



Departamento de Biología

TRABAJO DE DIPLOMA

Determinación de tasas de calcificación y grupos morfofuncionales
primarios en ecosistemas arrecifales de la Ensenada Playa Rancho
Luna, Cienfuegos

Autor: Luis Angel Aragón López

Tutor: Dr. C. Carlos Alonso Hernández

MSc. Miguel Gómez Batista

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA



“Determinación de tasas de calcificación y grupos morfofuncionales primarios en ecosistemas arrecifales de la Ensenada Playa Rancho Luna, Cienfuegos”

Tesis de Diploma

Autor: Luis Angel Aragón López

*Santa Clara,
2018*

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA



TRABAJO DE DIPLOMA

Determinación de tasas de calcificación y grupos
morfofuncionales primarios en ecosistemas arrecifales de la
Ensenada Playa Rancho Luna, Cienfuegos

Autor: Luis Angel Aragón López

Tutor: Dr. C. Carlos Alonso Hernández

MSc. Miguel Gómez Batista

Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC)

Carretera a Castillo de Jagua km 1 ½, Ciudad Nuclear, Cienfuegos

Santa Clara

2018

Pensamiento:

*Sabemos lo que somos,
pero no lo que podemos llegar a ser ...*

William Shakespeare

Dedicatoria:

*A mis tres guardianas,
mi madre, mi abuela Hilda y mi tía Hildeliza,
quienes me demostraron que la diferencia entre imposible y posible es un
corazón con voluntad.*

Agradecimientos:

A Carlos Alonzo por abrirme las puertas del CEEAC y permitir mi superación en lo profesional enseñándome que el camino a la ciencia es largo y tortuoso.

A Arianna por ser mi tercera tutora, guiándome y apoyándome cuando ya no había esperanza de que las cosas salieran bien.

A Yudeisy, Yanadín, Lurde y Donaida por hacer más agradable mi estancia en el laboratorio, gracias por sus ocurrencias y simpatía que las caracteriza, y principalmente por sacarme una sonrisa aún en mis peores momentos.

Muchas gracias a Yusmila, Yoelvy, Aniel, Lisbet, Alejandro y a todos los trabajadores del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron a realizar este trabajo y me hicieron sentir como un trabajador más.

A mi tutor Migue, por aparecer en el momento justo, gracias por tu tiempo, consejos, conocimientos, paciencia, por tus palabras de aliento, por confiar en mí, por tu amistad, tu sinceridad, por exigirme y demostrarme que si se puede. Gracias por enseñarme el significado de la palabra dependencia.

A los trabajadores del centro de buceo de Rancho Luna principalmente al flaco Manzanares y a Bladimir, así como al director del delfinario de Cienfuegos, por su ayuda desinteresada en los muestreos.

A mis profesores, los que me dieron la oportunidad de seguir adelante, gracias por su tolerancia esto no hubiera sido posible sin ustedes.

A mis compañeros de aula, los que están y los que no por las grandes experiencias, por las alegrías, por las tristezas, por los berrinches, por apoyarme y no dejarme a un lado a pesar de estar en un grupo de baile, los quiero.

A las familias que me acogieron como uno más de sus casas en especial la de Félix, Sandra y Dionis.

A Sandra, mi compañera de puesto, gran amiga, por su apoyo sus regaños en todos estos años, por su forma de ser y demostrarme que en la vida no se puede coger lucha, que cuando se quiere se puede.

*A Yoyi, gracias por ayudar a este mortal, por tus **Relájate, Todo va a estar bien**, por sacarme del apuro aun cuando dormías, por tus consejos, aunque no fueran los indicados.*

A Luis Alfredo que, aunque estuviste lejos siempre estabas pendiente, Gracias amigo.

A Adrián y a Micha, por estar en las malas y en las buenas, por oír, por aconsejar, por estar, el primero por ser maduro y guiarme por el buen camino gracias a ti la oveja negra no se descarrió del rebaño y el segundo por demostrarme que las cosas sencillas e insignificantes también pueden tener un gran valor.

A mí 5 de diciembre, mi segunda familia, por tener la facilidad de olvidarme de mis problemas.

A mi grupo de los micro Gesler, Juan Carlos, Dainier y Ale, por ser mis hermanos, por su fortaleza y sentir que podía refugiarme en ustedes en los momentos difíciles, por aguantar mis depresiones y animarme a seguir, por los momentos agradables y locuras, por ser ustedes, gracias.

A todas las muchachas (las cachitas) desde las primeras hasta las últimas, por su preocupación por su apoyo, por hacerme sentir una pieza más del grandioso rompecabezas que es el 5 a pesar de estar lejos del grupo.

A Youri, por ser amigo, hermano, maestro, mi confidente, mi guía, por la protección, por las rizas, por tu carisma, por la paciencia, por la exigencia, doy gracias por haberte conocido, solo tú tienes el don de mantenernos juntos a todos.

A todas mis amistades de la universidad, conocerlos a ustedes fue súper, por estar en los momentos buenos y malos y enseñarme a ser cada día mejor, a mi familión de Ciego de Ávila en especial a Iliana y Nanci, mis madrinas gracias por hacer suyos mis problemas.

A mis familiares por su apoyo incondicional, principalmente a María, Tamarita, José Manuel, los de San Joaquín y a Norma que, aunque no seas mi tía tu apoyo siempre estuvo presente.

A mis amigos del alma de toda la vida que se han convertido en familia: Lissy, Tito, Dianelis, Darielis, Idania y Rachel, por brindarme sus corazones por vencer juntos las batallas y celebrar los triunfos los quiero gracias por ser parte de sus vidas.

A mi media naranja, mi hermanita, mi luz en los momentos de oscuridad, mi confidente, mi protectora, Lynn, gracias por tu apoyo, por tu fuerza, por estar siempre a mi lado aun teniendo un océano por medio, por levantarme del suelo y combatir junto a mí, gracias por darme la oportunidad de conocerte. Solo este “pollito” sabe lo mucho que te agradece. MUCHAS GRACIAS ...Lyta.

A mis seres por estar siempre junto a mí, defendiéndome de todo mal.

A mi padre, por apoyarme y lograr lo que soy hoy. Gracias por darme la vida

*A mis tres guerreras, mi abuela Hilda, por ser fuente de inspiración para seguir adelante, solo tú puedes sonreír en momentos de dolor, gracias por tu perseverancia, tu humildad y fortaleza te amo. Mi tía Hildeliza por estar **SIEMPRE** junto a mí, por estar pendiente a que nada me faltara, por ser mi segunda madre, por tu amor, tu preocupación, por tu apoyo a pesar de cualquier inconveniente, gracias*

eres la mejor y por último y no menos importante, mi madre, mi guía, la más grande de todas, por ser leona cuidando a su cachorro, por tu carácter fuerte y positivo que me levanto y no permitió que me rindiera en ningún momento, por luchar junto a mi esta gran batalla, , por las noches en vela rezando a que todo saliera bien. Este triunfo más que mío es tuyo, no sé qué sería sin ti Te amo, que dios te bendiga siempre.

A todos..., muchas gracias

Índice

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Generalidades sobre el proceso de calcificación en el mar	4
2.1.1	Ciclo de los carbonos en el mar	4
2.1.2	Formas cristalinas del carbonato de calcio y su estado de saturación	5
2.1.3	Proceso de calcificación en el mar	6
2.1.4	Metodología para medir la tasa de calcificación	8
2.2	Generalidades sobre el proceso de acidificación marina.....	9
2.2.1	Proceso de acidificación marina.....	9
2.2.2	Impacto de la acidificación marina en organismos calcificadores.....	10
3	MATERIALES Y MÉTODOS	14
	Descripción del área de estudio.....	14
3.1	Cuantificación de la tasa de calcificación en ecosistema marino costero.....	15
	Confección del dispositivo de muestreo	15
	Muestreo.....	16
	Colecta de muestras de agua.....	17
	Procesamiento de las placas.....	18
	Cálculo y estimación de la tasa de calcificación en ecosistemas marino costero ..	18
3.2	Identificación de los grupos funcionales ecológicos y clasificación según su mineralogía de CaCO_3	18
	Análisis Fotográfico	18
3.3	Análisis de datos.....	20
4	RESULTADOS	21

4.1. Cuantificación de la tasa de calcificación en ecosistemas arrecifales de Rancho Luna en Cienfuegos.....	21
Colectas de muestras de agua	21
Cálculo y estimación de la tasa de calcificación en ecosistemas marino costero.....	21
4.2 Identificación de los grupos funcionales ecológicos y clasificación según su mineralogía de CaCO_3	23
5 DISCUSIÓN	28
5.1 Cuantificación de la tasa de calcificación en ecosistemas arrecifales de Rancho Luna en Cienfuegos.....	28
Colectas de muestras de agua.....	28
Cálculo y estimación de la tasa de calcificación en ecosistemas marino costero ..	28
5.2 Identificación de los grupos funcionales ecológicos y clasificación según su mineralogía de CaCO_3	31
6 CONCLUSIONES.....	34
7 RECOMENDACIONES	35
8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

Resumen:

Debido a las emisiones cada vez mayores de CO_2 a la atmósfera, la absorción de este gas por el océano se realiza con gran velocidad, provocando un aumento en la acidez del agua de mar. Este fenómeno es conocido como acidificación oceánica (OA), y sus efectos, provocan que la capacidad de calcificación de los organismos este siendo reducida y muchas especies y comunidades experimenten pérdidas netas de carbonato de calcio (CaCO_3). Como objetivo general de esta investigación se propuso determinar la tasa de calcificación y grupos morfofuncionales primarios en ecosistemas arrecifales de Rancho Luna, Cienfuegos. Para la cuantificación de la tasa de calcificación se construyeron 12 dispositivos de muestreo basados en la metodología de unidades de acreción, posicionándose seis de ellos en cada biotopo estudiado (Manglar y Arrecife). Para la identificación de los grupos funcionales primarios y la determinación de su porcentaje de cobertura, los dispositivos fueron fotografiados mensualmente y las imágenes tratadas con el software ImageJ. Los resultados obtenidos muestran valores medios de tasa de calcificación, en el arrecife con $0,0005 \text{ gCaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ y en el manglar de $0,0003 \text{ gCaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$. Se identificaron cuatro grupos funcionales, el césped (turf), el (CaCO_3 /sedimento), el grupo funcional (Sin Calcio) y el de las algas costrosas coralinas (CCA). Estas últimas fueron las de mayor porcentaje de cobertura y las principales aportadoras de (CaCO_3), encontrándose principalmente en el arrecife. Se determinó a la magnesita como forma cristalina de (CaCO_3) dominante, y las (CCA), el grupo funcional de mayor vulnerabilidad ante el efecto de (OA).

Palabras clave: Tasa de calcificación, alga costrosa coralina, acidificación, arrecife, manglar, unidad de acreción, calcificación.

Abstract:

Due to the increasing emissions of CO₂ into the atmosphere, the absorption of this gas by the ocean is carried out with great speed, causing an increase in the acidity of seawater. This phenomenon is known as ocean acidification (OA), and its effects cause the calcification capacity of organisms to be reduced and many species and communities experience net losses of calcium carbonate (CaCO₃). As a general objective of this research, it was proposed to determine the rate of calcification and primary morphofunctional groups in reef ecosystems of Rancho Luna, Cienfuegos. For the quantification of the calcification rate, 12 sampling devices were constructed based on the accretion units methodology, six of them being positioned in each studied biotope (Mangrove and Reef). For the identification of the primary functional groups and the determination of their coverage percentage, the devices were photographed monthly and the images treated with the ImageJ software. The obtained results show average values of calcification rate, in the reef with 0.0005 gCaCO₃×cm⁻²× year⁻¹ and in the mangrove of 0.0003 gCaCO₃×cm⁻²× year⁻¹. Four functional groups were identified: lawn (turf), (CaCO₃ / sediment), functional group (Without Calcium) and that of coarse crust algae (CCA). The latter were those with the highest percentage of coverage and the main contributors of (CaCO₃), found mainly in the reef. Magnesite was determined as a crystalline form of (CaCO₃) dominant, and (CCA), the functional group of greater vulnerability to the effect of (OA).

Key words: rate of calcification, coarse crust algae, collection badge, acidification, reef, swamp accretion unit, calcification.

1 INTRODUCCIÓN

El océano, absorbe alrededor del 25% del CO₂ atmosférico derivado de la quema de combustibles fósiles y de los cambios de utilización del suelo. Dicho elemento al disolverse en agua de mar forma ácido carbónico (H₂CO₃), el cual puede afectar a muchos de los minerales que comúnmente forman las rocas calizas o margosas. Debido a las emisiones cada vez mayores de CO₂ a la atmósfera, la absorción de este gas por el océano se realiza con gran velocidad, provocando así un descontrol perceptible en la química de los mares, reflejado en su progresiva acidificación (Sabine *et al.*, 2004).

Se plantea que el fenómeno de la acidificación ha aumentado en un 30% desde los principios de la revolución industrial. La elevación de la acidez altera el balance natural del pH del océano y fuerza al equilibrio ácido-base del agua hacia el lado ácido. Si, como se prevé, este proceso se acelera durante las cuatro próximas décadas, el consiguiente aumento de la acidez del océano será mayor que cualquiera de los ocurridos en los últimos 21 millones de años. Las proyecciones del futuro indican que para 2060 la acidez del agua de mar podría aumentar en un 120% (Doney *et al.*, 2009). Según el criterios de expertos, la tasa actual de cambio del pH es mucho más rápida que cualquiera de las experimentadas previamente en los últimos 55 millones de años (Gattuso *et al.*, 2009, Jokiel, 2011).

La tendencia hacia condiciones más ácidas se está observando ya en mar abierto y ha sido registrada con exactitud creciente en estos últimos años. Las predicciones indican que, en las próximas dos o tres décadas, los mayores cambios hacia condiciones más ácidas ocurrirán en las aguas marinas de las latitudes altas (Bernardo *et al.*, 2015). También la acidez del agua profunda que aflora en algunas áreas es exacerbada por la acidificación oceánica, de modo que el agua aflorada corrosiva afecta ahora a hábitats marinos más superficiales y a especies más cercanas a la costa (Doney *et al.*, 2009).

Con este fenómeno unido al aumento de la temperatura del mar, la capacidad del océano de absorber el CO₂ atmosférico se reduciría, con lo que se incrementaría la rapidez del cambio climático. Cuanto más tempranas sea la reducción de la emisión de este gas, más probable es que se pueda estabilizar y en última instancia invertir la situación. Pero algunos cambios son inevitables, y los impactos se notarán primeramente en los océanos Ártico y Antártico, donde los cambios observados y previstos, de la química oceánica con respecto a las condiciones preindustriales, serán los más importantes en su afectación (Feely y Doney, 2009).

El océano no sólo nos provee de alimento, sino que nos sostiene indirectamente de muchas otras maneras. El aire que respiramos depende en gran parte de la producción de oxígeno por un océano sano. La producción en las capas superficiales de los mares estimula la formación de nubes que ayudan

a sombrear el planeta. El océano proporciona aproximadamente la mitad de la productividad de la tierra y la humanidad se beneficia de ello con sus pesquerías. La acidificación oceánica nos está llevando a un viaje desconocido y tenemos solamente algunas intuiciones iniciales sobre cuántos de estos procesos esenciales se afectarán (Dufault *et al.*, 2012).

La acidificación oceánica no sólo está disminuyendo progresivamente la capacidad de muchos organismos de construir sus conchas, sino que también afectará progresivamente a la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Podría disparar una reacción de impactos en cadena a través de la red trófica marina, comenzando con las larvas de peces y crustáceos, que son particularmente vulnerables. Esto afectaría la producción de muchas industrias pesqueras provocando la pérdida de miles de millones en efectivo. Amenazaría la seguridad alimentaria mundial y de aquellas pequeñas economías pesqueras de pueblos ribereños. La mayoría de las regiones del océano se volverán inhabitables para los arrecifes de coral, afectando además al turismo, la protección de la línea de costa y la biodiversidad (Gattuso *et al.*, 2009).

Muchos organismos del océano tienen esqueletos o conchas de carbonato de calcio (CaCO_3), como el plancton microscópico que forma la base de la cadena alimentaria, los crustáceos y moluscos que utilizamos cotidianamente en nuestras dietas, e incluso las algas costrosas coralinas (CCA siglas en inglés), que cementan los arrecifes de coral, secretando una forma de CaCO_3 (aragonito) que se podría disolver fácilmente si los mares continúan volviéndose más ácidos. Un cambio hacia condiciones más ácidas reducirá la capacidad de tales especies para formar sus conchas. Por ahora, damos por supuesta la existencia de estas plantas y animales, pero la acidificación oceánica puede amenazarla (Andersson *et al.*, 2008).

La capacidad de calcificación de los organismos está siendo reducida y muchas especies y comunidades están experimentando pérdidas netas de CaCO_3 . Conocer las tasas de calcificación y los métodos para su cuantificación en un ecosistema, así como identificar las especies de mayor y menor grado de vulnerabilidad es hoy una necesidad investigativa a nivel global, regional y local.

Basado en esta necesidad investigativa se estableció la siguiente hipótesis de trabajo; "La aplicación de una metodología basada en unidades de acreción, permitirá calcular la tasa de calcificación en ecosistemas arrecifales, e identificar los grupos funcionales ecológicos primarios más vulnerables ante la acidificación oceánica".

Para la comprobación de esta hipótesis se plantearon los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

Determinar tasas de calcificación y grupos morfofuncionales primarios en ecosistemas arrecifales de Rancho Luna, Cienfuegos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1-Cuantificar las tasas de calcificación de ecosistemas arrecifales.

2-Identificar los grupos funcionales ecológicos y clasificarlos según la mineralogía del esqueleto de carbonato de calcio.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Generalidades sobre el proceso de calcificación en el mar

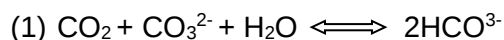
2.1.1 Ciclo de los carbonos en el mar

El carbono (C) orgánico se puede encontrar en los océanos tanto de forma particulada como disuelta. En su forma particulada está asociado como componente esencial a todas las formas de vida, desde estructuras microscópicas hasta grandes organismos. Por otra parte, en su forma disuelta se encuentra en toda la columna de agua y se considera en esta clasificación cuando su tamaño de partícula es menor de $0.4\ \mu\text{m}$ (Cifuentes y Cupul, 2014). El carbono inorgánico disuelto se encuentra en diferentes formas como: dióxido de carbono (CO_2), carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-) que, en su conjunto, forman el carbono inorgánico disuelto total (Bates *et al.*, 2014). La presencia de ambos tipos de carbono en el océano depende de factores bióticos, y abióticos como la temperatura, el transporte de masas de agua y la estratificación de la columna de agua (Cifuentes y Cupul, 2014).

El carbono orgánico está presente en los organismos y cuando un individuo muere, las bacterias por procesos tanto aeróbicos como anaeróbicos, rompen sus compuestos orgánicos en componentes químicos inorgánicos, a lo cual se le conoce como remineralización bacteriana. Los componentes inorgánicos son liberados en el agua como nutriente disueltos, los cuales en presencia de luz son consumidos por organismos fotosintetizadores, como las microalgas, denominadas comúnmente fitoplancton. Este proceso no es exclusivo solamente de ellas, ya que otros organismos como las macroalgas, pastos marinos y corales asociados a las zonas costeras, igualmente requieren de dichos nutrientes para sus actividades energéticas diarias (Morse *et al.*, 2006).

En el océano, en el momento en que el CO_2 se difunde de la atmósfera hacia la superficie del agua, se inician los ciclos, fotosíntesis/respiración (fijación/producción de CO_2) y el conocido sistema de los carbonatos. Este último no es más que el proceso de precipitación y disolución de cristales de carbonato de calcio (CaCO_3) empleados en la formación de caparzones o arrecifes ricos en carbonato de calcio (Doney *et al.*, 2009). La fotosíntesis se lleva a cabo tanto en el fitoplancton como en las macroalgas y es responsable de transformar (o fijar) el CO_2 inorgánico disuelto en el agua de mar en moléculas orgánicas. En cambio, los otros dos componentes de carbono inorgánico disuelto (HCO_3^- y CO_3^{2-}) no son directamente utilizados en procesos biológicos, pero son importantes para mantener estable la termodinámica del agua marina (Cifuentes y Cupul, 2014).

Cuando el CO₂ es liberado debido a la remineralización bacteriana o es transferido de la atmósfera, y a su vez disuelto en el agua de mar, se producen una serie de reacciones que son responsables del pH del agua, ya que intervienen en la concentración de iones H⁺ producidos en el sistema (Bates *et al.*, 2014). El dióxido de carbono se encuentra en un flujo constante, inicialmente, el proceso de fotosíntesis remueve CO₂ del agua de mar generando que el sistema tenga una deficiencia de dióxido de carbono, y dado que generalmente hay una mayor concentración de CO₂ en la atmósfera que en el océano, se genera un gradiente de concentraciones, permitiendo que más CO₂ se disuelva de la atmósfera hacia el océano. Cuando las condiciones son inversas, es decir, que la concentración de dióxido en la superficie del agua es mucho mayor que el atmosférico, el CO₂ se disuelve nuevamente a la atmósfera, sucediendo esto de manera constante con el fin de que el sistema se mantenga en un continuo equilibrio termodinámico que se describe según la siguiente ecuación (1) (Cifuentes y Cupul, 2014).



2.1.2 Formas cristalinas del carbonato de calcio y su estado de saturación

El carbonato de calcio (CaCO₃), lo podemos encontrar en el mar de dos formas cristalinas: calcita y aragonita. Generalmente, los organismos crean una u otra forma, aunque también introducen magnesio en sus estructuras calcáreas que en este caso se denomina como magnesita o carbonato de magnesio. La aragonita y la magnesita son al menos un 50% más solubles que la calcita, y por tanto más vulnerables a los efectos del aumento de acidez en los mares y océanos (Decet *et al.*, 2015). Los corales y pterópodos construyen sus esqueletos y conchas principalmente de aragonita, mientras que las algas coralinas lo hacen con carbonato de magnesio (Manzello, 2010), siendo en estos organismos donde más se evidencia los daños provocados por la acidificación oceánica (Bernardo *et al.*, 2015).

La cantidad de carbonato de calcio depositado en los organismos depende de las condiciones ambientales, ya que, en aguas cálidas, poco productivas y muy iluminadas, los esqueletos crecen más rápido y presentan una mayor tasa de crecimiento (Feely *et al.*, 2004). Esto se puede corroborar principalmente en los corales los cuales presentan simbiosis con dinoflagelados conocidos como zooxantelas, quienes cambian el entorno químico presente en el interior de los pólipos y los ayudan a depositar el carbonato a gran velocidad, tanto que pueden alcanzar varios kilogramos por metro cuadrado cada año (Sheppard *et al.*, 2009). Análisis estequiométricos han demostrado que, para que la calcificación se desarrolle mejor, se requiere un ambiente con baja acidez, lo que se detecta por medio de un indicador llamado Omega (Kleypas *et al.*, 2006). Omega (Ω), o también conocido como estado de saturación por muchos investigadores, describe el nivel de saturación de carbonato de calcio en el mar. Se plantea que si Ω = 1, el agua marina esta exactamente en estado de equilibrio o de saturación con

respecto a la aragonita. Si $\Omega > 1$, el agua esta sobresaturada de carbonato de calcio y las condiciones son favorables para que los organismos puedan formar sus conchas y esqueletos calcáreos. En el caso de que $\Omega < 1$, se dice que el agua marina esta insaturada y las condiciones son corrosivas por lo que se ve afectada la fijación de carbonato de calcio por su fácil degradación en el medio (Cooley y Kite-Powell, 2009, Medellín *et al.*, 2016).

La calcificación depende en gran medida del estado de saturación del carbonato de calcio (Ω) y este a su vez depende de variables como el pH, la alcalinidad total, la presión parcial de dióxido de carbono ($p\text{CO}_2$), el carbono inorgánico disuelto y la temperatura del agua entre otras. En la actualidad, el agua de mar cercana a la superficie está sobresaturada con respecto a cualquier forma de carbonato calcio (Anthony *et al.*, 2008), por lo que las aguas superficiales son las de mayor concentración de este compuesto. Las aguas frías y profundas albergan una mayor cantidad de dióxido de carbono y poseen una menor presencia de carbonato calcio, siendo por tanto más ácidas que las aguas cálidas (Bates *et al.*, 2014). La capacidad de calcificación, o sea la aptitud de un organismo para construir estructuras de carbonato de calcio, es mayor cuando el pH es superior y el agua está saturada de iones carbonato. Si el nivel de saturación desciende, como ocurre en aguas más profundas, el crecimiento de estas especies también disminuye (Bernardo *et al.*, 2015). Una vez se alcance el nivel de infra-saturación, el carbonato calcio comenzará a disolverse. Sin embargo, debido a la rapidez a la que se producen dichos cambios, la capacidad de calcificación puede disminuir mucho antes de que se alcance la infra-saturación (Orr, 2011).

Al aumentar la cantidad de dióxido de carbono en el océano, el límite de saturación (límite entre aguas saturadas e infra-saturadas) tanto para la aragonita como para la calcita disminuye en profundidad acercándose a la superficie, reduciendo por tanto el área en el que se puede producir la calcificación (Tanhua *et al.*, 2013). La cantidad de dióxido de carbono absorbido por los océanos ha hecho que los límites de saturación suban entre 50 y 200 metros hacia la superficie, por encima del nivel anterior a la revolución industrial (Orr, 2011). Debido a sus frías aguas, el Océano Antártico tiene las concentraciones más bajas de carbonato de todo el planeta, y es el que menos estructuras de carbonato cálcico posee, incluso cerca de la superficie (Orr, 2011). Por ello, los calcificadores presentes en estas aguas son los más amenazados por el aumento del nivel de dióxido de carbono.

2.1.3 Proceso de calcificación en el mar

La calcificación es el proceso de biomineralización mediante el cual los iones de calcio (Ca^{2+}) se combinan con los iones de carbonato (CO_3^{2-}) para producir carbonato de calcio mineral (CaCO_3)

(Gazeau *et al.*, 2015). Mediante esta vía los organismos calcificadores, son capaces de incorporar el carbonato de calcio mineral (CaCO_3) a sus estructuras aumentando así su tamaño.

Son muchos los organismos calcificadores existentes en el ambiente marino, donde cada uno posee un proceso distinto para fijar el (CaCO_3) (Goldberg, 2013). En las algas calcáreas la calcificación ocurre generalmente durante el proceso de fotosíntesis y es catalizada principalmente por la enzima rubisco (Bosence, 1983). La mineralogía y el lugar donde se produce la calcificación son determinantes en la conservación de los caracteres morfológicos. El proceso de calcificación puede producirse en diferentes carbonatos, pero nunca se mezclan en el mismo organismo. Las algas rojas precipitan generalmente calcita, pero varía la cantidad de magnesio presente en la estructura cristalina. Las algas verdes depositan aragonito, mientras que los órganos reproductores de las carófitas son de calcita. La mineralización se puede producir tanto en la pared celular como en el depósito superficial del organismo (Goldberg, 2013).

El proceso de formación del esqueleto de carbonato de calcio en corales hermatípicos se lleva a cabo en la porción del tejido justo por arriba del esqueleto denominado epitelio calicoblástico (Feely *et al.*, 2004, Gattuso *et al.*, 2007, Sheppard *et al.*, 2009). Este se encuentra unido al esqueleto a través de un espacio virtual conocido como medio extracelular calcificante (MEC), el cual funciona como el sitio de precipitación de cristales de aragonita (Decet *et al.*, 2015). Los cristales al momento de formarse, se van acomodando generando diferentes arreglos en el esqueleto y que finalmente determinan la densidad del esqueleto (Feely *et al.*, 2004).

A manera de resumen, la calcificación en corales hermatípicos se inicia con el transporte activo de iones de calcio (Ca^{2+}) catalizado por la enzima Ca^{2+} -ATPasa, generando la expulsión de protones (H^+) del medio calcificante e incrementando el pH intracelular. Ante lo anterior los protones (H^+) reaccionan con el bicarbonato (HCO_3^-) intracelular formando el compuesto carbonato CO_3^{2-} . La formación de CO_3^{2-} reduce la presión parcial del CO_2 ($p\text{CO}_2$), permitiendo una difusión facilitada, es decir, sin costo energético de CO_2 a través del epitelio calicoblástico. Nuevamente se produce bicarbonato (HCO_3^-), y en consecuencia más carbonato (CO_3^{2-}), la continua producción de carbonato junto con la continua entrada de Ca^{2+} genera un punto de saturación de aragonita ($\Omega_{\text{aragonita}}$), provocando la precipitación de CaCO_3 en forma de cristales (Fabricius *et al.*, 2013). Por lo que el bombeo inicial de los iones de calcio, funciona como el disparador de la calcificación, ya que al eliminar protones aumenta la concentración de CO_2 , concentrando así los iones de carbonato en el medio extracelular calcificante (MEC) (Gattuso *et al.*, 2009, Bernardo *et al.*, 2015).

Por otra parte es importante destacar que el proceso de calcificación está influenciado por variables tales como los cambios anuales en la temperatura superficial del mar, las concentraciones de los iones pertenecientes al sistema de los carbonatos (Bernardo *et al.*, 2015, Medellín *et al.*, 2016) y las variaciones diarias asociadas a los periodos de luz y oscuridad (Anthony *et al.*, 2011, Erez *et al.*, 2011).

2.1.4 Metodología para medir la tasa de calcificación

Entre las metodologías para cuantificar la tasa de calcificación se encuentra la propuesta por Todd y colaboradores (2012) en la que se utilizan dispositivos denominados Unidades de Acreción (CAU, siglas en inglés) (Fig. 1). Estas unidades permiten el reclutamiento y colonización de especies como los crustáceos, algas coralinas y corales pétreos. Las placas de acreción pueden tener dimensiones entre los 10 y 30cm de largo y de ancho, con un grosor entre 0.5 y 1cm (Nichole *et al.*, 2012). En estudios realizados, es frecuente encontrar que estos dispositivos se encuentren entre los 10 y los 50 cm sobre el sustrato coralino, permitiendo así un mayor reclutamiento de organismos calcificadores ya que, al encontrarse las (CAU) cercanas al arrecife coralino, mayor es la probabilidad de que las especies calcificadoras se adhieran a las mismas (Nichole *et al.*, 2012, Bernardo *et al.*, 2015). Para determinación de la tasa de calcificación ($T_{\text{calcificación}}$) por este método, primeramente, las placas de acreción son procesadas para obtener los valores necesarios para conformar la siguiente ecuación ($T_{\text{calcificación}} = (P_{\text{orgánico+calcáreo}} - P_{\text{orgánico}}) / Axt$), siendo ($P_{\text{orgánico+calcáreo}}$) el peso de la placa seca con material orgánico y calcáreo, ($P_{\text{orgánico}}$), el peso de la placa con material orgánico, (A) el área de las superficies de la placa y (t) el tiempo de exposición. Los resultados de tasa de calcificación se miden en gramos de $\text{CaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$.

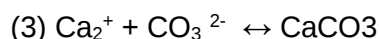
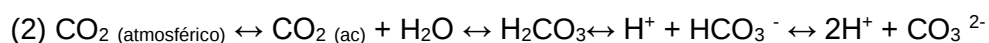


Figura 1: Unidad de acreción de calcificación (CAU)

2.2 Generalidades sobre el proceso de acidificación marina

2.2.1 Proceso de acidificación marina

La acidificación del océano es una causa directa del aumento de los niveles de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera. Cuando el CO₂ entra en el mar, este pasa rápidamente por una serie de reacciones químicas que provocan el aumento de la acidez de la superficie del agua del mar (bajando su nivel de pH) (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). El CO₂ absorbido por la atmósfera reacciona con el agua del mar formando ácido carbónico. Este ácido libera un ión bicarbonato y un ión hidrógeno. El ión hidrógeno se une a los iones carbonato libres en el agua, formando otro ión bicarbonato. En caso contrario (sin la presencia en exceso de los iones de hidrógeno), los iones carbonato libres estarían disponibles para que los animales marinos formen conchas y esqueletos de carbonato cálcico (ecuaciones (2) y (3)) (Hoffman *et al.*, 2010).



El pH es una medida de la acidez o basicidad de una solución, basándose en la concentración de iones hidrógeno (H⁺). La escala va desde 0 (solución ácida, con una alta concentración de H⁺) hasta 14 (solución muy básica, con una baja concentración de H⁺). El pH del ácido sulfúrico, usado en baterías, por ejemplo, es cercano al 0, mientras que el del hidróxido de sodio (o sosa cáustica) es de casi 14. Una solución neutra tiene un pH de 7, y el agua de mar pura tiene un pH de entre 8 y 8.3. Un cambio de una unidad representa que la concentración de iones hidrógeno aumenta diez veces, y por tanto también la acidez (Houghton *et al.*, 1996). Los océanos han removido casi el 30% del CO₂ antropogénico de los últimos 250 años, disminuyendo el pH a una tasa que no ha sido registrada en los últimos 60 millones de años (Jokiel, 2011).

La absorción del dióxido de carbono por parte de los océanos posee un efecto regulador en los impactos producidos por el cambio climático en la vida terrestre. Los océanos actúan como “sumideros de carbono”, reduciendo los impactos asociados al cambio climático (Cooley y Kite-Powell, 2009). Si los océanos no tuvieran este papel, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera sería un 55% superior a la de los últimos 250 años (Bernardo *et al.*, 2015). Antes de la revolución industrial, los océanos mantenían un relativo equilibrio con la atmósfera, absorbiendo aproximadamente la misma cantidad de dióxido de carbono que era emitido (2.150 millones de toneladas métricas de CO₂) (Kurihara *et al.*, 2008). Sin embargo, al aumentar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles, también ha aumentado la cantidad de CO₂ absorbida

por los océanos. Este proceso continuará mientras la concentración de dióxido de carbono en las aguas superficiales sea menor que la de la atmósfera (Doney *et al.*, 2009, Feely y Doney, 2009, Martin y Gattuso, 2009, Bernardo *et al.*, 2015).

El pH de la superficie del océano ya ha caído 0,1 unidades, lo que representa un aumento del 30% en la acidez (Brinkman y Smith, 2015). A finales de este siglo, si las emisiones actuales continúan, el pH podría caer otras 0,3 unidades, lo cual significaría un aumento de acidez de casi el 100% (Miller *et al.*, 2010). En los últimos 300 millones de años, el pH del océano nunca ha caído más de 0,6 unidades por debajo del nivel de 1750 (Morse *et al.*, 2006). Sin embargo, si durante los próximos dos siglos no disminuye el uso de combustibles, el pH del océano podría caer más de 0,7 unidades por debajo de dicho nivel. Desde el siglo XVIII, los océanos han absorbido más de 460 mil millones de toneladas métricas de dióxido de carbono (Nichole *et al.*, 2012), lo que representa casi la mitad de las emisiones de este gas. La concentración actual de dióxido de carbono en la atmósfera es la más alta en la historia de la humanidad; de hecho, hasta donde han podido determinar los (800.000 años), el nivel no había superado los 300 ppm (Jokiel, 2011). Si continuamos con la tendencia actual de emisiones, en el año 2050 el pH del océano será el más bajo de los últimos 20 millones de años. Pero todavía más significativa es la velocidad a la que está cambiando la composición química de los océanos. La velocidad actual de acidificación es al menos 100 veces superior a la velocidad máxima de los últimos cientos de miles de años (Jokiel *et al.*, 2008). El dióxido de carbono se absorbe tan rápido que las aguas superficiales no serán capaces de prevenir y contrarrestar el importante descenso en el pH del océano.

2.2.2 Impacto de la acidificación marina en organismos calcificadores

Los organismos calcificadores se encuentran tanto en ecosistemas de aguas profundas como en aguas poco profundas. Algunos calcificadores construyen grandes estructuras, como los arrecifes de coral, mientras que otros son minúsculos, como las capas de los cocolitóforos, que sólo se pueden ver con un microscopio (Kleypas *et al.*, 1999). Un aumento del dióxido de carbono puede reducir los iones carbonato, lo que ralentizaría o pararía la calcificación a lo largo de su vida. Los organismos marinos producen estructuras de carbonato de calcio por diversas razones. Por ejemplo, los corales crean esqueletos de carbonato cálcico no sólo como ancla y guarida, sino también para elevar sus pólipos hacia la luz y las corrientes. Esto les permite obtener luz con mayor facilidad, así como los nutrientes y minerales que necesitan para crecer (Klumpp y Mckinnon, 1992). La madurez reproductiva también depende de dicha capacidad de calcificación, por ejemplo, en el *Goniastrea aspera*, se alcanza cuando adquiere un cierto tamaño, que a su vez depende de la capacidad de calcificación (Kurihara *et al.*, 2008). Como resultado, la incapacidad de muchos organismos de crear sus estructuras calcáreas podría

afectar a su salud y supervivencia, lo que podría tener importantes efectos secundarios en los ecosistemas marinos y las cadenas alimenticias (Lee y Carpenter, 2001).

En el caso de los corales tropicales un aumento del 20% de los niveles actuales de dióxido de carbono, que podría producirse en las próximas dos décadas, reduciría de manera significativa la capacidad de estos para construir sus esqueletos y algunas especies podrían extinguirse en dicho período de tiempo (Martin y Gattuso, 2009). Cuando hay grandes cantidades de dióxido de carbono, no sólo el crecimiento de los corales es más lento, sino que también son menos robustos y los esqueletos que producen son más débiles (Meehl *et al.*, 2008). Consecuentemente, los arrecifes de coral en condiciones ácidas podrían no superar el ritmo habitual de erosión y podrían comenzar a disminuir mucho antes de lo que se hubiera esperado. La pérdida de los arrecifes supondría la pérdida del hábitat de millones de especies. Los arrecifes son guaridas, zonas de cría, alimentación y lugar de puesta para muchas especies, sin que exista otro sistema parecido en la Tierra. Por desgracia, debido a las amenazas de la acidificación de los océanos y el cambio climático, los arrecifes serán cada vez menos abundantes (Miller *et al.*, 2010). Sin los arrecifes, nueve millones de especies (incluidos cuatro mil especies de peces) sufrirían graves consecuencias, ya que dependen de ellos como cobijo y alimentación (Morse *et al.*, 2006).

Aunque los corales tropicales son tal vez los calcificadores más conocidos y apreciados de los océanos, no son los únicos tipos de corales a los que afectará la acidificación. Los corales de aguas profundas son tal vez los ecosistemas marinos más sensibles ante las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (Orr *et al.*, 2005). Los corales de aguas profundas, formadores de arrecifes, cuentan con una gran biodiversidad y son el hábitat y zona de cría para muchos organismos que viven en esas profundidades, incluidas muchas especies de peces de gran importancia comercial (Pörtner *et al.*, 2005). Si los océanos se acidifican al ritmo actual, haremos que desaparezcan antes de conocer a fondo su verdadera belleza e importancia. Se sabe que los corales de aguas profundas, las esponjas y los ecosistemas donde éstos viven son importantes fuentes para tratamientos médicos contra enfermedades tan variadas como el cáncer, la artritis, el Alzheimer y patologías de la piel (Price, 2010). Por ejemplo, los corales bambú, un tipo de abanicos de mar, se emplean para crear huesos humanos sintéticos utilizados en injertos, y pueden ser un modelo de síntesis artificial para el colágeno (Sabine *et al.*, 2004). Hay seis especies de corales de aguas profundas formadores de arrecifes que crean esqueletos de carbonato de calcio a partir del aragonito. Puesto que son unos de los corales de crecimiento más lento del planeta, la acidificación supone para ellos una amenaza real e inmediata (Stocker *et al.*, 2013).

En el caso de las algas coralinas, estas son importantes calcificadoras de los arrecifes y juegan un papel importante en el crecimiento y estabilización de éstos, contribuyen de manera significativa en los procesos de sedimentación, y sirven de alimento para el erizo de mar, el pez loro y muchas especies de moluscos (Medellín *et al.*, 2016). Un estudio reciente reveló una reducción del 86% en el crecimiento de algas coralinas en aguas acidificadas (Nichole *et al.*, 2012). Estas algas construyen su esqueleto con calcita de magnesio y por ello serán uno de los primeros organismos que se vean afectados por la acidificación (Iglesias y Rodriguez, 2014). Una disminución en su capacidad de crear calcita y en su capacidad de crecimiento tendría un gran impacto en la estabilidad y la diversidad de los arrecifes de coral.

Los cocolitóforos son algas unicelulares cubiertas con capas de calcita. Estudios relacionados con estos organismos demuestran que, cuando se les expone a aguas acidificadas, algunas especies sufren una disminución en la capacidad de producir calcita, pero otras no. De hecho, una especie aumentó su cubierta calcárea al incrementar la cantidad de dióxido de carbono (Tyrell, 1999, Iglesias y Rodriguez, 2014). Los cocolitóforos producen dimetil sulfuro (DMS), que reacciona en la atmósfera estimulando el desarrollo de nubes. Es posible que la producción de DMS de los cocolitóforos se vea afectada por la acidificación. Ésta podría reducir en gran manera la concentración atmosférica de DMS, disminuyendo la capa de nubes que cubren los océanos, que a su vez actúan como una capa protectora reflejando radiación solar a la atmósfera y provocando así un mayor calentamiento del planeta (Vroom y Smith, 2001, Vroom y Smith, 2003). Una reducción del DMS también tendría muchos efectos en los ecosistemas, ya que este compuesto es un importante indicador utilizado por varios organismos como las aves marinas (Nelson, 2009), los peces que viven en los arrecifes (Miller *et al.*, 2010) y las focas (Bosence, 1983) para buscar alimento.

Muchas especies producen carbonato de calcio durante su fase larvaria, por lo que una mayor acidificación podría también afectar a especies que no es probable se vean afectadas de adultos. Por ejemplo, las larvas de dos tipos de erizos de mar tuvieron un menor proceso de calcificación y una menor tasa de crecimiento al ser expuestas a una mayor concentración de dióxido de carbono (Gattuso *et al.*, 2009). Especies, como mejillones, ostras, estrellas marinas, ofiuras y crustáceos, mostraron un menor índice de calcificación durante la fase larval en condiciones de incremento de dióxido de carbono (Bernardo *et al.*, 2015, Anthony *et al.*, 2008). Una alteración en las etapas de crecimiento de los organismos marinos podría mermar su adaptabilidad y supervivencia, con importantes consecuencias para los ecosistemas marinos

Los pterópodos son parte de la base de la cadena alimenticia polar y sub-polar y sirven de alimento a gran parte del ecosistema, incluidas las ballenas y los grandes depredadores. Estos representan el 45% de la dieta del salmón rosa de Alaska (Cooley y Kite-Powell, 2009). Algunos estudios preliminares sugieren que una reducción del 10% en los pterópodos provocaría una reducción del 20% en el peso de un salmón rosa maduro (Andersson *et al.*, 2008). Puesto que sus conchas están hechas con aragonito y se encuentran en las zonas más frías de las altas latitudes, que a su vez serían las primeras zonas en volverse infra-saturadas, los pterópodos podrían ser uno de los primeros calcificadores amenazados por la acidificación (Albright y Langdon, 2011). En una serie de experimentos, se expuso a pterópodos vivos al nivel de infra-saturación de aragonito que se prevé en el Océano Antártico para el 2100. En 48 horas sus conchas empezaron a disolverse, a pesar de que el propio animal estaba vivo (Doropoulos *et al.*, 2012). Un aumento en la acidez traería consigo una menor tasa de calcificación en los pterópodos, lo que, a su vez, provocaría una interrupción en la base de la cadena alimenticia de los océanos, desencadenando grandes cambios en los ecosistemas y una ruptura en las interacciones depredador-presa.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el arrecife costero de la provincia de Cienfuegos, ubicada en la región centro sur de Cuba. Los límites de la Ensenada de Rancho Luna se encuentran ubicados desde Mangles Altos (22 02, 882'N, -80 35, 403'W) por el oeste, hasta el Río Cabagán (21 49, 515'N, -80 06, 112'W) por el este, con una extensión aproximada de 62 km. Por el sur toda la zona recibe la influencia del Mar Caribe. En este tramo de costa la plataforma submarina es muy estrecha (400 m aproximadamente). El relieve del fondo es heterogéneo, con la presencia de acantilados submarinos, montículos, depresiones, camellones, cavidades, cavernas y cañones submarinos. Solo en las regiones de playa las pendientes son suaves; aumentando a medida que se va perdiendo el espesor de arena.

Las temperaturas de las aguas varían entre 24 °C y 29 °C, en los meses de invierno y verano, respectivamente. La salinidad en toda el área somera de plataforma abierta al Mar Caribe es de 37‰ como promedio. El tipo de corriente predominante en toda el área se cataloga como “corrientes débiles de marea”, dado la poca intensidad de las mismas. A una profundidad de 20 m la transparencia llega a alcanzar los 10 m, lo cual es común en los dos regímenes de marea existentes (llenante y vaciante). En los meses correspondientes a la temporada lluviosa y en dependencia de la intensidad de la misma, los niveles de sólidos suspendidos se incrementan considerablemente con los aportes de los ríos (Río Arimao, Río Gavilán y Río San Juan) que descargan en este sector de la costa. Como consecuencia de lo anterior, los niveles de transparencia pueden llegar a disminuir hasta en un 70%. Durante el muestreo no se observaron indicios de contaminación ni de sedimentación elevados.

Se establecieron dos estaciones de muestreo, la primera estación se ubicó en la entrada de un estero semicerrado de manglar, próxima al Delfinario de Cienfuegos, con una profundidad entre 1 y 2 m. La segunda, en el arrecife coralino el Laberinto, localizado a 300 m del margen costero, a una profundidad de 8 m aproximadamente. Esta estación constituye uno de los sitios de buceo contemplativo más visitado por los clientes del Centro Internacional de Buceo “Whale Shark” de la Marina Marlín, Cienfuegos, enclavado en esta ensenada (Fig. 2).



Figura 2: Localización del área de estudio. El punto 1 en rojo indica representa la estación del manglar próximo al Delfinario; y el punto 2 en azul la estación de muestreo, el arrecife.

3.1 Cuantificación de la tasa de calcificación en ecosistema marino costero

Confección del dispositivo de muestreo

Basándonos en los modelos de un equipo de medición de calcificación de tipo (CAU) (Nichole *et al.*, 2012, Bernardo *et al.*, 2015), se creó un dispositivo de muestreo similar (Fig. 3). Este dispositivo se divide en dos secciones, la base, aproximadamente de 50 cm, conformada por un soporte metálico al cual se encuentra adherido un tubo plástico que servirá de soporte a la segunda sección, la de colecta o placa de exposición. La placa de exposición está constituida de material acrílico con dimensiones de 20 x 15 cm y un grosor de 1 cm aproximadamente; es válido destacar que dicha placa se lijó para proporcionar una superficie no brillante adecuada para la fijación permanente y pesada antes de ser colocada en el área de estudio.



Figura 3: Dispositivo de muestreo.

Muestreo

Mediante buceo autónomo se posicionaron seis dispositivos codificados en cada estación (Tabla I). Los dispositivos se colocaron aproximadamente a 30 cm por encima del sustrato y separados por 1 m entre ellos; estos permanecieron expuestos por un período de 69 días, entre el 25 de enero y el 4 de abril de 2018. Al culminar el período de exposición, se realizó la extracción de los dispositivos recuperándose el 100% de los mismos. Las placas de colecta fueron desmontadas y colocadas cuidadosamente en bolsas de polietileno para minimizar la pérdida de organismos adheridos o material calcificado durante el traslado al laboratorio.

Tabla I: Código y dimensiones de las placas

Código de placa	Estación	Peso (g)	Grosor (cm)	Largo (cm)	Ancho (cm)
y0745038	Arrecife	328,83	1	20,1	14,7
y0745040	Arrecife	342,14	1	20,1	15,1
y0745041	Arrecife	336,21	1	20,3	14,9
y0745042	Arrecife	332,8	1	20,2	14,5
y0745039	Arrecife	328,18	1	20,2	14,6
y0745044	Arrecife	334,04	1	20,1	14,8
y0745036	Manglar	333,67	1	19,9	14,7
y0745050	Manglar	335,82	1	20	14,8
y0745037	Manglar	334,83	1	20,2	14,8
y0745045	Manglar	334,84	1	20,3	14,9
y0745046	Manglar	337,32	1	20	14,9
y0745047	Manglar	332,44	1	20,3	15

Colecta de muestras de agua

Se colectaron 500 ml de agua utilizándose una botella tipo Niskin de 5000 ml, a los que se le realizaron los análisis comprendidos en la (Tabla II) En los casos requeridos las muestras fueron preservadas en frío (4°C) antes de su análisis.

Tabla II: Análisis de la muestra de agua.

Ensayo	Método
pH	Potenciométrico
Temperatura	Termopares
Oxígeno disuelto	Winkler
Alcalinidad	Tritación con H ₂ SO ₄
Salinidad	Potenciométrico

Procesamiento de las placas

En el laboratorio las placas se enjuagaron con agua de mar para eliminar los depósitos móviles (fauna, sedimento y arena) y fotografiadas por cada una de sus superficies para determinar la cobertura de los grupos morfofuncionales adheridos. Posteriormente, se secaron a 60°C (Estufa BINDER) durante 2-5 días. Este proceso de secado se realizó repetidamente y se clasificó como seca cuando la diferencia de peso entre pesajes secuenciales de una misma placa fue menor a 0.1 g (Balanza Semianalítica TREE con margen de error de 0.01 g) (Bernardo *et al.*, 2015). Después de secar, cada placa individualmente se sumergió en HCl al 5% durante 24 h o hasta que todo el carbonato de calcio se disolvió. Durante el proceso de disolución las placas se agitaron periódicamente cada 1-8 h para reducir los impedimentos de disolución del carbonato de calcio. Finalmente, las placas fueron nuevamente secadas y pesadas.

Cálculo de la tasa de calcificación en ecosistemas marino costero

Para determinar la tasa de calcificación ($T_{\text{calcificación}}$), se estableció el tiempo de exposición de los dispositivos ($t=69$ días), se calculó el área total de cada placa (A) y se determinaron los pesos siguientes i) peso de la placa seca con material orgánico y calcáreo antes de ser sumergida en HCl al 5% ($P_{\text{orgánico+calcáreo}}$) y ii) peso de la placa seca después de ser expuesta al HCl al 5 % ($P_{\text{orgánico}}$) conformándose así la siguiente ecuación:

$$T_{\text{calcificación}} = (P_{\text{orgánico+calcáreo}} - P_{\text{orgánico}}) / Axt$$

Los resultados se expresaron en gramos de $\text{CaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ (Nichole *et al.*, 2012, Bernardo *et al.*, 2015).

3.2 Identificación de los grupos funcionales ecológicos y clasificación según su mineralogía de CaCO_3

Análisis Fotográfico

Las fotografías fueron analizadas a través del programa ImageJ (versión 1.40), con el objetivo de calcular el porcentaje de cobertura de los organismos adheridos a la superficie de las placas (Bernardo *et al.*, 2015). Los diferentes taxa se clasificaron en grupos funcionales ecológicos y a su vez según la mineralogía del esqueleto de CaCO_3 teniendo en cuenta los criterios de (Smith *et al.*, 2012,), (Tabla III).

Tabla III: Grupos funcionales ecológicos, los taxas que los conforman y su mineralogía de CaCO₃.

Grupo funcional	Taxa	Mineralogía de esqueleto de CaCO ₃
Invertebrado calcificado	Gusanos tubícolas calcificados	Calcita
	Briozoo ramificado	Calcita
	Bivalvo	Calcita/Aragonita
Coral	Coral escleractíneo	Aragonita
	Hidrocoral	Aragonita
Algas costrosas coralinas (CCA)	Alga incrustada coralina y Algas coralinas ramificadas	Alto Mg-Calcita
Macroalgas calcificadas	<i>Dictyota</i>	Calcita
	Macroalgas rojas calcificadas	Calcita
CaCO ₃	Sedimento	Calcita / Aragonita
	Carbonato de calcio	Calcita
Macroalgas carnosas	Macroalgas carnosas rojas	NC
	Algas verdes carnosas	NC
	Algas Cianofita	NC
Césped (Turf)	Matriz de esponja y césped	NC
	Matriz de sedimentos. césped	NC
	Césped mixto	NC
	Algas marrones filamentosas	NC
	Algas verdes filamentosas	NC
	Algas rojas filamentosas	NC
Sin Calcio (NC)	Esponja	NC
	Colonia de tunicados	NC

Huevos	NC
Otros	NC

3.3 Análisis de datos

Los valores de las tasas de calcificación fueron sometidos a pruebas de normalidad y de homogeneidad de varianzas como premisas de las pruebas paramétricas. Confirmada la normalidad de los datos, se realizó una prueba t-Student, en el que se consideró como variable, la tasa de calcificación en los diferentes biotopos de muestreo. Se realizó una tabla de estadísticas descriptiva a los resultados de las tasas de calcificación donde se obtuvo la media, la desviación estándar y los valores máximos y mínimos de cada sitio de muestreo. Se implementó t-Student para determinar la existencia de diferencias significativas en el porcentaje de cobertura de los grupos funcionales calcificadores depositados en las placas de colecta. Todo el procesamiento estadístico de los datos, se realizó utilizando el paquete estadístico Statsoft Statistica 7.0.61.0.

Para el cálculo de las variables descriptivas del sistema de los carbonatos en agua de mar (alcalinidad, salinidad, temperatura, pH, oxígeno disuelto y los omegas calcita y aragonita). Se utilizó el paquete Seacarb (Lavigne *et al.*, 2014), el cual se ejecuta sobre el software libre R, usando las siguientes rutinas (Fig. 4).

```
#####
# Calculo de omega de aragonita y calcita
# 21/02/18
#####

# Cargando el paquete
library(seacarb)

# Valores Hidroquimicos
# Date : 21/02/18
# Arrecife el laberinto
carb(flag=8,var1=7.98,var2= 0.00250,S=36,T=26.2)
# Manglar el delfinario
carb(flag=8,var1=7.99,var2=0.00262,S=36,T=26.5)

#####
# Calculo de omega de aragonita y calcita
# 4/04/18
#####

# Cargando el paquete
library(seacarb)

# Valores Hidroquimicos
# Date : 4/04/18
# Arrecife el laberinto
carb(flag=8,var1=7.79,var2= 0.00240,S=36,T=24.9)
# Manglar el delfinario
carb(flag=8,var1=7.65,var2=0.00236,S=36,T=25.2)
```

Figura 4: Rutinas para obtener las omegas de aragonita y calcita en el software libre R en los sitios de estudio. Donde la var1: es pH (u/pH) y la var2: Alcalinidad (mol/L), (S) Salinidad (ppt) y (T) temperatura (°C)

4 RESULTADOS

4.1. Cuantificación de la tasa de calcificación en ecosistemas arrecifales de Rancho Luna en Cienfuegos

Colectas de muestras de agua

El oxígeno es un componente clave en la respiración celular tanto para la vida acuática como para la vida terrestre. La concentración de oxígeno disuelto en un ambiente acuático es un indicador importante de la calidad del agua ambiental. Esta variable mostró valores superiores a los 5 mg/l en ambos biotopos. (Tabla IV).

Analizadas las muestras de agua y obtenidas las variables descriptivas del sistema de los carbonatos en agua de mar (alcalinidad, salinidad, temperatura, pH, oxígeno disuelto y los omegas calcita y aragonita), se determinó que los valores de omega aragonita y calcita se mantuvieron por encima de uno. Los valores de omega aragonita variaron entre 3,5 y 1,65, mientras los valores de omega calcita presentaron valores en el rango entre 5,2 y 2,5.

Tabla IV: Resultado de las muestras de agua y análisis de las variables descriptivas del sistema de los carbonatos en agua de mar.

Estación	Fecha	pH (u/pH)	Alcalinidad (mol/l)	Salinidad (ppt)	Temperatura (°C)	oxígeno disuelto (mg/l)	Ω aragonito	Ω calcita
Arrecife	21/02/2018	7,98	0,00250	36	26,2	7,17	3,5	5,2
Manglar	21/02/2018	7,99	0,00262	36	26,5	6,16	3,7	5,6
Arrecife	28/03/2018	7,79	0,00240	36	24,9	6,81	2,205	3,34
Manglar	28/03/2018	7,65	0,00236	36	25,2	6,67	1,65	2,5

Cálculo y estimación de la tasa de calcificación en ecosistemas marino costero

Las tasas de calcificación de cada placa variaron en dependencia a la gama de construcciones espaciales y al biotopo (Arrecife o Manglar) en donde se encontraban posicionadas. Los resultados de la media, los valores máximo y mínimo y la desviación estándar se muestran en la tabla V.

Tabla V: Tabla estadística descriptiva de las tasas de calcificación en los sitios de muestreo

Sitios de Muestreo	Media ($\text{gCaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$)	Mínimo ($\text{gCaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$)	Máximo ($\text{gCaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$)	Desviación estándar ($\text{gCaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$)
Arrecife	0,000462	0,000230	0,000901	0,000252
Manglar	0,000316	0,000141	0,000413	0,000094

La tasa de calcificación en el arrecife osciló entre 0.0002 y 0,0009 $\text{g CaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$, con una media de 0.0005 $\text{g CaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ siendo este, el sitio de muestreo en el que se observaron los mayores valores. En el manglar la media de la tasa de calcificación fue de 0.0003 $\text{g CaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$ y sus valores oscilaron 0.0001 y 0,0004 $\text{g CaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$. Al aplicar una prueba t-Student ($t=1.33$; $gl=10$; $p<0.05$) se comprobó que no existían diferencias significativas entre la tasa de calcificación de ambos biotopos (Fig. 5).

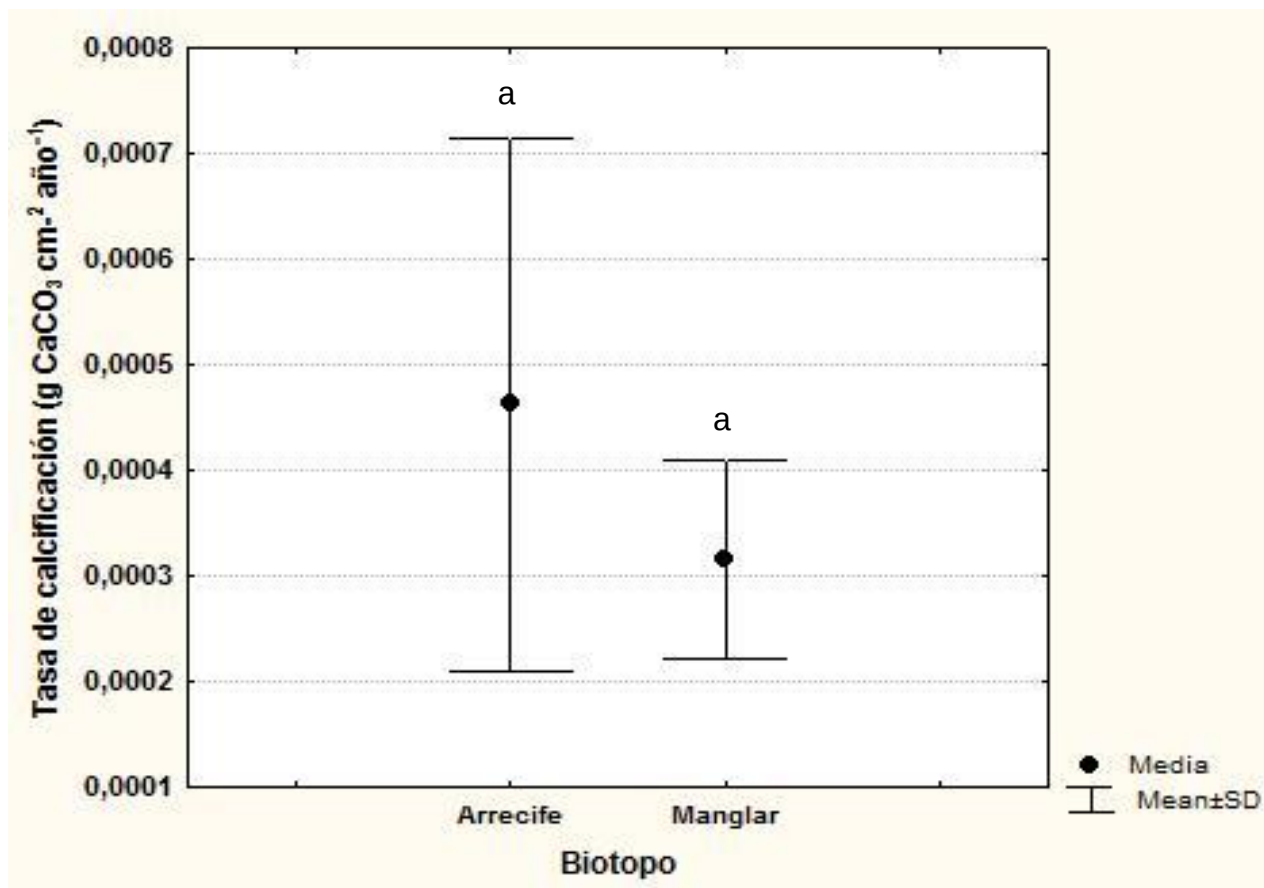


Figura 5: Comparación entre las medias y las desviaciones estándar de las tasas de calcificación de los biotopos de muestreo.

4.2 Identificación de los grupos funcionales ecológicos y clasificación según su mineralogía de CaCO₃

Como resultado del análisis fotográfico, se establecieron siete grupos de taxa, correspondientes a los organismos y estructuras adheridas a las superficies de las placas. Los mismos fueron agrupados en cuatro grupos funcionales y a su vez clasificados según la mineralogía del esqueleto de CaCO₃ teniendo en cuenta los criterios de (Tucker y Wright, 1990, Smith *et al.*, 2012, Goldberg, 2013) (Tabla VI)

Tabla VI. Grupos funcionales encontrados en las superficies de las placas y su clasificación de mineralogía de CaCO_3 .

Grupos Funcionales	Taxa	Mineralogía de CaCO_3
Algas costrosas coralinas (CCA)	CCA blancas	Mg-Calcita
	CCA rozadas	Mg-Calcita
CaCO_3 /Sedimento	Ramificación de arena	Aragonita
	Sedimento	Aragonita
Turf	Turf	NC
Sin Calcio (NC)	Incrustaciones naranjas	NC
	Huevos invertebrados	NC

Después de los análisis del porcentaje de cubrimiento de los grupos funcionales en las superficies de las placas, se observó que en el sitio del manglar fue donde se identificó mayor cantidad de grupos funcionales. En el arrecife se obtuvo el mayor valor de cubrimiento, con un 49,87 % de cubrimiento aportado por las algas costrosas coralinas (CCA) y en el manglar el menor, correspondiente al grupo funcional de CaCO_3 /Sedimento con un 3,47% de incrustación. El grupo funcional césped se encontró en los dos biotopos, en el manglar con un 24,68 % siendo mayor que en el arrecife que presentó solamente un 8,47% de cubrimiento. Los valores de los grupos funcionales CCA y Sin Calcio en el manglar se encontraron por debajo del 10% con valores de 7.37% y 9,72% respectivamente (Fig. 6).

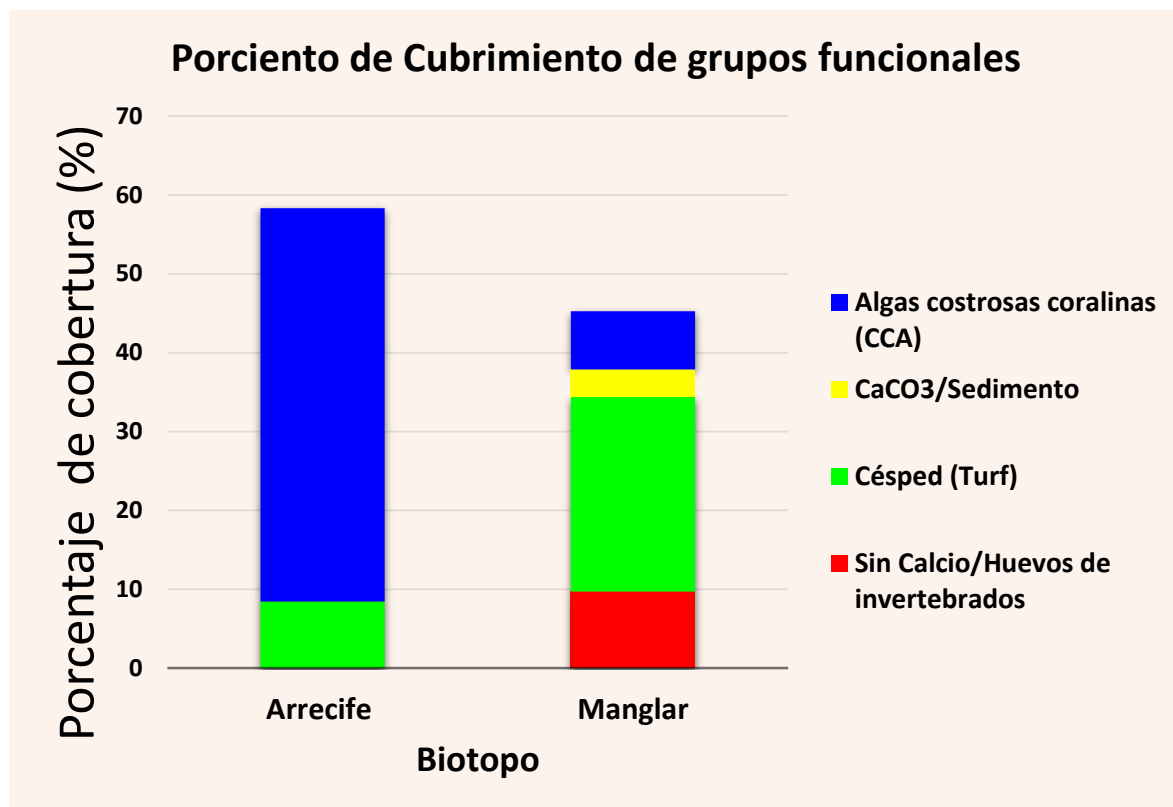


Figura 6: Porcentaje de Cubrimiento de los grupos funcionales en las superficies de las placas.

Los resultados del porcentaje de cobertura, de los grupos funcionales que coincidieron en los dos biotopos investigados, fueron analizados estadísticamente determinando sus medias y las desviaciones estándar. Cada grupo funcional fue analizado por la prueba de t- Student para comprobar la existencia de diferencias significativas entre los biotopos investigados (Tabla VII).

Tabla VII: Tabla estadística descriptiva de los grupos funcionales y resultado de la prueba de t- Student.

Grupos funcionales	Media Arrecife	Media Manglar	Desviación estándar Arrecife	Desviación estándar Manglar	t-value	p
CCA	49,9	7,4	11,87	4,80	8,13	0,05
Césped	8,5	24,7	4,09	19,11	-2,03	0,05

El grupo funcional con porcentaje de cobertura estadísticamente diferente entre los sitios estudiados es el representado por las algas costrosas coralinas (CCA), mientras el grupo funcional césped (turf) no presentó diferencias en su porcentaje de cobertura entre los dos biotopos estudiados (Fig. 7 y 8).

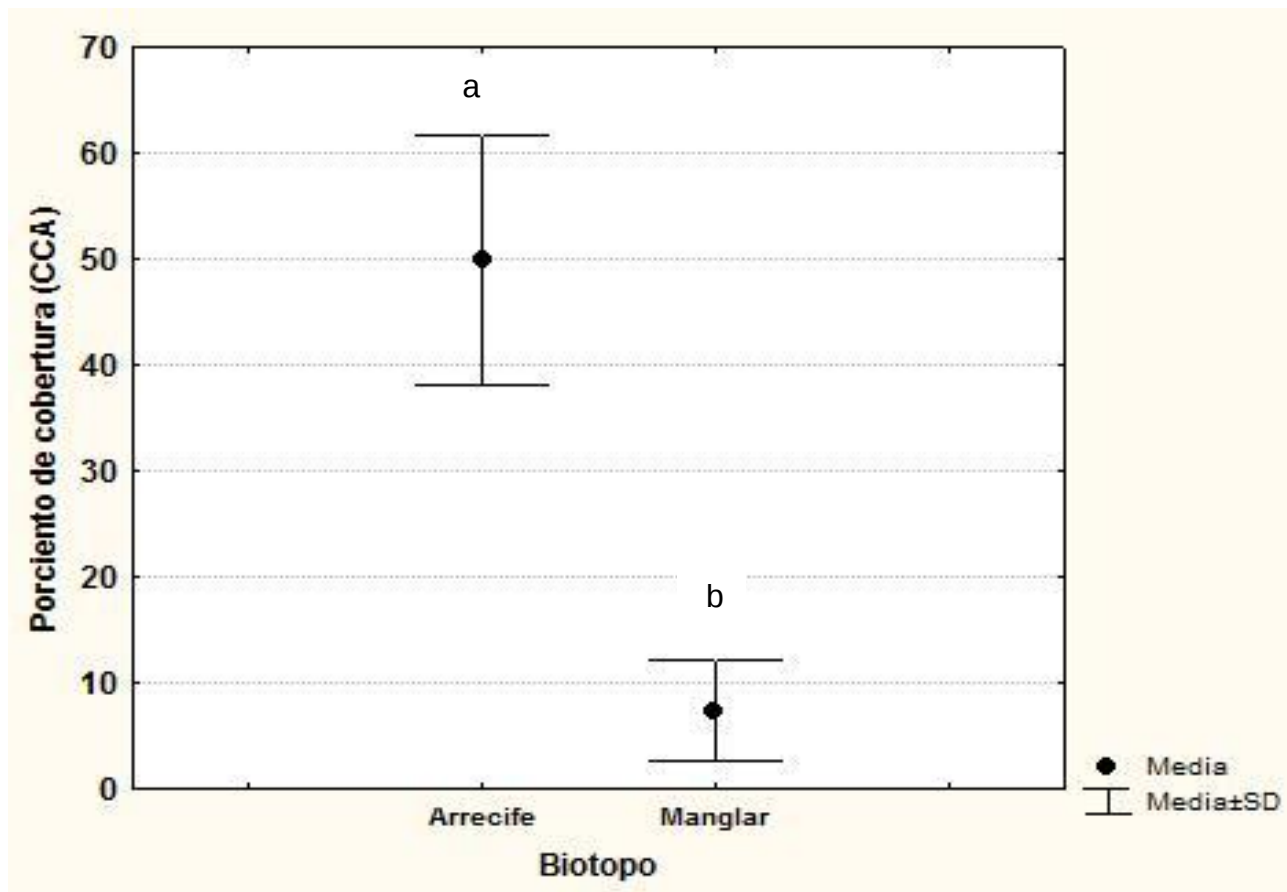


Figura 7 Gráfico de la media y desviación estándar del grupo funcional (CCA) adheridos a las superficies de las placas de colectas.

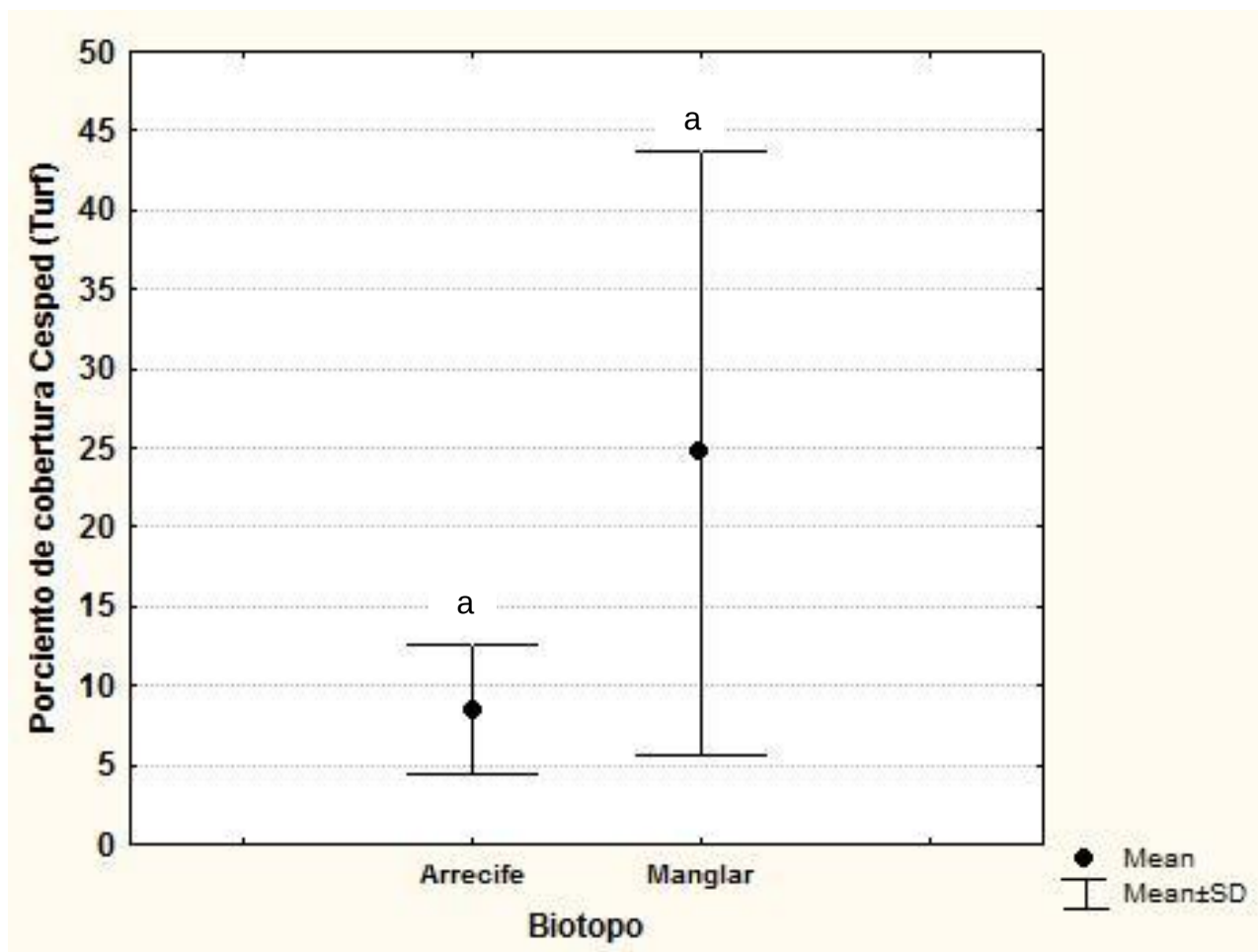


Figura 8: Gráfico de la media y desviación estándar del grupo funcional (turf) adheridos a las superficies de las placas de colectas.

Con respecto al porcentaje de mineralogía de CaCO_3 , sobre las superficies de las placas, se observó una mayor variedad de este mineral en el manglar. En el arrecife fue donde se registró el mayor porcentaje de incrustación de magnesita con un 49.84 % mientras en el manglar solo se registró el 7.37% del mismo compuesto. En el manglar fue donde único se encontró aragonita, aunque en pequeña medida con un valor de 3.47% de incrustación. En los dos biotopos se observaron estructuras sin carbonato de calcio, principalmente en el manglar con un 34.40 % de cubrimiento representada principalmente por los huevos de los invertebrados y en el arrecife solamente un 8.47% correspondiente al grupo funcional (césped) (Fig. 9).

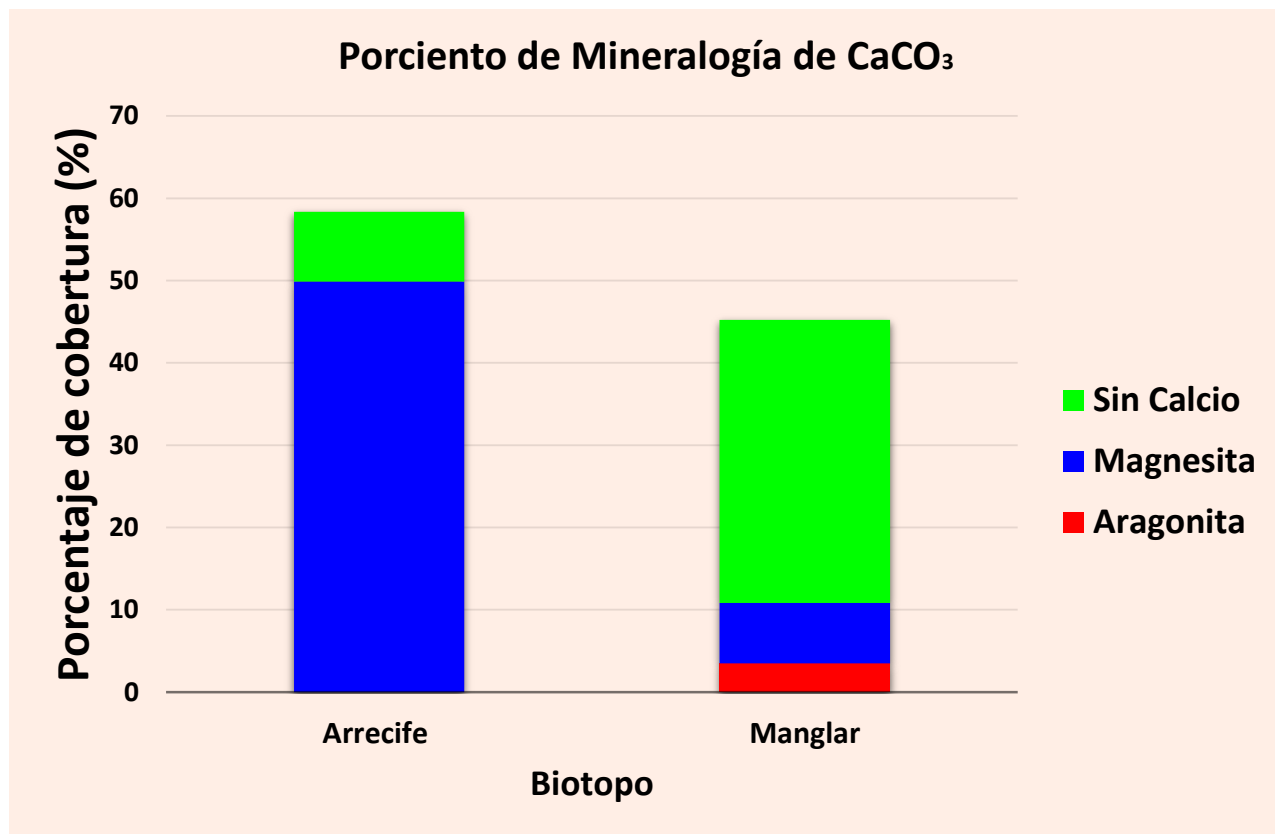


Figura 9: Porcentaje de la mineralogía de CaCO_3 en la superficie de las placas.

5 DISCUSIÓN

5.1 Cuantificación de la tasa de calcificación en ecosistemas arrecifales de Rancho Luna en Cienfuegos

Colectas de muestras de agua

Las variables ambientales que más influyen en el crecimiento coralino son la luz, la sedimentación, la concentración de nutrientes, el estado de saturación de la aragonita ($\Omega_{\text{aragonita}}$), el pH y la temperatura superficial del mar (Kuffner *et al.*, 2013, Bernardo *et al.*, 2015). El análisis de los resultados de las muestras de agua y de las variables descriptivas del sistema de los carbonos en agua de mar, mostraron que los biotopos analizados, se encontraban en óptimas condiciones para la formación de estructuras de carbonato de calcio.

La aragonita al ser más soluble que la calcita, su estado de saturación (omega aragonita), puede tomarse como un indicador en el análisis del estado de saturación de carbonato de calcio en agua de mar (Bernardo *et al.*, 2015). Si ($\Omega_{\text{aragonita}} > 1$), el agua esta sobresaturada de carbonato de calcio y las condiciones son favorables para que los organismos puedan formar sus conchas y esqueletos calcáreos (Gattuso *et al.*, 2009, Bernardo *et al.*, 2015). Los valores de las omegas de aragonita y de calcita, obtenidos en los sitios muestreados, se encuentran por encima de uno ($\Omega > 1$); por lo que el agua se encontraba en condiciones óptimas para la calcificación al encontrarse suficiente disponibilidad de iones carbonato.

Cálculo de la tasa de calcificación en ecosistemas marino costero

La cuantificación de la tasa de calcificación de las principales especies formadoras de arrecife permite evaluar el estado en que se encuentran las especies, así como también conocer el estado de salud del arrecife en general (Kuffner *et al.*, 2013). La tasa de calcificación permite hacer reconstrucciones ambientales de los períodos en los que se desarrolla el coral y con esto, inferir en la respuesta del crecimiento coralino ante escenarios climáticos futuros (Kuffner *et al.*, 2013, Bernardo *et al.*, 2015).

Los valores de tasas de calcificación cuantificados en este estudio variaron en dependencia al sitio en donde las placas de colecta fueron posicionadas. Los mayores valores de tasa de calcificación se registraron en el arrecife y esto es debido a las condiciones ambientales existente en este lugar. Las estructuras calcáreas crecen mejor en aguas cálidas, poco profundas, claras, soleadas y agitadas (Bernardo *et al.*, 2015, Medellín *et al.*, 2016). Estas condiciones no son las existentes en el manglar debido a la poca iluminación en el agua, producto al follaje del mangle, así como la turbulencia del agua,

por la presencia de sedimento y los altos niveles de nutrientes, característico de este sitio (González *et al.*, 2015)

La mayor parte de la producción de CaCO_3 en el mar se les atribuye a los arrecifes por la formación de corales y algas costrosas coralinas (Bernardo *et al.*, 2015). Estas últimas, fueron las de mayor aporte de CaCO_3 en la cuantificación de las tasas de calcificación de este estudio. En el arrecife, la incrustación de las algas costrosas coralinas en las placas de colecta fue superior y esto se debe a que estos organismos son fotosintéticos y requieren de aguas limpias y bien iluminadas para crecer y calcificarse (Bernardo *et al.*, 2015, Gazeau *et al.*, 2015).

Después de analizar estadísticamente los valores de tasas de calcificación, se comprobó que no existían diferencias significativas entre los biotopos muestreados. A este resultado se le atribuye el factor tiempo principalmente, ya que, al comparar nuestros resultados con investigaciones similares, donde el tiempo de exposición es mayor, se observan diferencias entre tasas de calcificación de los biotopos analizados (Tabla VIII).

Tabla VIII: Tabla comparativa entre las tasas de calcificación en diferentes biotopos.

Sitio	Tiempo de exposición	Tasa de calcificación	
		($\text{gCaCO}_3 \times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$)	Referencia
Arrecife	69 días	0,0005	Este Estudio
Manglar	69 días	0,0003	Este Estudio
Arrecife	2 años	0,251	Bernardo <i>et al.</i> , 2015
Laguna	2 años	0,004	Bernardo <i>et al.</i> , 2015

Los corales se desarrollan a un ritmo lento, tanto que crecen entre 5 y 25 mm por año aproximadamente (Kuffner *et al.*, 2013). Por lo que el tiempo es un factor fundamental en la cuantificación de tasa de calcificación. En condiciones favorables para el proceso de calcificación a mayor tiempo, mayor tamaño de las estructuras calcáreas formadas. El hecho de que no se hayan encontrado diferencia entre las tasas de calcificación, no significa que no existan. Esto se explica al analizar las diferencias entre los valores de porcentaje de cobertura de las algas costrosas coralinas, las cuales, fueron las principales

aportadoras de CaCO_3 . Este análisis demuestra que existen diferencias significativas entre los sitios de muestreo con respecto al cubrimiento de algas costrosas coralinas (Fig. 10). Por lo que una investigación con mayor tiempo de exposición es necesaria, para lograr cuantificar la diferencia entre los biotopos arrecife y manglar con respecto a la tasa de calcificación.

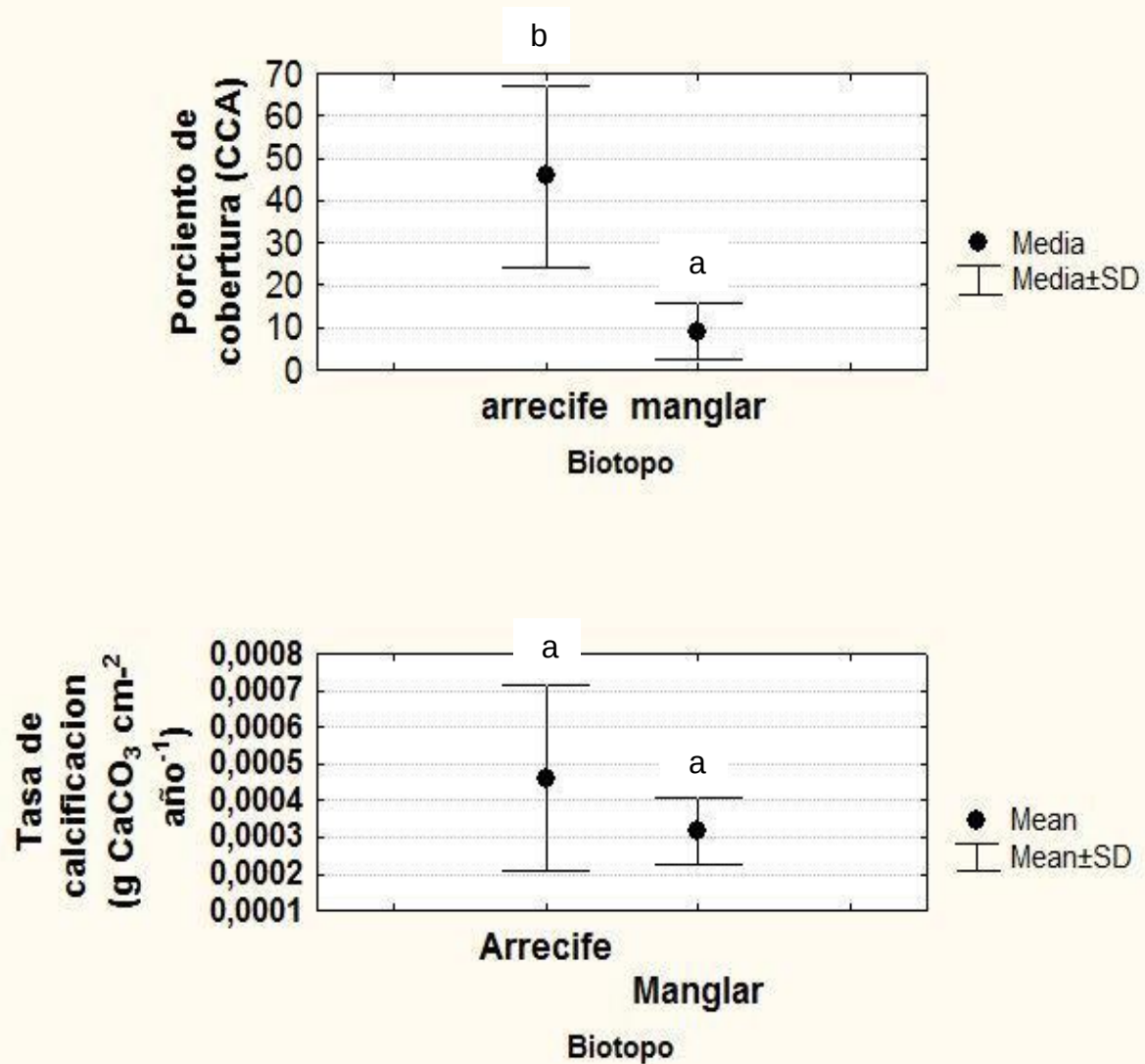


Figura 10: Comparación entre el análisis estadístico de porcentaje de cobertura de las algas costrosas coralinas CCA y las tasas de calcificación en los biotopos arrecife y manglar.

5.2 Identificación de los grupos funcionales ecológicos y clasificación según su mineralogía de CaCO_3

La sucesión ecológica en términos generales, se puede definir como el proceso de desarrollo de un ecosistema a través del tiempo. Todos los ecosistemas naturales, tienen una tendencia hacia un cambio dinámico en el tiempo, que es consecuencia de fuerzas que irrumpen desde el exterior y de procesos de desarrollo generados dentro del sistema (González *et al.*, 2015). La literatura ecológica distingue, dependiendo de las condiciones específicas de sitio al inicio del proceso, dos tipos básicos de sucesión: primaria y secundaria.

La sucesión primaria implica el desarrollo de comunidades bióticas a partir de un área estéril, donde las condiciones de existencia no son favorables, en un principio, por la falta de un suelo verdadero. La sucesión secundaria, es mucho más frecuente en la naturaleza que la primaria. Se inicia en un área donde hubo ocupación previa de organismos vivos, donde el ecosistema empieza un proceso de desarrollo a lo largo del cual progresa desde comunidades inmaduras, inestables, rápidamente cambiantes, a comunidades más maduras y estables (Odum, 1998).

Los grupos funcionales encontrados en las superficies de las placas de colecta, corresponden con los taxa de sucesión temprana en la formación del arrecife (Bernardo *et al.*, 2015). Estos fueron los primeros organismos en depositarse en un área estéril (las placas) para la formación de un pequeño ecosistema el cual se encuentra en sucesión primaria. Para que se formen estructuras coralinas y este pequeño ecosistema pase a una sucesión secundaria es preciso de más tiempo ya que los corales se desarrollan a un ritmo lento.

Las algas costrosas coralinas desempeñan un papel fundamental en el desarrollo del arrecife, estas atraen a las larvas de coral, sirven como fuente de alimento a animales de arrecife y ayudan a remendar esqueletos de coral rotos creciendo entre las roturas (Kuffner *et al.*, 2013). Este tipo de alga son las principales calcificadoras del arrecife siendo más importante que la calcificación por los corales (Bernardo *et al.*, 2015, Jokiel *et al.*, 2008), al actuar como pegamento o cemento de la superficie del arrecife y liberando sustancias químicas para su desarrollo (Bernardo *et al.*, 2015). Las algas costrosas, son fotosintéticas y requieren de aguas limpias y bien iluminadas para crecer y calcificarse. De ahí que el mayor porcentaje de cobertura de este tipo de algas se obtuviese en el arrecife, debido a las condiciones ambientales del mismo. El análisis estadístico del porcentaje de cubrimiento de algas costrosas coralinas, demostró la existencia de diferencias significativas entre los dos biotopos muestreados, lo que pudiera estar determinado por condiciones ambientales existentes en el arrecife, las cuales, favorecen el crecimiento de estructuras calcáreas.

La gran diversidad biológica que podemos encontrar en un ecosistema marino-costero, suele tener buena parte de su origen en las complejas interacciones entre éste y los ecosistemas vecinos (González *et al.*, 2015). Las hojas secas y ramas de muchos de los árboles y arbustos que componen el bosque de manglar caen al agua espontáneamente o forzadas por las lluvias y el viento. Allí se disponen entre el enrejado de raíces donde son usadas como sustrato, refugio e ingeridas como alimento por disímiles organismos hasta ser completamente destruidas con la ayuda de los organismos comedores de depósito, microorganismos y bacterias. Todo ello permite que estos fondos del manglar sean ricos en nutrientes derivados de la descomposición de la materia orgánica generada por el bosque y los organismos que en él habitan (González *et al.*, 2015).

Niveles más altos de nutrientes facilitan la proliferación de macroalgas de rápido crecimiento (algas de césped), que pueden superar fácilmente a los organismos calcificadores de arrecifes en cuanto a espacio y recursos (González *et al.*, 2015). Esto último explica que en el manglar el porcentaje de cobertura del grupo funcional (césped), haya sido mayor que el del arrecife; así como también el bajo porcentaje de algas costrosas coralinas. Bajo las raíces de los árboles que conforman los manglares se inmoviliza una gran cantidad de materia orgánica, sedimentos y sirven como áreas de reproducción y crianza de especies que forman parte del ecosistema del arrecife (Odum, 1998, González *et al.*, 2015); lo que explica las incrustaciones de huevos de invertebrados en las placas expuestas en el manglar, correspondientes al grupo funcional Sin calcio. La erosión del material acumulado por las raíces de los mangles debido a las olas y las mareas favorece el incremento de los sedimentos suspendidos en la columna de agua, lo que justifica el porcentaje de sedimento en el manglar.

En el análisis de la clasificación de la mineralogía de CaCO_3 de los grupos funcionales, se obtuvieron dos formas cristalinas de CaCO_3 , la aragonita, correspondiente al porcentaje de cobertura de sedimento y la magnesita el cual fue el polimorfo de carbonato de calcio dominante en los dos sitios de muestreo. Esto es de esperar, ya que las algas costrosas coralinas (CCA) que precipitan magnesita, representaron el principal grupo funcional calcificante adherido a las placas de colecta.

La acidificación oceánica puede afectar profundamente la función del arrecife de coral en múltiples niveles ecológicos: desde el reclutamiento de las algas costrosas coralinas (CCA) y los organismos que dependen de ellos para el asentamiento (González *et al.*, 2015), a la producción, estabilización y la cementación del marco del arrecife y los sedimentos de carbonato (Odum, 1998, Bernardo *et al.*, 2015). Las algas crustosas coralinas son una de las especies más susceptibles del arrecife ante la acidificación de los océanos (Bernardo *et al.*, 2015). En condiciones acidificadas, pueden perder su ventaja

competitiva como taxón calcificante dominante de la comunidad sucesión temprana del arrecife impidiendo el desarrollo y crecimiento del mismo.

En este estudio se encontró que las algas costrosas coralinas representaron al grupo ecológico que aportó mayor porcentaje de cobertura y fue el mayor contribuyente a la formación de CaCO_3 , si además consideramos que este grupo es formador de magnesita que a su vez es más soluble ante condiciones de acidez, entonces podemos considerar al grupo de las algas costrosas coralinas como el grupo más vulnerable a los efectos de la acidificación en el área estudiada.

6 CONCLUSIONES

1. En el área de Rancho Luna, el valor medio de la tasa de calcificación del arrecife fue al del manglar.
2. Se obtuvieron cuatro grupos funcionales, siendo las algas costrosas coralinas (CCA) las de mayor porcentaje de cobertura en el arrecife y el césped el de mayor porcentaje en el manglar.
3. La magnesita fue el polimorfo de CaCO_3 dominante, en los dos biotopos analizados.

7 RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios con un mayor tiempo de exposición de los dispositivos en los sitios de estudio.
2. Investigar sobre las principales especies calcificadoras de los sitios de muestreo para su clasificación de mineralogía de CaCO_3 .
3. Realizar investigaciones en otros ecosistemas arrecifales del país para la comparación de las tasas de calcificación.
4. Aumentar las mediciones de las variables descriptivas de los carbonos en los análisis de agua.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albright, R. y Langdon, C. (2011) Ocean acidification impacts multiple early life history processes of the Caribbean coral *Porites astreoides*. *Global Change Biology*. 17: 2478-2487.
- Andersson, A., Mackenzie, F. y Bates, N. (2008) Life on the margin: implications of ocean acidification on Mgcalcite, high latitude and cold-water marine calcifiers. *Marine Ecology Progress Series*. 373: 265-273.
- Anthony, K., Kleypas, J. y Gattuso, J. (2011) Coral reefs modify their seawater carbon chemistry-implications for impacts of ocean acidification. *Global Change Biology*. 17: 3655-3666.
- Anthony, K., Kline, D., Diaz-Pulido, G., Dove, S. y Hoegh-Gouldberg, O. (2008) Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. *Proceedings Natural Academic Science*. 105: 42-46.
- Bates, N., Amat, A. y Andersson, A. (2014) Feedbacks and responses of coral calcification on the Bermuda reef system to seasonal changes in biological processes and ocean acidification. *Biogeosciences*. 7: 3-15.
- Bernardo, A., Cristi, L., Richards, J., Peter, S. y Nichole, N. (2015) Baseline Assessment of Net Calcium Carbonate Accretion Rates on U.S. *Plos One*. 12: 3-25.
- Bosence, D. (1983) Coralline algal reef frameworks. *Geol Soc London*. 140: 365-376.
- Brinkman, T. y Smith, A. (2015) Effect of climate change on crustose coralline algae at a temperate vent site, White Island, New Zealand. *Mar. Freshwater Res*. 66: 360-370.
- Cifuentes, J. y Cupul, F. (2014) *Temas sobre Investigaciones Costeras*. Universidad de Guadalajara, Mexico. 317 pp.
- Cooley, S. y Kite-Powell, H. (2009) Ocean acidification's potential to alter global marine ecosystem services. *Oceanography*. 4: 172-181.
- Decet, A., Reyes, E. y Suárez, M. (2015) Calcium carbonate precipitation: A review of the carbonate crystallization process and applications in bionspired composites. *Plos One*. 11: 1-15.
- Doney, S., Fabry, V., Feely, R. y Kleypas, J. (2009) Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Science*. 223: 169-192.
- Doropoulos, C., Ward, S., Diaz, P. y Hoegh, G. (2012) Ocean acidification reduces coral recruitment by disrupting intimate larval-algal settlement interactions. *Ecology Letters*. 15: 338-346.
- Dufault, A., Cumbo, V., Fan, T. y Edmunds, P. (2012) Effects of diurnally oscillating pCO₂ on the calcification and survival of coral recruits. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences*. 1740: 2951-2958.

- Erez, J., Reynaud, S., Silverman, J., Schneider, K. y Allemand, D. (2011) *Coral calcification under ocean acidification and global change*. Coral reefs; an ecosystem in transition. New York, Springer Press. 176 pp.
- Fabricius, K., De'ath, G., Noonan, S. y Uthicke, S. (2013) Ecological effects of ocean acidification and habitat complexity on reef-associated macroinvertebrate communities. *Proceedings Natural Academic Science*. 282: 24-79.
- Feely, R., Calderón, L. E., Reyes Bonilla, H. y D., C. J. (2004) Impacts of Anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ System in the Oceans. *Science*. 305: 360-374.
- Feely, R. y Doney, C. (2009) Ocean acidification: present conditions and future changes in a highCO₂ world. *Oceanography*. 22: 37-47.
- Gattuso, J., Martin, S. y Cruz, H. (2009) Response of Mediterranean coralline algae to ocean acidification and elevated temperature. *Global Change Biology*. 26-35.
- Gattuso, J. P., Allemand, D. y Frankignoulle, M. (2007) Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification. *Geophys Res Lett*. 34: 32-65.
- Gazeau, F., Urbini, L., Cox, T. E. y Gattuso, J. (2015) Comparison of the alkalinity and calcium anomaly techniques to estimate rates of net calcification. *Marine Ecology Program Service*. 527: 1-12.
- Goldberg, W. (2013) *The biology of reef organisms*. University of Chicago Press, Chicago. 546 pp.
- González, S., Martínez, B. y Cano, M. (2015) *Ecosistemas de manglar en el archipiélago cubano. Manglares, pastos marinos y arrecifes coralinos*. Editorial Academia Cuba. 206-278 pp.
- Hoegh-Guldberg, O., Bruno, J., Mumby, P. y Hooten, A. (2007) Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318: 37-42.
- Hoffman, G., Barry, J., Edmunds, P., Gates, R. y Hutchings, D. (2010) The effect of ocean acidification on calcifying organisms in marine ecosystems: and organism to ecosystem perspective. *Annual Review of Ecology Science* 41: 127-147.
- Houghton, J., Meira Filho, L., Callander, B., Harris, N. y Kattenberg, A. (1996) *The science of climate change*. Cambridge Univ. Cambridge; Press,. 526 pp.
- Iglesias, M. y Rodriguez, D. (2014) Phytoplankton Calcification in a High-CO₂ World. *Science*. 320: 336-340.
- Jokiel, P. (2011) Ocean acidification and control of reef coral calcification by boundary layer limitation of proton flux. *Marine Science*. 87: 633-657.
- Jokiel, P., Rodgers, K., Kuffner, I., Andersson, A., Cox, E. y Mackenzie, R. (2008) Ocean acidification and calcifying reef organisms: a mesocosm investigation. *Coral Reefs*. 27: 473-483.
- Kleypas, J., Buddemeier, R., Archer, D., Gattuso, J. y Langdon, C. (1999) Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*. 284: 118-120.

- Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L. y L., R. (2006) *Coral reefs and changing seawater carbonate chemistry*. Science and Management, Coast. Estuar. Washington. 73-110 pp.
- Klumpp, D. y Mckinnon, A. (1992) Community structure, biomass and productivity of epilithic algal communities on the Great Barrier Reef: dynamics at different spatial scales. *Marine Biology Ecological*. 86: 77-89.
- Kuffner, I., Hickey, J. y Morriso, B. (2013) Calcification rates of the massive coral *Siderastrea siderea* and crustose coralline algae along the Florida Keys (USA) outer-reef tract. *Coral Reefs*. 8: 1-16.
- Kurihara, H., Matsui, M., Furukawa, H. y Hayashi, M. (2008) Long-term effects of predicted future seawater CO₂ conditions on the survival and growth of the marine shrimp *Palemon pacificus*. *Marine Biology Ecological*. 367: 41-46.
- Lavigne, H., Epitalon, J. M. y Gattuso, J. P. (2014) *Seacarb: seawater carbonate chemistry with R. R package version 3.0*. [En línea] Disponible desde. [Consultado].
- Lee, D. y Carpenter, S. (2001) Isotopic disequilibrium in marine calcareous algae. *Chemistry Geology* 172: 307-329.
- Manzello, D. P. (2010) Coral growth with thermal stress and ocean acidification: lessons from the eastern tropical Pacific. *Coral Reefs*. 29: 749-758.
- Martin, S. y Gattuso, J. (2009) Response of Mediterranean coralline algae to ocean acidification and elevated temperature. *Global Change Biology*. 15: 2089-2100.
- Medellín, F., Cabral, F. A., López, A. y Calderón, L. (2016) Calcificación de las principales especies de corales constructoras de arrecifes en la costa del Pacífico del sur de México. *Ciencias Marinas*. 42: 209-225.
- Meehl, G., Stocker, T., Collins, W., Friedlingstein, P., Prmandou, T. y Gaye, A. (2008) *The physical science basis: contribution working group 1, 4th assessment report of the Intergovernmental*. Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge,. 747-845 pp.
- Miller, J., Maragos, J., Brainard, R. y Asher, J. (2010) The State of Coral Reef Ecosystems of the Pacific Island Remote Areas. *Biogeography*. 73: 353-386.
- Morse, J., Anderson, A. y Mackenzie, F. (2006) Initial responses of carbonate-rich sediments to rising atmospheric pCO₂ and ocean acidification: role of high Mg-calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 40: 14-30.
- Nelson, W. (2009) Calcified macroalgae-critical to ecosystems and vulnerable to change: a review. *Marine Freshwater Res*. 60: 787-801.

- Nichole, N., Todd, R., Russell, E., Price, E. y Smith, N. (2012) Diel Variability in Seawater pH Relates to Calcification and Benthic Community Structure on Coral Reefs. *Plos One*. 7: 2-15.
- Odum, E. (1998) *Desarrollo del Ecosistema y Evolución*. En: *Ecología*. Compañía Editorial Continental SA. Vigésima, México,. 185-207 pp.
- Orr, J., Fabry, V., Aumont, O., Bopp, L. y Doney, S. (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*. 437: 681-686.
- Orr, J. (2011) *Recent and future changes in ocean carbonate chemistry*. Ocean Acidification, New York: Oxford Univ. Press. 686 pp.
- Pörtner, H., Langenbuch, M. y Michaelidis, B. (2005) Synergistic effects of temperature extremes, hypoxia, and increases of CO₂ on marine animals from Earth history to global change. *Geophys. Res.* 110: 10-36.
- Price, N. (2010) Habitat selection, facilitation, and biotic settlement cues affect distribution and performance of coral recruits in French Polynesia. *Oecologia*. 163: 747-758.
- Sabine, C. L., Feely, R., Gruber, N., Key, R., Lee, K. y Bullister, J. (2004) Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂. *Science*. 305: 367-371.
- Sheppard, C. R., Davy, S. K. y Pilling, G. M. (2009) *The Biology of Coral Reefs, Oxford, Oxford University Press*. Oxford, Oxford University Press. 457 pp.
- Smith, A. M., Sutherland, J., Kregting, L. y Winter, D. J. (2012) Phylomineralogy of the coralline red algae: correlation of skeletal mineralogy with molecular phylogeny. *Phytochemistry*. 81: 97-108.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S. y Boschung, J. (2013) Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *The Physical Science Basis*. 38: 15-35
- Tanhua, T., Bates, N. y Körtzinger, A. (2013) *The Marine Carbon Cycle and Ocean Carbon Inventories*. Ocean Circulation and Climate, International Geophysics Series 103. Academic Press, Oxford;. 787-815 pp.
- Tucker, M. E. y Wright, V. P. (1990) *Carbonate sedimentology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 563 pp.
- Tyrell, T. (1999) Optical Impacts of Oceanic Coccolithopore Blooms. *Journal of Geophysical Research*. 104: 3323-3341.
- Vroom, P. y Smith, C. (2001) The challenge of siphonous green algae. *American Scientist*. 89: 524-531.
- Vroom, P. y Smith, C. (2003) Life without cells. *Biologist*. 50: 222-226.