

EFFECTOS DE EVENTOS OCEÁNICOS EXTREMOS EN FORMACIONES CORALINAS DE ISLAS DEL ROSARIO, CARIBE COLOMBIANO

Vega-Sequeda, Johanna^{1,*}, Sven Zea¹ & Gladys Bernal²

¹ Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe, Instituto de Estudios en Ciencias del Mar, CECIMAIR, c/o INVEMAR, Calle 25 2-55, Rodadero Sur, Playa Salguero, Santa Marta, Colombia. ² Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Cra. 80 65-223, Medellín, Colombia. *Autor de correspondencia: johavega@gmail.com

RESUMEN. El incremento en la frecuencia e intensidad de eventos oceánicos extremos limita la capacidad de recuperación de los ecosistemas, amenazando su subsistencia. Con el fin de entender la relación entre la estructura y salud arrecifal y los eventos extremos ambientales, se analizaron series de datos ambientales de las islas del Rosario (e.g., temperatura del mar, caudal y/o salinidad, turbidez), en comparación con cobertura coralina y signos de deterioro (e.g., blanqueamiento, enfermedades). En las series de tiempo de las variables ambientales se calcularon los eventos oceánicos que excedieron un umbral estadístico, estableciendo su intensidad, duración y frecuencia. Para los atributos de la comunidad, se evaluaron dos estaciones del Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia (SIMAC), en dos ventanas temporales (largo plazo, 1998-2013 y corto plazo, 2013 - 2014). Los eventos extremos de temperatura superficial del mar, el caudal de descarga continental y la turbidez asociada fueron las principales variables relacionadas con la reducción de la cobertura coralina. El blanqueamiento masivo de 2005 y otros eventos posteriores dieron como resultado una reducción de la cobertura coralina entre 2004 y 2010. En el corto plazo no se registraron fuertes eventos extremos ni cambios en las formaciones coralinas, si bien el estrés térmico y las reducciones de salinidad en la época de lluvias estuvieron asociados con un ligero blanqueamiento en noviembre de 2014. Aunque los signos de deterioro sean bajos, es importante considerarlos, ya que la sinergia entre perturbaciones continuas puede conllevar a una pérdida de cobertura del coral.

Palabras clave: Arrecifes coralinos, eventos oceánicos extremos, cobertura coralina, signos de deterioro, Caribe colombiano.

Effect of extreme oceanic events in the coral formations of Islas del Rosario, Colombian Caribbean

ABSTRACT. The increase in frequency and intensity of extreme oceanic events limits the capacity of recovery of ecosystems, threatening their subsistence. Thus, in order to understand the relationship between coral health and extreme environmental events, data on sea temperature, runoff and / or salinity, turbidity were analyzed in the Islas del Rosario in comparison with coral cover, and coral signs of deterioration (e.g., bleaching, coral diseases). In the time series of environmental variables, oceanic events that exceeded a statistical threshold were calculated, establishing their intensity, duration and frequency. The attributes of the community were studied through observations in two stations of the National Coral Reef Monitoring System in Colombia (SIMAC), assessed in two time windows (long term, 1998-2013 and short term, 2013-2014). The extreme events of sea surface temperature, river discharge and associated turbidity, were the main variables related to the reduction of coral cover. The massive coral bleaching of 2005 and other subsequent events resulted in a reduction in coral coverage between 2004 and 2010. During the short-term observations there were no strong extreme events or changes in coral formations, although thermal stress and reductions in salinity in the rainy season were associated with a slight bleaching in November 2014. Although the signs of deterioration are low, it is important to consider them, since the synergy between continuous disturbances can lead to a loss of coral cover.

Keywords: Coral reefs, extreme ocean events, coral cover, signs of coral deterioration, Colombian Caribbean.

Vega-Sequeda, J., S. Zea & G. Bernal. 2017. Efectos de eventos oceánicos extremos en formaciones coralinas de Islas del Rosario, Caribe Colombiano. *CICIMAR Oceánides*, 32(1): 25-38.

INTRODUCCIÓN

Los eventos oceánicos extremos son aquellos en que las condiciones meteorológicas y oceanográficas exceden los niveles normales, son difícilmente predecibles y producen un impacto sobre los ecosistemas marinos y costeros (Smith, 2011; Denny & Gaylord, 2010; GBRMPA, 2011; Crabbe, 2012). A nivel mundial se ha detectado un incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos en asocio con el cambio climático global (Wilkinson & Souter, 2008; Jentsch & Beierkuhnlein, 2008; Wernerberg *et al.*, 2013). Según la frecuencia, intensidad y duración de los eventos, el ecosistema puede estar adaptado y tener una alta capacidad de resiliencia, o

puede iniciar un cambio irreversible y dar paso a una nueva composición y estructura (Pickett & White, 1985).

El arrecife de coral es uno de los ecosistemas más sensibles frente a cambios en el sistema climático. Por ejemplo, es afectado por eventos extremos de altas temperaturas, una de las principales causas del blanqueamiento coralino (Marshall & Schuttenberg, 2006; Wilkinson & Souter, 2008) y del incremento en la prevalencia de enfermedades coralinas (Raymundo *et al.*, 2008; Sutherland *et al.*, 2004). Asimismo, los ciclones, huracanes y mares de leva provocan daños físicos en los corales y en el andamiaje arrecifal (Wilkinson & Souter, 2008; GBRM-

PA, 2011).

Las formaciones coralinas del Caribe colombiano han estado sometidas históricamente a eventos oceánicos extremos. Colombia tiene arrecifes coralinos en las costas continentales y en áreas oceánicas en el archipiélago de San Andrés y Providencia, en el Caribe suroccidental (Díaz *et al.*, 2000). Las altas temperaturas del mar han generado varios eventos de blanqueamiento coralino, tanto en el continente (islas del Rosario y San Bernardo, Parque Nacional Natural Tayrona en Santa Marta, y La Guajira), como en San Andrés, siendo los de 2005 y 2010 los más severos en los últimos 25 años (Alvarado *et al.*, 1986; Zea & Duque-Tobón, 1989; Solano, 1994; Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2008; Vega-Sequeda *et al.*, 2011; Bayraktarov *et al.*, 2013; Romero-Rodríguez *et al.*, 2014). El Impacto directo de huracanes ha ocurrido principalmente en el Archipiélago de San Andrés (Garzón-Ferreira & Díaz, 2003; Taylor *et al.*, 2007; Rodríguez-Ramírez & Reyes-Nivia, 2008). Los arrecifes continentales también han sido afectados indirectamente por el fuerte oleaje junto con las descargas continentales producto de las fuertes lluvias. Este fenómeno ha sido principalmente reportado en los arrecifes de las islas del Rosario (López-Victoria & Zea, 2004; Restrepo & Alvarado, 2011) y del Parque Nacional Natural Tayrona (Rodríguez-Ramírez & Garzón-Ferreira, 2003; Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2008).

Desde la perspectiva del manejo y ante los escenarios de cambio climático, es importante entender la respuesta de los ecosistemas ante las perturbaciones y detectar los cambios en su estado. En Colombia existe un Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos (SIMAC) que realiza desde 1998 un monitoreo anual de atributos relevantes de la comunidad, como cobertura del sustrato, salud coralina, riqueza y abundancia de peces y abundancia de invertebrados ágiles y octocorales (Garzón-Ferreira *et al.*, 2002). Sin embargo, esta información no ha sido analizada desde el punto de vista de la ocurrencia de eventos ambientales extremos. Por tal motivo, esta investigación evaluó la ocurrencia de los eventos oceánicos extremos en las formaciones coralinas de las islas del Rosario, Caribe colombiano y sus posibles efectos sobre atributos de la comunidad (cobertura del sustrato, salud coralina). Se analizaron los cambios de la estructura y salud coralina de dos estaciones de monitoreo, relacionándolos con eventos extremos de variables ambientales en dos ventanas temporales; una con resolución anual entre 1998 y 2013, y otra con resolución trimestral entre 2013-2014.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El archipiélago de las islas del Rosario está ubicado al suroccidente de la ciudad de Cartagena, un importante centro turístico y portuario del Cari-

be colombiano (Díaz *et al.*, 2000). Las islas hacen parte del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo (PNNCRSB) y del Área Marina Protegida Corales del Rosario, San Bernardo e Isla Fuerte (Figura 1). El clima de la región es tropical, con una época seca (diciembre-abril) con mayor influencia de los vientos alisios del NE, un ligero descenso de la temperatura del agua (27 °C) y un incremento en la acción oleaje; así como una época de lluvias (mayo-noviembre), cuando los vientos alisios se debilitan, el agua es más cálida (29 °C), las lluvias son frecuentes, y llegan las descargas del Canal del Dique, un brazo artificial del río Magdalena, que incrementan la turbidez (Alvarado *et al.*, 1986; Cendales *et al.*, 2002; Díaz-Pulido & Garzón-Ferreira, 2002; Restrepo *et al.*, 2016).

El arrecife de coral de las islas del Rosario ha sufrido fuertes impactos antropogénicos desde la década de 1980. Estos se han atribuido a enfermedades epizooticas coralinas, sedimentación y turbidez provenientes del Canal del Dique, pesca con dinamita y sobrepesca, desarrollo costero, turismo incontrolado, construcción en las islas, y vertimiento de aguas residuales (Alvarado *et al.*, 1986; Díaz *et al.*, 2000; Restrepo & Alvarado, 2011).

En las islas del Rosario hay tres estaciones del SIMAC pero solo dos contienen información de largo plazo: Tesoro y Pavitos (Figura 1). Isla Tesoro es una zona intangible. Tanto las estaciones de profundidad somera (5-6 m) como media (9-12 m), están conformadas principalmente por especies de coral de tipo masivo, siendo los taxa *Orbicella* spp. y *Diploria labyrinthiformis* (Linnaeus 1758) las más abundantes. Isla Pavitos está conformada principalmente por especies de coral de tipo foliáceo, siendo *Agaricia tenuifolia* (Dana 1848) la especie predominante en ambas profundidades, pero también pueden observarse algunas colonias de *Orbicella annularis* (Ellis & Solander 1786) y *O. faveolata* (Ellis & Solander 1786) (Garzón-Ferreira *et al.*, 2002). Ambas estaciones están protegidas del oleaje predominante del noreste generado por los vientos alisios, aunque están expuestas a fuertes oleajes esporádicos del sur y occidente durante las tormentas en la época de lluvias, en la temporada de huracanes, o por mares de leva (Bernal *et al.*, 2016).

Fuentes de datos ambientales

Se obtuvieron datos históricos de variables ambientales que pueden afectar los atributos de la comunidad coralina, a partir de bases de datos satelitales y de re-análisis indicadas en la Tabla 1. La información del caudal del Canal del Dique (m³/s) se tomó como medida indirecta del flujo de agua dulce hacia los arrecifes (salinidad) y el coeficiente de atenuación difusa a 490 nm (Kd490) como una medida de turbidez. La serie del índice Degree Heating Weeks (DHW) calcula el tiempo (en semanas) del efecto acumulativo del incremento de la temperatura, tomando como referencia el “Umbral de To-

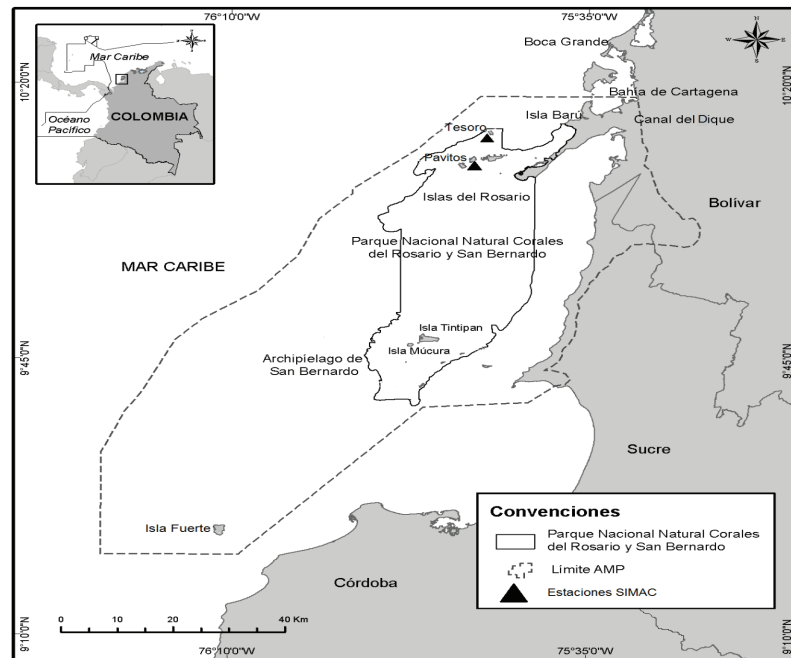


Figura 1. Ubicación de las estaciones de monitoreo SIMAC en las islas de Tesoro y Pavitos en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo.

lerancia” al blanqueamiento para el PNNCRSB de 29,4 °C (NOAA Coral Reef Watch, 2013). Un DHW superior a cuatro semanas ha demostrado un blanqueamiento coralino significativo y valores por encima de ocho semanas han causado blanqueamiento masivo y mortalidad asociada (Liu *et al.*, 2005).

Adicionalmente, entre 2013 y 2014 se midieron *in situ* la temperatura del mar y la salinidad. Para ello, en la estación somera de isla Tesoro se instaló un sensor electrónico HOBO® (Onset Computer Corporation, EUA) Pendant 8K UA-002-08 de temperatura con exactitud de $\pm 0,47$ °C a 25 °C y un sensor electrónico Sea Star DST-CT (Star Oddi Ltd., Islandia) de salinidad con un intervalo de conductividad de 13-63 mS/cm y una exactitud de ± 1 unidades de salinidad. Cada dispositivo fue programado para almacenar datos cada hora. Se midió la tasa de sedimentación a partir de trampas de 2 pulgadas de diámetro y 30 cm de altura, siguiendo el protocolo de Garzón-Ferreira *et al.* (2002). Se ubicaron dos trampas en cada una de las estaciones de SIMAC evaluadas. Las trampas fueron retiradas y reemplazadas en cinco campañas de campo (noviembre, 2013, febrero, 2014, mayo, 2014, agosto, 2014 y noviembre, 2014).

Fuentes de datos de atributos de la comunidad

Se utilizaron los datos anuales generados por el SIMAC (INVEMAR, 2014) en sus estaciones de las islas Tesoro y Pavitos (Figura 1) de profundidad somera (5-6 m) y media (9-12 m). Cada estación cuenta con cinco transectos permanentemente marcados,

de 10 m de longitud, donde se registraron anualmente la cobertura del bentos arrecifal mediante el método de cadena, y la salud coralina en bandas de 10 m x 2 m (Garzón-Ferreira *et al.*, 2002). El monitoreo no se realizó en los años 2000, 2005 y 2007.

En los mismos transectos permanentes de las estaciones SIMAC de Tesoro y Pavitos, se evaluó cada tres meses la cobertura coralina por el método punto intercepto en transecto (Dodge *et al.*, 1982; Hill & Wilkinson, 2004) en las cinco campañas de campo indicadas anteriormente. Se extendió una cinta métrica observando cada 10 cm el componente del sustrato que estaba debajo. Solo se anotaron los puntos donde los corales estaban presentes, siendo identificados hasta especie. Se estableció la frecuencia de signos de deterioro en cinco bandas de 10 m x 2 m, donde se contaron y anotaron todas las colonias coralinas mayores a 5 cm, sanas, y las afectadas por enfermedades, blanqueamiento, palidamiento, volcamiento, fragmentación e invasión (recubrimiento del tejido vivo por organismos). La identificación en campo de blanqueamiento fue definida por la pérdida de color del tejido coralino en la colonia (Marshall & Schuttenberg, 2006); el volcamiento se registró como la inversión, inclinación o desprendimiento de una colonia y la fragmentación como la ruptura de la colonia coralina en una o varias partes.

Análisis de la información

Las frecuencias de las variables ambientales obtenidas de bases de datos se usaron tal como están

Tabla 1. Fuente de datos históricos y resolución de las variables ambientales obtenidas de bases de datos desde enero de 1998 hasta diciembre de 2014. Kd490: coeficiente de atenuación difusa a 490 nm, TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission, NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer, MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Variable	Fuente	Resolución espacial	Resolución temporal	Página web
Precipitación (mm)	TRMM 3B42 v.7	0,25°	Cada 6 h (1998-2014)	http://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/trmm_3b42_3hour.php
	ERA-INTERIM (re-análisis)	0,25°	Cada 6 h (1998-2013)	http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/
Altura de ola (m)	Modelación numérica, Grupo Oceánicos Universidad Nacional, Sede Medellín	-	Cada hora (2013-2014)	-
Temperatura (°C)	NOAA AVHRR v.2 (interpolación óptima)	0,25°	Diaria (1998-2013)	http://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/oisst_avhrr.php
		50 km	Dos veces a la semana (2001-2013)	http://www.ospo.noaa.gov/data/cb/TS_vs/vs_ts_San-Bernardo_Colombia.txt
Degree Heating Weeks (DHW)	NOAA Coral Reef Watch	5 km	Diaria (2013-2014)	http://coralreefwatch.noaa.gov/vs/data/colombia_atlantic.txt
		4 km	Semanal (2002-2013)	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3
Kd490 (m ⁻¹)	Aqua MODIS	4 km	Semanal (2002-2013)	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3
Caudal canal del Dique (m ³ /s)	IDEAM (estación Santa Helena 2)	-	Diaria (1998-2013)	www.ideam.gov.co

indicadas en la Tabla 1. Adicionalmente, se calculó el valor acumulado diario de la precipitación, y para el oleaje se analizaron por separado la altura de ola proveniente de los dos cuadrantes del norte y del sur, ya que el oleaje que pasa directamente sobre los arrecifes estudiados es el del sur. Para las variables ambientales de corto plazo medidas *in situ* se usó el promedio diario de los sensores de temperatura de fondo y salinidad. Para esta última variable se eliminó la información de 203 días entre el 5 de diciembre de 2013 y el 14 de agosto de 2014, debido a una descalibración del dispositivo por la alta colonización de algas. Por lo tanto, la información de salinidad debe ser tomada con cautela. Para la tasa de sedimentación (TS) se empleó la fórmula descrita en Garzón-Ferrerira *et al.* (2002), donde $TS (mg/cm^2/día) = (\text{peso del sedimento (g)/1000 mg}) * (1/ \text{área de la boca de la trampa}) * (1/\text{No. días})$.

Para establecer la ocurrencia de eventos oceánicos extremos se calculó el percentil 95 para las variables oceanográficas, el percentil 99 para las variables atmosféricas y oleaje y el percentil 5 para la salinidad. Para cada intervalo entre los monitoreos del SIMAC se determinó el número de eventos extremos (frecuencia), el valor máximo (intensidad), y el número máximo de días seguidos (duración) en que las variables registraron valores extremos. Este mismo proceso se hizo en el corto plazo en el periodo entre cada campaña de campo.

Se tomaron los datos de SIMAC de cobertura coralina total (% del fondo) por transecto para cada

momento de muestreo, calculados a partir del número de eslabones de cadena recubriendo los corales, relativo al total de eslabones del transecto. Para las mediciones trimestrales, la cobertura coralina total (% del fondo) se calculó a partir del número de puntos del transecto en relación con el total de puntos. Para los signos de deterioro se calculó su frecuencia en porcentaje por transecto, relativa al total de colonias presentes en el transecto de banda. Para los atributos de la comunidad se calcularon el promedio, error estándar y coeficiente de variación, por estación, a partir de los valores por transecto.

Para relacionar los cambios de la cobertura de coral entre monitoreos con las variables ambientales, se realizaron análisis de componentes principales (ACP) con el programa R, donde previamente se estandarizó toda la información. Para este análisis se incluyó el cambio de la cobertura de coral (pérdida o ganancia con respecto al monitoreo anterior), la frecuencia de signos de deterioro coralino y las variables descriptoras de eventos extremos (frecuencia por mes, intensidad, máximas duraciones) para el intervalo entre muestreos. Se realizaron dos ACP separados, uno con datos desde 1998 a 2013 que excluyó el coeficiente de atenuación difusa a 490 nm (Kd490), y otro de 2002 a 2013 donde sí se incluyó. Para el corto plazo no fue posible aplicar un método estadístico, debido a la breve longitud de la serie y a la escases de eventos extremos. Por lo tanto, se hizo un análisis descriptivo de los cambios en la cobertura de coral en cada estación y su posible relación con

los signos de deterioro y las variables ambientales.

RESULTADOS

Evaluación histórica (1998-2013)

En la figura 2 se muestran las series de tiempo de las variables ambientales y sus umbrales extremos. Se definieron como eventos extremos todos los que superaron el umbral. La tabla 2 resume los eventos extremos de cada variable que ocurrieron entre cada monitoreo del arrecife (frecuencia, intensidad y duración). La mayoría de los eventos extremos se presentaron en la estación lluviosa (mayo a noviembre). Solo los eventos de oleaje provenientes del norte fueron extremos en la época seca (diciembre a abril).

La temperatura superficial del mar (TSM) y el coeficiente de atenuación Kd490 registraron mayores valores extremos entre el periodo de febrero de 2006 y agosto de 2008 (en este periodo ocurrieron un evento El Niño y uno La Niña moderados). En 1998 y 2002 se registró un mayor número de eventos de alta TSM (eventos El Niño). Los eventos extremos más críticos de la precipitación y del caudal del Canal del Dique se presentaron entre agosto de 2010 y mayo de 2011 (eventos La Niña). Otros periodos con eventos significativos de caudal – precipitación fueron del 2006 al 2008 (El Niño – La Niña moderados) y agosto 2008 – mayo 2009 (condiciones normales). Teniendo en cuenta los valores del DHW, estudios anteriores y los resultados de atributos de la comunidad, el año en que se presentó un blanqueamiento masivo fue en 2005 y los años en que se presentó un blanqueamiento significativo fueron 2010 y 2013.

Por su parte, el oleaje proveniente del sur registró mayores valores extremos entre octubre de 2012 y diciembre de 2013, mientras que para la altura de la ola proveniente del norte lo fue en el periodo entre agosto de 2008 y mayo de 2009 (Figura 2, Tabla 2). Sin embargo, no hay signos en los datos de los atributos de la comunidad que indiquen que estos oleajes pudieran haber afectado al ecosistema.

En la figura 3 se presentan las series de cobertura, blanqueamiento y enfermedades para todas las estaciones. En cuanto a la cobertura coralina, la estación de Tesoro somero es la que históricamente presentó los mayores valores, (promedio 45 %); la estación media de Tesoro presentó una cobertura cercana al 25 %, mientras que en la estación de Pavitos los corales cubren cerca del 30 % del sustrato en ambas profundidades. En general, se observó un descenso en la cobertura coralina entre el monitoreo de diciembre de 2004 y agosto de 2010 en las estaciones someras (11 %) y entre febrero de 2006 y agosto de 2008 en Tesoro medio (5.6 %). En el caso de Pavitos medio, se registró la mayor pérdida de cobertura de coral (17.7 %) entre diciembre 2001 y mayo de 2009, y posteriormente se observó un des-

censo más leve entre el monitoreo de agosto de 2010 y mayo de 2011 (5,0 %). Las especies más afectadas en Tesoro fueron *Orbicella* spp. y *D. labyrinthiformis* y en Pavitos fueron *A. tenuifolia* y en menor medida *O. franksi* y *O. faveolata*. No obstante, todas las estaciones incrementaron su cobertura a partir de octubre de 2012, entre 4.2 % y 10.5 %, especialmente en Pavitos. En cuanto a la salud coralina, el blanqueamiento fue el signo de mayor frecuencia, especialmente en el monitoreo entre diciembre 2004 y febrero de 2006.

Las relaciones entre los cambios de cobertura y la ocurrencia de los eventos ambientales y signos de deterioro coralino, se estudiaron a través de los ACP. El primer análisis, tomando información entre 1998 y 2013 y sin incluir Kd490, mostró que, excepto en Pavitos medio, los valores extremos de TSM y caudal del Canal del Dique estuvieron fuertemente asociados con la reducción de la cobertura de coral (Figura 4). Adicionalmente, en las estaciones someras estas variables estuvieron también asociadas con el incremento del blanqueamiento. Por su parte, en Pavitos medio el decremento de cobertura se asoció solo con mayores caudales. En el ACP realizado para datos entre 2002 y 2013, incluyendo el Kd490, en todas las estaciones la pérdida de la cobertura de coral estuvo asociada con mayores atenuaciones de la luz y mayores temperaturas, ambas relacionadas con los incrementos del caudal (Figura 5).

Evaluación a corto plazo (noviembre, 2013 – noviembre, 2014)

La tabla 3 presenta el resumen de los eventos extremos (frecuencia, intensidad y duración) entre cada monitoreo hecho *in situ* en el arrecife. Se utilizaron los mismos umbrales de las series más largas, excepto para salinidad. Para la temperatura y salinidad del fondo y la precipitación, se registraron los mayores eventos extremos en el periodo agosto-noviembre de 2014. Teniendo en cuenta los valores del DHW con nuestros resultados, se presentó un blanqueamiento, aunque no fue significativo, en noviembre de 2013 y noviembre de 2014. No se registraron eventos extremos de sedimentación por encima de 10 mg/cm²/día, que ejercerían un impacto negativo sobre los corales (Rogers, 1990), así como no se registraron por eventos de oleaje.

En cuanto a la cobertura de coral, los valores del muestreo *in situ* fueron mayores a los estimados en los monitoreos de SIMAC (comparar Figura 3 con Figura 6), ya que se emplearon técnicas diferentes. Empero, el objetivo del estudio, más que comparar con los datos previos, era el de obtener una referencia de un posible cambio en el corto plazo. En este sentido, la cobertura varió poco entre muestreos, ya que se registraron coeficientes de variación inferiores al 7.6 % (Figura 6). Sin embargo, en Tesoro somero se registró una reducción en la cobertura de coral del 5.2 % entre febrero y mayo de 2014. En

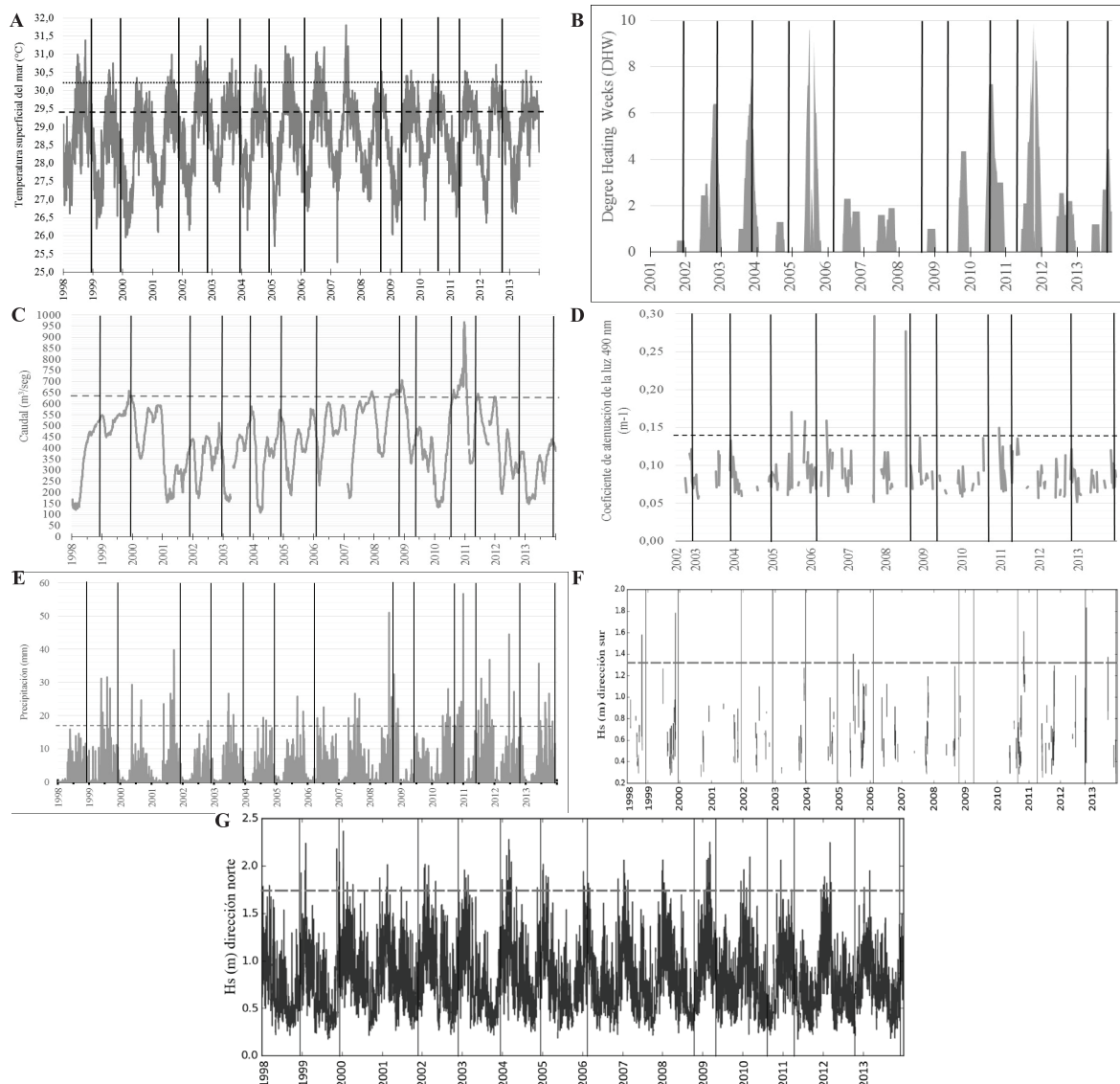


Figura 2. Series ambientales históricas entre 1998 y 2013 asociadas a eventos oceánicos extremos obtenidas de bases de datos. La línea punteada muestra el umbral anómalo. Las líneas verticales indican el momento en que fue realizado el monitoreo SIMAC. A. Temperatura superficial del mar ($^{\circ}\text{C}$) diaria. La línea punteada corta muestra el umbral de extremos. La línea punteada larga muestra el umbral de tolerancia al blanqueamiento de la NOAA ($29,4^{\circ}\text{C}$). B. Índice DHW entre 2001 y 2013. C. Caudal diario (m^3/s) del Canal del Dique. D. Coeficiente de atenuación difusa a 490 nm (m^{-1}) semanal entre 2002 y 2013. E. Precipitación acumulada (mm) cada 6 h. F. Altura significativa de la ola (H_s en m) cada 6 h provenientes de los cuadrantes sur. G. Altura significativa de la ola (H_s en m) cada 6 h proveniente de los cuadrantes norte (panel inferior).

relación con la salud coralina, se presentaron cinco signos de deterioro, blanqueamiento, enfermedades, palidamiento, invasión y volcamiento, siendo el primer signo el de mayor afección, especialmente en noviembre de 2014 en todas las estaciones. Sin embargo, en Tesoro somero las enfermedades fueron el signo de mayor afección, con un aumento paulatino en su frecuencia a partir de febrero de 2014 (de $2.3 \pm 1.3\%$ en febrero de 2014 a $3.9 \pm 1.7\%$ en noviembre de 2014), seguido del blanqueamiento (Figura 6).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se interpretaron teniendo en cuenta el conocimiento sobre la causalidad de los signos de deterioro coralino establecida por estudios anteriores (e.g. Coles & Brown, 2003; Marshall & Schuttenberg, 2006; Raymundo *et al.*, 2008; Wilkinson & Souter, 2008; Crabbe, 2012). Asimismo, las variables ambientales y los atributos comunitarios se consideraron representativos del lugar, independientemente de las escalas espaciales.

Tabla 2. Número de eventos extremos al mes (No), valor máximo o intensidad (I) y número máximo de días/semanas seguidos o duración (D) de las variables ambientales, teniendo en cuenta los periodos del monitoreo SIMAC, el percentil 95 o P95 (variables oceanográficas) y 99 o P99 (atmosféricas y oleaje). DHW: *Degree Heating Weeks*.

Periodo entre monitoreos	Temperatura (P95=30,2 °C)		DHW (semanas)		Caudal (P95=639 m ³ /s)		Precipitación (P99=17,04 mm)		Altura ola dirección sur (P99=1,32 m)		Altura ola dirección Norte (P99=1,61 m)		Coeficiente de atenuación difusa a 490 nm (P99=0,14 m ⁻¹)		
	No	I	D	I	No	I	D	No	I	D	No	I	D	No	I
1 ene - 18 dic 1998	1,00	31,38	4	-	0	0	0	0	0,08	1,58	1	0,58	1,93	1	-
19 dic 1998 - 7 dic 1999	0,33	30,75	7	-	0,08	660,3	6	0,33	31,62	1	0,08	1,78	1	0,50	2,24
8 dic 1999 - 7 dic 2001	0,33	30,99	3	0,5	0	0	0	0,33	39,87	1	0,04	1,34	1	0,75	2,37
8 dic 2001 - 12 dic 2002	0,92	31,23	7	6,4	0	0	0	0,08	18,47	1	0,00	0	0	1,17	2,02
13 dic 2002 - 3 dic 2003	0,33	30,88	4	7,5	0	0	0	0,33	26,66	1	0,00	0	0	1,08	1,96
4 dic 2003 - 7 dic 2004	0,42	30,7	5	3,7	0	0	0	0,17	19,43	1	0,00	0	0	1,33	2,28
8 dic 2004 - 6 feb 2006	0,46	31,22	8	9,6	0	0	0	0,15	25,8	1	0,08	1,4	1	0,92	2,02
7 feb 2006 - 30 ago 2008	0,55	31,80	10	2,3	0,13	657,3	23	0,26	51,09	1	0,00	0	0	0,74	2,06
31 ago 2008 - 21 may 2009	0,33	30,52	5	1,0	0,22	706,8	53	0,56	32,43	1	0,00	0	0	1,56	2,25
22 may 2009 - 10 ago 2010	0,40	30,55	5	7,25	0	0	0	0,33	28,04	1	0,00	0	0	0,53	2,1
11 ago 2010 - 10 may 2011	0,20	30,44	2	6,05	0,50	970,1	91	0,60	56,72	1	0,10	1,61	3	0,50	1,75
11 may 2011 - 21 oct 2012	0,42	30,71	3	9,9	0	0	0	0,33	44,54	1	0,00	0	0	1,08	2,25
22 oct 2012 - 3 dic 2013	0,29	30,55	3	4,45	0	0	0	0,50	35,71	1	0,14	1,83	2	0,14	1,78

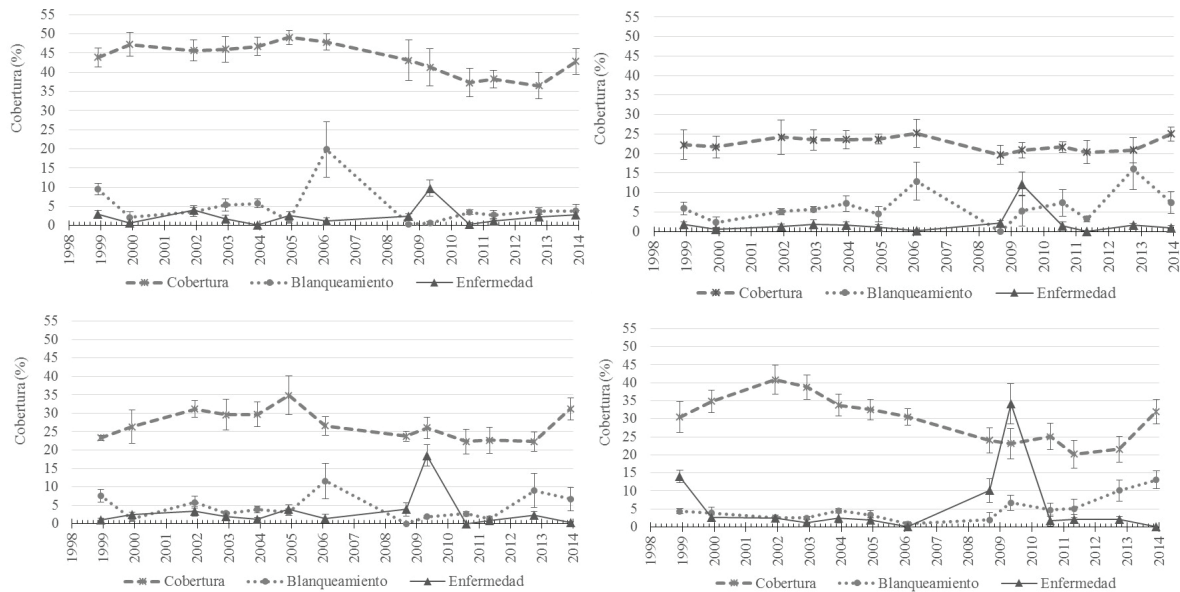


Figura 3. Cobertura de coral y frecuencia de enfermedades y blanqueamiento (% ± 1 error estándar) obtenida de las bases de datos del SIMAC durante sus monitoreos entre 1998 y 2013 en las islas del Rosario (INVEMAR, 2014). A. Tesoro somero. B. Tesoro medio. C. Pavitos somero. D. Pavitos medio. Para los intervalos de profundidad ver el texto.

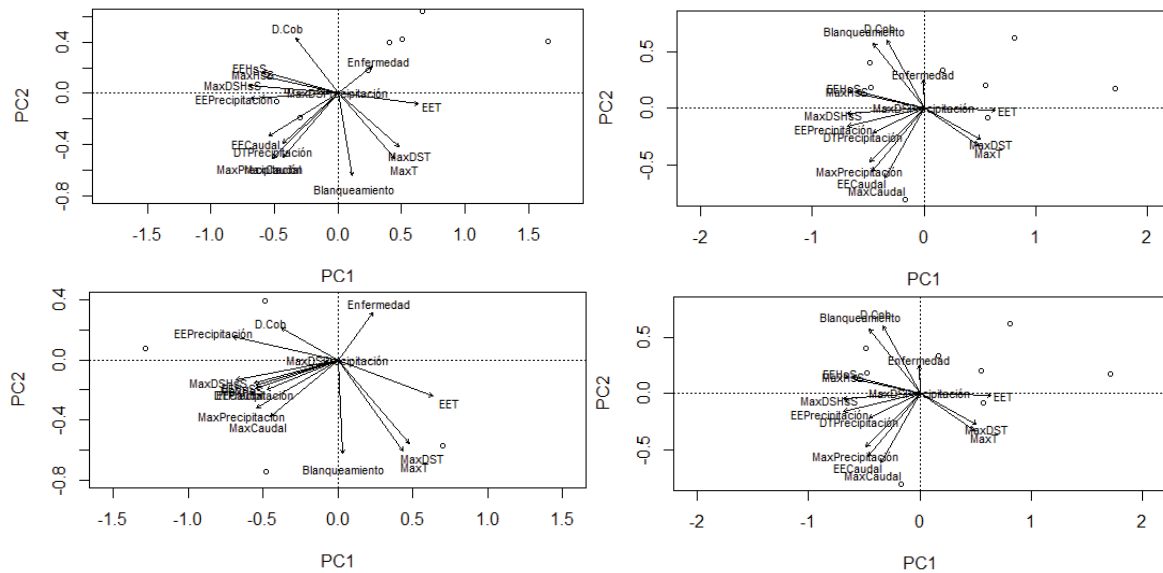


Figura 4. Análisis de componentes principales con la información biológica y ambiental entre 1998 y 2013. Gráfica doble; los puntos representan los valores combinados de las variables en los momentos de monitoreo y las flechas de los vectores propios de las variables incluidas en el análisis; el inicio del vector representa el promedio global y la dirección representa el aumento; la longitud representa la magnitud del cambio. D.cob: cambio de cobertura de coral. T: temperatura. EE: número de eventos extremos. Hs: altura de la ola dirección cuadrantes sur. MaxDS: número máximo de días seguidos. DT: número de días totales. Este análisis no incluye el coeficiente de atenuación a 490 nm. A. Tesoro somero. B. Tesoro medio. C. Pavitos somero. D. Pavitos medio.

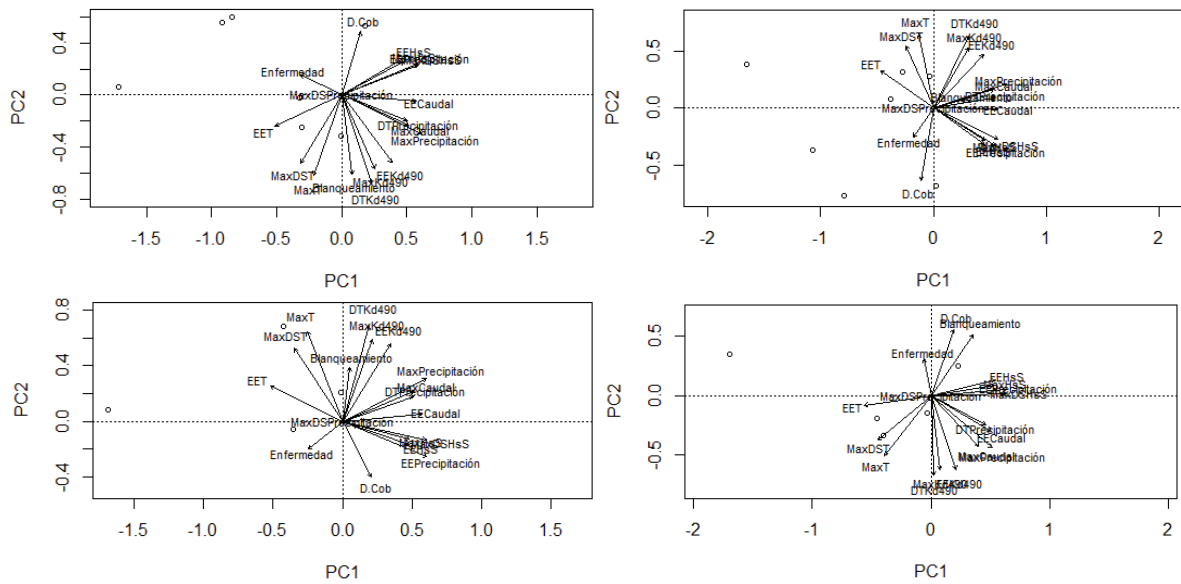


Figura 5. Análisis de componentes principales con la información biológica y ambiental entre 2002 y 2013, incluyendo el coeficiente de atenuación a 490 nm. Para la explicación de la gráfica ver Figura 3. D.cob: cambio de cobertura de coral. T: temperatura. EE: número de eventos extremos. Hs: altura de la ola dirección cuadrantes sur. MaxDS: número máximo de días seguidos. DT: número de días totales. A. Tesoro somero. B. Tesoro medio. C. Pavitos somero. D. Pavitos medio.

La mayoría de los eventos extremos detectados en las series ambientales ocurrieron en la estación lluviosa, cuando se presenta un incremento de temperatura, precipitación y turbidez (Leblé & Luignon, 1987; Díaz-Pulido & Garzón-Ferreira, 2002; Bernal *et al.*, 2006, Romero-Rodríguez *et al.*, 2014). Entre 1998 y 2013, los resultados del ACP mostraron que los eventos extremos de TSM, caudal del Canal del Dique y Kd490 estuvieron asociados con la reducción de la cobertura de coral de las islas del Rosario, sumado al blanqueamiento en las estaciones someras. De hecho, las mayores afectaciones ocurrieron cuando hubo combinación y/o sucesión de eventos extremos, cuyos efectos acumulados prolongados incrementan el deterioro y llevan a una recuperación más lenta del ecosistema arrecifal (Pickett & White, 1985; Scheffer & Carpenter, 2003; Restrepo & Alvarado, 2011).

Durante el periodo de estudio, el blanqueamiento masivo más severo en el Gran Caribe ocurrió en 2005 (Wilkinson & Souter, 2008), el cual redujo la cobertura coralina en varios sitios. En las islas del Rosario se evidenció principalmente en los primeros 10 m de profundidad y con una mortalidad coralina asociada hasta de un 8 % (Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2008). En las series analizadas, la pérdida de cobertura coralina entre las mediciones de 2004 y 2010 puede ser efecto de este evento que se evidenció en la frecuencia del blanqueamiento medida en febrero de 2006. Así, el blanqueamiento tiene un papel en la pérdida de cobertura coralina, lo cual es preocupante ya que se espera un incremento de estos eventos masivos, tanto en magnitud como en extensión (Mars-hall & Schuttenberg, 2006).

Entre febrero de 2006 y agosto de 2008, se presentó una combinación de eventos extremos de TSM, Kd490 y caudal. La interacción de las altas temperaturas con otras variables fisicoquímicas es una de las principales causantes del estrés coralino (Coles & Brown, 2003). Varias investigaciones han sugerido que gran parte del proceso de degradación de las formaciones coralinas de las islas del Rosario es debido a las descargas del Canal del Dique (Leblé & Cuignon, 1987; Díaz *et al.*, 2000; Cendales *et al.*, 2002; Restrepo & Alvarado, 2011; Restrepo *et al.*, 2016). Este arrecife está expuesto a niveles altos de turbidez entre el 19.6 % y 47.8 % del tiempo (Restrepo *et al.*, 2016). Según esto, esta sinergia que generan las descargas continentales puede ocasionar una perturbación aún mayor y reducir la capacidad y velocidad de recuperación del ecosistema. Sin embargo, los impactos del fenómeno La Niña de 2010, que trajo consigo fuertes eventos extremos de caudal y precipitación, y que además superó la cota de desbordamiento del Canal del Dique (Euscátegui & Hurtado, 2011; IDEAM, 2011), estuvieron relacionados con tan sólo una leve reducción de cobertura de coral de 5 % en Pavitos medio.

La pérdida de cobertura coralina registrada en todas las estaciones desde 2004, comenzó en Pavitos medio desde diciembre de 2001. Factores de perturbación humana (contaminación, descargas del Canal del Dique, anclaje de embarcaciones, vertimiento de aguas residuales, entre otros) pueden tener una mayor influencia en la mortalidad coralina en dicha estación debido a su mayor cercanía a los asentamientos humanos.

Tabla 3. Número total de eventos extremos (EE), valor máximo (Máx), días totales no seguidos (Días Total) y número máximo de días seguidos (Máx Días) de todas las variables ambientales evaluadas, teniendo en cuenta los periodos en que fue realizado el monitoreo entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014 y el percentil 5 (salinidad), 95 histórico (variables oceanográficas) y 99 histórico (atmosféricas y oleaje). DHW: *Degree Heating Weeks*. Hs N: altura de la ola dirección norte. Hs S: altura de la ola dirección sur. Sedimentos: tasa de sedimentación. SOM: estación a profundidad somera. MED: estación a profundidad media.

Periodo	Temperatura (p95=30,2 °C)			DHW (semanas)		Salinidad (P5=31,4)			Precipitación (p99=17,04 mm)			Tesorero			Pavitos								
	EE	Max	Días Total	Max	Máx valor	EE	Min	Días Total	Max	EE	Max	Días Total	Max	Hs N	Max	Hs S	SOM	Max	Hs N	Max	Hs S	SOM	MED
19 nov-13-8 feb/14	0	30,09	0	0	9,3	0	32,63	0	0	0	0	0	0,69	0,37	1,91	0,95	0,90	0	0,41	0,25			
9 feb-7 may/14	0	29,27	0	0	1,8	0	32,04	0	0	0	0	0	0,79	0	1,17	0,67	0,99	0	0,31	0,28			
8 may-12 ago/14	2	30,46	3	2	10,0	1	30,92	1	1	1	1	1	0,68	0,46	0,95	0,79	0,91	0,51	0,60	0,21			
13 ago-22 nov/14	9	30,75	41	14	9,7	5	30,94	9	2	1	29,98	1	1	0,76	0,58	2,43	0,98	0,78	0,43	0,57	0,26		

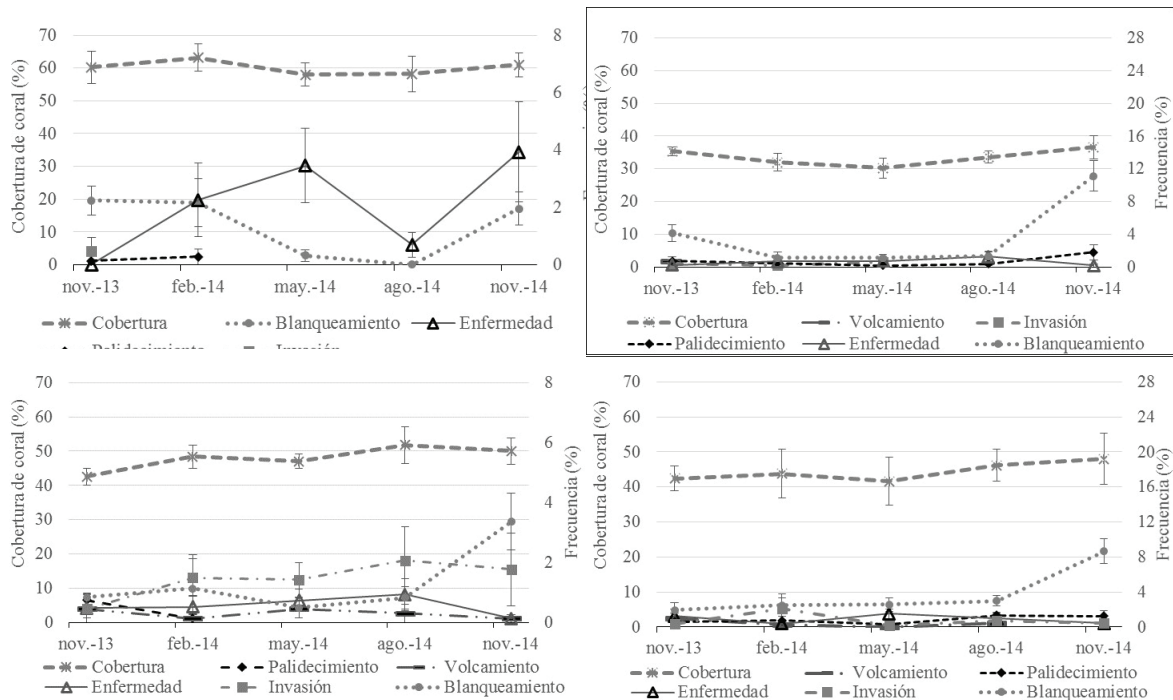


Figura 6. Cobertura de coral y de frecuencia de los signos de deterioro coralino (± 1 error estándar) registrados en las estaciones evaluadas trimestralmente entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014. A. Tesoro somero. B. Tesoro medio. C. Pavitos somero. D. Pavitos medio. Los signos de deterioro están en el eje Y secundario.

De otro lado, es inusual que en tan poco tiempo se haya presentado un incremento de la cobertura de coral en todas las estaciones, de hasta un 10.5 % entre octubre de 2012 y diciembre de 2013, debido al lento crecimiento del coral, el cual es de unos milímetros por año (Hubbard & Scaturro, 1985). Este aumento, al parecer, se debe en gran medida a un artificio, *i.e.*, el cambio de investigadores en el monitoreo de 2013. Sin embargo, en el caso de Pavitos podría haber una contribución por el crecimiento de las colonias adultas de *A. tenuifolia*, la especie más representativa del lugar. Este coral es de estrategia oportunista, con crecimiento rápido, talla pequeña, vida corta y reproducción más frecuente por fertilización interna (Szmant, 1986; Knowlton, 2001; Aronson *et al.*, 2002). Sin embargo, no hay mediciones que demuestren el crecimiento de estas colonias durante este periodo.

En el corto plazo, el año de evaluación realizada en este trabajo fue relativamente tranquilo en términos de eventos oceánicos extremos. Los pocos eventos registrados (temperatura de fondo, salinidad y precipitación) fueron en época de lluvias, principalmente entre septiembre y noviembre de 2014. En este periodo no se registró una reducción de la cobertura de coral, y la frecuencia de signos de deterioro como volcamiento, fragmentación y palidecimiento fue baja, inferior al 2 %. Sin embargo, el estrés causado por los eventos de temperaturas anómalas, la

acumulación térmica de meses atrás (DHW máximo de 10 semanas) y en menor medida por la baja salinidad, estuvo reflejado en un incremento en la frecuencia de blanqueamiento que alcanzó un 11.1 %. Aunque la intensidad y duración de las anomalías térmicas son importantes para determinar el momento y la gravedad del blanqueamiento (Marshall & Schuttenberg, 2006), en este caso la mayor intensidad de este signo fue debido al efecto combinado y/o sucesivo de estos factores junto a los aportes de agua dulce.

La leve reducción de cobertura en Tesoro somero en mayo de 2013 pudo ser consecuencia del efecto conjunto del incremento en el blanqueamiento y enfermedades en los muestreos anteriores, a pesar de presentar porcentajes bajos, menores al 4 %. En ocasiones, el aumento en la frecuencia de las enfermedades ocurre después de una perturbación, como en un blanqueamiento, cuando el coral se encuentra susceptible (Harvell *et al.*, 1999; Miller *et al.*, 2006; Wilkinson & Souter, 2008), por lo que se reduce su resistencia frente a los patógenos, aumentando la virulencia de estos últimos (Aeby & Santavy, 2006; Raymundo *et al.*, 2008). Según esto, en el corto plazo no se deben subestimar los bajos porcentajes de los signos de deterioro, pues la sinergia entre estos síndromes podría contribuir a la pérdida adicional de cobertura de coral. Es necesario realizar investigaciones para comprender mejor el efecto conjunto

de los signos de deterioro en el ecosistema.

De otro lado, al no presentarse eventos de olas anómalas, no se pudo determinar su relación directa con la ocurrencia de volcamiento de corales, el cual fue menor al 1 % y sus efectos en el estado de salud de las formaciones coralinas. El estudio de un año en este caso fue un tiempo muy corto para evaluar sus efectos, en el arrecife coralino, por lo que es importante incluir el volcamiento y la fragmentación de corales dentro de las actividades de monitoreo de largo plazo y contrastar con bases de datos de oleaje.

Consideraciones finales

Tanto para la evaluación de largo plazo como la de corto plazo, las mayores perturbaciones naturales fueron debidas al efecto conjunto de varios factores ambientales bajo condiciones anómalas, siendo la temperatura uno de los principales conductores que afectan en gran medida a las formaciones coralinas. Esta situación es preocupante frente al escenario del cambio climático, en el cual las altas temperaturas que alguna vez fueron parte de la variabilidad natural, superan la tolerancia de los corales (Hoegh-Guldberg, 2011).

Si bien no es posible controlar las perturbaciones naturales, son esenciales las acciones de manejo y gestión de los factores de estrés de origen humano local y regional como la sobrepesca, degradación de la calidad del agua, deforestación, entre otros, para comenzar a proteger los arrecifes coralinos para que puedan sobrellevar los eventos extremos y así aumentar su recuperación frente al cambio climático (Wooldridge *et al.*, 2005; Knowlton & Jackson, 2008). Esto va de la mano con la continuidad de los programas de monitoreo que son empleados a nivel mundial para generar información sobre el estado, tendencias, cambios y conservación, y para comprender además su deterioro gradual y generalizado.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó gracias al apoyo de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín y la Universidad Nacional de Colombia – Sede Caribe y a los recursos financieros de COLCIENCIAS en el marco del proyecto “Eventos oceánicos extremos en ecosistemas costeros insulares del Pacífico y Caribe colombianos” (Código 1118-569-34826). Los autores agradecen al programa SIMAC del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVE-MAR), por el acceso a las series de datos históricos y a las estaciones de monitoreo en las islas del Rosario (Oficio DGI-GEZ-0526, 18 de marzo de 2014, en el marco de un Acuerdo de Condiciones de Acceso y Uso a Conjuntos de Datos). Igualmente a Diego Duque, funcionario del PNNCRSB y a los miembros del Grupo OCEÁNICOS de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. El trabajo de J.V.-S y de S.Z es contribución 1160 del INVEMAR y 458 de la Universidad Nacional de Colombia, Ins-

tituto de Estudios en Ciencias del Mar CECIMAR (Sede Caribe) y Programa de Posgrado en Ciencias –Biología, Línea Biología Marina.

REFERENCIAS

- Aeby, G. S. & D. L. Santaby. 2006. Factors affecting susceptibility of the coral *Montastraea faveolata* to black-band disease. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 318: 103-106.
- Alvarado, E. M., F. Duque, L. Flórez & R. Ramírez. 1986. Evaluación cualitativa de los arrecifes coralinos de las islas del Rosario (Cartagena, Colombia). *Bol. Ecológica*, 15: 1-30.
- Aronson, R., I. Macintyre, W. Precht, T. Murdoch & C. Wapnick. 2002. The expanding scale of species turnover events on coral reefs in Belize. *Ecol. Monogr.*, 72 (2): 233-249.
- Bayraktarov, E., V. Pizarro, C. Eidens, T. Wilke & C. Wild. 2013. Bleaching susceptibility and recovery of Colombian Caribbean corals in response to water current exposure and seasonal upwelling. *PLoS ONE*, 8 (11): e80536. doi:10.1371/journal.pone.0080536.
- Bernal, G., A. Velásquez, I. Vargas, A. C. Agudelo, C. A. Andrade, J. G. Domínguez, C. Ricaurte & G. Mayo. 2006. Variabilidad de los aportes a los sedimentos superficiales durante un ciclo anual en los bancos de Salmedina. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 35: 59-75.
- Bernal, G., A. F. Osorio, L. Urrego, D. Peláez, E. Molina, S. Zea, R. D. Montoya & N. Villegas. 2016. Occurrence of extreme oceanic events and their impact on the ecosystems in the Colombian Caribbean coasts: some study cases. *Journal of Marine Systems*, 164: 85-100.
- Cendales, M., S. Zea & J. Díaz. 2002. Geomorfología y unidades ecológicas del complejo de arrecifes de las islas del Rosario e isla Barú (mar Caribe, Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 26 (101): 497-510.
- Coles, S. L. & B. E. Brown. 2003. Coral bleaching-capacity for acclimatization and adaptation. *Advances in Marine Biology*, 46: 183-223.
- Crabbe, M. 2012. The influence of extreme climate events on models of coral colony recruitment and survival in the Caribbean. *American Journal of Climate Change*, 1: 33-40.
- Denny, M. & B. Gaylord. 2010. Marine ecomechanics. *Annu. Rev. Marine. Sci.*, 2: 89-114.
- Díaz, J. M., L. M. Barrios, M. H. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G. H. Ospina, F. Parra-Velandia, J. Pinzón, B.

- Vargas-Ángel, F. Zapata & S. Zea. 2000. Áreas coralinas de Colombia. INVEMAR. Serie Publicaciones Especiales, No. 5. Santa Marta.
- Díaz-Pulido G. & J. Garzón-Ferreira. 2002. Seasonality in algal assemblages on upwelling-influenced coral reefs in the Colombian Caribbean. *Bot. Mar.*, 45: 284-292.
- Dodge, R., A. Logan & A. Antonius. 1982. Quantitative reef assessment studies in Bermuda: a comparison of method and preliminary results. *Bull. Mar. Sci.*, 32 (3): 745-760.
- Euscátegui, C. & G. Hurtado. 2011. *Análisis del impacto del fenómeno "La Niña" 2010-2011 en la hidroclimatología del país. IDEAM.* Bogotá; 32 p.
- Garzón-Ferreira, J., M. C. Reyes-Nivia & A. Rodríguez-Ramírez. 2002. *Manual de métodos del SIMAC-Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia.* INVEMAR. Santa Marta.
- Garzón-Ferreira, J. & J. M. Díaz. 2003. *The Caribbean coral reefs of Colombia.* 275-301, in: Cortés, J. (Ed). *Latin American Coral Reefs.* Elsevier Science B.V. Amsterdam.
- GBRMPA. 2011. *Extreme weather and the Great Barrier Reef.* Australian Government. Great Barrier Reef Marine Park Authority. Townsville. Australia.
- Harvell, C. D., K. Kim, J. Burkholder, R. R. Caldwell, P. R. Epstein, D. J. Grimes, E. E. Hoffman, E. K. Lipp, A. D. M. E. Osterhaus, R. M. Overstreet, J. Porter, G. W. Smith & G. R. Vasta. 1999. Emerging marine diseases: climate links and anthropogenic factors. *Science*, 285: 1505-1510.
- Hill, J. & C. Wilkinson. 2004. *Methods for ecological monitoring of coral reefs: version 1.* Australian Institute of Marine Science. Townsville. Australia.
- Hoegh-Guldberg, O. 2011. Coral reef ecosystems and anthropogenic climate change. *Reg Environ Change*, 11 (Suppl. 1): S215-S227. DOI 10.1007/s10113-010-0189-2.
- Hubbard, D. K. & D. Scaturro. 1985. Growth rates of seven species of scleractinian corals from Cane Bay and Salt River, St. Croix, USVI. *Bull. Mar. Sci.*, 36: 325-338.
- IDEAM. 2011. *Boletín informativo sobre el monitoreo del fenómeno de "La Niña". IDEAM.* Boletín No. 24. Bogotá.
- INVEMAR. 2014. *Sistema de Monitoreo de Arrecifes de Colombia.* En línea, <http://siam.invemar.org.co/sibm>, publicado el 01/03/2014.
- Jentsch, A. & C. Beierkuhnlein. 2008. Research frontiers in climate change: effects of extreme meteorological events on ecosystems. *C. R. Geoscience*, 340: 621-628.
- Knowlton, N. 2001. The future of coral reefs. *PNAS*, 98 (10): 5419-5425.
- Knowlton, N. & J. B. C. Jackson. 2008. Shifting baselines, local impacts, and global change on coral reefs. *PLoS Biol.*, 6: 215-220.
- Leblé, S. & R. Cuignion. 1987. El Archipiélago islas del Rosario, estudio morfológico, hidrodinámico y sedimentológico. *Bol. Cient. CIOH*, 7: 37-52.
- Liu G, A. E. Strong, W. Skirving & L. F. Arzayus. 2005. *Overview of NOAA Coral Reef Watch Program's near-real time satellite global coral bleaching monitoring activities.* 1783-1793, in, Proc. 10th Int. Coral Reef Symp. Okinawa. Japón. 2004.
- López-Victoria, M. & S. Zea. 2004. Storm-mediated coral colonization by an excavating Caribbean sponge. *Clim. Res.*, 26: 251-256.
- Marshall, P. & H. Schuttenberg. 2006. *A reef manager's guide to coral bleaching.* IUCN Publications Services Unit. Cambridge. Reino Unido.
- Miller, J., R. Waara, E. Muller & C. Rogers. 2006. Coral bleaching and disease combine to cause extensive mortality on corals reefs in US Virgin Islands. *Coral Reefs*, 25 (3): 418.
- NOAA Coral Reef Watch. 2013. *Datos de series de tiempo diarias de las estaciones satelitales virtuales de la NOAA Coral Reef Watch 5-km para Colombia Atlántico, desde noviembre 1, 2013-noviembre 30, 2014.* College Park, Maryland, EUA. NOAA Coral Reef Watch. http://coralreefwatch.noaa.gov/vs/data/colombia_atlantic.txt
- Pickett, S. T. A. & P. S. White. 1985. *The ecology of natural disturbance and patch dynamics.* Academic Press. Nueva York.
- Raymundo, L., C. Couch & C. Harvell. 2008. *Coral disease handbook: guidelines for assessment monitoring and management.* Coral Reef Targeted Research and Capacity Building for Management Program. Melbourne, Australia.
- Restrepo, J. & E. Alvarado. 2011. *Los sedimentos de río Magdalena y su impacto sobre los arrecifes*

- coralinos de las islas del Rosario: una prioridad de investigación nacional*. 78-94. In: Zarza-González, E. (Ed.). El entorno ambiental del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo. Parques Nacionales Naturales de Colombia. Cartagena.
- Restrepo, J., E. Park, S. Aquino & E. M. Latrubesse. 2016. Coral reefs chronically exposed to river sediment plumes in the southwestern Caribbean: Rosario Islands, Colombia. *Science of the Total Environment*, 553: 316-329.
- Rodríguez-Ramírez, A. & J. Garzón-Ferreira. 2003. *Monitoreo de arrecifes coralinos, pastos marinos y manglares en la Bahía de Chengue (Caribe colombiano): 1993-1999*. INVEMAR, Santa Marta. 170 p.
- Rodríguez-Ramírez, R. & M. C. Reyes-Nivia. 2008. Evaluación rápida de los efectos del huracán Beta en la isla Providencia (Caribe colombiano). *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 37 (1): 217-224.
- Rodríguez-Ramírez, A., C. Bastidas, S. Rodríguez, Z. Leão, R. Kikuchi, M. Oliviera, D. Gil, J. Garzón-Ferreira, M. C. Reyes-Nivia, R. Navas-Camacho, N. Santodomingo, G. Díaz-Pulido, D. Venera-Pontón, L. Flórez-Leiva, A. Rangel-Campo, C. Orozco, J. C. Márquez, S. Zea, M. López-Victoria, J. A. Sánchez & M. C. Hurtado. 2008. The effects of coral bleaching in Southern Tropical America: Brazil, Colombia, and Venezuela. 105-114. In: Wilkinson, C. & D. Souter (Eds). Status of Caribbean Coral Reefs after Bleaching and Hurricanes in 2005. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre. Townsville. Australia.
- Romero-Rodríguez, D., G. Bernal & S. Zea. 2014. Variables ambientales durante blanqueamiento coralino en el Caribe colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 38 (149): 347-55.
- Rogers, C. S. 1990. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 62: 185-202.
- Scheffer, M. & S. R. Carpenter. 2003. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *TRENDS in Ecology and Evolution*, 18 (12): 648-656.
- Smith, M. D. 2011. The ecological role of climate extremes: current understanding and future prospects. *Journal of Ecology*, 99: 651-655.
- Solano, O. D. 1994. Corales, formaciones arrecifales y blanqueamiento de 1987 en Bahía Portete (Guajira, Colombia). *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betin*, 23: 149-163.
- Sutherland, K., J. Porter & C. Torres. 2004. Diseases and immunity in Caribbean and Indo-Pacific zooxanthellate corals. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 266: 273-302.
- Szmant, A. 1986. Reproductive ecology of Caribbean reef corals. *Coral Reefs*, 5: 43-53.
- Taylor, E., D. Hernández, F. Howard, G. Peñaloza, S. Posada, N. Howard, R. Robinson & M. Prada. 2007. Impactos en los arrecifes de coral ocasionados por el huracán Beta en la plataforma insular de Old Providence y Santa Catalina. *Bol. Cient. CIOH*, 25: 71-77.
- Vega-Sequeda, J., R. Navas-Camacho, K. Gómez-Campo, T. López-Londoño & D. L. Duque. 2011. *Estado del conocimiento de los arrecifes coralinos*. 88-119, in: INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia. 2010. Serie Publicaciones Periódicas, No. 8. Santa Marta.
- Wernberg, T., D. A. Smale, F. Tuya, M. S. Thomsen, T. J. Langlois, de T. Bettignies, S. Bennett, & C. S. Rousseaux. 2013. An extreme climatic event alters marine ecosystem structure in a global biodiversity hotspot. *Nature Climate Change*, 3: 78-82.
- Wilkinson, C. & D. Souter. 2008. *Status of Caribbean coral reefs after bleaching and hurricanes in 2005*. Global Coral Reef Monitoring Network y Reef and Rainforest Research Centre. Townsville. Australia.
- Wooldridge, S., T. Done, R. Berkelmans, R. Jones & P. Marshall. 2005. Precursors for resilience in coral communities in a warming climate: a belief network approach. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 295: 157-169 doi:10.3354/meps295157.
- Zea, S. & F. Duque-Tobón. 1989. Bleaching of reef organisms in the Santa Marta region, Colombia: 1987 Caribbean-wide event. *Trianea*, 3: 37-51.