40 frutos del PI, PD, PSA a partir del peso de estos en cada etapa y el lapso en días que requirieron los frutos del árbol para abrir bajo condiciones ambientales.

Resultado y discusión

Características morfológicas

Los frutos de manglillo registraron un promedio de 18.1 cm de longitud, 5.2 cm de grosor y 10.3 cm de ancho con un peso de 208.9 g, esto a los 205 días de desarrollo en el árbol (**Tabla 2**). Estas dimensiones son ligeramente superiores a las registradas en Costa Rica por Morales (2005), quien informó folículos con longitudes y anchos de hasta 16 y 10 cm, respectivamente. Por su parte, para la región de Centroamérica y México, Morales y Zamora (2017) registraron frutos con una mayor longitud (21-24 cm) y un ámbito en el ancho que concuerda con el presente estudio (9.5-12.5 cm). En Brasil, los registros para *Aspidosperma*

spruceanum alcanzaron valores máximos de 16.4 cm para la longitud, 4.6 cm de grosor y 9.4 cm de ancho (Días de Freitas, Martins, Vilhena, Souza y Venicio, 2014). Ante las variaciones mostradas Bocanegra, Fernández y Galvis (2015) mencionan que el tamaño y peso de los frutos depende de cómo es el ambiente que los rodea, siendo este, un índice relativo entre la materia y energía que la planta madre invierte para desarrollarlos, previendo los requerimientos de dispersión y las necesidades de reservas que utiliza la plántula para establecerse.

Con respecto a la fase fenológica de maduración del fruto, se mostró un aumento de 99.8 % en peso y 91.2 % en longitud en un lapso de 190 días. El grosor y ancho de los frutos registraron un aumento de 37.7 % y 67.8 %, respectivamente, en 154 días (**Figura 1**).

Tabla 2. *Peso, longitud, ancho y grosor de frutos de *Aspidosperma cruentum* calculados con los modelos seleccionados según días de fructificación*

Edad (días)	Peso (g)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)
15	0.36	1.59	-	-
51	45.79	7.10	3.33	3.24
87	105.64	10.74	6.71	4.27
108	133.00	12.43	7.84	4.57
150	173.72	15.22	9.27	4.94
164	184.22	16.03	9.60	5.03
169	187.67	16.31	9.71	5.05
185	197.83	17.16	10.01	5.13
205	208.88	18.15	10.33	5.21

Fuente: Elaboración propia



Figura 1. Fase fenológica de maduración de frutos de *Aspidosperma cruentum* a los 15 (a), 51 (b), 87 (c), 108 (d), 164 (e), 185 (f) y 205 (g) días y dehiscencia (h), recolectados en la Península de Osa, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia

Relaciones de crecimiento

Las relaciones de crecimiento muestran que conforme aumentan los días de desarrollo del fruto, el peso (P), la longitud (L) y el ancho (A) incrementan hasta en un 65 % con respecto al grosor (G) (**Figura 2a y 2b**). Esto porque P, L y A aumentaron sus dimensiones exponencialmente con el paso de los días, mientras que G registró un incremento mínimo. A los 205 días, por cada cm en grosor, el P, L y A es de 40 g, 3.5 y 2 cm, respectivamente. Para los mismos días el peso reportó una relación de 11:1 y 20:1 gramos por cada cm de longitud y ancho (**Figura 2a**), mientras el ancho mostró un incremento de 2 y 0.6 cm por cada cm de grosor y largo (**Figura 2b**).

Estos resultados sugieren que durante la maduración de los frutos los árboles invierten mayor energía en el aumento de peso, en la longitud con respecto al grosor y en el ancho con respecto al grosor y longitud. Este comportamiento coincide con lo reportado por Garces de Granada (1987) en *Psidium guajava* L. y Dos-Santos et al. (2015) para un estudio de frutos, quienes explican que el desarrollo de estos se da inicialmente por una división celular, seguido por el aumento en el tamaño, generando así un crecimiento y alargamiento que provocan un incremento en el volumen del fruto. Un estudio realizado para *Campomanesia*

lineatifolia Ruiz & Pav. mostró que los frutos mantienen una acumulación constante de masa fresca que se refleja de forma exponencial con el tiempo, siendo los primeros 85 días de desarrollo los que presentan menor aumento al igual que en la fase final de maduración (160 días) (Balaguera, Álvarez y Bonilla, 2009).

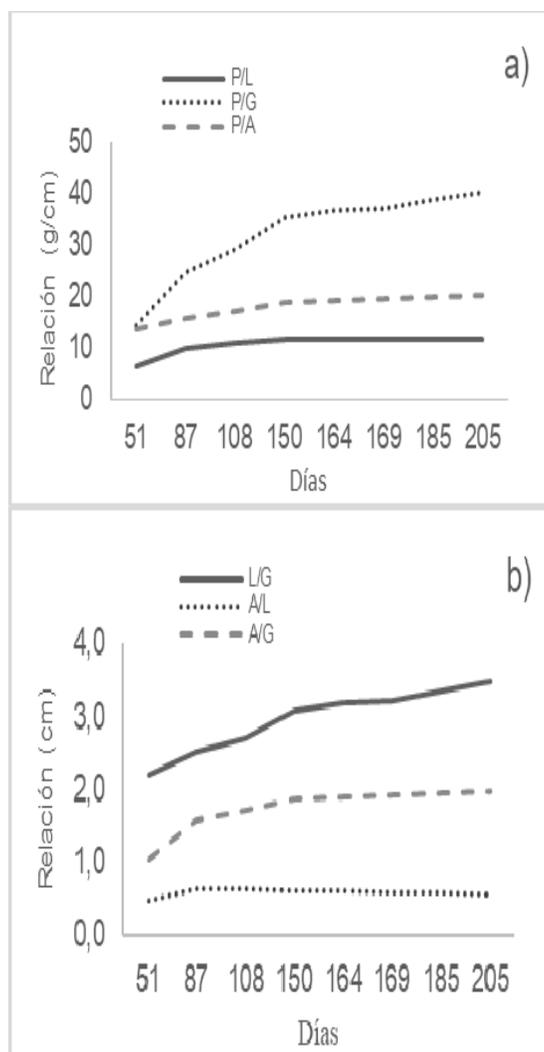


Figura 2. Relación entre las dimensiones de peso (P), longitud (L), grosor (G) y ancho (A) de los frutos de *Aspidosperma cruentum* según los días de maduración en la Península de Osa, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia de la investigación

Modelos de predicción

Los modelos generados para predecir peso y longitud se elaboraron con base en la información de campo recolectada a partir del día 15 de maduración del fruto, mientras que para el ancho y grosor se utilizó la información desde el día 51. Lo anterior debe de considerarse al utilizar las ecuaciones, las cuales se ajustan para predecir las variables hasta 20 días anteriores a la primera medición, mostrando una correlación (p-value < 0.05) positiva moderada (p= 0.66 y 0.67) y alta (p= 0.76), respectivamente. El modelo que registró el menor ajuste del R² (0.68) fue aquel que predice el grosor del fruto con respecto al número de días, mostrando una correlación positiva moderada (p= 0.58) con un nivel de confianza del 95 % (Tabla 3). El grosor mantiene una estabilidad dimensional desde sus inicios, es decir, no aumenta continuamente durante el tiempo de maduración. En efecto, al observar las mediciones de frutos del día 51 con respecto a frutos más longevos (205 días), únicamente se encontraron diferencias de 1.97 cm en el aumento del grosor.

Tabla 3. Modelos predictivos de peso, longitud, ancho y grosor de frutos de *Aspidosperma cruentum* provenientes de bosque natural en Osa, Costa Rica

Ecuación	n	R ²	EEE	EMA	DW	ECM	DA	E%	AIC
Peso (g) = exp (5.84436 - 103.034/días)	303	0.96	0.27	0.19	1.40	32.47	5.73	4.00	3.48
Longitud (cm) = (-1.84421 + 1.14676*ln (días)) ²	312	0.94	0.23	0.19	1.01	1.59	0.05	2.89	0.47
Ancho (cm) = (3.67404 - 94.3108/días) ²	279	0.91	0.11	0.09	1.73	0.65	0.01	0.48	-0.42
Grosor (cm) = (2.44103 - 32.6827/días) ²	274	0.68	0.08	0.06	1.55	0.08	0.01	0.42	-2.50

n: tamaño de la muestra; R²: coeficiente de determinación; EEE: error estándar del estimado; EMA: error medio absoluto; DW: prueba de Durbin Watson; ECM: Error Cuadrático Medio; DA: diferencia agregada; E%: error porcentual; AIC: Criterio de Información de Akaike

Fuente: Elaboración propia de la investigación

Las investigaciones que consideran la variable de días de maduración para predecir las dimensiones de los frutos son inexistentes para especies forestales; sin embargo, distintos autores han registrado modelos de predicción de número de semillas con respecto al ancho y longitud de los frutos, así como el peso con respecto al volumen. Al respecto, Tálamo, Cardozo y Mohr (2012) registraron coeficientes de determinación con valores de 0.18 y 0.33

utilizando el ancho y la longitud de los frutos de *Aspidosperma quebracho-blanco* Schltld. como variables independientes para predecir cantidad de semillas. Por su parte, estudios realizados en la especie herbácea *Capsicum pubescens* Ruiz & Pav. muestran coeficientes de determinación mayores a 0.90 al relacionar el peso fresco de los frutos como variable dependiente del ancho y volumen, mediante modelos de regresión lineal simple, haciendo las mediciones por medio del método no destructivo (Rojas, Pérez, Colinas, Sahagún y Avitia, 2008). Los ajustes logrados en la presente investigación al predecir peso verde, ancho y longitud muestran coeficientes de determinación mayores a los obtenidos en las investigaciones mencionadas anteriormente.

Los modelos generados presentan un error inferior al 4 %, siendo las variables grosor y ancho las de menor error (E %); valores tan bajos en este parámetro estadístico demuestran una alta capacidad de predicción por parte de los modelos. El error porcentual y la diferencia agregada (DA) tan bajos se ven reflejados en el EEE y EMA, los cuales presentan resultados similares que significan un error máximo de la estimación en valores absolutos de 0.27 g en peso y 0.23 cm, según sea la variable.

Por su parte, el análisis gráfico mostró que en términos generales los residuos, que permiten verificar si la ecuación se ajusta adecuadamente línea a los datos (Carrasquilla-Batista et al., 2016), tienen un comportamiento homogéneo en todos los modelos generados. Sin embargo, se observan ciertas proporciones de los modelos donde existen comportamientos negativos y positivos de los residuos. Por ejemplo, los modelos que predicen el peso y longitud muestran una tendencia de residuos negativos en los días de maduración iguales a los 51 y 169, respectivamente, lo que significa que el valor observado es menor que el predicho (**Figura 3a y 3b**); mientras que a los 87 días, el modelo que predice el grosor muestra residuos positivos, lo que indica que el valor observado es mayor que el predicho (**Figura 3d**).

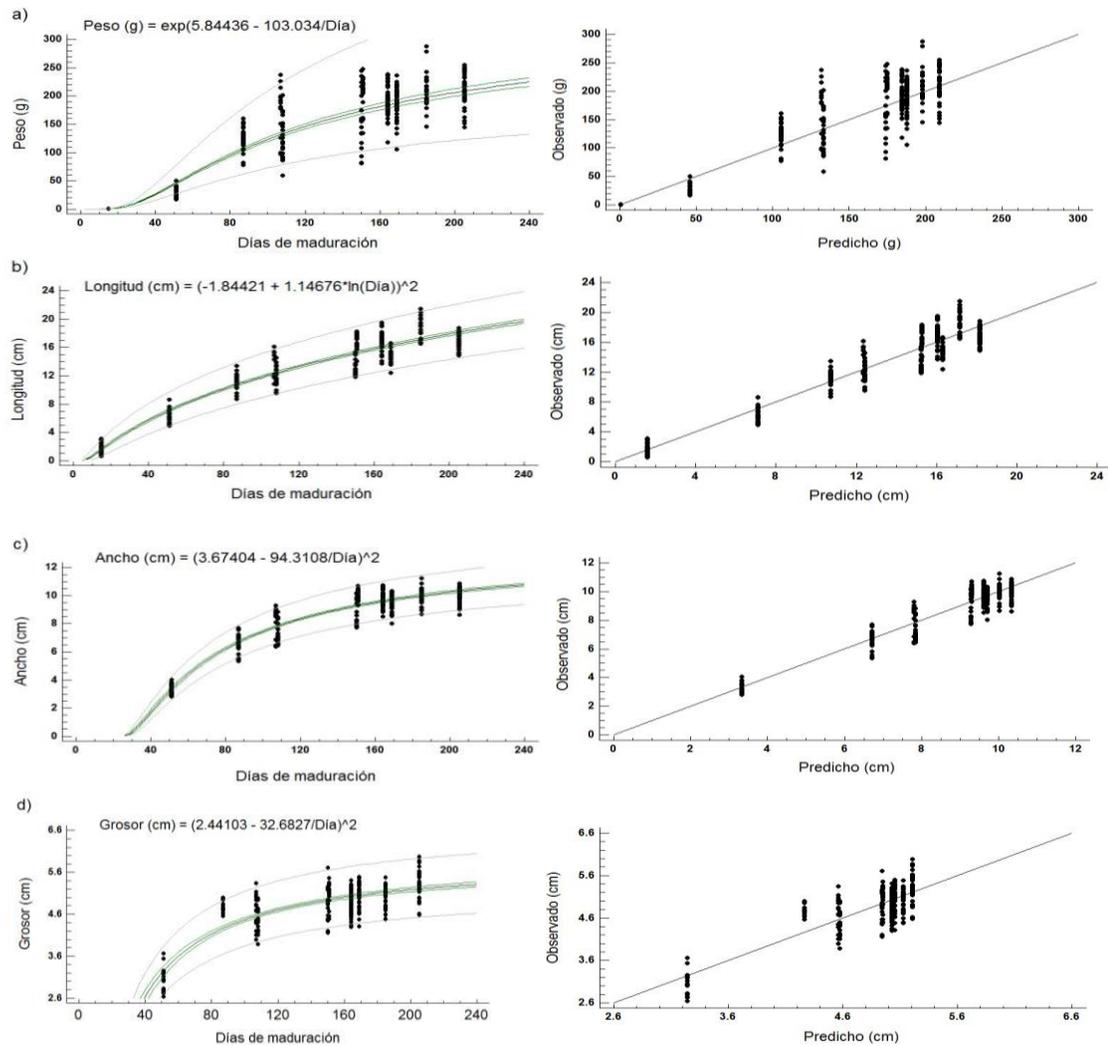


Figura 3. Modelos de predicción de peso (a), longitud (b), ancho (c) y grosor (d) y gráficos de predicho y observados según número de días de maduración de *Aspidosperma cruentum* en la Península de Osa, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia de la investigación

Dehiscencia

Los frutos colectados del último árbol visitado presentaron dehiscencia a los ocho días después de haber sido cortados y secados al aire, teniendo una pérdida de peso diaria promedio de 4.9 g (± 2.4 g); es decir, una disminución de 17.5 % (36.1 g) con respecto al peso inicial (**Tabla 4**). Laines-Hidalgo (2019) registró para *Argemone mexicana* L., la cual posee frutos de tipo cápsula dehiscente, una dehiscencia a los tres días posterior a que el fruto llegase a su madurez. El estudio presentó una disminución en el peso fresco producto de la

deshidratación de los tejidos, lo que se considera el punto de dehiscencia, donde el fruto mostró una apertura en sus carpelos y una decoloración en su cápsula y secado de las semillas.

La dehiscencia del fruto representa el tiempo de espera promedio que debe ser tomado en cuenta cuando se colectan frutos para la obtención de las semillas en caso de reproducir la especie. No obstante, este valor es representativo para un único árbol cuyos frutos fueron cortados a los 205 días, tiempo en que el fruto se considera maduro, por lo tanto, no puede asumirse como dato general de dehiscencia para la especie. El comportamiento de apertura de los frutos de *Aspidosperma cruentum* podría variar con respecto a la ubicación geográfica, desarrollo del fruto y del árbol, así como variables climáticas y edáficas que no fueron consideradas en la presente investigación.

Tabla 4. *Peso, tiempo de dehiscencia y pérdida de peso por día de frutos de Aspidosperma cruentum*

Parámetros	Promedio	DE	CV %	
Peso (g)	PI	211.92	28.61	13.50
	PD	175.11	29.84	17.04
	PSA	93.10	13.16	14.13
Tiempo de dehiscencia (días)	PI-PD	8.10	3.06	37.80
	PD-PSA	18.90	3.06	16.20
Pérdida de peso por día (g)	PI-PD	4.87	2.37	48.75
	PD-PSA	4.34	1.13	26.02

DE: desviación estándar; CV %: coeficiente de variación porcentual; PI: peso inicial; PD: peso dehiscente; PSA: peso seco al aire

Fuente: Elaboración propia de la investigación

Conclusiones

La fenológica de maduración del fruto de *Aspidosperma cruentum* presenta un aumento de 99.8 y 91.2 % para peso y longitud en 190 días, y de 37.7 y 67.8 % para grosor y ancho en 154 días.

El peso, longitud y ancho promedio registrado para los frutos maduros, a los 205 días de desarrollo, fue de 208.9 g, 18.1 cm y 10.3 cm, respectivamente. El peso fue el que presentó el mayor aumento posterior a la primera etapa de desarrollo.

Los modelos de predicción explican con éxito la variabilidad de los datos en un 91 % cuando se predice el peso, longitud y ancho de los frutos, mientras que para la predicción del grosor se logró explicar la variabilidad en un 68%. Por lo tanto, se consideran como una herramienta útil para mejorar la planificación en términos de recolección de frutos considerando las variables analizadas.

El tiempo de dehiscencia para los frutos fue de ocho días en promedio, lo cual, en conjunto con los modelos, permite estimar el tiempo de espera por quienes desean recolectar frutos para su reproducción; sin embargo, se recomienda tomar en cuenta el alcance del valor presentado por la limitante en representatividad para la especie en general.

Se recomienda continuar con estudios que estén relacionados a las variables analizadas como la producción de semillas por fruto, tasa de germinación y crecimiento de las plantas en vivero, con el fin de determinar si existe una relación entre dichas variables y el desarrollo de la especie.

Agradecimiento

Se agradece a la Universidad Nacional por el apoyo mediante fondos FIDA a la propuesta de proyecto 0206-14, en cuyo marco se realizó esta investigación. A los señores Wilberth Alvarado Durán y Wilson Azofeifa Delgado del INISEFOR por su colaboración en la colecta de los frutos. A los editores de la revista *Environment & Technology* y a las personas revisoras anónimas del presente trabajo.

Referencias

- Amador, S. (2016). *Caracterización del Territorio Península de Osa*. Instituto de Desarrollo Rural, Dirección Región Brunca Oficina Subregional Osa. <https://www.inder.go.cr/peninsula-de-osa/Caracterizacion-territorio-Peninsula-Osa.pdf>
- Araya-Montero, M. A. (2012). *Manual para la identificación de maderas a nivel macroscópico de 110 especies maderables del Caribe Norte de Costa Rica*. (tesis de grado). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/3074>
- Balaguera, H. E., Álvarez, J. G. y Bonilla, D. C (2009). Crecimiento y desarrollo del fruto de Champa (*Campomanesia lineatifolia* Ruiz y Pavón). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 12(2), 113-123. <https://doi.org/10.31910/rudca.v12.n2.2009.697>
- Bocanegra-González, K. T., Fernández-Méndez, F. y Galvis-Jiménez, J. D. (2015). Grupos funcionales de árboles en bosques secundarios de la Región Bajo Calima (Buenaventura, Colombia). *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 19(1), 17-40. <https://www.researchgate.net/publication/325035490> Grupos funcionales de arboles en bosques secundarios de la region Bajo Calima Buenaventura Colombia
- Carrasquilla-Batista, A., Chacón-Rodríguez, A., Núñez-Montero, K., Gómez-Espinoza, O., Valverde, J. y Guerrero-Barrantes, M. (2016). Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal. *Tecnología en Marcha*, 29(5), 33-45. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2983>
- Carvajal-Arroyo, D. A., Villegas-Espinoza, J. P., Vargas-Rojas, G., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C. y Barquero-Elizondo, A. I. (2021). Morfología de frutos – semillas, fenología y crecimiento de plántulas de manglillo (*Aspidosperma cruentum* Woodson) en vivero, Península de Osa, Costa Rica, en prensa.
- Días de Freitas, A. D. (2008). Aspectos tecnológicos e morfoanatômicos de sementes maduras, plântulas e plantas jovens de *Aspidosperma spruceanum* Benth ex. Müll. Arg. (APOCYNACEAE). (tesis de posgrado) Universidade Federal Rural da

Amazônia, Belém. <http://docplayer.com.br/7794332-Aspectos-tecnologicos-e-morfoanatomicos-de-sementes-maduras-plantulas-e-plantas-jovens-de-aspidosperma-spruceanum-benth-ex-mull-arg.html>

- Días de Freitas, A. D., Martins- Leão, N. V., Vilhena- Potiguara, R. C., Souza-Reis, A. R. y Venicio-Sousa, D. (2014). Caracterização morfológica do fruto, semente e desenvolvimento pós-seminal de *Aspidosperma spruceanum* Benth. Ex Mull. Arg. (Apocynaceae). Centro Científico Conhecer – Goiânia, *Enciclopédia Biosfera*, 10 (18), 863-873.
<https://www.conhecer.org.br/enciclop/2014a/AGRARIAS/caracterizacao%20morfologica%20do.pdf>
- Dos-Santos, R. S., Pacheco-Arge, L. W., Iribarem-Costa, S., Dienes-Machado, N., de Mello-Farias, P. C., Valmor-Rombaldi, C. y Costa de Oliveira, A. (2015). Genetic regulation and the impact of omics in fruit ripening. *Plant Omics Journal*, 8(2), 78-88.
https://www.academia.edu/30555688/Genetic_regulation_and_the_impact_of_omics_in_fruit_ripening
- Flores, E. y Obando, G. (2003). *Árboles del trópico húmedo: importancia socioeconómica*. Cartago, CR. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 922 p.
- Garces de Granada, E. (1987). Estudio anatómico y de los procesos de crecimiento del fruto del guayabo (*Psidium guajava* L.). *Agronomía Colombiana*, 4, 23-30.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/20918/21826>
- Grandtner, M. (2005). Elsevier's Dictionary of Trees Volume 1. North America. *Écoscience*, 13(2), 288-289.
- INDER [Instituto de Desarrollo Rural]. (2017). *Plan de Desarrollo Rural Territorial del Territorio Península de Osa 2017 – 2022*. Instituto de Desarrollo Rural, 2017.
<https://www.inder.go.cr/peninsula-de-osa/PDRT-Peninsula-de-Osa.pdf>
- Laines-Hidalgo, J. I. (2019). *Análisis de la síntesis de alcaloides en fruto y semilla de Argemone mexicana L.* (Tesis de posgrado), Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1507/1/PCB_M_Tesis_2019_Jose_Ignacio_Laines_Hidalgo.pdf

- Morales, J. (2005). Estudios en las Apocynaceae neotropicales XIX: La familia Apocynaceae S. Str. (Apocynoideae, Rauvolfioideae) de Costa Rica. *Darwiniana*, 43 (1-4), 90-191. https://www.researchgate.net/publication/26614848_Estudios_en_las_Apocynaceae_neotropicales_XIX_La_familia_Apocynaceae_Rauvolfioideae_Apocynoideae_de_Costa_Rica
- Morales, J. y Zamora, N. (2017). A synopsis of *Aspidosperma* (Apocynaceae) in Mexico and Central America with a taxonomic clarification of *Aspidosperma cruentum* and a new cryptic species. *Phytoneuron*, 68, 1-13. <http://www.phytoneuron.net/2017Phytoneuron/68PhytoN-Aspidosperma.pdf>
- Moya, R., Rodríguez, A. y Olivares, C. (2014). *Árboles maderables de la Península de Osa: madera y corteza*. Cartago, CR. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 342 p.
- Quesada-Monge, R. (2007). Los Bosques de Costa Rica. *IX Congreso Nacional de Ciencias*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://www.cientec.or.cr/exploraciones/ponencias2007/RupertoQuesada.pdf>
- Rojas-Lara, P., Pérez-Grajales, M., Colinas-León, M., Sahagún-Castellanos J. y Avitia-García, D. (2008). Modelos matemáticos para estimar el crecimiento del fruto de chile manzano (*Capsicum pubescens* “R y P”). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14, 289-294. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rcsh/v14n3/v14n3a9.pdf>
- Román, F., de Lionés, R., Sautu, A., Deago, J. y Hall, J. S. (2012). *Guía para la propagación de 120 especies de árboles nativos de Panamá y el Neotrópico*. Environmental Leadership and Training Initiative, Yale School of Forestry & Environmental Studies, USA. https://www.researchgate.net/publication/259871359_Guia_para_la_Propagacion_de_120_Especies_de_Arboles_Nativos_de_Panama_y_el_Neotropico
- Sousa-Farias, H. L., Rodrigues-Silva, W., de Oliveira-Perdiz, R., Camurça-Citó, A., Da Silva Caryalho, L. C. y Imbrozio Barbosa, R. (2020). Dataset on wood density of trees in ecotone forests in Northern Brazilian Amazonia. *Data in Brief*, 30, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105378>
- Tálamo, A., Cardozo, S. y Mohr, F. (2012). Producción de semillas de quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) en un sector del Chaco semiárido y su relación con el tamaño del fruto. *Bosque (Valdivia)*, 33(1), 87-91.

https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002012000100010

Zamora, N. (2000). *Árboles de la Mosquitia Hondureña: descripción de 150 especies*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Inf. técnico no. 43, Turrialba, Costa Rica.

Zamora, N. (2014). *Protocolo de campo para la identificación de especies arbóreas: Información taxonómica y dendrológica de las especies arbóreas de Costa Rica*. Sistema Nacional de Áreas de Conservación y Programa REDD-CCAD-GIZ, vol. 3, San José, Costa Rica. <https://chmcostarica.go.cr/sites/default/files/volumen3-protocolo-identificacion-especies.pdf>

Zamora, N., Jiménez, Q. y Poveda L. J. (2000). *Árboles de Costa Rica*. 1ra ed., Centro Científico Tropical, Santo Domingo de Heredia, Costa Rica: Instituto Nacional de Biodiversidad, vol. 2.

Zanne, A., López, G., Coomes, D., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S., Miller, R., Swenson, N., Wiemann, M. y Chave, J. (2009). Global wood density database (en línea). Consultado set 2020. <https://datadryad.org/stash/dataset/doi:10.5061/dryad.234>

Zúñiga, C. (2016). *Determinación de especies comerciales y clasificación de la madera según su dureza para los bosques bajo manejo forestal sostenible en el Área de Conservación Arenal-Huetar Norte, Costa Rica*. Oficina Nacional Forestal, Costa Rica. Ficha técnica 3. Oficina Nacional Forestal. <https://onfcr.org/wp-content/uploads/media/uploads/documents/ficha-tecnica-christian-zuniga-mendez.pdf>

Comunidad de peces arrecifales: posibles afectaciones del cambio climático

Reef fish community: possible effects of climate change

Humberto López-Ríos

M.Sc. en Ciencias Marinas y Costeras

Programa de Maestría en Ciencias Marinas y Costeras

Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre, Escuela de Ciencias Biológicas,

Universidad Nacional

hantlopez@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8527-6062>

Lilliana María Piedra-Castro

Dra. Ciencias Naturales para el Desarrollo con énfasis en gestión de recursos naturales

Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre, Escuela de Ciencias Biológicas,

Universidad Nacional

lilliana.piedra.castro@una.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0003-4878-1531>

Resumen

Las comunidades ícticas de los sistemas arrecifales están siendo presionadas como consecuencia del cambio climático sobre los ecosistemas marinos, especialmente por el aumento de la temperatura, la acidificación y la proliferación de algas. Así como por factores antrópicos que actúan de forma sinérgica. El objetivo de este trabajo es analizar el impacto de las afectaciones del cambio climático sobre la comunidad de peces en el Caribe Sur de Costa Rica. Se realizaron 21 inmersiones en el Parque Nacional de Cahuita, donde se efectuaron 42 video transectos a tres profundidades en los parches arrecifales. Se encontraron 90 especies de peces en total. En la profundidad de 1 m se reportan 50 especies, a 6 m de profundidad se reportan 63 y a 10 m de profundidad, 48 especies. Algunas especies más vulnerables sufrirán procesos de migración como consecuencia de la tolerancia a la temperatura, buscando aguas más frías hacia el hemisferio norte o sur mientras que otras menos tolerantes podrían desaparecer. Algunos peces que se alimentan específicamente de corales, pueden verse afectados porque se han reportado afectaciones de las comunidades arrecifales. Estos procesos son complejos y podrían cambiar la estructura y composición de las comunidades de peces a corto o a largo plazo. Se concluye que la comunidad íctica del arrecife es vulnerable a las presiones ejercidas por el cambio climático, y puede tender a simplificarse en respuesta a la adaptación a estos cambios.

Palabras clave: Arrecife; ictiofauna; Cahuita; cambio climático; Caribe.

Recibido: 11/10/2021

73 Revisado: 30/11/2021

Aprobado: 27/01/2022



Los artículos de Environment & Technology se comparten con Licencia Creative Commons: CC BY-NC-ND

Abstract

Fish communities in reef systems are being pressured as a result of climate change on marine ecosystems, especially from rising temperatures, acidification and algal blooms. As well as by anthropic factors that act synergistically. The objective of this work is to analyze the impact of the climate change effects on the fish community in the Southern Caribbean of Costa Rica. Twenty-one dives were made in the Cahuita National Park, where 42 video-transects were made at three depths in the reef patches. A total of 90 species of fish were found. In the depth of 1 meter 50 species are reported, at 6 meters deep 63 are reported and at 10 meters depth, 48 species. Some vulnerable species will undergo migration processes as a result of temperature tolerance, looking for colder waters towards the northern or southern hemisphere while others less tolerant could disappear. Some fish that feed specifically on corals may be affected because the reef communities have been affected. These processes are complex and could change the structure and composition of fish communities in the short or long term. It concludes that the reef fish community is vulnerable to the pressures exerted by climate change, and may tend to be simplified in response to adaptation to these changes.

Keywords: Reef; ichthyofauna; Cahuita; climate change; Caribbean.

Introducción

El cambio climático se refiere a las modificaciones en cualquier aspecto del clima del planeta (Miller 2007), que trae consigo cambios e impactos en los ecosistemas, especialmente los marinos. Estos impactos se reflejan en el aumento del contenido calórico y de la temperatura a un ritmo acelerado, se ve modificado el nivel del mar, y es evidente como se derriten los glaciares y mantos de hielo (Romero et al., 2014; Reid, 2016). Estos cambios han producido el blanqueamiento de corales, producto de episodios de temperaturas elevadas del mar en los últimos 20 años (Oliver, Berkelmans, y Eakin, 2018), dando como resultado pérdidas significativas de coral vivo.

No solo los corales se afectan por este fenómeno, sino también la comunidad que vive en estos biomas. Los peces son un componente importante de estos ecosistemas, (McClanahan 2000; Bellwood et al. 2004; Dulvy et al. 2004) además de formar parte de los medios de vida para las personas en las zonas costeras tropicales (Pauly et al. 2002). La mayoría de los peces de arrecife están estrechamente asociados con el sustrato (Choat y Bellwood 1991), lo que los hace muy susceptibles a perturbaciones que alteren la estructura biológica o física de sus hábitats (Wilson et al. 2006; Pratchett et al. 2008 a, b).

Otro impacto importante del cambio climático sobre los océanos, ha sido la redistribución de los organismos marinos, que se desplazan hacia altas latitudes o hacia aguas más profundas a medida que la temperatura aumenta (Sunday, Bates y Duty 2012; Poloczanska et al. 2013). Los cambios a largo plazo en la distribución de las especies se han relacionado con variaciones graduales en la temperatura (Pinsky et al. 2013; Kleisner 2016),

ya que las distribuciones geográficas de las especies marinas están fuertemente vinculadas a la tolerancia a la temperatura (Sunday, Bates y Duty 2012). Además, la productividad de las especies regionales (Hettler 1992; Meng, Oremus y Gaines 2016) y la fenología (Sims et al. 2001; Mills et al. 2013) pueden ser altamente sensibles a los cambios de la temperatura del agua, lo que puede ser un propulsor de alteraciones a largo plazo (Morley, Batt y Pinsky 2017).

Sumado a lo anterior, los sedimentos afectan a los peces de arrecife, ya sea directamente en el crecimiento o la supervivencia en diferentes etapas de la vida, o indirectamente, a través de los efectos sobre la cubierta de coral o la complejidad topográfica. La estrecha asociación entre los peces de arrecife y su hábitat subyacente (Jones y Syms 1998; Jones et al. 2004; Wilson et al. 2006) sugieren que cualquier cambio inducido por sedimentos en la estructura del ecosistema, tendrá efectos importantes en los peces asociados a los corales. En términos de efectos directos, la visión reducida causada por la turbidez puede dificultar la capacidad de búsqueda de alimento de los peces, lo que podría conducir a una disminución de la abundancia o limitar su crecimiento (Williams et al. 1986; Kingsford y Hughes 2005).

Por otra parte, la invasión de los arrecifes por macroalgas compite por espacio con los corales e inhibe su crecimiento. Estas algas marinas mostraron una abundancia bastante baja en los arrecifes del Caribe (Suchley et al. 2016); pero actualmente, la mayoría de estos ecosistemas están invadidos por ellas. La proliferación de macroalgas se debe principalmente al inadecuado tratamiento de aguas residuales; a los afluentes agrícolas e industriales; al desarrollo costero; y a la destrucción del hábitat, como ocurre con las pérdidas de manglares y pastos marinos (McField et al. 2018).

La acidificación de los océanos es otro factor que presiona a las comunidades de peces. Es complicado evaluar el impacto que este proceso tendría en los peces, siendo probable que muchos de ellos se vean afectados de forma negativa. Estas presiones pueden ocasionar la desaparición de los arrecifes tropicales y muchas especies de importancia comercial que dependen de ellos se verían amenazadas, puesto que les sirven de alimento y protección (Ishimatsu et al. 2004).

Este panorama no es halagüeño, sobre todo porque el conocimiento actual es escaso para predecir lo que sucederá con los peces, en un mundo con alto contenido de CO₂ en diferentes escalas temporales. Sobre la base de la evidencia disponible, afectará directamente a los peces a través de impactos agudos y potencialmente letales en las funciones fisiológicas vitales, e impactos subletales crónicos en aspectos más sutiles, pero aún esenciales del ciclo de vida. Tales niveles en el agua influyen indirectamente en los peces a través de impactos en el medio ambiente acuático, como el aumento de la temperatura del agua y en la estructura y función del ecosistema (Ohsumi 2004).

Por consiguiente, el objetivo de este trabajo será analizar la comunidad de peces del Parque Nacional Cahuita, Costa Rica, y los posibles impactos que les genera el cambio climático.

Metodología

Para seleccionar los sitios de muestreo se realizó una gira preliminar en noviembre de 2017, para el reconocimiento y geoposicionamiento de los puntos, empleando un GPS Garmin 60 CSX. Los puntos de muestreo fueron situados en tres zonas arrecifales del área de estudio: Playa Blanca (PB), Punta Cahuita (PC) y Puerto Vargas (PV) donde por lo general, el acceso a los turistas es limitado, y en cada uno se ubicaron a tres profundidades (1, 6 y 10 m), considerando que estuvieran colocados sobre parches de coral (**Figura 1**). En las zonas de Playa Blanca y Punta Cahuita solamente se encontraron dos profundidades, debido a la poca variabilidad topográfica del terreno.

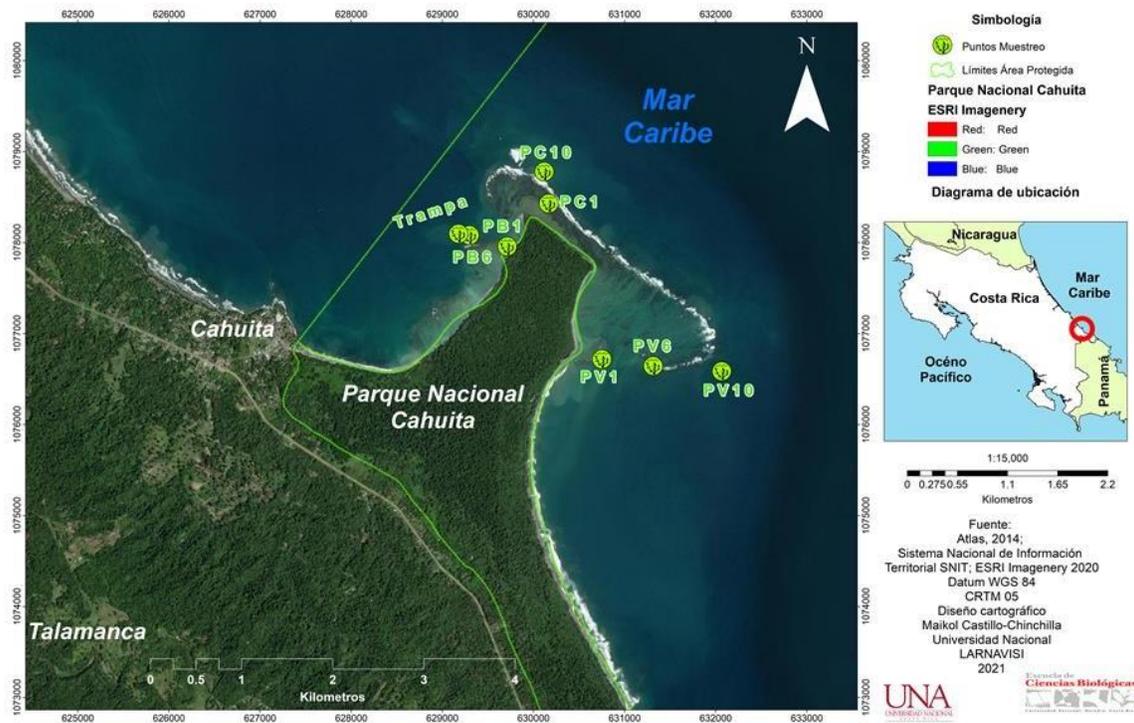


Figura 1. Área de estudio y ubicación de los sitios de muestreo con sus profundidades, Playa Blanca (PB 1 m y PB 6 m), Punta Cahuita (PC 1 m y PC 10 m), y Puerto Vargas (PV 1m, PV 6m y PV 10 m). Fuente: López (2021)

Los muestreos se realizaron en los meses de abril, mayo, setiembre y octubre de 2018, y en mayo, setiembre y octubre de 2019, entre las 8 a.m. y las 4 p.m., cuando las condiciones hidrometeorológicas de Cahuita eran las más aceptables para llevar a cabo inmersiones (que corresponden al periodo menos lluvioso en la zona). Esto con el fin de determinar la riqueza, abundancia, densidad y diversidad de la ictiofauna. En la medida de lo posible, las giras fueron programadas durante fechas próximas a la luna llena, ya que se ha observado una mayor presencia de peces en esta fase lunar (Robertson 1992).

En las profundidades seleccionadas (1, 6 y 10 m) en cada punto de muestreo, se aplicó el método AGRRA (Programa de Evaluación Rápida de Arrecifes del Atlántico y Golfo) (2012), que se ha utilizado en el Gran Caribe para las evaluaciones de peces en áreas arrecifales por censos visuales. Esta metodología se modificó reemplazando los censos visuales por video transectos utilizando cámaras submarinas (GoPro Hero) protegidas en un estuche hermético, empleando una cuerda de nylon de 100 m de longitud, marcada cada 20 m por una plomada que se extendió sobre el sustrato marino y se utilizó como guía para el

desarrollo de las evaluaciones *in situ*. Sobre esta cuerda se realizaron transectos de 100 m lineales por 2 m de ancho, y constó cada punto de tres repeticiones.

Para estos video transectos se requirió que al menos dos buzos participaran en el muestreo. En cada transecto un buzo se colocó en una de las bandas de 1 m de ancho. Y comenzaron a nadar en dirección opuesta sobre el transecto siempre manteniéndose al lado asignado de la cuerda (**Figura 2**). Para el momento del video se debió nadar a una velocidad, que permitió hacer la totalidad de la línea de transecto de 100 m en aproximadamente 25 minutos (4 m/minuto). Se incluyeron en el muestreo, todos los peces de arrecife observados dentro del transecto. Los individuos que se desplazaron de atrás hacia adelante no fueron evaluados.

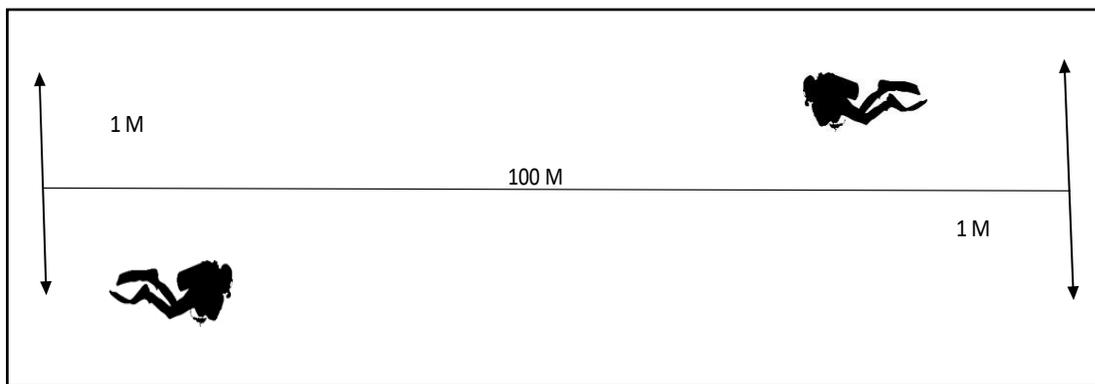


Figura 2. Esquema de la metodología de los video-transectos aplicada en este estudio en el Parque Nacional Cahuita. Fuente: López (2021)

Los videos permitieron la identificación de las especies de peces *ex situ* y el conteo de estos, en el Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre. Para esto se utilizó una computadora de mesa con una pantalla de 22 pulgadas, y las guías de identificación de Humann y DeLoach (2014), Bussing y López (2010), Robertson et al. (2019) y AGRRA (2012). Se verificó la validez taxonómica, con el fin de garantizar las especies sinónimas para la comparación de los datos de Phillips y Pérez (1984), empleando las siguientes bases de datos: www.marinespecies.org, www.fishbase.org, y www.reefguide.org.

Se estimó la diversidad de la comunidad de peces con el índice de Shannon-Wiener (H') (Martella et al. 2012), y el índice de equidad de Pielou (Moreno 2001).

Una distribución de abundancia relativa de especies utiliza toda la información acumulada en la comunidad y es la descripción matemática completa de los datos. Este es un

índice basado en la abundancia proporcional de especies. Considera tanto la uniformidad como la riqueza de especies en donde la abundancia representa el número total de individuos por especie (Moreno 2001).

La abundancia relativa (AR) se calculó dividiendo el número de miembros de cada especie por el total de individuos de todas las especies, multiplicado por cien, utilizando la siguiente fórmula:

$$\%Ni = (Ni / NT) \times 100.$$

Donde % Ni, es el porcentaje de la abundancia relativa de la especie i, Ni es el número de individuos de la especie i, NT es el número total de individuos de todas las especies de peces.

Por medio de este índice, se evidencia la importancia numérica de cada especie y las variaciones que presenta la comunidad íctica a través de los diferentes transectos (Chávez, 2009). Se calculó el índice de diversidad de Shannon-Wiener (H), que representa la relación entre la abundancia relativa de los individuos y la riqueza específica mediante la expresión: **$H = - \sum (Pi * \text{Log}_{10} Pi)$** ,

Donde:

Pi = ni/N (abundancia relativa), N = total de todas las especies, ni = abundancia para la especie i, Log₁₀Pi = logaritmo base 10 de Pi.

La densidad (D) es el número de individuos (N) en un área determinada. Puede estimarse, a partir del conteo del número, a través de mediciones de distancias entre puntos. Cuando los datos de densidad se emplean para hacer comparaciones entre sitios, se obtienen varias estimaciones para calcular la desviación estándar de cada muestra (Morlans 2004).

El índice de equidad de Pielou mide la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada. Su valor va de 0 a 1, de forma que 1 corresponde a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes (Moreno 2001).

Donde:

$$J' = \frac{H'}{H' \max}$$

$$H' \max = \ln(S)$$

Finalmente, para el análisis de los datos se utilizaron los programas Species Diversity and Richness 4, EstimateS versión 9.1, Past 3.22 y Microsoft Excel 2019.

Para la evaluación de los parámetros fisicoquímicos en los sitios de muestreo, se empleó el multiparámetro Vernier LabQuest2 con el que se midieron: oxígeno disuelto, pH, temperatura y salinidad. Además, se evaluó la transparencia como un equivalente de la turbidez empleando el disco Secchi. Los datos registrados se sometieron a un análisis de componentes principales (ACP)

Los datos de temperatura superficial del mar desde 2003 a 2020, se obtuvieron mediante de la plataforma Earth Data de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de los Estados Unidos (NASA) con una resolución de 4 km (Global Change Master Directory (GCMD 2020). Se realizó un box plot entre años.

Se calculó la tasa de sedimentación usando la metodología propuesta por el Manual de Métodos del Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia (Garzón, Reyes y Rodríguez 2002), donde se establece la colocación de tres trampas de sedimento por sitio de muestreo a profundidades entre 9 y 12 m. Cada trampa está constituida por tubos de PVC de 5.5 cm. de diámetro y 30 cm de altura, tapados en su fondo y sujetos a una varilla roscada de 60 cm por cuerdas sintéticas. La varilla se clavó con un mazo en forma vertical y sujeto al sustrato para evitar que fuera removida (**Figura 3**).

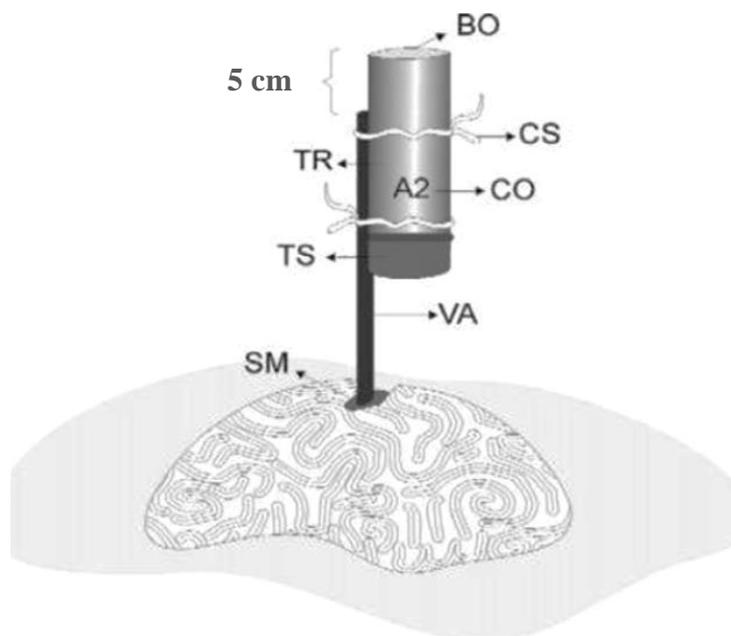


Figura 3. Trampa de sedimentos (TR), VA= varilla, TS= tapa sellada, BO= boca de la trampa, CO= código de identificación, CS= cuerda sintética, SM= sustrato muerto para clavar la varilla. Fuente: Garzón et al. (2002)

En este caso, se realizó la modificación de colocar seis trampas a una profundidad de 6 m en el área de Playa Blanca, esto debido a las limitaciones en el tiempo de recolecta y el espacio de almacenamiento. Se aseguró que las trampas fueran recolectadas en los dos periodos aptos para las inmersiones como son los meses de abril y mayo, y setiembre y octubre. Luego, fueron transportadas en hieleras hacia el laboratorio donde se tamizaron con un colador de 1 mm de luz de malla. Posteriormente, los sedimentos se sometieron a dos sesiones de lavado por precipitación en agua dulce durante dos días para eliminar su contenido de sal.

Seguidamente, a las muestras se les retiró el agua con ayuda de una manguera de hule, para ser colocadas en beakers de 150 ml previamente pesados. Los sedimentos fueron secados dentro de los beaker en un horno a 90 °C durante cuatro días.

Finalmente, los beakers fueron pesados con el sedimento en una balanza semianalítica Setra BL-410S para establecer el peso seco en gramos de las muestras. La tasa de sedimentación se calculó a partir de la siguiente ecuación corregida de Garzón et al. (2002):

$$T\text{SF} = \frac{W \text{ g} \cdot 1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \cdot \frac{1}{AB} \cdot \frac{1}{ND}$$

Donde, TSF: tasa de sedimentación por fracción (mg/cm/día), W: peso (g), AB: área de la boca de la trampa, ND: número de días que la trampa estuvo bajo el mar.

Las tasas de sedimentación por fracción fueron calculadas considerando el número de días en los cuales estuvo la trampa sumergida. Esto permitió compararlas entre sí a pesar de haber sido retiradas en períodos diferentes.

Los datos obtenidos en este estudio se compararon con los de Phillips y Pérez (1984), a pesar de las diferencias metodológicas, porque es el único estudio previo.

Resultado y discusión

A partir del análisis de los registros obtenidos por los video transectos, se contabilizaron 4 345 individuos correspondientes a 90 especies, 47 géneros y 28 familias. Las familias más numerosas fueron Labridae con 12 especies, Haemulidae y Pomacentridae con diez, Scaridae con ocho, Labrisomidae con siete, y Lutjanidae y Gobiidae con seis cada una (**Tabla 1**). Se incluyeron en la **Tabla 1** las especies encontradas por Phillips y Pérez en 1984, con el fin de observar diferencias temporales en la comunidad de peces en el área de estudio.

De las 49 especies reportadas por Phillips y Pérez (1984), 13 de ellas no fueron observadas en este estudio. Además, la especie que presentó un mayor número de individuos que los reportados por el estudio realizado en 1984 fue *Anisotremus virginicus*. Esto nos deja claro los cambios que ha sufrido la comunidad de peces, y el arrecife de coral del que dependen (Moberg y Rönnback (2003); Mumby et al. 2004), el cual presenta un deterioro muy significativo debido a efectos antrópicos y probablemente a los fenómenos asociados al cambio climático que podrían estar actuando de forma sinérgica (Cortés et al. 1984; Jiménez 2001 b).

Tabla 1. Lista de especies y número total de individuos observados en la zona arrecifal del Parque Nacional Cahuita por Phillips y Pérez (1984), y este estudio (2018-2019).

Familia	Especie	Phillips y Pérez (1984) (Número ind.)	Este estudio (PC 1 y PV 1-6 M) No. Ind	Este estudio (Playa Blanca 1-6 M) No.ind	Este estudio (PC-PV 10 M) No.ind
Acanthuridae	<i>Acanthurus bahianus</i>	278	0	0	0
Acanthuridae	<i>Acanthurus chirurgus</i>	0	18	3	0
Acanthuridae	<i>Acanthurus coeruleus</i>	397	6	1	4
Acanthuridae	<i>Acanthurus tractus</i>	0	3	1	0
Apogonidae	<i>Apogon maculatus</i>	20	0	0	0
Blenniidae	<i>Ophioblennius atlanticus</i>	75	0	0	0
Carangidae	<i>Caranx bartholomaei</i>	41	0	14	0
Carangidae	<i>Caranx crysos</i> (1815) (<i>Caranx fusus</i> 1817)	1	0	0	0
Carangidae	<i>Caranx ruber</i>	0	1	0	9
Chaenopsidae	<i>Acanthemblemaria spp.</i>	4	0	0	0
Chaetodontidae	<i>Chaetodon capistratus</i>	4	1	0	0
Chaetodontidae	<i>Chaetodon ocellatus</i>	63	5	3	0
Chaetodontidae	<i>Chaetodon striatus</i>	26	6	1	1
Cirrhitidae	<i>Amblycirrhitus pinos</i>	0	0	0	9
Diodontidae	<i>Diodon histrix</i>	1	0	0	0
Glinglymostomatidae	<i>Glinglymostoma cirratum</i>	0	1	0	0
Gerreidae	<i>Gerres cinereus</i>	0	0	1	0
Gobiidae	<i>Bathygobius soporator</i>	0	6	0	0
Gobiidae	<i>Coryphopterus personatus</i>	0	0	11	0
Gobiidae	<i>Coryphopterus spp</i>	0	2	1	0
Gobiidae	<i>Elacatinus spp</i>	0	0	1	3
Gobiidae	<i>Gnatholepis thompsoni</i>	0	11	5	0

Continuación Tabla1. Lista de especies y número total de individuos observados en la zona arrecifal del Parque Nacional Cahuita por Phillips y Pérez (1984), y este estudio (2018-2019).

Familia	Especie	Phillips y Pérez (1984) (Número ind.)	Este estudio (PC 1 y PV 1-6 M) No. ind	Este estudio (Playa Blanca 1-6 M) No.ind	Este estudio (PC-PV 10 M) No.ind
Gobiidae	<i>Gnatholepis spp</i>	0	0	0	1
Haemulidae	<i>Anisotremus moricandi</i>	0	0	0	1
Haemulidae	<i>Anisotremus surinamensis</i>	0	0	1	0
Haemulidae	<i>Anisotremus virginicus</i>	9	19	6	3
Haemulidae	<i>Haemulon aurolineatum</i>	0	1	1	0
Haemulidae	<i>Haemulon carbonarium</i>	0	1	1	0
Haemulidae	<i>Haemulon flavolineatum</i>	394	25	4	1
Haemulidae	<i>Haemulon macrostomum</i>	860	32	25	7
Haemulidae	<i>Haemulon parra</i>	114	0	0	0
Haemulidae	<i>Haemulon plumierii</i>	80	5	0	0
Haemulidae	<i>Haemulon sciurus</i>	15	8	6	0
Haemulidae	<i>Haemulon spp</i>	334	0	1	0
Hemiramphidae	<i>Hemiramphus balao</i>	0	1	0	0
Holocentridae	<i>Holocentrus adscensionis</i>	0	2	0	1
Holocentridae	<i>Holocentrus rufus</i>	119	0	5	0
Holocentridae	<i>Myripristis jacobus</i>	51	0	0	1
Kyphosidae	<i>Kyphosus sectatrix</i>	0	0	1	0
Kyphosidae	<i>Kyphosus incisor</i>	144	0	0	0
Labridae	<i>Bodiamus rufus</i>	79	9	3	1
Labridae	<i>Halichoeres bivittatus</i>	76	233	96	22
Labridae	<i>Halichoeres caudalis</i>	0	1	0	0
Labridae	<i>Halichoeres garnoti</i>	0	5	0	0
Labridae	<i>Halichoeres maculipinna</i>	0	0	0	1
Labridae	<i>Halichoeres pictus</i>	0	0	0	2

Continuación Tabla 1. Lista de especies y número total de individuos observados en la zona arrecifal del Parque Nacional Cahuita por Phillips y Pérez (1984), y este estudio (2018-2019).

Familia	Especie	Phillips y Pérez (1984) (Número ind.)	Este estudio (PC 1 y PV 1-6 M) No. ind	Este estudio (Playa Blanca 1-6 M) No.ind	Este estudio (PC-PV 10 M) No.ind
Labridae	<i>Halichoeres poeyi</i>	0	45	8	24
Labridae	<i>Halichoeres radiatus</i>	0	3	0	0
Labridae	<i>Halichoeres spp</i>	0	10	3	3
Labridae	<i>Lachnolaimus maximus</i>	0	0	0	1
Labridae	<i>Thalassoma bifasciatum</i>	1148	230	405	265
Labridae	<i>Xyrichtys splendens</i>	0	1	0	0
Labrisomidae	<i>Gobioclinus guppyi</i>	0	1	0	1
Labrisomidae	<i>Labrisomus conditus</i>	0	1	0	1
Labrisomidae	<i>Labrisomus nuchipinnis</i>	0	2	1	3
Labrisomidae	<i>Labrisomus spp</i>	0	1	2	1
Labrisomidae	<i>Malacoctenus delalandii</i>	0	1	0	1
Labrisomidae	<i>Malacoctenus spp</i>	0	2	1	0
Labrisomidae	<i>Malacoctenus triangulatus</i>	0	3	0	5
Lutjanidae	<i>Lutjanus analis</i>	0	0	0	2
Lutjanidae	<i>Lutjanus apodus</i>	54	7	2	0
Lutjanidae	<i>Lutjanus griseus</i>	1	0	0	0
Lutjanidae	<i>Lutjanus jocu</i>	0	0	0	6
Lutjanidae	<i>Lutjanus mahogoni</i>	52	3	0	2
Lutjanidae	<i>Lutjanus synagris</i>	0	5	2	10
Lutjanidae	<i>Ocyrus chrysurus</i>	5	0	16	1
Megalopidae	<i>Megalops atlanticus</i>	0	5	0	0
Mullidae	<i>Mulloidichthys martinicus</i>	1	12	0	0
Mullidae	<i>Pseudupeneus maculatus</i>	17	0	0	0
Myliobatidae	<i>Aetobatus narinari</i>	0	1	0	0

Continuación Tabla 1. Lista de especies y número total de individuos observados en la zona arrecifal del Parque Nacional Cahuita por Phillips y Pérez (1984), y este estudio (2018-2019).

Familia	Especie	Phillips y Pérez (1984) (Número ind.)	Este estudio (PC 1 y PV 1-6 M) No. ind	Este estudio (Playa Blanca 1-6 M) No.ind	Este estudio (PC-PV 10 M) No.ind
Nomeidae	<i>Nomeus gronovii</i>	0	1	0	0
Pempheridae	<i>Pempheris schomburgkii</i>	28	0	32	0
Pomacanthidae	<i>Holacanthus ciliaris</i>	6	0	3	0
Pomacanthidae	<i>Holacanthus tricolor</i>	1	0	0	0
Pomacanthidae	<i>Pomacanthus paru</i>	3	0	0	0
Pomacentridae	<i>Abudefduf saxatilis</i>	647	61	146	5
Pomacentridae	<i>Chromis multilineata</i>	1	0	4	0
Pomacentridae	<i>Microphastodon chrysurus</i>	372	15	59	7
Pomacentridae	<i>Stegastes adustus</i>	0	237	265	129
Pomacentridae	<i>Stegastes diencaeus</i>	0	135	188	170
Pomacentridae	<i>Stegastes leucostictus</i>	0	0	0	2
Pomacentridae	<i>Stegastes partitus</i>	6	1	4	6
Pomacentridae	<i>Stegastes planifrons</i>	1156	31	62	9
Pomacentridae	<i>Stegastes spp</i>	0	62	59	37
Pomacentridae	<i>Stegastes variabilis</i>	0	66	35	15
Priacanthidae	<i>Priacanthus cruentatus</i>	63	0	0	0
Scaridae	<i>Nicholsina usta</i>	0	1	0	0
Scaridae	<i>Scarus iseri</i> 1789 (<i>Scarus croicensis</i> 1790)	460	8	3	2
Scaridae	<i>Scarus spp</i>	0	1	0	0
Scaridae	<i>Scarus taeniopterus</i>	53	0	1	0
Scaridae	<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	0	3	3	4
Scaridae	<i>Sparisoma chrysopteron</i>	0	1	0	0
Scaridae	<i>Sparisoma rubripinne</i>	172	12	4	7

Continuación Tabla 1. Lista de especies y número total de individuos observados en la zona arrecifal del Parque Nacional Cahuita por Phillips y Pérez (1984), y este estudio (2018-2019).

Familia	Especie	Phillips y Pérez (1984) (Número ind.)	Este estudio (PC 1 y PV 1-6 M) No. ind	Este estudio (Playa Blanca 1-6 M) No.ind	Este estudio (PC-PV 10 M) No.ind
Scaridae	<i>Sparisoma viride</i>	97	5	1	0
Sciaenidae	<i>Odontoscion dentex</i>	25	15	11	5
Scorpaenidae	<i>Pterois volitans</i>	0	1	0	0
Scorpaenidae	<i>Scorpaena plumieri</i>	2	0	0	0
Serranidae	<i>Cephalopholis cruentata</i> 1802 (<i>Epinephelus cruentatus</i> 1802)	1	3	8	4
Serranidae	<i>Cephalopholis fulva</i> 1758 (<i>Epinephelus fulva</i> 1758)	18	1	0	0
Serranidae	<i>Epinephelus spp</i>	0	0	1	0
Serranidae	<i>Serranus flaviventris</i>	0	5	3	17
Sphyraenidae	<i>Sphyraena barracuda</i>	8	0	0	1
Syngnathidae	<i>Syngnatus caribbaeus</i>	0	1	0	0
Tetraodontidae	<i>Canthigaster rostrata</i>	0	156	311	140

Fuente: Elaboración propia

Los índices ecológicos de Shannon y Pielou obtenidos en esta investigación son similares a los registrados por Phillips y Pérez (1984) (**Tabla 2**), lo que indica que, a pesar de las perturbaciones antrópicas de las últimas décadas, estos se mantienen en el tiempo. De igual forma, la estructura de las comunidades de peces, calculada con el índice de diversidad de Shannon no varió entre las épocas poco lluviosas y lluviosas durante el 2018-2019.

Tabla 2. Comparación de los índices ecológicos para el Parque Nacional Cahuita, Limón Costa Rica por Phillips y Pérez (1984) y este estudio (2018-2019). ND: no hay datos

Sitio de muestreo	Profundidad metros	H' Phillips y Pérez (1984)	H' (Este estudio)	J' Phillips y Pérez (1984)	J' (Este estudio)
Playa Blanca	1	ND	2.25	ND	0.72
Playa Blanca	6	ND	2.32	ND	0.64
Punta Cahuita	1	2.49	2.34	0.82	0.72
Punta Cahuita	10	ND	2.25	ND	0.64
Puerto Vargas	1	2.12	2.51	0.77	0.74
Puerto Vargas	6	2.71	2.74	0.73	0.71
Puerto Vargas	10	ND	2.19	ND	0.64

Fuente: Elaboración propia

En relación con los resultados de los parámetros fisicoquímicos del arrecife de Cahuita, se puede observar en la **Tabla 3**, los valores promedio en los diferentes puntos de muestreo. Destacan el oxígeno disuelto (OD mg/L) con un promedio total de 5.56 mg/L, un máximo de 6.4 mg/L en Punta Cahuita a un metro de profundidad y un mínimo de 5.0 mg/L en Puerto Vargas a 10 m. El pH con un promedio total de 8.45, siendo mayor en Puerto Vargas con 8.73 a 6 m de profundidad y un mínimo de 8.3 en Punta Cahuita a un metro.

Además, la temperatura (°C) tuvo un promedio de 30.32 °C, siendo las más altas registradas en Punta Cahuita y Playa Blanca de 30.2 °C a un metro de profundidad, mientras que la menor temperatura estuvo en Punta Cahuita a 10 m de profundidad con 28.8 °C. La salinidad promedio fue de 30.2 ppt, la mayor salinidad estuvo en Puerto Vargas a 6 m de profundidad con 31.4 ppt y la mínima también en Puerto Vargas con 28.7 ppt. Para finalizar, el promedio de transparencia del agua fue de 3.73 m, la máxima se registró en Punta Cahuita a 10 m de profundidad con 6.48 m y la mínima se localizó en Puerto Vargas a 6 m de profundidad con 4.8 m.

Tabla 3. *Parámetros físicoquímicos (promedios) registrados en el arrecife del Parque Nacional Cahuita, Limón Costa Rica entre 2018 y 2019.*

Lugar	pH	Temperatura °C	Salinidad (ppt)	Oxígeno disuelto(mg/L)	Transparencia (turbidez m)
Puerto Vargas 1 m	8.44±0.04	29.8±0.2	28.7±0.9	5.2±0.04	1±0
Puerto Vargas 6 m	8.73±0.01	29.2±0.4	31.4±0.8	5.7±0.2	4.8±0.6
Puerto Vargas 10 m	8.62±0.01	28.9±0.5	31.3±0.3	5.0±0.08	5.8±0.4
Punta Cahuita 1 m	8.3±0.08	30.2±0.3	29.3±0.2	6.4±0.4	1±0
Punta Cahuita 10 m	8.34±0.2	28.8±0.4	29.2±1.3	5.43±0.1	6.48±2.2
Playa Blanca 1 m	8.32±0.3	30.2±0.2	30.6±0.5	5.73±0.5	1±0
Playa Blanca 6 m	8.39±0.1	29.2±0.2	30.7±0.2	5.5±0.08	5±1.6
Cahuita total	8.45±0.1	30.32±0.6	30.2±1.08	5.56±0.4	3.73±2.2
SD	0.1645	0.59080	1.0889	0.4504	2.2932
SE	0.0621	0.2233	0.4115	0.1702	0.8667

Fuente: López (2021)

En el análisis de componentes principales de las variables físicoquímicas, transparencia, profundidad y precipitación, los tres primeros componentes explican el 75.77% de la variación de los datos (**Figura 4**) representa el 42.98 % de la información, y se observa que la distribución de la mayoría de las especies de peces está relacionada en forma directa con la salinidad, transparencia, profundidad y pH se encuentra representando el 18.64 % de la varianza, siendo pocas las especies relacionadas con pH y precipitación explica el 14.14% de la variabilidad total del sistema, y representa las variables pH, temperatura, salinidad y precipitación como las responsables de la presencia de la ictiofauna en el ecosistema arrecifal. Variables como la temperatura superficial, transparencia y salinidad están relacionadas según el IPCC (2013), con factores del cambio climático. Los mismos han mostrado tener influencia sobre la distribución sobre las especies de peces en la zona estudiada.

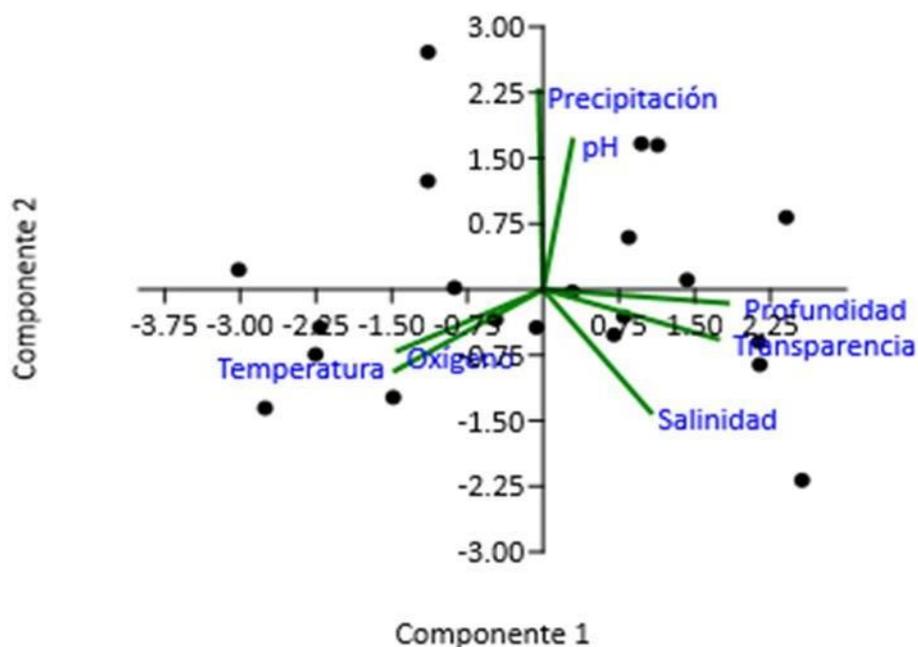


Figura 4. Análisis de los componentes principales CP1 y CP2, utilizando como variables: especies, pH, temperatura, salinidad, oxígeno, transparencia y precipitación, en el Parque Nacional Cahuita, Limón Costa Rica entre 2018 y 2019. Fuente: López (2021)

Cabe mencionar que el Caribe Sur de Costa Rica es una de las regiones más afectadas por la erosión provocada por el oleaje, y lugares como el Parque Nacional Cahuita (PNC) sufren uno de los procesos más acelerados de erosión costera. Según Lizano (2013) la degradación es ocasionada, por el daño en los arrecifes, cuencas hidrográficas y humedales que interactúan con la playa, así mismo como el ascenso en la energía de las olas y el cambio climático.

Con respecto a los resultados de las temperaturas, se obtuvo un promedio de 30.32 °C, siendo las más altas registradas en Punta Cahuita y Playa Blanca de 30.2 °C a un metro de profundidad, mientras que la menor temperatura se registró en Punta Cahuita a 10 m de

profundidad con 28.8 °C. Esto demuestra que en el área de estudio ha habido una leve tendencia al aumento de la temperatura superficial del agua al compararlos con los valores registrados durante el periodo 2003-2020 (**Figura 5**).

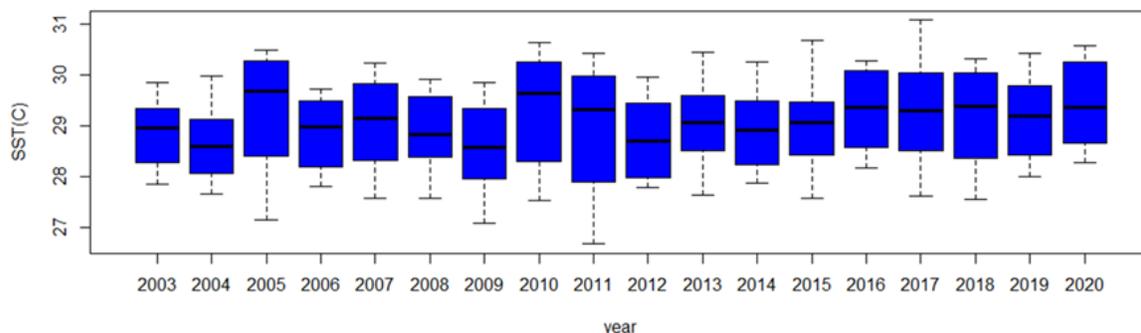


Figura 5. Comportamiento anual de la temperatura superficial del agua (SST) entre los años 2003 y 2020 provenientes de plataforma Earth Data de la Nasa para el Caribe Sur, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia

Hay una serie de factores que están deteriorando el arrecife, entre ellos se encuentra el aumento de la temperatura superficial del mar. Estas presiones sobre el arrecife afectan la comunidad íctica, porque tiende a simplificarse perdiendo espacio las estructuras coralinas, lo cual implica menos refugios disponibles para la ictiofauna. Además, muchas especies ícticas tienden a migrar cuando hay un aumento significativo de la temperatura desplazándose a aguas más profundas conforme esta aumenta (Poloczanska et al. 2013). Biológicamente las especies pueden ser susceptibles a pequeños cambios en la temperatura, como ocurre con los corales que sufren blanqueamiento e incluso mortalidad, cuando hay aumento de temperatura de un grado centígrado sostenido durante una semana (Solano, Navas y Moreno-Forero 1993).

Con respecto a los sedimentos recolectados en el punto de muestreo de Playa Blanca a 6 m, las tasas y variaciones se vieron marcadas con el cambio del periodo lluvioso (de noviembre a febrero y de junio a agosto) a seco (de marzo a abril y de setiembre a octubre). Se registró en promedio una tasa de sedimentación (TSF) = 117.42 mg/cm²/día.

Como resultado, el año 2018 en el Caribe Sur fue “inusual”, según comentarios de los boteros (comunicación personal), y corroborado por IMN (2018-2019). Cahuita estuvo marcado por la presencia de sedimentos casi todo el tiempo, esto debido a las condiciones climatológicas que imperaron. Por lo que se refiere a las corrientes dentro del Parque

Nacional estas fluyen de noroeste a sureste y su rapidez depende de la magnitud con que sople el viento (Cortés y Risk 1984). Los sedimentos que afectan Cahuita provienen del río La Estrella, según fotografías satelitales (Cortés 1983). Este supuesto se basa en el siguiente análisis: 1) En las fotos de satélite se puede reconocer el sedimento que sale del río y se mueve hacia el arrecife y 2) La combinación geoquímica de los sedimentos es igual a los encontrados en el río La Estrella (Cortés 1981).

Debido a lo anterior, los sedimentos capturados por las trampas ubicadas en Playa Blanca, contenían restos de hojas, cortezas de troncos, una vez procesados eran finos de color negro, asemejando a aquellos de origen terrígeno y materia orgánica en descomposición, como mencionan Araya (2020). Esto corrobora investigaciones de Cortés (1981, 1983, 1994; Cortés y Jiménez 2003), que plantean que es material generado por la erosión del suelo y la infiltración de agroquímicos en los bordes del río la Estrella, y la forma de mazo de Punta Cahuita propicia la retención de sedimentos en la parte norte.

Esto ha traído como consecuencia, mayor cobertura del sustrato por macroalgas y una disminución de coral vivo como sucede en Punta Cahuita a 1m de profundidad. Esto indica que la sedimentación es la causa de la colonización del sustrato submarino por organismos de crecimiento rápido que se benefician de los nutrientes (Fonseca et al., 2006). No obstante, estas condiciones en la calidad del agua son aprovechadas por otras especies piscívoras. Por ejemplo, el sábalo *Megalops atlanticus* está mejor adaptado a condiciones de turbidez para poder detectar a sus presas (Huber y Rylander 1992). Y solo las especies territoriales se observaron en los periodos en que la transparencia era baja.

Aunque no era el objetivo de este estudio, se observó que los sedimentos están afectando diferentes especies de corales y otros organismos presentes en el sistema arrecifal. Lo que coincide con un estudio realizado en Australia por Hess et al. (2017) donde sugieren que los sedimentos en suspensión interfieren en la agudeza visual y olfativa en algunas especies de peces de arrecife, en el establecimiento de las larvas y las capturas de presas. Asimismo, los sedimentos en suspensión tienen importantes impactos sobre procesos fisiológicos, tales como la respiración (Heath, 1995). Varios estudios han demostrado, que los sedimentos y otros contaminantes pueden irritar y dañar los tejidos branquiales generando cambios a nivel estructural (Au et al. 2004; Cumming y Herbert 2016).

La sedimentación es un problema que se ha venido agravando a través del tiempo, y es necesario mantener un registro de los niveles que llegan y se depositan en el arrecife. Como se mencionó, el sedimento no solo afecta el desarrollo del coral sino también los peces residentes y no residentes, por lo que se plantea, como sugiere el World Bank (2016) involucrar instituciones gubernamentales, universidades, ONGs, comunidades locales y las compañías bananeras, con el fin de establecer estrategias para la disminución de los sedimentos producidos en la parte continental.

Se evidencia que la comunidad de peces ha cambiado en término de número de especies, así como la relación con la abundancia de cada una de las especies observadas, lo cual está relacionado con la presencia de sólidos suspendidos y la transparencia del agua. Estos dos factores pueden estar influenciados por el aumento del nivel del mar y la erosión costera. Adicionalmente, la presencia de especies de peces arrecifales ha cambiado temporalmente en la zona de estudio como consecuencia de las variaciones de la temperatura superficial del mar, mismo que ha evidenciado el panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC2013) como un factor asociado al cambio climático.

Conclusiones

La temperatura y la sedimentación que provoca la erosión costera y continental afectan la comunidad de peces del Parque Nacional Cahuita.

La comunidad de peces que habita el arrecife puede afectarse por los aportes de sedimentos que provocan pérdida de hábitat, asfixia por la remoción de sedimentos, disminución de la visibilidad y reducción de refugios.

Un aumento de sólidos en suspensión en la columna de agua provoca la migración de aquellas especies de peces que no se pueden adaptar a las nuevas condiciones.

La comunidad de peces ha cambiado en relación a la evaluada por Phillips y Pérez en 1984.

Las variaciones de la salinidad, temperatura y transparencia, son las principales responsables de los cambios de la comunidad íctica en el área de estudio.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación, al Programa de Maestría en Ciencias Marinas y Costeras, el Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre y a la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Costa Rica.

A Maikol Castillo Chinchilla y Marco Ramírez Vargas por sus valiosos aportes.

A los funcionarios del Área de Conservación Caribe, del Sistema Nacional de Áreas de Conservación, del Ministerio de Ambiente y Energía, a los miembros de la comunidad de Cahuita y a Manuel Mairena por su apoyo incondicional.

Referencias

- AGRRA (2012). Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment. Ocean Research & Education Foundation, Inc. Version 5.5
- Araya, A., Busutil, L., García, A., Pereira, J., y Castro, L. (2020). Evaluación de la estructura comunitaria de las esponjas marinas en parches arrecifales del Caribe sur, Costa Rica. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* • Vol. 49 (1) DOI: 1025268/bimc. invemar.2020.49.1.773
- Au, D., Pollino, C., Wu, R., Shin, P., Lau, S. y Tang, J. (2004). Chronic effects of suspended solids on gill structure, osmoregulation, growth, and triiodothyronine in juvenile green grouper *Epinephelus coioides*. *Mar. Ecol. Progress Series* 266, 255–264. (Doi:10.3354/ meps266255).
- Bellwood D., Hughes, T., Folke, C., y Nyström, M. (2004) Confronting the coral reef crisis.
- Boletín Meteorológico Mensual. (2018-2019). Instituto Meteorológico Nacional, San José, Costa Rica. [https:// www.imn.ac.cr/boletinmeteorologico](https://www.imn.ac.cr/boletinmeteorologico)
- Bussing, W., y López, M. (2010). Guía ilustrada de Peces Costeros del Caribe de Centroamérica Meridional. *Rev.Bio. Trop.*, Vol.58. (Supl.2).
- Chávez, J. (2009). Caracterización y estructura de la ictiofauna de arrecifes rocosos y coralinos en Punta Carrizal, Colima, México para fines de inventario y conservación de la diversidad animal. Universidad de Colima Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DJ020. México D. F.
- Choat, J., Bellwood, D.R. (1991) Reef fishes: their history and evolution. In: Sale PF (ed) *The ecology of fishes on coral reefs*. Academic Press, San Diego, pp 39–66 *Nature* 429:827–833
- Cortés, J. y Jiménez, C. (2003). Past present and future of the coral reefs of the Caribbean coast of Costa Rica. En J. Cortés (Ed.), *Latin American Coral Reefs*, (pp. 223 – 239). Ámsterdam, Países Bajos: Elsevier Science.

- Cortés, J. (1994). A reef under siltation stress: a decade of degradation. En R. N. Guinsburg (compilador), *Proceedings of the Colloquium on Global Aspects of Coral Reefs: Health, Hazards and History*, 1993 (pp. 240-246). Miami, Florida: RSMAS, Universidad de Miami
- Cortés, J. y Risk, M. (1984). El arrecife coralino del Parque Nacional Cahuita, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 32: 109-121.
- Cortés, J., Murillo, M. M., Guzmán, H. M y Acuña, J. (1984). Pérdida de zooxantelas y muerte de corales y otros organismos arrecifales en el Atlántico y Pacífico de Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 32: 227-231.
- Cortés, J y Risk M. (1983). El arrecife coralino del Parque Nacional Cahuita. *Rev. Biol. Trop.* 32(1):109-121
- Cortés, J. (1981). *The Coral Reef at Cahuita, Costa Rica: A Reel Under Stress*. Tesis de Maestría: McMaster University, Hamilton, Canada. 176 p.
- Cumming, H. y Herbert, N. (2016). Gill structural change in response to turbidity has no effect on the oxygen uptake of a juvenile sparid fish. *Conserv. Physiol.* 4, cow033. (Doi:10.1093/conphys/cow033)
- Dulvy, N., Freckleton, R., Polunin, N. (2004) Coral reef cascades and the indirect effects of predator removal by exploitation. *Ecol Lett* 7:410–416
- Fonseca, E., Salas, E. y Cortés, J. (2006). Monitoreo del arrecife coralino Meager Shoal, Parque Nacional Cahuita (sitio CARICOMP). *Rev. Biol. Trop.* 54: 755-763.
- Garzón, J., Reyes, M. y Rodríguez, A. (2002). *Manual de métodos del Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia*. Santa Marta, Colombia: INVEMAR.
- Heath AG. (1995). *Water pollution and fish physiology*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Hettler, W.F. (1992) Correlation of winter temperature and landings of pink shrimp *Penaeus duorarum* in North Carolina. *Fish Bull.* 1992; 90:405–406

- Hess, S., Prescott, L., Hoey, A., McMahon, S., Wenger, A. y Rummer, J. (2017). Species specific impacts of suspended sediments on gill structure and function in coral reef fishes. *Proc R Soc B* 284. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1279>
- Huber, R. y Rylander, M. (1992). Quantitative histological study of the optic-nerve in species of minnows (Cyprinidae, Teleostei) inhabiting clear and turbid water. *Brain Behavior and Evolution*. 40(5): 250-255
- Humann, P., y DeLoach, N. (2014). Reef fish identification: Florida, Caribbean, Bahamas. New World Publications, Inc. Jacksonville, Florida, USA. Fourth Edition.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Ishimatsu, A., Kikkawa, T., Hayashi, M. et al. (2004). Effects of CO₂ on Marine Fish: Larvae and Adults. *Journal of Oceanography* 60, 731-741. <https://doi.org/10.1007/s10872-004-5765-y>
- Jiménez, C.E. (2001b). Bleaching and mortality of reef organisms during a warming event in 1995 at the Caribbean coast of Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 49: 233-238.
- Jones, G., McCormick, M., Srinivasan, M., Eagle, J.V. (2004) Coral decline threatens fish biodiversity in marine reserves. *Proc Natl Acad Sci USA* 101:8251–8253
- Jones, G., Syms, C. (1998) Disturbance, habitat structure and the ecology of fishes on coral reefs. *Aust J Ecol* 23:287–297
- Kingsford, M., Hughes, J.M. (2005) Patterns of growth, mortality, and size of the tropical damselfish *Acanthochromis polyacanthus* across the continental shelf of the Great Barrier Reef. *Fish Bull* (Wash DC) 103:561–5

- Kleisner, K, Fogarty, M., McGee, S., Barnett, A., Fratantoni, P., Greene, J., et al. (2016) The effects of sub-regional climate velocity on the distribution and spatial extent of marine species assemblages. *PLoS ONE*. 2016; 1–21.
- Lizano, O. G. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *Intersedes*, 14 (27): 6-27.
- López, H. A. (2021). Estructura y estado de conservación de la comunidad de peces en la zona arrecifal del Parque Nacional Cahuita, Costa Rica para el planeamiento de acciones de manejo. Tesis de maestría, Universidad Nacional, Heredia. Costa Rica.
- Martella, M., Trumper, E., Bellis, L., Renison, D., Giordano, P., Bazzano, G. y Gleisser, R. (2012). Manual de ecología. Evaluación de la biodiversidad. *Reduca (Biología) Ser. Ecol.* 5(1): 71-115.
- McClanahan, T R (2000) Recovery of a coral reef keystone predator, *Balistapus undulatus*, in East African marine parks. *Biol Conserv* 94:191–198. *The Healthy Reefs*. (2018). Report Card for the Mesoamerican Reef. <http://www.healthyreefs.org>
- Meng, K., Oremus, K., Gaines, S. (2016) New England cod collapse and the climate. *PloS ONE*. 2016; 11:1–10.
- Miller, G., 2007, *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral*, 8va edición, Editores Internacional Thomson, México.
- Mills, K., Pershing, A., Brown, C., Chen, Y., Chiang, F-S, Holland, D.S, et al. (2013). Fisheries management in a changing climate: Lessons from the 2012 ocean heat wave in the northeast Atlantic. *Oceanog.* 2013; 26(2):191–195.
- Moberg, F. y Rönnback, P. (2003). Ecosystem services of the tropical seascape: interactions, substitutions and restoration. *Ocean and Coastal Management.* 46:27-46.
- Moreno, C. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. M y T Manuales y Tesis SEA, vol. 1. Zaragoza, España. 84 p.

- Morlans, M. (2004). *Introducción a la ecología de poblaciones*. Editorial científica universitaria, Universidad Nacional de Catamarca. ISSN 1852-3013
- Morley, J., Batt, R., Pinsky, M. (2017) Marine assemblages respond rapidly to winter climate variability. *Glob Chan Bio*. 2017; 23:2590–2601
- Mumby, P., Edwards, A., Arias, J., Lindeman, K. y Blackwell, H. (2004). Mangrove enhance the biomass of coral reef fish communities. *In the Caribbean Nature*. 427:533-536.
- Ohsumi, T. (2004), What is the ocean sequestration of carbon dioxide? *J. Oceanogr.*, 60, 693–694.
- Oliver, J., Berkelmans, R., y Eakin, C. M (2018). Coral bleaching in space and time. In M. van Oppen & J. Lough (Eds.), *Coral Bleaching* (pp. 21–39). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-69775-6_3
- Pauly D, Christensen V, Guenette, S., Pitcher, T.J, Rashid Sumaila, U., Walters, C.J, Watson R, Zeller, D. (2002) Towards sustainability in world fisheries. *Nature* 418:689–695
- Pratchett, M., Wilson, S., Graham, N., Munday, P., Jones, G & Polunin, N.V. (2008 a) Effects of coral bleaching on motile reef organisms: current knowledge and the long-term prognosis. In: Lough J, van Oppen M (eds) *Coral bleaching: patterns, processes, causes and consequences*. Springer, Dordrecht
- Pratchett, M.S., Munday, P.L., Wilson, S.K., Graham, N., Cinner, J., Bellwood, D.R., Jones, G.P, Polunin, N.V., & McClanahan, T.R. (2008). Effects of climate-induced coral bleaching on coral-reef fishes - ecological and economic consequences. *Oceanography and Marine Biology*, 46, 251-296.
- Phillips, P. y Pérez, M. (1984). A comparative survey of reef fishes in Caribbean and Pacific of Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 32:95-102
- Pinsky, M., Worm, B, Fogarty, M., Sarmiento, J., Levin, S. (2013) Marine taxa track local climate velocities. *Science*; 341:1239–1242. pmid:24031017

- Poloczanska, E., Brown, C., Sydeman, W., Kiessling, W., Schoeman, D., Moore, P.J, et al. (2013) Global imprint of climate change on marine life. *Nat Clim Chang.*; 3:919–925.
- Robertson, D., Peña, E., Posada, J. y Claro, R. (2019). Peces costeros del Gran Caribe: sistema de información en línea. Versión 2. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Balboa, República de Panamá.
<https://biogeodb.stri.si.edu/caribbean/es/thefishes/species/2744>
- Romero, P., Smith, J., Davidson, D., Diffenbaugh, N., Kinney, P., Kirshen, P., y Ruiz, L. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability—Contributions of the Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1439–1498.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415386006>
- Sims, D., Genner, M., Southward, A., Hawkins, S.J. (2001) Timing of squid migration reflects north Atlantic climate variability. *Proc Roy Soc Lon B.* 2001; 268:2607–2611.
- Solano, O., Navas, G., y Moreno-Forero, S. (1993). BLANQUEAMIENTO CORALINO DE
1990 EN EL PARQUE NACIONAL NATURAL CORALES DEL ROSARIO
(CARIBE, COLOMBIANO). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR*, 22(1), 97- 111. Retrieved November 27, 2021, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-97611993000100008&lng=en&tlng=es
- Suchley, A., McField, M. y Alvarez, L. (2016). Rapidly increasing macroalgal cover not related to herbivorous fishes on Mesoamerican reefs. *PeerJ* 4: e2084; DOI 10.7717/peerj.2084
- Sunday, J., Bates, A., y Duty, N. (2012) Thermal tolerance and the global redistribution of animals. *Nature Climate Change* 2:686-690 DOI:[10.1038/nclimate1539](https://doi.org/10.1038/nclimate1539)

- Williams, D.M. (1986) Temporal variation in the structure of reef slope fish communities (Central Great Barrier Reef): short term effects of *Acanthaster planci* infestations. *Mar Ecol Prog Ser* 28:157– 164
- Wilson, S., Graham, N., Pratchett, M., Jones, G., Polunin, N. (2006) Multiple disturbances and the global degradation of coral reefs: are reef fishes at risk or resilient? *Global Change Biol* 12:2220–2234
- World Bank. (2016). *Managing coasts with natural solutions: Guidelines for measuring and valuing the coastal protection services of mangroves and coral reefs*. M. W. Beck and G-M. Lange, editors. *Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services Partnership (WAVES)*, World Bank, Washington, DC.



Cobertura de pastos marinos asociado a factores ambientales, Parque Nacional Cahuita, Costa Rica

Seagrass cover associated to environmental factors, Cahuita National Park, Costa Rica

Lilliana María Álvarez-Sánchez

Licenciada, Bióloga Marina
Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional, Costa Rica
a_lilliana@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5941-0675>

Costa Rica

Beatriz Martínez-Daranas

Doctorado, Ciencias Biológicas
Centro de Investigaciones Marinas, Universidad de la Habana, Cuba

beatriz@cim.uh.cu

<https://orcid.org/0000-0002-2703-4097>

Cuba

Lilliana María Piedra-Castro

Doctorado. Bióloga Marina
Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre, Escuela de Ciencias Biológicas,
Universidad Nacional, Costa Rica

lilliana.piedra.castro@una.cr

<https://orcid.org/0000-0003-4878-1531>

Costa Rica

Resumen

Los pastos marinos ofrecen diversos servicios ecosistémicos como la estabilización del sustrato, mejorando la calidad del agua. El objetivo de esta investigación fue analizar el estado de la pradera de pastos marinos del Parque Nacional Cahuita en relación con las variables físico química y las condiciones atmosféricas en dos periodos de tiempo. Se escogieron tres sitios con tres transectos a diferentes profundidades separados por 25 metros. En cada uno, se muestrearon 11 parcelas, separadas entre ellas por 5 m. Se utilizaron



marcos de 50 x 50 cm para medir la cobertura. Las variables ambientales fueron suministradas por el IMN. Con el programa Statistica versión 14, se realizaron las pruebas de normalidad, análisis no paramétricos de Kruskal-Wallis y Mann-Whitney para determinar la diferencia entre la cobertura de los sitios muestreados y fechas de muestreo. Con Arc Map 10.8, se realizó un mapa con gráficos circulares para obtener la cobertura. La salinidad presentó diferencias significativas en los tres sitios. La temperatura presentó diferencias significativas entre los dos periodos y entre los sitios. *T. testudinum* fue la especie dominante y presentó los valores más altos en Punta Vargas y Punta Cahuita. Los pastos marinos han cambiado temporalmente en cuanto a la cobertura por especie, probablemente en respuesta a las variaciones entre los tres diferentes sitios en que se realizaron los muestreos. Se recomienda realizar estudios de nitratos y fosfatos para conocer la afectación en este ecosistema.

Palabras clave: fanerógamas marinas; Caribe Sur; temperatura; salinidad

Abstract

Seagrasses offer various ecosystem services such as substrate stabilization, improving water quality. The objective of this research was to analyze the state of the seagrass meadow of the Cahuita National Park in relation to the physicochemical variables and the atmospheric conditions in two time periods. Three sites were chosen with three transects at different depths separated by 25 meters. In each one, 11 plots were sampled, separated by 5 m. 50 x 50 cm frames were used to measure coverage. The environmental variables were supplied by the IMN. Using Statistica version 14, normality tests and Kruskal-Wallis and Mann-Whitney non-parametric analyses were performed to determine the difference between the coverage of the sampled sites and sampling dates. Using Arc Map 10.8, a map with pie charts was made to obtain coverage. Salinity presented significant differences in the three sites. Significant temperature differences between the two periods and between the sites. *T. testudinum* was the dominant species and presented the highest values in Punta Vargas and Punta Cahuita. Seagrass meadows have temporarily changed in terms of species coverage, probably in response to variations between the three different sampling sites. Nitrate and phosphate studies should be carried out to know the impact on this ecosystem.

Key words: marine phanerogams; Caribe Sur; temperature; salinity

Introducción

Los pastos o fanerógamas marinas son plantas angiospermas que fueron evolucionando para sobrevivir sumergidas en agua salobre o marina en las costas de casi todo el mundo, con excepción del Ártico, Antártico y las costas del Pacífico Suramericano (Gómez et al., 2014).

Este hábitat ofrece diversos servicios ecosistémicos como la estabilización del sustrato, impidiendo que los sedimentos se resuspendan, mejorando así la calidad del agua y actuando como sitios de refugio para las etapas juveniles de especies de peces, moluscos y crustáceos, entre otros, que son de interés en las pesquerías. Así mismo, sirven para el avistamiento de especies animales y fijan carbono que ayuda a mitigar el cambio climático (Hemminga y Duarte, 2000).

Asociado a la comunidad de pastos marinos se pueden encontrar diversos grupos taxonómicos que lo integran, como fitoplancton, zooplancton, invertebrados, vertebrados y numerosas algas que pueden permanecer en las hojas de los pastos o compitiendo por espacio, luz o nutrientes (Lara, 2005; Cortés y Wehrtmann, 2009).

Por lo anterior, las áreas silvestres protegidas ofrecen un espacio donde proteger estos ecosistemas de las presiones antropogénicas y permitirles alcanzar la resiliencia ante los efectos del cambio climático. El objetivo de esta investigación fue analizar el estado de la pradera de pastos marinos del Parque Nacional Cahuita en relación con las variables físico-químicas y las condiciones atmosféricas en dos periodos de tiempo.

Metodología

Área de estudio

El Parque Nacional Cahuita (PNC) se ubica en la costa caribeña, provincia de Limón, Talamanca, Cahuita. Se estableció como área protegida por Decreto Ejecutivo (N°1236-A) con la categoría de Monumento Nacional en 1970, posteriormente, en 1978 se modificó la categoría a Parque Nacional, formando parte del Área de Conservación La Amistad Caribe (ACLAC). La extensión es de 1067.9 ha en la parte terrestre y 22400 ha en la parte marina (Sistema Nacional de Áreas de Conservación [SINAC], 2015).

La zona presenta dos estaciones, la seca y la lluviosa, sin embargo, la primera no es bien marcada, pero se presentan dos picos de precipitación, en junio y diciembre, donde pueden presentarse inundaciones. La temperatura promedio es de 27 °C, la precipitación anual es de 4700-5500 mm y la humedad relativa media es de 92% (Bermúdez, Rojas y García, 2009).

Las mareas son mixtas y están asociadas a las fases de la luna, cerca del cuarto de esta, muestran un pequeño cambio en la marea al subir y bajar. En ocasiones, pueden presentarse mareas semidiurnas, con luna llena y nueva, con predominio de las mareas diurnas que oscilan entre 30 a 50 m (Lizano, 2006).

Métodos

Se realizaron dos muestreos, el primero en septiembre 2020 y el segundo en abril 2021. Se determinó la cobertura de los pastos marinos y las especies de algas asociadas a estos.

Además, se midieron parámetros físico químicos: salinidad, temperatura y oxígeno disuelto con el multiparámetros HANNA HI 98194. Los datos se tomaron a tres distancias, desde la línea de la costa hacia el mar: somera (0 m), media (25 m) y profunda (50 m).

Se seleccionaron tres sitios del PNC: Sitio 1: Punta Vargas (09°47,732 N; 082°48,588 E), Sitio 3: Punta Cahuita (9°44,945 N; 082° 48,837 E) y Sitio 2: Sector intermedio entre ambos lugares (9°44,838 N; 082° 48,721 E), siendo que la pradera de fanerógamas se extendía alrededor de 1 km. Entre cada punto se establece una separación de 250 m para evitar las pseudoréplicas.

En cada sitio, se muestrearon tres transectos en las zonas: somero, medio y profundo separados por 25 m. En cada uno, se muestrearon 11 parcelas separadas entre ellas por 5 m. Se utilizaron marcos de 50 cm x 50 cm, dividido por subcuadrículas para evaluar la cobertura de pastos marinos y algas (McKenzie, Campbell y Roder, 2003). Los muestreos se realizaron mediante buceo por apnea debido a que la profundidad oscilaba entre 0.2 m y 1 m en los transectos.

Se realizaron videotransectos con una cámara sumergible modelo Go-Pro Hero 4 Silver. El porcentaje de cobertura de las diferentes especies de algas y de pastos marinos se estimó en una escala del 0-100% según las guías fotográficas de McKenzie (2003), contando en los cuadrantes cada subcuadrícula para cada especie de flora observada.

Las algas se colectaron y se etiquetaron con el número de la parcela y el sitio de muestreo. Posteriormente fueron trasladadas en una hielera con bolsas frías al Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre (LARNAVISI) de la Universidad Nacional, Costa Rica, donde se identificaron mediante cortes y con la ayuda de literatura especializada.

Las variables ambientales precipitación (mm) y temperatura (°C) fueron suministradas por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de la estación automática situada en Puerto Vargas. Se obtuvieron datos diarios de los meses julio, agosto y septiembre 2020 y febrero, marzo y abril 2021. Se promediaron mensualmente, excepto la precipitación, la cual se estimó su total acumulado mensual.

Se utilizó el programa Statistica versión 14 (TIBCO, 2020) para realizar las pruebas de normalidad, análisis no paramétricos de Kruskal-Wallis y comparaciones múltiples entre la cobertura de los sitios muestreados. Se realizaron pruebas de Mann-Whitney y boxplot para

conocer las relaciones entre la cobertura y los periodos, así como gráficos de medias para la salinidad y la temperatura.

Con Arc Map 10.8 se realizó un mapa con gráficos circulares, empleando las coordenadas de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés), tomados en el campo para todas las parcelas y el porcentaje de cobertura de las algas y los pastos. Los gráficos del promedio de salinidad y temperatura se realizaron con el complemento XRealStats para Excel 2016.

Resultado y discusión

Se encontraron dos especies de pastos marinos, *Syringodium filiforme* Kützing y *Thalassia testudinum* K.D. Koeing. La segunda se registró en todos los sitios y en los dos periodos muestreados, mientras que la primera especie se encontró en ambos periodos, pero no en todos los transectos. También se hallaron, en septiembre 2020, 14 géneros de algas y, en abril 2021, 13 géneros de las divisiones Chlorophyta, Rhodophyta y Ochrophyta, siendo las dos primeras las que mostraron mayor frecuencia.

En ambos periodos, se encontraron *T. testudinum* y *S. filiforme* que fueron reportadas por otros autores como Fonseca, Nielsen y Cortés (2006), Nielsen y Cortés (2008), Cortés y Wehrtmann (2009) y Samper, van Tussenbroek y Cortés (2018), coexistiendo y formando una pradera mixta en el Sitio 1 Punta Vargas y en el Sitio 2 Sector intermedio. En el caso del sitio 3 Punta Cahuita se forma una pradera monoespecífica de *T. testudinum*.

La salinidad promedio en septiembre 2020, para los tres sitios muestreados, fue de 35.27 PSU, mientras que, en abril 2021, fue de 37.71 PSU (**Figura 1**). Por otra parte, los valores individuales en cada sitio, fueron diferentes significativamente ($H=27.96$; $p<0.00$) entre los tres sitios, con el mayor valor en el sitio 2.

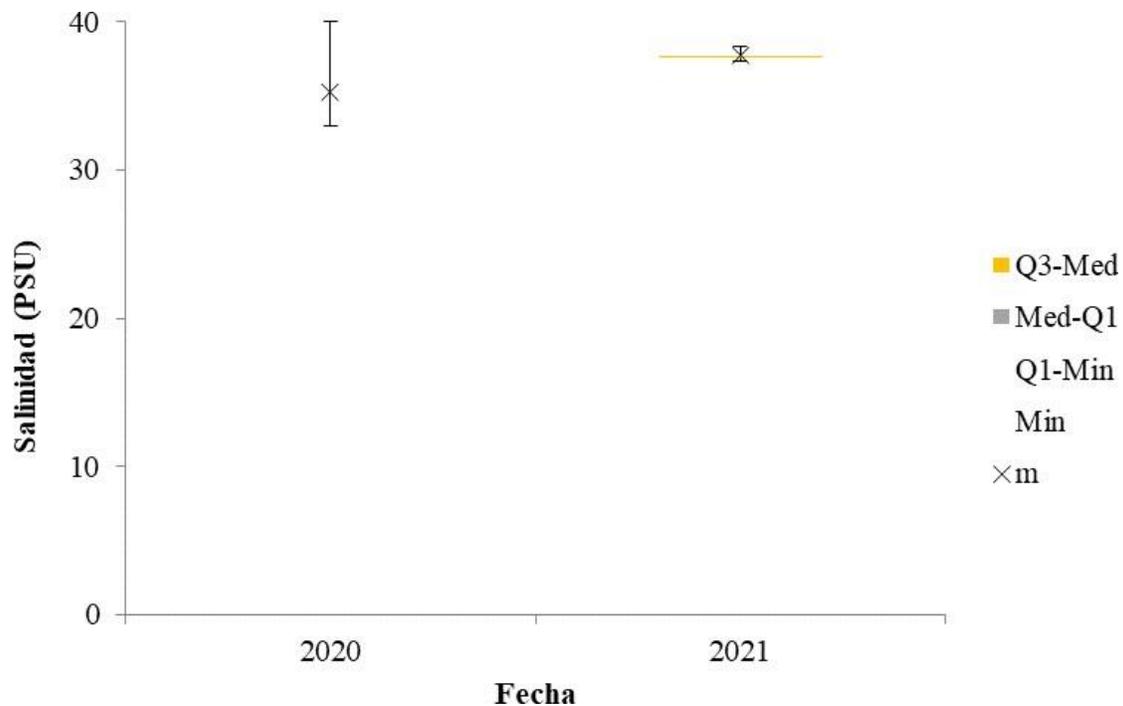


Figura 1. Salinidad promedio (PSU) en dos diferentes años en el PNC, Limón, Costa Rica.
Fuente: Elaboración propia

Para el correcto crecimiento de los brotes de las fanerógamas marinas se deben presentar ciertas condiciones ambientales, tales como la penetración de luz, temperatura, salinidad, disponibilidad de oxígeno, disposición de nutrientes, precipitación e hidrodinámica. La disponibilidad de estas condiciones influye en la distribución, la biomasa, la tasa de crecimiento y la distribución espacio temporal (van Tussenbroek et al., 2014).

Las fluctuaciones más significativas en la salinidad pueden ocurrir por las sequías o la concentración en las precipitaciones, (Pachauri y Meyer 2014) asociadas al cambio climático o al escaso intercambio entre los ríos o las lagunas cercanas al mar. El represamiento de los ríos cercanos o la construcción de viaductos influyen directamente sobre el lecho marino limitando el intercambio del agua dulce con el mar, tal es el caso de la bahía de Perros en Cuba, donde los valores de la salinidad rondaban los 80 a 85 UPS, lo que provocó la desaparición casi por completo de pastos marinos y las algas. Para atenuar este impacto, realizaron obras de mitigación propiciando la reaparición de estos parches, lo que contribuyó al reinicio de la pesca a menor escala (Martínez et al., 2007).

Contrariamente, la descarga de agua dulce tiene efectos negativos, debido a que ocurre la dilución en la concentración de la salinidad, causando estrés osmótico (Björk, McLeod y Beer, 2008). En algunos estudios, se ha observado que *Thalassia hemprichii* presentó una disminución en el crecimiento de las hojas y la reducción en el número de brotes. Por su parte, en *T. testudinum* ocurren mortalidades por estos cambios (Jiang, Huang y Zhang, 2013), pero puede adaptarse a sobrevivir en salinidades hasta de 3.58 PSU. Estas adaptaciones son el mayor número y grosor de hojas, raíces y rizomas desarrollados y carnosos (Arellano, 2004). En este estudio, se observó diferencia en la salinidad, lo cual pudo determinar el cambio en la cobertura entre los años muestreados.

Al ser la salinidad importante para la cobertura, también el aporte de agua dulce subterránea o por escorrentía superficial se encuentra relacionado con el mayor desarrollo de biomasa, densidad e índice de área foliar. Por tanto, las precipitaciones y el aporte de nutrientes ofrecen las condiciones propicias para el desarrollo de los pastos marinos (Arellano, 2011).

En este estudio, la salinidad aumentó durante el muestreo del 2021, mientras que la temperatura disminuyó, lo cual coincidió con las descargas de agua dulce provenientes de las precipitaciones y el aporte de los ríos cercanos. Sin embargo, la cobertura disminuyó respecto al muestreo del 2020, con el predominio de *T. testudinum*. El cambio en la cobertura podría deberse al estrés osmótico sufrido por el cambio de salinidad (2.44 PSU), aunado al de la temperatura (1.9 °C) en un periodo de seis meses.

En otros estudios se ha evidenciado que *S. filiforme* es una especie sensible a los cambios de salinidad, por lo que un cambio fluctuante puede hacer la diferencia en la densidad de los brotes y la biomasa aérea de un periodo a otro (Buzzelli et al., 2012).

Por otra parte, en septiembre, el promedio de la temperatura del agua fue de 31.15 °C y en abril de 29.32 °C, mostrando una diferencia significativa entre periodos ($H=40.51$; $p<0.00$) y entre sitios, donde los valores más altos se encontraron en el sitio 1 (**Figura 2**).

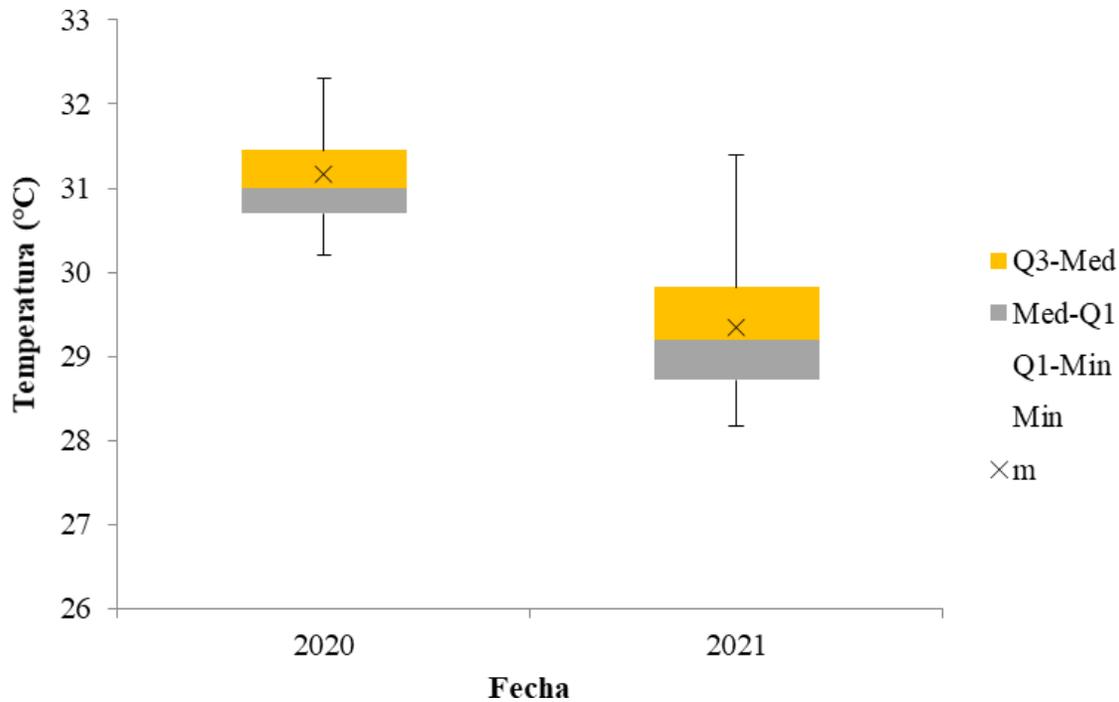


Figura 2. Promedio de temperatura (°C) en dos diferentes periodos en el PNC, Limón, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, la temperatura es otro de los factores determinantes para estas especies que tienen rangos de temperatura donde se desarrollan mejor. De acuerdo con Barber y Behrens (1985), *T. testudinum* tuvo un mayor crecimiento de sus hojas entre los 23-31 °C, en tanto que para *S. filiforme* los valores óptimos fueron entre 23-29 °C. Según estudios anteriores, la especie *T. testudinum*, al llegar a 35 °C disminuye el crecimiento de las hojas debido a que se da un aumento de la frecuencia respiratoria y disminuye el proceso de la fotosíntesis (Phillips, 1960).

Para este estudio, los valores en septiembre estuvieron dentro del promedio para *T. testudinum* y coincide con el crecimiento de sus hojas y una mayor cobertura. Con *S. filiforme* se encontraron hojas con mayor crecimiento. Para abril, los valores promedios reportados para ambas especies son menores aunado a la disminución en la cobertura y el crecimiento de las hojas, coincidiendo con lo reportado en la literatura. El crecimiento de los pastos marinos presenta estacionalidad, notándose mayormente estas diferencias en sitios con estacionalidad bien definida, además de que las especies de zonas templadas presentan patrones diferentes a las especies presentes en los trópicos (Kenworthy, Zieman y Thayer,

1982), por ejemplo, ocurre la inhibición en el crecimiento cuando hay altas temperaturas o la reducción en la respiración con relación a la fotosíntesis (Marsh, Denisson y Alberte, 1986).

Existe una alta variabilidad, ya que, por una parte se encuentran los pastos marinos de áreas templadas, como *Zostera marina*, la cual se encuentra adaptada a temperaturas extremas, ya que en invierno sobrevive a bajas temperaturas y en verano soporta altas temperaturas que oscilan entre los 11.5 y 26 °C, aunque fuera de ese rango de temperatura los brotes no son capaces de realizar correctamente las funciones biológicas. Por otra parte, se encuentran las especies tropicales, que está adaptadas a temperaturas más altas, con valores que oscilan entre los 23 a 32 °C. Es por esta plasticidad y resiliencia a cambios de temperatura del agua que este ecosistema de pastos marinos puede distribuirse a nivel mundial (Lee, Park y Kim, 2007) y podría contribuir con la capacidad de enfrentar al cambio climático.

La temperatura atmosférica promedio varió entre los años 2020 y 2021. Septiembre mostró valores altos y febrero bajos. El promedio acumulado de precipitación mostró el valor más bajo en septiembre (14.8 mm) y el más alto en marzo (129.2 mm), mientras que la radiación global presentó valores similares para los dos periodos (**Tabla 1**).

La abundancia de *T. testudinum* se evaluó en el 2008 en el PNC, mostrando correlación con la temperatura mínima del agua, debido a que el aumento de la temperatura puede provocar estrés térmico en las hojas. También, estuvo inversamente correlacionado con la radiación solar, la temperatura atmosférica, la precipitación y las mareas (Nielsen y Cortés, 2008). Los valores de temperatura del agua fueron mayores respecto al presente estudio, pero la salinidad fue menor. En septiembre se obtuvo una mayor cobertura y apareció con más frecuencia *S. filiforme* respecto a abril cuando se encontró poco esta especie. Esto puede explicarse por los cambios en las condiciones ambientales y climáticas, ocurriendo mayor precipitación, salinidad y humedad, junto al descenso en la temperatura del agua y la atmósfera. Como consecuencia, se redujo la aparición de esa especie y el porcentaje de cobertura de pastos y algas.

Tabla 1. Promedio de la temperatura del aire, humedad, radiación global y acumulado de la precipitación mensual en Puerto Vargas, PNC, Limón, 2020-2021

Meses	Temperatura ° C	Precipitación (mm)	Humedad (%)	Radiación Global (MJ/m ²)
Julio 2020	25.71±0.74	14.8±16.18	85.74±5.14	18.36±6.33
Agosto 2020	25.8±0.94	9.4±6.65	84.29±3.1	17.63±7.23
Septiembre 2020	26.01±0.83	0.6±6.28	82.63±2.48	20.89±5.02
Febrero 2021	22.0±7.34	6±17.72	84.82±3.81	19.11±5.41
Marzo 2021	24.01±0.79	129.2±39.44	85.32±3.71	19.68±6.60
Abril 2021	24.86±0.89	3±34.88	87.8±4.47	17.11±7.29

Fuente: Elaboración propia

La radiación es otro factor que influye en el crecimiento de los pastos; además actúa de forma sinérgica con la temperatura y la interacción de ambos factores es la que determina el crecimiento de estos (Wetzel y Penhale, 1983). Esto se debe a que el aumento de la temperatura hasta los límites de tolerancia de las especies, la reducción de la capacidad fotosintética de las hojas y la duración del aumento en la temperatura puede ocasionar daño en el aparato fotosintético, específicamente en el cloroplasto y llevar a la muerte de la hoja. Sin embargo, no se tiene información de los efectos en la capacidad fotosintética cuando disminuye la temperatura en pastos marinos, aunque se conocen cuatro especies que pueden resistirlos *T. testudinum*, *S. filiforme*, *Z. marina* y *Halodule wrightii* (Bulthuis, 1987).

Dennison et al. (1993) reportaron que *S. filiforme* requiere un mínimo de luz del 19.2% y *T. testudinum* 24.4% para su crecimiento óptimo, debido a que logran realizar con mayor eficiencia el proceso de la fotosíntesis, existiendo una sinergia entre el aumento de la temperatura del agua y la radiación solar.

Dennison (1987), Masini y Manning (1997), Ruiz y Romero (2003), demostraron que los pastos marinos presentan requerimientos de luz dependiendo de donde habiten. Tal es el caso de especies que habitan en aguas profundas, ya que cerca de sus límites de profundidad

tienen menores requerimientos de luz para realizar el proceso fotosintético, a diferencia de aquellas encontradas en aguas someras.

En el 2020, *T. testudinum* presentó la mayor cobertura en el Sitio 3 Punta Cahuita ($40.69\% \pm 12.83$) y en el Sitio 1 Punta Vargas ($40.06\% \pm 26.73$), mientras que, en el Sitio 2 Sector intermedio no se observó dominancia de esta especie en los transectos, excepto en el somero ($25.0\% \pm 30.33$). Por otra parte, el transecto medio mostró valores más altos para *S. filiforme* ($25.9\% \pm 15.47$) y en el profundo las algas mostraron el mayor valor de cobertura ($18.36\% \pm 17.23$) (**Figura 3A**).

Para el año 2021, *T. testudinum* tuvo los mayores valores de cobertura en el Sitio 1 Punta Vargas ($30.66\% \pm 16.70$) y en el Sitio 3 Punta Cahuita ($36.0\% \pm 17.35$), así como en los transectos somero ($21.54\% \pm 26.02$) y medio ($20.45\% \pm 21.82$) del Sitio 2 Sector intermedio, en tanto que en el transecto profundo ($14.81\% \pm 22.25$) los valores más altos lo presentaron las algas (**Figura 3B**).

Se observaron diferencias significativas entre la cobertura de *T. testudinum* ($F=16.812$; $p<0.000$) y *S. filiforme* ($F=21.226$; $p<0.000$) para los tres sitios muestreados. Sin embargo, para la cobertura de algas no se obtuvieron diferencias significativas ($F=1.226$; $p>0.295$). Asimismo, *T. testudinum* fue el que tuvo el valor más alto en el sitio de Punta Cahuita; en el sitio medio la mayor cobertura la presentó *S. filiforme*. Por lo contrario, las algas no presentaron diferencia significativa entre los tres sitios ($p>0.05$).

La cobertura de *T. testudinum* ($p=0.214$), *S. filiforme* ($p=0.140$) y las algas ($p=0.08$), fue similar entre los periodos muestreados.

Las praderas de pastos marinos contribuyen con la mitigación de los procesos erosivos en la playa producidos por los oleajes generados por eventos hidrometeorológicos. Las altas densidades y/o coberturas contribuyen a que los niveles del transporte transversal de arena sean bajos y se retengan en la orilla (Rodríguez, Córdoba, Franco y Rueda, 2009). Por el contrario, el aumento en el nivel del mar, el aumento en la temperatura del aire y el derretimiento de los casquetes polares intensifican la erosión de las playas, por lo que el perfil de playa intenta adaptarse a los cambios buscando un equilibrio. Esta ruptura del equilibrio requiere una cantidad extra de sedimentos que no vienen de áreas profundas, por lo que los extrae de las playas (Bruun, 1988).

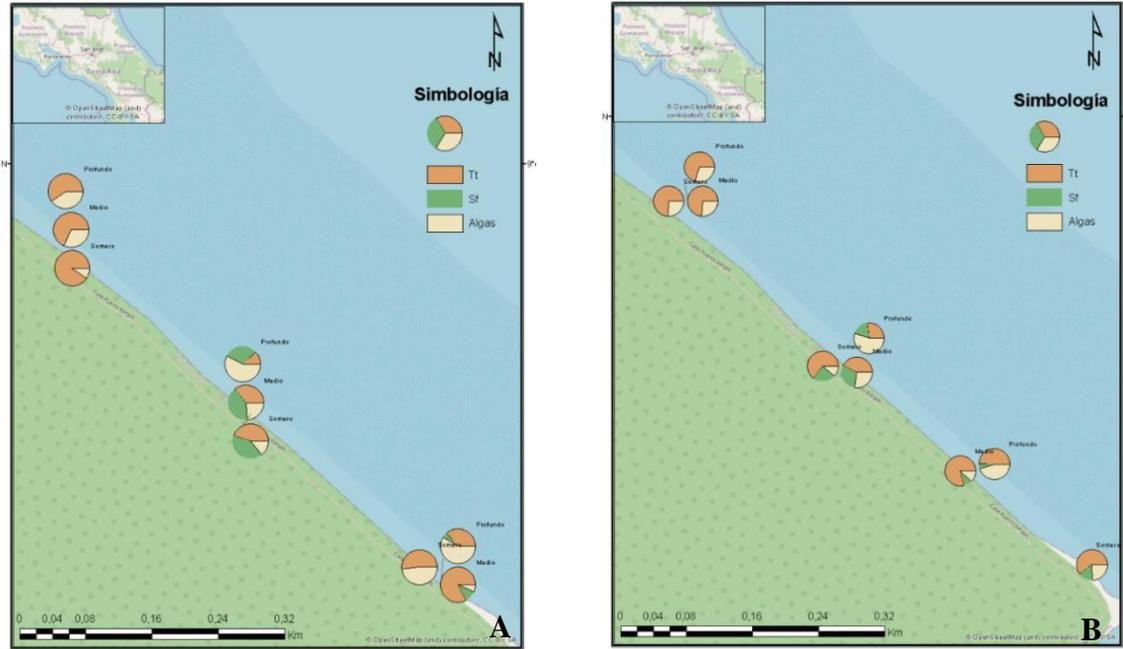


Figura 3. Promedios de los porcentajes de cobertura de las especies de *T. testudinum*, *S. filiforme* y las algas asociadas a la pradera de pastos marinos, PNC, Limón, Costa Rica. A: 2020. B: 2021. Fuente: Elaboración propia

El sustrato presentó cambio según el sitio y las profundidades. En el Sitio 1 Punta Vargas, el transecto somero mostró mayor cantidad de arena fina y conchas; en el transecto medio: arena gruesa, conchas y pequeñas piedras y en el transecto profundo: arena gruesa, conchas, piedra y escombros de coral. En el Sitio 2 Sector intermedio, en el transecto somero se encontró arena fina, piedras y escombros de coral; en el transecto medio y profundo: arena gruesa, conchas, piedra y escombros de coral. Por último, en el Sitio 3 Punta Cahuita, en el transecto somero y medio se encontró arena gruesa, conchas, piedra y escombros de coral y en el transecto profundo: arena fina, escombros de coral y conchas.

S. filiforme domina las praderas que han sufrido perturbaciones naturales o antrópicas, debido a que es pionera u oportunista, ya que tolera condiciones de sedimento menos favorable para otras especies. Esta condición puede estar presentándose en el Sitio 3 Punta Cahuita. Por el contrario, *T. testudinum* se instala en sucesiones tardías, pero ambas especies pueden coexistir en praderas en estado clímax (Bricker, Waycott, Calladine y Zieman, 2011),

por lo que esta condición puede presentarse en el Sitio 1 Punta Vargas y en el Sitio 2 Sector intermedio.

Adicionalmente, esta planta crece en áreas poco profundas, debido a que las especies con rizomas pequeños tienden a estar en mayores profundidades porque su demanda respiratoria es menor, comparada con especies que tienen rizomas grandes. Asimismo, los rizomas pequeños, limitados por mayores profundidades, están relacionados con la reducción de la densidad de los brotes de los pastos marinos (Duarte, 1991).

Por otra parte, *S. filiforme* es un importante productor primario y con tasas de renovación dos veces mayor que *T. testudinum*, por lo que puede dispersarse con mayor rapidez, sin embargo, presenta altas tasas de mortalidad ya que requiere más nutrientes, pero no posee un sistema para almacenarlos y reciclarlos (Gallegos et al. 1994). Concordando con lo que se observó en este estudio, al presentarse condiciones menos favorables durante abril 2021, la cobertura fue menor que en septiembre 2021, debido a la mayor turbidez en el agua y menor penetración de luz, por ende, también fue menor la tasa fotosintética. Estas condiciones limitan la fijación de CO₂, lo que contribuiría a mitigar el cambio climático.

En el mes de abril del 2021 hubo turbidez y se evidenció con la marea alta la baja visibilidad (0.15 m), condición que cambió al bajar la marea, ya que se apreciaba el fondo marino. Caso contrario, en el mes de septiembre no se presentó turbidez y las precipitaciones fueron bajas. El aumento en la turbidez del agua da como resultado un decrecimiento en las praderas de pastos marinos, debido a que al mismo tiempo ocurre la disminución en la irradiación y disminuye la fotosíntesis (Cabello, Muñiz y Ward, 2004). Por su parte, *S. filiforme* tiene requerimientos de luz mayores que otras especies (Kenworthy, 1992), lo que puede explicar la disminución en el porcentaje de cobertura que se dio en el presente estudio, durante el mes de abril.

Aunque varios autores han concluido que los pastos marinos tienen la capacidad de foto-aclimatación cuando las condiciones de luz son muy bajas, debido a alta turbidez del agua proveniente de actividades antrópicas o naturales, estos pueden tener altas eficiencias fotosintéticas (Olesen, Enríquez, Duarte y Sand, 2002; Ruiz y Romero, 2003).

La evaluación por profundidad mostró diferencias en la distribución de los pastos, coincidiendo con lo reportado por Castillo (2002), donde *T. testudinum* presentó mayor cobertura en los transectos de las zonas somera y media, disminuyendo conforme se avanza

en áreas más profundas. Para este estudio, las algas dominaron en las zonas profundas, excepto en el Sitio 3 Punta Cahuita, donde dominó *T. testudinum* en las tres profundidades.

Los géneros de algas que se encontraron concuerdan con reportes anteriores a este estudio. Castillo (2002) reportó la presencia de los géneros *Caulerpa*, *Halimeda*, *Penicillus*, *Dictyota*, *Padina*, *Sargassum* y *Anadyomene*. En la presente investigación, además de los reportados por Castillo (2002) se registraron los siguientes géneros: *Galaxaura*, *Chaetomorpha*, *Hypnea*, *Dictyosphaeria*, *Palisada* y *Champia*, la cual se detectó únicamente en septiembre y que fue reportada por primera vez para Costa Rica por Samper-Villareal, Bernecker y Whertmann (2008).

La presencia de estas algas puede ser la respuesta a la competencia por espacio y nutrientes entre algas y pastos marinos. En praderas marinas, la cobertura de algas aumenta cuando baja la cobertura de fanerógamas marinas (Sidik, Bandeira y Milchakova, 2001). Por otra parte, se observó que, en fondos donde dominaba el escombros de coral, no se desarrollaron las fanerógamas marinas, ya que en estos espacios prevalecían macroalgas de los géneros *Chaetomorpha* y *Sargassum*. Lo anterior puede ser por la dificultad de colonización de las estructuras de coral por parte de los pastos marinos.

Conclusiones

Existen diferencias significativas entre los periodos de muestreo y entre los porcentajes de cobertura de *T. testudinum* y *S. filiforme*

La comunidad de fanerógamas marinas ha cambiado temporalmente en cuanto a la cobertura por especie, probablemente en respuesta a las variaciones que se dieron entre los tres diferentes sitios en que se realizaron los muestreos

Se recomienda realizar estudios de nutrientes como nitratos y fosfatos para determinar si hay un aumento o una disminución de los mismos y la posible afectación en las comunidades de pastos marinos.

Se da una competencia por espacios, la cual es aprovechada por las algas para colonizar los que quedan descubiertos. Así mismo, los fondos de escombros de coral no son ambientes adecuados para el desarrollo de pastos.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional, Costa Rica, específicamente al Fondo para el Fortalecimiento de las Capacidades Estudiantiles (FOCAES) por su apoyo económico durante el 2020 para avanzar con los muestreos y al fondo para apoyo de estudiantes de posgrado, por su apoyo para concluir con este trabajo.

Al Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre (LARNAVISI) por su ayuda con el uso del laboratorio para poder llevar a cabo este trabajo y al laboratorio de Biopreparaciones por toda su ayuda con los equipos para poder salir al campo y para trabajar en el laboratorio. Al Programa de Laboratorio de la UNED por el préstamo del multiparámetros. Por último, a los miembros del SINAC, ACLAC, especialmente a los del PNC por su hospitalidad y el préstamo de la embarcación para realizar muestreos.

Referencias

- Arellano, L. (2004). *Análisis Espacio-Temporal de las Variables Hidrológicas: Detección de Heterogeneidad a Gran escala espacial en un Ecosistema Costero*. Tesis de Maestría no publicada. Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Mérida, Yucatán, México.
- Arellano, L. (2011). *Estructura de los pastos marinos y su relación con la variabilidad ambiental a diferentes escalas espaciales*. Tesis doctoral no publicada. Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Mérida, Yucatán, México.
- Barber, B., & Behrens, P. (1985). Effects of elevated temperature on seasonal in situ leaf productivity of *Thalassia testudinum* Banks ex König and *Syringodium filiforme* Kützing. *Aquatic Botany*, 22, 61-69.
- Bermúdez, A., Rojas, C., y García, P. (2009). *Plan de turismo sostenible Parque Nacional Cahuita*. MINAE. Informe Técnico. San José, Costa Rica.
- Björk, M., Short, F., McLeod, E., y Beer, S. (2008). *Managing Seagrasses for Resilience to Climate Change*. Switzerland: IUCN.
- Bricker, E., Waycott, M., Calladine, A., y Zieman, J. (2011). High connectivity across environmental gradients and implications for phenotypic plasticity in a marine plant. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 423, 57-67.
- Bruun, P. (1988). The Bruun rule of shore erosion by sea-level rise: A Discussion on large-scale two and three-dimensional usage. *Journal of Coastal Research*, 4, 627-648.
- Bulthuis, D. (1987). Effects of temperature on photosynthesis and growth of seagrass. *Aquat. Bot.*, 27, 27-40.
- Buzzelli, C., Robbins, R., Doering, P., Chen, Z., Sun, D., Wan, Y., Welch, B., & Schwarzschild, A. (2012). Monitoring and Modeling of *Syringodium filiforme* (Manatee Grass) in Southern Indian River Lagoon. *Estuaries and Coasts*, 35, 1401-1415. <http://10.1007/s12237-012-9533-8>
- Cabello, A., Muñiz, R., y Ward, D. (2004). Caracterización bioquímica del pasto marino *Zostera marina* en el límite sur de su distribución en el Pacífico Norte. *Cienc. Mar.*, 30(1), 21-34.

- Castillo, P. (2002). *Caracterización estructural y evaluación del estado ambiental de las praderas de pastos marinos del Caribe Colombiano*. Tesis no publicada. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Santa Marta, Colombia.
- Cortés, J., & Wehrtmann, I. (2009). Diversity of Marine Habitats of the Caribbean and Pacific of Costa Rica. Pp. 1-45. In: Wehrtmann, I. S. y Cortés, J. (eds.) *Marine biodiversity of Costa Rica, Central America. Monographiae Biologicae*, 86. Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8278-8_1
- Dennison, W. (1987). Effects of light on seagrass photosynthesis, growth and depth distribution. *Aquat. Bot.*, 27, 15-26.
- Dennison, W., Orth, R., Moore, K., Stevenson, J., Carter, V., Kollar, S., Bergstrom, P., & Batiuk, R. (1993). Assessing water quality with submersed aquatic vegetation. *Bioscience*, 43, 86-94.
- Duarte, C. (1991). Seagrass depth limits. *Aquat. Bot.*, 40, 363-377.
- Fonseca, A., Nielsen, V., y Cortés, J. (2006). Monitoreo de pastos marinos en Perezoso. Cahuita, Costa Rica (sitio CARICOMP). *Rev. Biol. Trop.*, 55(1), 55-66.
- Gallegos, M., Merino, M., Rodríguez, A., Marba, N., y Duarte, C. (1994). Growth patterns and demography Pioneer Caribbean seagrasses *Halodule wrightii* and *Syringodium filiforme*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 109, 99-104.
- Gómez, D., Navarrete, S., Navas, R., Díaz, C., Muñoz, L., y Galeano, E. (2014). *Protocolo Indicador Condición Tendencia Praderas de Pastos Marinos (ICTPM). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP)*. Santa Marta: INVEMAR.
- Hemminga, M. A., y Duarte, C. M. (2000). *Seagrass ecology*. Inglaterra: Cambridge University Press.
- Jiang, Z., Huang, X., & Zhang, J. (2013). Effect of nitrate enrichment and salinity reduction on the seagrass *Thalassia hemprichii* previously grown in the low light. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 443, 114-122. <http://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.02.034>
- Kenworthy, W., Zieman, J., & Thayer, W. (1982). Evidence for the influence of seagrasses on the benthic nitrogen cycle in a coastal plain estuary near Beaufort. North Carolina (USA). *Oecologia*, 54, 152-158.

- Kenworthy, W. (1992). *Protecting fish and wildlife habitat through an understanding of the minimum light requirements of subtropical-tropical seagrasses of the southeastern United States and Caribbean Basin*. Tesis doctoral no publicada. North Carolina State University. USA.
- Lara, A. (2005). *Pastos Marinos*. Pp. 229-240. In: Moreno-Casasola, P., Peresbarbosa-Rojas, E., & Travieso-Bello, A. C. (eds.). *Manejo costero integral: el enfoque municipal*. Sección II. Caracterización física y biológica de la zona costera. México: Instituto de Ecología (INECOL).
- Lee, K., Park, S., & Kim, J. (2007). Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: A review. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 350, 144-175.
- Lizano, O. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Ciencia y Tecnología*, 24, 51-64.
- Martínez, B., Cano, M., Perdomo, M., Clero, L., Díaz, J., Guimaraes, M., Zuñiga, D., Alcolado, P., Duarte, C., y Siret, S. (2007). Estado de los pastos marinos. Pp. 51-56. In: Alcolado, P., García, E., & Arellano, M. (eds.). *El ecosistema Sabana-Camagüey*. Cuba: Estado actual. avances y desafíos en la protección y usos sostenible de la biodiversidad. Cuba: Academia.
- Marsh, J., Dennison, W., & Alberte, R. (1986). Effects of temperature on photosynthesis and respiration in eelgrass (*Zostera marina* L.). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 101, 257-267.
- Masini, R., & Manning, C. (1997). The photosynthetic responses to irradiance and temperature of four meadow-forming seagrasses. *Aquat. Bot.*, 58, 21-36.
- Mckenzie, L. (2003). *Guidelines for the rapid assessment and mapping of tropical seagrass habitats*. Australia. Marine Plant Ecology.
- Mckenzie, L., Campbell, S., & Order, C. (2003). *Seagrass-Watch: Manual for Mapping and Monitoring Seagrass Resources by Community* (citizen volunteers). Australia: Marine Plant Ecology Group.
- Nielsen, V., & Cortés, J. (2008). Abundancia, biomasa y floración de *Thalassia testudinum* (Hydrocharytaceae) en el Caribe de Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.*, 56(4), 175-189.
- Olesen, B., Enríquez, S., Duarte, C., & Sand, K. (2002). Depth acclimation of photosynthesis. morphology and demography of *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* in the Spanish Mediterranean Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 236, 89-97.

- Pachauri, R., y Meyer, L. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).
- Phillips, R. C. (1960). Observations on the ecology and distribution of the Florida seagrasses. *Florida Board of Conservation*, 2, 1-72.
- Rodríguez, R., Córdoba, E., Franco, J., y Rueda, A. (2009). La Erosión en las playas del litoral de Holguín. Cuba. *Ciencias Holguín*, 15(1), 1-20.
- Ruiz, J., & Romero, J. (2003). Effects of disturbances caused by coastal constructions on spatial structure, growth dynamics and photosynthesis of the seagrass *Posidonia oceanica*. *Mar. Pollut. Bull.*, 46, 1523-1533.
- Samper, J., van Tussenbroek, B., & Cortés, J. (2018). Seagrasses of Costa Rica: from the mighty Caribbean to the dynamic meadows of the Eastern Tropical Pacific. *Rev. Biol. Trop.*, 66(1), 53-65.
- Samper-Villarreal, J., Bernecker, A. & Wehrtmann, I. S. (2008). Inventory of macroalgal epiphytes on the seagrass *Thalassia testudinum* (Hydrocharitaceae) in Parque Nacional Cahuita, Caribbean coast of Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.*, 56, 4, 163-174.
- Sidik, B., Bandeira, S., & Milchakova, N. (2001). Methods to measure macroalgal biomass and abundance in seagrass Meadows. In: Short, F. T., & Coles, R. G. *Global Seagrass Research Methods. Volume 33*. Elsevier.
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). (2015). *Plan de Turismo Sostenible del Parque Nacional Cahuita*. Proyecto Fortalecimiento del Programa de Turismo en Áreas Silvestres Protegidas. Programa de Turismo en Áreas Silvestres Protegidas. <http://www.sinac.go.cr/ES/transprncia/Planificacin%20y%20Gestin%20BID/Gesti%C3%B3n%20Sostenible%20del%20Turismo%20en%20ASP/Planes%20de%20Turismo%2010%20ASP/Plan%20de%20Turismo%20Sostenible%20del%20PN%20Cahuita.pdf>
- TIBCO. (2020). Statistica V.14.0.0. TIBCO Software Inc. <https://docs.tibco.com/products/tibco-statistica-14-0-0>

- Van Tussenbroek, B., Cortés, J., Collin, R., Fonseca, A., Gayle, P., Guzmán, H. , Jácome, G. E., Juman, R., Koltés, K., Oxenford, H., Rodríguez, A., Samper, J., Smith, S., Tschirky, J., & Weil, E. (2014). Caribbean-Wide, Long-Term Study of Seagrass Beds Reveals Local Variations, Shifts in Community Structure and Occasional Collapse. *PLOS ONE*, 9(3), e90600. [https:// 10.1371/journal.pone.0090600](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090600)
- Wetzel, R., & Penhale. P. (1983). Production ecology of seagrass communities in the lower Chesapeake Bay. *Mar. Technol. Soc. J.*, 17, 22-31.