



**RESULTADOS FINALES: CORRELACIÓN ENTRE LOS DAÑOS A ARRECIFES  
CAUSADOS POR HURACANES Y LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS  
HURACANES QUE PROVOCAN LOS DAÑOS**

**INICIATIVA MESOAMERICANA DE RESCATE DE ARRECIFES (RRI)**

**Consultor principal:** M. en C. Esmeralda Pérez Cervantes

**Especialista en análisis estadísticos:** M. en B. Fernando Pardo Urrutia



## CONTENIDO

<b>A. RESUMEN</b> .....	4
<b>A. SUMMARY</b> .....	5
<b>B. INTRODUCCIÓN</b> .....	6
<b>C. METODOS</b> .....	7
<b>1. Revisión bibliográfica de información acerca de arrecifes impactados por huracanes en la cuenca del Caribe.</b> .....	7
<b>2. Sistematización y almacenamiento de los datos de arrecifes impactados</b> .....	9
<b>3. Búsqueda de información histórica de huracanes para obtener las características de los huracanes que han impactado al Caribe.</b> .....	10
<b>4. Análisis estadístico de los datos</b> .....	13
<b>5. Análisis de los datos provisto por el Dr. Simon Young</b> .....	15
<b>D. RESULTADOS DE LAS VARIABLES DE LOS ARRECIFES Y HURACANES.</b> .....	17
<b>1. Velocidad del viento al impacto, cobertura de coral.</b> .....	19
<b>2. Cobertura de coral inicial.</b> .....	21
<b>3. Tipo de arrecife, cobertura de coral.</b> .....	25
<b>4. Zona arrecifal, cobertura de coral.</b> .....	27
<b>5. Localización, cobertura de coral.</b> .....	29
<b>6. Fetch, cobertura de coral</b> .....	31
<b>7. Profundidad del arrecife, cobertura de coral.</b> .....	34
<b>8. Tamaño del arrecife, cobertura de coral.</b> .....	35
<b>9. Intensidad del viento y presión central, cobertura de coral, cobertura de coral.</b> .....	36
<b>10. Duración de la afectación, cobertura de coral.</b> .....	37
<b>11. Marea de tormenta, cobertura de coral.</b> .....	38
<b>12. Intensidad de la tormenta y la máxima intensidad del huracán, cobertura de coral.</b> .....	39
<b>13. Distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio, cobertura de coral.</b> .....	40
<b>14. Rugosidad arrecifal inicial.</b> .....	44
<b>18. Exposición, rugosidad.</b> .....	48
<b>19. Tamaño del arrecife y fetch, rugosidad.</b> .....	49
<b>20. Presión central, duración de la afectación y distancia a la zona de estudio, rugosidad.</b> .....	50
<b>21. Intensidad de tormenta y la máxima intensidad del huracán, rugosidad.</b> .....	51
<b>E. MODELO FINAL Y ECUACIÓN.</b> .....	53
<b>F. CONCLUSIONES</b> .....	58
<b>G. RECOMENDACIONES PARA EL ESTUDIO</b> .....	59

<b>H. RECOMENDACIONES BRINDADAS POR LOS PARTICIPANTES DE LOS TALLERES .....</b>	<b>59</b>
<b>I. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>61</b>
<b>J. ANEXOS.....</b>	<b>64</b>

## A. RESUMEN

Los huracanes son una parte integral de la ecología de los arrecifes de coral. Dependiendo de su intensidad, pueden contribuir con la dinámica arrecifal al fragmentar colonias de coral y favorecer el reclutamiento. Pero en algunos casos el daño puede ser tan severo que no se logrará la regeneración del arrecife. En la consultoría, para determinar la correlación entre los daños a arrecifes causados por huracanes y las características de los huracanes que provocan los daños, se utilizó información histórica (1973 a 2017) de cobertura de coral rugosidad arrecifal y huracanes. La información histórica de sitios con información de cobertura coralina y rugosidad arrecifal antes y después del paso de un huracán fue obtenida de: bases de datos, artículos científicos, programas de monitoreo y contacto directo con personal encargada de monitoreo e investigadores. La información de los huracanes que impactaron estos sitios fue obtenida de la base de datos HURDAT2 del Atlántico (NOAA), con excepción de los datos de marea de tormenta que fueron obtenidos de la base de datos SURGEDAT. Para asociar cuales huracanes impactaron a los sitios de estudio, trazamos un búfer de 100 km de radio alrededor de cada sitio, y asociamos a ese sitio, todas las “snapshots” o capturas de huracanes que lo interceptaron entre el período de muestreo. Al calcular las variables promedio de huracanes, dimos más peso a las instantáneas de huracanes más cercanas al sitio

Los datos sirvieron para evaluar qué características de los huracanes, y características de los arrecifes impactados, se correlacionan más con las tasas efectivas anuales de cambio de cobertura coralina después del paso de un huracán. Para cada sitio, calculamos la tasa logarítmica y la tasa efectiva anual de cambio de cobertura antes y después del huracán y mediante análisis exploratorios se identificaron las principales variables que se correlacionaron con las tasas de cambio. Posteriormente con las tasas de cambio logarítmicas se realizó un modelo explicativo lineal mixto, para las variables de cobertura de coral y un modelo explicativo lineal múltiple para las variables de rugosidad, esto con el fin de determinar la contribución de estas variables en su conjunto y determinar cuál de ellas tiene mayor correlación con el daño arrecifal.

Utilizando los resultados del análisis exploratorio, se seleccionaron las variables para incluir en nuestro modelo final: porcentaje inicial de cobertura de coral, la exposición del sitio, la máxima velocidad de viento al impacto, el viento sostenido máximo, la presión central, el tiempo de exposición al huracán y la marea de tormenta para el cambio en la cobertura de coral; y rugosidad inicial, viento sostenido máximo, exposición y zona de arrecife para cambios en la rugosidad. También incluimos el tiempo transcurrido desde el impacto del huracán hasta el remuestreo como una variable importante a tener en cuenta. De estas variables, solo los primeros 3 fueron significativos para el cambio de cobertura de coral y solo la cobertura de rugosidad inicial explicar el cambio en la rugosidad. De acuerdo con nuestros resultados, proponemos el uso de las variables: cobertura de coral inicial, exposición del sitio, velocidad máxima del viento en el impacto y rugosidad inicial para calcular los parámetros de seguro. Además, según lo solicitado, entregamos una ecuación de regresión lineal que puede ayudarles a evaluar diferentes escenarios de pérdida de cobertura de coral

## A. SUMMARY

Hurricanes comprise an important component of coral reef ecology. Depending on their intensity, they can contribute to reef dynamics by means of fragmenting coral colonies and favoring recruitment. However, in some cases, the damage can be so severe that complete reef regeneration will not be possible. In this project, we used historical data (1973 to 2017) concerning coral cover, reef rugosity and various hurricane/reef characteristics, in order to determine the correlation between observed reef damage after hurricane impact, with the characteristics of the impacting hurricane and the impacted reef. We obtained the historical information of coral cover and rugosity before and after a hurricane impact, as well as various reef characteristics from databases, scientific articles, reports of monitoring programs in the area of interest and direct contact with field data collectors and researchers. The information of impacting hurricanes was mostly obtained from the

Atlantic HURDAT2 database (NOAA), with the exception of storm surge data, which were obtained from the SURGEDAT database. In order to associate sites with their impacting hurricanes, we used a 100 km radius buffer around each site, and we associated to that site, all the hurricanes “snapshots” that intersected it between the sampling period. In calculating the average hurricane variables, we gave more weight to the hurricane snapshots nearer to the site.

With these data, we evaluated which characteristics of hurricanes and impacted reefs were correlated with logarithmic annual rates of coral cover and rugosity change, before and after the hurricane. Using exploratory data analysis we identified the reef and hurricane variables with the highest potential to be correlated with the described rates of change; afterwards, we adjusted a linear mixed model to explain the coral cover rate of change and a multiple linear regression to explain the rugosity rate of change, in order to determine the significant covariates. We used different models in order to appropriately satisfy each model’s assumptions.

Using the results of our exploratory data analysis, we selected the variables to include in our final model: initial coral cover, site exposition, maximum wind speed at impact, maximum sustained wind, minimum central pressure, time of exposition to hurricane winds and storm surge for change in coral cover; and initial rugosity, maximum sustained wind, exposition and reef zone for change in rugosity. We also included the time elapsed from the hurricane impact until resampling as an important variable to take account for. From these variables, only the first 3 were significant for coral cover change and only the first one to explain change in rugosity.

According to our results, we propose the use of the variables: initial coral cover, site exposition, maximum wind speed at impact and initial rugosity to compute the insurance parameters. Moreover, as asked by the client, we handed over a linear regression equation that can help them assess different scenarios of coral cover loss.

## B. INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral son uno de los ecosistemas más diversos del mundo: por su arquitectura tridimensional pueden albergar a cientos de miles de especies distintas. Lamentablemente, es un ecosistema que está en constante peligro: tan solo en la región del Caribe la cobertura de coral ha disminuido casi un 40% desde 1970 (Jackson *et. al.* 2014). Las causas principales del declive pueden atribuirse a factores antropogénicos, el cambio climático y desastres naturales.

Dentro de los desastres naturales encontramos a los huracanes. Cada año, la zona del Caribe recibe en promedio 6.2 huracanes durante los meses de junio a noviembre (<http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/E11.html>), con picos de actividad en septiembre (Taylor & Alfaro, 2005).

Los huracanes son una parte integral de la ecología de los arrecifes de coral. Dependiendo de su intensidad, un huracán puede destruir colonias de coral a su paso, para posteriormente permitir el reclutamiento de nuevos organismos en las áreas alteradas (Connell, 1978). Pero en algunos casos el daño puede ser tan severo que no se logrará la regeneración del arrecife (Hughes, 1994).

Los corales son los principales constructores de los arrecifes de coral, por lo que un porcentaje bajo de su cobertura indica una mala salud del arrecife y en consecuencia puede provocar la degradación del ecosistema. Una alta complejidad arrecifal permite proveer refugio a los organismos, por lo tanto, si la complejidad disminuye también podrá disminuir la alta biodiversidad que albergan los arrecifes (Álvarez-Filip *et. al.*, 2009). La importancia de los arrecifes no sólo radica en su alta biodiversidad, estos a su vez también proveen de numerosos bienes y servicios ambientales: se estima que el 10% de la proteína de consumo humano proviene de estos ecosistemas (WWF, 2006), además protegen las costas de tormentas, huracanes y erosión (Ferrario *et. al.*, 2014) y son de alto atractivo turístico. Por lo anterior su valor económico a nivel global es de aproximadamente treinta y seis billones de dólares (Spalding *et. al.*, 2017).

La presente consultoría tiene como misión cuantificar los daños causados por huracanes a la cobertura de coral y complejidad arrecifal de los sitios afectados, para calcular el daño se consideraron los datos de antes y después del paso de un ciclón. Se enfocó la búsqueda en sitios que tuvieran series de tiempo (dos o más años de datos) de cobertura coralina o rugosidad y/o estudios que estén enfocados a evaluar el daño después del paso de huracanes entre la década de 1980 y el presente. Este reporte presenta resultados finales de las variables consideradas para los arrecifes y los huracanes.

Posteriormente se abordarán los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el daño causado por huracanes y tormentas en los arrecifes del Caribe y de la Región del SAM.
- Determinar la relación entre las características del huracán (parámetros), las características del arrecife y el daño causado en los arrecifes del Caribe y del SAM.
- Determinar los parámetros que podrían activar el pago del seguro paramétrico en el SAM.

## C. METODOS

### 1. Revisión bibliográfica de información acerca de arrecifes impactados por huracanes en la cuenca del Caribe.

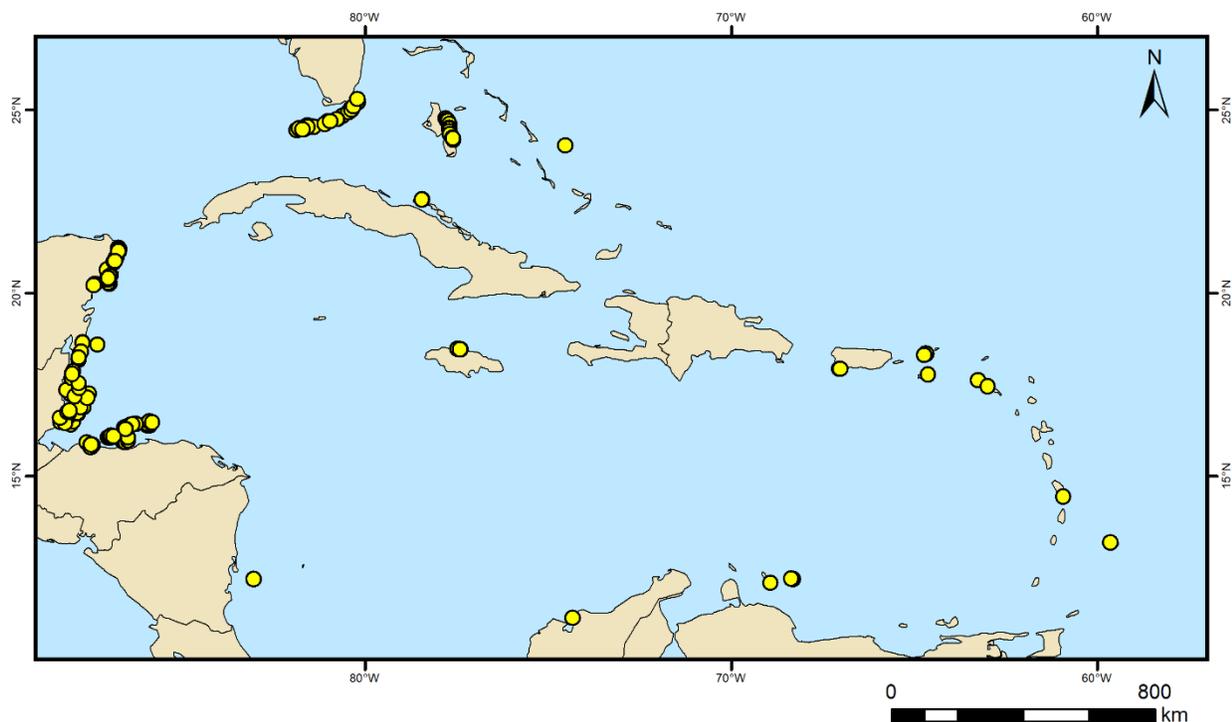
La información acerca del estado de los arrecifes del Caribe antes y después del paso de un huracán, se obtuvo realizando búsqueda bibliográfica intensiva de artículos científicos en la Web utilizando herramientas como: Web of Science, Google Scholar, ScienceDirect, etc. Además, se contactó a investigadores y encargados de monitoreo de arrecife en los países o territorios que han sufrido el impacto de algún huracán en los últimos años. En anexo se puede encontrar la lista detallada de los artículos, bases de datos, reportes y tesis que fueron consultadas.

Los sitios utilizados para el análisis fueron obtenidos principalmente de la base del Sistema de información arrecifal del Caribe (SIAC) y la base de datos de la U.S. Geological Survey.

Se integraron 414 sitios con datos de cobertura de coral: 48 sitios en artículos, 356 en bases de datos, 5 reportes y 5 tesis de licenciatura. Además de 44 sitios recopilados para el análisis con datos de rugosidad. 29 sitios en artículos, 27 en bases de datos y 3 en informes.

Para los análisis finales solo se eligieron 245 sitios con datos de cobertura de coral y 37 sitios con datos de rugosidad arrecifal, ya que eran los que cumplían las características de un solo huracán entre remuestreos. Para los datos de rugosidad se determinó el huracán que paso entre remuestreos por medio de revisión bibliográfica, ya que no se contaba con las fechas exactas de muestreo.

Los sitios se distribuyen en 24 países de la cuenca del Caribe: Belice, Guatemala, México, Honduras, Bahamas, Barbados, Bermuda, Bonaire, Colombia, Cuba, Curazao, Estados Unidos, Isla Grande del Maíz, Islas Caimán, Islas Vírgenes EUA, Jamaica, Martinica, Puerto Rico, República Dominicana, Saba, San Eustaquio, San Salvador, Tobago y Venezuela. Abarcando series de tiempo (dos o más años de datos) de 1973 a 2017. Ver figura 1.



**Figura 1.** Mapa de los sitios que se distribuyen en 24 países de la cuenca del Caribe. 245 sitios con los datos de cobertura de coral antes y después del paso de un solo huracán (●) y 37 sitios recopilados para el análisis con datos de rugosidad.

Las variables de los arrecifes consideradas en el análisis se explican a continuación:

**Cobertura de coral.** Se refiere a la cantidad de corales pétreos que se encuentran sobre el arrecife. se consideró el porcentaje de cobertura antes y después del paso del huracán y se obtuvo directamente de los artículos, bases de datos, tesis y reportes.

**Rugosidad del arrecife.** Es una medida de la complejidad del arrecife, una cadena mide el contorno de una distancia conocida sobre el arrecife y se obtiene el cociente del tamaño de la cadena y la distancia conocida. Se consideró la rugosidad de antes y después del paso del huracán y se obtuvo directamente de los artículos.

**Tipo de arrecife.** Los tipos de arrecife que se tomaron en cuenta fueron: atolón, barrera, costero, plataforma, banco, parche y bajo (Lang *et. al.*, 2010).

**Zona arrecifal.** Las distintas zonas que se identificarán dentro de un arrecife son las siguientes: cresta, frontal, laguna y posterior (Lang *et. al.*, 2010).

**Profundidad del arrecife.** La profundidad en metros (m) a la que se encuentra el arrecife del sitio registrada en artículos, bases de datos, tesis y reportes.

**Localización.** De acuerdo con la exposición del sitio en el contexto de la isla o línea de costa puede variar el efecto y la intensidad de las corrientes y vientos por lo que se tomara en cuenta la posición del sitio respecto a su exposición, dividida en: sotavento (protegido) intermedio y barlovento (expuesto). Cada sitio fue clasificado según sus características (Lang *et. al.*, 2010).

**Grado de protección ante el oleaje (fetch).** El fetch se define como la distancia de agua máxima sobre la cuál un viento puede soplar, medida en kilómetros (km). Entre más fetch se esperan olas más energéticas. Para calcularlo se usó el paquete de “R” “Waver” (InVEST Coastal Vulnerability Model y Rohweder J. *et. al.*, 2008). Para el cuál se utilizó la capa del continente americano (Porto Tapiquén C. E., 2015) y la base de datos de las coordenadas de los sitios analizados. La dirección del viento utilizada fue: norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste y oeste. También se filtró a las direcciones: sur, sureste y este, por ser las direcciones que siguen las trayectorias de los huracanes.

**Tamaño del arrecife.** El tamaño del arrecife correspondió al tamaño en metros (m) del área muestreada, la cual se calculó con el número de transectos utilizados para cada estudio, los datos se obtuvieron a partir de los artículos, bases de datos, tesis y reportes.

## 2. Sistematización y almacenamiento de los datos de arrecifes impactados

Los datos recopilados de los sitios, antes y después del impacto de un huracán fueron homologados en Excel preservando campos correspondientes a los siguientes tipos de información:

- Información del proyecto
- Información del sitio
- Información de la metodología
- Cobertura de coral
- Complejidad

### 3. Búsqueda de información histórica de huracanes para obtener las características de los huracanes que han impactado al Caribe.

Las características de los huracanes que han impactado a los arrecifes del Caribe se obtuvieron de la base de datos de huracanes del Atlántico de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration* <https://www.nhc.noaa.gov/data/>): HURDAD2 del Atlántico, la cual compila datos de huracanes desde 1851 a 2017 (Landsea y Franklin, 2013).

Las variables del huracán que se utilizaron para este estudio se describen a continuación:

**Intensidad del viento (viento sostenido máximo):** La intensidad de los vientos máximos sostenidos en nudos (kt), la velocidad del viento más fuerte en promedio por un minuto a 10 m de altitud, que se encuentra asociada al huracán.

**Presión central.** Presión a la que se encuentra en centro del huracán, está correlacionada con la intensidad, pero la presión del viento tendrá una relación variable, se mide en milibares (mb).

**Duración de la afectación.** Para calcular el tiempo que tardó en pasar el huracán por la zona de estudio, se utilizó la cantidad de capturas de huracán o “snapshots” que pasaron buffer de 100 km, cada captura corresponde a un intervalo de 6 horas.

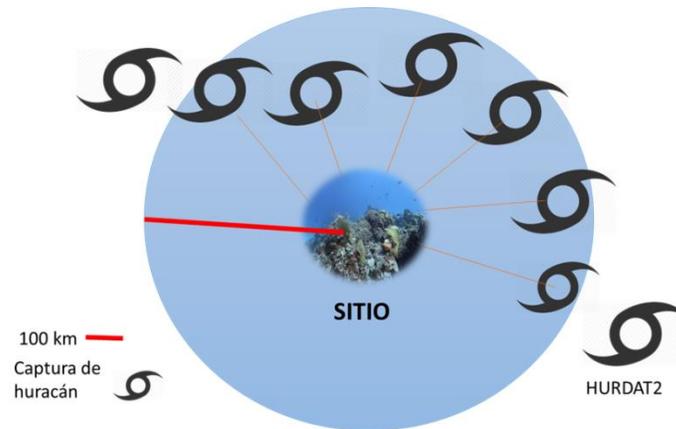
**Distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio:** Es la distancia en metros (m) entre el sitio y el ojo del huracán, el cual se obtendrá de los “tracks” de las bases de datos de la NOAA.

**Intensidad de la tormenta y máxima intensidad del huracán:** las tormenta o huracanes dependiendo de la intensidad del viento los clasificamos en las siguientes categorías: TD (depresión tropical), TS (tormenta tropical), H1 (huracán categoría 1), H2 (huracán categoría 2), H3 (huracán categoría 3), H4 (huracán categoría 4) y H5 (huracán categoría 5), ver tabla 1.

**Tabla 1.** Clasificación de tormentas y huracanes: tipo, categoría, velocidad del viento y presión central.

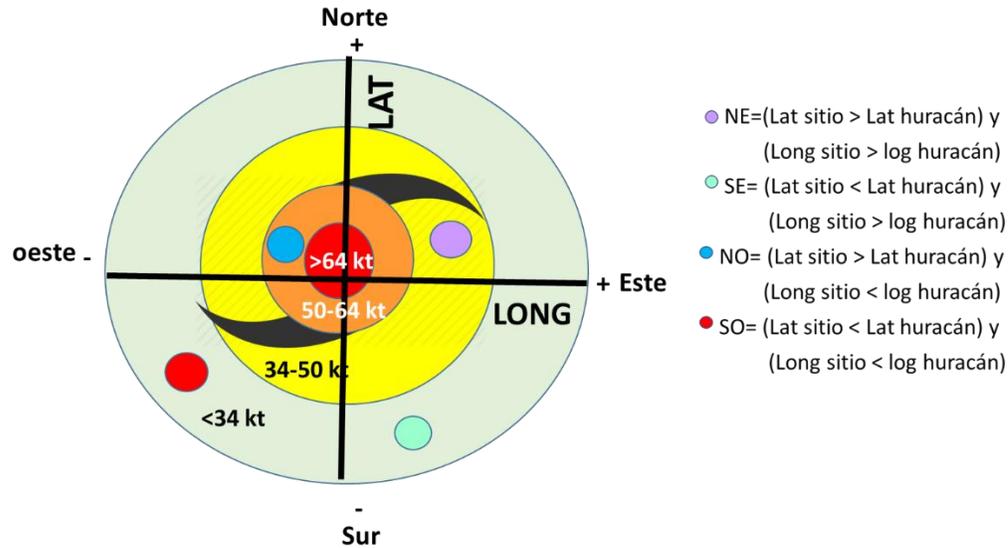
Tipo	Categoría	Velocidad del viento (kt)	Presión central (mb)
Depresión tropical	TD	>34	-----
Tormenta tropical	TS	34-63	-----
Huracán	H1	64-82	> 980
Huracán	H2	83-95	965-980
Huracán	H3	96-113	945-965
Huracán	H4	115-135	920-945
Huracán	H5	135-249	< 920

Para obtener las variables de los huracanes que pasaron en cada uno de los sitios con serie de tiempo, se elaboró un buffer de 100 km de radio en cada uno de los sitios, los datos de la base HURDAT2 del Atlántico tienen las características del huracán cada 6 hr, “snapshots”, para obtener los valores se realizó un promedio ponderado del inverso de la distancia de la captura del huracán respecto al sitio de interés. Ver figura 2.



**Figura 2.** Como se determinó las características de los huracanes de: Intensidad del viento, presión central, distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio, intensidad de la tormenta y máxima intensidad del huracán de la base de datos HURDAT2.

**La velocidad del viento al impacto.** Es el rango de viento del huracán que pasó sobre de la zona de estudio. Para calcularlo se localizó al sitio en el cuadrante correspondiente del huracán, por medio de las coordenadas de ambos. Los cuadrantes de los vientos se dividen en cuadrante noreste (NE), sureste (SE), noroeste (NE) y suroeste (SE) y la velocidad del viento esta registra en radios de: 34 nudos (kt), 34 kt-50 kt, 50 kt-64kt y mayores a 64 kt, del exterior al centro del huracán. Con esta información se estima en que intervalo de velocidad de los vientos se localiza el sitio. Este parámetro se mide a partir de 2004 y tiene una resolución de 9.26 km. Ver figura 3.



**Figura 3.** La velocidad del viento al impacto se determinó a partir de las velocidades de los cuadrantes proporcionados por la HURDAT2, y las latitud y longitud de sitio de interés. Rango de viento del huracán que pasó sobre de la zona de estudio. Dividido en las categorías de: <34 kt (verde), 34-50 kt (amarillo), 50-64 kt (naranja) y > 64 kt (rojo).

**Marea de tormenta (storm surge):** Cuando el huracán cruza a la costa con los altos niveles de agua da como resultado a la marea de tormenta. La marea de tormenta es un aumento sobre el nivel de agua normal en la costa abierta debido a la acción del estrés del viento sobre la superficie del agua, medida en metros (m). La cual se pudo obtener de la base de datos: SURGEDAT: The World's Storm Surge Data Center, base que elaboró la Universidad Estatal de Luisiana, la base registra datos de todo el mundo desde 1880 y tiene archivada información de más de 700 huracanes y tormentas.(Needham & Keim, 2012).

En total se tiene el registro de 44 huracanes, tormentas tropicales y depresiones tropicales para los sitios analizados.

Las variables de oleaje, temperatura del agua y precipitación no fueron consideradas por recomendación de nuestros asesores y por recomendaciones de los participantes del taller realizado en Puerto Morelos el 6 de noviembre de 2018.

#### 4. Análisis estadístico de los datos

Los datos analizados fueron series de tiempo de cobertura coralina y complejidad arrecifal (rugosidad) en sitios de muestreo que fueron impactados por un huracán. Las variables que se utilizaron para medir los daños arrecifales están relacionadas con cambios en el porcentaje de cobertura y complejidad arrecifal antes y después del huracán (Gardner et. al 2005, Álvarez-Filip et. al, 2011). En todos los análisis, se utilizó la tasa logarítmica debido a que, por sus propiedades, es la más apropiada a la hora de realizar análisis estadísticos (ver tabla 2 y Álvarez-Filip et. al, 2011). No obstante, en las gráficas y ecuación auxiliar finales relativos a cobertura coralina, se utilizó la tasa efectiva de cambio, ya que está intrínsecamente relacionada con la tasa logarítmica de cambio, pero es fácilmente interpretable como porcentaje de cambio acumulativo (%). Todos los análisis fueron realizados utilizando el lenguaje estadístico R (R Core Tema, 2013).

**Tabla 2.** Diferentes tasas para medir el cambio. Donde  $V_f$  el valor final de un *proceso* (cobertura de coral o rugosidad) y  $V_0$  su valor inicial, después de un tiempo  $t$ .  $\Delta V$ = Cambio bruto,  $i$ =Tasa de cambio bruto,  $p$ =proporción de cambio,  $\delta$ =tasa logarítmica,  $\log$ =logaritmo,  $i$ =tasa efectiva.

Nombre	Fórmula	Interpretación	¿Toma en cuenta el valor inicial?	Fácil de interpretar
Cambio bruto	$\Delta V = V_f - V_0$	Cambio total	No	Sí
Tasa de cambio bruto	$i = \frac{V_f - V_0}{t}$	Cambio total medio por unidad de tiempo	No	Sí
Proporción de cambio	$p = \frac{V_f - V_0}{V_0}$	Cambio porcentual con respecto a la muestra inicial	Sí	NO
Tasa de cambio simple	$i = \frac{V_f - V_0}{tV_0}$	Cambio porcentual medio por unidad de tiempo	Sí	NO
Tasa logarítmica*	$\delta = \frac{\log(V_f) - \log(V_0)}{t}$	Cambio total medio de los logaritmos por unidad de tiempo (difícil de interpretar)	Sí	NO
Tasa efectiva*	$i = e^\delta - 1$	La manera de interpretar $\delta$ como un cambio porcentual acumulativo (interés compuesto)	Sí	Sí

\*Tasas usadas en este trabajo.

Cabe destacar que tanto la tasa logarítmica como la tasa efectiva son ampliamente utilizadas para análisis de cambio en los arrecifes: Côté, *et. al.* 2005, Côté, *et. al.* 2006, Álvarez-Filip *et. al.* 2011, Paddack *et. al.* 2009, Suchley *et. al.* 2016, Gardner *et. al.* 2003, Gardner *et. al.* 2005, Grahan & Nash 2013. Una tasa logarítmica o efectiva negativa indica una pérdida de cobertura /rugosidad en porcentaje y viceversa.

Después de seleccionar la tasa logarítmica como nuestro indicador para cambios en cobertura coralina o rugosidad, se realizaron análisis exploratorios con el fin de detectar variables de los dos grupos (características de los huracanes/arrecifes y daño causado) que pudieran estar correlacionadas. Este análisis incluyó la creación de diagramas de caja y brazos, diagramas de dispersión, mapas y regresiones locales (LOESS) que incluyen intervalos de confianza para la tendencia encontrada (cabe destacar que este tipo de regresiones permite encontrar tendencias que posteriormente se podrán evaluar con un modelo más robusto). Es importante destacar que, para obtener algunas variables de interés, como, por ejemplo, la distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio, procesamos algunos datos obtenidos en el paso 3.

Una vez que se detectaron las variables de interés, el siguiente paso fue ajustar modelos inferenciales que permitieron encontrar las variables que correlacionan significativamente con la tasa de cambio en la cobertura/rugosidad. Para el modelo final de cobertura se usó un modelo lineal mixto con ordenada al origen aleatoria por huracán y modelo de varianza exponencial, con el fin de tomar en cuenta autocorrelación espacio-temporal entre los residuales de sitios afectados por el mismo huracán, así como la heterocedasticidad en los residuales. Para el modelo final de rugosidad se observó que, al eliminar atípicos, una regresión lineal múltiple producto de una selección de variables utilizando el criterio AIC (criterio de información de Akaike, medida de la calidad relativa de un modelo estadístico), se ajustó bastante bien a los datos, eligiéndose este modelo como el final. No se encontraron evidencias de autocorrelación espacio-temporal en los residuales ni heterocedasticidad. Es importante mencionar que razón por la que se filtraron variables exploratoriamente antes de incluirlas en los modelos finales, si incluíamos todas las variables, perderíamos una gran cantidad de datos debido a que muchas observaciones tienen al menos un faltante en alguna variable.

Con respecto a los modelo predictivo originalmente planteados como parte de esta consultoría, debido a que los clientes encontraban poco práctico tener un script con un modelo que sería necesario correr cada que se requiriera hacer una predicción, se acordó realizar una ecuación auxiliar en Excel que les permitiera darse una idea del cambio en cobertura bajo distintos escenarios, y dejar el modelo predictivo para otra ocasión (se discutió la posibilidad de tener una interfaz Web para este último).

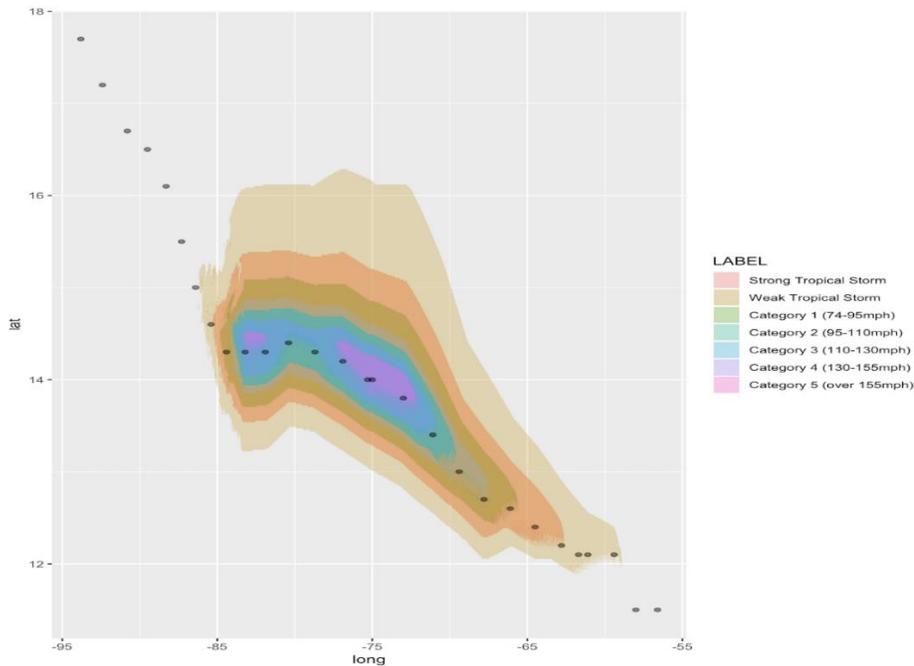
## 5. Análisis de los datos provisto por el Dr. Simon Young.

En la reunión del 13 de noviembre del 2018, realizada en Guatemala, el Dr. Simon Young de Willis Towers Watson/Global Ecosystem Resilience Facility, recomendó utilizar datos de las variables del huracán que él y su grupo de trabajo podrían proporcionar para mejorar la consultoría. El Dr. Young mandó, como ejemplo de datos que él podrá proporcionar, los datos de 14 huracanes:

AL031993, tormenta Tropical Bret  
AL041980, huracán Allen.  
AL042001, tormenta tropical Chantal.  
AL042003, huracán Claudette.  
AL042007, huracán Dean.  
AL052005, huracán Emily.  
AL062007, huracán Felix.  
AL081988, huracán Gilbert.  
AL092004, huracán Iván.  
AL102002, huracán Isidore.  
AL111988, huracán Joan-Miriam  
AL112001, huracán Iris  
AL121994, huracán Gordon.  
AL172008, huracán Paloma.

Para cada huracán los datos estaban agregados en archivos shape, la información que tenía los archivos era: velocidad del viento, marea de tormenta y “track” de los huracanes. Los cuales se compararon con la base de datos HURDAT 2 del Atlántico de la NOAA. Lo que se encontró es estos datos se explica a continuación:

1. Para cada huracán los polígonos de velocidad del viento eran de tamaños muy variables, estos polígonos indicaban una categorización más fina de los vientos que impactaron a determinadas coordenadas, comparada con los datos de la que nos da la NOAA, ver figura 4:
  - 40 nudos,
  - 40- 74 nudos,
  - 74 - 95 nudos,
  - 95 - 110 nudos,
  - 110 - 130 nudos,
  - 130 -155 nudos,
  - > 155 nudos.



**Figura 4.** Ejemplo de los polígonos de velocidad de viento para el huracán AL042007 (Dean). Cada color indica una categoría de huracán diferente y los puntos indican en “track” de la NOAA.

2. Sin embargo, a diferencia de la NOAA, los ejemplos que nos envió Simon no nos ofrecen datos para cada periodo de tiempo (aunque no sabemos si cuenta con la información desglosada de esta manera). Por este motivo, nos falta aclarar con él si los polígonos nos dicen para cada par de coordenadas, la media de las velocidades de vientos que lo impactaron, el máximo, etc.
3. Con respecto a los datos de marea de tormenta, Simon nos ofrece estimaciones de dicha variable en toda el área de estudio, por lo que creemos que esta información es de mayor calidad que la que utilizamos en este análisis, los datos que tenemos son mediciones puntuales por huracán, posiblemente alejadas de nuestro sitio de interés.
4. Finalmente, los shape files de “tracks” incluyen información extraída de la base de datos de huracanes de la NOAA, pero además contienen variables adicionales que son potencialmente útiles para mejorar el análisis.

En conclusión, los datos de la NOAA nos ofrecen una categorización de los vientos que impactaron a un sitio determinado en cada instante. Los datos del Dr. Young nos ofrecen una categorización más fina de los vientos que impactaron a un sitio determinado, pero, al menos en el ejemplo que nos envió, no la tenemos para cada instante, por lo que pensamos que pudieran ser datos agregados (medias, máximos, etc) de algún tipo.

#### D. RESULTADOS DE LAS VARIABLES DE LOS ARRECIFES Y HURACANES.

En la fase de exploración se analizaron las variables de arrecifes y huracanes y su aparente relación con cambios en la cobertura de coral y rugosidad con el daño arrecifal, las cuales se enlistan a continuación: cobertura de coral inicial, rugosidad inicial tipo de arrecife, zona arrecifal, profundidad del arrecife, localización o exposición, tamaño del arrecife, fetch, intensidad del viento, presión central, duración de la afectación, distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio, intensidad de la tormenta y máxima intensidad del huracán, velocidad del viento al impacto y marea de tormenta. los resultados se pueden resumir en la tabla 3, el resultado de cada variable se explica a continuación.

**Tabla 3.** Las variables que están correlacionadas con el daño que causan los huracanes a los arrecifes de coral y que no están correlacionadas en relación a la tasa de cambio de cobertura de coral.

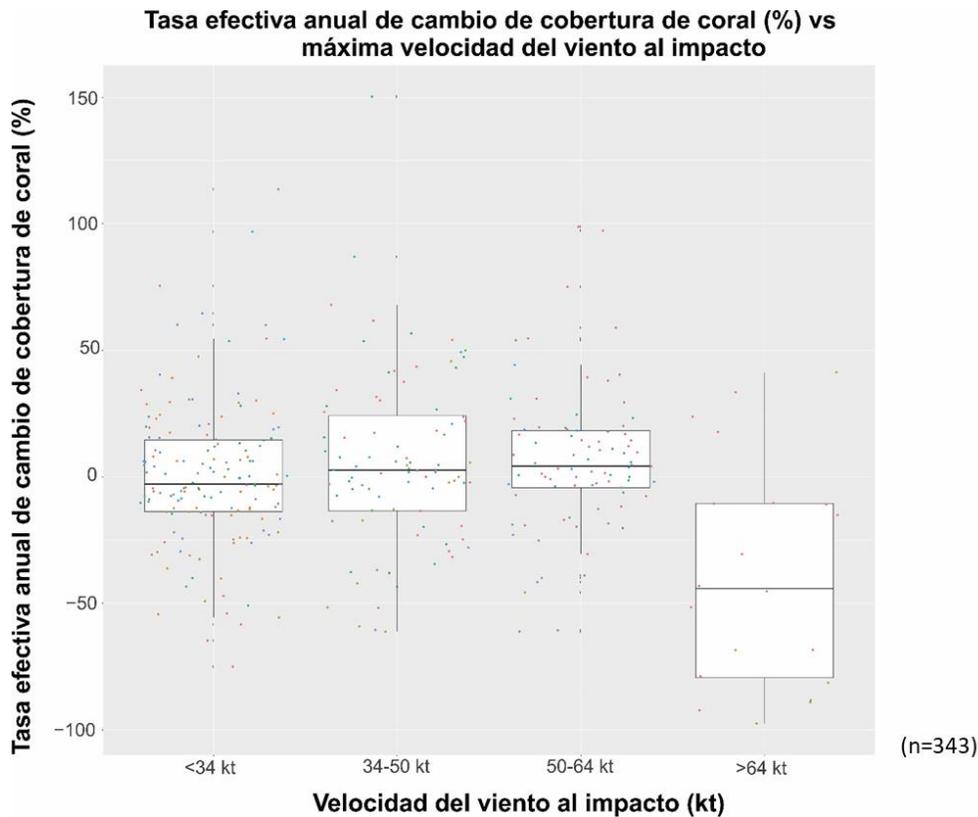
Variable		Relación aparente con la tasa de cambio de cobertura de coral con el daño arrecifal.	Relación aparente con la tasa de cambio de rugosidad con el daño arrecifal
Arrecifal	1. Cobertura de coral inicial.	Correlacionada	
	2. Rugosidad inicial.		Correlacionada.
	3. Tipo de arrecife.	No correlacionada	No correlacionada
	4. Zona arrecifal.	No correlacionada	No correlacionada
	5. Profundidad del arrecife.	No correlacionada	No correlacionada
	6. Exposición	Correlacionada	Correlacionada.
	7. Tamaño del arrecife.	No correlacionada	No correlacionada
	8. Fetch (Grado de protección ante el oleaje).	No correlacionada	No correlacionada
Huracán	1. Intensidad del viento.	Correlacionada	No correlacionada.
	2. Presión central	Correlacionada	No correlacionada
	3. Duración de la afectación	Correlacionada	No correlacionada
	4. Distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio.	No correlacionada	No correlacionada

	5. Intensidad de la tormenta y la Máxima intensidad del huracán.	Correlacionada	No correlacionada
	6. Velocidad del viento al impacto	Correlacionada	Sin datos.
	7. Marea de tormenta	Correlacionada	No correlacionada

## 1. Velocidad del viento al impacto, cobertura de coral.

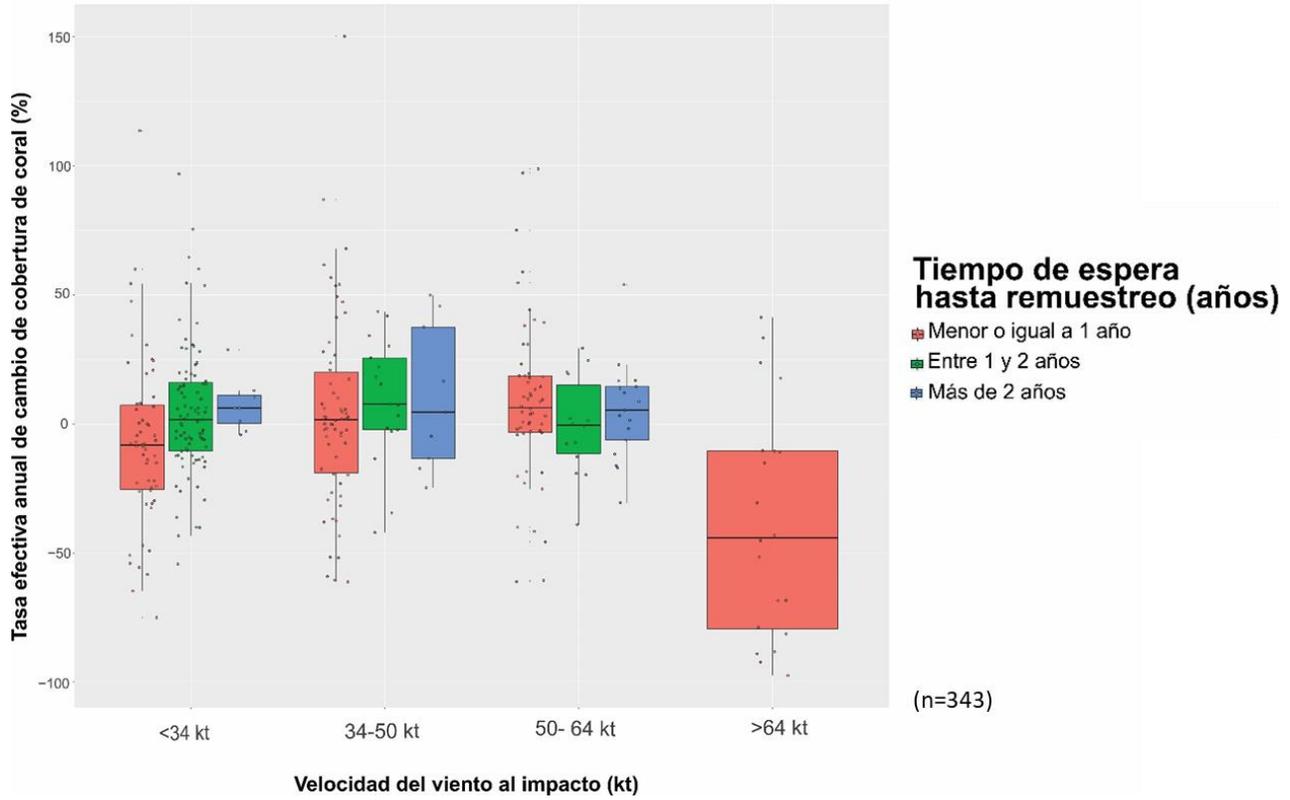
La máxima velocidad del viento al impacto fue la variable que mejor explica el daño a la cobertura de coral, fue usada en lugar de la categoría de huracán, los resultados indican que vientos mayores a 64 nudos (kt) son los que provocan mayor daño arrecifal, en dónde el daño es más evidente en la tasa efectiva anual de cambio. En intensidades de viento menores a 64 kt no se ve el efecto en la tasa efectiva anual de cambio de la cobertura de coral. Ver figura 5.

Además, la tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra la velocidad de viento al impacto se perfilo a diferentes tiempos de remuestreo, en las siguientes categorías: menor o igual a 1 año, entre 1 y 2 años y más de 2 años. En dónde arrecifes que fueron remuestreos antes de un año tienen mayor afectación a mayores de 64 kt de velocidad del viento al impacto. Para vientos menores a 50 kt se observa una ganancia en la cobertura de coral, lo anterior sugiere que es menos evidente el daño causado por huracán después de un año de remuestreo, ver figura 6.



**Figura 5.** Tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral por máxima velocidad del viento al impacto, en dónde velocidades mayores a 64 kt provocan mayor daño arrecifal.

**Tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral (%) vs tiempo hasta remuestreo perfilada por velocidad del viento al impacto**



**Figura 6.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra la máxima velocidad de viento al impacto perfilada al tiempo de espera hasta remuestreo en menor a 1 año, entre 1 y 2 años y mayor a 2 años. El tiempo de remuestreo para los sitios afectados a velocidad de máximo viento al impacto es menor a 1 año, mayores a 64 kt.

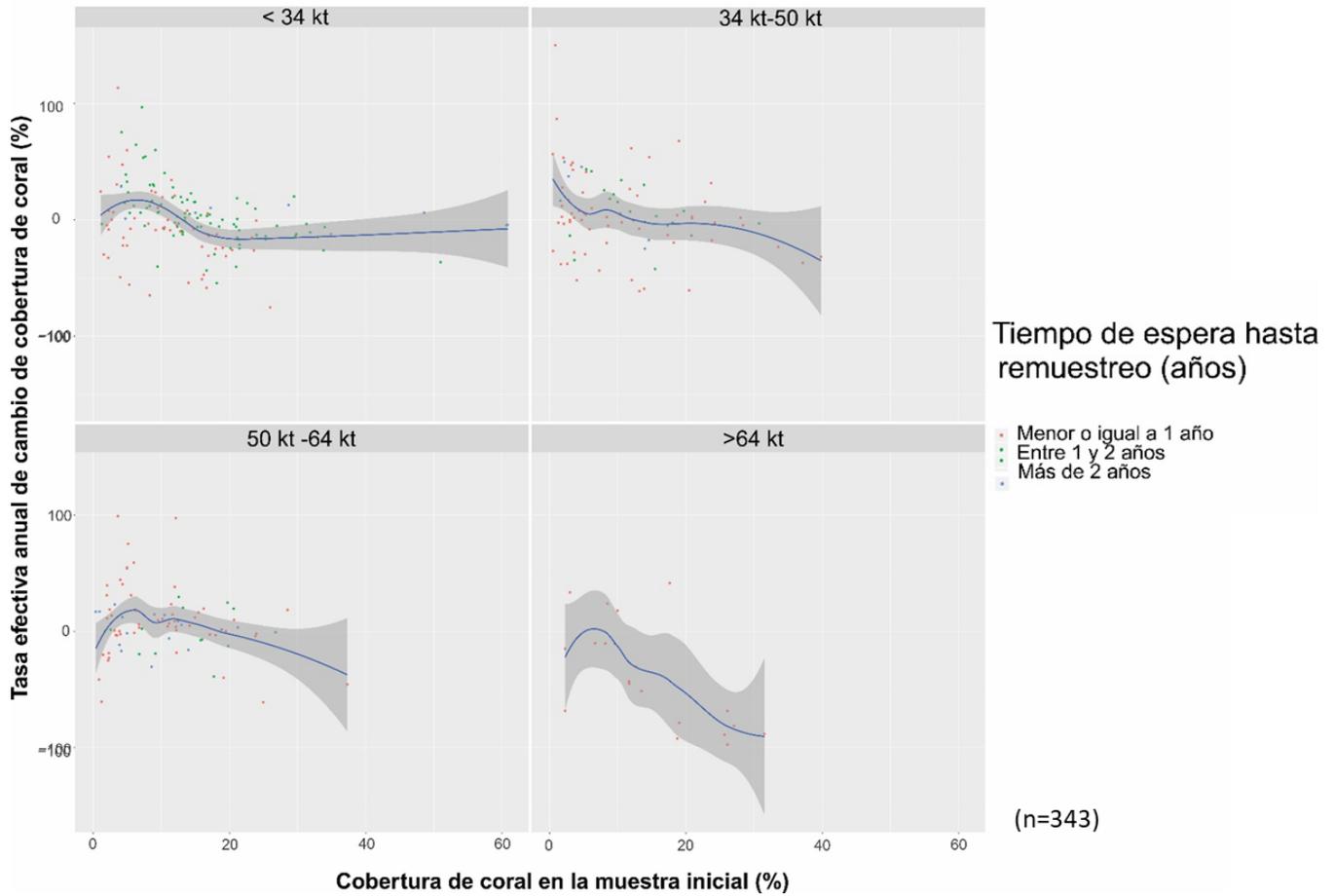
## 2. Cobertura de coral inicial.

La cobertura de coral inicial es la cantidad de corales pétreos que se encuentran sobre el arrecife antes del paso de un huracán. Para determinar si la cobertura inicial tiene un efecto en el daño que puede generar un huracán se realizó una gráfica de tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral, por cobertura inicial y viento sostenido máximo al impacto. En la gráfica se observa que huracanes con vientos menores a 34 kt parece ser no tienen efecto en la cobertura inicial, vientos entre 34-50 kt y 50-64 kt provocan daño y finalmente, a mayor porcentaje de cobertura inicial mayor daño en vientos mayores a 64 kt es mayor, ver figura 7.

La tasa efectiva anual de cambio contra la máxima velocidad de viento al impacto se perfiló por el porcentaje inicial de cobertura de coral, las coberturas se agruparon según el índice de salud arrecifal que registra el Reporte de la Salud Ecológica del Arrecife Mesoamericano del 2018 de la iniciativa arrecifes saludables, el índice se divide en: crítico (0-5%), mal (5-10%), regular (10-20%), bien (20-40%) y muy bien (40-100%) (Iniciative, H. R., 2018). En todos los rangos velocidades de viento al impacto mayores de 64 kt hay pérdida la cobertura de coral, pero el cambio es mayor en coberturas iniciales de 20-40%, cabe resaltar que se encontraron muy pocos sitios con coberturas mayores a 40%, ver figura 8.

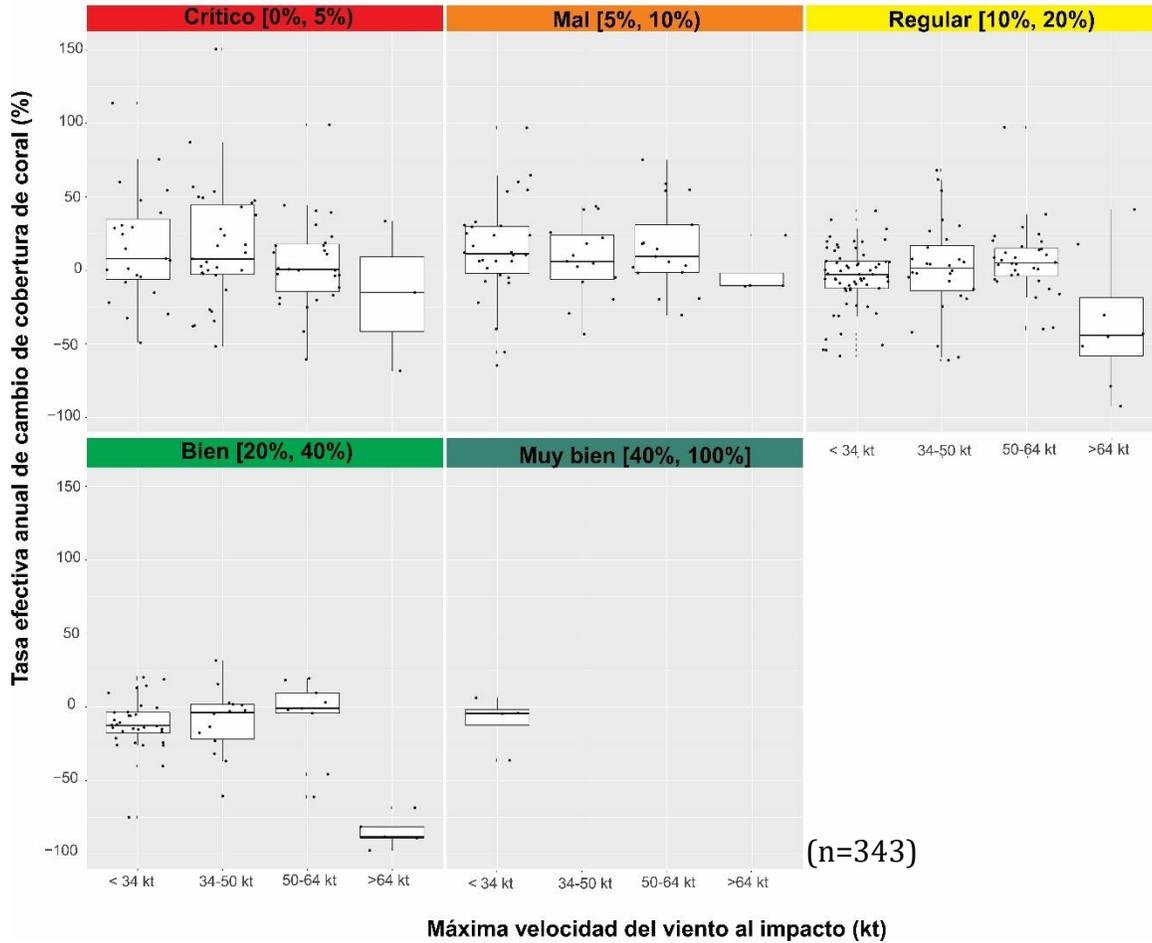
Los datos fueron separados en tiempo de espera hasta remuestreo en las siguientes categorías: menor o igual a 1 año, entre 1 y 2 años y más de 2 años, en dónde todas las categorías de cobertura inicial a vientos mayores a 64 kt tienen daño arrecifal con tiempo de remuestreo menor a 1 año. Para los rangos de viento al impacto menores a 64 kt en tiempos de remuestreo mayores a 1 año se observa un aumento de la cobertura de coral lo que sugiere que es menos evidente el daño causado por huracán después de un año de remuestreo, ver figura 9.

**Tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral (%) vs porcentaje inicial de cobertura perfilada por máxima velocidad del viento al impacto**



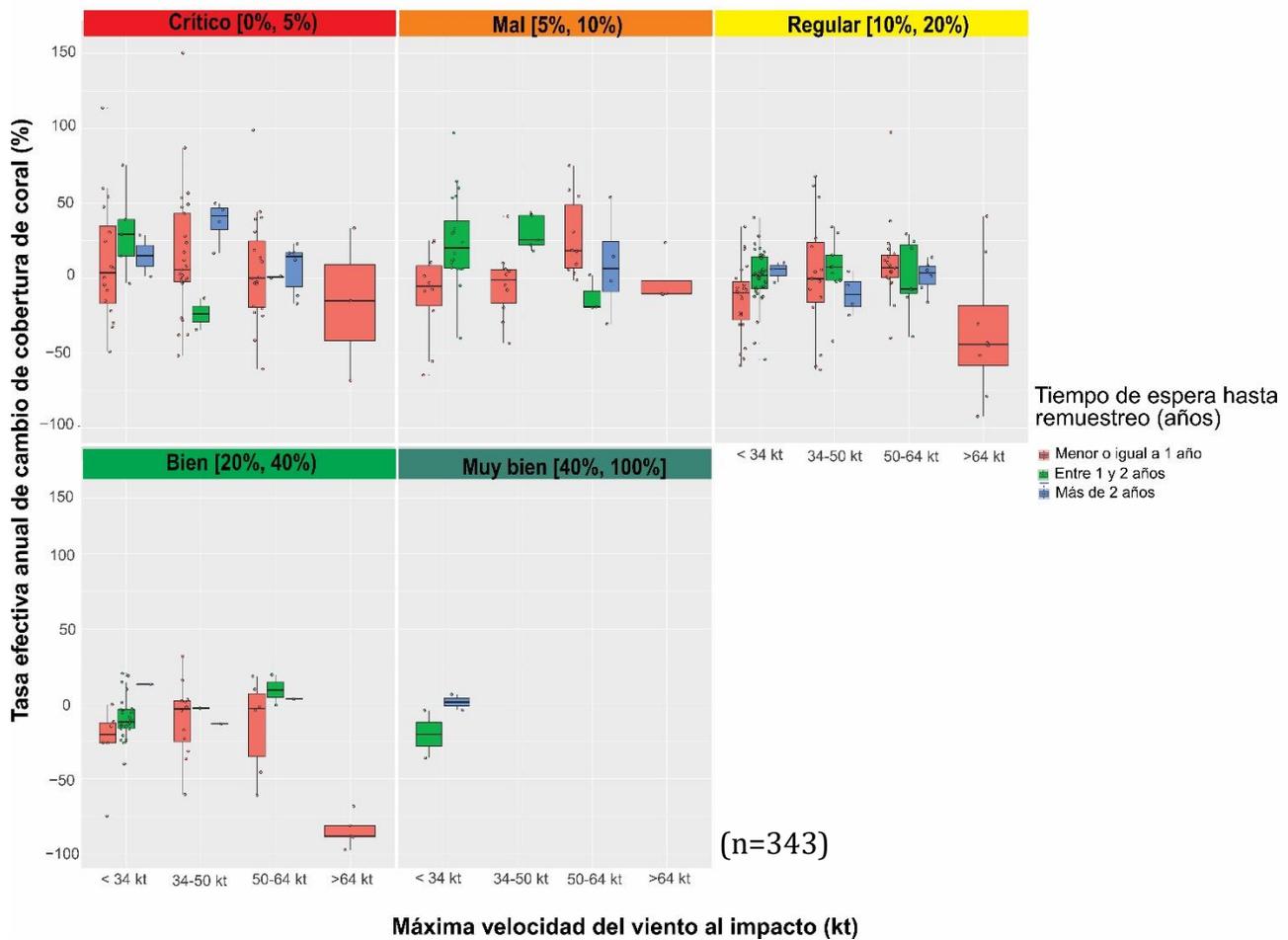
**Figura 7.** Tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral, por cobertura inicial y máximo viento sostenido al impacto, en donde se observa el efecto de huracanes con vientos de 34 kt- 50 kt, 50 kt-64 kt y vientos mayores a 64 kt. En donde a mayor porcentaje de cobertura inicial mayor daño en vientos mayores a 64 kt. Los datos fueron separados hasta tiempo de remuestreo en menor o igual a 1 año, entre 1 y 2 años y más de dos años

**Tasa efectiva anual de cambio de cobertura vs máxima velocidad del viento al impacto perfilada por porcentaje inicial de cobertura**



**Figura 8.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra la máxima velocidad de viento al impacto perfilado por el porcentaje inicial de cobertura de coral. Coberturas se agruparon según el índice de salud arrecifal, el cual se divide en: critico (0-5%), mal (5-10%), regular (10-20%), bien (20-40%) y muy bien (40-100%), mostrando en todos los rangos velocidades de viento al impacto mayores de 64 kt hay pérdida la cobertura de coral.

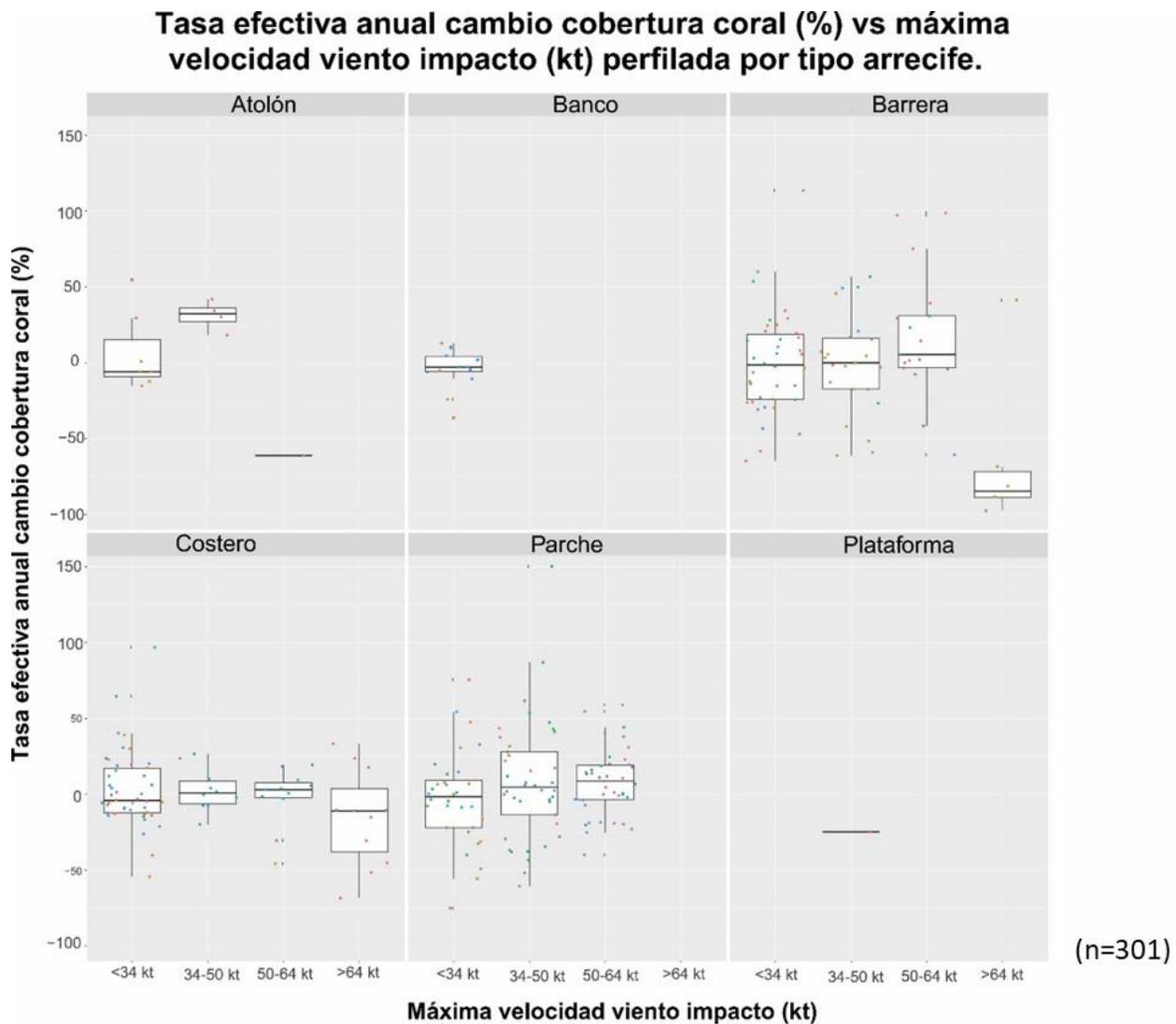
**Tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral (%) vs máxima velocidad del viento al impacto perfilada por porcentaje inicial de cobertura y tiempo de espera hasta remuestreo**



**Figura 9.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra la máxima velocidad de viento al impacto perfilado por el porcentaje inicial de cobertura de coral y tiempo de espera hasta remuestreo en menor a 1 año, entre 1 y 2 años y mayor a 2 años. El tiempo de remuestreo para los sitios afectados a velocidad de máximo viento al impacto es menor a 1 año en vientos mayores a 64 kt.

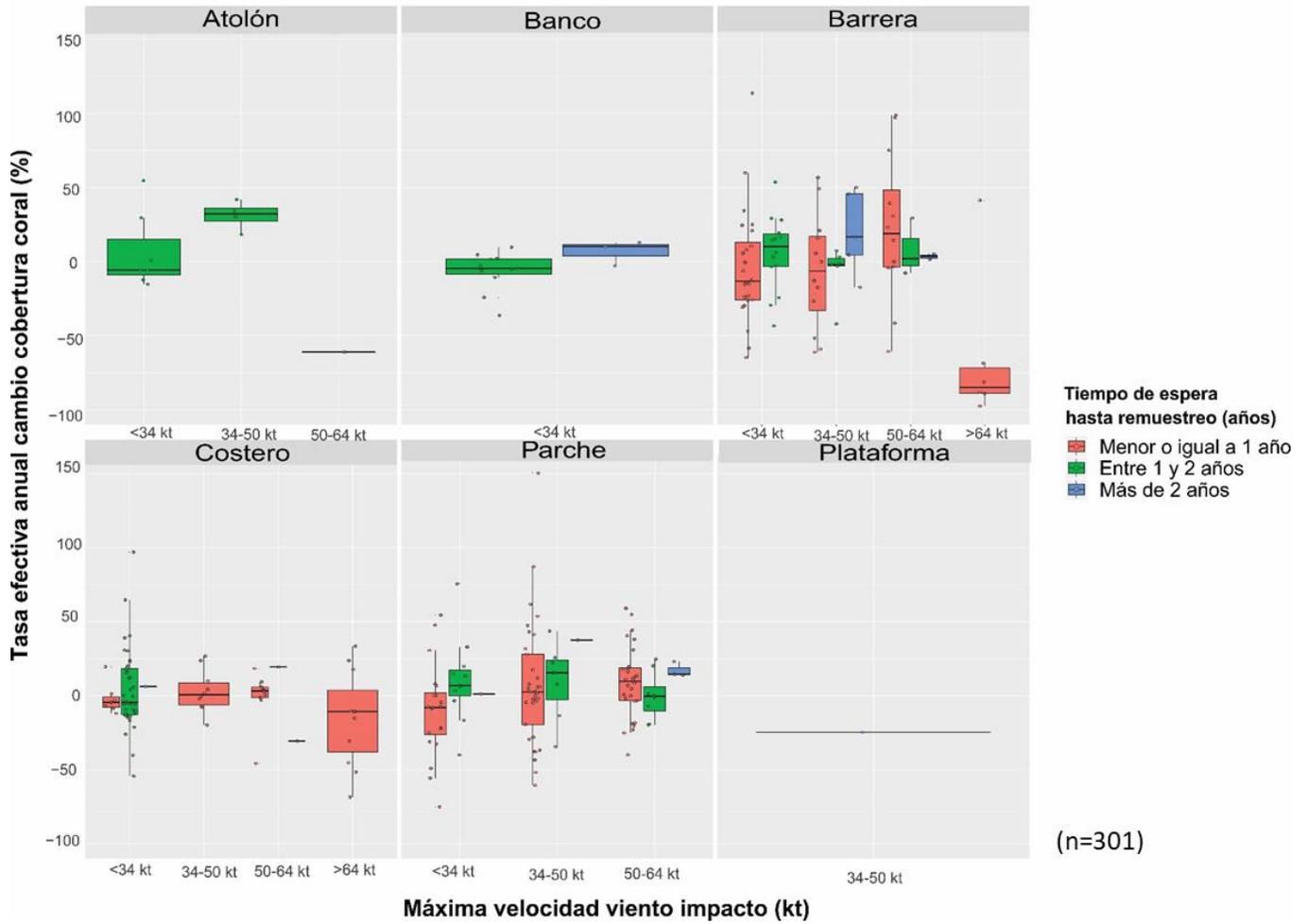
### 3. Tipo de arrecife, cobertura de coral.

El efecto que tienen los huracanes en el tipo de arrecife se determinó con la tasa efectiva de cambio anual de la cobertura de coral y velocidad del viento al impacto, en donde aparentemente los arrecifes tipo costero y tipo barrera tenían afectaciones mayores a 64 kt, pero en los arrecifes costero la tendencia no es tan clara y para los de barrera son solo 5 sitios afectados por un solo huracán que muestran esa tendencia, ver figura 10. Para determinar si el efecto observado es parte del tiempo de remuestreo se realizó la división de remuestreo en: menor a 1 año, entre 1-2 años y mayor a 2 años, en el cual ambos arrecifes son afectados a menos de 1 año de remuestreo, ver figura 11. Paralelo a este análisis el tiempo de remuestreo se clasificó en cuantiles en donde los arrecifes tipo barrera tienen menos evidencia de daño por huracanes.



**Figura 10.** Tasa de cambio de cobertura de coral por tipo de arrecife y velocidad de viento. Aparentemente en los arrecifes tipo costero y tipo barrera tenían afectaciones mayores a 64 kt.

**Tasa efectiva anual cambio cobertura coral (%) vs máxima velocidad viento impacto (kt) perfilada por tipo arrecife y tiempo de remuestreo.**

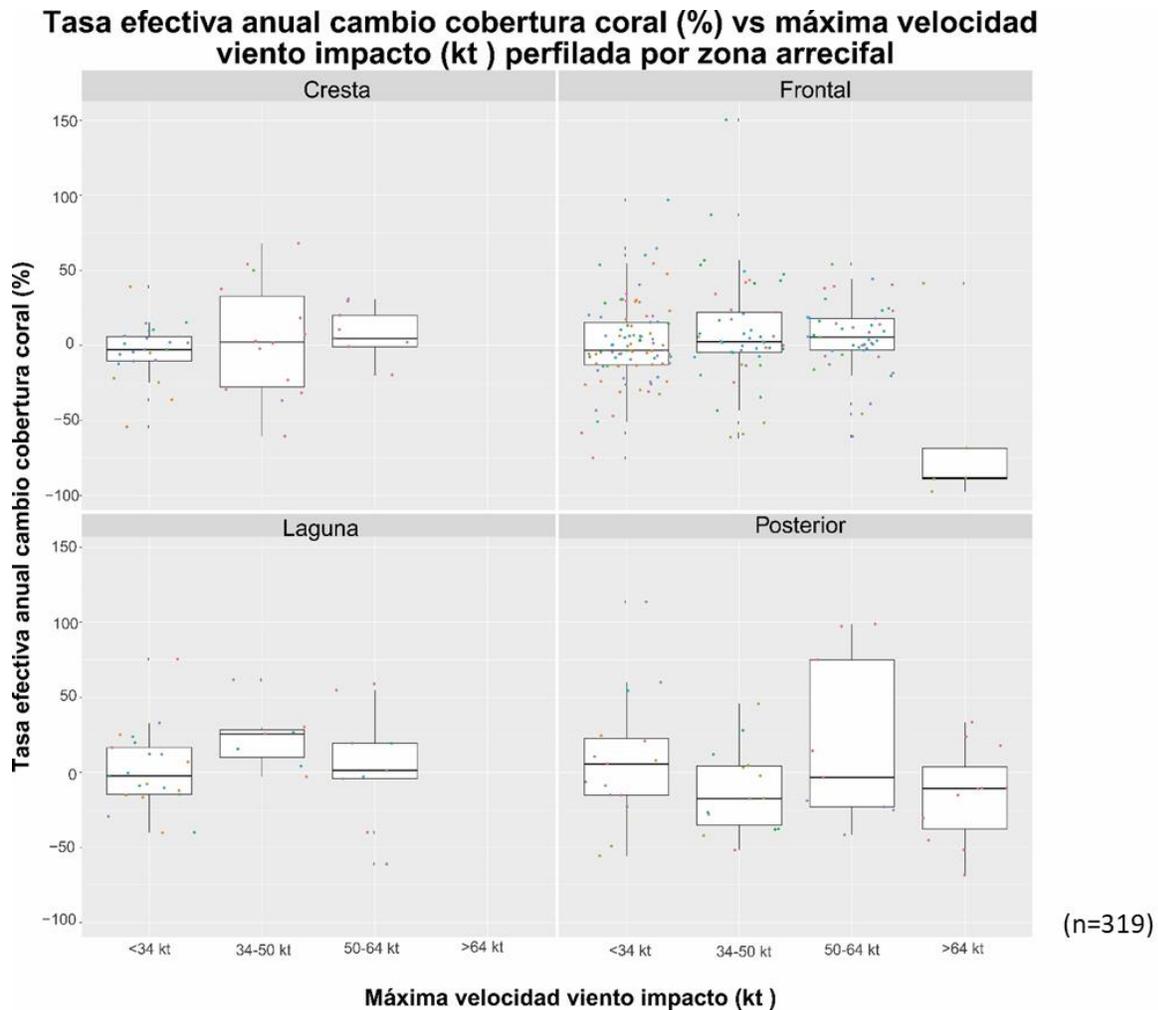


**Figura 11.** División de remuestreo: menor a 1 año, entre 1-2 y mayor a 2 años. En dónde los arrecifes barrera parecen tener un efecto de daño mayor con vientos mayores a 64 kt en un tiempo de espera de remuestreo menor 1 año.

#### 4. Zona arrecifal, cobertura de coral.

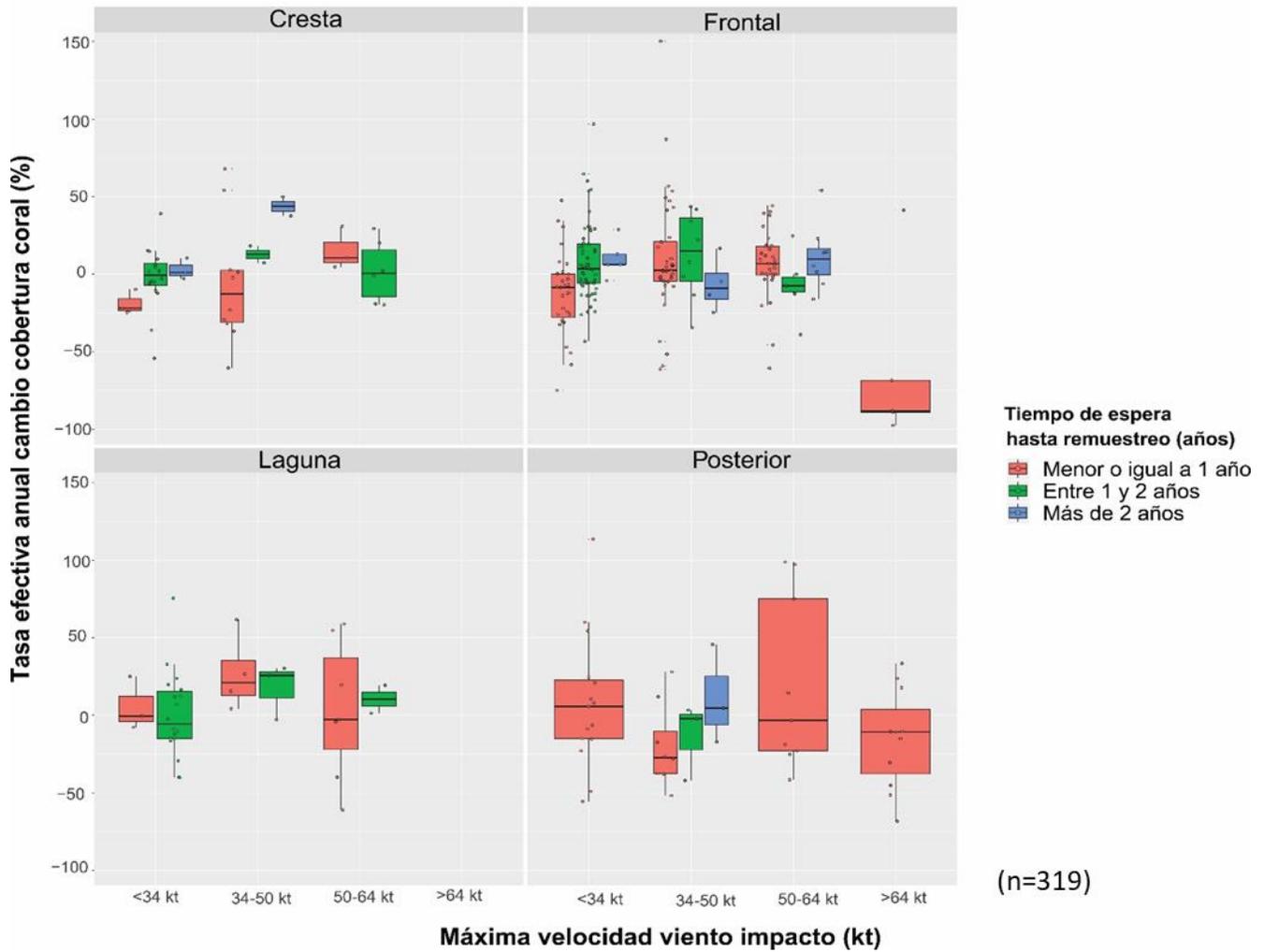
El análisis de la tasa efectiva anual de cambio de la cobertura de coral por zona arrecifal y velocidad al impacto demuestra que aparentemente la zona frontal con vientos mayores a 64 kt tiene una afectación, pero al igual que en el tipo de arrecife este efecto es dado solo por 5 sitios que son afectados por el mismo huracán, ver figura 12.

Para saber si el efecto observado es parte del tiempo de remuestreo se realizó la división de remuestreo en: menor a 1 año, entre 1-2 años y mayor a 2 años. En dónde los arrecifes de la zona frontal parecen tener un efecto de daño mayor con vientos mayores a 64 kt, ver figura 13.



**Figura 12.** Tasa efectiva anual de cambio de la cobertura de coral por zona arrecifal y velocidad al impacto, donde aparentemente la zona frontal con vientos mayores a 64 kt.

**Tasa efectiva anual cambio cobertura coral (%) vs máxima velocidad viento impacto (kt) perfilada por zona arrecifal y tiempo de remuestreo.**

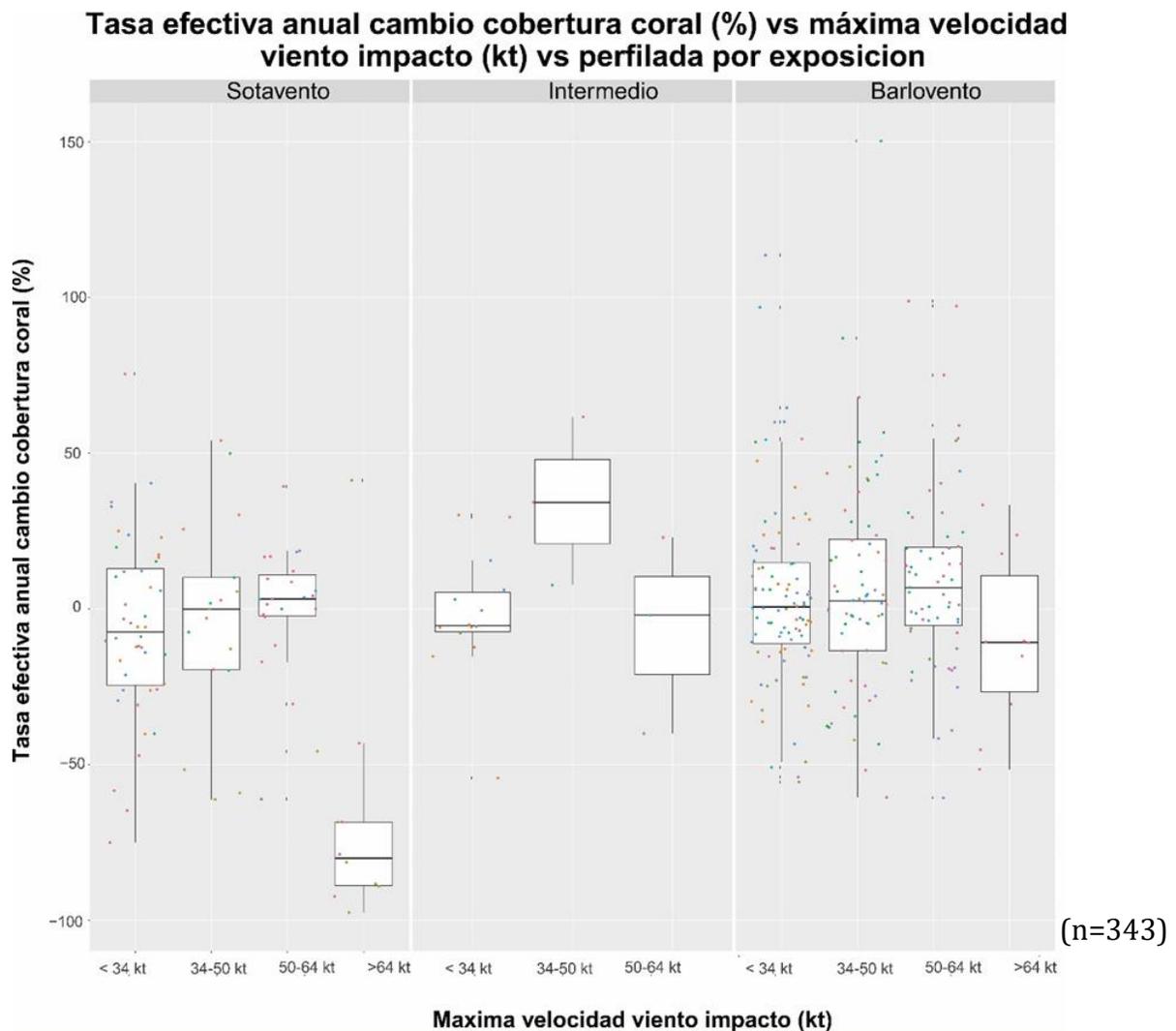


**Figura 13.** Tasa efectiva anual de cambio de la cobertura de coral por zona arrecifal, velocidad del viento al impacto y tiempo hasta remuestreo, donde el arrecife frontal con vientos mayores a 64 kt.

## 5. Localización, cobertura de coral.

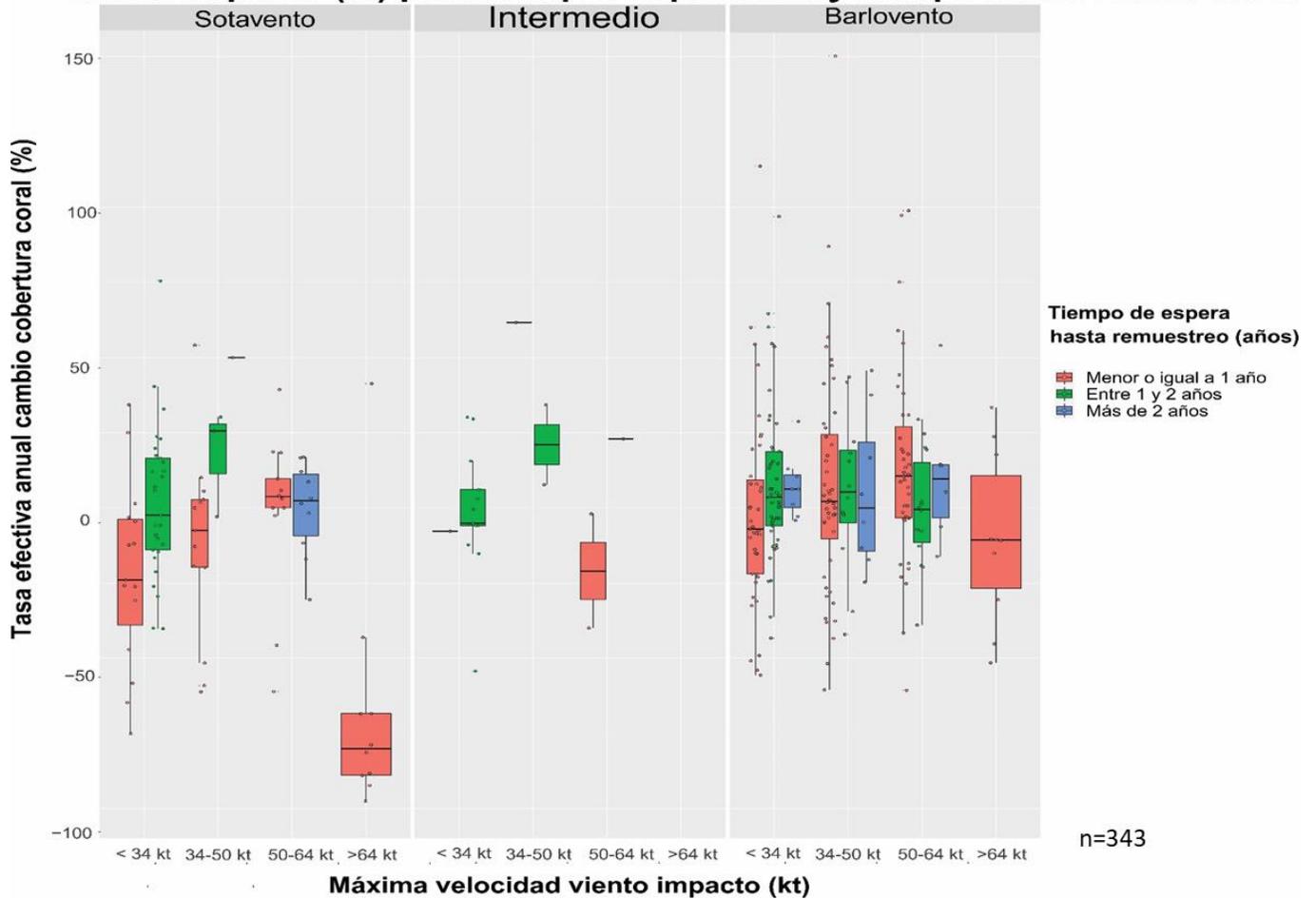
La localización del sitio o exposición se dividió en: barlovento (zona expuesta), el sotavento (zona protegida) e intermedio. La tasa efectiva anual de cambio de la cobertura de coral contra la máxima velocidad de viento al impacto perfilada a la exposición, indica que aparentemente en el sotavento se causa más daño al paso de huracanes con vientos mayores a 64 kt, ver figura 14. Una posible explicación es la diferencia de especies de coral que habitan en ambas zonas.

Los datos fueron perfilados hasta tiempo de remuestreo: menor a 1 año, entre 1-2 años y mayor a 2 años. En donde a remuestreo menor a 1 año se observa el mismo comportamiento en los sitios localizados en sotavento, ver figura 15.



**Figura 14.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra la máxima velocidad de viento al impacto, en la zona del sotavento parecer indicar más daño en huracanes con vientos mayores a 64 kt.

**Tasa efectiva anual cambio cobertura coral (%) vs maxima velocidad viento impacto (kt) perfilada por exposicion y tiempo hasta remuestreo.**

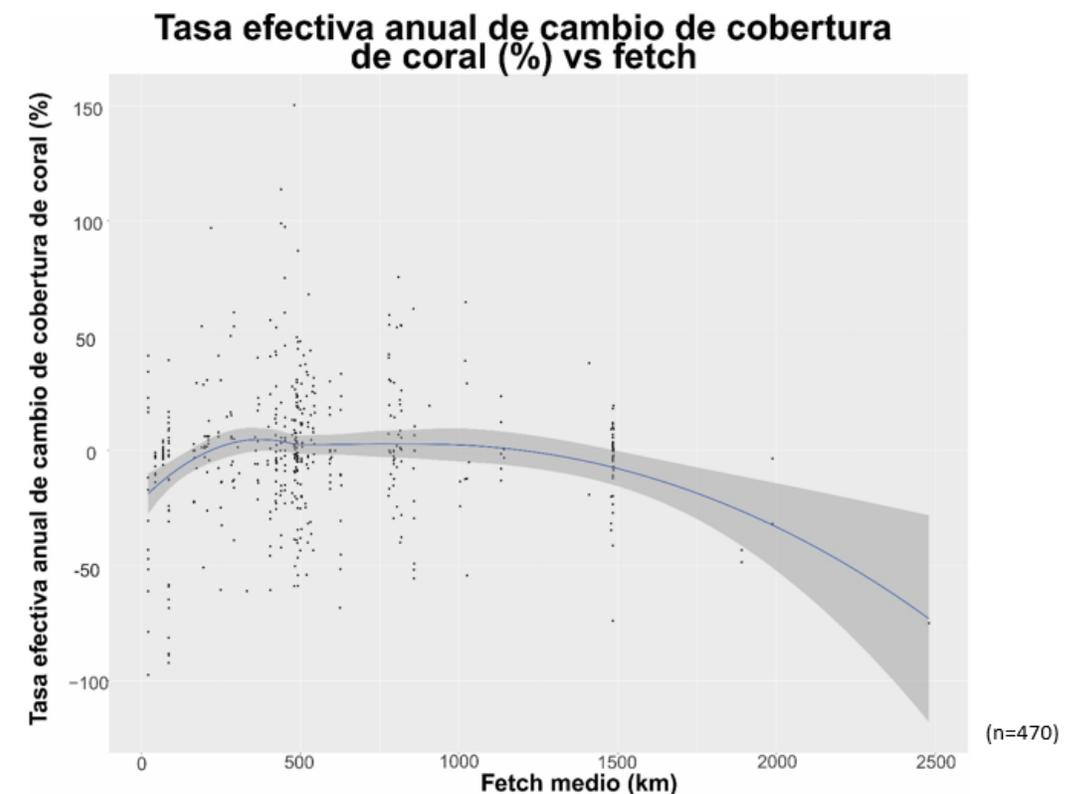


**Figura 15.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra la máxima velocidad de viento al impacto, antes de 1 año de remuestreo se observa el mismo daño en los sitios localizados en sotavento a vientos mayores a 64 kt.

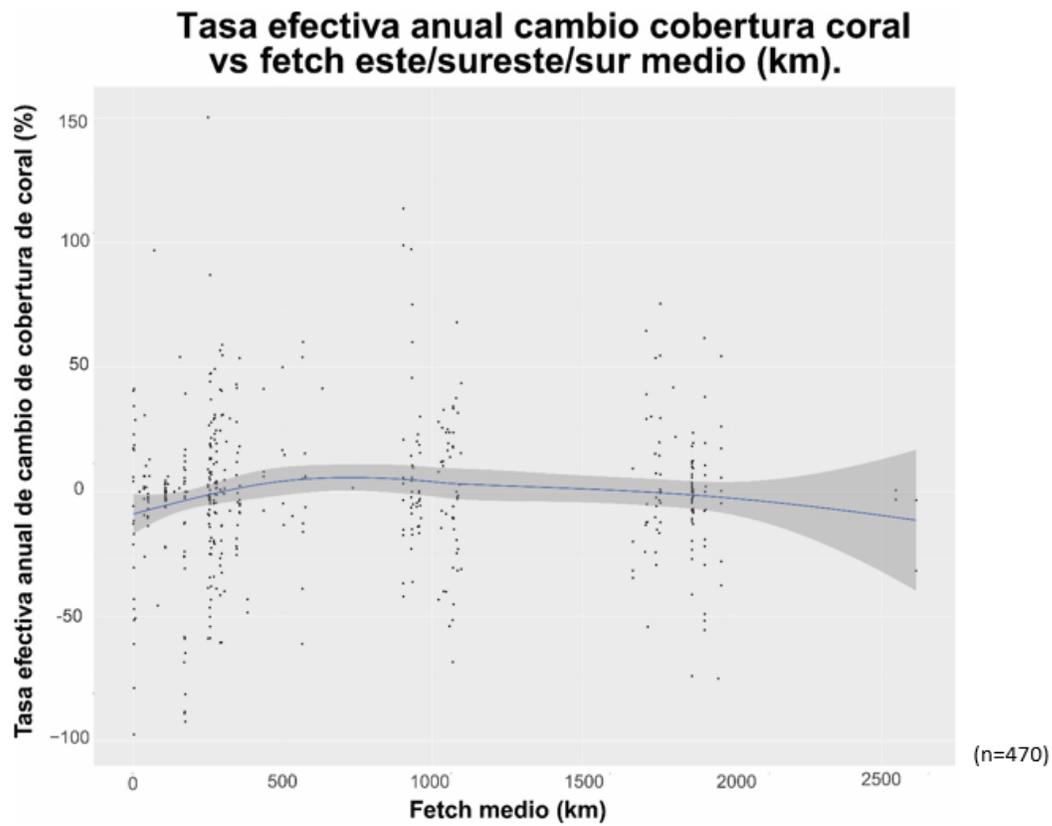
## 6. Fetch, cobertura de coral

El fetch, se calculó para todos los ángulos: norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste y oeste. La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra el fetch indica que hay una correlacionado con el daño arrecifal, ver figura 16. También se filtró los ángulos de dirección de fetch a sur, sureste y este, en ese caso no se encontró correlación, ver figura 17.

El fetch de todos los ángulos se perfiló por la exposición: sotavento, intermedio y barlovento. En donde la tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral en dónde a todas las exposiciones hay una afectación al arrecife entre más aumenta la distancia de fetch, pero los sitios de sotavento (menos expuestos) tienen tasas efectivas de cambio de cobertura de coral negativas de hasta el 100% anual. Posiblemente se deba al tipo de corales de la zona, ver figura 18.

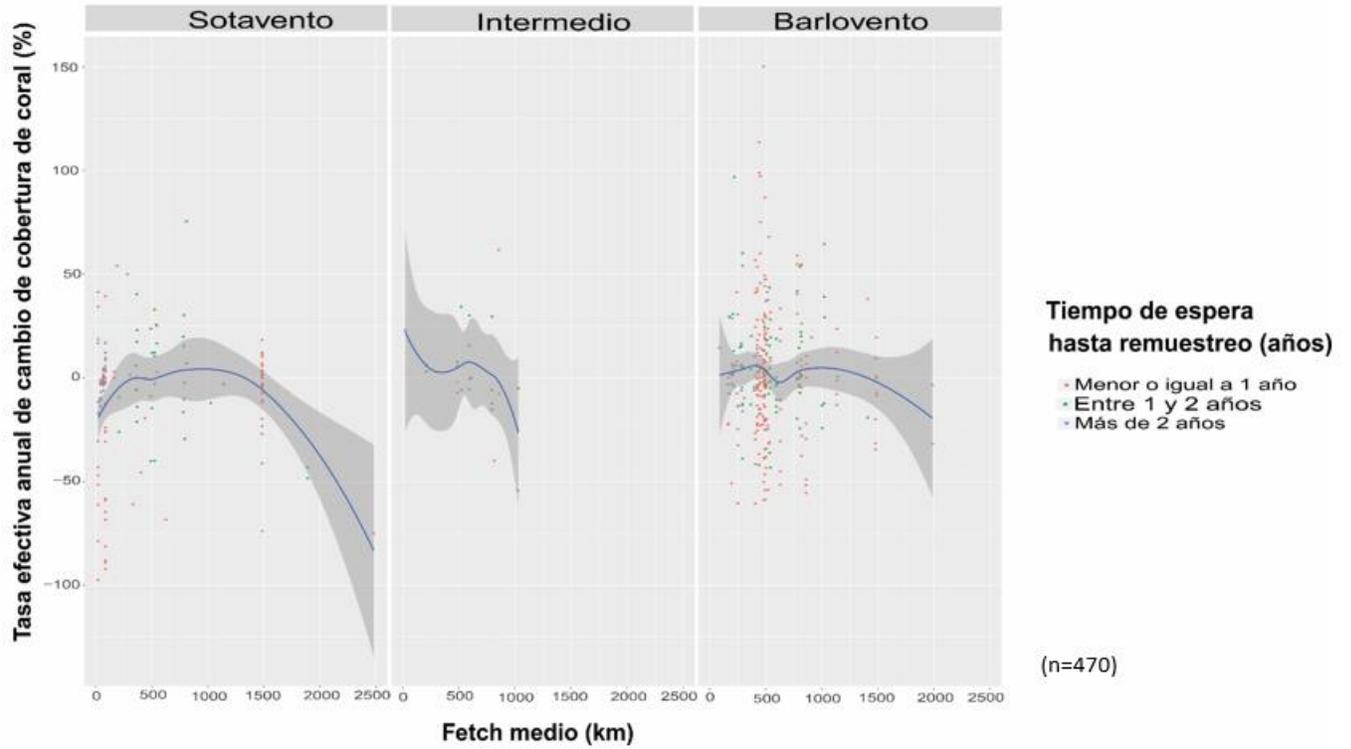


**Figura 16.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra fetch (km), el fetch está correlacionadas con un mayor daño arrecifal.



**Figura 17.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra fetch este/sureste y sur (km), el fetch filtrado no está correlacionadas con el daño arrecifal.

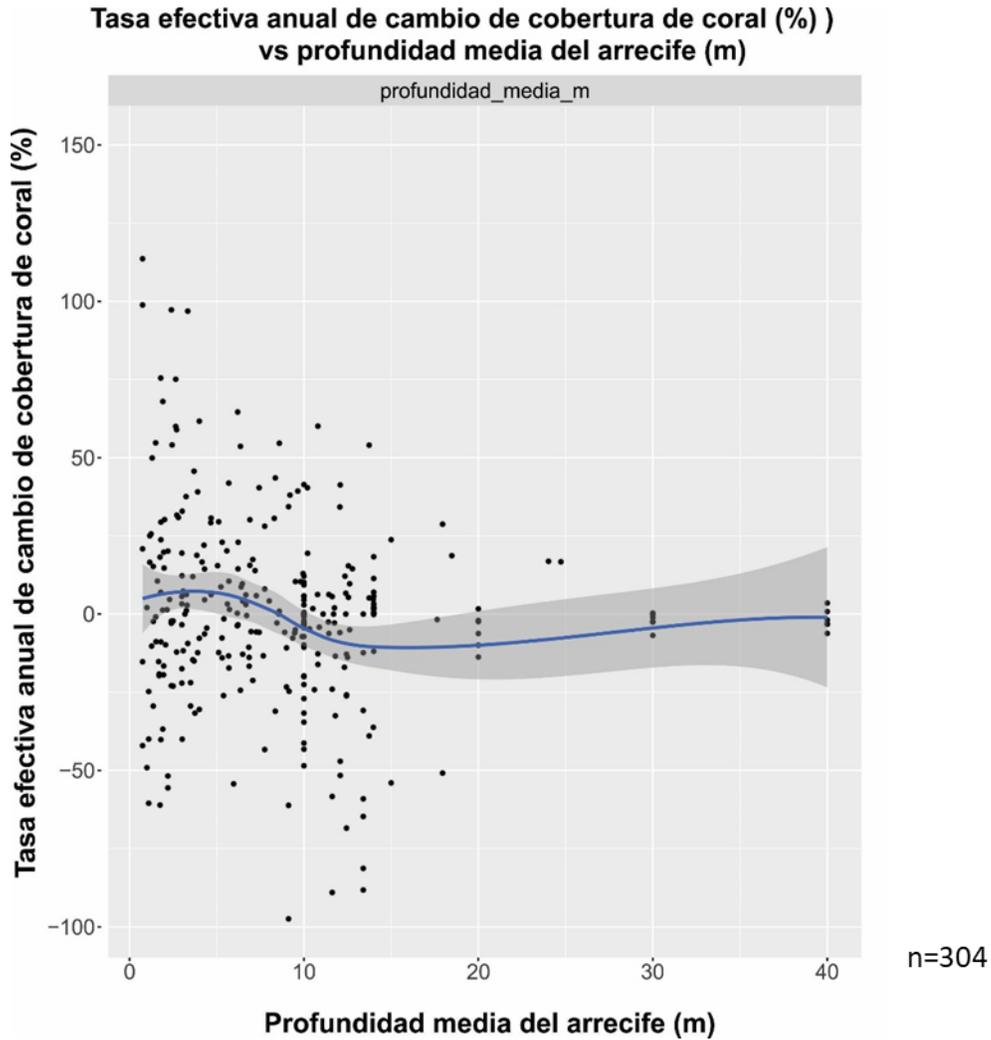
### Tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral (%) vs fetch perfilada por exposición



**Figura 18.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra el fetch perfilada a la exposición del arrecife, donde a mayor fetch mayor afectación al arrecife

## 7. Profundidad del arrecife, cobertura de coral.

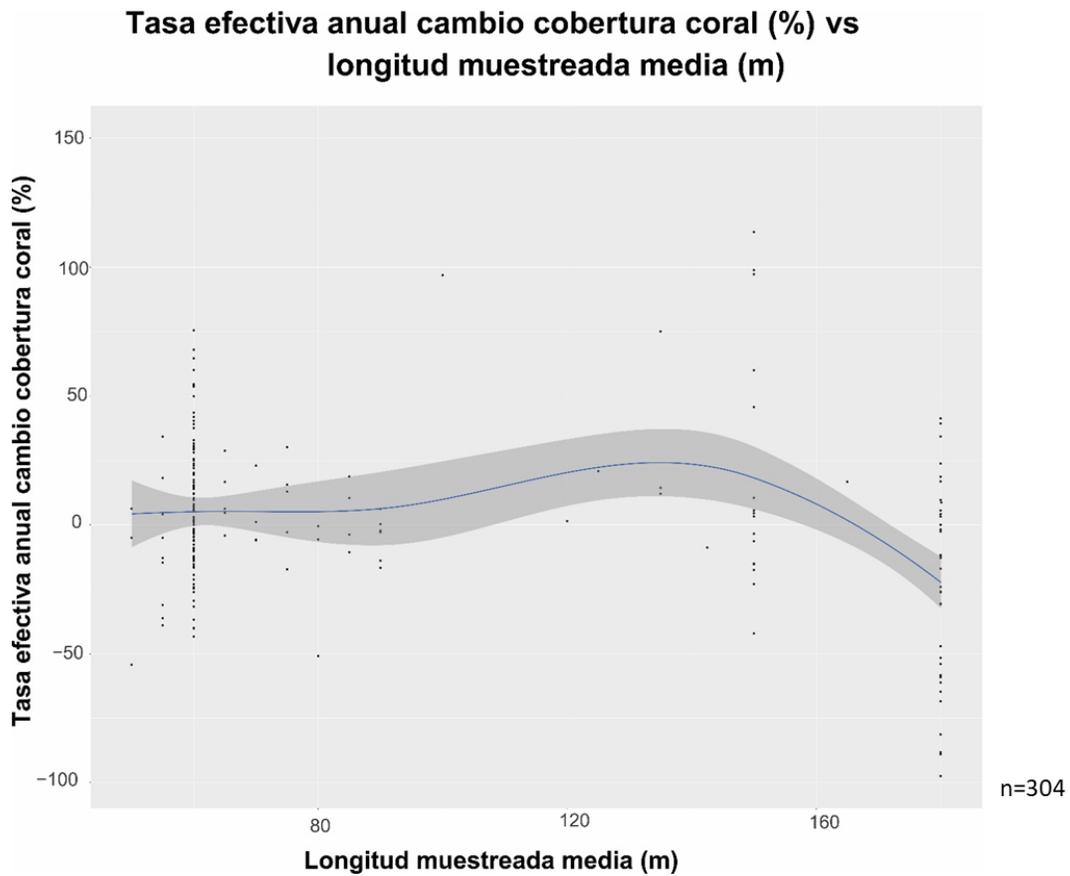
La profundidad es la medida en metros a la que se encuentra el sitio. En dónde en nuestro análisis aparentemente la tasa de cambio de la cobertura de coral no parece tener cambio con la profundidad, ver figura 19.



**Figura 19.** La tasa efectiva anual de cambio de la cobertura de coral no parece tener cambio con la profundidad.

## 8. Tamaño del arrecife, cobertura de coral.

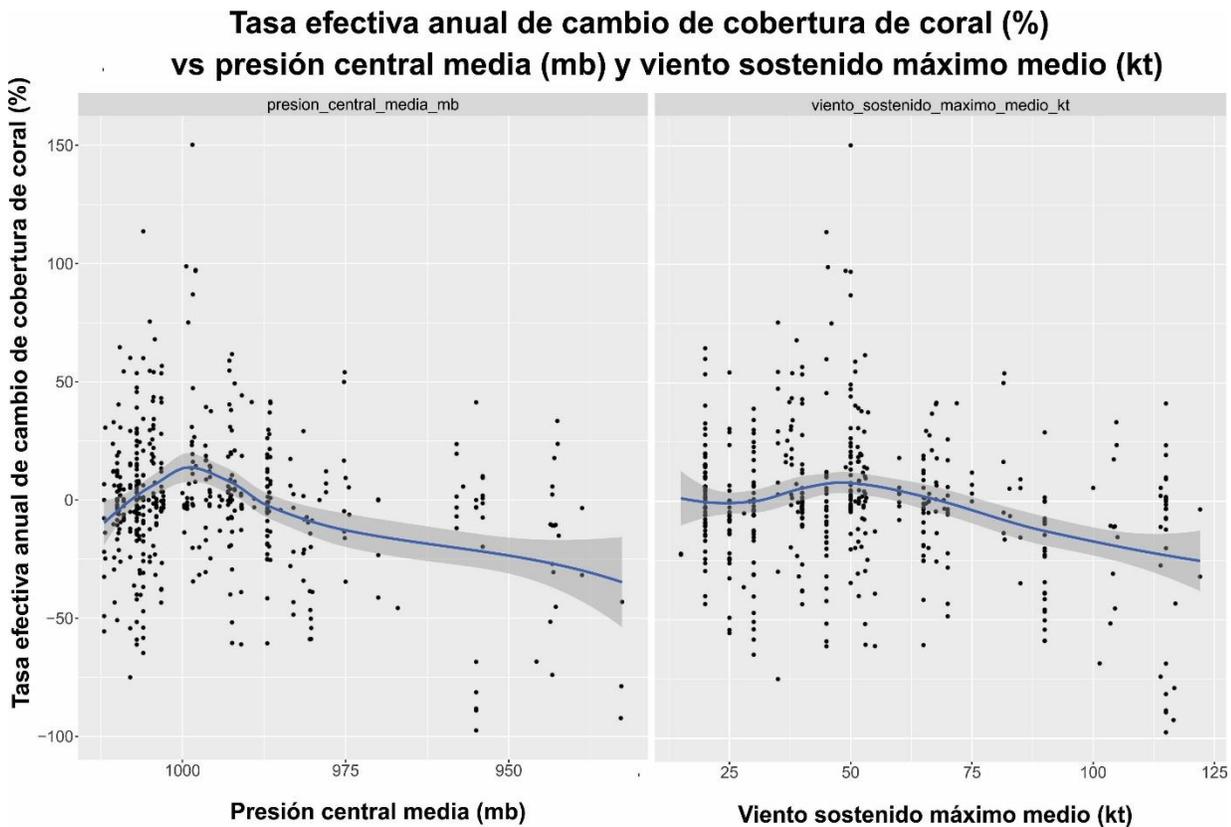
El tamaño del arrecife se calculó a partir de la longitud muestreada media, después del análisis de puede observar que no hay cambio en la tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral, está variable, aunque no se ve que tenga un efecto, puede indicar que el tamaño de las muestras de los datos para este análisis tiene una buena calidad, ver figura 20.



**Figura 20.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra la longitud muestreada media aparentemente no tiene correlación.

## 9. Intensidad del viento y presión central, cobertura de coral, cobertura de coral.

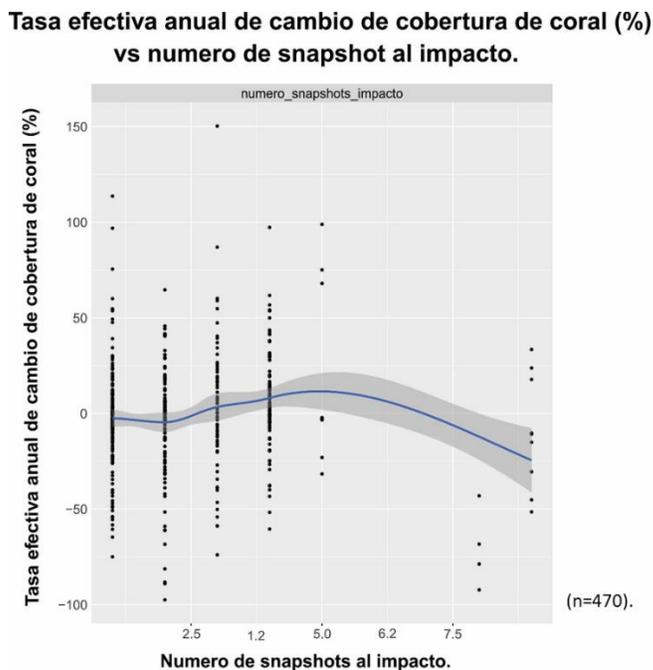
La intensidad del viento y la presión central tienen una alta correlación ( $r = -0.91$ , ver anexos figura a), en los huracanes a menor presión central mayor máximo viento sostenido. La presión central media del huracán está correlacionada con la tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral, a menor presión mayor pérdida de cobertura. El viento máximo sostenido también está correlacionado con un mayor daño arrecifal, en donde a mayor viento sostenido máximo mayor pérdida, ver figura 21.



**Figura 21.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra presión central media y viento sostenido máximo medio del huracán. El viento máximo sostenido parece estar correlacionadas con un mayor daño arrecifal, así como la presión central parece estar correlacionadas con un mayor daño arrecifal.

## 10. Duración de la afectación, cobertura de coral.

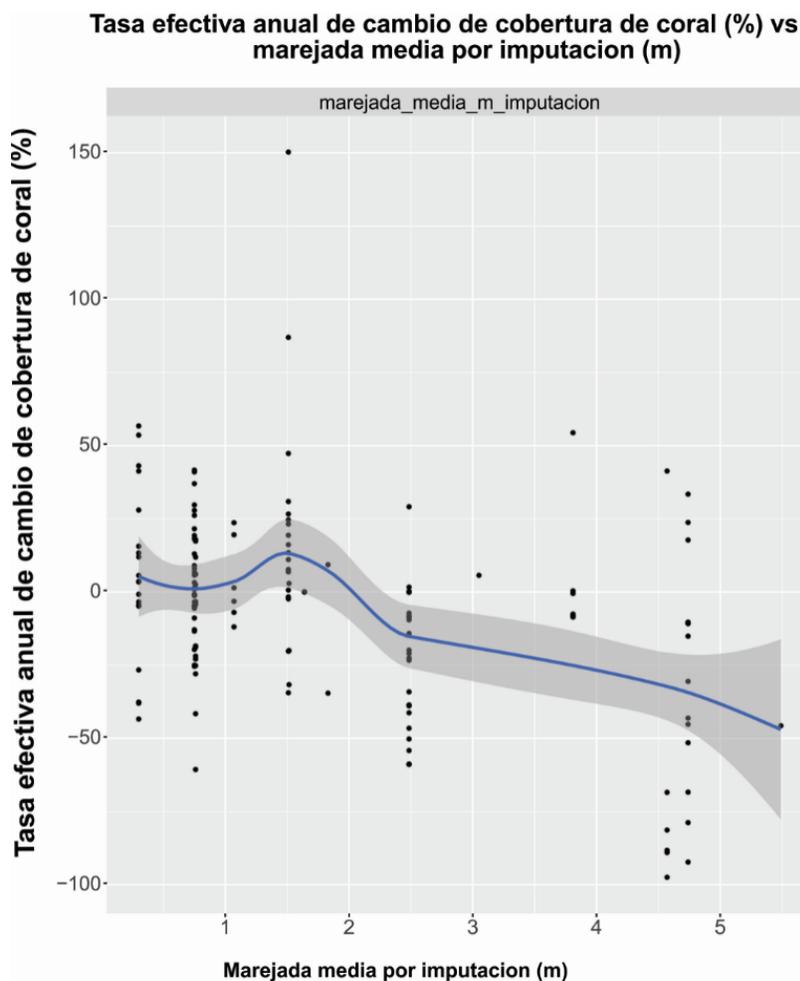
La duración de la afectación son las horas en las que el huracán tardó en pasar por la zona de estudio. Se determinó con el número de capturas del huracán o “snapshots”, un “snapshots” es igual a 6 horas. En dónde aparentemente a mayor tiempo de exposición parece estar correlacionado con un mayor daño arrecifal. Ya que después de 5 “snapshots” o 30 horas de duración de la afectación hay mayor pérdida de cobertura de coral, ver figura 22.



**Figura 22.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra el numero de “snapshot” de impacto del huracán, 1 “snapshots” = 6 horas. El tiempo de exposición al huracán parecen estar correlacionadas con un mayor daño arrecifal.

## 11. Marea de tormenta, cobertura de coral.

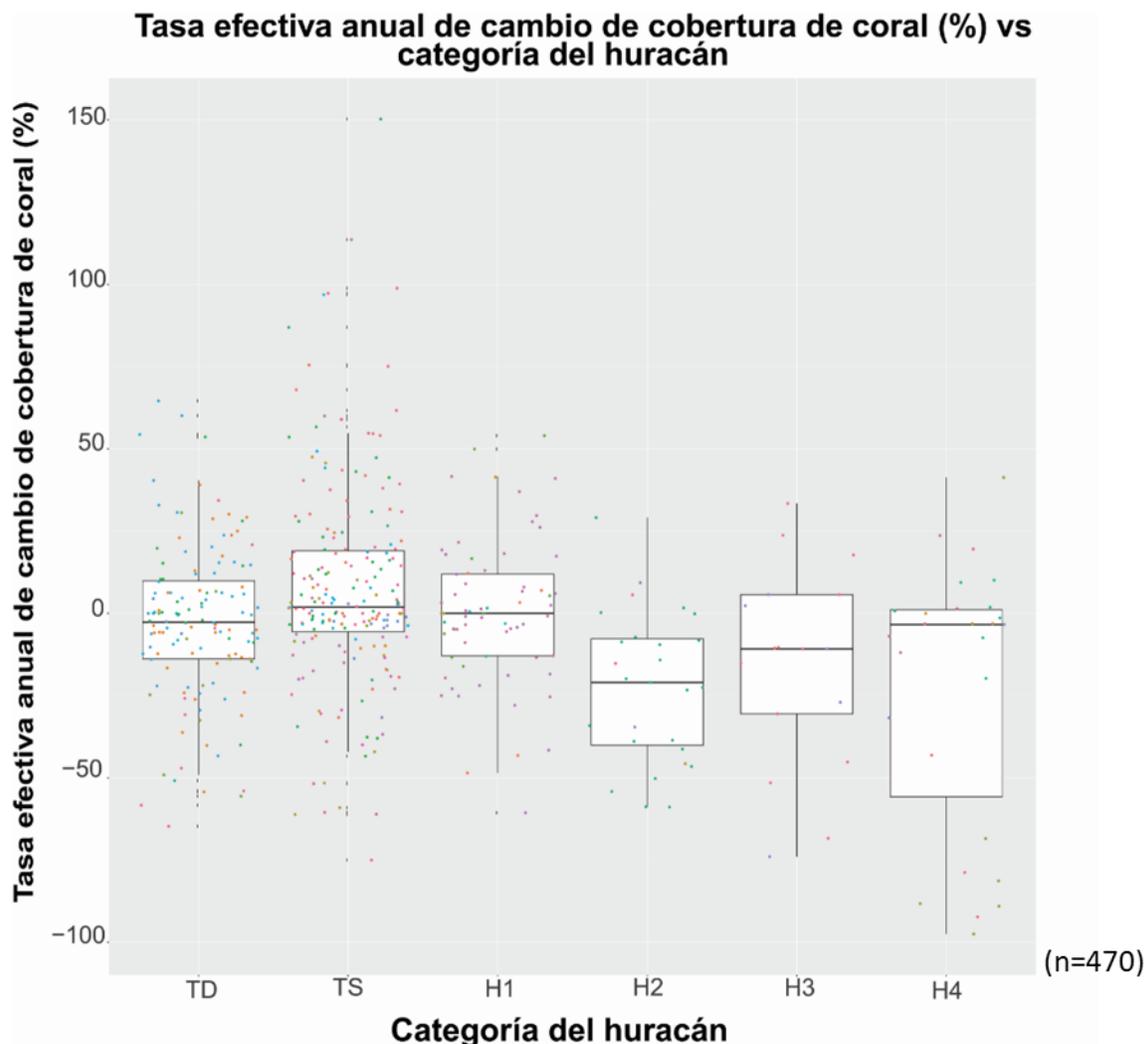
La marea de tormenta (marejada) aparente esta correlacionada con un mayor daño arrecifal. La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra la marejada, aparentemente, demuestra que marejadas mayores a 2 m provocan daño arrecifal, con tasas negativas efectivas anuales de cambio de cobertura de coral, ver figura 23.



**Figura 23.** La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra marejada (m), la marejada parece estar correlacionadas con un mayor daño arrecifal.

## 12. Intensidad de la tormenta y la máxima intensidad del huracán, cobertura de coral.

Intensidad de la tormenta y la máxima intensidad del huracán, se clasificó usando como referencia el viento máximo medio, en dónde la tasa de cambio de cobertura de coral indica que los huracanes categoría 4 (H4) son los que aparentemente provocan mayor daño arrecifal, esta variable no se utilizó ya que la variable de máxima velocidad de viento al impacto explica mejor el efecto de los huracanes en la tasa efectiva anual de cambio, ver figura 24.



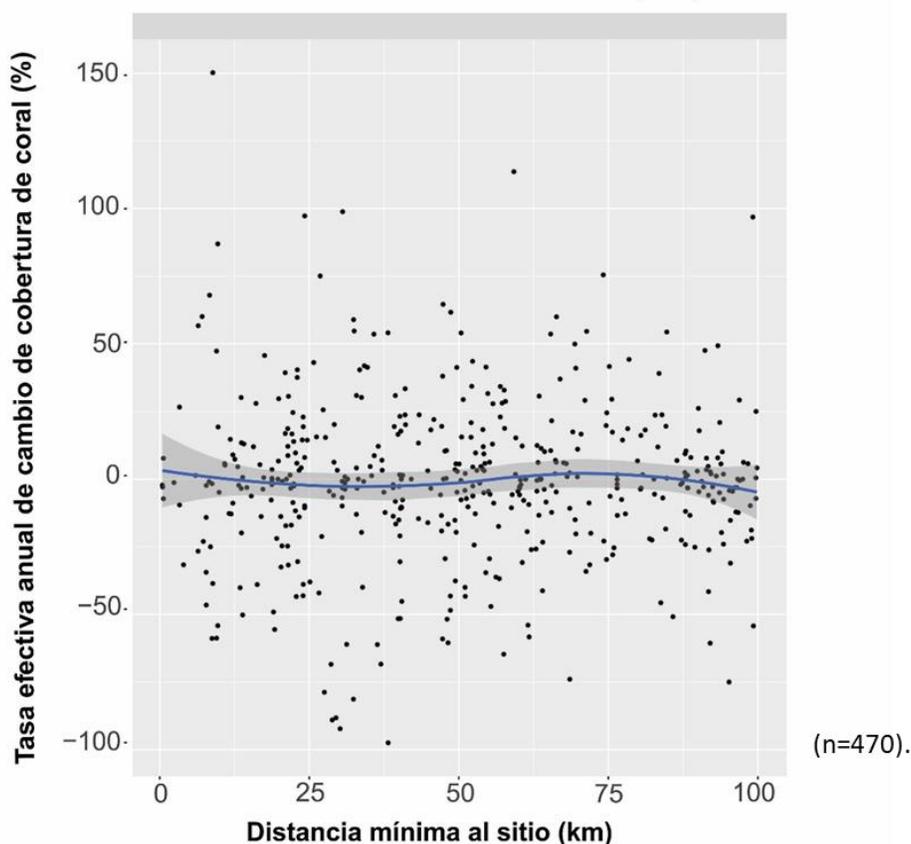
**Figura 24.** Tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra la categoría de huracán, en dónde huracanes categoría 4 (H4) parecen tener mayor afectación a la cobertura de coral.

### 13. Distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio, cobertura de coral.

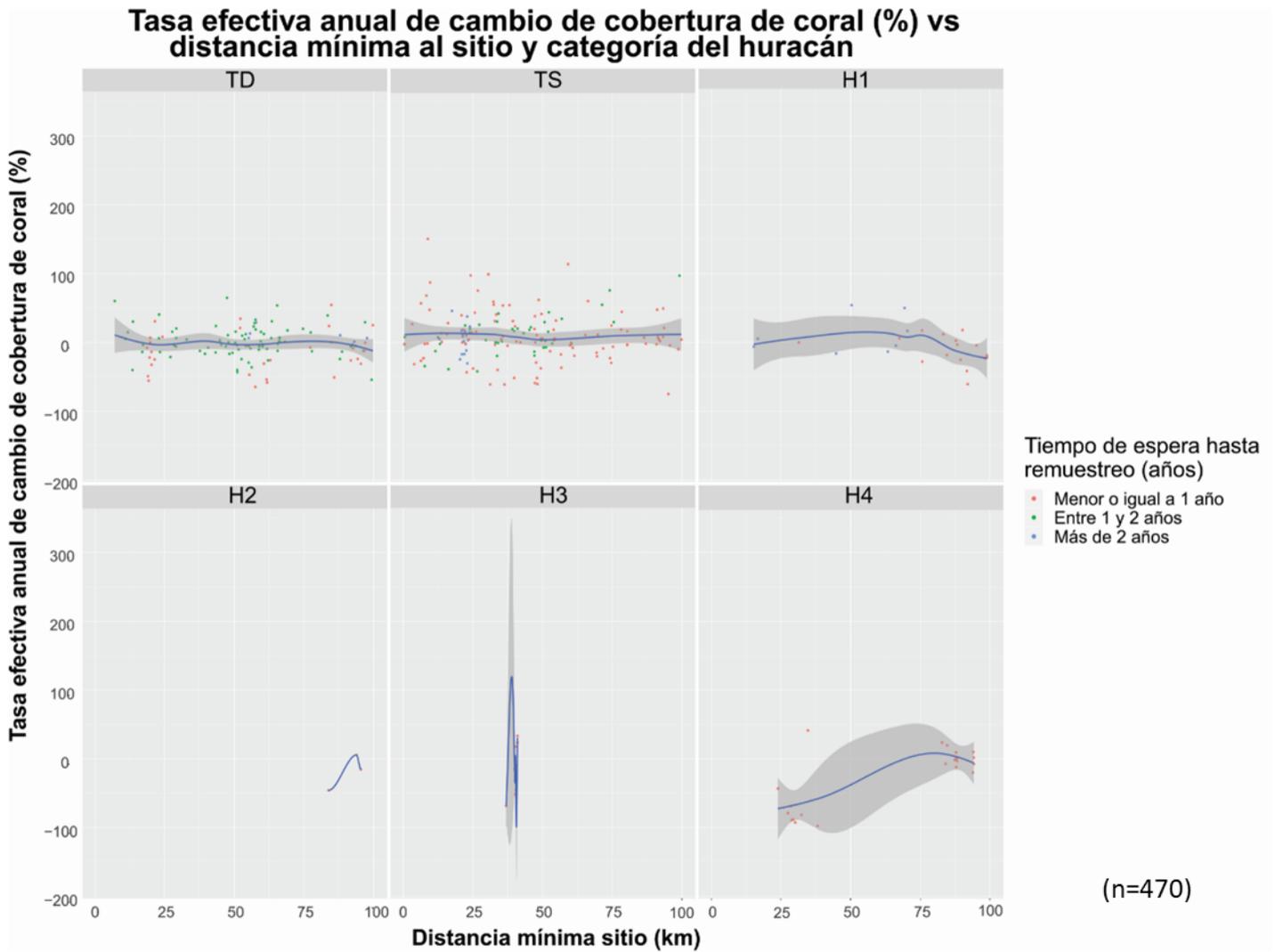
La distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio, medida en metros, aparentemente no tiene relación con la tasa de cambio de cobertura de coral, ya que en no se observa cambio respecto a la distancia que hay entre el huracán y los sitios, ver figura 25.

La tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral contra la distancia mínima del sitio también se perfiló con la categoría de huracán en dónde aparentemente no hay correlación, ver figura 26. También se perfiló máxima velocidad de viento al impacto, en dónde aparentemente en sitios impactados entre 24-50 km hay mayor impacto a vientos mayores a 64 kt, ver figura 27. Además, la tasa efectiva anual de cambio contra la distancia se perfiló contra el porcentaje inicial de cobertura de coral inicial y no se observa una correlación, ver figura 28.

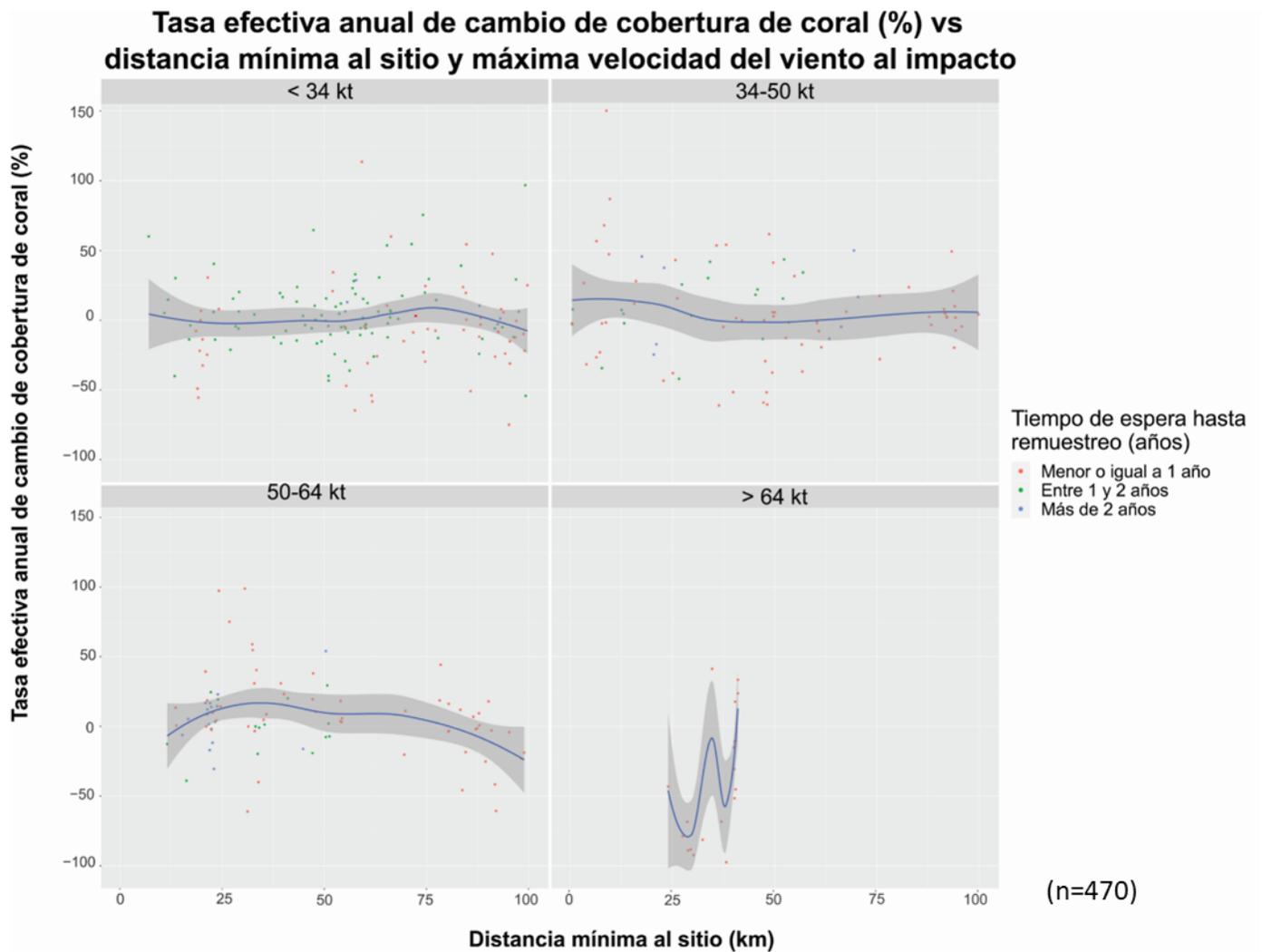
**Tasa efectiva anual de cambio de cobertura de coral (%)  
vs distancia mínima al sitio (km)**



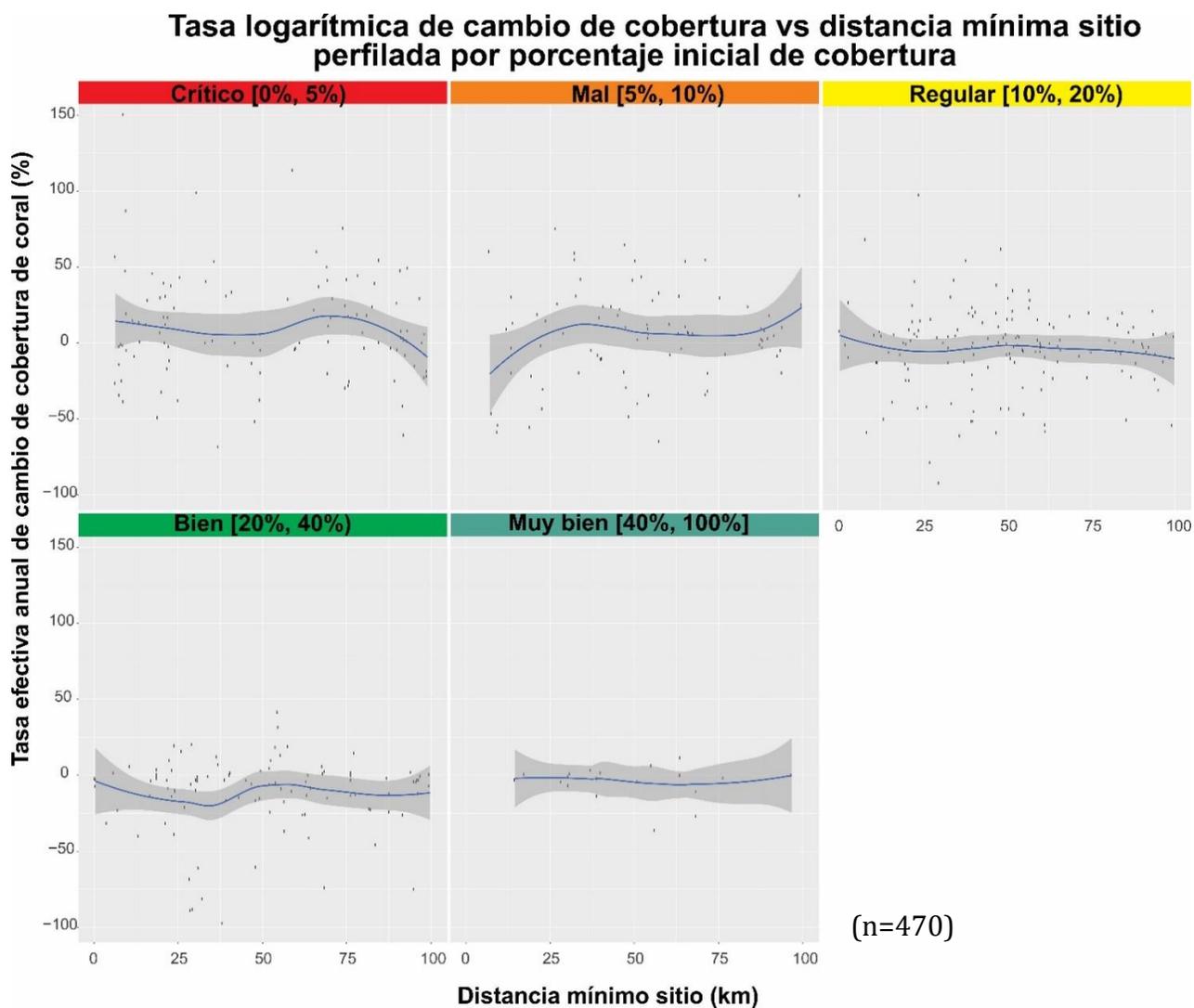
**Figura 25.** La distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio aparentemente no tiene relación con la tasa efectiva anual de cobertura de coral.



**Figura 26.** La distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio perfilada a la categoría del huracán aparentemente no tiene relación con la tasa efectiva anual de cobertura de coral.



**Figura 27.** La distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio perfilada a la máxima velocidad de viento al impacto, aparentemente en sitios impactados entre 24-50 km hay mayor impacto a vientos mayores a 64 kt.

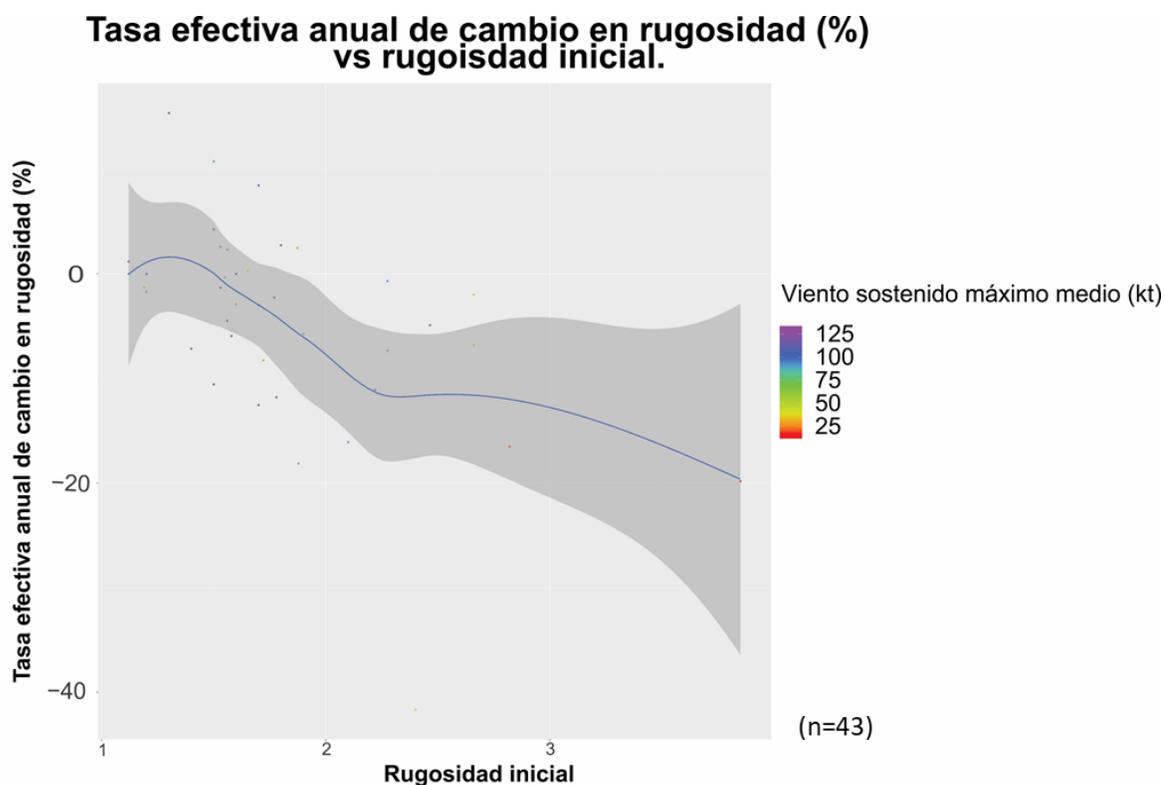


**Figura 28.** La distancia mínima entre el huracán y la zona de estudio perfilada al porcentaje inicial de la cobertura aparentemente no tiene relación con la tasa efectiva anual de cobertura de coral.

#### 14. Rugosidad arrecifal inicial.

La rugosidad, es una medida de la complejidad de arrecife, en donde valores cercanos a 1 indican una baja complejidad y valores más altos son más complejos. La rugosidad inicial, al igual que la cobertura de coral inicial, se ve afectada a mayores vientos sostenidos máximos. Se puede observar que la tasa efectiva anual de cambio de la rugosidad puede llegar a disminuir hasta en un 20% con rugosidades iniciales mayores de 3 después del paso de un huracán, ver figura 29.

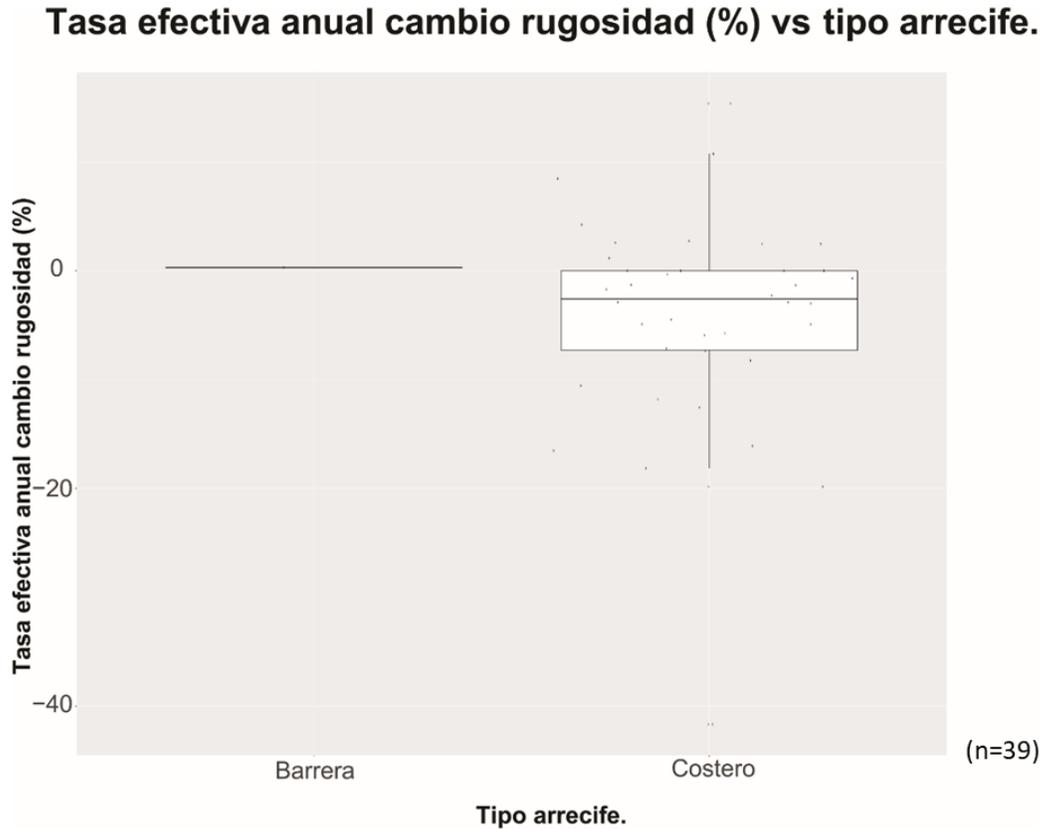
Las tasas efectivas anuales de cambio en la rugosidad arrecifal son menores a las tasas efectivas de cambio de la cobertura de coral, esto se debe probablemente a que la cobertura de coral es más sensible a paso de los huracanes que la rugosidad.



**Figura 29.** La tasa efectiva anual de cambio de rugosidad contra la rugosidad inicial, en donde a mayor rugosidad inicial mayor afectación al arrecife por el paso de un huracán.

### 15. Tipo de arrecife, rugosidad.

El tipo de arrecife parece no tener correlación con la tasa efectiva anual de cambio de rugosidad arrecifal, en estos datos solo se encontraron tipo barrera y costero y en ambos casos la tasa efectiva anual de cambio de la rugosidad cerca del 0, ver figura 30.

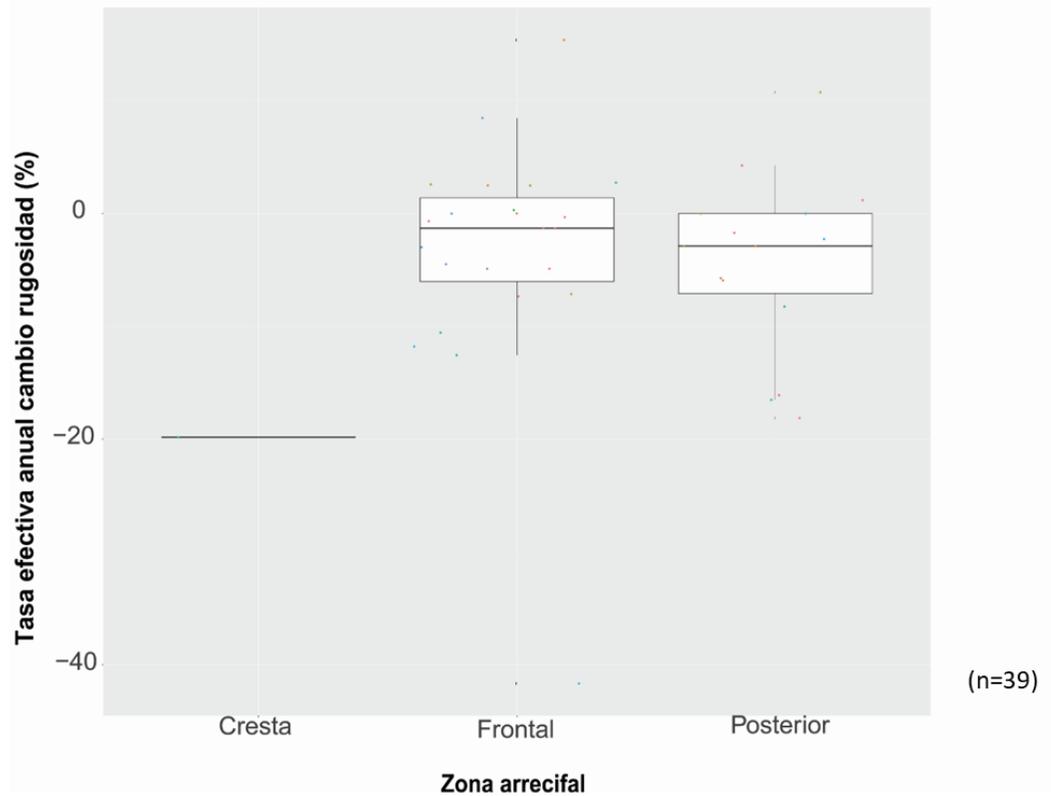


**Figura 30.** La tasa efectiva anual de cambio de rugosidad contra tipo de arrecife, en dónde aparentemente no hay correlación.

## 16. Zona arrecifal, rugosidad.

La zona arrecifal de los datos de rugosidad aparentemente no esta relacionada con tasa efectiva anual de cambio de rugosidad, ver figura 31.

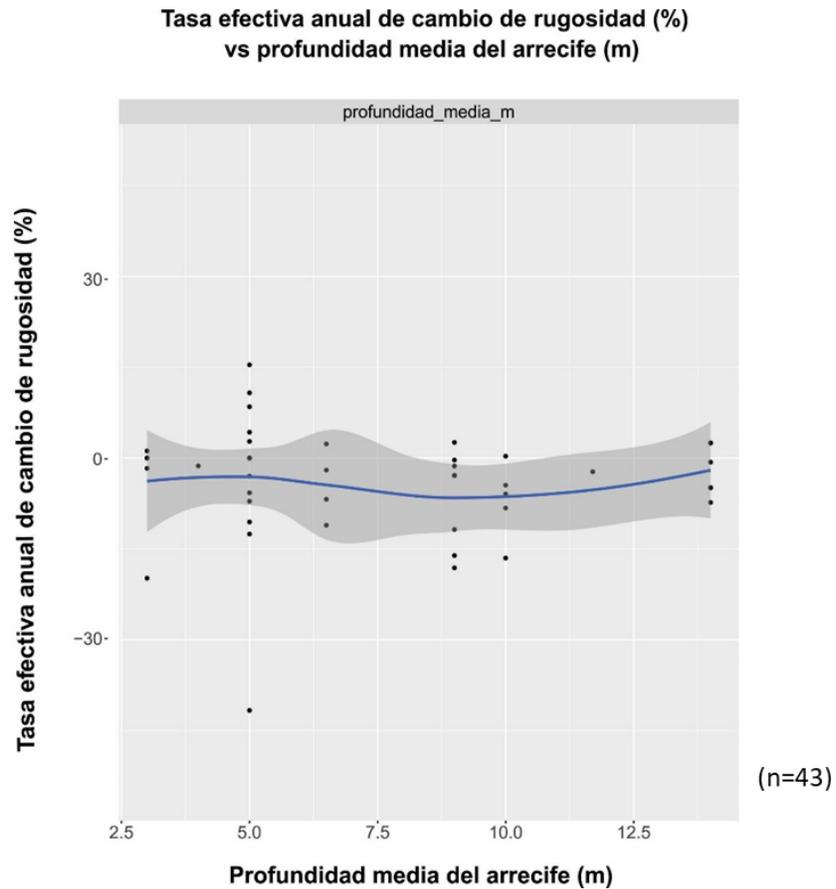
**Tasa efectiva anual cambio rugosidad (%) vs zona arrecifal.**



**Figura 31.** La tasa efectiva anual de cambio de rugosidad contra zona arrecifal, en dónde aparentemente no hay correlación.

## 17. Profundidad media, rugosidad.

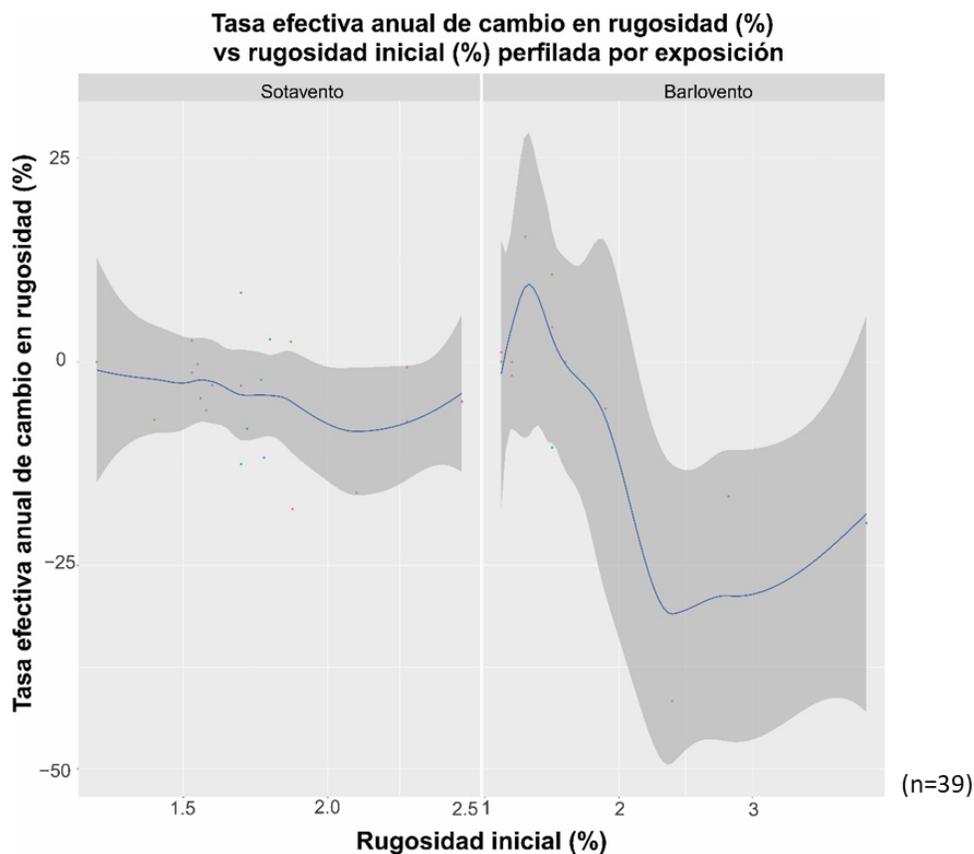
La profundidad media del arrecife de los datos colectados con rugosidad arrecifal parece no tener relación con la tasa anual de cambio de rugosidad, en los datos de cobertura de coral también se observa el mismo efecto, ver figura 32.



**Figura 32.** La tasa efectiva anual de cambio de rugosidad contra profundidad media del arrecife, en dónde aparentemente no hay correlación.

## 18. Exposición, rugosidad.

La tasa efectiva anual de cambio en rugosidad se ve afectada en sitios situados en el barlovento, a diferencia de los datos de cobertura de coral, en dónde los arrecifes más afectados se encuentran localizados en el sotavento, ver figura 33.

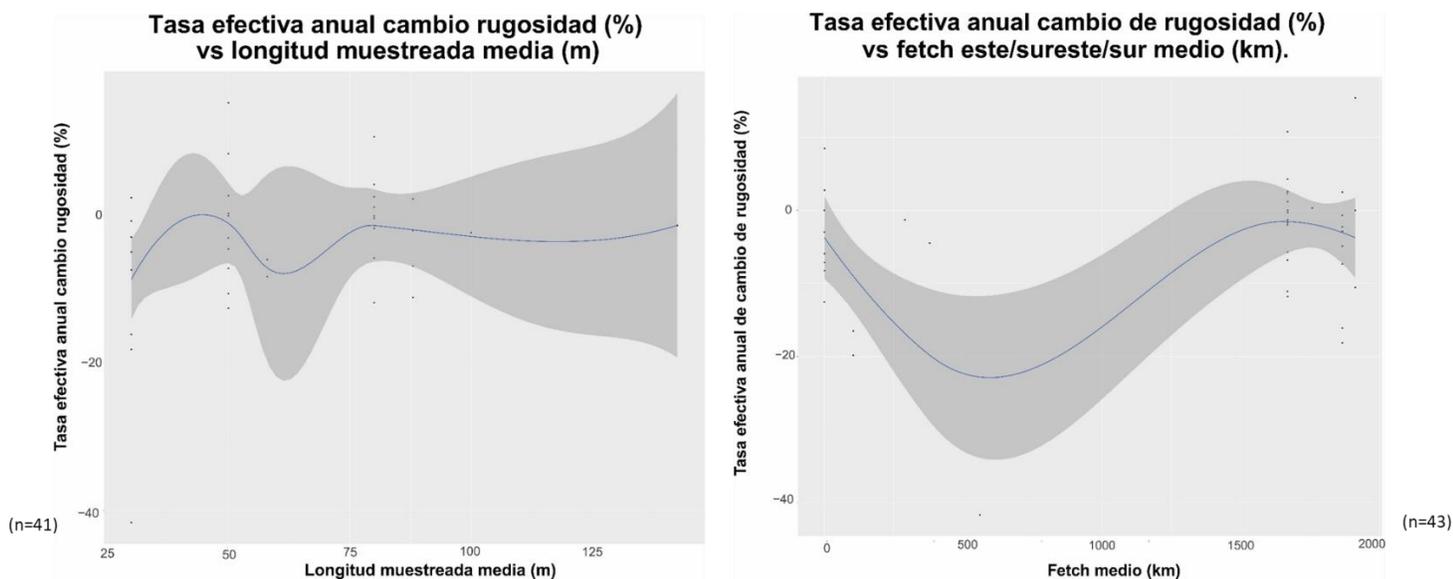


**Figura 33.** La tasa efectiva anual de cambio de rugosidad contra rugosidad inicial perfilada por exposición, en dónde aparentemente los arrecifes situados en barlovento (zona expuesta) son los más afectados.

## 19. Tamaño del arrecife y fetch, rugosidad.

La tasa efectiva anual de cambio de la rugosidad no tiene correlación con la longitud muestreada, tamaño del arrecife, se puede observar el mismo comportamiento en la variable de cobertura de coral, ver figura 34.

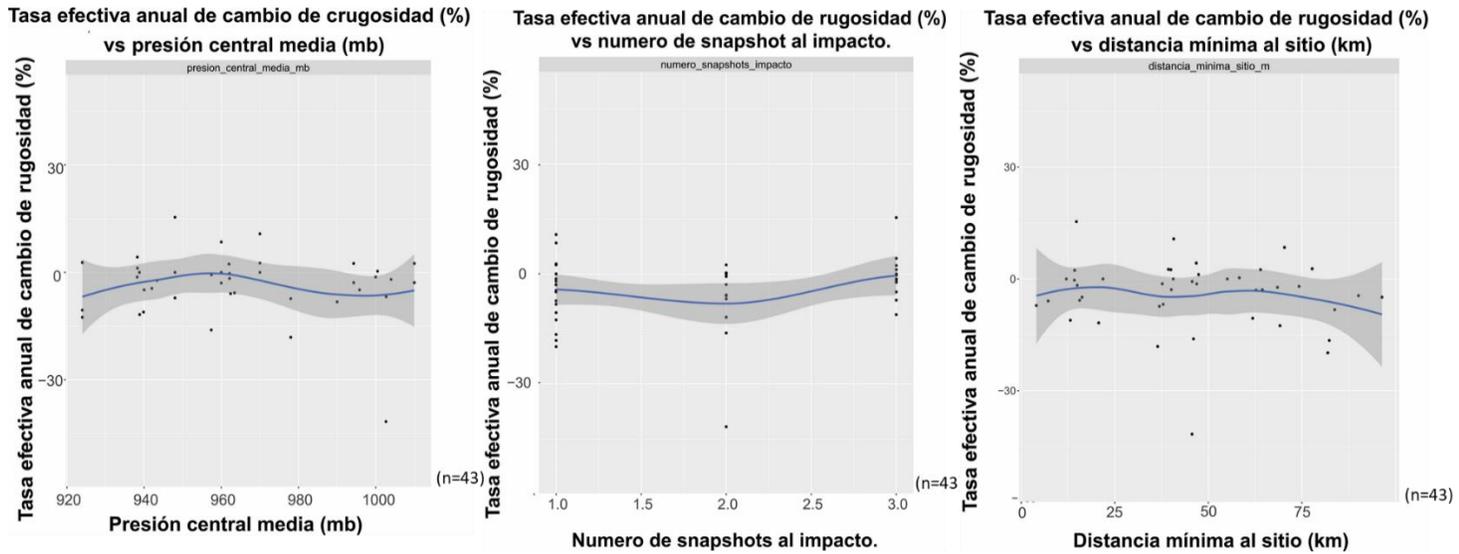
Además, el fetch fue calculado para las direcciones: sur, sureste y este. Aparentemente no hay una correlación con la tasa efectiva anual de cambio de rugosidad, ver figura 34.



**Figura 34.** La tasa efectiva anual de cambio de rugosidad contra longitud muestreada media y fetch este/sureste/sur, en dónde aparentemente no hay correlación.

## 20. Presión central, duración de la afectación y distancia a la zona de estudio, rugosidad.

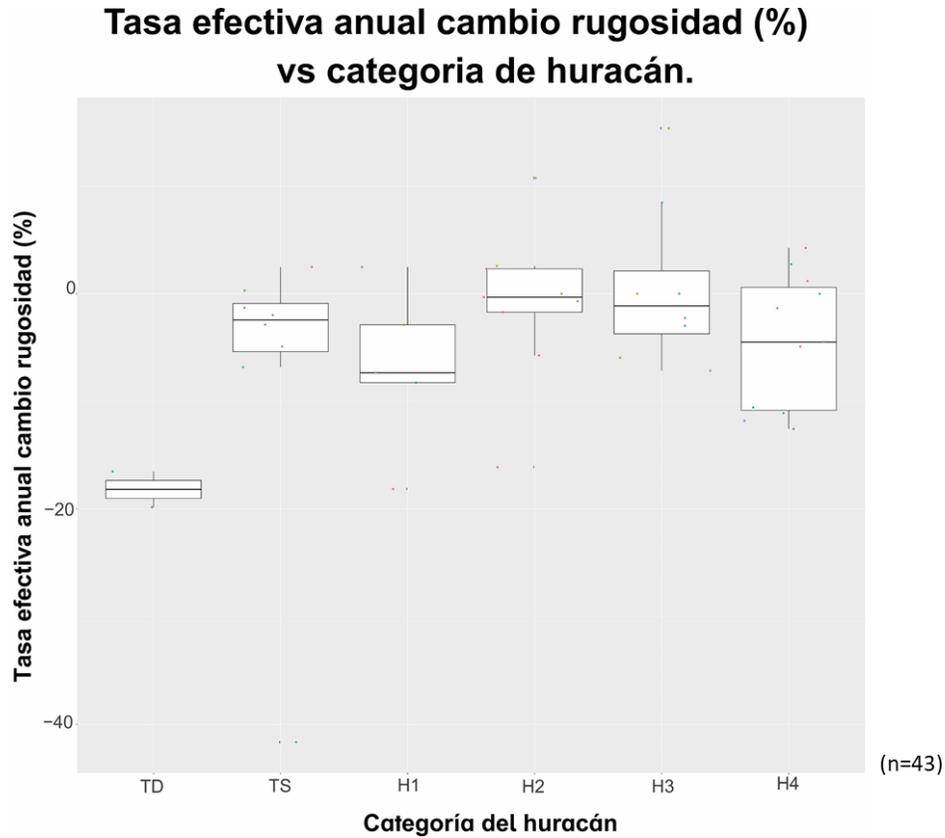
Las variables de presión central, duración de la afectación (número de snapshots) y la distancia a la zona de estudio aparentemente no tienen correlación con la rugosidad arrecifal, ver figura 35.



**Figura 35.** La tasa efectiva anual de cambio de rugosidad contra la presión central, numero de snapshots al impacto y distancia mínima al sitio, aparentemente no tienen correlación.

## 21. Intensidad de tormenta y la máxima intensidad del huracán, rugosidad.

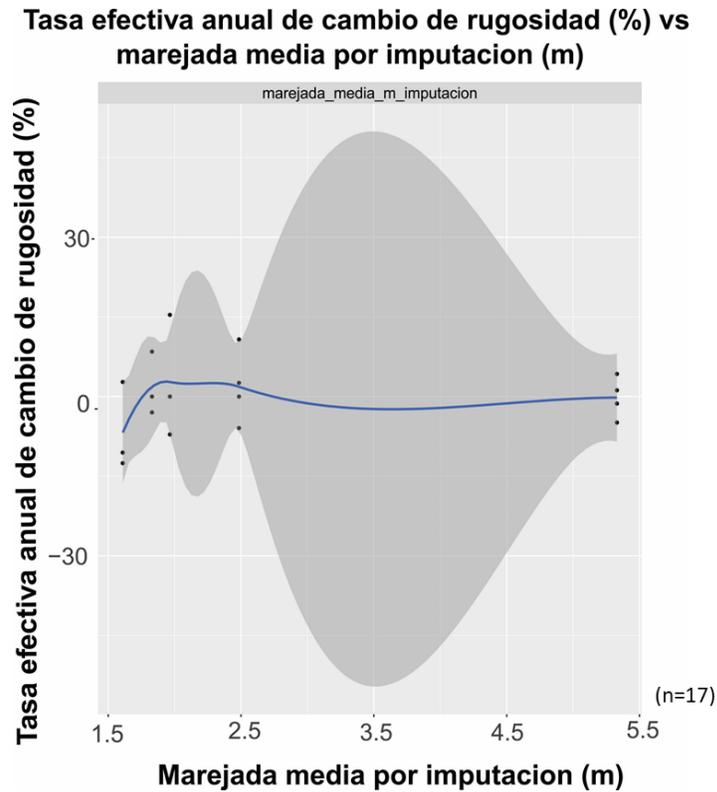
Intensidad de la tormenta y la máxima intensidad del huracán, la tasa efectiva anual de cambio de rugosidad indica que aparentemente que no hay correlación, ya que a pesar de que la depresión tropical indica una tasa negativa en solo un dato, ver figura 36.



**Figura 36.** Tasa efectiva anual de cambio de rugosidad contra la categoría de huracán, aparentemente no hay correlación.

## 22. Marea de tormenta, rugosidad.

La marea de tormenta de los datos de rugosidad aparentemente no presenta correlación con la tasa efectiva anual de cambio de rugosidad, esto se deba posiblemente a la poca cantidad de datos que se pudo extraer de la base de datos de la marea de tormenta, ver figura 37.



**Figura 36.** Tasa efectiva anual de cambio de rugosidad contra marejada media por imputación, aparentemente no hay correlación.

## **E. MODELO FINAL Y ECUACIÓN.**

Para el modelo de cobertura de coral, las variables seleccionadas fueron:

1. Tasa logarítmica diaria cambio cobertura coral (Y)
2. Máxima velocidad viento impacto kt (categórica)
3. Porcentaje cobertura coral muestra inicial
4. La interacción entre la máxima velocidad viento impacto kt, y el porcentaje de cobertura de coral en la muestra inicial.
5. Numero snapshots al impacto
6. Presión central media mb
7. Viento sostenido máximo medio kt
8. Exposición
9. Fetch medio km
10. La interacción entre la exposición y el fetch medio km
11. La diferencia entre la muestra final y la salida del huracán (en días)

Resultados del modelo explicativo son las variables que más se correlacionan con la pérdida de cobertura de coral después del paso de un huracán y son, ver tabla 4:

Porcentaje cobertura coral muestra inicial.

Exposición Barlovento.

Máxima velocidad viento impacto kt.

**Tabla 4.** Modelo explicativo lineal mixto de cobertura de coral. Itnintercep= intercepto, Value=Valor de  $\beta$ , Std Error=Error estándar, DF=grados de libertad, t-value=valor de t, p-value=valor de p para aceptar o rechazar la hipótesis nula.

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Itnintercep)	3.73	8.94	298.00	0.42	0.677
Máxima velocidad viento impacto kt cat.L	-0.26	0.26	298.00	-0.98	0.3261
Máxima velocidad viento impacto kt cat.Q	-0.11	0.18	298.00	-0.62	0.5372
Máxima velocidad viento impacto kt cat.C	-0.05	0.10	298.00	-0.51	0.6071
<b>Porcentaje cobertura coral muestra inicial</b>	-0.02	0.01	298.00	-3.90	<b>0.0001</b>
Numero snapshots impacto	0.03	0.02	298.00	1.23	0.2213
Presión central media mb	0.00	0.01	298.00	-0.43	0.6643
Viento sostenido máximo medio kt	0.00	0.01	298.00	-0.40	0.6865
Exposición Intermedio	0.21	0.15	298.00	1.43	0.1528
<b>Exposición Barlovento</b>	0.17	0.07	298.00	2.59	<b>0.0101</b>
Fetch medio km	0.00	0.00	298.00	0.98	0.3257
Diferencia muestra final salida huracán días	0.00	0.00	298.00	-0.08	0.9343
Máxima velocidad viento impacto kt cat.L:porcentaje cobertura coral muestra inicial	-0.02	0.01	298.00	-1.60	0.1116
Máxima velocidad viento impacto kt cat.Q:porcentaje cobertura coral muestra inicial	-0.02	0.01	298.00	-1.86	0.0642
<b>Máxima velocidad viento impacto kt cat.C:porcentaje cobertura coral muestra inicial</b>	-0.02	0.01	298.00	-2.67	<b>0.008</b>
Exposición Intermedio:fetch medio km	0.00	0.00	298.00	-1.15	0.2526
Exposición Barlovento:fetch medio km	0.00	0.00	298.00	-1.02	0.3078

Para el modelo final de rugosidad, se incluyeron originalmente las siguientes variables:

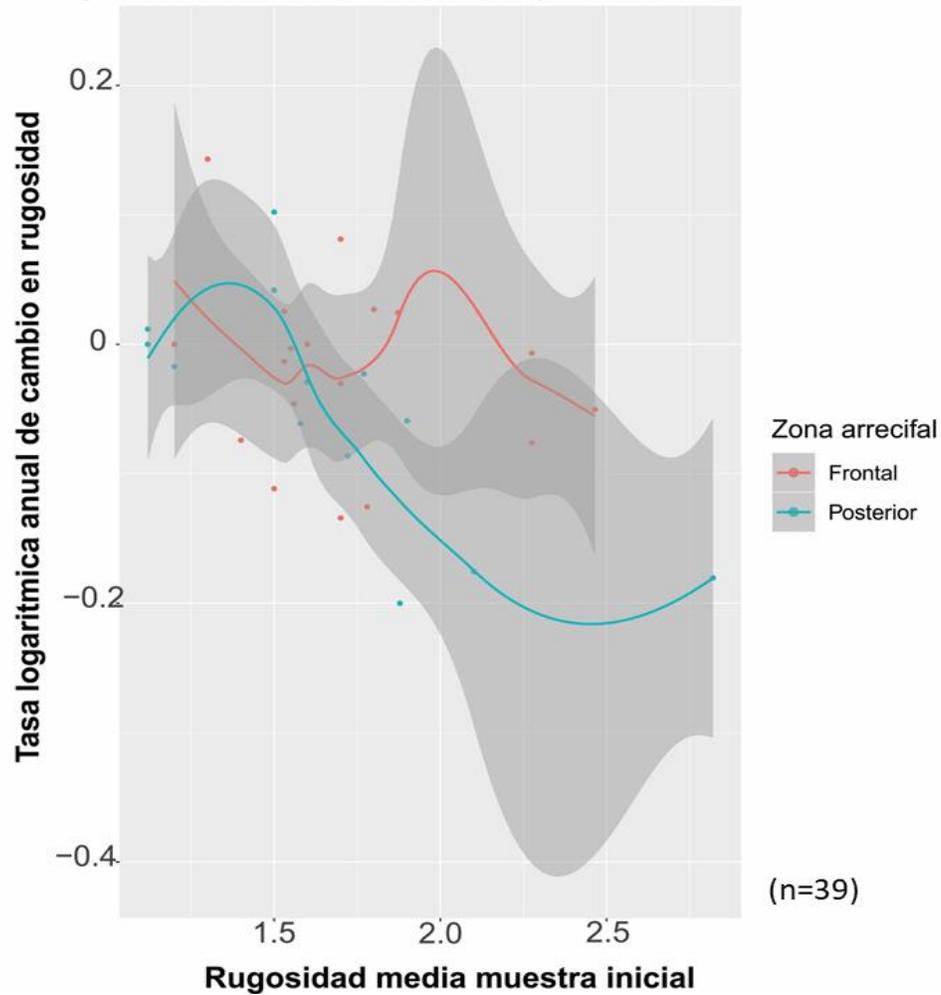
1. Viento sostenido máximo medio kt, en lugar de la categoría del huracán, pues es la variable original y aparte es continua, lo que nos permite ahorrar parámetros.
2. Rugosidad media muestra inicial
3. Diferencia muestra final salida huracán años
4. Exposición
5. La interacción entre la exposición y la rugosidad media en la muestra inicial
6. Zona arrecifal

Sin embargo, después de la selección de variables, sólo quedaron la rugosidad media en la muestra inicial y la zona arrecifal. La variable de rugosidad inicial media es la que resultó que mejor explica la pérdida de rugosidad por el paso de un huracán, ver tabla 5. Además, la zona arrecifal es una variable que estuvo cerca de ser significativa, podría ser una variable de ayuda, para ello se elaboró una gráfica de la tasa logarítmica anual de cambio contra rugosidad media muestra inicial perfilada por zona arrecifal, en dónde a pesar del traslape de los intervalos de confianza, el arrecife posterior es el que podría verse más afectado, ver figura 37.

**Tabla 5.** Modelo explicativo lineal múltiple

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.144	0.053	2.715	0.011
<b>Rugosidad media muestra inicial</b>	<b>-0.094</b>	<b>0.029</b>	<b>-3.216</b>	<b>0.003</b>
Zona arrecifal Posterior	-0.038	0.023	-1.648	0.109

**Tasa logarítmica anual de cambio en rugosidad vs rugosidad media muestra inicial y zona arrecifal.**



**Figura 37.** Tasa logarítmica anual de cambio contra rugosidad media muestra inicial perfilada por zona arrecifal, en dónde el arrecife posterior tiene una mayor pérdida después del paso de un huracán.

Usando las variables significativas obtenidas al ajustar el modelo explicativo de cobertura, se ajustó una regresión lineal simple que sirva para ayudar a explorar diferentes escenarios, ver tabla 6.

**Tabla 6.** Valores de la ecuación para calcular la tasa efectiva promedio estimada de distintos escenarios.

	Estimate
(Intercept)	0.067329
porcentaje cobertura coral muestra inicial	-0.008203
Exposición Barlovento	0.094204
Porcentaje cobertura coral muestra inicial máxima velocidad viento impacto (kt) 34-50 kt	-0.001374
Porcentaje cobertura coral muestra inicial máxima velocidad viento impacto (kt) 50-64 kt	0.001929
Porcentaje cobertura coral muestra inicial máxima velocidad viento impacto (kt) Mayor a 64 kt	-0.024567

La ecuación resultante es las siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Tasa efectiva promedio estimada} = & (0.067329 - (0.008203 * \%Ci) + (0.094204 * 0(B) \text{ ó } 1(S)) \\ & - (0.001374 * (1 \text{ si MVVi es } 34-50 \text{ kt ó } 0) + (0.001929 * (1 \text{ si MVVi es } 50-64 \text{ kt ó } 0) \\ & - (0.024567 * (1 \text{ si MVVi es } >64 \text{ kt ó } 0)) * 100 \end{aligned}$$

**%Ci**=porcentaje cobertura coral muestra inicial.

**B**=Barlovento.

**S**=Sotavento

**MVVi**=máxima velocidad viento impacto

**kt**=nudos

En el programa de Excel se elaboró un documento para calcular automáticamente la tasa efectiva promedio estimada y la cobertura de coral final estimada, de esta forma se podrá calcular para todos los escenarios de interés.

## F. CONCLUSIONES

Las variables que aparentemente son las que tienen mayor correlación con el daño arrecifal son:

1. **Cobertura de coral**, a mayor porcentaje de cobertura inicial mayor daño en vientos mayores a 64 kt. La misma tendencia se observa a menos de 1 año de remuestreo.
2. **Rugosidad inicial**, a mayor rugosidad inicial mayor daño.
3. **Exposición**, aparentemente hay mayor afectación en sitios situados en sotavento a vientos mayores a 64 kt. La misma tendencia se observa a menos de 1 año de remuestreo.
4. **El fetch**, calculado al ángulo de: norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste y oeste, tiene un efecto negativo, pero filtrando solo a este, sureste y sur ya no tiene correlación. El fetch de todos los ángulos tiene afectación en arrecifes situados en sotavento.
5. **Velocidad del viento al impacto**, a vientos mayores a 64 kt es más evidente daño arrecifal.
6. **La intensidad del viento y la presión central** parecen estar correlacionadas con un mayor daño arrecifal.
7. **Duración de la afectación**, aparentemente a mayor tiempo de exposición parece estar correlacionado con un mayor daño arrecifal.
8. **La marea de tormenta** parece estar correlacionadas con un mayor daño arrecifal.

Las variables que no tienen correlación son: profundidad del sitio, tamaño, fetch, tipo arrecife, zona arrecifal y distancia mínima a la zona de estudio.

Las variables que resultaron en el modelo explicativo que más se correlacionan con la pérdida de cobertura de coral después del paso de un huracán son:

**Porcentaje cobertura coral muestra inicial**

**Exposición Barlovento**

**Máxima velocidad viento impacto**

La variable que más se correlaciona con la pérdida de rugosidad es:

**La rugosidad inicial.**

Por lo tanto, las variables de: porcentaje cobertura coral muestra inicial, exposición, máxima velocidad de viento al impacto y rugosidad inicial, son las que recomendamos para el seguro paramétrico.

## **G. RECOMENDACIONES PARA EL ESTUDIO**

Para fortalecer los resultados presentados en el presente estudio recomendamos ampliamente una segunda fase en la que se incluya:

Los datos del Dr. Simon Young, estos datos son puntuales por sitio de estudio de las siguientes variables: velocidad del viento, presión del huracán, marea de tormenta y oleaje, esto permitirá tener datos mucho más específicos para el análisis, Por ese motivo recomendamos una fase dos de este proyecto.

Además, muchas de las recomendaciones que tuvimos comprendían tomar en cuenta las especies de corales que se encuentran en los arrecifes estudiados. Por lo que en la siguiente fase también recomendamos incluir las especies de coral como una variable a analizar

Finalmente, se propone ajustar un verdadero modelo predictivo, robustamente validado, que sea accesible por medio de una aplicación Web.

## **H. RECOMENDACIONES BRINDADAS POR LOS PARTICIPANTES DE LOS TALLERES**

6 de noviembre 2018. Puerto Morelos Quintana Roo.

1. Rosa Rodríguez (UNAM): Tomar en cuenta los factores de estrés adicionales para incorporarlos al análisis (enfermedades, blanqueamiento, contaminación) para robustecer la base de datos. Realizar un análisis por profundidad y especies importantes.
2. Melina Soto (HR-México) Sus resultados podrían cambiar los parámetros disparadores actuales de huracán a tormenta (ej. El tamaño de la marejada).
3. Calina Zepeda (TNC) Se requiere de datos para identificar el nivel de daño de los sitios que estaban al norte y sur del ojo del huracán, ya que el daño varía de acuerdo con la posición del ojo. Se pueden integrar datos de CARICOM (Honduras).
4. Eric Jordán Dahlgren (UNAM) Por el tipo de datos que tienen un modelo explicativo con un enfoque multivariado es lo que se debería de utilizar, no hacer modelos predictivos. Frecuencia de arribo de huracanes, en el esquema es importante tomar en cuenta donde llegan, dado que con el cambio climático se están viendo desplazamiento de las rutas de huracanes.
5. María del Carmen García Rivas (PNAPM, CONANP) Habría que incluir en la toma de datos de indicadores arrecifales, algunos parámetros para evaluar el daño de los arrecifes.

6. Claudia Padilla (INAPESCA): Buscar las dos o tres variables explicativas de la variabilidad del cambio en los factores y a partir de esto decir las modificaciones que se observan (ej. La marejada es menor en los arrecifes protegidos).

7. Vanessa Francisco (PNUD-CONANP): Buscar la manera para ponderar el número mínimo de muestra. Para tener resultados más robustos. **filtrar la variable de tiempo, para ver el espacio de recuperación, diferencia entre muestreo y remuestreo.**

8. Fernando Secaira (TNC-México) Sería muy interesante saber qué sitios son los que salieron muy afectados en el arrecife frontal con los huracanes de categoría 4. Y conocer las características tienen esos sitios que hicieron que hubiera una variabilidad tan alta, en comparación con las demás zonas (ubicación, tipo de arrecife, zona, especies, profundidad). Además, utilizar la variable de **velocidad de viento al impacto nos dará más información que la variable de categoría de huracán.** Además, Fernando recomendó considerar el cambio absoluto.

9. Omar Ortiz Moreno (Sian Ka'an, CONANP): qué factores sociales se van a tomar en cuenta para el seguro (pesca, turismo etc) qué valor social y económico a tomar en cuenta.

13 de noviembre. Guatemala City.

1. Ana Giro (HR-Guatemala): La rugosidad es medida en la técnica AGRRA en la sección de peces, podría considerarse bajar de la base de datos de Healthy Reefs. Para ver un efecto de los huracanes en arrecifes profundos se tendría que tener más datos de mayores profundidades. La precipitación para el caso de Guatemala es importante por la desembocadura de ríos al mar.
2. Luisa Fernández: Considerar a las diferentes especies de coral.
3. María José González (MarFund): A futuro necesitamos información de los huracanes que esté inmediata para el pago del seguro de huracanes.
4. Simon Young (ICRI): Puede estimar con precisión el viento, las olas y la marea de tormenta para cada punto de la tierra o el mar de cualquier huracán histórico, y obtener un dato de lluvia (especialmente en los últimos 30 años). Reunirá algunos ejemplos de lo que está disponible y se discutirá más adelante la manera de obtener los datos de las tormentas, periodos de tiempo de interés.
5. Maricarmen García Rivas (PNAPM CONANP): La precipitación es importante ya que sedimentación que provoca la lluvia puede afectar a organismos, como las langostas.
6. Comité de proyecto- ICRI: Al respecto del análisis de más datos, dependiendo de la cantidad de datos, si fuera necesario se extendería el período de la consultoría, para lo cual se haría una carta de extensión el próximo año. Lo importante, como dijo la representante de ICRI, es contar con datos y análisis robustos para sustentar el modelo piloto del seguro.

## I. LITERATURA CITADA

Álvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Côté, I. M., Watkinson, A. R., & Gill, J. A. (2011). Coral identity underpins architectural complexity on Caribbean reefs. *Ecological Applications*, 21(6), 2223-2231.

Álvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Gill, J. A., Côté, I. M., & Watkinson, A. R. (2009). Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 276(1669), 3019-3025.

Álvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Gill, J. A., Côté, I. M., & Watkinson, A. R. (2009). Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 276(1669), 3019-3025.

Álvarez-Filip, L., Gill, J. A., Dulvy, N. K., Perry, A. L., Watkinson, A. R., & Côté, I. M. (2011). Drivers of region-wide declines in architectural complexity on Caribbean reefs. *Coral Reefs*, 30(4), 1051.

Connell, J. H. (1978). Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science*, 199(4335), 1302-1310.

Côté, I. M., Gill, J. A., Gardner, T. A., & Watkinson, A. R. (2005). Measuring coral reef decline through meta-analyses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 360(1454), 385-395.

Côté, I., Gardner, T., Gill, J., Hutchinson, D., & Watkinson, A. (2006). New approaches to estimating recent ecological changes on coral reefs. In *Coral reef conservation*. Cambridge University Press.

Ferrario, F., Beck, M. W., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C., & Airoidi, L. (2014). The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature communications*, 5, 3794.

Gardner, T. A., Cote, I. M., Gill, J. A., Grant, A., & Watkinson, A. R. (2005). Hurricanes and Caribbean coral reefs: impacts, recovery patterns, and role in long-term decline. *Ecology*, 86(1), 174-184.

Gardner, T. A., Côté, I. M., Gill, J. A., Grant, A., & Watkinson, A. R. (2003). Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*, 301(5635), 958-960.

Graham, N. A. J., & Nash, K. L. (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs*, 32(2), 315-326.

Hughes, T. P. (1994). Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science*, 265(5178), 1547-1551.

Iniciativa, H. R. (2018). Reporte de la Salud Ecológica del Arrecife Mesoamericano. Una Evaluación de la Salud del Ecosistema

InVEST Coastal Vulnerability Model. [http://data.naturalcapitalproject.org/invest-releases/documentation/2.2.0/coastal\\_vulnerability.html](http://data.naturalcapitalproject.org/invest-releases/documentation/2.2.0/coastal_vulnerability.html)

Jackson J. B. C., Donovan M. K., Cramer K. L. & Lam V. V. (editors). (2014) Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970-2012. Global Coral Reef Monitoring Network, IUCN, Gland, Switzerland.

Landsea, C. W. and J. L. Franklin, 2013: Atlantic Hurricane Database Uncertainty and Presentation of a New Database Format. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 3576-3592.

Needham, H.F., and B.D. Keim, 2012: A Storm Surge Database for the U.S. Gulf Coast. *International Journal of Climatology*, 32,14,2108-2123. DOI: 10.1002/joc.2425.

Paddack, M. J., Reynolds, J. D., Aguilar, C., Appeldoorn, R. S., Beets, J., Burkett, E. W., ... & Forrester, G. E. (2009). Recent region-wide declines in Caribbean reef fish abundance. *Current Biology*, 19(7), 590-595.

Porto Tapiquén C. E. (2015). América. Orogénesis Soluciones Geográficas. Porlamar, Basado en capas de Environmental Systems Research Institute (ESRI). Distribución Gratuita. Venezuela. Descargado desde <http://tapiquen-sig.jimdo.com>.

R Development Core Team. 2009. *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <[www.r-project.org](http://www.r-project.org)>

Rohweder J. et al. (2008) Application of Wind Fetch and Wave Models for Habitat Rehabilitation and Enhancement Projects. USGS report. [http://www.umesc.usgs.gov/management/dss/wind\\_fetch\\_wave\\_models.html](http://www.umesc.usgs.gov/management/dss/wind_fetch_wave_models.html)

Spalding, M., Burke, L., Wood, S. A., Ashpole, J., Hutchison, J., & zu Ermgassen, P. (2017). Mapping the global value and distribution of coral reef tourism. *Marine Policy*, 82, 104-113.

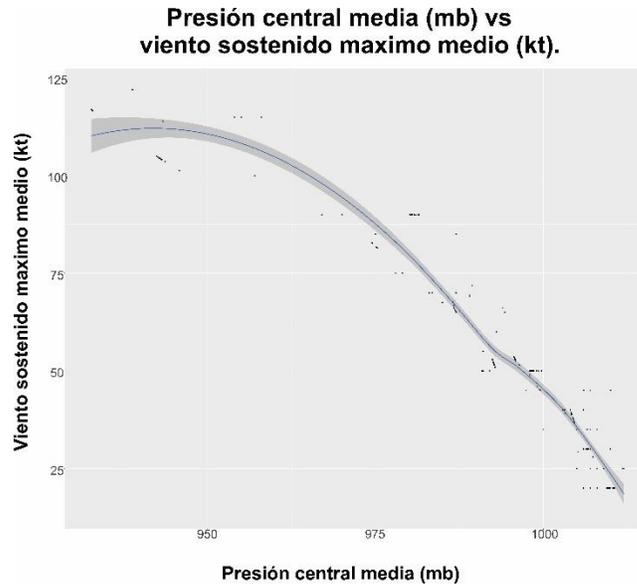
Suchley, A., McField, M. D., & Alvarez-Filip, L. (2016). Rapidly increasing macroalgal cover not related to herbivorous fishes on Mesoamerican reefs. *PeerJ*, 4, e2084.

Taylor, H. T., Ward, B., Willis, M., & Zaleski, W. (2012). The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. <https://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws.pdf>

WWF. 2006. Mejores prácticas de pesca en arrecifes coralinos. Guía para la colecta de información que apoye el Manejo de Pesquerías Basado en Ecosistemas. WWF México/Centroamérica. Pp. 81

## J. ANEXOS

Figura a.



**Figura a.** Presión central media del huracán contra vientos sostenidos máximos medio, muestra alta correlación ( $r = -0.91$ )

**Tabla a.** Citas de los artículos, bases de datos, informe y tesis de licenciatura que se utilizaron para este proyecto.

Artículo (14)
Álvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Côté, I. M., Watkinson, A. R., & Gill, J. A. (2011). Coral identity underpins architectural complexity on Caribbean reefs. <i>Ecological Applications</i> , 21(6), 2223-2231
Aronson, R. B., Sebens, K. P., & Ebersole, J. P. (1994). Hurricane Hugo's impact on Salt River submarine canyon, St. Croix, US Virgin Islands. In Proc Colloquium on Global Aspects of Coral Reefs: Health, Hazards and History. Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, Miami (pp. 189-195).
Beltrán-Torres, A. U., Muñoz-Sánchez, L., & Carricart-Ganivet, J. P. (2003). Effects of hurricane Keith at a patch reef on Banco Chinchorro, Mexican Caribbean. <i>Bulletin of marine science</i> , 73(1), 187-196.
Bythell, J. C., Bythell, M., & Gladfelter, E. H. (1993). Initial results of a long-term coral reef monitoring program: impact of Hurricane Hugo at Buck Island Reef National Monument, St. Croix US Virgin Islands. <i>Journal of Experimental Marine Biology and Ecology</i> , 172(1-2), 171-183.

Edmunds, P. J. (2013). Decadal-scale changes in the community structure of coral reefs of St. John, US Virgin Islands. <i>Marine Ecology Progress Series</i> , 489, 107-123.
Fenner, D. P. (1991). Effects of Hurricane Gilbert on coral reefs, fishes and sponges at Cozumel, Mexico. <i>Bulletin of Marine Science</i> , 48(3), 719-730.
Rogers, C. S. (1992). A matter of scale: damage from Hurricane Hugo (1989) to U.S. Virgin Islands reefs at the colony, community, and whole reef level. <i>Seventh International Coral Reef Symposium</i> , 1(1989), 127–133.
Rogers, C. S., Gilnack, M., & Fitz III, H. C. (1983). Monitoring of coral reefs with linear transects: a study of storm damage. <i>Journal of Experimental Marine Biology and Ecology</i> , 66(3), 285-300.
Rogers, C. S., McLain, L. N., & Tobias, C. R. (1991). Effects of Hurricane Hugo (1989) on a coral reef in St. John, USVI. <i>Marine Ecology Progress Series</i> , 189-199.
Rogers, C. S., Suchanek, T. H., & Pecora, F. A. (1982). Effects of hurricanes David and Frederic (1979) on shallow <i>Acropora palmata</i> reef communities: St. Croix, US Virgin Islands. <i>Bulletin of Marine Science</i> , 32(2), 532-548.
Rousseau, Y., Galzin, R., & Maréchal, J.-P. (2010). Impact of hurricane Dean on coral reef benthic and fish structure of Martinique, French West Indies. <i>Cybium</i> , 34(3), 243–256.
Steneck, R. S. (1993). Is herbivore loss more damaging to reefs than hurricanes? Case studies from two Caribbean reef systems (1978-1988). p. i-viii. In Ginsburg, RN (compiler). <i>Proceedings of the Colloquium on Global Aspects of Coral Reefs: Health, Hazards, and History</i> . Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami, Miami.
Woodley, J. D., Chornesky, E. A., Clifford, P. A., Jackson, J. B. C., Kaufman, L. S., Knowlton, N., ... & Rylaarsdam, K. W. (1981). Hurricane Allen's impact on Jamaican coral reefs. <i>Science</i> , 214(4522), 749-755.
<b>Base de datos (5)</b>
Alvarez Filip L. (datos sin publicar). Base del Sistema de información arrecifal del Caribe (SIAC).
Guest, J.R., Edmunds, P.J., Gates, R.D., Kuffner, I.B., Brown, E.K., Rodgers, K.S., Jokiell, P.L., Ruzicka, R.R., Colella, M.A., Miller, J., Atkinson, A., Feeley, M.W., Rogers, C.S., 2018, Time-series coral-cover data from Hawaii, Florida, Mo'orea, and the Virgin Islands: U.S. Geological Survey data release, <a href="https://doi.org/10.5066/F78W3C7W">https://doi.org/10.5066/F78W3C7W</a> . Accessibility FOIA Privacy Policies and
Linton, Dulcie; Bermuda Institute of Ocean Sciences (2010). A unified, long-term, Caribbean-wide initiative to identify the factors responsible for sustaining mangrove wetland, seagrass meadow, and coral reef productivity, February 1993 - October 1998 (NODC Accession 0000501). Version 1.2. National Oceanographic Data Center, NOAA. Dataset.
AGRRA. 2018. Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA): An online database of AGRRA coral reef survey data. Available: <a href="http://agrra.org">http://agrra.org</a> . (Accessed: Date June 10, 2018).

Meesters E. (datos sin publicar). DUTCH CARIBBEAN Biodiversity database, <a href="http://www.dcbd.nl/monitoring/reef">http://www.dcbd.nl/monitoring/reef</a>
<b>Informe (1)</b>
PNAPM-CONANP. Evaluación de la condición de las comunidades coralinas que se desarrollan en sitios de visita, destinados al uso turístico semi-intensivo, dentro de las Unidades Arrecífales del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. (WILMA). Sin fecha de publicación.
<b>Tesis Licenciatura (1)</b>
Rodríguez-Martínez, R. E. (1993). Efectos de un ciclón en la estructura comunitaria de corales escleractinios. Tesis de Licenciatura. ENEP Iztacala. Universidad Nacional Autónoma México, México. TESIUNAM

**Tabla b.** Lista de huracanes utilizados para este estudio, clave de la NOAA (HURDAT 2 del Atlántico) y el nombre.

1. AL012008	ARTHUR	19. AL062006	ERNESTO	37. AL111989	HUGO
2. AL021996	BERTHA	20. AL062007	FELIX	38. AL111996	KYLE
3. AL022007	BARRY	21. AL062008	FAY	39. AL121994	GORDON
4. AL022013	BARRY	22. AL071998	GEORGES	40. AL121996	LILI
5. AL031993	BRET	23. AL072000	DEBBY	41. AL122005	KATRINA
6. AL031996	CESAR	24. AL072010	EARL	42. AL122013	KAREN
7. AL032010	BONNIE	25. AL072012	HELENE	43. AL131990	KLAUS
8. AL041980	ALLEN	26. AL081994	UNNAMED	44. AL131999	IRENE
9. AL042007	DEAN	27. AL081996	HORTENSE	45. AL132010	KARL
10. AL042008	DOLLY	28. AL082011	HARVEY	46. AL152008	OMAR
11. AL051995	ERIN	29. AL092004	IVAN	47. AL162007	NOEL
12. AL052001	DEAN	30. AL092011	IRENE	48. AL172007	OLGA
13. AL052005	EMILY	31. AL092012	ISAAC	49. AL182010	PAULA
14. AL052011	EMILY	32. AL092014	HANNA	50. AL182011	RINA
15. AL052012	ERNESTO	33. AL101981	DENNIS	51. AL191995	ROXANNE
16. AL052016	EARL	34. AL101994	UNNAMED	52. AL252005	WILMA
17. AL061978	CORA	35. AL102002	ISIDORE		
18. AL061994	DEBBY	36. AL111988	JOAN		