

# Seguimiento satelital de las condiciones océano-atmosféricas asociadas a los eventos de precipitación en Colombia durante el evento La Niña 2010–2011

## *Satellite tracking of ocean-atmospheric conditions related to rainfall events in Colombia during La Niña event 2010-2011*

Fecha de recepción: 2014-05-19 / Fecha de aceptación: 2014-07-25

Martha Lucero Bastidas-Salamanca<sup>1</sup>, Apolinar Figueroa-Casas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>**Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar).** Programa de Geociencias Marinas y Costeras. Calle 25 # 2-55, Playa Salguero, Santa Marta. Tel: +57 (5) 432 86 00. Correo electrónico: martha.bastidas@invemar.org.co

<sup>2</sup>**Grupo de Estudios Ambientales (GEA).** Universidad del Cauca. Carrera 2 # 1A-2, Popayán. Tel: +57 (2) 820 98 00. Correo electrónico: apolinarfigueroa@gmail.com

**Bastidas-Salamanca ML, Figueroa-Casas A.** Seguimiento satelital de las condiciones océano-atmosféricas asociadas a los eventos de precipitación en Colombia durante el evento La Niña 2010–2011. Bol. Cient. CIOH 2014;32:123-134.

### RESUMEN

La comprensión de la variabilidad climática es un tema de gran interés científico debido a que puede repercutir en las condiciones ambientales y socio-económicas de un país. Este estudio hace uso de datos satelitales para describir los eventos de precipitación ocurridos en el territorio colombiano durante el evento de La Niña 2010-2011 y registrados en estaciones meteorológicas costeras del Caribe. Se utilizaron datos de la temperatura de brillo de las nubes, medida por el *Geostationary Operational Environmental Satellite -GOES-12*; datos de temperatura superficial del mar derivados de imágenes mensuales del *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer -MODIS*, y datos de precipitación in situ de dos estaciones meteorológicas costeras (Cartagena y Santa Marta). Las imágenes satelitales GOES permitieron describir el evento La Niña 2010-2011 a partir de la identificación de nubes altas y complejos convectivos de mesoescala, los cuales se asocian a elevadas precipitaciones; mientras que las imágenes MODIS evidenciaron un comportamiento oceánico opuesto entre el Caribe colombiano, que exhibió anomalías positivas, y el Pacífico Oriental Tropical, que experimentó la influencia del evento y lo reflejó en anomalías negativas. Modelos lineales empleando datos satelitales de temperatura superficial del mar, in situ de precipitación y del Índice de Oscilación del Sur, revelaron que solamente para la estación ubicada en El Rodadero (Santa Marta), la precipitación fue explicada por la temperatura superficial del mar adyacente, mientras que el IOS no resultó significativo.

**PALABRAS CLAVES:** La Niña 2010-2011, Colombia, imágenes GOES, imágenes MODIS, precipitación, temperatura superficial del mar.

### ABSTRACT

Understanding the climate variability is a topic of great scientific interest because it can affect the environmental and socio-economic conditions of a country. This work makes use of satellite data to assess the rainfall events that occurred in Colombia during La Niña 2010-2011 and recorded in the Caribbean coastal weather stations. Data from brightness temperature of clouds measured by the *Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES -12)*, sea surface temperature (SST) data derived from monthly images of *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)* and in situ rainfall data, from two coastal weather stations (Cartagena and Santa Marta) was used. GOES images allowed describing La Niña event 2010-2011 due to the identification of high clouds and mesoscale convective complexes (MCC), which are related to high rainfall; meanwhile MODIS images showed an opposite oceanic behavior between the Colombian Caribbean, that exhibited positive anomalies and the Eastern Tropical Pacific, which experienced the influence of this event and reflected in negative anomalies. Linear models using SST satellite data, in situ rainfall and Southern Oscillation Index (SOI), revealed that only in the weather station located in Rodadero (Santa Marta), the rainfall was explained by SST in the adjacent sea; meanwhile the SOI was not.

**KEYWORDS:** La Niña 2010-2011, Colombia, GOES imagery, MODIS imagery, rainfall, sea surface temperature.

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la distribución espacial y el ciclo anual de la precipitación es de vital importancia para un país desde el punto de vista social y económico, además de que es el componente fundamental del ciclo hidrológico [1]. El entendimiento de la variabilidad climática puede ayudar a un mejor manejo de los ecosistemas productivos, dando la oportunidad de prevenir y mitigar los efectos adversos de eventos de cambio extremo. En Colombia la distribución anual de la precipitación está regulada por la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), de tal forma que el Pacífico colombiano y la zona andina experimentan un ciclo anual bimodal con dos estaciones lluviosas (abril-mayo y octubre-noviembre) y dos estaciones secas (diciembre-febrero y junio-agosto) como resultado del doble paso de la ZCIT sobre la región [2]. Por su parte, el Caribe presenta una época seca a principios de año (diciembre-abril) con vientos provenientes del norte y noreste, cuando la ZCIT se encuentra al sur, una época de transición con vientos variables entre mayo y julio conocida como 'Veranillo de San Juan' y la época de lluvias entre agosto y noviembre, en la cual la ZCIT se encuentra al norte [3].

Según [3], los mecanismos físicos anuales de gran escala que modulan la variabilidad climática en Colombia son: El Niño -Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación del Atlántico Norte, los Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM), las Ondas del Este, la Oscilación Quasi-Bienal y la Circulación de la Cuenca Amazónica. La componente atmosférica del ENOS, conocida como la Oscilación del Sur y cuantificada a través del Índice de Oscilación del sur (IOS), tiene teleconexiones a nivel atmosférico relacionadas directamente con la precipitación y la temperatura locales [4].

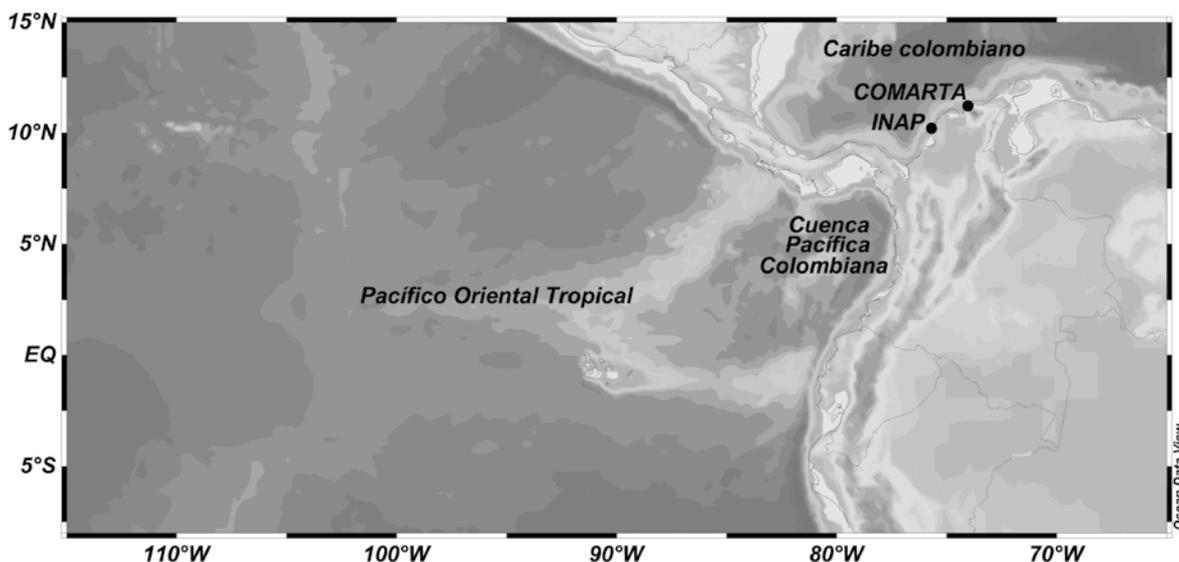
Para el caso específico de Colombia, las fluctuaciones en los patrones de temperatura atmosférica y precipitación tienen interés tanto por la presencia de periodos secos como por los de inundaciones y crecida de ríos [3], ya que existen evidencias de anomalías hidrológicas asociadas a

las fases extremas del ENOS [5-7]. Los efectos hidro-climáticos de El Niño en la región Andina de Colombia están bastante documentados [8-10] y pueden resumirse en cinco aspectos: (i) disminución en la precipitación, (ii) en los caudales medios mensuales de los ríos, (iii) en la humedad del suelo y (iv) en la actividad vegetal, (v) así como un incremento en la temperatura del aire.

Muchos de los eventos más intensos de precipitación en Colombia se desarrollan en CCM, los cuales han sido descritos por [3] [11-12]. Los CCM corresponden a estructuras convectivas formadas por agrupaciones nubosas, las cuales pueden ser identificadas en imágenes satelitales infrarrojas a partir de ciertos criterios de forma y duración del evento [13]. Los CCM también se han reportado en otras regiones de Suramérica, especialmente en Argentina y Uruguay, donde han sido identificados en imágenes térmicas GOES y MeteoSat, y explicados a partir de incursiones de chorros de bajo nivel y advección de humedad desde la zona tropical [14-15].

## ÁREA DE ESTUDIO

El presente trabajo abarcó un dominio que incluye el Pacífico oriental tropical (POT) y el territorio colombiano, tanto la parte continental como marítima e insular (Fig. 1). Colombia ha sido denominada por [11] como "una isla entre tres océanos", teniendo en cuenta que además de estar rodeada por el océano Pacífico y el mar Caribe, recibe la influencia de la circulación atmosférica de la cuenca amazónica. Esta circulación atmosférica es alimentada por la precipitación en el pie de monte andino, la cual a su vez es ocasionada por la gran cantidad de humedad transportada por los vientos Alisios del sureste desde el Amazonas, constituyéndose así una retroalimentación positiva entre la cuenca y la cordillera. Las aglomeraciones nubosas provenientes del Amazonas y Pacífico son interceptados por las cordilleras y obligados a ascender, sirviendo la cordillera de protección contra grandes precipitaciones. Por el lado de la cordillera que asciende llueve más, por el lado que desciende menos [3].



**Figura 1.** Área de estudio donde se muestra el dominio espacial de las imágenes satelitales y ubicación de las estaciones meteorológicas de donde se obtuvieron datos de precipitación mensual acumulada.

Es importante mencionar la fuerte afectación que sufrió el territorio colombiano como consecuencia de la manifestación del evento La Niña 2010-2011, detectado desde mayo de 2010 como una anomalía negativa de la temperatura superficial del mar (TSM) a lo largo del Pacífico Ecuatorial [16] y que para Colombia se empezó a registrar desde julio de 2010 [17]. De acuerdo con el Departamento Nacional de Planeación (DNP), la ola invernal de finales del 2010 fue catalogada como uno de los eventos de mayor impacto sobre la infraestructura de transporte; el evento de La Niña fue catalogado como el más intenso en los últimos 50 años debido a que afectó 28 de los 32 departamentos, siendo el Caribe la zona más golpeada [18]. Estudios recientes, revelaron agrupaciones regionales o hotspots con un alto grado de inundación localizadas en las planicies inundables de los ríos Magdalena y Atrato asociadas con este evento [19].

La TSM es una variable oceanográfica asociada con eventos atmosféricos, puesto que además de ser un indicador ambiental marino, por estar relacionada con aspectos físicos como corrientes marinas, intensidad de los vientos superficiales, dinámica de la capa de mezcla, energía cinética turbulenta, precipitación e intensidad de la radiación solar [20]; sirve como indicador de la presencia de El Niño en el Pacífico Oriental Tropical (POT) y puede verse

en imágenes satelitales como una anomalía positiva de TSM [21-23]. En sentido inverso, anomalías negativas de TSM corresponden oceanográficamente a la condición opuesta y son referidas como La Niña, durante el cual ocurren eventos de precipitación muy intensos, crecidas de ríos, avalanchas e inundaciones de planicies aluviales con las consecuentes pérdidas de vidas humanas, infraestructura y cosechas agrícolas [11].

## METODOLOGÍA

### Datos satelitales

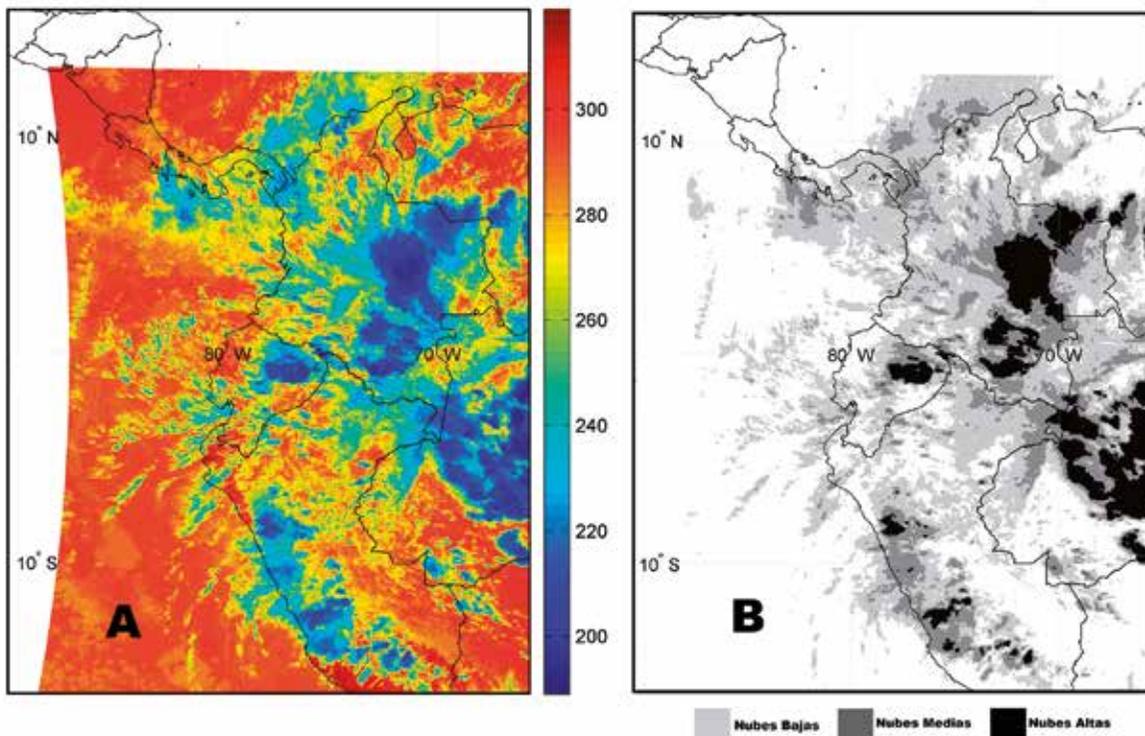
Para el seguimiento de las condiciones atmosféricas en el territorio colombiano se hizo uso de imágenes satelitales del *Geostationary Operational Environmental System* (GOES-12) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, por sus siglas en inglés) en la banda térmica (11  $\mu\text{m}$ ) con 4 km de resolución espacial. La información de esta banda corresponde a los valores geofísicos de la temperatura de brillo del tope de la nube (Tb), la cual está directamente asociada a la altura de la nube y probabilidad de precipitación [24-28]. Los valores de Tb fueron segmentados y se asignó una nueva paleta de color para la diferenciación entre nubes altas, medias y bajas. Para esto, se

tuvo en cuenta la relación  $T_b$ -altura de la nube; según la cual, las nubes bajas se forman hasta los 2 km de altura con  $-33^{\circ}\text{C} < T_b < 2^{\circ}\text{C}$ , las nubes medias se forman entre 2 y 5 km de altura con  $-57^{\circ}\text{C} < T_b < -33^{\circ}\text{C}$  y las nubes altas, que son aquellas que indican mal tiempo por tormentas, se forman en alturas entre los 5 y 14 km con  $T_b < -57^{\circ}\text{C}$  (Fig. 2).

Asimismo, se implementó una metodología para identificar la formación, caracterización y seguimiento de los CCM a partir de imágenes GOES de acuerdo al criterio establecido por [13] en cuanto a  $T_b$ , área, excentricidad y duración del fenómeno atmosférico. Las imágenes desde noviembre de 2010 hasta abril de 2011 fueron procesadas en una plataforma informática desarrollada por el Grupo de Estudios Ambientales de la Universidad del Cauca, la cual permitió analizar las imágenes GOES, así como identificar y rastrear la duración de los CCM durante el periodo estudiado. Posteriormente,

fueron seleccionadas algunas de ellas como representativas de cada mes y como evidencia del comportamiento atmosférico previamente descrito por otros autores durante un evento La Niña.

Para el seguimiento de las condiciones oceanográficas se procesaron imágenes mensuales de TSM con 4 km de resolución espacial del *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), descargadas gratuitamente del sitio web del *Ocean Color de la National Aeronautic and Space Administration* (NASA, por sus siglas en inglés). Se descargaron las imágenes disponibles desde julio de 2002 hasta diciembre de 2013 y se calcularon los promedios mensuales multianuales con el fin de contar con una aproximación de la TSM mensual en un dominio que abarcó el POT y el Caribe colombiano (Fig. 1). Posteriormente, con respecto a estos promedios mensuales, se calcularon las anomalías de TSM entre septiembre de 2010 y abril de 2011.



**Figura 2.** Segmentación de nubes y asignación de paleta de color en una imagen de temperatura de brillo GOES. **A.** Imagen original en grados Kelvin. **B.** Imagen segmentada con la nueva paleta de color.

## Datos in situ

Con el objetivo de identificar alguna asociación entre los eventos de precipitación ocurridos durante La Niña 2010-2011 y las condiciones océano-atmosféricas identificadas a partir de las imágenes satelitales, se utilizaron datos de precipitación acumulada mensual de dos estaciones en el Caribe colombiano. La primera de ellas es una estación meteomarina ubicada en Isla Tesoro (Islas del Rosario, Cartagena), la cual hace parte del Proyecto Piloto de Adaptación al Cambio Climático (INAP) y vinculada al *Global Ocean Observing System* (GOOS), administrada por el Instituto de Investigaciones Marinas y costeras (Invemar) desde 2009 [29]. Esta estación fue reubicada en marzo de 2011 del lado expuesto a los vientos hacia el lado protegido, razón por la cual no se cuenta con datos de marzo y abril de 2011. La segunda es la estación meteorológica del Centro de Observación Marina Tadeísta (Comarta), ubicada en el sector de El Rodadero (Santa Marta) y administrada por la Universidad Jorge Tadeo Lozano (Fig. 1).

## Aproximación estadística

Con el objetivo de evaluar la influencia oceánica representada por la TSM y la atmosférica representada por el IOS, en los eventos de precipitación registrados en las estaciones Comarta e INAP durante el periodo enero 2010-diciembre 2011, se utilizó la significancia de los coeficientes de un modelo polinomial de grado 1 orden 2 (Ecuación 1). Una vez obtenido el modelo, la significancia de los coeficientes fue evaluada con el estadístico *t* de *student* y la significancia global del modelo con el estadístico F de Fisher.

$$P = b_0 + b_1 TSM + b_2 IOS \quad [1]$$

De las imágenes mensuales MODIS se extrajeron las series de tiempo de la TSM para dos puntos del Caribe en los años 2010 y 2011, ubicados en la bahía de El Rodadero (Santa Marta) e Islas del Rosario (Cartagena), puntos adyacentes a la ubicación de las estaciones meteorológicas. El IOS fue obtenido de la página del *National Center for Environmental Prediction* (NECP, por sus siglas en inglés) de la NOAA. Valores negativos del IOS se reflejan en el océano como un aumento anómalo de la TSM, evento oceanográfico conocido como El Niño, mientras que valores positivos se asocian a la fase fría (La Niña) [30].

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Condiciones atmosféricas

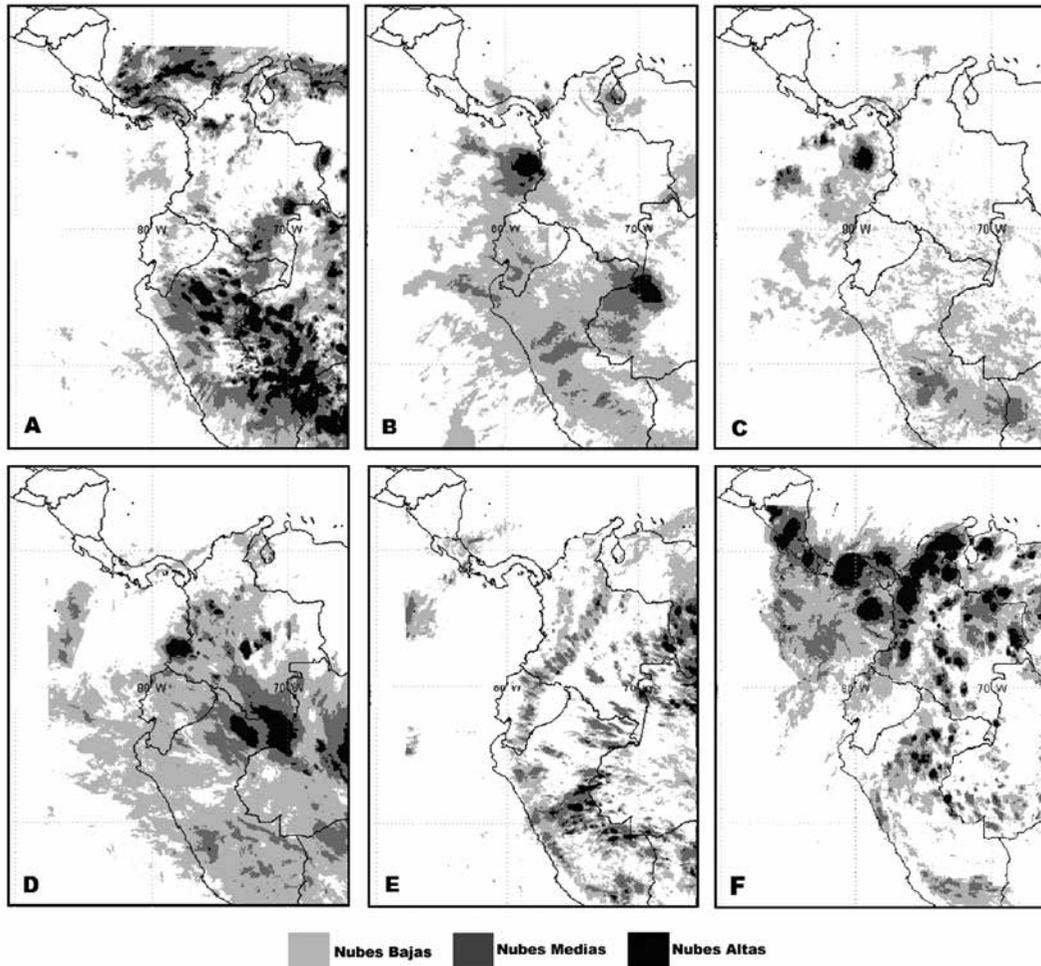
A partir del procesamiento de las imágenes de nubosidad GOES, desde noviembre de 2010 hasta abril de 2011, fue posible identificar características generales de los meses evaluados que reflejaron el comportamiento de la atmósfera durante la presencia del evento La Niña 2010-2011. Noviembre de 2010 se caracterizó por presentar nubes medias y altas en el Caribe y el Amazonas, las de mayor probabilidad de precipitación según [24-28]. Se identificaron CCM en el Caribe durante algunos días (Fig. 3A), eventos a los que se puede atribuir las fuertes precipitaciones presentadas en la zona norte de Colombia durante este mes [18], el cual hace parte de la época de lluvias identificada por [3]. Durante la época húmeda también se presenta la mayor intensidad del chorro del Chocó [20], lo cual pudo favorecer la convección profunda y la formación de CCM que incursionaron desde el Pacífico hacia el interior causando alta precipitación y que se ven reforzados durante un evento La Niña [31].

De forma general, en diciembre de 2010 se debilitó la nubosidad en el Caribe y empezó a fortalecerse en el Pacífico, evidenciado mediante la aparición de algunos CCM sobre la zona costera. La segunda quincena estuvo relativamente despejada de nubes. El 12 de diciembre de 2010 se presentó un CCM sobre el océano Pacífico a la altura del municipio de Buenaventura (Fig. 3B), el cual se empezó a formar desde las 3:00 a.m. y se mantuvo hasta las 8:00 a.m. La caracterización de este fenómeno se realizó siguiendo el criterio de [13] y permitió identificar un fuerte evento de precipitación durante las horas de la mañana, el cual registró 47.2 mm acumulados hasta el mediodía, de acuerdo con la estación meteorológica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam). Otros CCM fueron identificados especialmente sobre la zona costera, indicando que su formación estuvo asociada a la influencia oceánica.

Durante la primera quincena del 2011 la mayoría de las imágenes evaluadas mostraron una atmósfera libre de nubes, siendo representativa de ellas la presentada en la Fig. 3C; aunque a lo largo del mes se mantuvo la influencia del Pacífico manifestada a través de la presencia de CCM. febrero de 2011 se caracterizó por muy poca nubosidad en la zona norte,

debido a la migración de la ZCIT hacia el sur y continuó la influencia del Pacífico manifestada a través de CCM localizados específicamente en la costa frente a los departamentos de Cauca y Nariño, cuya imagen representativa se muestra en la Fig. 3D. Para marzo de 2011

continuó la influencia del Amazonas, generando fuerte nubosidad en el centro del país, donde la mayor parte del mes las nubes medias y bajas se situaron sobre las cordilleras, afectando principalmente las cuencas altas de los ríos (Fig. 3E).



**Figura 3.** Imágenes GOES de nubes altas, medias y bajas, segmentadas a partir de Tb (°C) y seleccionadas como representativas del período evaluado. **A.** Noviembre 2010, **B.** Diciembre 2010, **C.** Enero 2011, **D.** Febrero 2011, **E.** Marzo 2011, **F.** Abril 2011.

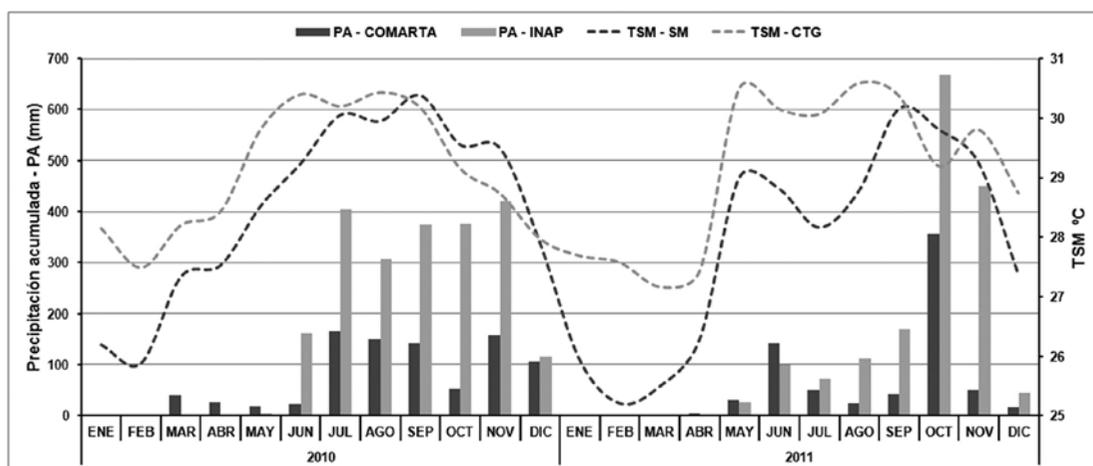
Finalmente, en la primera quincena de abril de 2011 aparecieron CCM bastante definidos sobre todo el Caribe y zona norte del Pacífico, generando condiciones desfavorables en gran parte de Colombia, comportamiento que es representado en la Fig. 3F. Para la segunda quincena, este comportamiento disminuyó levemente y regresó

la fuerte nubosidad al Pacífico. Esta última es una de las tres regiones favorecidas según [32] para el desarrollo de CCM de bajo nivel, debido a que las aguas cálidas, el ascenso orográfico y la convergencia de gran escala en los bajos niveles de la atmósfera se combinan, para enfocar y aumentar la convección.

De otro lado y con respecto a los datos *in situ* en las dos estaciones evaluadas del Caribe, se encontró que los valores mensuales de precipitación acumulada fueron superiores en la estación Isla Tesoro (INAP) para el periodo 2010-2011, con mayores valores durante el segundo semestre del 2010 y presentaron menor variabilidad entre meses (Fig. 4). Durante 2011 las precipitaciones del segundo semestre fueron notablemente menores a las registradas en el segundo semestre de 2010 para ambas estaciones; exceptuando octubre de 2011 que se caracterizó por presentar las mayores precipitaciones acumuladas de la serie analizada.

Los acumulados mensuales de precipitación de las estaciones evaluadas son superiores a

los presentados en las cartas climatológicas mensuales de las estaciones del Ideam ubicadas en los aeropuertos Rafael Núñez de Cartagena y Simón Bolívar de Santa Marta (disponibles electrónicamente en: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/tablas.htm>). Específicamente para noviembre de 2010, mes que se caracterizó por presentar nubes medias y altas, las de mayor probabilidad de precipitación según [24-28] así como CCM, los valores acumulados de precipitación fueron de 157.10 y 419.40 mm en las estaciones Comarta e INAP, respectivamente; mientras que las cartas climatológicas mensuales reportan 45.11 y 121.3 mm en Santa Marta y Cartagena, respectivamente; evidenciando que fue un mes de elevadas precipitaciones, tal y como fue reportado por el DNP [18].



**Figura 4.** Precipitación acumulada (PA) mensual en las estaciones Comarta (Santa Marta) e INAP (Cartagena), y temperatura superficial del mar (TSM) en dos puntos oceánicos adyacentes.

### Condiciones oceanográficas

Las imágenes satelitales para el POT muestran la evolución de la anomalía de TSM desde septiembre de 2010 hasta abril de 2011 (Fig. 5), donde es evidente la presencia de la anomalía negativa de TSM, evento oceanográfico referido como La Niña. De acuerdo con las imágenes MODIS, esta anomalía negativa permaneció hasta enero de 2011 (Fig. 5E), donde empezó a debilitarse hasta lograr condiciones neutras en marzo (Fig. 5G); sin embargo, es notable a partir de las imágenes que la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC) presentó en algunos

meses características particulares respecto al resto del POT.

Septiembre y octubre (Fig. 5A y 5B) se caracterizaron por presentar anomalías positivas de TSM en el Caribe colombiano y negativas en el POT. Para noviembre de 2010 el POT continuó presentando la anomalía negativa de la TSM, presentando los valores más bajos de todo el periodo evaluado y el Caribe presentó condiciones neutras. Este mes se caracterizó por presentar nubes medias y altas así como CCM en el Caribe (Fig. 3A) y fuertes eventos de precipitación en Santa Marta y Cartagena (Fig. 4). Este mes es

reconocido como parte de la época húmeda para el Caribe colombiano [3] [33] y pudo haberse visto reforzado por la intensificación de los CCM durante el fenómeno de La Niña [31]. Diciembre de 2010 (Fig. 5D) presentó un comportamiento oceanográfico similar a noviembre de 2010.

La anomalía de TSM durante enero de 2011 (Fig. 5E) presentó un comportamiento similar a noviembre 2010; no obstante y a diferencia de éste, se caracterizó por una atmósfera libre de nubes durante la primera quincena del año (Fig. 3C) y como se mencionó anteriormente, a lo largo del mes se mantuvo la influencia del Pacífico manifiesta a través de CCM localizados en la costa. Este mes hace parte de la época seca del Caribe colombiano [3] [33] y se registraron precipitaciones mínimas en la estación Comarta (<2 mm) y nulas en la estación INAP (Fig. 4).

Febrero y marzo se caracterizaron por presentar condiciones neutras para el Caribe (Fig. 5F y 5G) y en el POT empezó a debilitarse la anomalía negativa exhibida en los meses anteriores; sin embargo, específicamente la CPC presentó anomalía positiva de la TSM, la cual desapareció casi por completo para abril (Fig. 5H), donde las condiciones neutras regresaron para toda la región, exceptuando la zona frente a Ecuador.

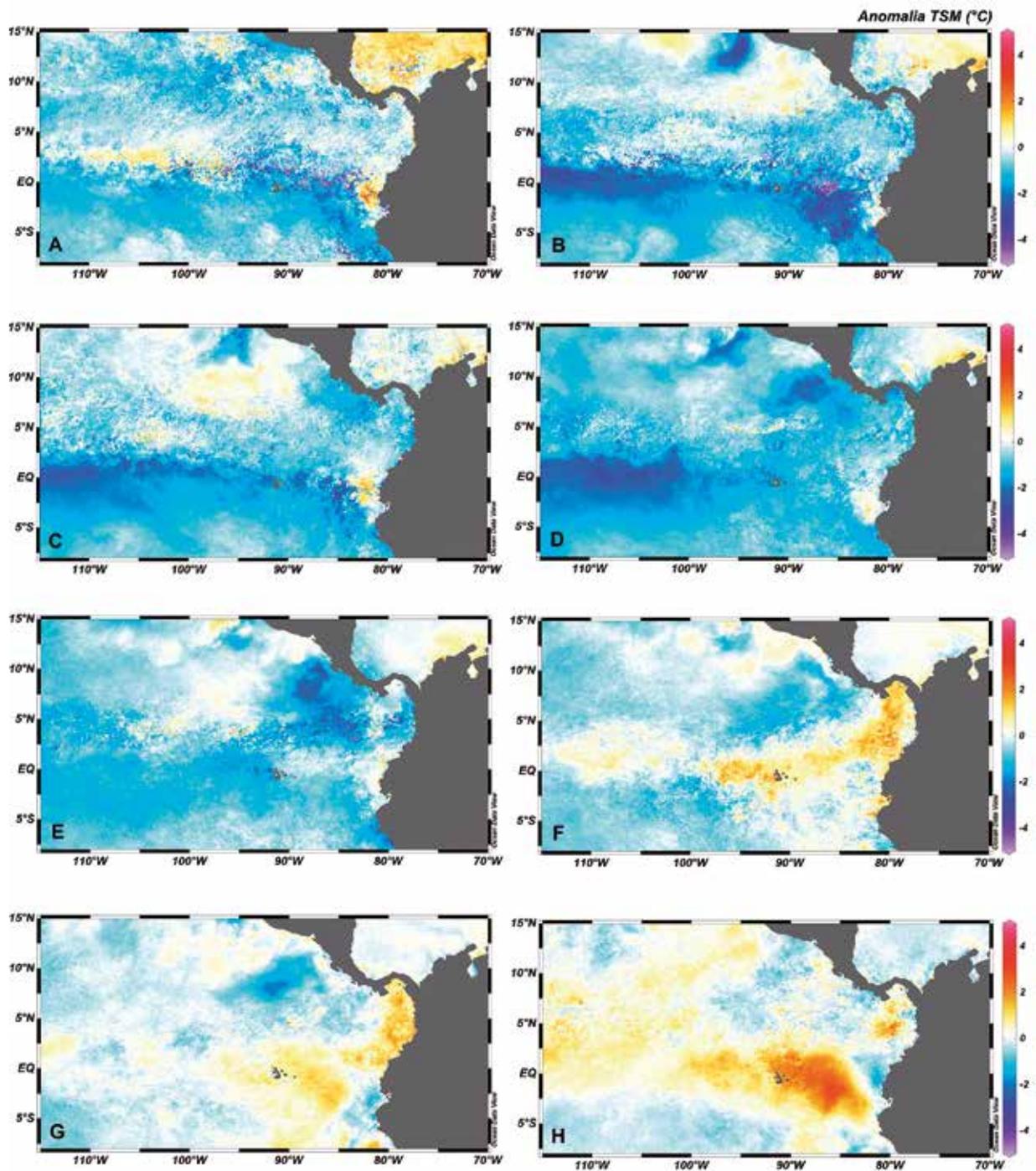
El análisis de las series de tiempo 2010-2011 de la TSM en Santa Marta y Cartagena (Fig. 4) mostraron que la TSM en Santa Marta presentó los menores valores a principios de 2010 y 2011, lo cual pudo estar relacionado con su mayor

cercanía al sistema de surgencia de La Guajira con respecto a Cartagena, el cual se manifiesta a principios de año con la intensificación de los vientos del noreste y el afloramiento costero [34-35]. Durante el segundo semestre, las series de tiempo en ambas estaciones alcanzaron valores similares en 2010; mientras que en 2011, Santa Marta exhibió valores de TSM inferiores a los de Cartagena.

Finalmente, de los modelos lineales encontrados para Santa Marta (estación Comarta) y Cartagena (estación INAP) durante el periodo evaluado (Ecu. 2 y 3), las pruebas de significancia de los coeficientes mostraron para Santa Marta que la precipitación es explicada solamente por la TSM ( $\alpha=0.05$ ); mientras que para Cartagena, ninguna de las variables evaluadas (TSM, IOS) resultó significativa para explicar la precipitación. Este resultado indica que en el sector de El Rodadero las condiciones oceanográficas locales fueron más determinantes que las atmosféricas regionales en el régimen de precipitación para el periodo evaluado. Este resultado es reforzado por las anomalías de TSM durante el periodo septiembre 2010-abril de 2011, las cuales fueron positivas en el Caribe, contrario a lo esperado durante la presencia de La Niña (anomalías negativas) y que si fueron evidentes en el Pacífico. El modelo lineal obtenido para esta estación fue estadísticamente significativo ( $\alpha=0.05$ ) y explicó el 39% de la variabilidad de los datos.

$$P_{COMARTA} = -829 + 31.5TSM + 6IOS \quad [2]$$

$$P_{INAP} = -1637 + 61.7TSM + 38.6IOS \quad [3]$$



**Figura 5.** Anomalia de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Oriental Tropical. **A.** Septiembre 2010, **B.** Octubre 2010, **C.** Noviembre 2010, **D.** Diciembre 2010, **E.** Enero 2011, **F.** Febrero 2011, **G.** Marzo 2011, **H.** Abril 2011. (Fuente de datos: sensor MODIS).

## CONCLUSIONES

El uso de imágenes satelitales GOES permitió la identificación de nubes altas y complejos convectivos de mesoescala en el territorio colombiano durante el periodo noviembre 2010–abril 2011, los cuales estuvieron asociados a la manifestación del fenómeno La Niña 2010-2011 que trajo consigo fuertes lluvias. Este seguimiento satelital resultó una herramienta importante de caracterización ambiental al momento de identificar eventos atmosféricos asociados a fuertes precipitaciones durante el periodo evaluado, los cuales afectaron al país en diferentes sectores socio-económicos.

De otro lado, las imágenes satelitales MODIS de TSM del periodo septiembre 2010–abril 2011 permitieron identificar un comportamiento oceánico opuesto entre el Caribe colombiano, que exhibió anomalías positivas de temperatura, y el Pacífico Oriental Tropical, que experimentó la influencia del evento La Niña y lo reflejó en anomalías negativas.

Finalmente, los modelos lineales encontrados a partir de datos satelitales e *in situ* permitieron identificar las asociaciones entre los eventos de precipitación registrados en dos estaciones del Caribe colombiano (Cartagena y Santa Marta) y las variables océano-atmósfera durante el periodo 2010-2011; tal que solamente para el caso de la estación ubicada en El Rodadero (Santa Marta) la precipitación fue explicada por la TSM adyacente, mientras que el Índice de Oscilación del Sur no resultó significativo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos al Invermar y a la Universidad Jorge Tadeo Lozano por la libre disposición de sus datos meteorológicos a la comunidad en general. Asimismo, a COLCIENCIAS a través del proyecto MACACEA- 2012 y a CDKN, a través del proyecto AVA, por la financiación de esta investigación. Finalmente agradecen a los revisores del manuscrito quienes contribuyeron con sus valiosos aportes al mejoramiento del producto final.

## LITERATURA CITADA

[1] Mejía F, Mesa O, Poveda G, Vélez J, Hoyos C, Mantilla R, Barco J, Cuartas A, Montoya M, Botero B. Distribución espacial y ciclos

anual y semianual de la precipitación en Colombia. *DYNA* 1999;127:7-26.

- [2] Poveda G, Mesa O, Salazar L, Arias P, Moreno H, Vieira S, Agudelo P, Toro V, Álvarez F. The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review* 2004;133:228-240.
- [3] Mesa O, Poveda G, Carvajal L. Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín; 1997. 390 pp.
- [4] Trenberth KE, Caron JM. The Southern Oscillation Revisited: Sea level pressures, surface temperatures and precipitation. *Journal of Climate* 2000;13:4358-4365.
- [5] Poveda G, Mesa OJ. Metodologías de predicción de la hidrología colombiana considerando el evento El Niño–Oscilación del Sur (ENOS). Sociedad Colombiana de Meteorología. 1993;(17).
- [6] Poveda G. The Relationship between ENSO and the hydrology of tropical South America: The case of Colombia. *Proceedings of the Fifteenth Annual American Geophysical Union Hydrology Days*. Atherton, USA. Hydrology Days Publications; 1995. Pp. 227-236.
- [7] Restrepo JC, Ortiz JC, Pierini J, Schorrotke K, Maza M, Otero L, Aguirre J. Freshwater discharge into the Caribbean Sea from the rivers of Northwestern South America (Colombia): Magnitude, variability and recent changes. *Journal of Hydrology* 2014;509: 266–281.
- [8] Poveda G, Mesa O. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale ocean–atmospheric phenomena. *Journal of Climate* 1997;10 (10):2690-2702.
- [9] Poveda G, Jaramillo A. ENSO related variability of rivers discharges and soil moisture in Colombia. *Biospheric Aspects of the Hydrologic Cycle*. IGBP 2000;(8):3-6.
- [10] Waylen P, Poveda G. El Niño Southern Oscillation and aspects of western South America hydro-climatology. *Hydrological Processes* 2002;16:1247-1260.
- [11] Poveda G. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala

- inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias* 2004;28(107):201-222.
- [12] Mapes BE, Warner TT, Xu M, Negri AJ. Diurnal Patterns of Rainfall in Northwestern South America. Part I: Observations and Context. *Monthly Weather Review*. 2003;131:799-812.
- [13] Maddox RA. Mesoscale convective complexes. *Bulletin of American Meteorology Society*. 1980;61:1374-1387.
- [14] Quispe N. Mecanismos físicos para la formación de un complejo convectivo de mesoescala: Caso de estudio del 23 de abril de 2003. *Revista del Aficionado a la Meteorología*. 2003.
- [15] Salinas CR. Análisis de un Sistema Convectivo de Mesoescala que Afectó el Paraguay el 3 de febrero del 2001. *Top. Meteorol. Oceanogr*. 2001;8(2):60-70.
- [16] NOAA/National Weather Service/Cimatic Prediction Center. 2011. ENSO Diagnostic Discussion. [http:// http://www.cpc.ncep.noaa.gov/](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/)
- [17] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). Boletín informativo N° 16 sobre el monitoreo de los fenómenos El Niño y La Niña; 2010.
- [18] Departamento Nacional de Planeación (DNP). Impactos y respuestas a la ola invernal 2010-2011; 2011. [http:// https:// www.dnp.gov.co/](http://www.dnp.gov.co/)
- [19] Hoyos N, Escobar J, Restrepo JC, Arango AM, Ortiz JC. Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Applied Geography* 2013;39:16-25.
- [20] Bernal G, Poveda G, Roldán P, Andrade C. Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 2006;30(115):195-208.
- [21] Murtugudde RG, Signorini SR, Cristian JR, Busalacchi AJ, McClain CR, Picaut J. Ocean color variability of the tropical Indo-Pacific basin observed by SeaWiFS during 1997-1998. *Journal of Geophysical Research* 1999;104(C8):18351-18366.
- [22] Murakami H, Ishizaka J, Kawamura H. ADEOS observations of chlorophyll a concentration, sea surface temperature, and wind stress change in the equatorial Pacific during the El Niño 1997 onset. *Journal of Geophysical Research* 2000;105(C8):19551-19559.
- [23] Lagerloef SE, Lukas R, Bonjean F, Gunn JT, Mitchum GT, Bourassa M, Busalacchi AJ. El Niño Tropical Pacific Ocean surface current and temperature evolution in 2002 and outlook for early 2003. *Geophysical Research Letters* 2003;30(10):1514-1518.
- [24] McCollum JA, Krajewski WF, Ferraro RR, Ba M. Evaluation of biases of satellite rainfall estimation algorithms over the continental United States. *Journal of Applied Meteorology* 2002;41:1065-1080.
- [25] Mecikalski JR, Bedka KM. Forecasting Convective Initiation by Monitoring the Evolution of Moving Cumulus in Daytime GOES Imagery. *Monthly Weather Review*. 2006;134:49-78.
- [26] Ba M, Frouin R, Nicholson S. Satellite derived interannual variability of west African rainfall during 1983-1988. *Journal of Applied Meteorology* 1995;34:411-431.
- [27] Purdom JFW. Some uses of High-Resolution GOES imagery in the mesoscale forecasting of convection and its behavior. *Monthly Weather Review* 1976;104:1474-1483.
- [28] Griffith C, Lee Woodley W, Grube P, Martin D, Stout J, Sikdar D. Rain estimation from Geosynchronous Imagery-Visible and Infrared Studies. *American Meteorology Society*; 1978. Pp. 1153-1171.
- [29] Gutiérrez-Moreno C, Marrugo M, Lozano-Rivera P, Sierra P, Andrade C. *Clima Marino*. En: Esteban Zarza-González (Ed.) *El entorno ambiental del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y de San Bernardo*. Parques Nacionales Naturales de Colombia. Cartagena de Indias; 2011. 416 pp.
- [30] McPhaden M. El Niño and La Niña: Causes and Global Consequences. *Enciclopedia of Global Environmental Change Vol. 1*; 2001. Pp. 353-370.

- [31] Poveda G, Mesa O. La corriente de chorro superficial del Oeste ("Del Chocó") y otras dos corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias* 1999;23(89):517-528.
- [32] Velasco I, Frisch M. Mesoscale convective complexes in the Americas. *Journal of Geophysical Research* 1987;92(D8):9591-9613.
- [33] Mancera J, Pinto G, Vilardy S. Patrones de distribución estacional de masas de agua en la bahía de Santa Marta, Caribe colombiano: importancia relativa del upwelling y outwelling. *Bol. de Invest. Mar. y Cost.* 2013;42(2):329-360
- [34] Andrade CA, Barton ED. The Guajira upwelling system. *Cont. Shelf Res.* 2005;25(9):1003-1022.
- [35] Páramo J, Correa M, Núñez S. Evidencias de desacople físico-biológico en el sistema de surgencia en La Guajira, Caribe colombiano. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 2011;46(3):421-430.