



**INDICADORES RELACIONADOS CON EL CAMBIO CLIMÁTICO PARA
MONITOREAR LA RESTAURACIÓN DE ARRECIFES DE CORAL – Caso de Estudio
para Isla Fuerte, Colombia**

CARLOS ALEJANDRO CRUZ MARTINEZ

Director:

FABIO GÓMEZ DELGADO MSC.

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES
CARRERA DE ECOLOGÍA**

BOGOTÁ, D. C.

2021

RESUMEN.

La vulnerabilidad humana y ecosistémica causada por el cambio climático es una condición que se ha hecho cada vez más presente en los últimos años, especialmente en las comunidades que viven en zonas cercanas a las costas, donde las dinámicas sociales, económicas y hasta servicios ecosistémicos se han visto afectados negativamente, entrando así en un ciclo de aumento constante en el riesgo por eventos oceano-climáticos. Una de las estrategias más ambiciosas para reducir la vulnerabilidad en este tipo de comunidades, es la restauración de los diferentes ecosistemas marinos y costeros como son los arrecifes de coral que aparte de ser focos de diversidad tienen el potencial de servir como barreras físicas para proteger de estos eventos extremos oceano-climáticos.

La restauración de ecosistemas coralinos como estrategia para la adaptación a los efectos del cambio climático, presenta como reto la determinación y validación de las ganancias netas positivas de esta estrategia, en términos de biodiversidad y de reducción de la vulnerabilidad humana, que permitan abrir la posibilidad a nuevos proyectos de construcción de trabajos similares, como la realización de estándares de clima, comunidad y diversidad marina (CCBM) que no existen a nivel mundial.

Este documento incorpora 10 indicadores recopilados y contruidos a partir de diferentes trabajos institucionales como el CIOH, IDEAM e INVEMAR. Paralelamente se propuso para cada uno de ellos una escala de valor que permite establecer las ganancias netas de la restauración a partir de la línea base. Estos indicadores fueron divididos en tres grupos, físicos (5), químicos (3) y socioeconómicos (2).

Paralelamente se hace una propuesta para medir estos indicadores desde la línea base en los tres tipos de ubicaciones que todo proyecto de restauración debe incluir (Ecosistemas de Referencia, Restauración y Control), además de en los diferentes monitoreos.

Para cada indicador se definieron las variables que lo componen, la fórmula matemática para calcularlos y la escala de valores para interpretar resultados, la cual va acompañada de una escala visual de colores que permite concluir en qué estado se encuentra la variable evaluada en el tiempo a través de los monitoreos, la “Naturaleza del Indicador” como herramienta para clasificar el indicador según la necesidad de medición en términos temporales y/o espaciales, también cada indicador cuenta con una metodología diseñada para facilitar y garantizar el monitoreo, y las limitaciones que algunos pudieran presentar.

Cada indicador es discutido independientemente justo debajo de la tabla correspondiente, bajo el subtítulo “Justificación del indicador”.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVOS.....	10
a. Objetivo General.....	10
b. Objetivos Específicos.....	10
3. MARCO TEÓRICO.....	11
a. Marco Conceptual.....	11
i. Corales y Servicios Ecosistémicos.....	11
ii. Tiempo, Clima e Indicadores Climáticos.....	12
iii. Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático.....	13
b. Área de Estudio.....	13
i. Contexto Geográfico.....	13
ii. Contexto Biofísico.....	14
iii. Contexto Socioeconómico.....	14
c. Ubicaciones de Estudio.....	15
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
5. RESULTADOS.....	19
a. Propuesta Metodológica para la Medición de los Indicadores.....	19
b. Naturaleza de los Indicadores.....	20
i. Naturaleza del Indicador “A”.....	20
ii. Naturaleza del Indicador “B”.....	21
iii. Naturaleza del Indicador “C”.....	22
c. Propuesta Estaciones de Monitoreo Fijas.....	22
i. Estación de Monitoreo Laguna.....	23
ii. Estación de Monitoreo Cresta.....	24
iii. Estación de Monitoreo Contrafuerte.....	24
d. Indicadores Físicos.....	25
i. Cambio en la Temperatura Oceánica Anual Superficial.....	25
1. Justificación del Indicador.....	25
2. Naturaleza del Indicador.....	25

3.	Metodología para la Medición del Indicador.	26
4.	Limitantes del Indicador.	26
ii.	Frecuencia del Oleaje en Laguna-Cresta-Contrafuerte.	26
1.	Justificación del Indicador.	27
2.	Naturaleza del Indicador.	27
3.	Metodología para la Medición del Indicador.	27
4.	Limitantes del Indicador.	27
iii.	Diferencias de Altura del Oleaje en Laguna-Cresta-Contrafuerte.	28
1.	Justificación del Indicador.	28
2.	Naturaleza del Indicador.	29
3.	Metodología para la Medición del Indicador.	29
4.	Limitantes del Indicador.	29
iv.	Comparación Energética del Oleaje en Laguna-Cresta-Contrafuerte.	29
1.	Justificación del Indicador.	30
2.	Naturaleza del Indicador.	30
3.	Metodología para la Medición del Indicador.	30
4.	Limitantes del Indicador.	30
v.	Perfiles Costeros por Erosión Oceánica.	31
1.	Justificación del Indicador.	31
2.	Naturaleza del Indicador.	32
3.	Metodología para la Medición del Indicador.	32
4.	Limitantes del Indicador.	32
e.	Indicadores Químicos.	33
i.	Oxígeno Disuelto.	33
1.	Justificación del Indicador.	33
2.	Naturaleza del Indicador.	34
3.	Metodología para la Medición del Indicador.	34
4.	Limitantes del Indicador.	34
ii.	Acidificación de Aguas Marinas.	34
1.	Justificación del Indicador.	35
2.	Naturaleza del Indicador.	35
3.	Metodología para la Medición del Indicador.	35
4.	Limitantes del Indicador.	35
iii.	Sólidos Suspendidos y Sólidos Totales.	36
1.	Justificación del Indicador.	36
2.	Naturaleza del Indicador.	37
3.	Metodología para la Medición del Indicador.	37
4.	Limitantes del Indicador.	37
f.	Indicadores Socioeconómicos.	38
i.	Áreas Protegidas Afectadas.	38
1.	Justificación del Indicador.	38
2.	Naturaleza del Indicador.	39

3.	Metodología para la Medición del Indicador.	39
4.	Limitantes del Indicador.	39
ii.	Familias Ubicadas en Zonas Propensas a Inundaciones.	39
1.	Justificación del Indicador.	40
2.	Naturaleza del Indicador.	40
3.	Metodología para la Medición del Indicador.	40
4.	Limitantes del Indicador.	40
6.	CONCLUSIONES.	41
7.	RECOMENDACIONES.	42
8.	AGRADECIMIENTOS.	43
9.	BIBLIOGRAFÍA.	44
10.	ANEXOS.	51
a.	Ayudas Visuales.	51

1. INTRODUCCIÓN.

Los efectos del cambio climático se han convertido en una problemática a escala global que año a año han ido en aumento, generando estrés y afectando la supervivencia de especies botánicas y animales, la salud de los ecosistemas, y a nivel humano es responsable de vulnerabilidad social y económica. Estos efectos se han visto principalmente en comunidades costeras y los ecosistemas que se encuentran asociados a éstas, como es el caso de manglares, ciénagas y arrecifes de coral, así como en zonas interiores que, aunque están más alejadas de las costas y por lo tanto serían menos vulnerables, los efectos también se hacen presentes y aumentan gradualmente el riesgo a sufrir los efectos negativos (MinAmbiente, 2016; IPCC, 2012).

Un lugar significativo por el alto riesgo a estos efectos es el caso colombiano de Isla Fuerte, cuya condición geográfica, geomorfológica y relativa lejanía de la parte continental de Colombia la hacen un lugar vulnerable a cualquier cambio temporal a largo plazo en términos climáticos, y eventos extremos océano-climáticos impredecibles. En Isla Fuerte también resaltan características de tipo ecológico, como son los ecosistemas marinos, particularmente el caso de los corales, o las diferentes coberturas coralinas mixtas que rodean toda la isla (Díaz, Sánchez & Díaz-Pulido, 1996) las cuales han sido uno de los ecosistemas que más sensibilidad presenta a los efectos del cambio climático y al calentamiento global. A su vez, esta sensibilidad puede ser considerada de alto potencial como una herramienta indicadora para determinar la condición y estado de salud del ecosistema, ya que los corales serían de las primeras especies marinas en evidenciar cambios físicos, fisiológicos y comportamentales frente a cambios en condiciones del agua como el pH, temperatura, sedimentación, energía del oleaje, entre otras (Muller-Parker, D'Elia & Cook, 2015; Nugues & Roberts, 2003).

Pero aparte de servir como indicador para el estado general del ecosistema, los corales prestan gran variedad de servicios y bienes para las comunidades costeras que viven cerca de estos ecosistemas, ya que sirven como una fuente constante y abundante de alimento, pero también otorgan beneficios inmateriales como lugar de recreación, bienestar paisajístico y cultural (Moberg & Folke, 1999; Smith, 1978), pero a esto también se puede adicionar el potencial del arrecife como una fuente de ingresos, obtenido a partir de la venta del exceso de productos de pesca o el turismo de personas externas que estén interesados en estos lugares. Esto ha causado una dependencia en el ser humano, principalmente aquellos viviendo en las costas, lo que ha convertido a los corales en objeto de sobreexplotación, lo que ha comprometido a estos ecosistemas a escala mundial, viendo en decadencia cada vez más los servicios ecosistémicos, económicos y bióticos que previamente prestaban (Paulay, 1997; Richmond, 1993). Estas actividades antrópicas que deterioran la salud de estos ecosistemas están aumentando la vulnerabilidad de los arrecifes como ecosistemas y las comunidades humanas que viven y dependen de éstos (IPCC, 2012).

Los corales, especialmente las formaciones arrecifales que estos construyen son capaces de dar también un beneficio directo a las comunidades costeras al regular de forma eficiente el clima y como este altera las variables relacionadas con el comportamiento del océano, ya que sirven como barreras físicas frente a la energía del oleaje y las corrientes, que reduce el desgaste mecánico en las costas que causa erosión, pero también protege ante tormentas oceánicas y regula algunas características fisicoquímicas del agua como el pH (Ogden, 1988). Otra contribución que los arrecifes de coral tienen en términos ecológicos, es que al ser capaces de modificar o influenciar

el comportamiento de variables oceánicas y climáticas pueden orientar el desarrollo de un paisaje marino único cuando disipan la energía del oleaje, depositando gradualmente sedimentos que sirven para el asentamiento de otros ecosistemas marinos costeros como pastos marinos y manglares (Birkeland, 1985), esto hace que la presencia de estos ecosistemas los haga una fuente importante de diversidad marina, donde se encuentra un tercio de las especies de peces marinos del mundo (McAllister, 1991; Moberg & Folke, 1999).

Debido al deterioro que sufren los corales en ambos frentes (humano y climático) y como esto genera un debilitamiento en las dinámicas y servicios ecosistémicos, pero también aumenta el riesgo en la vulnerabilidad humana es de vital importancia la creación de mecanismos que garanticen la salud y el buen estado de estos ecosistemas, que ayude a contrarrestar este deterioro en las coberturas coralinas de Isla Fuerte, por medio de la siembra de corales como parte de una estrategia de mitigación y adaptación (DGOAT & CAR, 2018). Pero estos procesos de restauración requieren de un constante monitoreo, que permita verificar el éxito del proceso y las ganancias netas en los efectos climáticos buscados, por lo cual este proyecto busca diseñar un set de indicadores climáticos en torno a dicha restauración.

La relevancia de este trabajo permitirá también contribuir a la creación de un estándar de componentes climáticos, sociales y de biodiversidad como el CCB o VCS enfocados a ecosistemas marinos, como arrecifes de coral, donde todos los estándares certificados enfocados en proyectos de desarrollo sostenible y de acción climática son para ecosistemas terrestres cuyas características, dinámicas, interacciones, nivel de amenaza y conservación varían de manera muy significativa a los marinos, por lo que existe este vacío práctico y conceptual donde todo el esfuerzo científico ha sido dirigido a este tipo de ecosistemas y la escasa documentación disponible resultan ser esfuerzos independientes, pero hasta la fecha no existe un estándar que integre los componentes de clima, biodiversidad y comunidad en ecosistemas marinos o CCBM para actividades que se enfoquen en problemáticas ambientales como es mostrar los efectos netos positivos de la restauración de arrecifes de coral como estrategia para disminuir la vulnerabilidad humana y ecosistémica.

2. OBJETIVOS.

a. Objetivo General.

Diseñar y adaptar indicadores climáticos que permitan monitorear los efectos positivos de proyectos de restauración de arrecifes de coral en Isla Fuerte, Colombia.

b. Objetivos Específicos.

- Proponer indicadores que permitan determinar las diferencias en los escenarios climáticos de referencia, restauración y control.
- Crear indicadores climáticos que sean de fácil uso, entendimiento y practicidad para ser medidos por investigadores o personas de Isla Fuerte interesados en el proyecto, sin comprometer la precisión y calidad de los indicadores.

- Establecer una metodología estándar validada por diferentes investigadores para el monitoreo de los indicadores.

3. MARCO TEÓRICO.

a. Marco Conceptual

i. Corales y Servicios Ecosistémicos.

Los **corales** son organismos pertenecientes en su totalidad al filo Cnidaria, pero se diferencian del resto de cnidarios ya que éstos secretan y construyen estructuras complejas a manera de esqueleto formado de carbonato de calcio (CaCO_3), y aunque comparten características del ciclo de vida similares a los demás cnidarios como son los planos o fases de desarrollo de pólipo y medusa (Kayanne, 2016), los corales no se establecen y desarrollan en su etapa adulta de pólipo de manera individual, sino que forman grandes colonias de cientos de miles de pólipos filtradores (NOAA, s.f.).

Otra característica relevante y distintiva de los corales es la presencia de organismos dinoflagelados fotosintéticos llamados zooxanthelas (zooxanthellae), que se encuentran dentro de sus tejidos, más específicamente en su gastrodermis, y tanto los corales como las zooxanthelas tienen una relación mutualista obligada, donde los corales sirven de hábitat para estos organismos y éstos a cambio se encargan de proveer gran cantidad de compuestos resultantes de la fotosíntesis a los corales, como es el oxígeno, carbohidratos simples y aminoácidos. Pero las zooxanthelas también son las responsables de dar a los corales su gran gama de colores (Kinzie et al., 2001). Esta interacción simbiótica actualmente se ve amenazada por los efectos del cambio climático, donde al aumentar las temperaturas oceánicas superficiales muchas de estas zooxanthelas mueren y se produce el blanqueamiento del coral (Baird et al., 2009), que, de durar por periodos prolongados de tiempo, puede causar la mortalidad de los corales, aunque algunas especies de corales son capaces de adaptar su microbiota a eventos de estrés causados por temperatura (Baker et al, 2004).

Las formaciones o congregaciones de gran variedad de especies de corales (principalmente corales duros o pétreos) forman ecosistemas marinos llamados arrecifes de coral que se clasifican en 3 grandes categorías de acuerdo con características físicas e historia de vida (Montaggioni & Braithwaite, 2009):

- Arrecife de franja o costero: Tienen un crecimiento cercano a la costa y siguiendo su dirección (alrededor), donde solo los separa una pequeña laguna interior o un canal de reducido tamaño, cuya formación depende de la cantidad de energía del oleaje y la pendiente que tenga la costa, estos arrecifes son los más rápidos de establecerse (Kennedy & Woodroffe, 2002).
- Arrecife de barrera: Estos arrecifes tienen formaciones continuas, pero se muestran gradientes de crecimiento diferenciados, y se desarrollan de manera paralela a la orilla,

pero están separados de la parte terrestre por una laguna o canal de agua de gran tamaño (Montaggioni & Braithwaite, 2009).

- (Arrecife de) Atolón: Se caracterizan por una formación de anillo completa en la mayoría de los casos, o formaciones discontinuas que siguen patrón de anillo, con una laguna en el interior sin presencia de masas terrestres (Montaggioni & Braithwaite, 2009). Esta formación tiene como origen un volcán submarino al que se adhirieron corales y que después de millones de años solo queda el atolón como estructura resultante (Scoffin & Dixon, 1983).

Grandes comunidades de corales a lo largo de miles o millones de años son capaces de crear ecosistemas de arrecifes de coral, que sirven de fuente de alimentación para múltiples formas de vida marina o que estén asociadas a estos ecosistemas, como es el caso de los seres humanos; adicional a esto están los corales como insumo para investigaciones médicas, y también son un punto clave para el turismo y como objeto de recreación (ICRI et al., 2018).

Todos estos procesos y/o acciones que son causadas en o por los arrecifes de coral en pro de los seres humanos se consideran **servicios ecosistémicos**, que pueden ser de abastecimiento, regulación, apoyo y cultural (MEA, 2005).

Para este trabajo los servicios más importantes son los de regulación, donde se encuentra la protección de costas, generación de arena, regulación en la calidad del agua y el ciclaje biogeoquímico (Woodhead et al., 2019).

La efectividad de los corales para reducir la energía de las olas que llega a la costa se puede ver manifestada en la reducción de la erosión y turbidez del agua antes y luego del coral, sin embargo, la efectividad también puede ser cuantificada para corales en condiciones óptimas de salud, complejidad estructural y de alta diversidad que son capaces de reducir hasta en un 98% la energía del oleaje (Ferrario et al., 2014). Este servicio de regulación puede cuantificarse también en términos económicos, donde los corales junto con otros ecosistemas marinos son responsables del comportamiento de la energía del oleaje, vientos y otras variables océano-climáticas para cerca de 200 millones de personas que viven en zonas costeras, lo cual representa cerca de 4 billones de dólares anuales en daños que se evitan gracias a la regulación ecosistémica de los corales (Ferrario et al., 2014; MEA, 2005, Beck et al., 2005).

ii. Tiempo, Clima e Indicadores Climáticos.

Las complejas interacciones físicas y químicas entre la energía solar, los océanos y a mayor escala, la hidrósfera, criósfera, atmósfera, geósfera y biósfera, es lo que determina las variables climáticas como la humedad, temperatura, nubosidad, viento, etc., pero son estas variables con relación al tiempo en las que se midan, lo que puede dar múltiples interpretaciones (WHO, 2003). Si se determina el cambio de estas variables en una escala de segundos, minutos, horas, días o meses se habla del **tiempo**, éste a su vez se suele trabajar a escalas espaciales muy reducidas como una porción de una ciudad, una propiedad o puntos de una región específicos, mientras que si se monitorea en una escala de años, décadas, siglos y milenios se habla de **clima**, ya que a este nivel de medición se pueden observar tendencias y comportamientos que el tiempo jamás podría mostrar por su alta variabilidad y poco periodo de observación; el clima también funciona a una escala

espacial mayor comprendiendo grandes extensiones de territorio como ecosistemas, países, continentes, mares y océanos (Hurrell, 1995; Lamb, 1995).

Las variables climáticas pueden interpretarse de múltiples maneras en la escala de tiempo que se esté trabajando, pero una herramienta con la que se puede obtener información mucho más compleja son los **indicadores climáticos**, cuyo objetivo es determinar los cambios y tendencias de una variable sencilla o compuesta para un periodo de tiempo y área, por medio de diferentes fórmulas o medidas, resultando en un seguimiento detallado con el que se pueda determinar el estado en que se encuentra esa variable o condición frente a una escala establecida, para ser socializada con la comunidad de una manera más sencilla (Benavides & Rocha, GCOS, 2017; Duncan et al., 2013).

iii. Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático.

Los cambios en los patrones climáticos, y el aumento en la cantidad y magnitud de eventos extremos ha aumentado en los últimos años, y de manera directa se encuentran vinculados a acciones de origen humano cuyo resultado ha sido amenazar la supervivencia de especies, ecosistemas y hasta la misma humanidad. Toda esta serie de cambios que están ocurriendo en cortos periodos de tiempo, hacen que más y más sistemas se vean propensos a ser afectados de manera negativa por eventos océano-climáticos, lo que significa que la probabilidad y exposición de que un evento negativo suceda en una comunidad específica genera **vulnerabilidad** que muchas veces puede verse aumentada por variables como bajo desarrollo socioeconómico (IPCC, 2012; Duncan et al., 2013; Ebi et al., 2018).

Este constante riesgo en muchas comunidades humanas fomenta el uso de recursos y la creación de herramientas como indicadores climáticos que en su constante monitoreo pueden determinar cómo una zona, ecosistema o población, que actualmente se encuentra estable, en un futuro pueda verse en condición de vulnerabilidad climática. Conocer los contextos particulares ayuda a determinar qué tipo de amenazas son más probables, para poder de manera preventiva anticipar, sobrellevar y en algún momento recuperarse de los eventos del cambio climático. Toda esta serie de acciones, medidas o iniciativas que se tengan por parte de la comunidad y los entes gubernamentales, que alteren de alguna manera nuestras prácticas y/o comportamientos con el fin de protegerse o reducir la vulnerabilidad frente al cambio climático, se conocen como estrategias de **adaptación al cambio climático** (DNP, 2012; IPCC, 2012).

b. Área de Estudio.

i. Contexto Geográfico.

Isla Fuerte se encuentra en el área centro-sur de la plataforma continental del Caribe colombiano, a 11 km de la costa frente al departamento de Córdoba (Figura 1), su superficie terrestre no supera los 12 m.s.n.m, tiene una longitud de cerca de 3 km entre sus puntos más extremos y cubre una superficie aproximada de 2.9 km² (Díaz, Sánchez & Díaz-Pulido, 1996; Anderson, 1975).

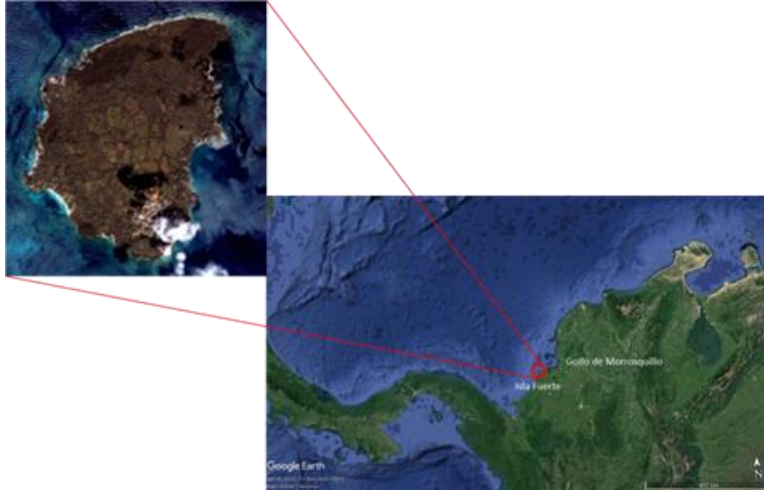


Figura 1. Ubicación de Isla Fuerte, Bolívar (Colombia), obtenido y editado de Google Earth Pro.

ii. Contexto Biofísico.

Isla Fuerte presenta un clima cálido y semiseco, similar al del Golfo de Morrosquillo, con temperatura promedio de aproximadamente 27°C y temperaturas mínimas registradas de 26°C para el mes de octubre y máximas de 29°C para febrero. La temperatura del mar es solo un par de grados mayor que la del aire, con presencia de vientos alisios provenientes del noreste (Javelaud, 1984; IGAC, 1975; DHI, 1958). La influencia de los vientos cambia de acuerdo con la época de año generando la oscilación norte a sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), lo que genera un régimen unimodal de lluvias con una gran estación seca con un máximo de 50 mm/mes de precipitación entre los meses de abril a diciembre, mientras que la época de lluvias ascienden las precipitaciones entre 136 a 146,9 mm/mes.

Principalmente hacia el norte hay presencia de cadenas de coral continua, aunque se puede encontrar presencia de parches de coral a lo largo de toda la periferia de la isla, con presencia de pastos marinos del género *Thalassia* (Diaz, Sanchez & Diaz-Pulido, 1996). Gran cantidad de las actividades agrícolas se llevan a cabo en el centro de la isla y hacia el norte se encuentran parches de bosque de manglar menos alterados.

La influencia de los vientos alisios no solo se evidencia en el clima atmosférico sino en las corrientes marinas, que sufren variación en la velocidad de la contracorriente del Darién (Pujos et al., 1986; Huertas, 2000).

iii. Contexto Socioeconómico.

La población de Isla Fuerte oscila cerca de las 2,500 personas (DANE, 2005) acompañadas de un flujo recurrente de turistas. El turismo, la pesca y la agricultura son las tres principales fuentes de ingreso oficial de la isla (Anderson, 1975). El único asentamiento humano en la isla se ubica en el área suroriente, denominado Puerto Limón (Figura 2).

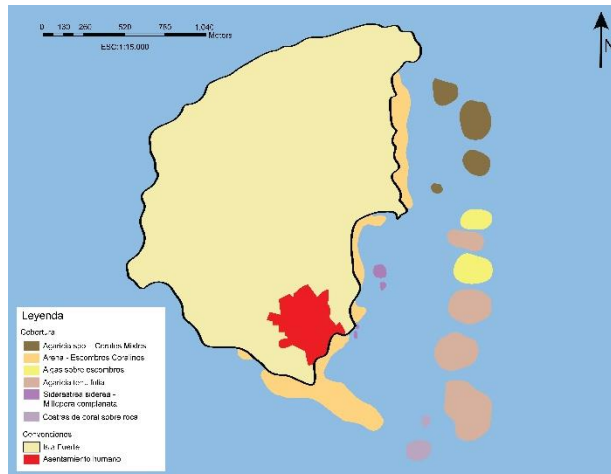


Figura 2. Ubicación del poblado de Isla Fuerte. Modificado de Mapa de Coberturas Marinas de Isla Fuerte (10), SIGAM.

La isla es un complejo arrecifal compuesto por parches arrecifales en el sector oriental, en donde está el área de interés para la restauración de arrecifes de coral (Figura 3), al costado norte se encuentra un arrecife de borde y al occidente se encuentra un arrecife de barrera, finalmente al sur se encuentra otros arrecifes de parche inmersos en una matriz de pastos marinos.

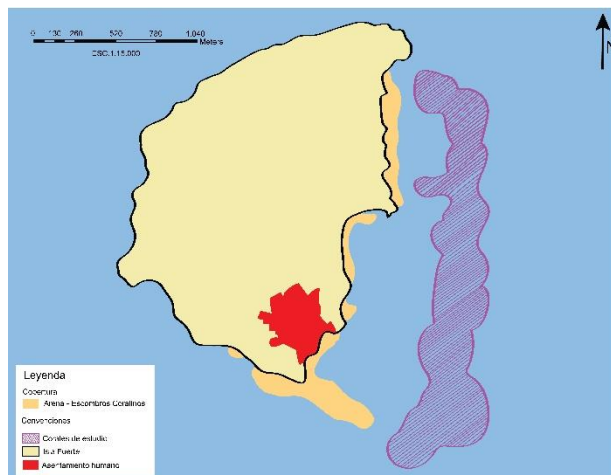


Figura 3. Mapa de la zona de interés para la restauración en Isla Fuerte. Modificado de Mapa de Coberturas Marinas de Isla Fuerte (10), SIGAM.

c. Ubicaciones de Estudio.

Para el desarrollo del proyecto de restauración coralina, se definieron tres áreas en donde se implementará el set de indicadores del presente trabajo. Estas áreas son el ecosistema de referencia, control y de restauración.

El ecosistema de referencia (Figura 4), es el ecosistema modelo para la restauración y para su monitoreo. Se caracteriza por tener considerablemente menos amenazas que otros ecosistemas, aunque no está exento de ellas, sus condiciones físicas junto con una composición de especies nativas, hace que este ecosistema esté en el punto más estable y de mejor estado de salud y conservación.

Adicional a esto, un ecosistema de referencia cuenta con una diversidad de niveles tróficos y estratificación adecuados, esto le confiere variedad de funciones como productividad, ciclaje de nutrientes, interacciones y alta capacidad de resiliencia (SER, 2019; Pollock, Beechie & Imaki, 2012).

En este sentido, el ecosistema de referencia representa un ecosistema arrecifal saludable, por lo que presenta los mejores valores biológicos y biofísicos a seguir en el proceso de restauración. Por último, este ecosistema de referencia debe estar integrado en un contexto paisajístico de mayor escala donde haya alto flujo de materia y energía (SER, 2004).



Figura 4. Ecosistema de referencia, arrecife de coral.

Ecosistema de restauración (Figura 5), es la zona que se necesita intervenir, es decir, es la zona arrecifal en donde se quiere recuperar, mantener y reintroducir corales. Esta necesidad nace del daño físico a los corales causado por diferentes agentes perturbadores (antrópicos y naturales), como es el caso de impactos de hélices de las embarcaciones, las redes de pesca, las afectaciones por corrientes marinas muy fuertes, y los cambios en la temperatura y el pH, que generan enfermedad, mortalidad y blanqueamiento. La mayoría de las especies de coral, particularmente los denominados “corales rocosos” o “duros” pueden recuperarse a partir de fragmentos muy pequeños, que son ubicados en guarderías que tienen diferentes formas, de acuerdo a los costos, facilidades de manejo y condiciones de las zonas, , donde después de un tiempo, estos corales se desarrollan a tal punto que pueden ser devueltos y sembrados en los lugares de donde provinieron, zonas de restauración o zonas nuevas de reintroducción (NOAA, 2014). Es un proceso relativamente rápido, de baja manutención y masivo, ya que, en aproximadamente 1 año, los fragmentos originales ya estarían listos para ser plantados nuevamente.

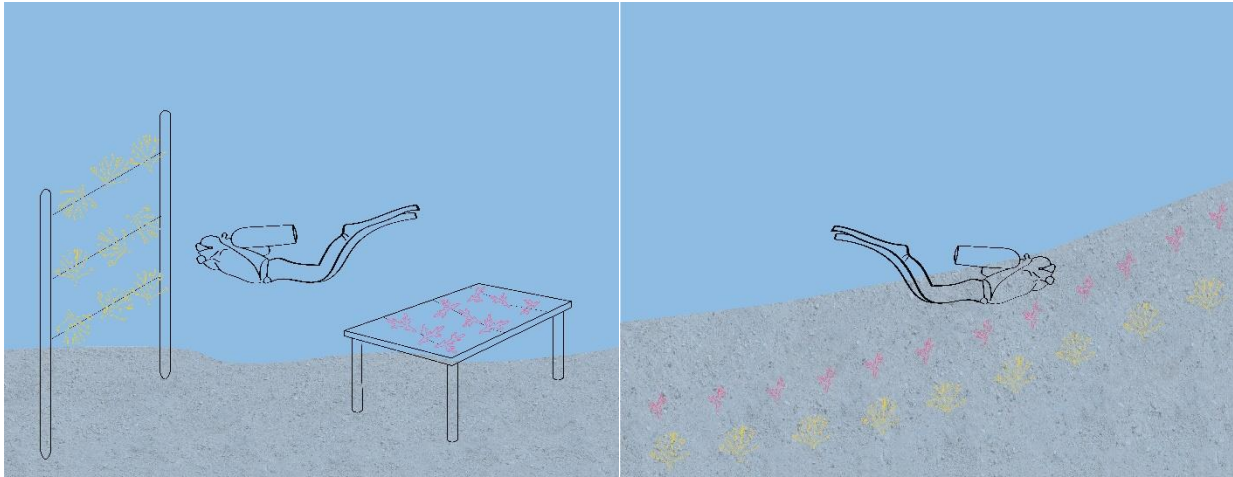


Figura 5. Ecosistema de Restauración. Diferentes tipos de guarderías de coral (izquierda) y sembrado de corales aptos (derecha).

Ecosistema de Control (Figura 6), es un ecosistema perturbado o deteriorado, que presenta condiciones similares al ecosistema de restauración, pero que no será intervenido con el proyecto de restauración. Este ecosistema se define con el fin de determinar los efectos de la restauración, es necesario un ecosistema de control u observación que sirva para demostrar los efectos que tiene la restauración comparada con un sistema no intervenido (Ford, 2010). El estado de este ecosistema debe ser igual al del ecosistema de restauración antes de que empiece el proyecto para determinar las diferentes direcciones y resultados que puedan ser causadas por la intervención humana positiva que resulta de la restauración (SER, 2004).

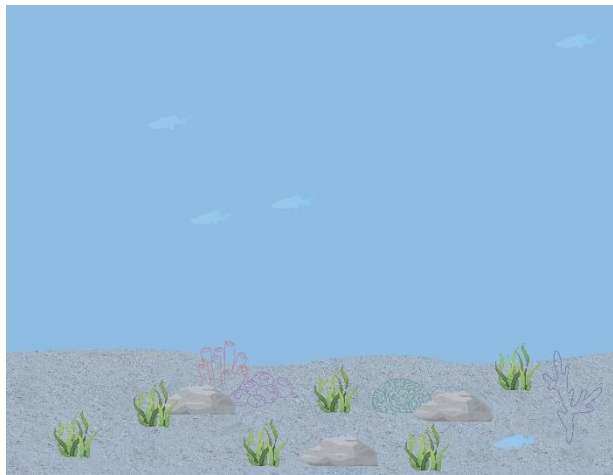


Figura 6. Ecosistema de control mostrando baja densidad coralina por deterioro.

4. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para el desarrollo de este trabajo fue tomado como línea base la edición 3.1 de CCB Standards – The Climate, Community and Biodiversity Standards, publicado en 2017, el cual sirvió de modelo temático, de estructura y guía de contenido para la propuesta de indicadores climáticos que pudiera ser aplicada a proyectos de restauración de coral.

Posterior a esto, se procedió a la recopilación del material bibliográfico en 3 motores de búsqueda web para revistas científicas. Scopus (<https://www.scopus.com/home.uri> o <http://www.elsevier.com/online-tools/scopus>), Web of Science (<https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science/>) y Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>). Las palabras clave para el criterio de búsqueda y la selección de artículos incluyeron los términos relacionados enmarcados en 3 conceptos principales: (1) “corales” o “arrecife de coral”, (2) “indicadores” o “Indicadores climáticos”, (3) “variables climáticas” o “variables hidrológicas” o “variables meteorológicas” o “variables oceanográficas”. La búsqueda fue realizada tanto en español como en inglés para aumentar la cantidad de material bibliográfico y no fue limitada por el año de publicación.

Teniendo en cuenta estos criterios de búsqueda, se obtuvo un total de 88 publicaciones que comprendían artículos científicos, libros especializados y publicaciones oficiales gubernamentales y no gubernamentales. De esta lista de material bibliográfico fueron seleccionadas 40 publicaciones que contaran con algún elemento específico descriptivo, conceptual o metodológico que fuera realizado en corales o que pudiera ser adaptado/transformado a ecosistemas marinos, especialmente arrecifes de coral. Una vez definidas las publicaciones que servirían para fundamentar la creación de los indicadores, sus justificaciones, metodologías y posibles limitaciones, el paso a seguir fue determinar las variables cuantitativas y cualitativas que serían utilizadas en los indicadores, para esto se establecieron tres categorías de indicadores: físicos, químicos y socioeconómicos.

De acuerdo con las etapas dispuestas para el componente de clima en la edición 3.1 de CCB Standards – The Climate, Community and Biodiversity Standards. (CL1) Escenario Climático sin Proyecto, (CL2) Escenario Climático Neto Positivo, (CL3) Impactos Climáticos Fuera del Sitio, (CL4) Monitoreo de Impactos Climáticos y, (GL1) Beneficios de la Adaptación al Cambio Climático, se limitaron las variables e indicadores que cumplieran con las categorías (CL1, CL2, CL3 y CL4) que son consideradas como obligatorias para este tipo de estándar y se buscó que la categoría opcional GL1 estuviera ligada a los indicadores socioeconómicos. Adicionalmente fueron tenidos en cuenta indicadores y elementos que estuvieran ligados a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente los objetivos 13 (Acción por el Clima - Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos) y 14 (Vida Submarina - Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos).

Lo anterior sirvió para que los indicadores pudieran ser medibles, comparables en el área del proyecto y en un área de referencia, en diferentes momentos temporales y que además contaran con el rigor requerido según el estándar CCB.

Para el diseño de los indicadores se siguió como modelo el trabajo y recomendaciones de Oliveros-Martinez de 2020, con el fin de guardar características comunes y que este trabajo sirviera como una continuación de los elementos tratados previamente (Biodiversidad y Comunidad), de aquí se

adoptaron tanto la presentación del indicador a manera de tabla, así como algunos elementos de categorías, como fue la escala colorimétrica de valores para los indicadores la cual fue complementada por la escala de clasificación de indicadores del “Protocolo Indicador – Condición Tendencia Áreas Coralinas (ICTAC)”.

Para la construcción de mapas y demás ayudas gráficas, los insumos fueron obtenidos del IGAC y de INVEMAR, donde se procedió a adaptarlos con ayuda de una estudiante de diseño, siguiendo con los criterios y propósitos de este trabajo. Para la creación y definición del material gráfico y conceptual relacionado con las zonas de coral, zonas marinas y costeras donde se aplicará este trabajo, la información fue obtenida de la estrategia educativa “Corals” de Coral Reef Information System (CoRIS) parte de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), y el libro Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, Form and Process, de David Hopley.

5. RESULTADOS.

a. Propuesta Metodológica para la Medición de los Indicadores.

Las diferentes variables climáticas de medición para los indicadores físicos, químicos y socioeconómicos deben ser tomadas en una o más zonas definidas para medición permanente del arrecife (Figura 7 y 8), y en una o más ubicaciones (Referencia, Control y Restauración) de acuerdo como el indicador lo indique.

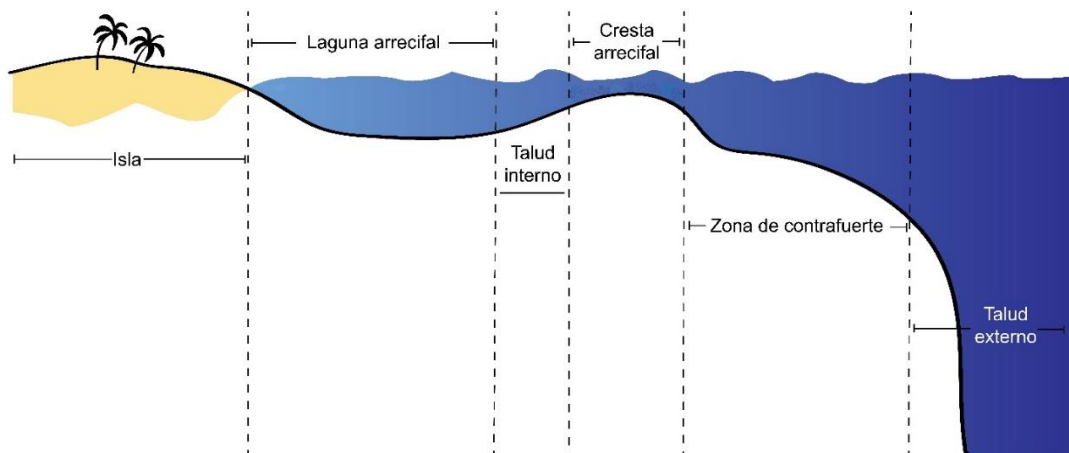


Figura 7. Perfil en las zonas de medición (laguna arrecifal, cresta arrecifal y zona de contrafuerte) en donde se deben instalar las estaciones permanentes.

Los indicadores están diseñados para ser medidos en 3 zonas principales: laguna arrecifal, cresta arrecifal y zona de contrafuerte. Los ecosistemas de referencia, restauración y control poseen estas zonas, pero debido a sus características de conservación, geomorfología y otros factores, pueden variar en tamaño, extensión, pendiente, etc., sin embargo, las estaciones permanentes deben ser

homogéneas, es decir deben tener la misma disposición, distribución, tamaño y profundidad entre otras variables.

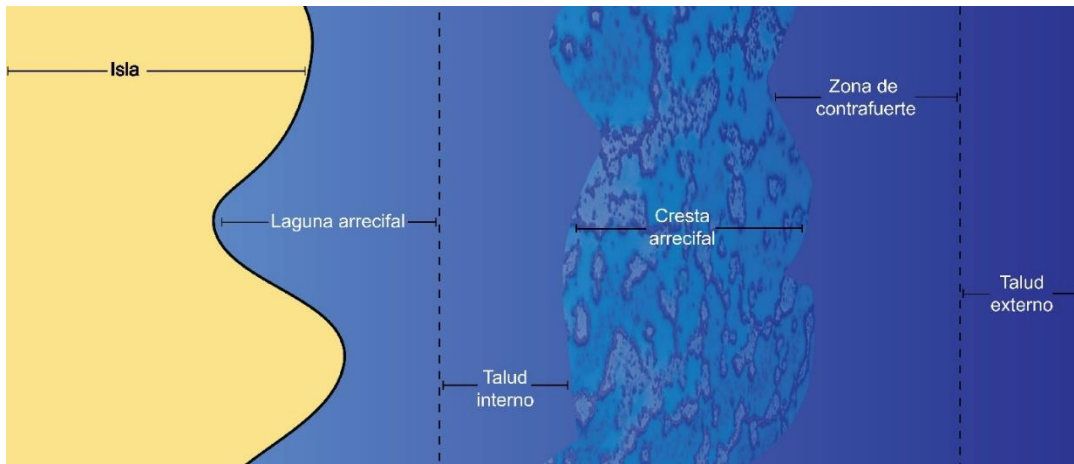


Figura 8. Vista superior de las zonas de medición. Se conservan las mismas zonas de medición que en la vista de perfil.

b. Naturaleza de los Indicadores.

Para lograr clasificar los indicadores en cuanto a tiempo y lugar de medición, se denomina “Naturaleza del Indicador” según como el indicador deba ser medido a nivel espacial y/o temporal. Se definieron tres grandes clasificaciones de la naturaleza del indicador: “A”, “B” y “C”.

i. Naturaleza del Indicador “A”.

En esta clasificación, el indicador debe ser medido en un mismo momento de tiempo (Figura 9), pero en diferentes puntos de las zonas de medición (véase Figuras 7 y 8 para Zonas de Medición). Dentro de esta clasificación está la subcategoría “A1” donde el indicador solo se compara en zonas de medición dentro de una misma ubicación (Figura 9 – A1), (ej. Ecosistema de restauración), mientras que la subcategoría “A2” el indicador debe compararse en las zonas de medición de una misma ubicación, pero también debe ser comparado en otra ubicación (Figura 9 – A2) (ej. Ecosistema de restauración vs. Ecosistema de control).

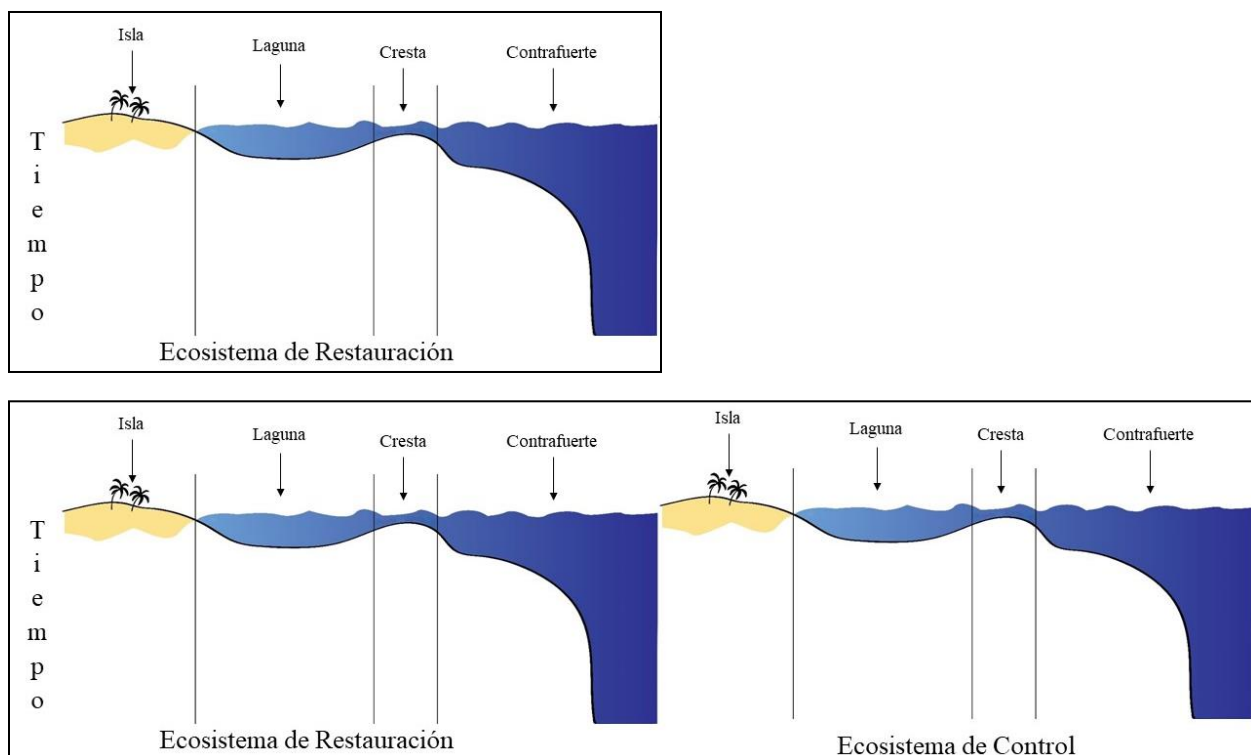


Figura 9. Naturaleza del Indicador “A”. La subcategoría “A1” arriba y subcategoría “A2” abajo.

ii. Naturaleza del Indicador “B”.

En esta clasificación, el indicador debe ser medido en diferentes momentos de tiempo, pero en un mismo punto de las zonas de medición (véase Figura 7 y 8 para Zonas de Medición). Dentro de esta clasificación está la subcategoría “B1” donde el indicador solo se compara en diferentes momentos de tiempo dentro de una misma ubicación (Figura 10 - B1) (ej. Ecosistema de restauración), mientras que la subcategoría “B2” el indicador debe comparar diferentes momentos de tiempo entre diferentes ubicaciones (Figura 10 – B2) (ej. Ecosistema de restauración vs. Ecosistema de control).

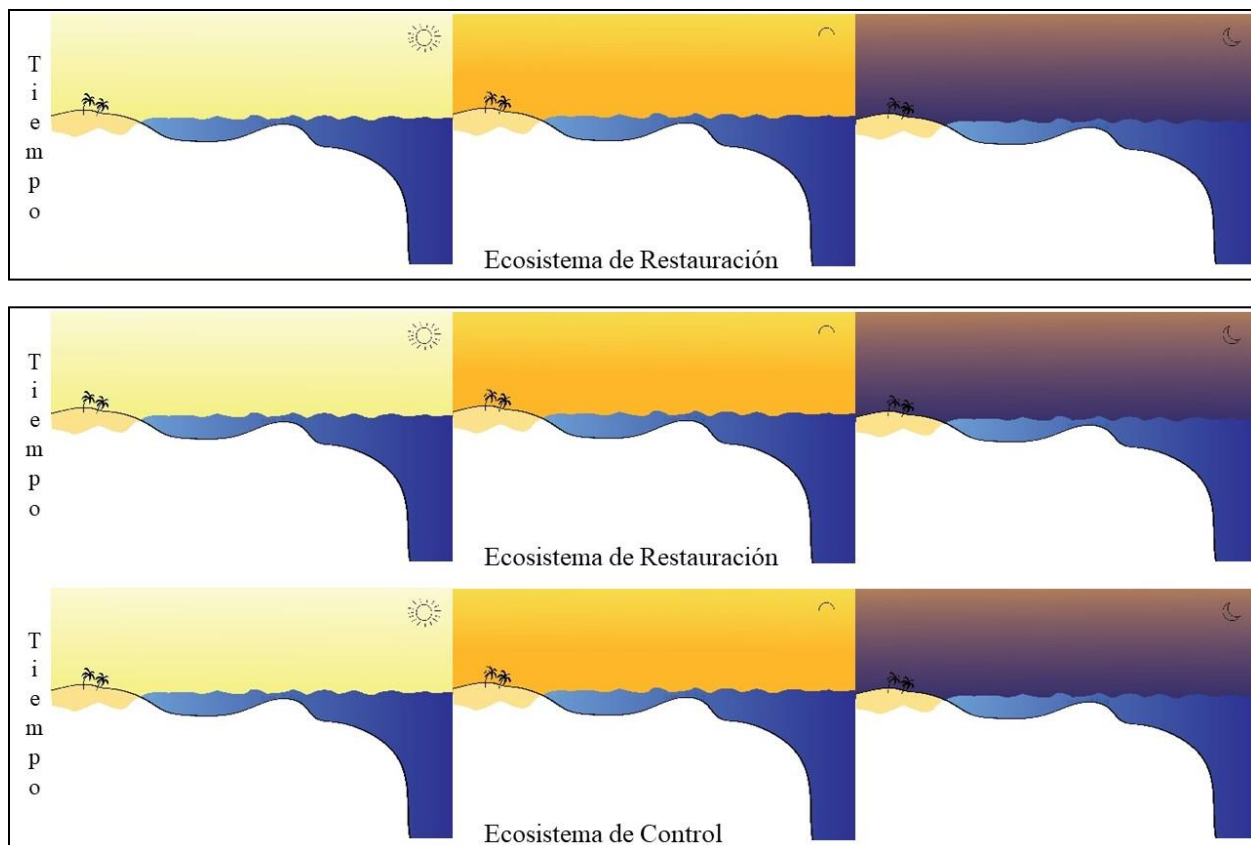


Figura 10. Naturaleza del Indicador “B”. La subcategoría “B1” recuadro de arriba y subcategoría “B2” recuadro de abajo

iii. Naturaleza del Indicador “C”.

En esta clasificación el indicador debe ser medido en diferentes momentos de tiempo y la zona o ubicación no son relevantes. No tiene subcategorías.

c. Propuesta Estaciones de Monitoreo Fijas.

Con el fin de poder tomar medidas más precisas y garantizar el control de la rutina en la toma de mediciones, otorgar facilidad logística para investigadores y habitantes de la isla que se involucren en proyectos de restauración de coral o para la toma general de datos para estas variables, se diseñó un prototipo de estación de monitoreo meteorológica fija de fácil construcción, acceso, uso y que permite la medición y/o recolección de datos para la gran mayoría de los indicadores.

Se diseñaron 3 prototipos de estaciones de monitoreo meteorológicas, para cada una de las diferentes zonas (Figura 11).

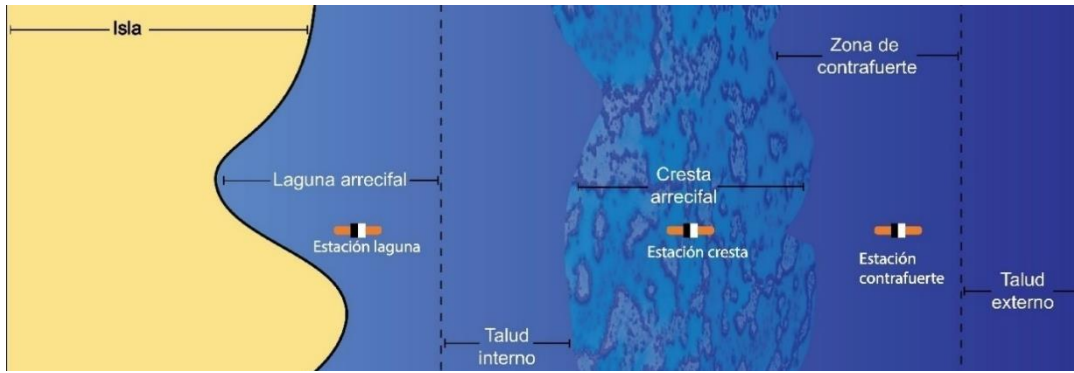


Figura 11. Vista superior de las zonas de medición. Señalando cómo y en dónde deberían estar ubicadas las diferentes estaciones de monitoreo, nótese que las estaciones deben estar alineadas y de manera perpendicular a la línea de costa.

Prototipo 1. Diseño preliminar de la estación de monitoreo para la zona de laguna (Figura 12). Pueden reconocerse los elementos constitutivos así: a) Recipiente graduado hasta los 100 ml, b) Indicador (0) del nivel del agua, definido en condiciones calmas, c) Reloj, d) escala hidrométrica en centímetros, e) Termómetro (en °C) que se encuentre sumergido entre 20 y 50 cm de profundidad, f) Flotador naranja para fácil reconocimiento de la estación, g) Anclaje (lastre) subterráneo para la fijación de la estación, h) fondo marino de la laguna.

i. Estación de Monitoreo Laguna.

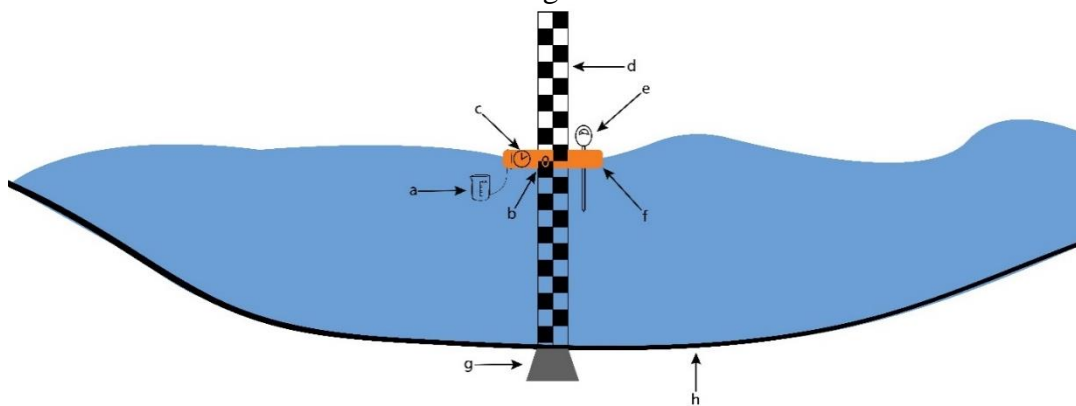


Figura 12. Prototipo 1. Diseño preliminar de la estación de monitoreo para la zona de laguna.

Prototipo 2. Diseño preliminar de la estación de monitoreo para la zona de cresta (Figura 13): Esta estación presenta fundamentalmente diferencias en el anclaje de la estación a) Recipiente graduado hasta los 100 ml, b) Indicador (0) del nivel del agua, definido en condiciones calmas, c) Reloj, d) escala hidrométrica en centímetros, e) Termómetro (en °C) que se encuentre sumergido entre 20 y 50 cm de profundidad, f) Flotador naranja para fácil reconocimiento de la estación, g) Anclaje (lastre) superficial para la fijación de la estación, h) fondo marino de la cresta, i) líneas de anclaje que conectan la estación a los anclajes

ii. Estación de Monitoreo Cresta.

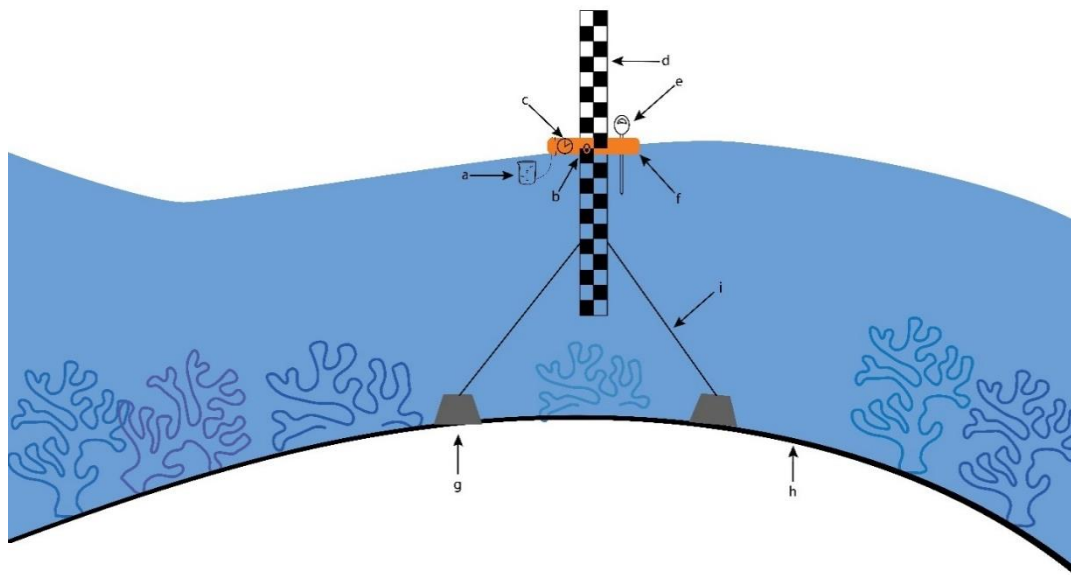


Figura 13. Prototipo 2. Diseño preliminar de la estación de monitoreo para la zona de cresta.

Prototipo 3. Diseño preliminar de la estación de monitoreo para la zona de contrafuerte (Figura 14): a) Recipiente graduado hasta los 100 ml, b) Indicador (0) del nivel del agua, definido en condiciones calmas, c) Reloj, d) escala hidrométrica en centímetros, e) Termómetro (en °C) que se encuentre sumergido entre 20 y 50 cm de profundidad, f) Flotador naranja para fácil reconocimiento de la estación, g) Anclaje (lastre) superficial para la fijación de la estación, h) fondo marino de la cresta, i) líneas de anclaje que conectan la estación a los anclajes.

iii. Estación de Monitoreo Contrafuerte.

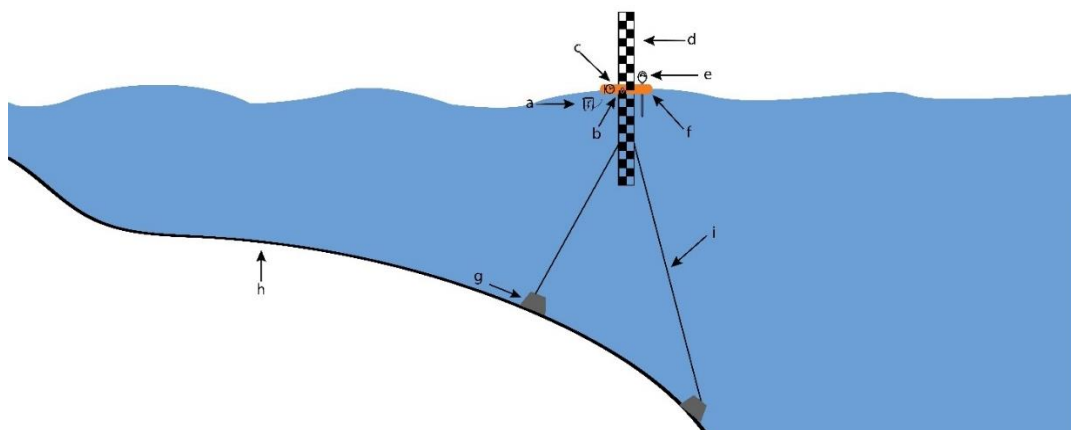


Figura 14. Prototipo 3. Diseño preliminar de la estación de monitoreo para la zona de contrafuerte.

d. Indicadores Físicos.

i. Cambio en la Temperatura Oceánica Anual Superficial.

Objetivo.	Unidad de Medida	Fórmula del Indicador.	Escala de Medición.	
Determinar los cambios en la temperatura media oceánica anual superficial.	°C	$29^{\circ}\text{C} - \sum_{m=1}^y \frac{x_m}{y}$	Rango (°C)	Condición
			2.9 - 3.3	No Deseable
			2.5 - 2.8	Alerta
			1.9 - 2.3	Regular
			1.1 - 1.8	Bueno
			0.0 - 1.0	Deseable

Donde:

°C: unidad de medida de temperatura, en grados centígrados.

29°C: constante de temperatura anual para la superficie oceánica en Isla Fuerte.

X_m : m-ésima medición de temperatura diaria (en °C).

y: es el número o cantidad de mediciones de temperatura registradas.

1. Justificación del Indicador.

Los cambios mantenidos en la temperatura oceánica por largos períodos de tiempo son capaces de alterar irreversiblemente los ciclos biogeoquímicos de carbono y oxígeno (Archer et al., 2004), ciclos vitales para los procesos biológicos de organismos como los corales, en donde su condición mutualista obligada con algas zooxanthelas sufren blanqueamiento a ritmos más acelerados que su capacidad de recuperación, llevando a la muerte de grandes extensiones de arrecifes coralinos causado por la tendencia positiva en la temperatura media oceánica (Abraham et al., 2013; Bigg et al., 2003; Brown et al., 2019).

2. Naturaleza del Indicador.

Indicador tipo “C”.

3. Metodología para la Medición del Indicador.

En la estación de monitoreo meteorológica de laguna, se debe tomar la temperatura del agua usando el termómetro de la estación. Esto debe realizarse todos los días a la misma hora, preferiblemente en horas de la mañana (DHI, 1958).

4. Limitantes del Indicador.

Se requiere observaciones de al menos 30 años para que las observaciones sean representativas y se puedan determinar tendencias (Brown et al., 2019).

Se debe medir por año al menos 347 días para que los resultados tengan un 95% de precisión.

ii. Frecuencia del Oleaje en Laguna-Cresta-Contrafuerte.

Objetivo.	Unidad de Medida	Fórmula del Indicador.	Escala de Medición.	
Calcular la frecuencia del oleaje en las zonas de laguna, cresta y contrafuerte, y los efectos del coral en las diferentes zonas.	bpm	$f_L = \frac{L}{1 \text{ minuto}}$ $f_{Cr} = \frac{Cr}{1 \text{ minuto}}$ $f_{Co} = \frac{Co}{1 \text{ minuto}}$	Rango	Condición
			$f_L > f_{Cr} > f_{Co}$	No Deseable
			$f_L = f_{Cr} > f_{Co}$	Alerta
			$f_L = f_{Cr} < f_{Co}$	Regular
			$f_L < f_{Cr} < f_{Co}$	Bueno
			$f_L < f_{Cr} > f_{Co}$	Deseable

Donde:

bpm: unidad de frecuencia, equivalente en este caso, al número de eventos o crestas de olas que pasan por un punto de referencia durante un minuto.

f_L : número de olas por minuto tomadas en la zona de laguna.

f_{Cr} : número de olas por minuto tomadas en la zona de cresta.

f_{Co} : número de olas por minuto tomadas en la zona de contrafuerte.

L: número de olas registradas en la zona de laguna.

Cr: número de olas registradas en la zona de cresta.

Co: número de olas registradas en la zona de contrafuerte.

1. Justificación del Indicador.

El comportamiento y la dinámica del oleaje, especialmente en las zonas donde se encuentran corales, es un factor que determina la salud de este sistema al ser responsable de la mezcla de corrientes marinas frías y calientes, oxigenación e intercambio de gases y transporte de sedimentos, entre otros (Sous et al. 2019). También puede ser un factor que determine el desgaste mecánico del coral y la facilidad de establecimiento de pólipos y colonias coralinas. En cuanto al ecosistema alrededor del coral, éste al servir de barrera puede cambiar no solo la energía del oleaje y su altura, sino que también puede modificar la frecuencia del oleaje que determina la erosión costera (Cheriton, Storlazzi & Rosenberger, 2016; Kench & Brander, 2006).

2. Naturaleza del Indicador.

Indicador tipo “A1” y “A2”.

3. Metodología para la Medición del Indicador.

Utilizando las 3 estaciones de monitoreo meteorológicas se debe utilizar la escala hidrométrica como punto de referencia y a partir de esto contar el número de crestas que pasen durante 1 minuto (Stewart, 1980; Ferrario et al., 2014). Esto debe compararse en las diferentes zonas, y a su vez en las diferentes ubicaciones.

4. Limitantes del Indicador.

Es necesario esperar un momento con bajo nivel de tráfico marítimo, preferiblemente ninguno, para evitar que las mediciones se vean alteradas por el paso de embarcaciones u otras actividades humanas.

iii. Diferencias de Altura del Oleaje en Laguna-Cresta-Contrafuerte.

Objetivo.	Unidad de Medida	Fórmula del Indicador.	Escala de Medición.	
Determinar los efectos del arrecife de coral en la altura de las olas.	cm.	$h_L = \sum_{m=1}^a \frac{X_m}{a}$ $h_{Cr} = \sum_{m=1}^b \frac{Y_m}{b}$ $h_{Co} = \sum_{m=1}^c \frac{Z_m}{c}$	Rango	Condición
			$h_L > h_{Cr} > h_{Co}$	No Deseable
			$h_L = h_{Cr} > h_{Co}$	Alerta
			$h_L = h_{Cr} < h_{Co}$	Regular
			$h_L < h_{Cr} < h_{Co}$	Bueno
			$h_L < h_{Cr} > h_{Co}$	Deseable

Donde:

cm: unidad de medida de longitud lineal aplicada para la altura de las olas, en centímetros.

h_L : altura promedio de las olas en la zona de laguna.

h_{Cr} : altura promedio de las olas en la zona de cresta.

h_{Co} : altura promedio de las olas en la zona de contrafuerte.

X_m : m-ésima medición de la altura diaria en la zona de laguna.

Y_m : m-ésima medición de la altura diaria en la zona de cresta.

Z_m : m-ésima medición de la altura diaria en la zona de contrafuerte.

a: número o cantidad de mediciones totales en la zona de laguna.

b: número o cantidad de mediciones totales en la zona de cresta.

c: número o cantidad de mediciones totales en la zona de contrafuerte.

1. Justificación del Indicador.

Las diferentes configuraciones estructurales de los corales, como formaciones periféricas, de barrera, parches o atolones (Hoeg-Goldberg, Pendleton & Kaup, 2019) les confieren a los sistemas internos a ellos, sean lagunas o islas, una protección natural contra de las corrientes oceánicas. Esta protección depende de variables como el tipo de formación coralina, la complejidad y edad, el tipo de corales presentes, la pendiente que tenga, etc., de acuerdo con estos factores los corales

son capaces de frenar la dinámica de transporte de Ekman, responsables del movimiento turbulento oceánico y transformarlo en un movimiento más lineal, menos energético y que superficialmente se vea con crestas de oleaje menores (Benthuisen, 2016; Massel & Gourlay, 2000; Gourlay, 1994).

2. Naturaleza del Indicador.

Indicador tipo “A1” y “A2”.

3. Metodología para la Medición del Indicador.

Utilizando las 3 estaciones de monitoreo meteorológicas se debe utilizar la escala hidrométrica como punto de referencia y tomar el promedio de altura del oleaje para cada zona, se recomienda hacer uso de una cámara de video con el fin de grabar los resultados de las alturas y que los promedios sean más precisos (Ferrario et al., 2014).

4. Limitantes del Indicador.

No se encontraron limitantes para este indicador.

iv. Comparación Energética del Oleaje en Laguna-Cresta-Contrafuerte.

Objetivo.	Unidad de Medida	Fórmula del Indicador.	Escala de Medición.	
Demostrar los efectos positivos de los arrecifes de coral en la disminución energética de las olas.	% de eficiencia.	$E = 1/8\rho gH^2$ $Rr = \ln(E_T/E_C)$ $\% \text{ de eficiencia} = 100 - (e^{Rr} * 100)$	Rango (%)	Condición
			0 - 26	No Deseable
			27 - 47	Alerta
			48 - 68	Regular
			69 - 89	Bueno
			80 - 100	Deseable

Donde:

% de eficiencia: porcentaje en el que las coberturas de arrecife de coral son capaces de reducir la energía del oleaje.

E: energía del oleaje, medida en julios (Joules) por unidad de área (J/m²).

E_T : energía (J/m^2) del oleaje en la zona de laguna, cresta o contrafuerte para el ecosistema de restauración o tratamiento.

E_C : energía (J/m^2) del oleaje en la zona de laguna, cresta o contrafuerte para el ecosistema de control o con el que desee compararse.

ρ : densidad promedio del medio, agua salada en kg/m^3 .

g : aceleración gravitacional del oleaje, medido en m/s^2 .

h : promedio de la altura del oleaje en la zona específica, en cm.

R_r : Relación de respuesta logarítmica que determina el tamaño general del efecto de cada lugar (laguna, cresta o contrafuerte) sobre la energía del oleaje.

1. Justificación del Indicador.

Los arrecifes de coral presentan un rol importante en la disipación de energía de las corrientes marinas, esto se da ya que los corales hacen el papel de una malla debido a la forma en la que estos crecen y se desarrollan, causando alta disipación por fricción en espacios relativamente reducidos (Lowe et al., 2005; Hearn, 1999), adicional a esto, los sistemas coralinos más complejos estructuralmente son capaces de presentar una protección costera más eficiente en términos de inundaciones, erosión en la zona de laguna y cambios súbitos en el nivel del mar (Harris et al., 2018), por lo que el sistema laguna-cresta-contrafuerte presentaría cambios considerables en sistemas coralinos más desarrollados, más complejos estructuralmente y menos intervenidos, esto siendo un servicio ecológico que brindan estos ecosistemas para asentamientos costeros.

2. Naturaleza del Indicador.

Indicador tipo “A1” y “A2”.

3. Metodología para la Medición del Indicador.

En las 3 estaciones de monitoreo meteorológicas como puntos de referencia, utilizando un olígrafo o sensor de presión oceánica (No incluidos en la estación) se debe medir la aceleración gravitacional del oleaje, por último, se deben utilizar los datos obtenidos en el indicador “Diferencias de Altura del Oleaje en Laguna-Cresta-Contrafuerte” (Ferrario et al., 2014).

4. Limitantes del Indicador.

Se requiere un olígrafo o sensor de presión oceánica.

v. Perfiles Costeros por Erosión Oceánica.

Objetivo.	Unidad de Medida.	Fórmula del Indicador.	Escala de Medición.	
Determinar el cambio en lo pronunciado de los perfiles costeros a lo largo del tiempo	° (grados)	$\sum_{a=1}^{m_1} \frac{R_a}{m_1} - \sum_{a=1}^{m_2} \frac{A_a}{m_2}$	Rango (°)	Condición
			24 - 29	No Deseable
			18 - 23	Alerta
			12 - 17	Regular
			6 - 11	Bueno
			0 - 5	Deseable

Donde:

cm: unidad de medida de longitud lineal aplicada para las distancias de la costa, en centímetros.

°: medida en grados que equivale a la treintécima-sexagésima parte de una circunferencia completa (1/360).

R_a: ángulo o pendiente promedio de la costa desde el primer punto de medición hasta el punto final de las mediciones, equivalente a la hipotenusa en el primer momento de la medición del indicador.

A_a: ángulo o pendiente promedio de la costa desde el primer punto de medición hasta el punto final de las mediciones, equivalente a la hipotenusa en el segundo momento de la medición del indicador.

m₁: número o cantidad de mediciones totales para el primer momento de medición.

m₂: número o cantidad de mediciones totales para el segundo momento de medición.

1. Justificación del Indicador.

La determinación de la erosión oceánica en las playas es determinante en la morfología y evolución de esta a lo largo de tiempo, el oleaje normal de una zona costera tiene el potencial de transportar entre 50 a 80 millones de metros cúbicos de sedimento anual (USGS, 2017), por lo que la creación de barreras artificiales y la conservación de barreras físicas naturales es vital para disminuir el riesgo erosivo del oleaje, en espacial en momentos de tormentas (Delgado & Lloyd, 2004). La erosión no solo significa la pérdida del lecho marino, sino que también genera cambios significativos en la pendiente y el tamaño de las zonas de la costa, puede hasta cambiar la estructura

y composición de la arena, por lo que la determinación de los perfiles costeros puede ser una estrategia práctica de mostrar cambios en la estructura de costa (Short, 1999; Delgado & Lloyd, 2004; Yates et al., 2017).

2. Naturaleza del Indicador.

Indicador tipo “B1” y “B2”.

3. Metodología para la Medición del Indicador.

Con la ayuda de una escuadra (No incluida en la estación) que se componga de dos partes, una de 0.8 m de base por 2m de altura que formen 90° entre sí, ubicarlos en la zona de laguna a 1 metro de profundidad un extremo de la base de la escuadra en el fondo y el otro extremo de la parte más larga en dirección hacia el interior de la isla manteniendo los 90° , después se mide la distancia desde el suelo hasta el extremo de la parte más larga de la escuadra, y la distancia entre la parte de la escuadra que se encuentra en el suelo y el punto sobre el suelo que tendría el otro extremo más largo de la escuadra, adicional a esto se deben medir para cada posición de la escuadra los 2 ángulos complementarios adicionales a los 90° . Una vez se realice el procedimiento, se repite este proceso teniendo como referencia el extremo de 2 m de la escuadra, esto debe hacerse hasta que se llegue a un terreno casi plano (Delgado & Lloyd, 2004). Después de esto se debe promediar los ángulos obtenidos desde el inicio al final de la medición.

4. Limitantes del Indicador.

Debe construirse la escuadra y se recomienda leer la publicación “A Simple Low Cost Method for One Person Beach Profiling” de Irene Delgado y Graham Lloyd para aclarar el proceso metodológico de la medición de los perfiles, o revisar en anexos para ayudas visuales.

El indicador solo comprende los valores positivos de la resta, por lo que cualquier medición que dé como resultado un numero negativo que indique que la pendiente disminuyo no está comprendida, aunque debe ser tomada como un resultado positivo en términos de reducción de la erosión oceánica.

e. Indicadores Químicos.

i. Oxígeno Disuelto.

Objetivo.	Unidad de Medida	Fórmula del Indicador.	Escala de Medición.	
Determinar la concentración de oxígeno disuelto marino en la zona de la cresta de coral.	mg/l	$OD = \frac{O}{Z}$	Rango (mg/L)	Condición
			0 – 1	No Deseable
			2 – 3	Alerta
			4 – 5	Regular
			6 – 8	Bueno
			9 – 12	Deseable

Donde:

mg/l: medida de concentración para un líquido, miligramos de soluto/litros de soluto.

OD: oxígeno disuelto o saturación de oxígeno, es una medida de equivalencia que determina el valor aproximado del oxígeno disuelto en una muestra de agua, medido en mg/l.

O: cantidad (en miligramos) de oxígeno disuelto.

Z: volumen de agua medidos para la muestra, en litros.

1. Justificación del Indicador.

Los arrecifes de coral son ecosistemas capaces de generar cambios significativos en los niveles de oxígeno disuelto en el agua debido a la fotosíntesis que se lleva a cabo y que libera cantidades importantes de este gas, pero también porque los arrecifes coralinos tienden a ser lugares de aguas superficiales donde las olas se rompen y esto hace que se introduzca oxígeno atmosférico al agua (Kanwisher & Wainwright, 1967). El oxígeno también cumple un papel limitante en el desarrollo de los corales (Nelson & Altieri, 2019) ya que como todo animal es necesario para su desarrollo y procesos fisiológicos primarios, pero en el caso de los corales el oxígeno es necesario también para la construcción de sus esqueletos de carbonato de calcio (CaCO₃) y también como un regulador del pH marino, incluso el cambio en niveles de oxígeno disuelto puede generar cambios sucesionales y de organización en los arrecifes (Fabricius et al., 2011; Wijgerde et al., 2014).

2. Naturaleza del Indicador.

Indicador tipo “A1”, “A2”, “B1” y “B2”.

3. Metodología para la Medición del Indicador.

En la estación de monitoreo meteorológico de laguna, cresta y contrafuerte, utilizando el recipiente graduado se deben recolectar los 100 ml entre los 20 y 50 cm de profundidad (ayudarse con la escala hidrométrica) (IOC, 2018), esta muestra debe ser tapada debidamente y cubierta del sol. La medición de oxígeno disuelto debe realizarse siempre de día y a la misma hora (ayudarse del reloj en la estación), una vez tomada debe ser calculado el oxígeno disuelto en un periodo menor a 2 horas después de la colecta de la muestra para evitar que la muestra pueda verse afectada (ICC, 2017; Rérolle et al., 2012; Millero et al., 2006).

4. Limitantes del Indicador.

Es necesario un medidor de oxígeno disuelto.

Acidificación de Aguas Marinas.

Objetivo.	Unidad de Medida.	Fórmula del Indicador.	Escala de Medición.	
Determinar los niveles y cambios de pH.	pH	$D=r-m$	Rango (pH)	Condición
			0.24 – 0.29	No Deseable
			0.18 – 0.23	Alerta
			0.12 – 0.17	Regular
			0.06 – 0.11	Bueno
			0 – 0.05	Deseable

Donde:

pH: escala que determina la acidez (<7) o alcalinidad (>7) de una solución, va desde 0 a 14, siendo 7 neutro.

D: diferencia de pH de referencia menos pH medido en el lugar de la muestra.

r: pH de referencia, tomado del ecosistema de referencia o de un valor establecido como óptimo para condiciones saludables de coral, va desde 0 a 14.

m: pH medido en el lugar de la muestra para el indicador, va desde 0 a 14.

1. Justificación del Indicador.

El CO₂ junto con otros gases de efecto invernadero producidos por el hombre tienen un directo impacto en las condiciones químicas oceánicas, donde la difusión de estos gases vía atmósfera-oceano (Réolle et al., 2012) hace que reaccione convirtiéndose en ácido carbónico (H₂CO₃), lo que acidifica las aguas marinas y reduce la disponibilidad de carbonato de calcio (CaCO₃), esto causa estrés y diversas afectaciones en corales y otros organismos afines, los impactos principalmente se dan en la construcción de sus esqueletos y otros procesos metabólicos (Comeau et al., 2017; Kinsey & Hopley, 1991).

2. Naturaleza del Indicador.

Indicador tipo “B1” y “B2”.

3. Metodología para la Medición del Indicador.

En la estación de monitoreo meteorológica de laguna, utilizando el recipiente graduado se deben recolectar los 100 ml entre los 20 y 50 cm de profundidad (ayudarse con la escala hidrométrica) (IOC, 2018), esta muestra debe ser tapada debidamente y cubierta del sol. La muestra de agua marina debe ser medida con un pHmetro o potenciómetro (No incluidos en la estación) que tengan una precisión de al menos 2 cifras significativas, esto debe realizarse en un periodo menor a 2 horas después de la colecta de la muestra para evitar que la muestra pueda afectarse por procesos químicos y físicos (Réolle et al., 2012; Millero et al., 2006).

4. Limitantes del Indicador.

Es necesario un pHmetro o potenciómetro.

ii. Sólidos Suspendidos y Sólidos Totales.

Objetivo.	Unidad de Medida.	Fórmula del Indicador.	Escala de Medición.	
Calcular la cantidad de sólidos suspendidos y sólidos totales en el agua.	mg/l	$ST = \frac{S}{Z}$	Rango (mg/L)	Condición
			84 - 100	No Deseable
			67 - 83	Alerta
			50 - 66	Regular
			33 - 49	Bueno
			16 - 32	Deseable

Donde:

ST: medida de la razón de los sólidos suspendidos y los sólidos totales en la muestra, en mg/l.

s: cantidad (en mg) de sólidos suspendidos y totales de la muestra.

Z: volumen de la muestra de agua (en litros).

1. Justificación del Indicador.

La presencia, tipo, concentración y tamaño del material particulado en el agua, en especial los sólidos suspendidos presentan una amenaza para la vida marina ya que estos representan contaminación y potenciales agentes patógenos en cuanto a la calidad del agua (Jokiel et al., 2014). Para los corales se consideran como un factor de detrimento en las condiciones de vida ya que pueden ser responsables de la disminución en tasas de fertilidad, reclutamiento y supervivencia de los pólipos (Glynn et al., 1986), pero también puede afectar la incidencia lumínica que llega a los corales y esto genera que tanto la tasa fotosintética como la productividad por unidad de área disminuyan (Pait, 2015; Jokiel et al., 2014). Aunque algunos sólidos suspendidos pueden tener origen natural, la mayoría es originado por actividad humana, lo que significa un buen indicador para el impacto de las acciones humanas en la calidad del agua (Rogers, 1990).

2. Naturaleza del Indicador.

Indicador tipo “A1”, “A2”, “B1” y “B2”.

3. Metodología para la Medición del Indicador.

En la estación de monitoreo meteorológico de laguna, cresta y contrafuerte, utilizando el recipiente graduado se deben recolectar los 100 ml entre los 20 y 50 cm de profundidad (ayudarse con la escala hidrométrica) (IOC, 2018), una vez en tierra (preferiblemente en un laboratorio o ubicación similar) se debe filtrar todo el contenido con un filtro capaz de retener toda partícula superior a los 2 micrones de diámetro, el filtro junto con su contenido debe ser secado en un horno y pesarse, por último, el resultado debe multiplicarse por 10 para determinar la cantidad de mg/l (Gray et al., 2000; Langland & Cronin, 2003).

4. Limitantes del Indicador.

No se consideran los valores de mg/l iguales o menores a 15 mg/l ni iguales o superiores a 101 mg/l ya que de acuerdo con la literatura no son posibles y de llegar a alcanzarse para el caso de iguales o superiores a 101 mg/l sería resultado de tormentas o eventos de corta duración. Si el resultado es igual o menor a 15 mg/l o, igual o mayor a 101 mg/l se debe repetir la toma de medición para confirmar que la medición está fuera de rango.

f. Indicadores Socioeconómicos.

i. Áreas Protegidas Afectadas.

Objetivo.	Unidad de Medida	Fórmula del Indicador.	Escala de Medición.	
Determinar el impacto de eventos océano-climáticos en áreas protegidas.	ha	$ha_a = ha_r - ha_1$	Rango (ha)	Condición
			60 - 75	No Deseable
			44 - 59	Alerta
			28 - 43	Regular
			12 - 27	Bueno
			0 - 11	Deseable

Donde:

ha: unidad de medida de área (hectárea), equivalente a 10.000 m².

ha_a: Área resultante total (en hectáreas) de la zona protegida de interés después de un evento oceano-climático extremo.

ha_r: Área (en hectáreas) de interés para un año de referencia, en buen estado o en condiciones normales.

ha₁: Área (en hectáreas) de interés que fue afectada después de un evento oceano-climático extremo.

1. Justificación del Indicador.

Las áreas protegidas están constantemente en situaciones de estrés y conflicto socioeconómico, adicional a esto muchas de ellas no solo disminuyen sus extensiones, sino que la dinámica al interior de éstas también se ve comprometida (Pisapia, Burn & Pratchett, 2019), como es el caso de los arrecifes de coral cuya principal amenaza es el cambio climático seguido de las acciones humanas. Son ecosistemas altamente sensibles a disturbios que pueden reflejar los efectos como enfermedad y mortalidad, pero también que estos espacios se pierdan por completo y den lugar a otros ecosistemas marinos como pastizales o manglares, cambiando por completo las dinámicas ecológicas, la diversidad de especies y los servicios ecosistémicos (Wilkinson & Buddemeier, 1994).

2. Naturaleza del Indicador.

Indicador tipo “C”.

3. Metodología para la Medición del Indicador.

Por medio de imágenes satelitales, registros históricos y junto con la información suministrada por PNN e INVEMAR se puede determinar la evolución de estas áreas protegidas frente a los eventos océano-climáticos en la isla, a partir de las imágenes satelitales de un año de referencia se puede introducir en QGIS o cualquier software similar donde por medio de la calculadora ráster se podría determinar la diferencia comparada con imágenes satelitales en años posteriores después de un evento océano-climático extremo que pueda afectar a estas áreas protegidas (FAO, 2011).

4. Limitantes del Indicador.

Determinar la diferencia entre los impactos causados por actividad humana y los impactos causados por eventos océano-climáticos, y la baja resolución de imágenes satelitales de Isla Fuerte puede no dar la información más detallada acerca de la evolución de superficie.

ii. Familias Ubicadas en Zonas Propensas a Inundaciones.

Objetivo.	Unidad de Medida	Fórmula del Indicador.	Escala de Medición.	
Calcular el porcentaje de familias que tienen riesgo de inundarse de las totales en la isla.	%	% de vulnerabilidad= F_i/F_t	Rango (%)	Condición
			24 - 29	No Deseable
			18 - 23	Alerta
			12 - 17	Regular
			6 - 11	Bueno
			0 - 5	Deseable

Donde:

% de vulnerabilidad: porcentaje de familias que se encuentran en riesgo de inundación con relación a las totales en la isla.

F_i : número de familias que se encuentran en zonas propensas o de riesgo de inundación.

F_t : número total de familias en la isla.

1. Justificación del Indicador.

Cerca del 40% de la población humana vive en zonas costeras, pero cerca de 600 millones de personas viven en costas que no superan los 10 m.s.n.m (ONU, 2017; Neumann et al., 2015), esta población es considerada vulnerable ya que no solo dependen directamente de los recursos marinos, sino que también se encuentran propensos a afectaciones por el aumento en el nivel del mar, tormentas tropicales y enfermedades (Alonso, Vides & Londoño, 2001; UNEP, 2006). Este nivel de vulnerabilidad aumenta en el tiempo a medida que los efectos del cambio climático se hacen más evidentes, siendo estas poblaciones las primeras en sufrir este tipo de daños y no tener estrategias de adaptación al clima que sean suficientes para evitar más afectaciones (Nicholls et al., 2008).

2. Naturaleza del Indicador.

Indicador tipo “B1”.

3. Metodología para la Medición del Indicador.

A partir de los datos de INVEMAR y la alcaldía de Cartagena de Indias sobre la demografía de la isla, y con ayuda de imágenes satelitales se puede determinar el número de propiedades totales y la cantidad de estas propiedades que se encuentran en zonas propensas a ser inundadas de acuerdo con las características geomorfológicas y climatológicas de la isla con ayuda de datos del IGAC y el IDEAM (MinAmbiente, 2017; GEF, 2008).

4. Limitantes del Indicador.

No se encontraron limitantes para este indicador.

6. CONCLUSIONES.

- Este trabajo permitió la creación de indicadores de fácil entendimiento y medición que pueden ser puestos en práctica por investigadores o los habitantes de Isla Fuerte, a partir de la explicación metodológica detallada, una contextualización de la relevancia de estos indicadores relacionados con las formaciones coralinas y un prototipo de estación de monitoreo meteorológica que hace práctica la toma de datos y que también ayuda para la minimización de errores por variables adicionales.
- La construcción y medición de los indicadores permite identificar y mostrar a la población humana nativa de Isla Fuerte la importancia de la conservación de los ecosistemas coralinos que pueden disminuir muy significativamente la vulnerabilidad de esta población humana frente a los eventos climáticos periódicos, pero también frente aquellos más extremos e impredecibles.
- Los indicadores permiten medir diversas variables desde diferentes frentes, como son climáticos, físicos, químicos y sociales.
- El desarrollo de este trabajo complementa a una escala de investigación de mayor tamaño que se viene realizando desde el año pasado, donde de manera similar se habían diseñado indicadores de biodiversidad y socioeconómicos, lo que al complementar con indicadores climáticos acerca la creación semejante al CCB.
- Al haberse expuesto los efectos positivos de la presencia y buen estado de conservación de los corales, al constituir una barrera física por medio de la restauración ecológica que recupere los servicios ecosistémicos como barrera contra eventos océano-climáticos, esto puede generar un cambio social en la población isleña que promueva la conservación, reintroducción y restauración de corales para su beneficio, así mismo, lo anterior fomentaría los servicios ecosistémicos, reclutamiento de especies, resiliencia, etc.
- Los indicadores propuestos en este trabajo permiten dar un paso más para la construcción de un estándar de Clima, Comunidad y Biodiversidad Marina (CCBM) que no existe a nivel mundial, convirtiéndose en un aporte fundamental para validar las ganancias netas positivas de proyectos en restauración ecológica de arrecifes de coral.
- El método propuesto para este trabajo permitió reducir el esfuerzo de búsqueda y filtrado de bibliografía de manera eficiente para la información relacionada con variables climáticas e indicadores.

7. RECOMENDACIONES.

Se recomiendan campañas sociales de sensibilización y apropiación enfocadas a los habitantes de la isla en los diferentes grupos sociales (pescadores, transportadores, vendedores, agricultores, guías turísticos, etc.) para que el proceso de conservación de los diferentes corales que rodean la isla sea garantizado por la misma comunidad.

Se recomienda acoplar este trabajo con el realizado previamente para consolidar un estándar conjunto que incorpore clima, biodiversidad y comunidad.

Se recomienda que la toma de datos se haga lo más rigurosa posible, siguiendo de manera sistemática las metodologías para garantizar la veracidad de los datos obtenidos y que estos se hagan públicos y sean compartidos entre la comunidad científica, entes gubernamentales interesados y en la comunidad de Isla Fuerte.

Se recomienda evaluar la evolución en la vulnerabilidad del ecosistema del proyecto, desde la línea base y durante los monitoreos.

Se recomienda poner a prueba los indicadores, metodologías y limitaciones con el fin de determinar fallas o complicaciones y que se puedan hacer ajustes.

Se recomienda incluir el uso de estos indicadores en proyectos de restauración marina relacionados con arrecifes de coral.

8. AGRADECIMIENTOS.

Esta tesis debe ser reconocida como el conjunto de muchas partes que por medio de labores individuales contribuyeron a culminar este trabajo como el resultado de 5 años de carrera, donde agradezco a Dios por permitirme mi vida y mi salud para llevar a cabo este proceso académico y personal, a mi mamá por darme su incondicional apoyo y seguimiento a lo largo de todo el proceso de planeación y desarrollo, junto con su incansable esfuerzo por dar la rigurosidad matemática y lógica para los indicadores sin los que este trabajo no habría podido completarse. A mis abuelos Gonzalo y Gabriela por estar presentes en las etapas más iniciales en la creación de este proyecto y por tener siempre el mayor orgullo y asombro por las cosas que yo hago, a mi hermana Juliana por la creación de las ayudas gráficas y visuales de este trabajo, y la tolerancia para entender y plasmar las ideas que tenía. A mi novia Valeria por acompañarme estos últimos 5 años y apoyarme por alcanzar finalmente este proyecto siendo mi mejor amiga y más grande compañía durante la Universidad. A mi director Fabio por haberme acogido y dado la oportunidad de trabajar en un proyecto tan interesante como éste, donde durante el proceso de creación tuve una gran cantidad de enseñanzas académicas, profesionales y personales.

9. BIBLIOGRAFÍA.

Abraham, J. P., Baringer, M., Bindoff, N. L., Boyer, T., Cheng, L., Church, J. A., Conroy, J. L., Domingues, C. M., Fasullo, J. Gilson, T. J., Goni, G., Good, S. A., Gorman, J. M., Gouretski, V., Ishii, M., Johnson, G. C., Kizu, S., Lyman, J. M., Macdonald, A. M., Minkowycz, W. J., Moffitt, S. E., Palmer, M. D., Piola, A. R., Reseghetti, F., Schuckmann, K., Trenberth, K. E., Velicogna, I., Willis, J. K., (2013). A review of global ocean temperature observations: Implications for ocean heat content estimates and climate change. *Reviews of Geophysics*, 51(3), 450–483. doi:10.1002/rog.20022.

Anderson, P. S., (1975). Isla Fuerte. *Colombia Geográfica*, 5 (2): 119-191.

Alonso, D. A., Vides, M. P. & Londoño, M. (2001). Amenazas y Riesgos Ambientales en las Zonas Costeras Colombianas. Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia: Año 2001.

Archer, D., Martin, P., Buffett, B., Brovkin, V., Rahmstorf, S., & Ganopolski, A. (2004). The importance of ocean temperature to global biogeochemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(2), 333–348. doi:10.1016/j.epsl.2004.03.011.

Baird, A. H., Bhagooli, R., Ralph, P. J. & Takahashi, S. (2009). Coral bleaching: the role of the host. *Trends Ecol Evol* 24:16–20.

Baker, A. C., Starger, C. J., McClanahan, T. & Glynn, P. W. (2004). Corals' adaptive response to climate change. *Nature* 430:741.

Beck, M. W., Losada, I. J., Menendez, P., Reguero, B. G., Díaz-Simal, P., & Fernandez, F. (2018). The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nature Communications*, 9(1), 2186. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04568-z>.

Benavides-Ballesteros, H. O. & Rocha-Enciso, C. E. (2012). Indicadores que Manifiestan Cambios en el Sistema Climático de Colombia (Años y Décadas más Calientes y las más y Menos Lluviosas). IDEAM–Meteo/001-2012. Nota Técnica Del IDEAM.

Birkeland, C., (1985). Ecological interactions between tropical coastal ecosystems. *UNEP Reg. Seas Rep. Stud.*, 73, pp. 1-26.

Benthuisen, J. A., Tonin, H., Brinkman, R., Herzfeld, M., & Steinberg, C. (2016). Intrusive upwelling in the Central Great Barrier Reef. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(11), 8395–8416. doi:10.1002/2016jc012294.

Bigg, G. R., Jickells, T. D., Liss, P. S., Osborn, T. J. (2003). The role of the oceans in climate. *International Journal of Climatology*, 23(10), 1127–1159. doi:10.1002/joc.926.

Brown, B. E., Dunne, R. P., Somerfield, P. J., Edwards, A. J., Simons, W. J. F., Phongsuwan, N. Phongsuwan, L. Putschim, L. Anderson & M. C. Naeije, (2019). Long-term impacts of rising sea temperature and sea level on shallow water coral communities over a ~40 year period. *Scientific Reports*, 9(1). doi:10.1038/s41598-019-45188-x.

Carter, D. J. T. (1982). Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP results. *Ocean Engineering*, 9(1), 17–33. doi:10.1016/0029-8018(82)90042-7.

Clark, C. D. & Russell, C. S. (2008) Ecological Conservation: The Problems of Targeting Policies and Designing Instruments, *Journal of Natural Resources Policy Research*, 1:1, 21-34, DOI: 10.1080/19390450802495890.

CCBA. 2013. Estándares de Clima, Comunidad y Biodiversidad Tercera Edición. CCBA, Arlington, VA, USA. Diciembre, 2013.

Cheriton, O. M., Storlazzi, C. D., & Rosenberger, K. J. (2016). Observations of wave transformation over a fringing coral reef and the importance of low-frequency waves and offshore water levels to runup, overwash, and coastal flooding. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(5), 3121–3140. doi:10.1002/2015jc011231.

Cochrane SKJ, Andersen JH, Berg T, Blanchet H, Borja A, Carstensen J, Elliott M, Hummel H, Niquil N and Renaud PE (2016) What Is Marine Biodiversity? Towards Common Concepts and Their Implications for Assessing Biodiversity Status. *Front. Mar. Sci.* 3:248. doi: 10.3389/fmars.2016.00248.

Comeau, S., Tambutté, E., Carpenter, R. C., Edmunds, P. J., Evensen, N. R., Allemand, D., Venn, A. A. (2017). Coral calcifying fluid pH is modulated by seawater carbonate chemistry not solely seawater pH. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1847), 20161669. doi:10.1098/rspb.2016.1669.

DANE, (2005). Boletín – Censo General 2005. Perfil Cartagena, Bolívar. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

Departamento Nacional de Planeación (2012). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. ABC: Adaptación Bases Conceptuales. Marco Conceptual y Lineamientos.

Deutsches Hydrographisches Institut, (1958). Westindien-Handbush, I. Teil: Die Nordküste Süd- und Mittelamerikas. HHI, Hamburg, 720 p.

Diaz, J. M., Sanchez, J. A. & Diaz-Pulido, G., (1996). Geomorfología y Formaciones Arrecifales Recientes de Isla Fuerte y Bajo Bushnell, Plataforma Continental del Caribe Colombiano. *Bol. Cient. Mar. Cost.*, 25: 87-105.

Delgado, I., & Lloyd, G. (2004). A Simple Low Cost Method for One Person Beach Profiling. *Journal of Coastal Research*, 204, 1246–1252. doi:10.2112/03-0067r.1.

Duncan, B.E., Higgason, K. D., Suchanek, T. H., Largier, J., Stachowicz, J., Allen, S., Bograd, S., Breen, R., Gellerman, H., Hill, T., Jahncke, J., Johnson, R., Lonhart, S., Morgan, S., Roletto, J., & Wilkerson, F. (2013). Ocean Climate Indicators: A Monitoring Inventory and Plan for Tracking Climate Change in the North-central California Coast and Ocean Region. Report of a Working Group of the Gulf of the Farallones National Marine Sanctuary Advisory Council.

Ebi, K., Boyer, C., Bowen, K., Frumkin, H., & Hess, J. (2018). Monitoring and Evaluation Indicators for Climate Change-Related Health Impacts, Risks, Adaptation, and Resilience. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(9), 1943. doi:10.3390/ijerph15091943.

Fabricius, K., Langdon, C., Uthicke, S., Humphrey, C., Noonan, S., De'ath, G., Okazaki, R., Muehllehner, N., Glas, M. S. & Lough, J. M., (2011). Losers and winners in coral reefs

acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. *Nature Clim Change* 1, 165–169. <https://doi.org/10.1038/nclimate1122>.

Fairbanks, R., Evans, M., Rubenstone, J. et al. Evaluating climate indices and their geochemical proxies measured in corals. *Coral Reefs* 16, S93–S100 (1997). <https://doi.org/10.1007/s003380050245>.

Ferrario, F., Beck, M., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C. & Airoidi, L., (2014). The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nat Commun* 5, 3794. <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), (2011) Fisheries management: Marine protected areas and fisheries. FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries No. 4, Suppl. 4. Rome.

Ford, D. (2010). *Scientific Method for Ecological Research*. Cambridge University Press. ISBN: 9780511612558.

Global Climate Observing System. (2017). Indicators of Climate Change Outcome of a meeting held at WMO 3 February 2017. World Meteorological Organization.

Global Environment Facility (GEF), (2008). GEF Annual Report 2008.

Glynn, P.W., Howard, L.S., Corcoran, E., Freay, D. (1986). Preliminary investigations into the occurrence and toxicity of commercial herbicide formulations in reef building corals.

Gourlay, M. R. (1994). Wave transformation on a coral reef. *Coastal Engineering*, 23(1-2), 17–42. doi:10.1016/0378-3839(94)90013-2.

Gray, J. R., Gylsson, G. D., Turcios, L. M., & Schwarz, G. E. (2000). Comparability of Suspended-Sediment Concentration and Total Suspended Solids Data. USGS Water-Resources Investigations Report 00-4191. Reston, VA: U S Geological Survey.

Guadayol, O., Silbiger, N. J., Donahue, M. J., & Thomas, F. I. M. (2014). Patterns in Temporal Variability of Temperature, Oxygen and pH along an Environmental Gradient in a Coral Reef. *PLoS ONE*, 9(1), e85213. doi:10.1371/journal.pone.0085213

Harris, D. L., Rovere, A., Casella, E., Power, H., Canavesio, R., Collin, A., Pomeroy, A., Webster, J. M. & Parravicini, V. (2018). Coral reef structural complexity provides important coastal protection from waves under rising sea levels. *Science Advances*, 4(2), eaao4350. doi:10.1126/sciadv.aao4350.

Hearn, C. J., (1999). Wave-breaking hydrodynamics within coral reef systems and the effect of changing relative sea level. *J. Geophys. Res. Oceans* 104, 30007–30019 (1999).

Hoegh-Guldberg, O., Pendleton, L., & Kaup, A. (2019). People and the changing nature of coral reefs. *Regional Studies in Marine Science*, 100699. doi:10.1016/j.rsma.2019.100699.

Huertas-Rodríguez, J. C. (2000). Caracterización estructural, composición y estado de salud de las formaciones coralinas de Isla Fuerte, Bajo Burbujas y Bajo Bushnell, Caribe Colombiano. Universidad de Antioquia, Medellin.

Hurrell, J. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science* 269: 676–679.

IC Controls (2017). ppm Dissolved Oxygen Measurement. Technical Article.

International Coral Reef Initiative, The Prince of Wales' International Sustainability Unit, UN Environment & Trucost. (2018). *The Coral Reef Economy: The business case for investment in the protection, preservation and enhancement of coral reef health.*

IGAC, (1975). *Estudio Hidroclimático de la Región del Caribe.* Instituto Geográfico 'Agustin Codazzi', Bogotá. 77 p.

Intergovernmental Oceanographic Commission (of UNESCO) (IOC), (2018). *Ocean Acidification. Development of the SDG 14.3.1 indicator methodology - Expert Workshop.* 16 - 18 January 2018, Paris cedex 07, France.

IPCC, (2010). *Glossary.* Annex I.

IPCC, (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation.* Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Javelaud, O., (1986). *Sedimentología de la Plataforma Continental del Caribe Colombiano.* Bol. Cient. CIOH, 6: 17-39.

Jokiel, P. L., Rogers, K. S., Storlazzi, C. D., Field, M. E., Lager, C. V. & Lager, D. (2014). *Response of reef corals on a fringing reef flat to elevated suspended-sediment concentrations: Moloka'i, Hawai'i.* Hawai'i Institute of Marine Biology Technical Report 37. Sea Grant Cooperative Report UNIHI-Seagrant CR-86-01.

Kanwisher, J. W., & Wainwright, S. A. (1967). *Oxygen Balance in Some Reef Corals.* The Biological Bulletin, 133(2), 378–390. doi:10.2307/1539833

Kench, P. S., & Brander, R. W. (2006). *Wave Processes on Coral Reef Flats: Implications for Reef Geomorphology Using Australian Case Studies.* Journal of Coastal Research, 22(1), 209–223. doi:10.2112/05a-0016.1.

Keyanne, H. (2016). *Coral Reef Science - Strategy for Ecosystem Symbiosis and Coexistence with Humans under Multiple Stresses.* Coral Reefs of the World 5. ISSN 2213-719X. ISBN 978-4-431-54363-3.

Kinsey, D. W., & Hopley, D. (1991). *The significance of coral reefs as global carbon sinks—response to Greenhouse.* Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 89(4), 363–377. doi:10.1016/0031-0182(91)90172-n.

Kinzie, R.A. III, Takayama, M., Santos, S.R. & Coffroth, M.A, (2001) *The adaptive bleaching hypothesis: experimental tests of critical assumptions.* Biol Bull 200:51–58.

Lamb, H.H. (1995). *Climate, history and the modern world.* 2nd Edition.

Langland, M., & Cronin, T. (2003). *A Summary Report of Sediment Processes in Chesapeake Bay and Watershed.* In Water-Resources Investigations Report 03-4123. New Cumberland, PA: U S Geological Survey.

- Lowe, R. J., Falter, J. L., Bandet, M. D., Pawlak, G., Atkinson, M. J., Monismith, S. J., Koseff, J. R., (2005). Spectral wave dissipation over a barrier reef. *J. Geophys. Res. Oceans* 110, C04001.
- Massel, S. R., & Gourlay, M. R. (2000). On the modelling of wave breaking and set-up on coral reefs. *Coastal Engineering*, 39(1), 1–27. doi:10.1016/s0378-3839(99)00052-6.
- McAllister, D. E., (1991). What is the status of the world's coral reef fishes? *Sea Wind*, 5 (1991), pp. 14-18.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being - synthesis*. ISBN 1-59726-040-1.
- Millero, F. J., Graham, T. B., Huang, F., Bustos-Serrano, H., & Pierrot, D. (2006). Dissociation constants of carbonic acid in seawater as a function of salinity and temperature. *Marine Chemistry*, 100(1-2), 80–94. doi:10.1016/j.marchem.2005.12.001.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Informe de Gestión – 2017*. Bogotá / Enero 2018.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Resumen - Plan Maestro de Erosión Costera De Colombia*.
- Moberg, F. & Folke, C., (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*. Volume 29, Issue 2, Pages 215-233, ISSN 0921-8009, [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00009-9).
- Montaggioni, L. F. & Braithwaite, C. J. R. (2009). The Great Barrier Reef: A 700,000 year Diagenetic history. *Sedimentology*, in press.
- Muller-Parker, G., D'Elia C.F., Cook C.B. (2015) Interactions Between Corals and Their Symbiotic Algae. In: Birkeland C. (eds) *Coral Reefs in the Anthropocene*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7249-5_5.
- Muir, A. M. & Fleming, C. A., (2014). *Coastal Hydraulics*. Second Edition. Palgrave. ISBN-10 : 134904508X.
- Nelson, H. R. & Altieri, A. H., (2019). *Oxygen: The Universal Currency on Coral Reefs*.
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *PLOS ONE*, 10(3), e0118571. doi:10.1371/journal.pone.0118571.
- Nicholls, R. & Harvey, N., (2008). Global sea-level rise and coastal vulnerability. *Sustainability Science*, 3(1), 5–7. doi:10.1007/s11625-008-0049-x.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2004). *How NOAA Uses Coral Nurseries to Restore Damaged Reefs*.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (s.f.). *Polyps Up Close. Corals. What Are Corals?*
- Nugues, M.M., Roberts, C.M., (2003). Coral mortality and interaction with algae in relation to sedimentation. *Coral Reefs* 22, 507–516. <https://doi.org/10.1007/s00338-003-0338-x>.

- Ogden, J. C., (1988). The influence of adjacent systems on the structure and function of coral reefs. Proc. 6th Int. Coral Reef Symp., 1.
- Pait, A. S., Hartwell, S. I., Mason, A. L., Apeti, D. A., Jeffrey, C. F. G., Pittman, S. J., Hoffman, A. M., Galdo Jr., F. R. April 2015. An assessment of nutrients, sedimentation, and Total Suspended Solids (TSS) in the St. Thomas East End Reserves (STEER). NOAA Technical Memorandum NOS/NCCOS 184. Silver Spring, MD. 74 pp.
- Pollock, M. M., Beechie, T. J., & Imaki, H. (2012). Using reference conditions in ecosystem restoration: an example for riparian conifer forests in the Pacific Northwest. *Ecosphere*, 3(11), art98. doi:10.1890/es12-00175.1.
- Paulay, G., (1997). Diversity and Distribution of Reef Organisms. *Life and Death of Coral Reefs* (pp.298-353).
- Pisapia, C., Burn, D. & Pratchett, M. S., (2019). Changes in the population and community structure of corals during recent disturbances (February 2016-October 2017) on Maldivian coral reefs. Decline and subsequent recovery of coral assemblages in Maldives following major disturbances. 10.1038/s41598-019-44809-9.
- Pujos, M., Pagliardin J. L., Steer, R., Vernet, G. & Weber, O. (1986). Influencia de la contracorriente norte colombiana para la circulación de las aguas en la plataforma continental: su acción sobre la dispersión de los efluentes en suspensión del río Magdalena. *Boletín Científico, CIOH* 6: 3-15.
- Richmond, R. H. (1993). Coral Reefs: Present Problems and Future Concerns Resulting from Anthropogenic Disturbance. *American Zoologist*, 33(6), 524–536. doi:10.1093/icb/33.6.524.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. & Porter, J.P., (1991). Revised Universal Soil Loss Equation. *J. of Soil and Water Conservation* 46: 30-33.
- Rérolle, V. M. C., Floquet, C. F. A., Mowlem, M. C., Connelly, D. P., Achterberg, E. P., & Bellerby, R. R. G. J. (2012). Seawater-pH measurements for ocean-acidification observations. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 40, 146–157. doi:10.1016/j.trac.2012.07.016
- Rérolle, V. M., Floquet, C. F., Mowlem, M. C., Connelly, D. P., Achterberg, E. P., & Bellerby, R. R. (2012). Seawater-pH measurements for ocean-acidification observations. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 40, 146–157. doi:10.1016/j.trac.2012.07.016.
- Rogers CS. 1990. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Marine Ecology. Progress Series* 62:185–202 DOI 10.3354/meps062185.
- Scoffin, T. P. & Dixon, J. E. (1983). The distribution and structure of coral reefs: One hundred years since Darwin. *Biological Journal of Linnean Society*, 20, 11–38.
- Society for Ecological Restoration. (2019). *International Principles and Standards for the Practice of Ecological Restoration*. Second Edition: November 2019.
- Society for Ecological Restoration. (2004). *The SER International Primer on Ecological Restoration*. Science & Policy Working Group (Version 2: October, 2004).

- Smith, S., (1978). Coral-reef area and the contributions of reefs to processes and resources of the world's oceans. *Nature* 273, 225–226. <https://doi.org/10.1038/273225a0>.
- Sous, D., Tissier, M., Rey, V., Touboul, J., Bouchette, F., Devenon, J.-L., Chevalier, C., Aucan, J., (2019). Wave transformation over a barrier reef. *Continental Shelf Research*. doi:10.1016/j.csr.2019.07.010.
- Steele, J., (2016). How Gaia and coral reefs regulate ocean pH. Scripps Ocean Acidification Real-time SOAR Monitoring Program.
- Stewart R.H. 1980. Ocean wave measurement techniques. In *Air Sea Interaction, Instruments and Methods*. Edited by L. H. F. Dobson and R. Davis. 447–470. New York: Plenum Press.
- Tunncliffe, V. (1982). The effects of wave-induced flow on a reef coral. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 64(1), 1–10. doi:10.1016/0022-0981(82)90064-8.
- United Nations, (2017). Factsheet: People and Oceans. The Ocean Conference.
- United Nations Environment Programme (UNEP), (2006). UNEP 2006 Annual Report. Climate change Disasters & conflicts Ecosystems and Biodiversity Environmental rights and governance Chemicals & waste Environment under review.
- United States Geological Survey. (2017). Sea Floor Erosion in Coral Reef Ecosystems Leaves Coastal Communities at Risk. Sea Floor Erodes, Reefs Can't Keep Up - Coastal communities losing storm protection.
- Wijgerde, T., Silva, C. I. F., Scherders, V., van Bleijswijk, J., & Osinga, R. (2014). Coral calcification under daily oxygen saturation and pH dynamics reveals the important role of oxygen. *Biology Open*, 3(6), 489–493. doi:10.1242/bio.20147922
- Wilkinson, C. R. & Buddemeier, R. W., (1994). Global Climate Change and Coral Reefs: Implications for People and Reefs. Report of the UNEP-IOC-ASPEI-IUCN Global Task Team on the Implications of Climate Change on Coral Reefs.
- Williams, I.R., (1975). Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service S-40, pp. 244252.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D., (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses. *Agriculture Handbook* 537. United States Department of Agriculture. Science and Education Administration. 58 pp.
- Woodhead, A. J., Hicks, C. C., Norström, A. V., Williams, G. J., & Graham, N. A. J. (2019). Coral reef ecosystem services in the Anthropocene. *Functional Ecology*. doi:10.1111/1365-2435.13331.
- Woodroffe, C. D., Kennedy, D. M., Jones, B. G., & Phipps, C. V. G. (2004). Geomorphology and Late Quaternary development of Middleton and Elizabeth Reefs. *Coral Reefs*, 23, 249–262.
- Yates, K. K., Zawada, D. G., Smiley, N. A., and Tiling-Range, G. (2017). Divergence of seafloor elevation and sea level rise in coral reef ecosystems, *Biogeosciences*, 14, 1739–1772, <https://doi.org/10.5194/bg-14-1739-2017>
- Young, I. R., (1999). *Wind Generated Ocean Waves*. Second Edition, Volume II. Elsevier Ocean Engineering Series. ISBN: 9780080433172.

10. ANEXOS.

a. Ayudas Visuales.

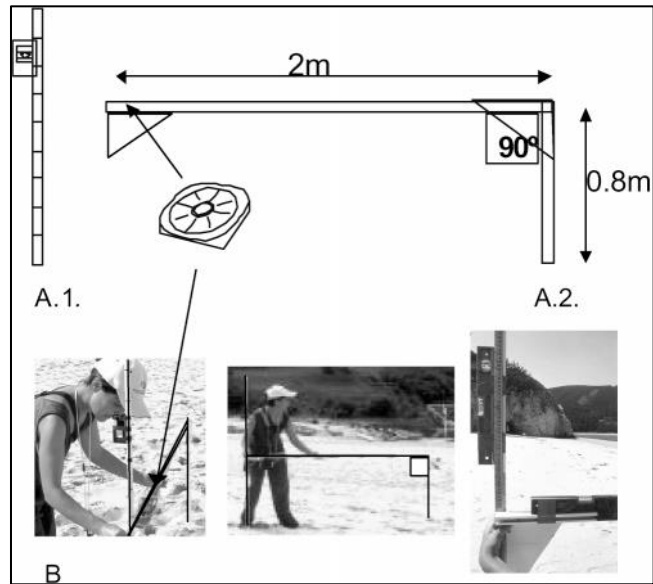


Figura 15. Esquema de la escuadra. Tomado de Delgado & Lloyd, 2004.

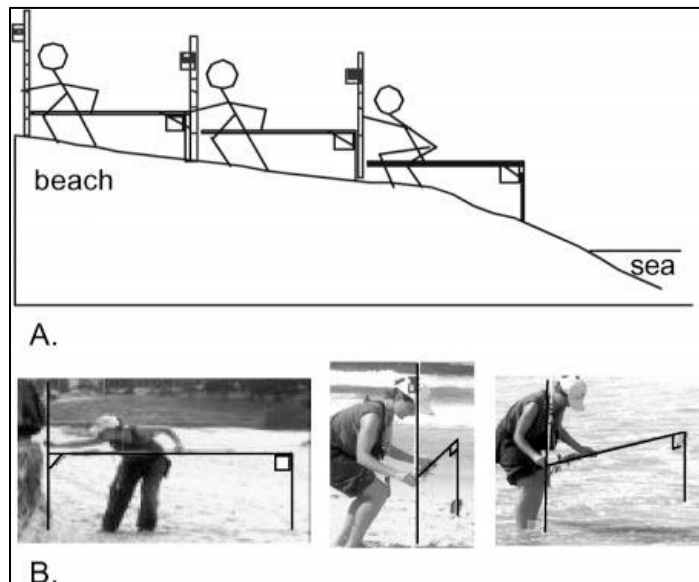


Figura 16. Esquema de la forma de establecimiento de la escuadra, medición y repetición de las mediciones. Tomado de Delgado & Lloyd, 2004.