



UNIVERSIDAD PERUANA  
**CAYETANO HEREDIA**  
ESCUELA DE POSGRADO

CARACTERIZACIÓN DE LOS  
EVENTOS DE AGUAS BLANCAS  
FRENTE A PISCO Y CHINCHA  
(ENTRE LOS 13°-15° S)

TESIS PARA OPTAR EL GRADO  
DE MAESTRO EN CIENCIAS DEL  
MAR

ZULITA CHAUCA VELA

LIMA – PERÚ

2018



**ASESOR DE LA TESIS**

**Arturo Aguirre Velarde**

PhD en Biología Marina

Investigador del Instituto del Mar del Perú

Dedicado a todos los jóvenes científicos que se  
inician en la investigación de las ciencias marinas.  
Por su entusiasmo, talento, dedicación y gran aporte  
que realizan con sus estudios para un mejor  
conocimiento y manejo de nuestros océanos.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar a dar mis agradecimientos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) por haber permitido que muchos jóvenes como yo tengamos la posibilidad de realizar nuestros estudios de posgrado en una prestigiosa casa de estudios como lo es la Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH) y que a través del Programa de Becas Fondecyt financiaron esta tesis. En este sentido agradecer al coordinador de la maestría, Dr. Dimitri Gutiérrez, por su gran interés de llevar adelante la maestría en Ciencias del Mar y por el apoyo constante brindado en todo mi paso por la maestría.

Al proyecto Dinámica del sistema de la Corriente de Humboldt (DISCOH) del cual nació el interés en llevar a cabo la investigación de los eventos de aguas blancas, desarrollando así mi tema de tesis. En especial al Dr. Arturo Aguirre Velarde por haber sido el tutor de esta tesis. Por su tiempo, sus conocimientos, y gran interés y curiosidad que tiene acerca de los procesos oceanográficos que ocurren en la bahía de Paracas, pero sobre todo por su apoyo constante para que este trabajo sea una realidad.

Al Instituto del mar del Perú (IMARPE) y al Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de Francia por el respaldo en la realización de esta tesis. En especial, a los doctores Hervé Demarcq por su contribución en la elaboración del algoritmo de identificación de aguas blancas y el conocimiento brindado acerca del

manejo de información satelital y sus valiosos aportes, al Dr, Alexis Chaigneau y al Dr. Jonathan Flye-Sainte-Marie por sus recomendaciones brindadas para la mejora de la tesis, al Dr, Francois Colas por sus conocimientos brindados e interesantes discusiones que se hicieron por el bien de este trabajo. Asimismo, al Dr. Thomas Ohde, a quien personalmente no conozco, pero que en todo momento ha estado muy involucrado en la tesis y cuyos trabajos me inspiraron a continuar con la investigación de las aguas blancas en Perú. A todos aquellos que de alguna manera me brindaron su apoyo con algún dato, en la realización de algún análisis o gráfico y a quienes me dieron alguna crítica constructiva para la tesis.

A mis amigos de la maestría, con quienes he compartido buenos y malos momentos y porque siempre han estado y sé que estarán siempre para brindarme su apoyo y sus sinceras críticas, así como también por compartir sueños por el bien de la ciencia.

Finalmente, y no menos importante, agradezco a mi familia que ha estado conmigo en todo momento, a mis padres quienes siempre me han brindado lo mejor que han podido y estimulado a salir adelante. A mis hermanas por haberme comprendido todo este tiempo y hacer que todo haya sido más fácil para mí. A Miguel, mi novio, con quien comparto mi vida y quien siempre ha sido un ejemplo a seguir por su perseverancia, fortaleza, y dedicación que le pone a todo lo que hace para lograr sus objetivos. A Dios. Gracias.

## RESUMEN

Los eventos de aguas blancas son coloraciones turquesas lechosas en la superficie del mar conformadas por azufre elemental ( $S^0$ ), producto de la oxidación del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ). Se han registrado eventos de aguas blancas en la bahía de Paracas asociados a mortandades y varazones de recursos pesqueros. Con el objetivo de conocer los escenarios bajo los cuales se desarrollan estos eventos, se realizó un estudio en la región  $13^{\circ}$ - $15^{\circ}$ S entre los años 2000 y 2016 determinándose su relación desfasada con el afloramiento. Además, se describieron los cambios en la temperatura y el oxígeno en la bahía de Paracas durante la ocurrencia de aguas blancas. Para ello, se utilizó información satelital de color del mar proveniente del espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) a bordo de los satélites AQUA y TERRA, a 1 km de resolución espacial. Otros datos utilizados fueron el índice de afloramiento, calculado con información de los escaterómetros QuickScat y ASCAT, así como datos de temperatura y oxígeno disuelto, de la columna de agua de la bahía de Paracas. Mediante un algoritmo de identificación, creado en base a las características espectrales de las plumas de aguas blancas de eventos conocidos, se pudo determinar el área ( $km^2$ ), distancia a la costa (mn), frecuencia de ocurrencia (días con aguas blancas / mes) y el índice de intensidad (llamado Índice de aguas blancas o IAB). Se observó una marcada estacionalidad de las aguas blancas, con máximas actividades durante el otoño. Las áreas abarcadas por las plumas de aguas blancas variaron entre 3 y  $\sim 4000 km^2$ . Los mayores índices de frecuencia se presentaron en el mes de mayo, llegando a ocurrir hasta 25 eventos durante el mes de mayo del 2008. La correlación cruzada entre el Índice de aguas

blancas y el afloramiento mostró una correlación negativa significativa ( $p < 0.05$ ) para un lag de 3 meses con un factor de correlación de -0.796, es decir el pico de actividad de aguas blancas se da 3 meses antes que el pico de máximo afloramiento. La presencia de aguas blancas en la bahía de Paracas estuvo acompañada de una disminución significativa de temperatura y oxígeno disuelto en la columna de agua. Los eventos de aguas blancas han ocurrido durante casi todo el periodo de estudio y han tenido una tendencia al aumento, la cual puede permanecer en un futuro debido a que los océanos están tendiendo a una fuerte disminución del oxígeno.

Palabras clave: aguas blancas, sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), afloramiento, MODIS, Pisco-Paracas.

## ABSTRACT

The sulfidic events are milky-turquoise colorations on the surface of the sea and are formed by elemental sulfur ( $S^0$ ), which is a product of hydrogen sulfide oxidation ( $H_2S$ ). At the Paracas bay the sulfidic events have been recorded associated to mortalities of fishery resources. A study was carried out at the region  $13^{\circ}$ - $15^{\circ}$ S with the aim to know the scenarios under these events take place and its relationship with upwelling during the period 2000 to 2016. In addition, temperature and oxygen changes in the Paracas Bay during the occurrence of the sulfidic events were described. For that, the satellite information of the color of the sea from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aboard AQUA and TERRA satellites, at 1km of spatial resolution was used. Another parameters like upwelling index from information of QuickScat y ASCAT scatterometers was calculated, as well as, the in situ data of temperature and dissolved oxygen from the water column of the Paracas Bay were used. Area ( $km^2$ ), distance to the coast (nm), occurrence frequency (days with sulfidic events / month) and an intensity index (called sulfidic events index or IAB in Spanish) were determined through an algorithm of identification based on spectral characteristics of sulfidic events of known events. A marked seasonality of sulfidic events was observed, with maximum activities during fall. Areas of sulfidic plumes ranged from 3 to  $\sim 4000 km^2$ . The highest frequency indexes were presented in May, reaching 25 sulfidic events in May 2008. Cross-correlation between sulfidic events index and the upwelling index showed a significant negative correlation ( $p < 0.05$ ) for 3 months lag with a correlation factor of -0.796, which means that the peak of activity of sulfidic events is given 3 months

before the peak of maximum upwelling coinciding with the beginning of the upwelling. The presence of sulfidic events was accompanied by a decrease in temperature and dissolved oxygen in the water column of Paracas bay. The sulfidic events have been occurring for almost the whole study period and have tended to increase. This situation may remain in the future due to oceans are trending to a strong decrease of oxygen.

**Key Words:** sulfidic events, hydrogen sulfide, upwelling, MODIS, Pisco-Paracas.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
2.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
2.2.	MARCO TEÓRICO .....	6
2.2.1.	Generalidades del sistema de afloramiento peruano. ....	6
2.2.2.	Generalidades de la zona marina entre los 13° y 15° S.....	10
2.2.3.	Eventos de aguas blancas suscitados en la Bahía de Paracas y en otros ambientes costeros. ....	30
2.2.4.	Remineralización de la Materia orgánica, Ciclo del Azufre y la Formación de aguas blancas .....	37
2.2.5.	Herramientas de teledetección para el estudio de los eventos de aguas blancas: sensores satelitales.....	45
2.3.	JUSTIFICACION DEL ESTUDIO .....	50
2.4.	OBJETIVOS.....	52
2.4.1.	Objetivo Principal .....	52
2.4.2.	Objetivos específicos .....	52
2.5.	HIPÓTESIS .....	52
3.	METODOLOGÍA .....	53
3.1.	DISEÑO DEL ESTUDIO .....	53
3.2.	AREA DE ESTUDIO .....	54
3.3.	POBLACION Y MUESTRA.....	55
3.4.	PERIODO DE ESTUDIO .....	55
3.5.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	56
3.5.1.	Variables Explicativas: .....	56
3.5.2.	Variables Respuesta:.....	56
3.6.	PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS.....	60
3.6.1.	Identificación de plumas de aguas blancas a partir de imágenes satelitales de color del mar.....	60
3.6.2.	Caracterización de las plumas de aguas blancas identificadas durante el periodo 2000-2016 .....	73

3.6.3.	<b>Procesamiento de las variables oceanográficas .....</b>	78
3.6.4.	<b>Plan de análisis .....</b>	80
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	82
4.1.	<b>Aplicación del algoritmo de identificación de aguas blancas .....</b>	82
4.2.	<b>Variabilidad temporal y espacial de los eventos de aguas blancas .....</b>	86
4.3.	<b>Cambios de la temperatura y oxígeno en la bahía de Paracas durante los eventos de aguas blancas. ....</b>	100
4.4.	<b>Relación del viento satelital e índice de afloramiento con los eventos de aguas blancas.....</b>	105
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN .....</b>	109
5.1.	<b>Verificación del algoritmo de identificación de aguas blancas .....</b>	109
5.2.	<b>Uso de las herramientas satelitales en el estudio de los eventos de aguas blancas.....</b>	112
5.3.	<b>Variabilidad estacional y anual de las plumas de aguas blancas en la región 13°-15°LS .....</b>	113
5.4.	<b>Distribución espacial de las plumas de aguas blancas .....</b>	118
5.5.	<b>Caracterización de la temperatura y oxígeno durante los eventos de aguas blancas en la Bahía de Paracas .....</b>	119
5.6.	<b>Causas antropogénicas y naturales de los eventos de aguas blancas.....</b>	121
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	124
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	126
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	128

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Climatología de la distribución anual de la Zona de Mínima de Oxígeno (ZMO [ $O_2$ ]  $<20 \mu\text{mol L}^{-1}$ ). En color se representa el espesor que alcanza (m). En iso-líneas se representa la profundidad del borde superior de la ZMO en intervalos de 50 m. Los datos provienen de la base histórica del IMARPE, colectados por el Laboratorio de Hidroquímica de 1960 al 2008. Frente a Chicama y hacia el norte, cerca de la costa, la ausencia de datos nos indica que la plataforma se encuentra más oxigenada por la influencia del sistema ecuatorial que profundiza la ZMO ( $>150\text{-}200$  m). Fuente: Michelle Graco. Tomado del Libro de oro del IMARPE, 2014.

**Figura 2.** (a) Ubicación del boxcore B0406 (estrella); (b) Distribución de la temperatura superficial del mar frente a Perú (GHRSSST-PP: 1985-2005). El punto negro corresponde al boxcore. Los triángulos blancos indican los muelles de IMARPE; (c) Climatología de Chl-a basada en los datos de color de SeaWiFS (1997-2006) y de las velocidades del viento a los largo de la costa (ECMWF-ERA40) dentro del área costera central representada con un cuadro rojo en la Figura 1a. La línea roja une la temperatura promedio mensual basada en el ajuste de mínimos cuadrados entre el muelle de Pisco y GHRSSST. Tomado de Gutiérrez et al. (2011).

**Figura 3.** Mapa base de la Reserva Nacional de Paracas ubicado en la provincia de Pisco, Región Ica. Tomado de la página web SERNANP.

**Figura 4.** Mapa de la Bahía de Paracas. Tomado y modificado de Flores (2016).

**Figura 5.** Circulación marina en la Bahía de Paracas. a) Con vientos fuertes y b) Con vientos débiles a moderados. Tomado de Flores et al., 2004.

**Figura 6.** a) Ubicación y batimetría de la Bahía Independencia en 2D y 3D. b) Ubicación de los principales lugares de la Bahía Independencia (A-K). Tomado de Quispe et al. (2010).

**Figura 7.** Esquema de circulación de masas de agua en la bahía Independencia. A) superficie y B) fondo, durante el invierno de 1986. Tomado de Sánchez et al. (1988).

**Figura 8.** Variación espacial de la temperatura en la bahía Independencia. Izquierda: superficie y Derecha: fondo. Tomado de Quispe et al. (2010).

**Figura 9.** Variabilidad espacio-temporal de temperatura a) en superficie y b) en fondo. Tomado de Quispe et al. (2010).

**Figura 10.** Distribución de texturas sedimentarias en la bahía de Paracas. Tomado de Velasco (2000).

**Figura 11.** Fuentes potenciales de Contaminación (puntos rojos) en las bahías de Pisco y Paracas. Fuente: Informe CDSP, 2004, modificado por Jacinto, 2014).

**Figura 12.** Supervivencia de concha de abanico de tres tamaños diferentes. Puntos rojos indican el cultivo en fondo y puntos azules, cultivo suspendido. Las líneas turquesas verticales señalan los días en los que se presentó aguas blancas en la bahía Paracas. Tomado de Aguirre et al., 2014.

**Figura 13.** Imágenes satelitales de color verdadero provenientes de los sensores MODIS Aqua y Terra mostrando el evento de aguas blancas ocurrido en la Bahía de Paracas entre el 22 y 31 de marzo del 2015. Tomado de Flores (2016).

**Figura 14.** Imágenes satelitales de eventos de aguas blancas frente a Callao y Pisco en enero y mayo del 2009. Tomado de Schunk et al. (2013).

**Figura 15.** Imágenes satelitales de temperatura superficial del mar (TSM) provenientes de AVHRR (a-d) y de plumas de aguas blancas provenientes de SeaWIFS (e-h). Tomado de Weeks et al. (2004).

**Figura 16.** Variabilidad estacional del tamaño de las plumas de sulfuro derivado de toda la data MERIS de los años 2002 al 2012. Tomado de Ohde y Dadou (2018).

**Figura 17.** Laguna de Thau. a) En condiciones normales, b) En condiciones de aguas blancas. Tomado de Google.

**Figura 18.** Fotografía de la Bahía de Concepción (vista desde el noreste) con presencia de coloraciones turquesas durante el verano austral del 2003. Foto: Didier Rousseau, 14 enero 2003. Tomado de Gallardo y Espinoza, 2008.

**Figura 19.** Distribución vertical de  $H_2S$  en la zona Callao-Paracas, donde las mayores acumulaciones de  $H_2S$  se dan en el fondo. Tomado de Schunck et al., 2013.

**Figura 20.** Perfiles de manganeso, hierro y  $H_2S$  disuelto en el agua intersticial del sedimento marino costero. Tomado de Jorgensen y Nelson, 2004.

**Figura 21.** El ciclo del azufre en sedimentos marinos. Tomado de Jorgensen y Kasten, 2006; Luther et al., 2004.

**Figura 22.** Esquema de la formación de aguas blancas luego de una mezcla vertical, originada por la intensificación de vientos, que rompe la condición de estratificación, en la cual se ve favorecida la formación de  $H_2S$ . Elaboración propia.

**Figura 23.** Ilustración indicando cómo se mide el color del océano, una de las propiedades básicas de los océanos que pueden determinarse desde el espacio. Tomado y modificado de García-Weil, L. et al, 2009.

**Figura 24.** Serie de tiempo de imágenes SeaWiFS de color casi real del 24 de marzo al 3 de abril del 2003 de un Bloom de cocolitofóridos frente a Namibia. Tomado de Siegel et al., 2007.

**Figura 25.** Comparación de las características espectrales de plumas sulfurosas con blooms algales (A) y material suspendido de origen terrestre (B). Tomado de Ohde et al., 2007.

**Figura 26.** Área de estudio: 13-15°S y 76-77°W. Elaboración propia.

**Figura 27.** Mapa de estaciones de muestreo de temperatura y oxígeno en la Bahía de Paracas. TPP: Estación Puerto San Martín de Pluspetrol (2006-2014). MiniDO2T: Logger de oxígeno y temperatura (2015). HOBO y RBR: Logger de oxígeno y temperatura (2012-2013). Elaboración propia.

**Figura 28.** Ejemplo de la región procedente de vientos satelitales para el día 3 de enero del 2000. Los colores indican la magnitud de la velocidad del viento (m/s) y las flechas, la dirección. Los contornos indican los valores de índice de afloramiento ( $m^3 \cdot s^{-1} \cdot 100m$ ). Fuente: David Correa.

**Figura 29.** Flujograma de pasos para la obtención de datos de reflectancias.

**Figura 30.** Ejemplo de mapas de reflectancias de las 10 longitudes de onda (412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667, 678 nm) para el día 08 de mayo del 2009, reportado como presencia de aguas blancas por Schunck et al., 2013. La pluma de agua blanca corresponde a los píxeles en color azul intenso. La barra de color indica los valores de reflectancia.

**Figura 31.** Señales espectrales de diferentes zonas en el mar, correspondientes a aguas blancas (línea turquesa), sedimentos suspendidos (línea blanca), alta clorofila (línea verde) y zonas no afectadas (línea azul). Se observa la curva característica de las plumas de aguas blancas con pico de máxima reflectancia a 488 nm.

**Figura 32.** Señal espectral característica de los píxeles que conformaron la pluma de agua blanca frente a la Bahía de Paracas el 08/05/2009.

**Figura 33.** Valores de 'ab2' para 16 píxeles que conforman la pluma de agua blanca frente a la Bahía de Paracas el 08/05/2009, registrada por Schunck et al. (2013). La línea roja indica el valor mínimo del parámetro  $lim\_pic$ .

**Figura 34.** Distribución de los valores de “ab2” (superior) y “rrs488” (inferior) del centro de 16 plumas de aguas blancas. Línea roja indica el valor de “ab2” y “rrs488” determinado como mínimo para que los eventos puedan ser considerados aguas blancas.

**Figura 35.** Flujograma del proceso de identificación de plumas de aguas blancas que incluye las etapas de descarga de datos de color del mar, elaboración del algoritmo, ajuste del algoritmo y aplicación del algoritmo.

**Figura 36.** Ejemplos de días X e Y con información satelital disponible de color del mar. Nótese que los mapas contienen información de reflectancia en más del 50% del área de estudio.

**Figura 37.** Figura referencial de una imagen compuesta por 576 filas y 672 columnas de píxeles, que abarca 6° de latitud y 7° de longitud.

**Figura 38.** Flujograma del procesamiento de datos de color del mar para la identificación y caracterización de las plumas de aguas blancas.

**Figura 39.** Imágenes diarias obtenidas de la aplicación del algoritmo mostrando la evolución de las plumas de aguas blancas detectadas (superior) en comparación con sus correspondientes imágenes satelitales MODIS de color real (inferior). La barra de color indica los valores de reflectancias a 488nm. Periodo: 31-03-2008 al 09-04-2008

**Figuras 40 (izquierda) y 41(derecha).** Imágenes diarias obtenidas de la aplicación del algoritmo mostrando la evolución de las plumas de aguas blancas detectadas (superior) en comparación con sus correspondientes imágenes satelitales MODIS de color real (inferior). La barra de color indica los valores de reflectancias a 488nm. Figura 40 corresponde al periodo: del 8 al 10 -05-2009, reportado por Schunck et al. (2013); y la Figura 41 corresponde al 11-02-2013, reportado por Aguirre et al. (2014).

**Figura 42.** Imágenes diarias obtenidas de la aplicación del algoritmo mostrando la evolución de las plumas de aguas blancas detectadas (superior) en comparación con sus correspondientes imágenes satelitales MODIS de color real (inferior). La barra de color indica los valores de reflectancias a 488nm. Periodo: 24-03-2015 al 18-04-2015, reportado por Flores (2016).

**Figura 43.** Serie estacional del número total de días: con información satelital disponible de color del mar en el área 13–15°S y 76–77°W (rojo), con presencia de aguas blancas en el área 13–15°S y 76–77°W a excepción de la bahía de Paracas (verde) y con presencia de aguas blancas en la Bahía de Paracas (azul), durante el periodo 2000-2016.

**Figura 44.** Serie anual del número total de días: con información satelital disponible de color del mar en el área 13–15°S y 76–77°W (rojo), con presencia de aguas blancas en el área 13–15°S y 76–77°W a excepción de la bahía de Paracas (verde) y

con presencia de aguas blancas en la Bahía de Paracas (azul), durante el periodo 2000-2016.

**Figura 45.** Serie temporal de los días con aguas blancas (línea negra) y los días con dato disponibles de color del mar (línea roja) para el área 13° - 15°S durante el periodo 2000 – 2016.

**Figura 46.** Diagrama de cajas estacional (a) y anual (b) de los índices de frecuencia.

**Figura 47.** Serie temporal del índice de Frecuencia (IF) de ocurrencia de aguas blancas durante el periodo 2000-2016 en el área 13–15°S y 76–77°W.

**Figura 48.** Diagrama de cajas a) estacional y b) anual de la distancia a la costa (mn) de las plumas de aguas blancas durante 2000-2016. Las distancias se calcularon con las coordenadas correspondientes a los puntos medios de las plumas detectadas.

**Figura 49.** Mapas de distribución estacional de las coordenadas de los centros geométricos de las plumas de aguas blancas.

**Figura 50.** Mapas de distribución anual de las coordenadas de los centros geométricos de las plumas de aguas blancas. No se detectaron aguas blancas en los años 2002 y 2016.

**Figura 51.** Diagrama de cajas estacionales (a) y anuales (b) de las áreas de las plumas de aguas blancas (km<sup>2</sup>).

**Figura 52.** Distribución estacional (a) y anual (b) de las áreas acumuladas (km<sup>2</sup>) de las plumas de aguas blancas.

**Figura 53.** Distribución estacional (a) y anual (b) de los índices de aguas blancas (IAB).

**Figura 54.** Series diarias de oxígeno (azul) y temperatura (rojo) al interior de la Bahía de Paracas y su relación con los eventos de aguas blancas (IAB) para los periodos abril-junio 2009 y marzo-abril 2015.

**Figura 55.** Distribución del oxígeno (a) y temperatura (b) en dos grupos: previo a los eventos de aguas blancas y durante los eventos de aguas blancas ocurridos en la Bahía de Paracas.

**Figura 56.** Series diarias de oxígeno y temperatura en relación con los eventos de aguas blancas de los periodos diciembre 2008(a) y marzo 2006(b) al interior de la bahía de Paracas. Los cuadros amarillos muestran las mayores disminuciones de oxígeno en diciembre 2008 (línea azul) y de temperatura en marzo 2006 (línea roja).

**Figura 57.** Climatología de oxígeno(a), temperatura (b) y gradiente de temperatura(c) a una profundidad de 5m en la bahía de Paracas a partir de datos de muestreos de Pluspetrol para el periodo 2006-2015.

**Figura 58.** Diagrama de cajas estacionales de la velocidad satelital del viento (a) e índice de afloramiento (b).

**Figura 59.** Diagrama de cajas anuales de la velocidad satelital del viento (a) e índice de afloramiento (b).

**Figura 60.** Análisis de correlación cruzada entre el Índice de aguas blancas (IAB) y el Índice de afloramiento. La mayor correlación se muestra en un lag negativo igual a 3 meses.

**Figura 61.** Relación de las series estacionales entre el Índice de afloramiento, el Índice de aguas blancas y la Gradiente de Temperatura.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las coloraciones turquesas blanquecinas que se presentan en las zonas costeras de la superficie del mar, como resultado de la oxidación del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) hasta azufre elemental ( $S^0$ ), son conocidos en Perú como eventos sulfídicos o eventos de aguas blancas debido a la alta dispersión de la luz que generan las partículas suspendidas de  $S^0$  (Weeks et al., 2002). Estos eventos fueron percibidos en el pasado por el olor desagradable que provenía del mar, propio del  $H_2S$ , y por las coloraciones negruzcas en la base de los botes y en las fachadas de las casas de la zona (Lavalle y García, 1917; Currie, 1953)

Eventos de aguas blancas han sido observados en varios lugares del mundo, tanto en áreas marinas cerradas o semicerradas: Laguna de Thau en Francia (Minghelli-Roman et al., 2011), Bahía de Paracas en Perú, (Aguirre et al., 2016, Flore, 2016), Bahía de Concepción en Chile (Gallardo y Espinoza, 2008), Bahía de Tokyo (Takeda et al., 1991), etc, así como también en zonas más alejadas de la costa en los sistemas de afloramiento de Humboldt (Schunck et al., 2013) y Benguela (Weeks et al., 2002, Weeks et al., 2004).

El reporte de la ocurrencia de estos eventos en Perú se ha concentrado en la zona frente a Pisco. Por ejemplo, dentro de la Bahía de Paracas se ha observado la ocurrencia de eventos de aguas blancas en simultáneo con eventos de hipoxia/anoxia, acompañados de aguas frías y de vientos favorables al afloramiento (Aguirre et al., 2014; Aguirre, 2016). También, se ha reportado la formación de plumas sulfurosas en

zonas más alejadas de la costa desde Lima hasta Paracas con un área total de más de 500 km<sup>2</sup> y con un contenido de  $\sim 2.2 \times 10^4$  tons. de H<sub>2</sub>S (Schunck et al., 2013).

Los casos más severos de aguas blancas han sido relacionados a mortandades masivas de peces o bentos, como los ocurridos con el recurso merluza frente a Namibia en el sistema de afloramiento de Benguela (Hamukuaya et al., 1998, Copenhagen et al., 1953). En Perú, también se ha suscitado casos de mortandades masivas de concha de abanico *Argopecten purpuratus* (Aguirre et al., 2014) y lisa *Mugil cephalus* (Cabello y Tam, 2002) en la Bahía de Paracas, las cuales se han visto asociadas a altas concentraciones de sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) en la columna de agua (Cabello y Tam, 2002; IMARPE 2015; PNUMA y CONAM 2007), simultáneamente con periodos de hipoxia, e incluso anoxia (Aguirre et al., 2014,2016). Tales mortandades pueden deberse a las condiciones anóxicas del medio marino, pero la toxicidad del H<sub>2</sub>S también contribuye a la mortandad de los organismos marinos, ya que interfiere en la transferencia de electrones durante el proceso de respiración aeróbica de los organismos vivos (Evans, 1967, Torrans y Clemens, 1982). Por lo tanto, la combinación de ambos factores podrían estar causando las mortandades masivas de peces (Copenhagen et al., 1953; Jacinto et al., 1996b) y bentos.

En Perú, los eventos de aguas blancas se han relacionado a un afloramiento costero activo (Aguirre et al., 2014) y a la alta actividad de bacterias quimiolitotrofas en aguas subsuperficiales que utilizan diversos oxidantes como oxígeno, nitrato, nitrito, óxido nítrico y óxido nitroso para detoxificar las aguas con H<sub>2</sub>S. (Schunck et al.,

2013). Sin embargo, las investigaciones aún no han sido suficientes para conocer los procesos que estarían desencadenando la formación de estos eventos en la costa peruana.

En general, los estudios y la comprensión de los eventos de aguas blancas han sido relativamente limitados. Aunque sí se han hecho esfuerzos para realizar mediciones *in situ* (Brüchert et al., 2003, Lavik et al., 2009; Schunk et al, 2013), estas no son de alta resolución y su extensión espacio-temporal es pequeña. Sin embargo, desde el principio de los años 2000, la disponibilidad y accesibilidad de imágenes satelitales de muy alta resolución han mejorado mucho el conocimiento en cuanto a la localización, extensión, duración y frecuencia de los eventos de aguas blancas (Weeks et al., 2002). Incluso, se ha logrado conocer que estos eventos son muchos más fuertes y persistentes que lo registrado por observaciones directas en las zonas afectadas (Schunck et al., 2013; Weeks et al., 2004; Weeks et al., 2002).

En este contexto, debido a la poca documentación y conocimiento de la formación, estacionalidad, duración y extensión de los eventos de aguas blancas en el litoral peruano, el presente estudio abordará la caracterización de estos eventos frente a Pisco y Chincha complementando información remota e *in situ*, dando a conocer su dinámica espacio temporal y la relación que tienen con los vientos y el afloramiento. Asimismo, se describirá las condiciones ambientales del agua durante estos eventos en la bahía de Paracas.

## **2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Eventos de aguas blancas se han observado frecuentemente en la zona de Pisco, específicamente al interior de la bahía de Paracas y se han visto asociados regularmente a condiciones de hipoxia severa o anoxia (Aguirre et al., 2014, 2016). Elevados valores de H<sub>2</sub>S en la bahía se repiten en épocas de verano a inicios de cada año, ocasionado por condiciones anóxicas en la zona (PNUMA y CONAM, 2007). Si bien el agotamiento de oxígeno impacta en el ecosistema marino, el H<sub>2</sub>S puede tener también un fuerte efecto tóxico en los organismos, comportándose como un inhibidor del transporte de electrones en el proceso de respiración celular (Evans, 1967). Como consecuencia causa la mortandad masiva de bentos, peces y otros organismos marinos, sobretodo de movilidad limitada.

En general, los eventos de aguas blancas pueden ser provocados bajo diferentes circunstancias. En sistemas de afloramiento, se han visto asociados a un afloramiento costero activo (Ohde, 2009; Schunck et al., 2013; Weeks et al., 2004). En sistemas cerrados como bahías y lagunas se ha observado que la aparición de las aguas blancas ha sido producto de la mezcla turbulenta de aguas estratificadas tras una intensificación de los vientos, lo cual lleva aguas de fondo cargadas en H<sub>2</sub>S que, posteriormente, se oxidan a S<sup>o</sup> (Minghelli-Roman et al., 2011). Sin embargo, aún se desconoce en gran medida los mecanismos involucrados en la generación de los eventos de aguas blancas en el ecosistema marino peruano.

El origen y las características de las aguas blancas en nuestro ecosistema marino aún resultan poco documentados debido en particular a una falta de observaciones in-situ y la complejidad de poder seguir de forma permanente y continua estos episodios pues son eventos esporádicos, de corta duración del orden de días (Ohde et al., 2007; Weeks et al., 2004). Si bien las mediciones in situ de ciertos parámetros oceanográficos permiten documentar las condiciones ambientales antes, durante o después de estos eventos, la distribución espacial limitada de esas observaciones no permite describir de manera exhaustiva estos eventos (e.g. extensión horizontal, frecuencia, duración, desplazamiento, etc). Sin embargo, hoy en día existen bases de datos con información satelital a frecuencias temporales y espaciales eficientes tal que, dichas características de los eventos de aguas blancas pueden ser estimadas a partir de observaciones satelitales de la coloración del mar (Weeks et al., 2004; Ohde et al., 2007; Schunck et al., 2013), resultando la teledetección una herramienta complementaria para seguir estos fenómenos de aguas blancas de manera casi continua. En este sentido, esta investigación acopla el uso de herramientas satelitales y de observaciones *in situ* para comprender mejor el contexto ambiental y temporal en el que se forman las aguas blancas y los principales cambios que se producen en el medio marino costero, así como registrar las principales características espacio temporales de estos eventos. Por lo tanto, la pregunta científica que se desprende es: ¿Qué procesos oceanográficos están relacionados a la ocurrencia de eventos de aguas blancas en la región 13-15°S?

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Generalidades del sistema de afloramiento peruano.**

Los vientos favorables al afloramiento que soplan de manera constantes a los largo de la costa peruana, con dirección al Ecuador, transportan aguas frías con alto contenido nutrientes (nitratos, fosfatos y silicatos) y bajo contenido de oxígeno disuelto desde profundidades someras (50-100m) (Zuta y Guillén, 1970; Pocklington, 1981 en Graco et al., 2007). Esto permite la disponibilidad de nutrientes ocasionando una alta productividad primaria en los sistemas de afloramiento. Tal es el caso que, frente a Perú se ha llegado a determinar una productividad primaria de 1-10 gC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Ryther et al., 1971; Lee y Cronin, 1982; Henrichs y Farrington, 1984 en (Henrik Fossing, 1990)), lo cual resulta ser 10 veces mayor al promedio observado para el océano en general (Menzel y Ryther, 1960 en Henrik Fossing, 1990). Siendo ésta una de las principales razones por las que el sistema de afloramiento peruano es uno de los ecosistemas marinos que sostiene una de las pesquerías más grandes e importantes del mundo (Bakun y Weeks, 2008).

Debido a la alta productividad primaria, se genera gran cantidad de materia orgánica cuya remineralización demanda oxígeno y en combinación con una pobre ventilación de la columna de agua, produce una extensa zona mínima de oxígeno, ZMO (Instituto del Mar del Perú, 2014) (Figura 1), que comparada a otros sistemas es mucho más intensa y somera (Helly y Levin, 2004). La ZMO presenta una concentración de

oxígeno menor a  $0,5 \text{ mL L}^{-1}$  (Zuta y Guillén, 1970) y varía su profundidad dependiendo de la latitud; se presenta por debajo de los 100-200m en el norte ( $5-6^{\circ}\text{S}$ ), mientras que a partir de los  $12^{\circ}\text{S}$  predomina por debajo de los 50m (Graco, et al., 2013).

En el Perú, los eventos de afloramiento ocurren durante todo el año, sin embargo, existe una variabilidad oceanográfica que se da a diferentes escalas temporales, causando importantes fluctuaciones en el afloramiento costero (Graco et al., 2007). A nivel estacional, existe una mayor intensidad de los afloramientos durante invierno y primavera y es más débil en verano y otoño a lo largo de la costa peruana, (Zuta y Guillen, 1970) (Figura 2). Por otro lado, se observa la variabilidad interanual de El Niño Oscilación Sur (ENOS), cuyas fases cálidas (El Niño) y frías (La Niña) presentan características opuestas. Durante La Niña existe una intensificación en las aguas de afloramiento frías, ricas en nutrientes y con una alta productividad, mientras que, durante El Niño se presentan aguas cálidas y pobres en nutrientes que provienen del Ecuador (Chávez, 2005 en Graco et al., 2007).

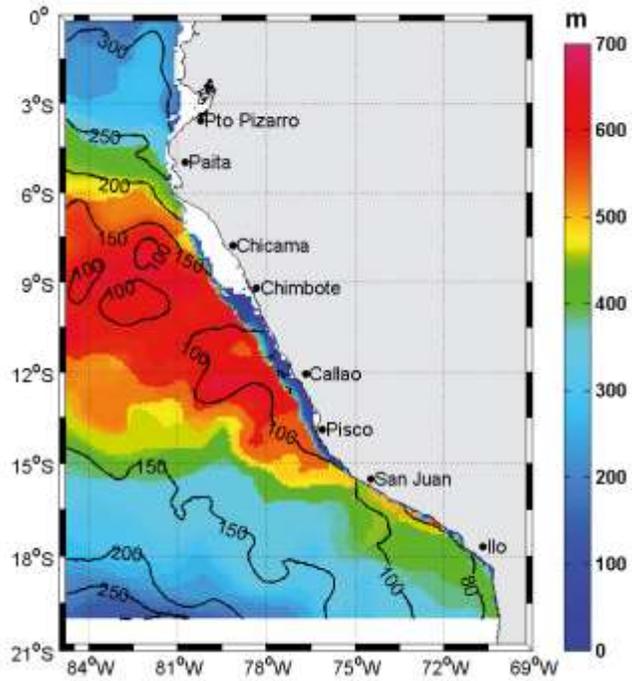


Figura 1. Climatología de la distribución anual de la Zona de Mínima de Oxígeno (ZMO  $[O_2] < 20 \mu\text{mol L}^{-1}$ ). En color se representa el espesor que alcanza (m). En iso-líneas se representa la profundidad del borde superior de la ZMO en intervalos de 50 m. Los datos provienen de la base histórica del IMARPE, colectados por el Laboratorio de Hidroquímica de 1960 al 2008. Frente a Chicama y hacia el norte, cerca de la costa, la ausencia de datos nos indica que la plataforma se encuentra más oxigenada por la influencia del sistema ecuatorial que profundiza la ZMO ( $>150\text{-}200$  m). Tomado de IMARPE, 2014.

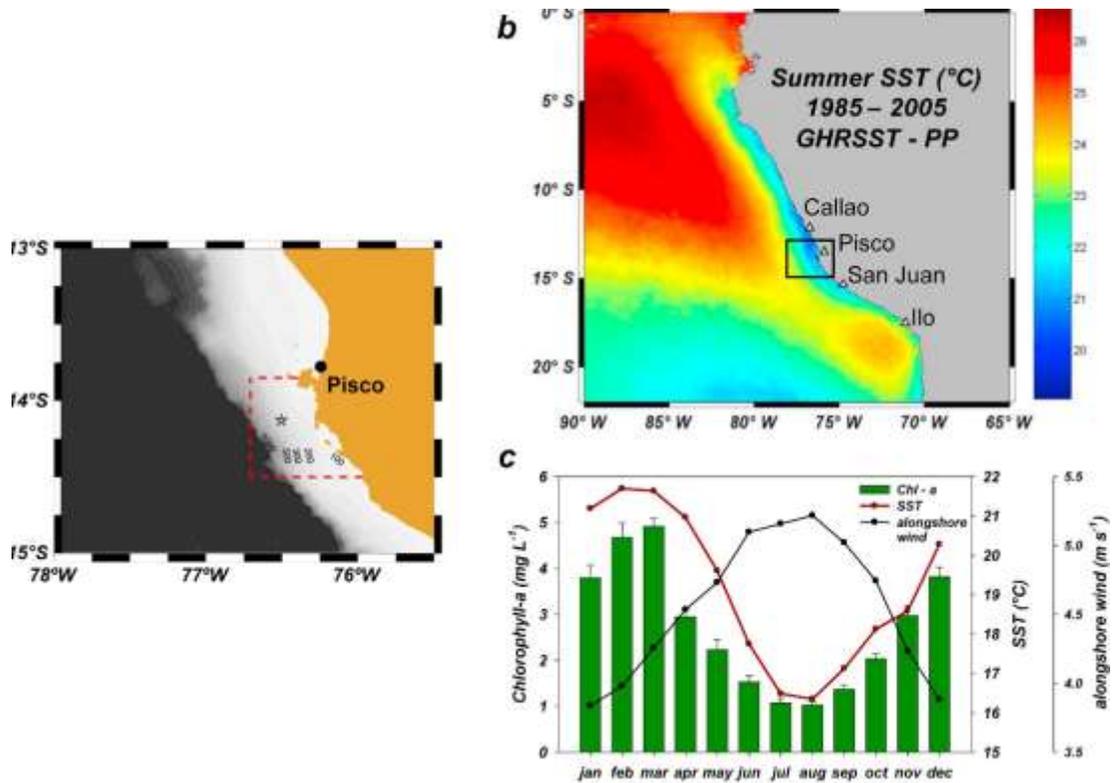


Figura 2. (a) Ubicación del boxcore B0406 (estrella); (b) Distribución de la temperatura superficial del mar frente a Perú (GHRSSST-PP: 1985-2005). El punto negro corresponde al boxcore. Los triángulos blancos indican los muelles de IMARPE; (c) Climatología de Chl-a basada en los datos de color de SeaWiFS (1997-2006) y de las velocidades del viento a lo largo de la costa (ECMWF-ERA40) dentro del área costera central representada con un cuadro rojo en la Figura 1a. La línea roja une la temperatura promedio mensual basada en el ajuste de mínimos cuadrados entre el muelle de Pisco y GHRSSST. Tomado de Gutiérrez et al. (2011).

### 2.2.2. Generalidades de la zona marina entre los 13° y 15° S

Las provincias de Pisco y Chincha ocupan la región delimitada entre los 13 y 15° de latitud y pertenecen al departamento de Ica. Esta parte costera tiene una gran importancia debido que coinciden con uno de los principales centros de afloramiento costero que se ubica entre los 14° y 16° S (Zuta y Guillén, 1970). Por otro lado, esta región presenta una de las más importantes Áreas Naturales Protegidas en el Perú: la Reserva Nacional de Paracas (RNP) (Figura 3), ubicada en gran parte en el distrito de Paracas y otra, en Salas, pertenecientes a las provincias de Pisco e Ica, respectivamente (web SERNANP). La RNP, Tiene una extensión de 335,000 hectáreas, las cuales se conforman por tierra firme e islas (35%) y ambientes marinos (65%, web SERNANP) entre los que se encuentran las Islas Ballestas (IMARPE, 2010).

Entre los 13° y 15°S también se ubica una serie de bahías tales como Pisco, Paracas, Lagunillas, Laguna Grande e Independencia. Esta última considerada como uno de los bancos naturales más importantes de la costa peruana, extrayéndose principalmente concha de abanico *Argopecten purpuratus* (Galindo et al., 2013). Todas estas bahías albergan gran diversidad biológica marina. En zonas más alejadas de la costa encontramos una serie de islas como Ballestas y la gran isla San Gallán, ubicadas al noroeste y al oeste de la península de Paracas, respectivamente, y hacia el sur en la bahía Independencia, se ubican las islas Independencia y Santa Rosa.

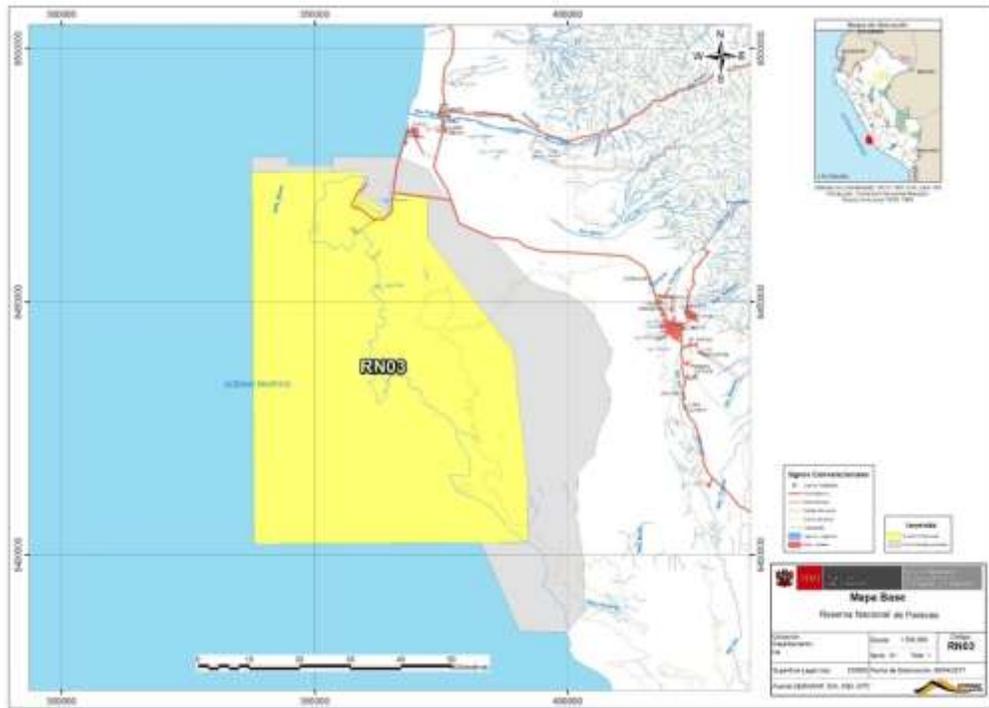


Figura 3. Mapa base de la Reserva Nacional de Paracas ubicado en las provincias de Pisco e Ica, Departamento de Ica. Tomado de la página web SERNANP.

### 2.2.2.1. Aspectos Oceanográficos:

#### FÍSICOS:

- **Vientos, afloramiento y circulación**

El promedio anual de la intensidad de los vientos es de  $8.5 \text{ m.s}^{-1}$  con una dirección predominante del Suroeste (Flores et al., 2004). Sin embargo, estos vientos exhiben una alta variabilidad con periodos de calmas o periodos de “vientos paracas” que se intensifican hasta  $18 \text{ m.s}^{-1}$  (Escobar, 1993 en Quijano, 2013) .

El afloramiento tiende a ser más intenso durante el invierno ya que presenta una relación directa con los vientos (Bakun, 1987). Las aguas afloradas, ricas en nutrientes y pobres en oxígeno son transportadas por la Corriente Costera Peruana en sentido sur a norte, impulsada por los vientos alisios. Las máximas intensidades de los vientos alisios (hasta  $12.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se presentan frente a la bahía Independencia (Quispe et al., 2010) y la isla San Gallán (PNUMA y CONAM, 2007). Las aguas afloradas llegan hasta la costa sur de Pisco y retrasan su circulación debido a la presencia de la península de Paracas, causando la mezcla de las aguas frías provenientes del sur con las aguas locales más cálidas (INRENA, 2002).

Al noreste de San Gallan, en el distrito de Paracas, se ubica la bahía de Paracas ( $13^{\circ}46' \text{ S}$  y  $13^{\circ}52' \text{ S}$  con  $76^{\circ}14' \text{ y } 76^{\circ}19' \text{ W}$ ; Mayo, 1987), de configuración semi-cerrada orientada hacia el norte (Figura 4). Esta bahía presenta profundidades someras con un promedio de 4 m y una profundidad máxima de 14m frente del puerto de San Martín (IMARPE 2010). Debido a su escasa profundidad, sus aguas son fácilmente calentadas por los rayos solares (PNUMA y CONAM, 2007; Sears, 1954).

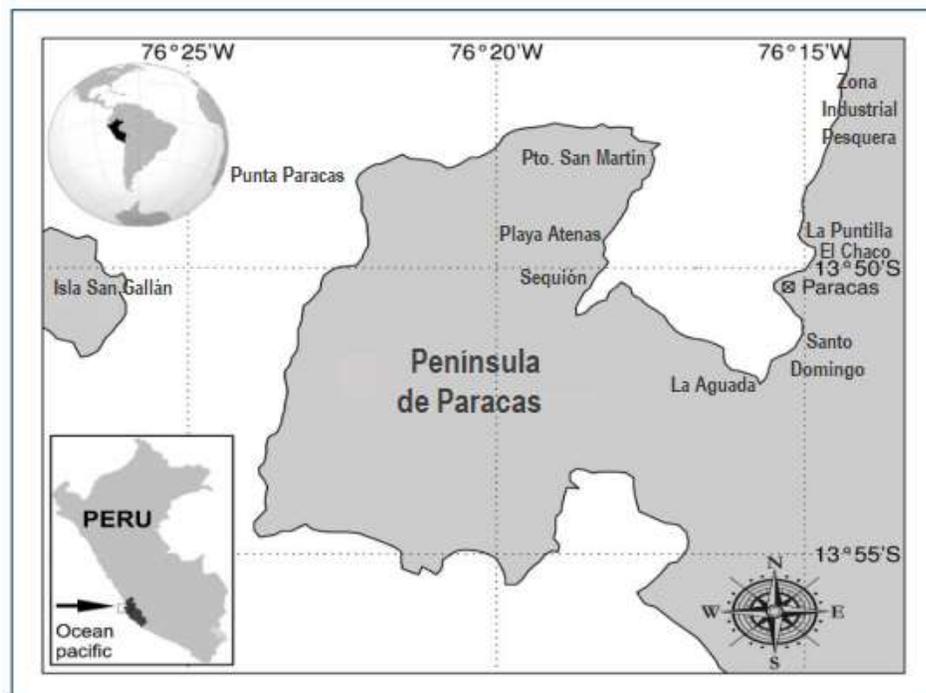


Figura 4. Mapa de ubicación de la Bahía de Paracas. Tomado y modificado de Flores (2016).

Una parte del agua aflorada que llega a la bahía de Paracas ingresa por el Oeste (desde Punta Paracas) formando una circulación anticiclónica (sentido antihorario) dentro de la bahía, bajo condiciones de vientos fuertes cuyas intensidades son mayores a  $10 \text{ ms}^{-1}$  (Flores et al., 2004) (Figura 5a). Esta circulación participaría del enfriamiento de la bahía por el ingreso de agua aflorada. Por otro lado, durante periodos de vientos débiles o moderados ( $<7 \text{ m s}^{-1}$ ) la circulación es ciclónica (sentido horario) y se caracteriza por un ingreso de agua relativamente cálida por el Norte pegado a la costa (desde Pisco hacia Paracas, figura 5b), y una salida del agua por el borde Oeste de la bahía (Flores et al., 2004). Estudios realizados en Pisco muestran que los vientos siguen un patrón estacional inverso en la parte oceánica (con mayores

intensidades durante el invierno) y la parte costera (con mayores intensidades durante los meses de verano y primavera) (Correa et al., 2014)

En 3 puntos de la zona litoral de las bahías Pisco y Paracas (frente a la desembocadura del río Pisco, Islas Ballestas y Punta Paracas) las corrientes marinas superficiales presentan una predominante dirección sur. En zonas donde la profundidad alcanza los 15 metros se presentan corrientes con dirección Norte. Mientras que, frente a la sección comprendida entre la Pampillas y Playa Lobería, la dirección es hacia el Oeste (INRENA, 2007 en PNUMA y CONAM, 2007).

En la barrera que forma las islas Chincha y la gran isla San Gallán, se aprecia notablemente la atípica dirección Sur de las corrientes. Esto probablemente se debe al fenómeno conocido como Eddies, que es un gran remolino o movimiento circular que rodea la barrera de islas y que interactúa con el sistema de corrientes al interior de la bahía de Paracas (PNUMA y CONAM, 2007).

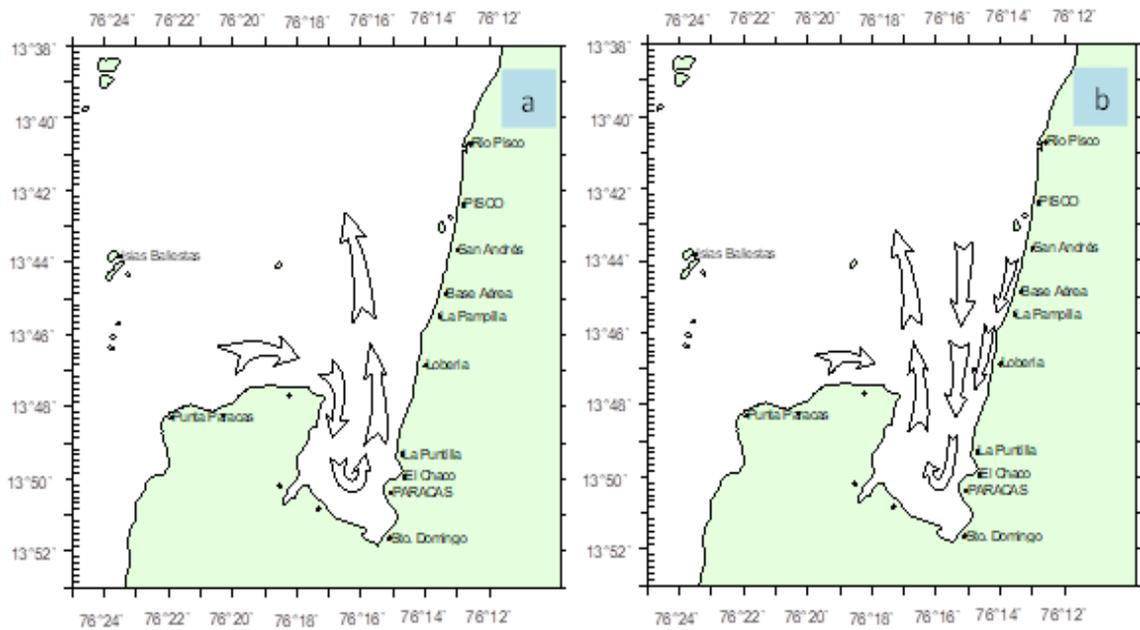


Figura 5. Circulación marina en la Bahía de Paracas. a) Con vientos fuertes y b) Con vientos débiles a moderados. Tomado de (Flores et al., 2004).

La bahía Independencia forma parte de la Reserva Nacional de Paracas y se extiende entre 14°07' - 14°21' S y 76°05' - 76°18' W, abarcando un área total de 15644.88 ha., de las cuales Laguna Grande ocupa 299.29 ha (Figura 6) (Quispe et al., 2010).

La batimetría en la zona norte de la bahía Independencia disminuye hacia el sur oeste a través del Canal La Trujillana (8.95 km de ancho), alcanzando profundidades entre 80 y 90 m (Quispe et al., 2010). En el centro de la bahía la batimetría es somera

debido a una extensión de baja profundidad entre la isla Independencia y la costa central de la bahía conocida como La Pampa cuyas profundidades están entre 10 a 20 m (Morón et al., 1988; Quispe et al., 2010). Esta zona es considerada la principal zona de extracción de *Argopecten purpuratus*. Desde La Pampa hacia el sur, se encuentra una amplia plataforma de entre 30 a 40 m de profundidad (Morón et al., 1988; Quispe et al., 2010), la cual tiende a aumentar cerca del Canal Serrate. El paso entre Pan de azúcar e Isla Santa Rosa mide 1.53 km y presenta una profundidad de 15 m y la distancia entre la Isla Santa Rosa y Morro Quemado es de 1.65 km con una profundidad de 25m aproximadamente (Figura 6) (Morón et al., 1988; Quispe et al., 2010).

La circulación de masas de agua superficiales en la bahía Independencia durante otoño e invierno presentan un gran flujo de ingreso por el canal La Trujillana, al norte de la isla Independencia; otro flujo de ingreso por el paso Serrate y entre la isla Santa Rosa e Independencia; y dos flujos someros con dirección sur, uno bordeando el continente y otro bordeando la isla Independencia. Las masas de agua de fondo se caracterizan también por tres flujos. Un flujo de salida al norte de la bahía por la parte más honda del canal La Trujillana; otro flujo en la parte central, con dirección suroeste para salir entre las islas Santa Rosa e Independencia; y un flujo menor en la parte sur de la bahía, por paso Serrate (Figura 7) (Sánchez et al., 1988). En la zona sur, la circulación presenta giros que en nivel de fondo favorecerían a conservar aguas con tiempo de residencia mayor que en la zona norte.

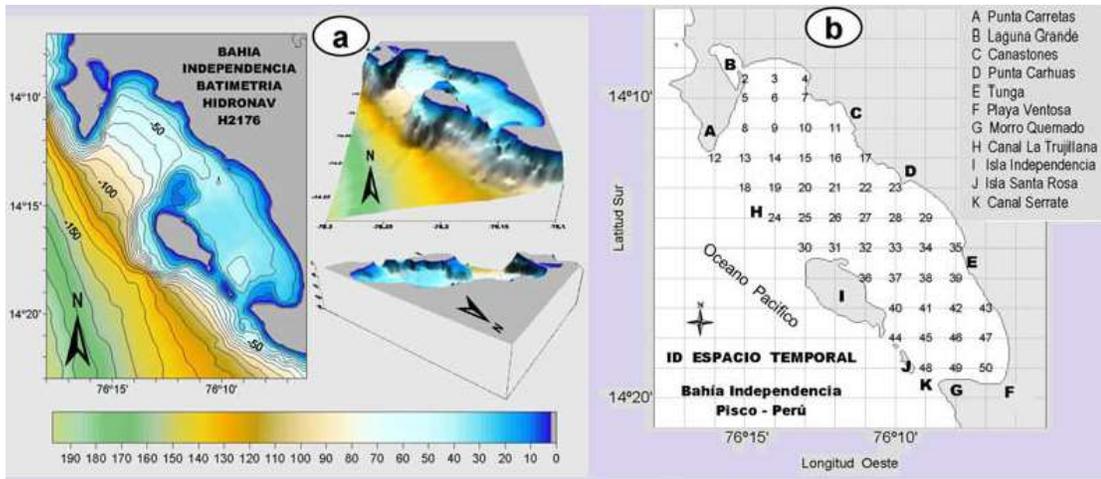


Figura 6. a) Ubicación y batimetría de la Bahía Independencia en 2D y 3D. b) Ubicación de los principales lugares de la Bahía Independencia (A-K). Tomado de Quispe et al. (2010).

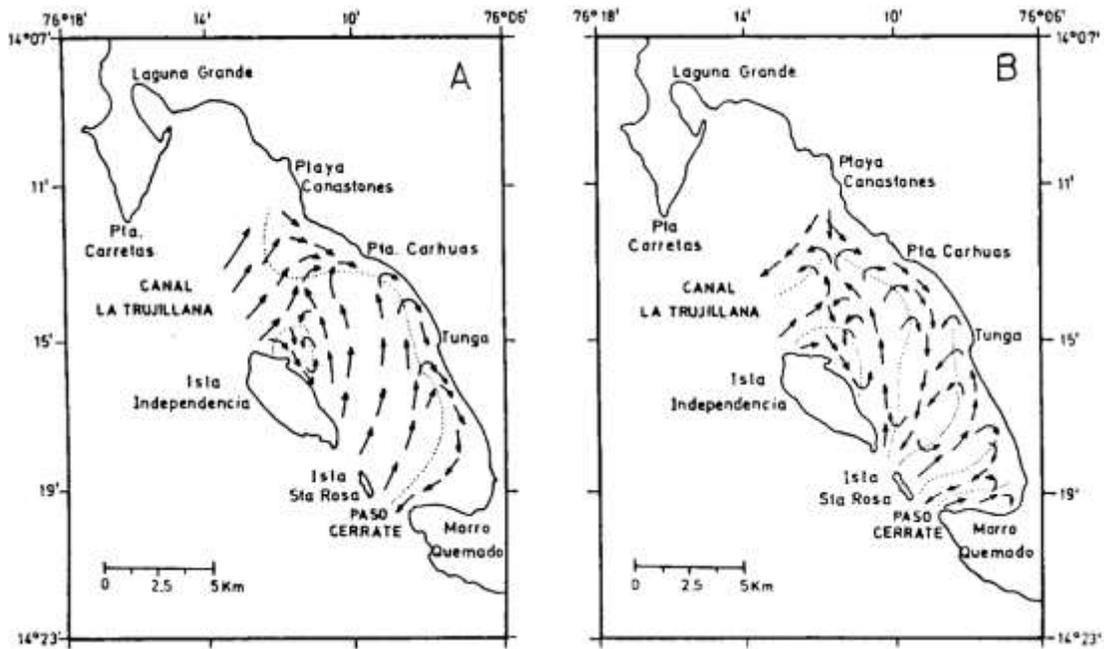


Figura 7. Esquema de circulación de masas de agua en la bahía Independencia. A) superficie y B) fondo, durante el invierno de 1986. Tomado de Sánchez et al. (1988).

- **Temperatura**

Las características de las masas de agua dentro de la bahía de Paracas difieren de las que se encuentran fuera. Al ingresar las aguas de afloramiento, frías y pobres en oxígeno, éstas se mezclan con aguas de mayor contenido de oxígeno y temperatura. Como resultado se obtienen aguas con temperaturas mayores a 16°C (Flores et al., 2004).

Al sur de la bahía de Paracas encontramos dos pequeñas bahías: El Sequión y La Aguada, las cuales son las que reciben menor renovación de agua por ser las más cerradas, sobre todo El Sequión (Mayo, 1987). En esta zona se han encontrado las temperaturas más frías ( $< 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en la Bahía de Paracas, mientras que, las temperaturas más cálidas ( $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), en las inmediaciones del puerto San Martín y el área comprendida entre la zona industrial pesquera y la playa El Chaco (IMARPE, 2010, ver Figura 4). En general, la bahía ha presentado valores de temperatura superficial entre 15 y 21°C, siendo los más altos en el extremo noreste con valores mayores a 19°C (Mayo, 1987; IMARPE, 2010), situación que se debió a los aportes de los efluentes de las plantas pesqueras ubicadas al norte de la Bahía antes del 2004 (Jacinto et al., 1996b).

En la bahía Independencia, la TSM promedio histórica es de 14.4°C (Rubio et al., 2001) y oscila entre 15.8 y 23.5°C (Quispe et al., 2010). La TSM presenta una variación latitudinal. Las temperaturas más altas se han encontrado al norte de la

bahía y bajas en la zona sur (Figura 8) (Segura et al., 1998; Rubio et al., 2001; Quispe et al., 2010). Esta distribución puede deberse al repliegue de aguas en la zona norte de la bahía por acción del viento, y que por efecto de la radiación solar y el contacto con aguas con mayor temperatura procedentes del área semi-cerrada de Laguna Grande, estaría favoreciendo al incremento de temperaturas (Quispe et al., 2010).

A nivel de fondo la temperatura varía entre 13.8 y 21°C (Quispe et al., 2010) y las zonas de mayor temperatura son de menor profundidad y están ubicadas próximas a las costas norte y centro de la bahía, así como en la zona de La Pampa, principal zona de extracción de *Argopecten purpuratus* (Figura 8).

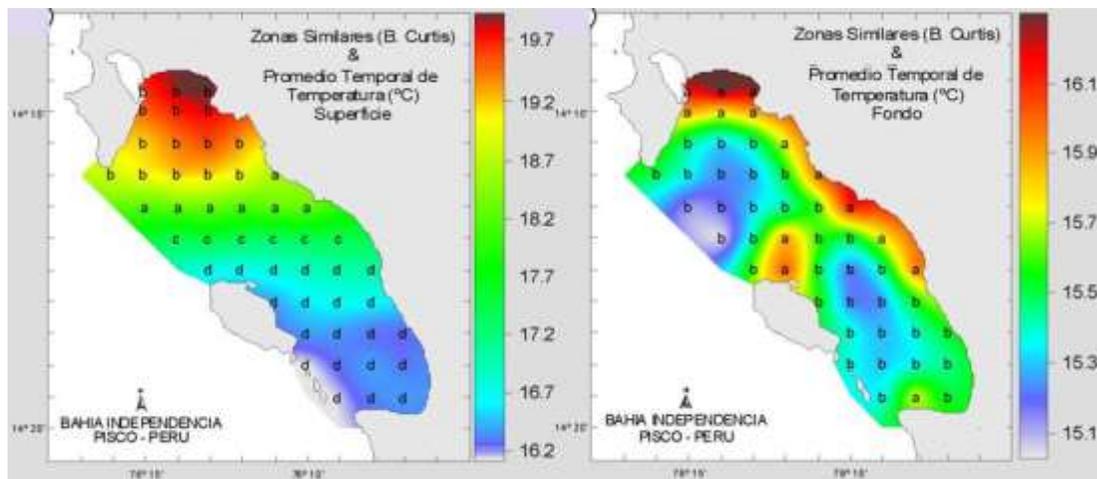


Figura 8. Variación espacial de la temperatura en la bahía Independencia. Izquierda: superficie y Derecha: fondo. Tomado de Quispe et al. (2010).

Las temperaturas en superficie y en fondo de la bahía Independencia han presentado correlaciones significativas, lo que evidencia patrones en la distribución espacial, sin embargo, en algunos periodos (primavera de 1998 y veranos de 1998, 1999 y 2004) la distribución espacial difiere entre ambos niveles (Figura 9).

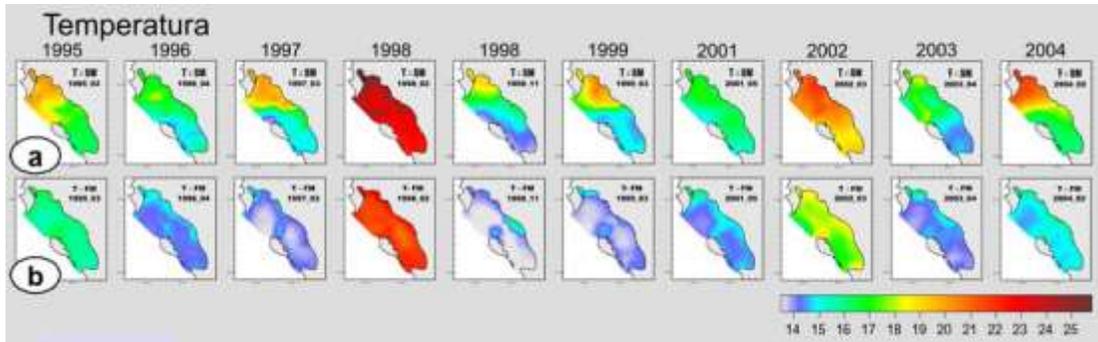


Figura 9. Variabilidad espacio-temporal de temperatura a) en superficie y b) en fondo. Tomado de Quispe et al. (2010).

## QUÍMICOS

- **Oxígeno**

En la bahía de Paracas, se registran aguas con concentraciones de oxígeno mayores a 2 ml L<sup>-1</sup> como resultado del ingreso de aguas de afloramiento (Flores et al., 2004). La solubilidad del oxígeno se ve afectada por el incremento de la temperatura asociado a fuentes antropogénicas (Jacinto et al., 1996). Así, antes del año 2004, las áreas de menor contenido de oxígeno se registraron alrededor de las zonas industriales con concentraciones promedio de 6 mgL<sup>-1</sup> y 3 mgL<sup>-1</sup> en la superficie y

el fondo, respectivamente (Jacinto et al., 1996b, PNUMA, 2007). Fuera de esta área se registraron valores mayores a 8 mgL<sup>-1</sup> (PNUMA, 2007).

## **BIOLÓGICOS**

El ingreso de aguas de afloramiento hacia la bahía Paracas también modifica la productividad debido al ingreso de nutrientes induciendo a la formación de “blooms” de fitoplancton hacia la costa (Zhang et al., 2010). El florecimiento fitoplanctónico también es favorecido por las descargas de material orgánico por parte de la zona industrial y doméstica. Ambos procesos desarrollan, posteriormente, condiciones anóxicas debido a la oxidación de la materia orgánica proveniente del fitoplancton (Cabello y Tam, 2002). Estos procesos naturales y antropogénicos tienen un efecto sinérgico sobre las mortandades y varazones de organismos marinos en la bahía de Paracas, los cuales se han visto favorecidos por los vientos Paracas (Jacinto, 2014). En el Perú se tiene episodios de mareas rojas principalmente durante las estaciones de verano y otoño (PRODUCE y IMARPE, 2010). Sin embargo, en la Bahía de Pisco se presentan mareas rojas incluso desde los meses de primavera. Entre el 2002 y 2008 se registraron 1099 casos de mareas rojas frente a Pisco, de los cuales el 80% (876 casos) tuvo lugar en la Bahía de Paracas. De estos 876 casos, 323 ocurrieron en el año 2005, muchas de ellas se dieron simultáneamente en diferentes partes de la bahía (Carbajo, 2009). Sin embargo, en años posteriores, la ocurrencia de mareas rojas disminuyó en un 85% en comparación a los registrados en el 2005.

Durante los eventos de varazones y mortandades de organismos marinos en la Bahía de Paracas, se ha registrado calentamiento de las aguas superficiales de las zonas afectadas (IMARPE, 2015). Asimismo, se han reportado grandes concentraciones de gases tóxicos, como los sulfuros y una débil circulación marina (Jacinto et al., 1996).

#### **2.2.2.2. Hidrografía:**

La zona de estudio se encuentra bajo la influencia del río Pisco, cuya descarga se realiza en la bahía de Pisco, dirigiéndose hacia la bahía de Paracas (PNUMA y CONAM, 2007) y disminuyendo la salinidad del agua de mar. Las máximas descargas se presentan en los meses de verano (INRENA, 2002, Flores et al., 2004). Durante el invierno el río Pisco mantiene un caudal escaso, predominando aguas relativamente frías provenientes del Sur del litoral peruano (PNUMA y CONAM, 2007). Se cree también existe un afluente subterráneo del río Ica que desemboca en la bahía de Paracas (INRENA, 2002).

#### **2.2.2.3. Aspectos sedimentológicos:**

Los sedimentos de la Bahía de Paracas presentan, predominantemente, texturas de tipo limosas, limo arcillas, arcillosas y fangosas (Mayo, 1987; Velazco, 2000) (Figura 10). La alta productividad biológica en la columna de agua, los residuos domésticos e industriales, los pellets fecales de los organismos bentónicos y los propios organismos del bentos al morir aportan altos contenidos de materia orgánica

(Velazco, 2000) hacia los sedimentos de la bahía. El contenido de materia orgánica se encuentra asociado al tipo de sedimento, encontrándose mayores cantidades en sedimentos más finos (limo y arcilla), pertenecientes al centro de la bahía (PRODUCE e IMARPE, 2010; Velazco, 2000) donde la energía de las corrientes es mucho menor. En esta misma zona y a mayor profundidad, la bahía presenta sedimentos fangosos con olor sulfhídrico, indicador de proceso de sulfato reducción en el sedimento, con presencia de bacterias filamentosas del género *Thioploca* y con escasa circulación (Velazco, 2000).

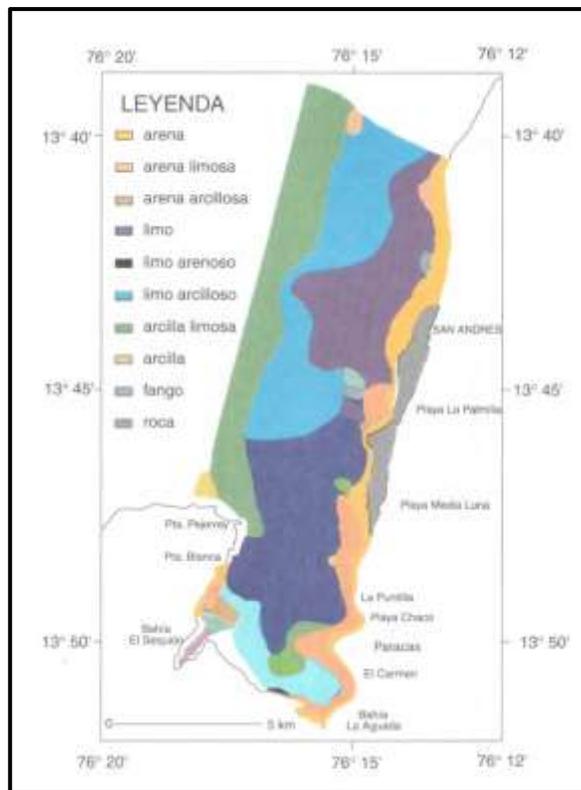


Figura 10. Distribución de texturas sedimentarias en la bahía de Paracas. Tomado de Velazco (2000)

En la zona del Sequión existe sedimento fangoso, el cual no presenta condiciones para desarrollar cultivos de fondo, siendo los sustratos de arena y grava los más apropiados (PRODUCE e IMARPE, 2010). En la zona de Atenas, donde se ubican las concesiones para maricultura, se aprecia arena gruesa, fragmentos de roca, restos de conchilla y presencia de conchas de abanico. Los menores valores de materia orgánica total ubicados en las zonas litorales de la bahía, está precisamente asociados a esto sedimentos arenosos localizados en zonas donde el régimen hidrodinámico es intenso y la presencia del oxígeno es mayor, permitiendo la mineralización de la materia orgánica (Velazco, 2000).

#### **2.2.2.4. Aspectos socioeconómicos:**

##### **Pesquería Industrial.**

La actividad económica más importante que se desarrollan en Pisco es la pesquería industrial de anchoveta que da pie a una gran industria pesquera dedicada a la elaboración de harina y aceite de pescado y que se desarrolla al norte de la Bahía de Paracas (Guzmán et al., 1997), generando empleo para los habitantes. Esta actividad industrial siempre ha presentado un fuerte impacto en la bahía por el vertimiento de sus efluentes, los cuales se producen por el agua de bombeo de pescado a las plantas y por el proceso de fabricación de los productos pesqueros (PRODUCE e IMARPE, 2010). En el 2004 se creó la Asociación de Productores de Harina de Pescado de Pisco (APROPISCO) con la finalidad de reducir la contaminación orgánica mediante

procesos físicos (Carbajo, 2009) Estas empresas realizan monitoreos periódicos y permanentes de la calidad acuática de la bahía y de los efluentes que vierten al mar por medio de un emisor submarino común de 13.8 km de extensión a 50 m de profundidad. Los monitoreos se realizaron semanalmente hasta el año 2007 y a partir del 2008, fue de manera mensual (PRODUCE e IMARPE, 2010).

En la bahía de Paracas se han logrado registrar en reiteradas oportunidades descoloración del mar (Aguirre et al., 2014, Flores, 2016), altas concentraciones de  $H_2S$  (Cabello y Tam, 2002), varazones de pequeños peces e invertebrados, mayormente asociados a presencia de mareas rojas (Jacinto et al., 1996b; Cabello y Tam., 2002; IMARPE, 2016b) y crecimiento de macroalgas en el litoral sur y norte de la ciudad de Pisco.

Tales situaciones se atribuyeron a los procesos de degradación de la materia orgánica (Sánchez et al., 1997) proveniente de los efluentes pesqueros, los cuales ocasionan niveles de anoxia en la columna de agua, y la formación de gases tóxicos como los sulfuros (Guzmán et al., 1997; Jacinto et al., 1996b, Sánchez et al., 1997). Comparando el nivel de oxígeno en superficie durante época de veda ( $3.29 - 10.55 \text{ ml.L}^{-1}$ ) (Jacinto et al., 1996a) y época de pesca ( $0 - 6.70 \text{ ml.L}^{-1}$ ) se puede aseverar que existe una alta depleción del oxígeno y formación de núcleos concéntricos de altos niveles de sulfuros (hasta  $35.67 \text{ } \mu\text{g-at } H_2S\text{-S.L}^{-1}$ ) que se asocian a la mayor concentración de solidos suspendidos totales (SST,  $79,2 \text{ mg.L}^{-1}$ ) (Sánchez et al., 1997 sacado de Velazco, 2000), producto de la actividad de la industria pesquera propia de

la zona (Guzmán et al., 1997). Como consecuencia, el ambiente se torna desfavorable para los recursos hidrobiológicos costeros ocasionando mortandades y posterior varazón de peces (Jacinto et al., 1996b).

En estudios realizados entre 1995 y 1997 se observó que las varazones de peces en Paracas han ocurrido mayormente durante la temporada de pesca, principalmente durante los meses de abril y mayo. La zona más frecuente de varazones ha sido la playa de Santo Domingo (13°51'-76°15') y la especie más afectada ha sido la lisa *Mugil cephalus* (Jacinto et al., 1996b). Sin embargo, el ambiente marino de la Bahía de Paracas muestra buenas condiciones de calidad de agua en épocas de veda pesquera, durante el mes de febrero (Guzmán et al., 1997; Jacinto et al., 1996a).

### **Pesquería Artesanal.**

La Pesquería artesanal es otra actividad que destaca en estas áreas, pues se concentran el 4.8% de las embarcaciones a nivel nacional desde Pisco a Lagunillas (Escudero, 1997 en Jacinto y Cabello, 1999).

San Andrés, El Chaco, Lagunilla y Laguna Grande son los centros de operaciones para el desembarque, acopio y comercialización de los productos marinos, peces y mariscos, en forma artesanal (INRENA, 2002). En San Andrés, Lagunilla y Laguna Grande-Rancherío predomina el desembarque de peces, mientras que en Laguna

Grande-Muelle y El Chaco el desembarque de mariscos cobra mayor importancia (INRENA, 2002).

El desembarque artesanal de anchoveta para consumo humano directo se realiza en el Complejo Pesquero (CP) La Puntilla ubicado en el distrito de Paracas. El muelle CP La Puntilla no cuenta con un sistema de desagüe adecuado, motivo por el cual la sanguaza proveniente del desembarque es vertida directamente al mar. Se ha calculado que alrededor de 250t diarias de sanguaza se vertieron al mar durante el 2010 con picos de más de 700t en noviembre del mismo año (Guardia et al., 2012) .

La pesquería artesanal es estacional y produce la migración temporal de pescadores de otras localidades en épocas de mayor abundancia de los recursos.

En la Bahía Independencia opera la flota marisquera artesanal de concha de abanico *Argopecten purpuratus* y almeja *Gari solida*. El recurso concha de abanico es extraído mayormente como semilla para luego ser transferidos a diferentes lugares de engorde (Galindo et al., 2013). La extracción de almeja en tamaño comercial se realiza especialmente en tres áreas de la bahía: La Pampa (norte), Pan de azúcar (centro) y El Ancla (sur). Las mayores biomásas y densidades promedio de almeja se han encontrado en el área de Pan de Azúcar con 232.8 g.m<sup>-2</sup> y 5.1 ind.m<sup>-2</sup> respectivamente (Donayre et al., 2015).

### **Actividades derivadas del petróleo.**

En la provincia de Pisco la empresa PLUSPETROL instaló la planta de fraccionamiento del gas natural licuado (GNL) en la zona de Playa Lobería. Hasta esta zona llega uno de los gaseoductos proveniente de la Planta de separación de Gas ubicada en Las Malvinas (Camisea, Urubamba, Cuzco). Asimismo, se encuentra la plataforma de embarque en Punta Lobería, utilizada para el transporte de los productos de combustibles obtenidos en la planta de fraccionamiento de Pisco hacia distintos puertos nacionales e internacionales (PRODUCE e IMARPE, 2010). En ese sentido, Paracas cuenta con el principal puerto “General San Martín” en donde han registrado incidentes de derrame de petróleo, como lo ocurrido en mayo del año 2008.

### **Actividades turísticas.**

El turismo constituye también un rubro económico importante. Unos de los principales atractivos son las Islas Ballestas donde habitan lobos marinos y se ubican a 11 mn de la Caleta El Chaco, Paracas (Cabello y Sánchez, 2006). Dentro de la Reserva Nacional de Paracas, las zonas turísticas son Islas Piedra Redonda y Tres Marías, playa Atenas, La Mina, Lagunillas, Raspón, La Casita, Yumaque, Mendieta, Salinas y Supay. Así mismo, los puntos para observación de fauna silvestre en playa La Aguada en la bahía de Paracas y Punta Arquillo (INRENA, 2002). La afluencia turística en la RNP se concentra en los primero cuatro meses del año, siendo febrero el mes con mayor cantidad de visitantes.

La Figura 11 muestra algunas de las principales actividades socioeconómicas que se llevan a cabo en las Bahías de Pisco y Paracas señalando las fuentes de contaminación en la zona.

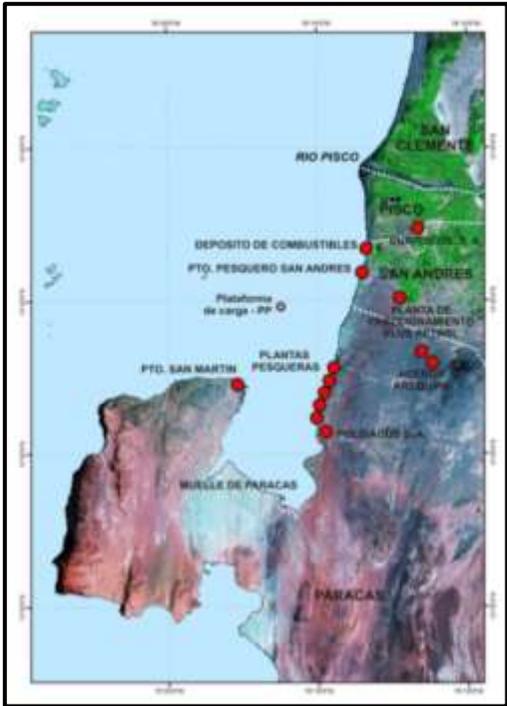


Figura 11. Fuentes potenciales de Contaminación (puntos rojos) en las bahías de Pisco y Paracas. Fuente: Informe CDSP, 2004, modificado por Jacinto, 2014).

### **2.2.3. Eventos de aguas blancas suscitados en la Bahía de Paracas y en otros ambientes costeros.**

Aguirre et al. (2014) y Aguirre (2016) reportaron 4 eventos de aguas blancas en la bahía de Paracas entre enero y marzo del 2013, durante los cuales se produjeron altas tasas de mortalidad (Figura 12) asociados a condiciones hipóxicas/anóxicas y disminución de la temperatura en la columna de agua acompañado de vientos favorables al afloramiento (Aguirre et al, 2014). Flores (2016) reportó varios días de presencia de estos eventos entre el 22 y 31 de marzo del 2015 (Figura 13), y una nueva aparición de aguas blancas el día 18 de abril, fecha en la cual se observaron flujos de  $H_2S$  desde el sedimento hacia la columna de agua, cuyos valores variaron entre  $0.621$  y  $2.825 \text{ mmol.m}^2. \text{d}^{-1}$ , aumentando hasta  $4.258 \text{ mmol.m}^2. \text{d}^{-1}$  a inicios de mayo. Estos valores resultaron ser inferiores a los reportados en las aguas del sistema de Benguela, en donde se determinaron flujos de hasta  $11.4 \text{ mmol.m}^2. \text{d}^{-1}$  (Brüchert et al., 2006) y en la plataforma continental peruana a  $12^\circ S$ , donde se estimó un flujo de  $12 \text{ mmol.m}^2. \text{d}^{-1}$  (Dale et al., 2016). El Instituto del Mar del Perú también reportó la presencia de aguas blancas entre el 20 y el 23 de mayo de 2016, además de percibirse en el ambiente un fuerte olor a  $H_2S$  (IMARPE, 2016c). Ocasionalmente, se presentaron floraciones algales durante los eventos de aguas blancas (IMARPE, 2016a).

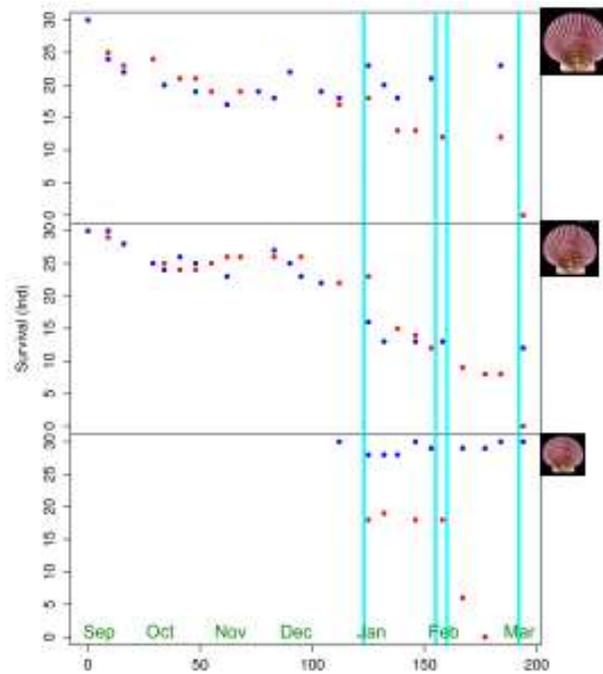


Figura 12. Supervivencia de concha de abanico de tres tamaños diferentes. Puntos rojos indican el cultivo en fondo y puntos azules, cultivo suspendido. Las líneas turquesas verticales señalan los días en los que se presentó aguas blancas en la bahía Paracas. Tomado de Aguirre et al., 2014.

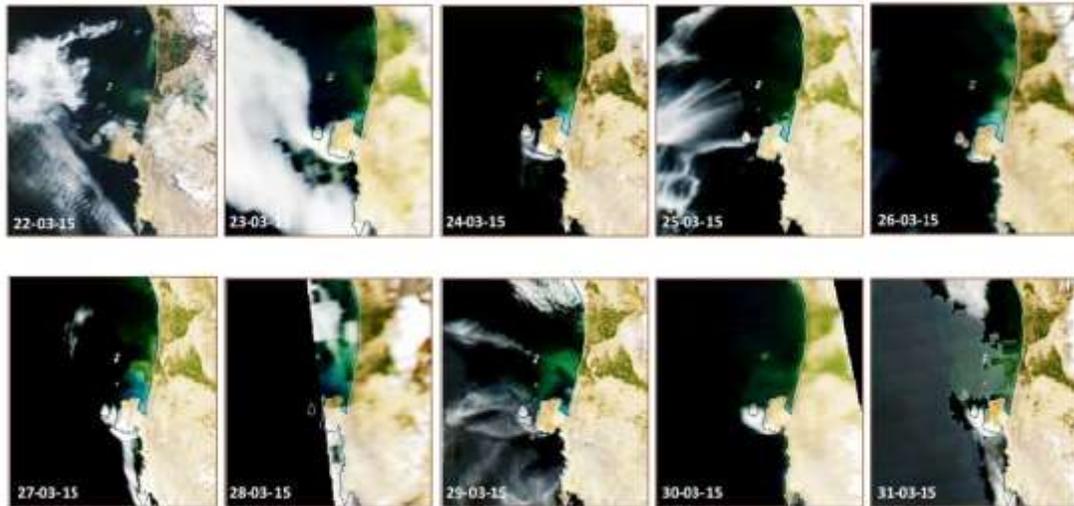


Figura 13. Imágenes satelitales de color verdadero provenientes de los sensores MODIS Aqua y Terra mostrando el evento de aguas blancas ocurrido en la Bahía de Paracas entre el 22 y 31 de marzo del 2015. Tomado de Flores (2016).

Otros eventos de aguas blancas mucho más grandes fueron registrados a las afueras de la bahía de Paracas y también frente a Callao con extensiones de más de 500 km<sup>2</sup>. Se evidenció que los eventos de aguas blancas fueron frecuentes ya que se observaron plumas en enero del 2009 y posteriormente en mayo del mismo año como lo muestra la Figura 14 (Schunck et al., 2013).

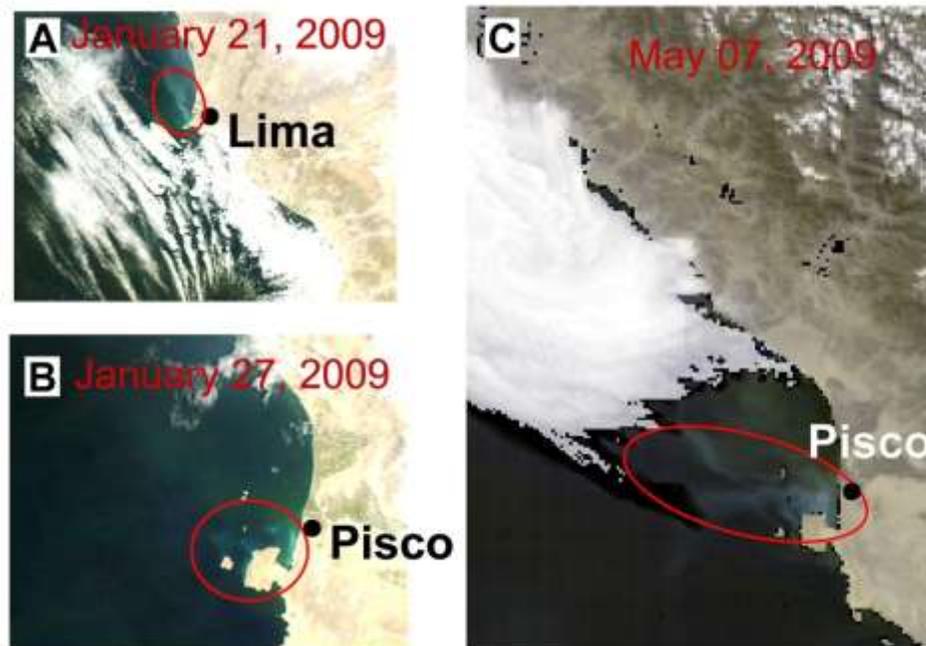


Figura 14. Imágenes satelitales de color real de eventos de aguas blancas frente a Callao y Pisco en enero y mayo del 2009. Tomado de Schunck et al. (2013).

En otras partes del mundo también se han registrado la presencia de eventos de aguas blancas. Los casos más frecuentes de ocurrencia de eventos de aguas blancas se han dado frente a Namibia en el sistema norte de la corriente de Benguela (Weeks et

al.,2002, Weeks et al., 2004, Ohde et al., 2007), asociados mayormente a mortandades masivas de recursos pesqueros (Hamukaya, 1998).

Se ha observado que estos eventos están relacionados a condiciones de bajas temperaturas, por lo que su ocurrencia se relaciona con un intenso afloramiento costero (Weeks et al., 2004, ver Figura 15). Lo cual se ve apoyado por el comportamiento estacional (entre los años 2002-2012) de la actividad de aguas blancas reportado recientemente por Ohde y Dadou (2018), en donde el principal pico se da en el verano tardío y otoño temprano, justamente al inicio del ciclo anual del afloramiento, causado por el incremento de los vientos en dirección al Ecuador a lo largo de la costa (Figura 16). Asimismo, la ocurrencia de aguas blancas se ha visto asociada a la liberación de gas biogénico ( $H_2S + CH_4$ ) provocado por procesos océano atmosféricos (Brüchert et al., 2009; Emeis, et al., 2004).

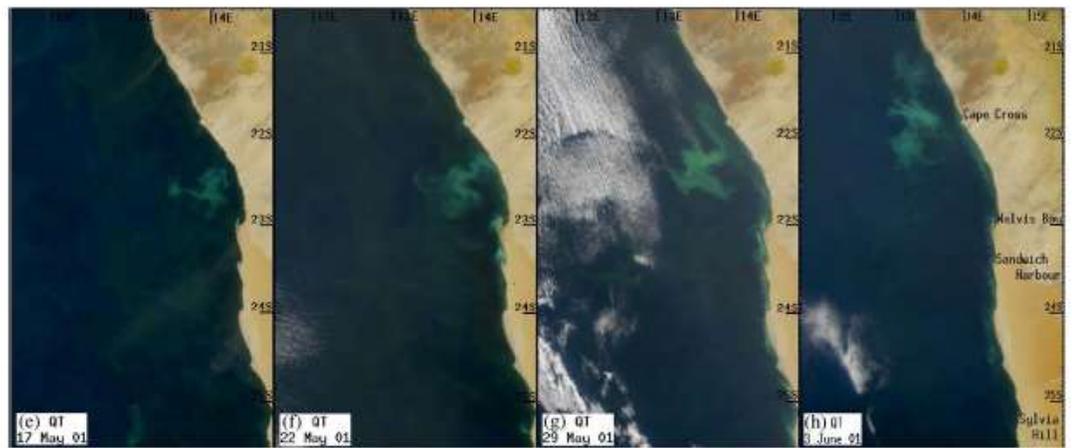
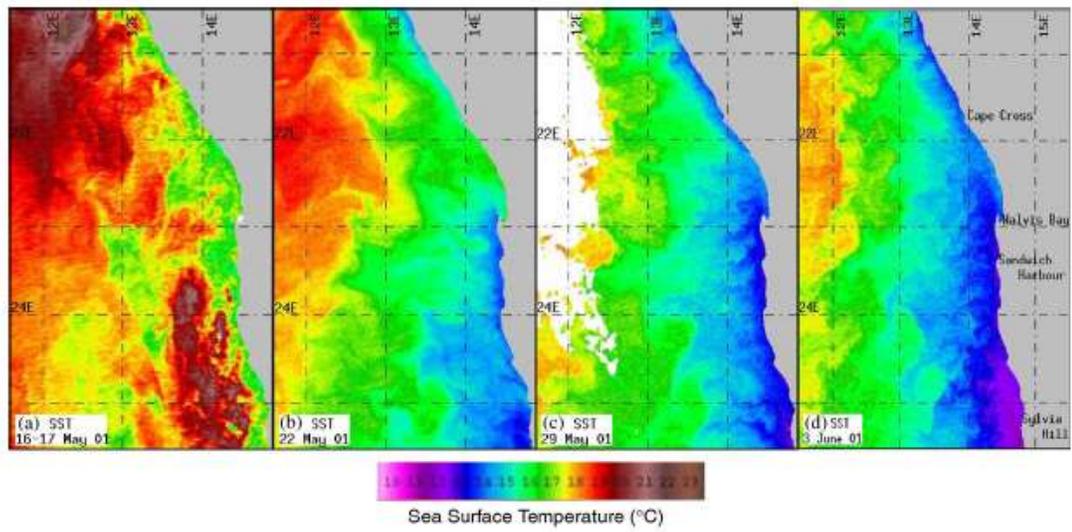


Figura 15. Imágenes satelitales de temperatura superficial del mar (TSM) provenientes de AVHRR (a-d) y de plumas de aguas blancas provenientes de SeaWiFS (e-h). Tomado de Weeks et al. (2004).

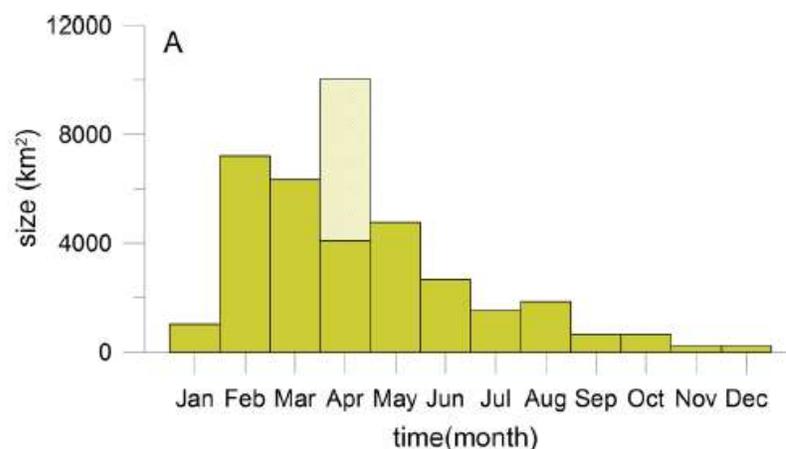


Figura 16. Variabilidad estacional del tamaño de las plumas de sulfuro derivado de toda la data MERIS de los años 2002 al 2012. Tomado de Ohde y Dadou (2018).

La laguna de Thau, localizada al sur de Francia, es otro sistema donde se ha presenciado eventos de aguas blancas (Figura 17) acompañados de estados anóxicos. Estos se desarrollaron luego de una ruptura de la estratificación de la columna de agua causada por la intensificación de los vientos. La estratificación y la poca circulación de agua, sumado a las temperaturas cálidas de la estación favorecieron la eutrofización de la laguna. Posteriormente, las células fitoplanctónicas muertas sufrieron descomposición bacteriana en el fondo de la laguna, disminuyendo los niveles de oxígeno (Minguelli et al., 2011).

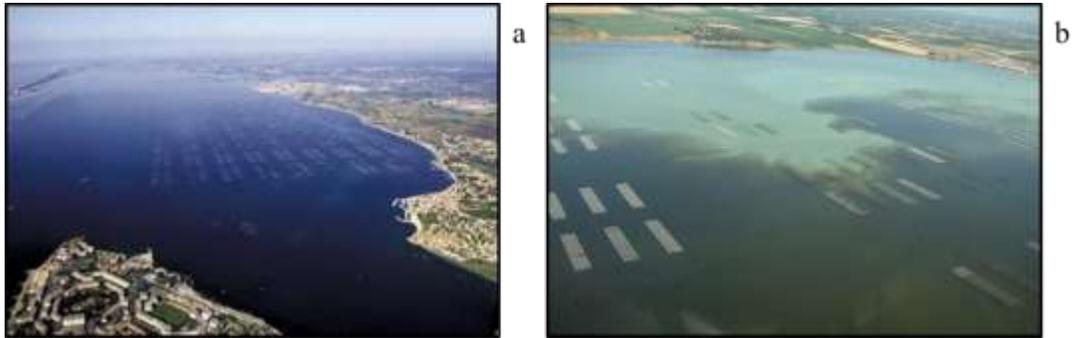


Figura 17. Laguna de Thau. a) En condiciones normales, b) En condiciones de aguas blancas. Tomado de Google.

La Bahía de Concepción, en Chile, ha mostrado una recurrente coloración turquesa durante el verano austral. La Figura 18 muestra la coloración turquesa, característica de plumas de aguas blancas, en la bahía de Concepción durante el verano austral del 2003. La pluma turquesa se expande desde la parte suroeste de la bahía, indicando que esta zona es la fuente de la descoloración, justo al frente del puerto de Talcahuano (Gallardo y Espinoza, 2008).



Figura 18. Fotografía de la Bahía de Concepción (vista desde el noreste) con presencia de coloraciones turquesas durante el verano austral del 2003. Foto: Didier Rousseau, 14 enero 2003. Tomado de Gallardo y Espinoza, 2008.

Durante los periodos que duran estos eventos, muchos pescadores de la bahía han manifestado que sus capturas de anchoveta y sardina disminuyeron o fueron nulas (Gallardo y Espinoza, 2008).

Los registros científicos en Chile muestran evidencias de que los eventos de aguas blancas se han venido presentando en la fase fría (La Niña) o en condiciones frías normales del Ciclo ENSO, luego de un evento El Niño (Gallardo y Espinoza, 2008).

#### **2.2.4. Remineralización de la Materia orgánica, Ciclo del Azufre y la Formación de aguas blancas**

##### 2.2.4.1. Ciclo del azufre:

Debido a la pobre concentración de oxígeno en la gran mayoría de los sistemas de afloramiento, el principal proceso de degradación de materia orgánica en el sedimento marino es la reducción del sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) o sulfato reducción (Fossing, 1990). Este proceso produce principalmente sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) el cual puede acumularse en grandes cantidades en los sedimentos anóxicos (Jorgensen y Postgate, 1982). Posteriormente, tras un proceso de oxidación de  $\text{H}_2\text{S}$  se forman partículas de  $\text{S}^0$ , propio de las aguas blancas, (Weeks et al., 2002). Por ello es importante comprender el ciclo del azufre para tener un mejor conocimiento de los procesos de

reducción del sulfato y oxidación del H<sub>2</sub>S, los cuales son procesos que modulan las concentraciones de H<sub>2</sub>S en el mar.

### **Reducción del sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>):**

La reducción de sulfato en el sedimento puede darse por la acción de bacterias sulfatorreductoras, propias de ambientes anaeróbicos (Sievert et al., 2007). En zonas de afloramiento, las tasas más altas de reducción del sulfato bacteriano se dan justo debajo de la interfase agua-sedimento (Fossing et al., 1990), y la presencia de una ZMO reduce el espesor de la capa óxica superficial del sedimento a solo mm. o cm. (Jorgensen y Kasten, 2006). Sin embargo, en capas más profundas del sedimento, la reducción del sulfato puede darse por la reacción con el metano, el cual es oxidado a CO<sub>2</sub> y el sulfato reducido a H<sub>2</sub>S (Jorgensen y Kasten, 2006). La reacción general de la reducción del sulfato está dada por:  $2[\text{CH}_2\text{O}] + \text{SO}_4^{-2} \rightarrow 2\text{HCO}_3^{1-} + \text{H}_2\text{S}$ . Se ha sugerido también que la formación de H<sub>2</sub>S podría tener lugar en la columna de aguas oceánicas debido a la reducción de partículas orgánicas por microorganismos pelágicos (Dugdale et al., 1977; Shunck et al., 2013), incluso se ha comprobado un ciclo críptico del azufre presente en aguas superficiales en la ZMO frente a Chile, demostrando la existencia de formación de H<sub>2</sub>S a partir de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en presencia de aceptores de electrones mucho más favorables como el nitrato y nitrito (Canfield et al., 2010). Sin embargo, la mayor fuente de H<sub>2</sub>S presente en la columna de agua durante los eventos de aguas blancas provienen del sedimento (Bruchert et al., 2003; Lavik et al., 2009; Schunck et al., 2013, Canfield et al., 2010), tal y como se observa

en la distribución vertical de  $H_2S$  frente a Perú en la Figura 19. Además, se ha encontrado que los ambientes someros pueden actuar como fuente de  $H_2S$ , con flujos desde el sedimento hacia la columna de agua, tal es el caso de la bahía de Paracas en donde se ha determinado una producción neta de  $0.575 \text{ mmol.m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  entre abril y junio del 2015 (Flores, 2016).

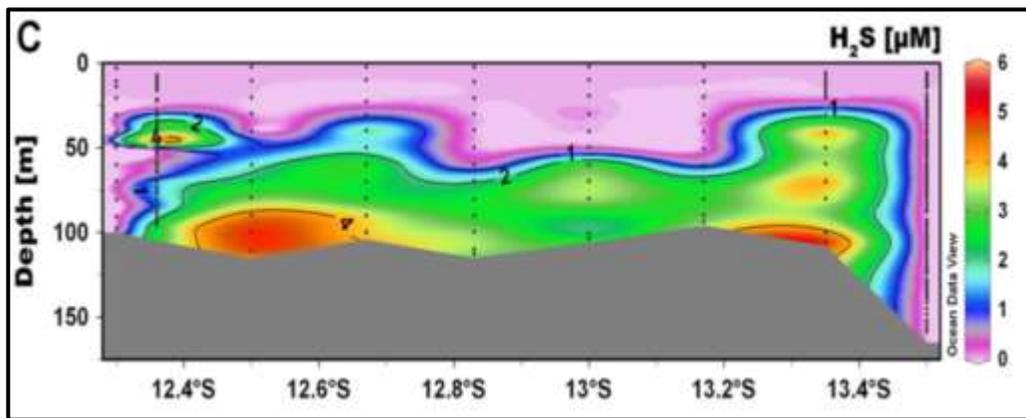


Figura 19. Distribución vertical de  $H_2S$  en la zona Callao-Paracas, donde las mayores acumulaciones de  $H_2S$  se dan en el fondo. Tomado de Schunck et al., 2013.

### **Oxidación del sulfuro de Hidrógeno ( $H_2S$ ):**

El  $H_2S$  formado en el sedimento puede sufrir oxidación química por distintos agentes oxidantes como el oxígeno, produciendo  $S^0$  o por hierro ( $Fe^{2+}$ ) y manganeso ( $Mn^{2+}$ ) (Emeis, et al., 1990 en Solis et al., 2012) (Figura 20). También, el  $H_2S$  puede sufrir oxidación biológica por bacterias oxidantes de sulfuro, pertenecientes a los géneros *Beggiatoa*, *Thioploca* y *Thiomargarita* (Sievert et al., 2007). El  $H_2S$  que

toman del sedimento resulta ser una fuente de energía para estas bacterias al llevar a cabo la oxidación de este compuesto por medio de nitrato que toman del agua de mar y que almacenan en su interior. Durante este proceso de oxidación biológica el  $\text{H}_2\text{S}$  es transformado a sulfato y el nitrato, a amonio o nitrógeno molecular (Levin, 2002). De esta manera, estas bacterias cumplen un rol detoxificante del medio cargado en  $\text{H}_2\text{S}$  y se encuentran presentes en forma de alfombras densas sobre los sedimentos de zonas de afloramiento costero como Chile, Perú y Namibia. Estos procesos de oxidación de  $\text{H}_2\text{S}$  disminuyen su concentración.

Durante los eventos de aguas blancas suscitados en Namibia, los gránulos de azufre elemental ( $\text{S}^0$ ) presente en la superficie del mar se le atribuyeron a la oxidación del  $\text{H}_2\text{S}$  en contacto con el oxígeno en aguas superficiales (Weeks et al., 2002). En el Mar Negro, se encontró que la oxidación de  $\text{H}_2\text{S}$  por oxígeno resultó en tiosulfato y sulfato. Otras evidencias sugieren que el azufre elemental ( $\text{S}^0$ ) encontrado se produjo probablemente por la oxidación de bacterias verdes fototróficas de azufre abundantes en la quimioclina.

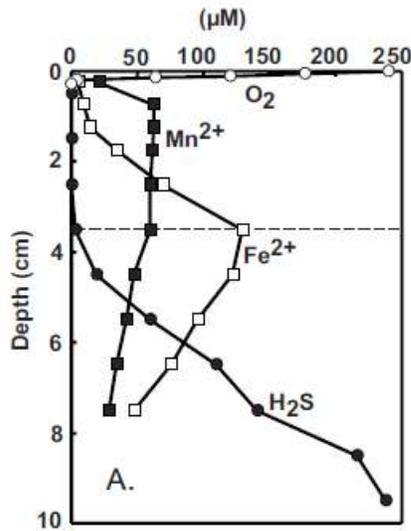


Figura 20. Perfiles de manganeso, hierro y H<sub>2</sub>S disuelto en el agua intersticial del sedimento marino costero. Tomado de Jorgensen y Nelson en Amend et al., 2004).

Los procesos de oxidación regresan aproximadamente el 90% del H<sub>2</sub>S a sulfato (Jorgensen y Kasten, 2006). El 10% restante de H<sub>2</sub>S es enterrado en el sedimento mediante la reacción anóxica con minerales de hierro como los (oxi)hidróxidos de hierro (FeOOH) produciéndose así, la formación de pirita, FeS<sub>2</sub> (Figura 21). La pirita es un mineral estable, pero puede ser también oxidado hacia sulfato por oxígeno u óxidos de metal, cerrando así el ciclo del azufre.

La oxidación total del H<sub>2</sub>S significa su transformación hasta sulfato. Sin embargo, en capas superficiales óxicas de la columna de agua, el H<sub>2</sub>S no puede llegar a oxidarse completamente, sino sólo hasta tiosulfato o S<sup>0</sup>. Ello depende de factores como la temperatura del agua, pH, oxígeno disuelto, salinidad, entre otros (Millero et al., 1987). Por ejemplo, la tasa de oxidación del H<sub>2</sub>S en el agua de mar es catalizada por



#### 2.2.4.2. Formación de aguas blancas:

Los mayores flujos de H<sub>2</sub>S hacia la columna de agua ocurren mayormente en los ambientes costeros con alta cantidad de materia orgánica como las bahías, fiordos, o estuarios (Brüchert et al., 2003). Estos sistemas se caracterizan generalmente por i) escaso intercambio de agua, ii) fuerte estratificación, iii) sedimentos anóxicos y iv) una gran cantidad de sulfuro que reduce los óxidos de hierro y manganeso (Brüchert et al., 2003; Jorgensen y Kasten, 2006).

La liberación de H<sub>2</sub>S desde el fondo hacia la columna de agua puede ser catalizada por ciertos mecanismos que involucran factores meteorológicos y oceanográficos (Emeis et al., 2004; Weeks et al., 2004), favoreciendo la formación de aguas blancas.

Uno de los mecanismos clave que permite la formación de aguas blancas en bahías semicerradas es la ruptura de la estratificación de la columna de agua debido a la intensificación de los vientos (Emeis et al., 2004; Luther et al., 2004; Mingheli et al., 2011). Durante un periodo de estratificación (e.g. que coincide con una alta radiación solar y calmas de viento, y/o aporte de agua “dulce” por los ríos o lluvias, etc), el sistema se torna anóxico y se favorece la formación de H<sub>2</sub>S en el fondo debido a la degradación de la materia orgánica y la débil mezcla vertical. Este H<sub>2</sub>S acumulado es liberado hacia la columna de agua debido a la mezcla vertical que ocurre cuando se rompe la estratificación debido a la intensificación de los vientos (Figura 22).

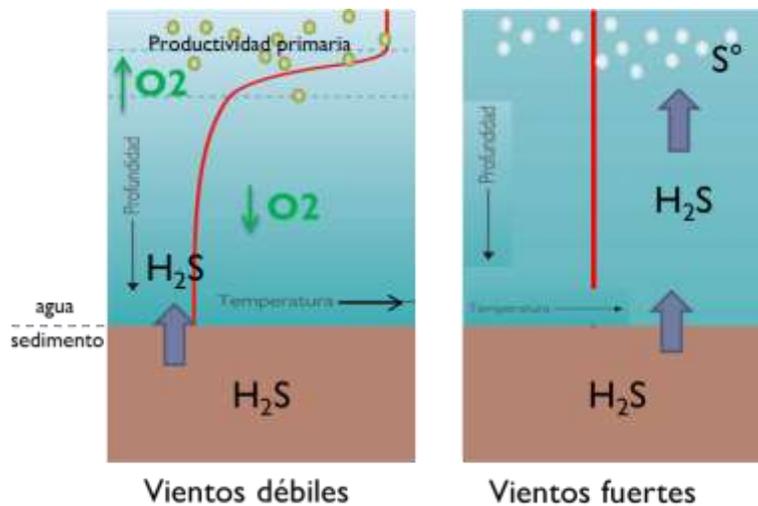


Figura 22. Esquema de la formación de aguas blancas luego de una mezcla vertical, originada por la intensificación de vientos, que rompe la condición de estratificación, en la cual se ve favorecida la formación de  $H_2S$ . Elaboración propia

Otros mecanismos que pueden favorecer la liberación de  $H_2S$  hacia la columna de agua y la posterior formación de aguas blancas involucran una disminución en la presión hidrostática en la columna de agua (Emeis et al., 2004; Weeks et al., 2004). Estos cambios que pueden ser inducidos por variaciones de la presión atmosférica y del transporte de Ekman, pueden ejercer un efecto sobre la interfase agua-sedimento, permitiendo la liberación de  $H_2S$ , acompañado de metano, atrapados en el sedimento (Emeis et al., 2004; Weeks et al., 2004). Cabe resaltar que estos mecanismos podrían ser válidos sólo para ambientes de poca profundidad, ya que, en ambientes muy profundos, un cambio de presión en las capas superficiales no tiene impacto en las capas más profundas (Alexis Chaigneau, com. pers).

### **2.2.5. Herramientas de teledetección para el estudio de los eventos de aguas blancas: sensores satelitales.**

Los sensores satelitales se han convertido en una herramienta básica en la investigación oceanográfica actual. Algunas de las propiedades que pueden medir los distintos tipos de sensores a bordo de los satélites son la temperatura superficial del mar (sensores térmicos y de microondas), la altura de las superficies de los océanos y las mareas (altímetros), la concentración del fitoplancton y producción primaria (sensores de color), entre otros. (García-Weil et al, en García-Soto, 2009).

Los sensores de color resultan ser los adecuados para estudiar los diversos constituyentes que le confieren cierta coloración a la superficie del océano. Estos son sensores ópticos pasivos capaces de captar la señal electromagnética visible del océano y sus constituyentes (Figura 23) permitiendo detectar variaciones de color asociadas a la abundancia y composición del fitoplancton, la materia orgánica disuelta y el material particulado en suspensión (García-Soto, et al. en García-Soto, 2009).

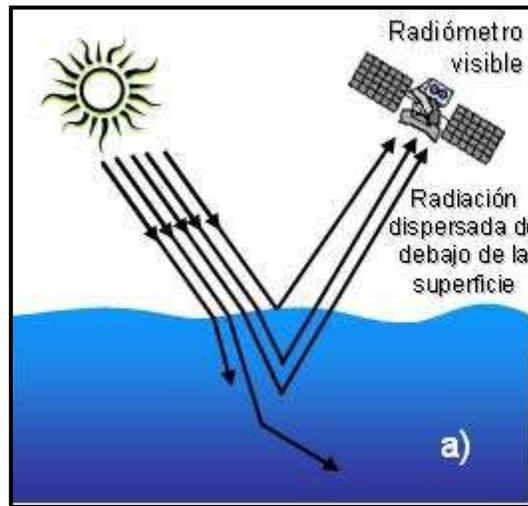


Figura 23. Ilustración indicando cómo se mide el color del océano, una de las propiedades básicas de los océanos que pueden determinarse desde el espacio. Tomado y modificado de García-Weil et al, 2009.

Cuando se estudia el color del océano mediante la teledetección, el medio marino se divide en aguas de Caso 1 y Caso 2 (Morel y Prieur, 1977, en Moore et al., 2012). Las aguas de Caso 1 son aquellas cuyas propiedades ópticas dependen principalmente del fitoplancton. La clorofila *a* del fitoplancton reduce la reflectancia del agua de mar en longitudes de onda inferiores a 540nm y la incrementa ligeramente en longitudes de onda mayores (Sathyendranath y Morel, 1983 en García-Soto et al., 2009. Figura 25a). Estas aguas se limitan principalmente a regiones puramente oceánicas donde la sustancias particuladas y disueltas son principalmente de origen planctónico. En este sentido, la concentración de clorofila puede variar desde valores muy altos ( $5-30 \text{ mg m}^{-3}$ ) durante las floraciones primaverales y en las regiones de afloramiento (Mauritania, Benguela, Perú, California) hasta valores muy bajos ( $0,02 \text{ mg m}^{-3}$ ) en el centro de los giros subtropicales.

Existe un caso especial de aguas dominadas por el fitoplancton, los blooms de cocolitofóridos que ha sido clasificado como Caso 1 anómalo (Gordon et al., 1988, citado en García-Soto et al., 2009). Este grupo taxonómico se caracteriza por presentar placas externas de carbonato cálcico altamente reflectantes que liberadas al medio en concentraciones muy elevadas colorean el medio de una tonalidad blanquecina (Figura 24) (García-Soto et al., 1995, en García-Soto et al., 2009).

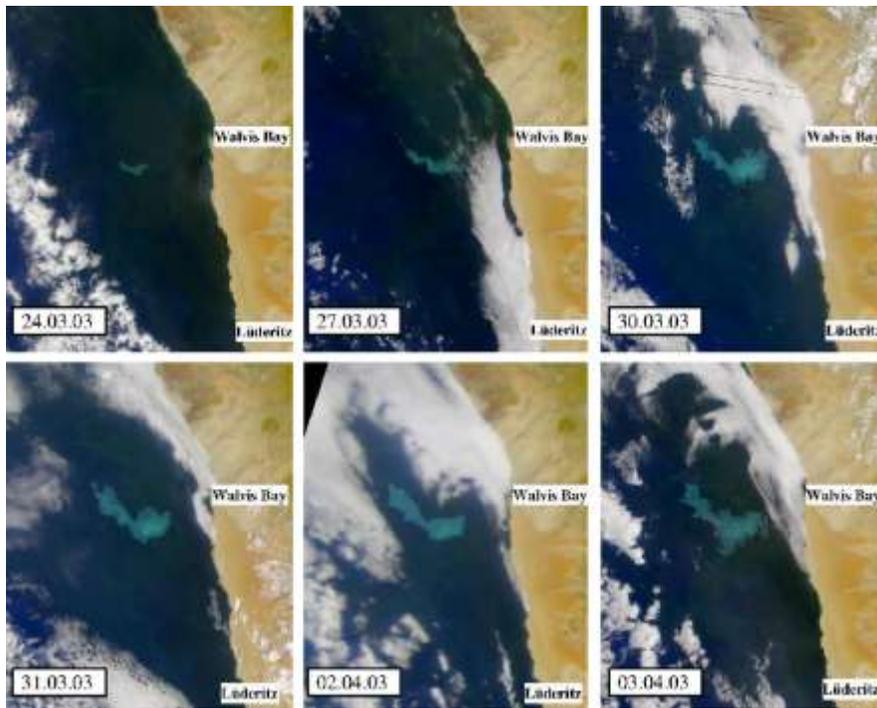


Figura 24. Serie de tiempo de imágenes SeaWiFS de color casi real del 24 de marzo al 3 de abril del 2003 de un Bloom de cocolitofóridos frente a Namibia. Tomado de Siegel et al., 2007.

Las aguas de Caso 2 se limitan principalmente a la región costera donde, en adición a fitoplancton, el color de las aguas está influenciado por la materia orgánica disuelta de origen terrestre en degradación (sustancia amarilla o *gelbstoff*) y la materia inorgánica particulada en suspensión (García-Soto et al., 2009). En esta clasificación se encuentran las plumas de aguas blancas debido a la presencia de partículas de S<sup>o</sup> suspendido en la superficie del océano (Weeks et al., 2002). En las aguas dominadas por el *gelbstoff* predomina la absorción y presentan reflectancias muy bajas. Por el contrario, en las aguas dominadas por sedimentos en suspensión, como las aguas blancas, predomina la dispersión y se caracterizan por reflectancias muy altas (García-Soto et al., 2009).

Ejemplos de los espectros característicos de los 3 tipos de aguas mencionados (bloom algal, material suspendido y plumas de sulfuro o aguas blancas) pueden observarse en la distinción que realizaron Ohde et al. (2007) con el objetivo de desarrollar un algoritmo de identificación de plumas sulfurosas turquesas-blanquecinas o aguas blancas en las costas de Namibia en base a sus características espectrales (Figura 25).

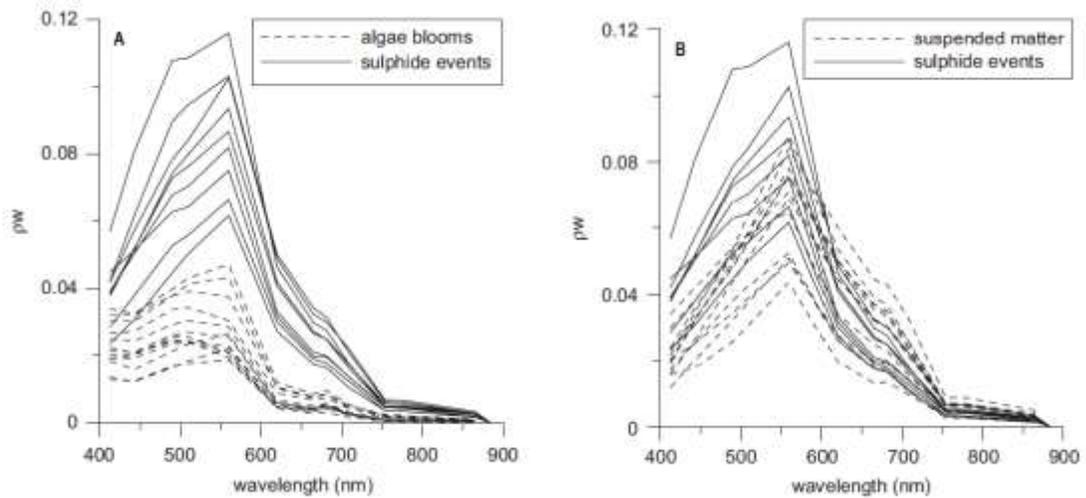


Figura 25. Comparación de las características espectrales de plumas de sulfuro con blooms algales (A) y material suspendido de origen terrestre (B). Tomado de Ohde et al., 2007.

La información obtenida a partir de sensores de color del mar se han aplicado generalmente al estudio del fitoplancton y la producción primaria limitándose a la identificación y monitoreo de blooms algales (Kahru et al., 2004), incluidos los cocolitofóridos (Weeks et al., 2004, Siegel et al., 2007, Moore et al., 2012), a la determinación de la concentración de clorofila a nivel global utilizando sensores remotos como SeaWiFS, MERIS o MODIS. Esta es sin duda la contribución más importante de los satélites a la oceanografía biológica.

Sin embargo, recientes esfuerzos se han realizado para investigar los eventos sulfurosos. Estos estudios se han realizado principalmente en la plataforma del sistema de afloramiento de Benguela utilizando sensores SeaWiFS y MERIS (Weeks et al., 2004, Ohde et al., 2007) y unos pocos, aunque de manera indirecta, se han

realizado en las costas frente a Perú (Schunck et al., 2013, Flores, 2016) utilizando sensores MODIS, permitiendo observar que estos eventos ocurren con mucha más frecuencia de la que se creía (Schunck et al., 2013). En este sentido, el uso de herramientas satelitales está mejorando el conocimiento que se tiene sobre los eventos de aguas blancas y resulta ser una fuente necesaria para conocer su dinámica espacial y temporal.

### **2.3. JUSTIFICACION DEL ESTUDIO**

En la región 13-15°S la pesca es considerada una de las actividades económicas más importantes para la población por la generación de empleo. De manera artesanal, la pesquería de peces e invertebrados sostiene la demanda alimenticia de la zona, mientras que, industrialmente, se obtienen productos como harina de pescado para la exportación. Asimismo, en la zona de estudio se encuentran ciertas bahías que cumplen una labor ecosistémica importante, albergando muchas especies marinas y funcionando como bancos naturales, generalmente de invertebrados marinos. En ese sentido, debido a las condiciones favorables para la crianza, en varios lugares del área de estudio se desarrolla principalmente la acuicultura de concha de abanico *Argopecten purpuratus*, especie altamente cotizada en el mercado internacional. Tal es el caso de bahía de Paracas y la bahía Independencia, considerados importantes bancos naturales de esta especie en el Perú.

La producción de esta especie bentónica depende enormemente de las condiciones ambientales en las que se desarrolla (Mendo et al., 2008). Las condiciones

ambientales cálidas y de oxigenación en aguas de fondo que ocurre durante El Niño (Mendo et al., 2008) favorece la proliferación de concha de abanico aumentando su tasa de crecimiento y reclutamiento (Mendo y Wolf, 2003). Sin embargo, existen también eventos que ponen en riesgo su supervivencia y la de otros recursos como los peces. Tal es el caso de la ocurrencia de aguas blancas, la cual se asocia a mortandades de diferentes especies marinas (Aguirre et al., 2014; Copenhagen, 1953), debido a la desoxigenación del ambiente y/o intoxicación que produce el H<sub>2</sub>S. Por lo que la presencia de aguas blancas trae como consecuencia un grave impacto en el ecosistema marino. Además de ello, hay que mencionar que estas aguas emiten un olor desagradable característico de la presencia de sulfuros en el agua, causando molestias en los habitantes y turistas que visitan la zona. Sumado a ello, existe la problemática de que aún hay un desconocimiento acerca del origen de las aguas blancas, por lo que la detección a tiempo de estos eventos es de vital importancia para prevenir mortandades masivas y por ende pérdidas económicas.

La presente investigación realizará un aporte al conocimiento de la dinámica de los eventos de aguas blancas, información que puede ser útil para una adecuada planificación del sistema costero, especialmente frente a Pisco y Chincha. Asimismo, se conocerá mejor los procesos generadores de los eventos de aguas blancas y los cambios ambientales que ocurren ante la presencia de estas aguas.

## **2.4. OBJETIVOS**

### **2.4.1. Objetivo Principal**

Caracterizar los eventos de aguas blancas en la región 13°-15°S, describir el contexto ambiental en el que se desarrollan y explorar mecanismos de su formación.

### **2.4.2. Objetivos específicos**

- Crear un algoritmo de identificación de aguas blancas en la región 13°-15°S, a partir de datos de color del mar (reflectancias).
- Detectar los eventos de aguas blancas en la región 13°-15°S y analizar su frecuencia de ocurrencia, distribución espacial, áreas e intensidad.
- Describir los cambios en la temperatura, oxígeno y estratificación que ocurren en la Bahía de Paracas durante de los eventos de aguas blancas.
- Correlacionar los cambios en vientos e índice de afloramiento con los eventos de aguas blancas.

## **2.5. HIPÓTESIS**

Los eventos de aguas blancas en la región 13°- 15°S tienen una relación directa con la intensificación de vientos e incremento del índice de afloramiento en la zona.

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. DISEÑO DEL ESTUDIO**

La presente investigación es un estudio retrospectivo no experimental basado en datos oceanográficos satelitales e in-situ. Se utilizó información de color del mar a partir de imágenes satelitales, provenientes del sensor MODIS a bordo de los satélites AQUA (operativo desde 2002) y TERRA (operativo desde finales de 1999), para la creación de un algoritmo de identificación de aguas blancas en las zonas costeras de la región 13°-15°S durante el periodo 2000-2016. Se realizó una caracterización de los eventos identificados en cuanto a su ubicación, extensión, duración, frecuencia e intensidad y se correlacionaron con datos de intensidad de vientos e índice de afloramiento. Por otro lado, se seleccionaron aquellos eventos de aguas blancas ocurridos al interior de la bahía de Paracas para examinar los cambios de temperatura, oxígeno disuelto y estratificación ocurridos en la columna de agua en diferentes zonas de la bahía.

### 3.2. AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se extiende entre los  $-13^{\circ}$  y  $-15^{\circ}\text{S}$  y los  $-76^{\circ}$  y  $-77^{\circ}\text{W}$ , abarcando principalmente las zonas costeras de las provincias de Chincha y Pisco, pertenecientes al Departamento de Ica. En esta área se ubican importantes bahías como Pisco, Paracas e Independencia. Estas dos últimas ubicadas dentro de los límites de las Reserva Nacional de Paracas. La Figura 26 indica la zona de estudio.



Figura 26: Área de estudio:  $13-15^{\circ}\text{S}$  y  $76-77^{\circ}\text{W}$ . Elaboración propia.

### **3.3. POBLACION Y MUESTRA**

La población de estudio comprende el conjunto de datos de color del océano frente a Chincha y Pisco.

La muestra corresponde a aquellos datos de color del océano captados por el sensor MODIS a bordo de los satélites AQUA y TERRA en el área de estudio, entre el 24 de febrero del 2000 (fecha en el que se tiene el primer registro de color del mar por MODIS-Terra) y el 31 de octubre del 2016 y extraídos posteriormente de la página web OCEAN COLOR de la NASA.

### **3.4. PERIODO DE ESTUDIO**

El periodo de análisis de eventos de aguas blancas provenientes de los datos satelitales de color del mar es entre los años 2000 y 2016. Sin embargo, dentro de este rango existen periodos de análisis exclusivamente para los datos oceanográficos, los cuales se describen en la tabla 1.

### 3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Se muestran las variables explicativas y respuesta del estudio, las unidades de trabajo y fuentes de obtención.

#### 3.5.1. Variables Explicativas:

Relacionadas a las condiciones de vientos y afloramiento

- Velocidad de vientos..... (m/s)
- Índice de Afloramiento..... ( $m^3 \cdot s^{-1} \cdot 100m$ )

Fuente: Escaterómetros QuickSCAT y ASCAT para los periodos 2000-2009 y 2008-2016, respectivamente. Consistieron en datos que cubrieron la zona marina comprendida entre los 13° y 16°S latitudinalmente y aproximadamente entre los 25 y 100 km desde la costa (Figura 28). Los datos fueron facilitados por el Laboratorio de Hidrofísica Marina, AFIOF-IMARPE.

#### 3.5.2. Variables Respuesta:

Derivados del espectro característico de las aguas blancas:

- Índice de frecuencia.....( $n^\circ$  de eventos / mes)
- Distancia a la costa de las plumas de aguas blancas..... (mn)
- Área de las plumas de aguas blancas .....( $km^2$ )
- Índice de aguas blancas .....(reflectancia media\* $n^\circ$ pixeles)

Fuente: Estas variables se obtuvieron de los mapas resultantes de la aplicación del algoritmo de identificación de aguas blancas a toda la serie de tiempo. El algoritmo se desarrolló a partir de información de color del mar (reflectancias) extraídos de sensores de color MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua. La resolución espacial de los datos de color del mar es de 1km de distancia, en tanto, la frecuencia temporal es diaria.

Relacionadas a las consecuencias en la columna de agua de la bahía de Paracas durante los eventos de aguas blancas:

- Temperatura.....(°C)
- Oxígeno disuelto.....(mL/l)
- Gradiente de temperatura .....(°C/m)

Fuente: Los datos de temperatura y oxígeno disuelto se obtuvieron de 3 fuentes diferentes: i) De muestreos diarios realizados por la empresa Pluspetrol en la estación Puerto San Martín (TPP), en superficie y a 5 m de profundidad para el periodo 2006-2015; ii) De los data-loggers HOBO para temperatura y RBR para oxígeno, ubicados a 5 m de profundidad para el periodo setiembre 2012-marzo 2013 cuya frecuencia temporal es diaria y iii) Del data-logger MiniDO2T para oxígeno y temperatura, ubicado a 20 cm de la superficie del sedimento, para el periodo marzo-2015-enero 2016 cuya frecuencia temporal es 15´.

Las fuentes de obtención de las variables de estudio y otras especificaciones se resumen en la tabla 1. Las estaciones de muestreo de las variables ambientales en la Bahía de Paracas se muestran en la Figura 27 y la región de extracción de vientos satelitales, en la Figura 28.

Tabla 1. Resumen de las variables de estudio. Fuentes, Periodo, Frecuencia y Ubicación de puntos de muestreo.

VARIABLE	FUENTE	AÑO INICIO	AÑO FIN	FRECUENCIA	ESTACIÓN
<b>Vientos</b>	QuickSCAT	2000	2012	diaria	Región: 13°-15°LS, desde 25 km fuera de la costa
	ASCAT	2012	2016	diaria	Entre 13° y 15°S y desde 25 km fuera de la costa
<b>Temperatura y Oxígeno Disuelto</b>	Monitoreo PlusPetrol	2006	2014	diaria (Profundidad: 0-5 m)	-13°48.6' / - 76°17.4'
	Data-loggers: HOBOU22-001 (temperatura) RBR TDO (oxígeno)	2012	2013	Horaria (Profundidad: 5m)	-13°44.7' / -76°13.2'
	Data-logger MiniDO2T	2015	2015	Cada 15' (Profundidad: a 20 cm de la superficie del sedimento)	-13°48.87' / -76°17.23'
<b>Color del mar (reflectancias)</b>	MODIS Terra	2000	2016	diaria	Toda el área de estudio
	MODIS Aqua	2002	2016	diaria	Toda el área de estudio

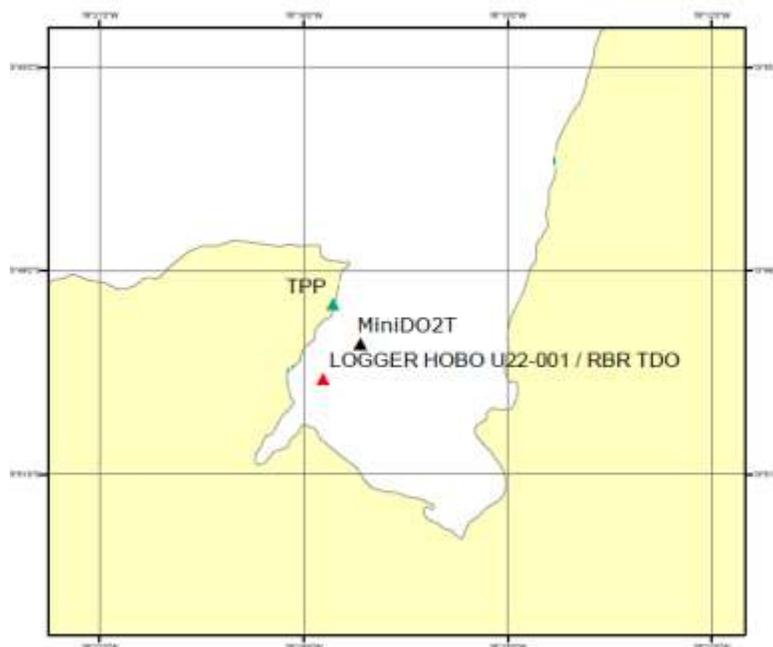


Figura 27. Mapa de estaciones de muestreo de temperatura y oxígeno en la Bahía de Paracas. TPP: Estación Puerto San Martín de Pluspetrol (2006-2014). MiniDO2T: Logger de oxígeno y temperatura (2015). HOBO y RBR: Logger de oxígeno y temperatura (2012-2013). Elaboración propia

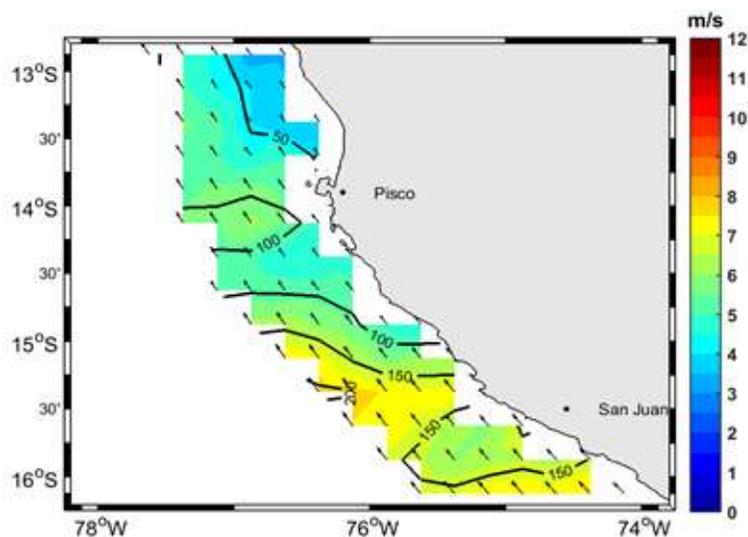


Figura 28. Ejemplo de la región procedente de vientos satelitales para el día 3 de enero del 2000. Los colores indican la magnitud de la velocidad del viento (m/s) y las flechas, la dirección. Los contornos indican los valores de índice de afloramiento ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100\text{m}$ ). Fuente: David Correa.

## **3.6. PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS.**

### **3.6.1. Identificación de plumas de aguas blancas a partir de imágenes satelitales de color del mar.**

Esta sección se divide en dos etapas de procesamiento: i) Obtención de datos de reflectancias y ii) Elaboración del algoritmo de identificación de aguas blancas. Ambas etapas se llevaron a cabo en una computadora con sistema operativo Linux y se utilizó el lenguaje de programación IDL.

#### **3.6.1.1. Obtención de datos de reflectancias.**

Esta etapa consistió en la descarga de imágenes satelitales diarias de color del mar desde la página web de Ocean Color perteneciente a la NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) para la zona y periodo de estudio y a partir de ellas extraer los datos de reflectancias emitidas por el océano en 10 longitudes de onda: 412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667 y 678 nm, las cuales fueron captadas por el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) a bordo de los satélites AQUA y TERRA. En el siguiente flujograma (Figura 29) se muestra los pasos desarrollados y los programas utilizados en IDL para obtener los datos de reflectancia que, posteriormente, servirán como variables de entrada en la elaboración del algoritmo (apartado 3.6.1.2).

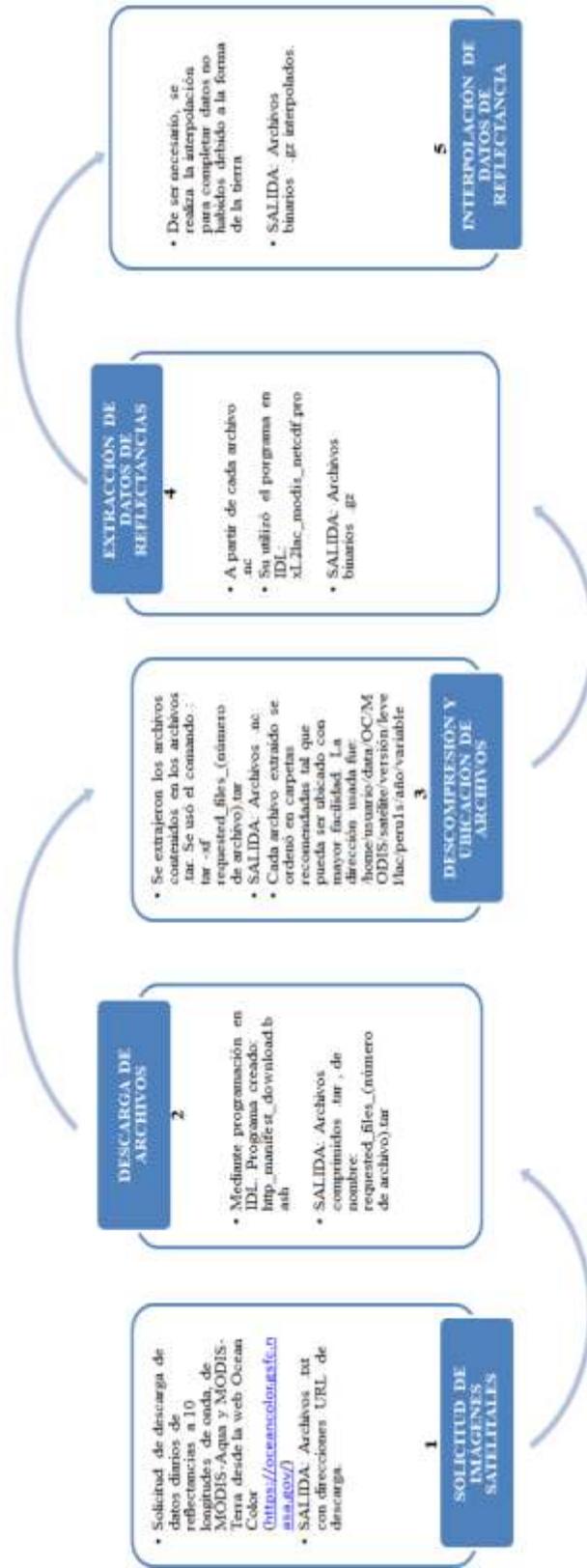


Figura 29. Flujo de pasos para la obtención de datos de reflectancias.

Como se observa en el paso 3 “Descompresión y Ubicación de archivos de archivos” se obtuvieron archivos en el formato .nc del tipo: iyyyydddhhmmss.L2\_ttt\_ppp.nc.

Donde:

i: es el identificador del instrumento de medida (A para AQUA y T para TERRA).

yyyydddhhmmss: corresponde al año, día del año, horas, minutos y segundos en UTC.

L2: indica datos Ocean Level-2.

ttt: es un identificador de datos opcional.

ppp: es el identificador del producto (OC para el color del océano).

Es decir que, A2009032163500.L2\_OC.nc nos indica que es un archivo que corresponde a información de color del océano de una órbita dada por el satélite AQUA el día 02 de febrero del 2009 a las 16:35:00 hrs.

Cabe resaltar que para un solo día puede haber varias órbitas que corresponden a diferentes horas.

Posteriormente se realizó el paso 4 “Extracción de datos de reflectancias” a partir de los archivos .nc. De este proceso se obtuvieron archivos binarios del tipo '.gz' para cada órbita y su promedio diario. Estos últimos serán utilizados en la etapa de Elaboración del algoritmo de identificación de aguas blancas como se explicará en el siguiente apartado.

En algunos casos fue necesario realizar el paso 5 “Interpolación de los datos de reflectancias” debido a que durante el proceso de extracción pueden generarse vacíos (no data) debido a la forma de la tierra.

Los datos obtenidos en esta etapa consistieron en 10 archivos diarios de datos en formato .gz por satélite. Lo cual resultó en 20 archivos diarios a partir de julio del 2002, fecha en la cual empezó a funcionar el satélite AQUA, además de TERRA, que empezó su funcionamiento a finales de febrero del 2000.

#### **3.6.1.2. Elaboración del algoritmo de identificación de aguas blancas**

Para empezar con la detección de las plumas de aguas blancas se realizó una caracterización del espectro de plumas de aguas blancas ocurridos en fechas en que se han confirmado su presencia por diversos autores en la Bahía de Paracas y/o frente a ella. En este caso se utilizaron los espectros del evento del día 08 de mayo del 2009 (registrado por Schunck et al., 2013), por ser un evento fuerte y claro (Figura 30).

Mediante el uso de un script en IDL que acopla la información de reflectancias de las 10 longitudes de onda diarias se pudo obtener los espectros típicos de aguas blancas y los respectivos valores de reflectancias para cada longitud de onda de cada pixel (o por lo menos la mayor cantidad de pixeles) que conforman la pluma de agua blanca del 08/05/2009. Asimismo, se obtuvieron los espectros de otros tipos de manchas tales como áreas de turbidez costera, áreas costeras de alto contenido de clorofila y

áreas alejadas de la costa con bajo contenido de clorofila (o áreas no afectadas) (Figura 31).

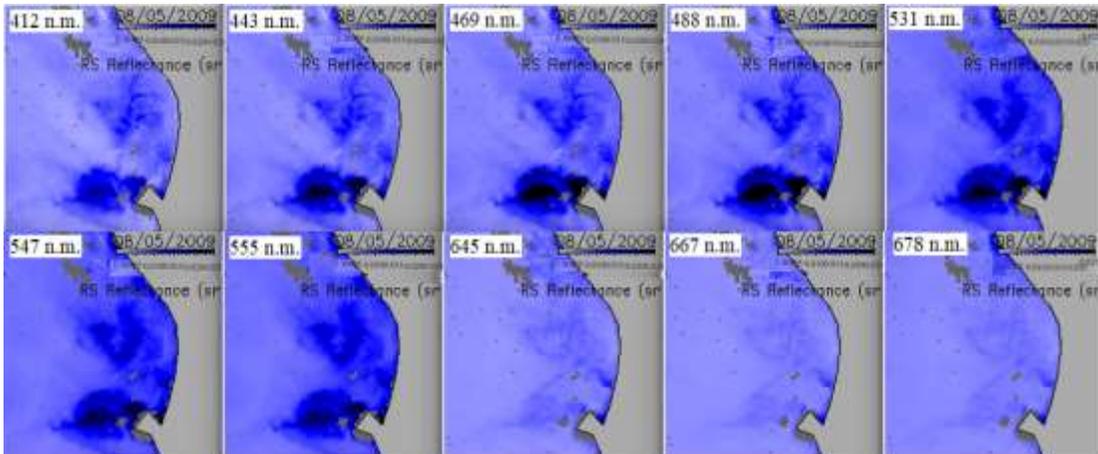


Figura 30. Ejemplo de mapas de reflectancias de las 10 longitudes de onda (412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667, 678 nm) para el día 08 de mayo del 2009, reportado como presencia de aguas blancas por Schunck et al., 2013. La pluma de agua blanca corresponde a los píxeles en color azul intenso. La barra de color indica los valores de reflectancia.

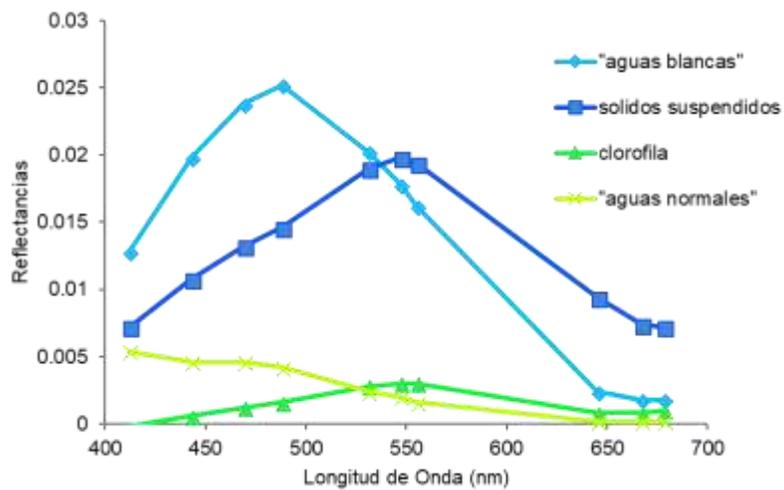


Figura 31. Señales espectrales de diferentes zonas en el mar, correspondientes a aguas blancas (línea turquesa), sedimentos suspendidos (línea azul), alta clorofila (línea

verde) y zonas no afectadas (línea amarilla). Se observa la curva característica de las plumas de aguas blancas con pico de máxima reflectancia a 488 nm.

Con las principales características de los espectros típicos de aguas blancas se pudo elaborar el primer algoritmo de detección de aguas blancas, el cual se basó en 2 criterios que deben cumplir los píxeles para considerarse como un píxel positivo, es decir, como parte de la pluma de aguas blancas.

**Primer criterio de clasificación:** *Pico máximo de reflectancia a 488 nm de longitud de onda.*

Este criterio consistió en maximizar el pico que se observa a 488 nm. Debido a que el espectro de agua blanca no presenta simetría a la derecha y a la izquierda del pico, una manera de maximizar el pico fue sumando las diferencias de reflectancias entre el pico a 488nm (reflectancia máxima) y el valor de reflectancia a una longitud de onda a la izquierda y a la derecha de 488 nm. En este caso se escogieron las longitudes de onda 443 y 531nm (Figura 32).

Así, se creó el indicador del pico a 488 nm., denominado “ab2”:

$$a = rrs488 - rrs443 +$$

$$b = rrs488 - rrs531$$

---

$$ab2 = rrs488 * 2 - rrs443 - rrs531$$

De acuerdo con los valores de “ab2” calculados para 16 pixeles de la pluma de agua blanca del día 08/05/2009, se estableció un límite mínimo, denominado  $lim\_pic=0.004$  por encontrarse la mayoría de ellos sobre este valor (Figura 33).

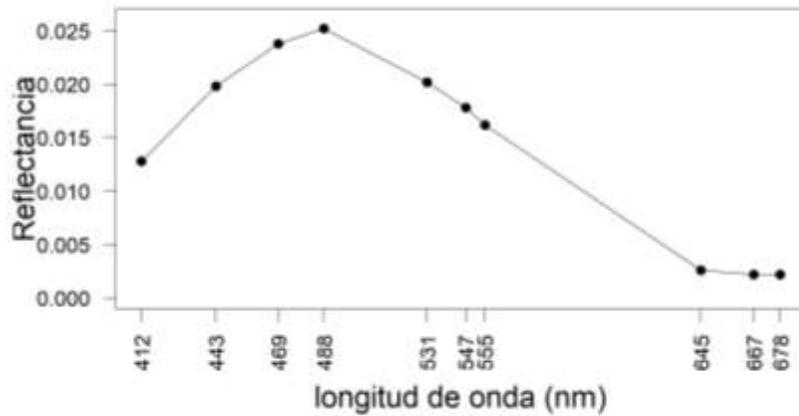


Figura 32. Señal espectral característica de los pixeles que conformaron la pluma de agua blanca frente a la Bahía de Paracas el 08/05/2009.

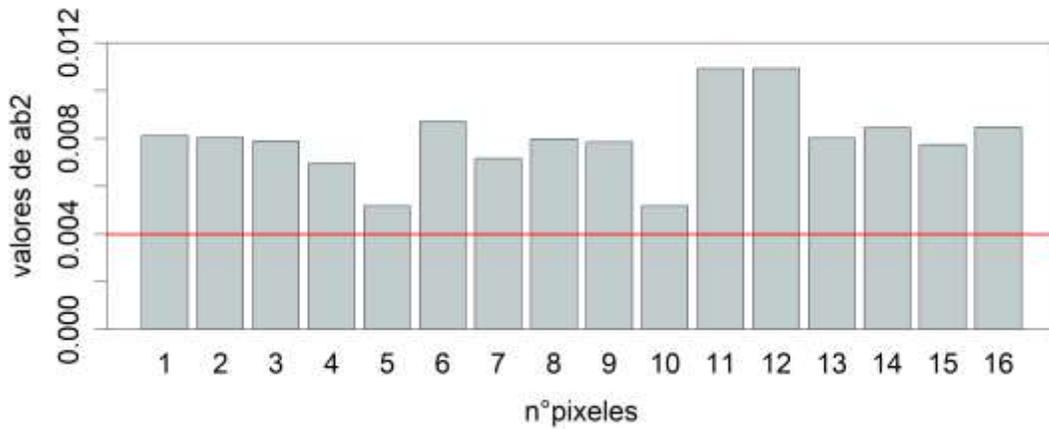


Figura 33. Valores de “ab2” para 16 pixeles que conforman la pluma de agua blanca frente a la Bahía de Paracas el 08/05/2009, registrada por Schunck et al. (2013). La línea roja indica el valor mínimo del parámetro  $lim\_pic$ .

Por lo tanto, el primer criterio del algoritmo quedó condicionado por:  $ab2 \text{ gt } lim\_pic$ . Cuya interpretación es que el algoritmo escogerá sólo los píxeles cuyo índice 'ab2' es mayor a (gt= greater than)  $lim\_pic$  (0.004).

**Segundo criterio de clasificación:** *Nivel mínimo de reflectancia del pico a 488nm.*

Para el segundo criterio fue necesario establecer un límite mínimo de reflectancia del pico a 488nm., el cual se denominó  $lim\_488 = 0.015$  (Figura 28), ya que la familia de espectros mostró picos cercanos a este valor. Por lo tanto, la segunda condición para identificar píxeles de aguas blancas estuvo dada por:  $rrs488 \text{ gt } lim\_488$ , que significa que el algoritmo distinguirá aquellos píxeles con niveles de reflectancia a 488 nm ( $rrs488$ ) mayores a (gt= greater than)  $lim\_488$  (0.015).

Por lo tanto, los parámetros del algoritmo para la detección de píxeles positivos o de aguas blancas son:  $lim\_pic = 0.004$ , el cual se refiere al primer criterio y  $lim\_488 = 0.015$ , referente al segundo criterio. Como consecuencia, se considerará una detección positiva de plumas de aguas blancas cuando los píxeles cumplen ambos criterios. Es decir, si los valores de "ab2" y "rrs488" son mayores a los parámetros ( $lim\_pic$  y  $lim\_488$ ) establecidos.

El comando que ejecuta la detección de píxeles positivos y el número de píxeles correspondientes es:  $wab1 = \text{where}(ab2 \text{ gt } lim\_pic \text{ and } rrs488 \text{ gt } lim\_488, \text{count})$ , el cual dará como resultado mapas binarios mostrando los píxeles detectados para aguas blancas y el número de ellos con el fin de obtener el área abarcada.

### 3.6.1.3. Ajuste del algoritmo

Los dos parámetros `lim_pic` y `lim_488` fueron establecidos para el caso de un solo evento de aguas blancas (08/05/2009), por lo que resulta muy sesgado utilizar estos parámetros para toda la serie de tiempo. Por ello, se hizo un ejercicio de comprobación de los parámetros establecidos con el fin de conocer si son adecuados para otros eventos de aguas blancas.

Este procedimiento consistió en determinar los valores de “`ab2`” y de las reflectancias a 488nm (“`rrs488`”) en el centro de 16 plumas diferentes de aguas blancas (16 eventos ocurridos en diferentes días) y conocer si están por encima de los parámetros establecidos y que efectivamente los pixeles positivos se están detectando. Se observó que no todas las plumas cumplían los dos criterios, encontrándose para un solo evento (18/02/2013) valores de “`ab2`” y “`rrs488`” por debajo de los parámetros establecidos y otras plumas como la del 15/01/2013 que sólo cumplía un criterio del algoritmo (Figura 34).

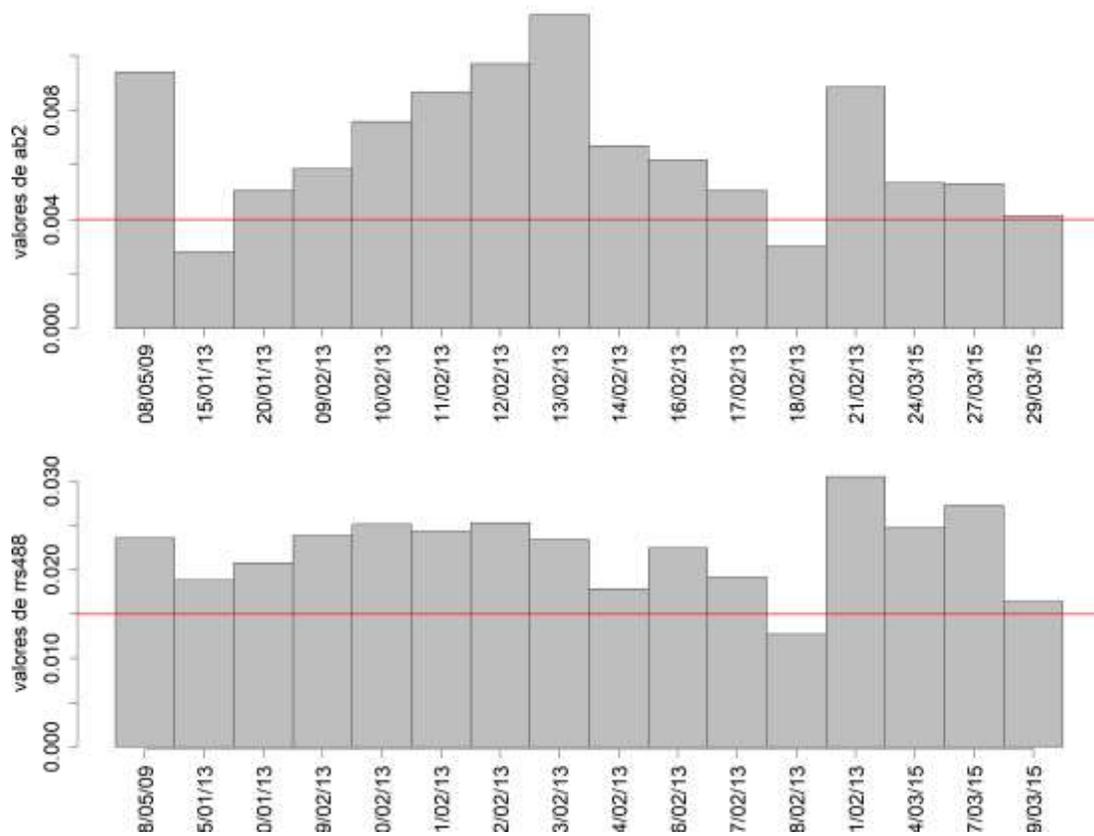


Figura 34. Distribución de los valores de “ab2” (superior) y “rrs488” (inferior) del centro de 16 plumas de aguas blancas ocurridos en diferentes días. Línea roja indica el valor de “ab2” y “rrs488” determinado como mínimo para que los eventos puedan ser considerados aguas blancas.

Este procedimiento pudo constatar que los parámetros establecidos deberían ser ajustados para adaptarse a diferentes magnitudes de los eventos de aguas blancas.

Otra forma ajustar el algoritmo y comprobar si los parámetros eran adecuados, fue comparando los resultados de las áreas obtenidas, hasta esta etapa del desarrollo del algoritmo, con aquellas resultantes del algoritmo de identificación de aguas blancas en Namibia, desarrollado para datos de reflectancia provenientes del sensor MERIS (Ohde, et.al, 2007). Para ello, se compararon las áreas de 11 eventos de aguas blancas

ocurridos en el 2009. Ambos algoritmos mostraron buena correlación en las áreas abarcadas resultantes (no mostrado en esta investigación).

A consecuencia de que los parámetros establecidos a raíz de los criterios de clasificación desarrollados líneas arriba no resultaron ser adecuados para otros eventos de aguas blancas (Figura 34), se consideró necesario seguir explorando con más eventos de aguas blancas a fin de determinar nuevos valores de los parámetros.

Posteriormente, se exploraron más fechas (incluido el 08/05/2009) y se encontró que el segundo criterio del algoritmo estuvo obviando pixeles con valores de  $lim_{488}$  menores a 0.015. Es decir, en la imagen de reflectancias a 488nm (Figura 30), que es la imagen que contiene los mayores valores de reflectancia, se pudo constatar que los correspondientes al borde de la mancha de agua blanca eran más o menos de 0.01, por lo que se optó por modificar el valor de  $lim_{488}$ . En tal sentido, el valor inicial de  $lim_{488}=0.015$  podría estar considerado para eventos de aguas blancas más fuertes como el del 08/05/2009 o para el centro de las plumas. Tal que, disminuyendo el valor, estaríamos considerando también los eventos débiles y abarcando los extremos de las plumas, los cuales presentan menores intensidades de reflectancias.

Para la determinación de nuevos valores de  $lim_{pic}$  y  $lim_{488}$  fue necesario realizar simulaciones de detección de aguas blancas con rangos de valores de estos parámetros, en lugar de establecer valores fijos. Se consideraron los siguientes rangos de valores para:  $lim_{pic}$  = de 0.001 a 0.005 y  $lim_{488}$  = de 0.001 a 0.014.

Estas simulaciones de detección mostraron que  $\text{lim\_pic}$ , el cual indica que existe un pico a 488nm, debería asumirse como 0.001, es decir, el valor mínimo que se pueda obtener en la maximización del pico. Para el caso de  $\text{lim\_488}$ , se tuvo en cuenta que los valores más bajos de  $\text{lim\_488}$  estarían indicando plumas más débiles y los más altos, plumas más fuertes. De las pruebas, se vio conveniente tomar 30 valores de  $\text{lim\_488}$ , a partir de 0.003 para asegurarse de que el algoritmo considere todas las intensidades en las que se puede presentar los eventos de aguas blancas.

Aplicando nuevamente el algoritmo con los valores determinados para  $\text{lim\_pic}$  (0.001) y  $\text{lim\_488}$  (0.003-0.032) se obtuvieron mapas que muestran los pixeles correspondientes a aguas blancas a diferentes niveles de intensidad.

La Figura 35 resume el procesamiento de identificación de plumas de aguas blancas a partir de imágenes satelitales de color del mar, correspondiente al apartado 3.6.1.

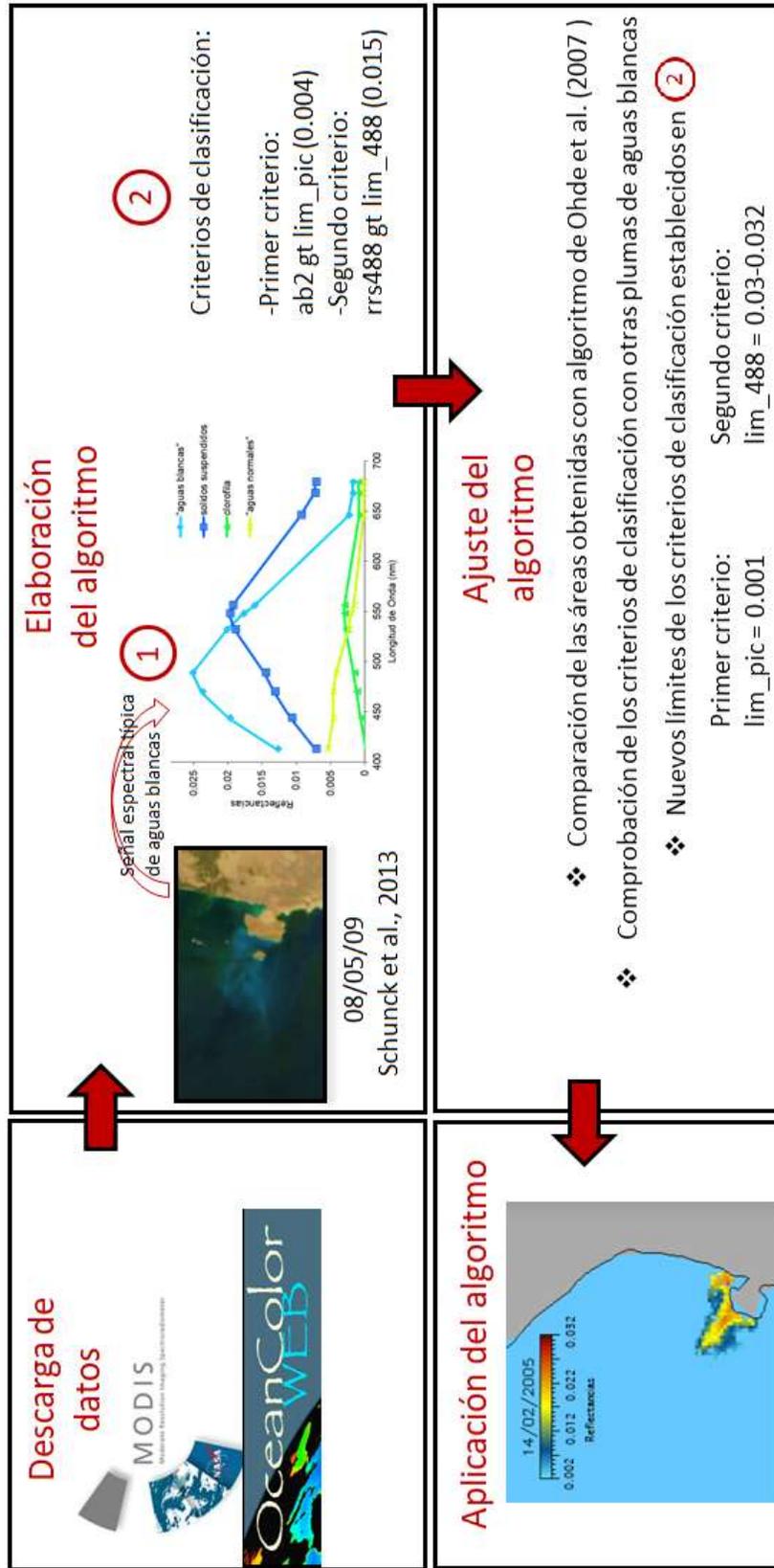


Figura 35. Flujoograma del proceso de identificación de plumas de aguas blancas que incluye las etapas de descarga de datos de color del mar, elaboración del algoritmo, ajuste del algoritmo y aplicación del algoritmo.

### **3.6.2. Caracterización de las plumas de aguas blancas identificadas durante el periodo 2000-2016**

A partir de los mapas resultantes de la aplicación del algoritmo de identificación de aguas blancas, desarrollado en el apartado 3.6.1, se originó información diaria acerca de las principales características de las plumas de aguas blancas, tales como:

- Número de parches o plumas detectadas.
- Área aproximada de cada pluma (en número de píxeles).
- Coordenadas del centro geométrico de cada pluma.
- Batimetría del área en el que se encuentran las plumas.
- Índice de intensidad de cada pluma.
- Valor mínimo y máximo de reflectancia de cada pluma.

Con esta información se determinaron ciertas características de las aguas blancas, como se desarrolla a continuación:

#### **3.6.2.1. Determinación del Índice de Frecuencia mensual**

Para la creación de este índice se consideraron los siguientes días:

- a) Días con presencia de aguas blancas: Considera todos los días en el mes en los que el algoritmo detectó plumas de aguas blancas. Se abrevia con: N°díasAB

b) Días con información satelital disponible de color del mar: Considera los días en el mes con datos de reflectancias en al menos el 50% del área de estudio. Incluye a los días con presencia de aguas blancas del ítem a). Se abrevia como: N° días con data (Figura 36).

El índice de frecuencia mensual (IF) se calculó mediante la siguiente relación:

$$IF = N^{\circ} \text{díasAB}_i / N^{\circ} \text{ días con data}_i$$

Donde:

N° díasAB<sub>i</sub>, es el número acumulado de días con presencia de aguas blancas en el iésimo mes.

N° días con data<sub>i</sub>, es el número acumulado de días con información satelital disponible de color del mar en el iésimo mes.

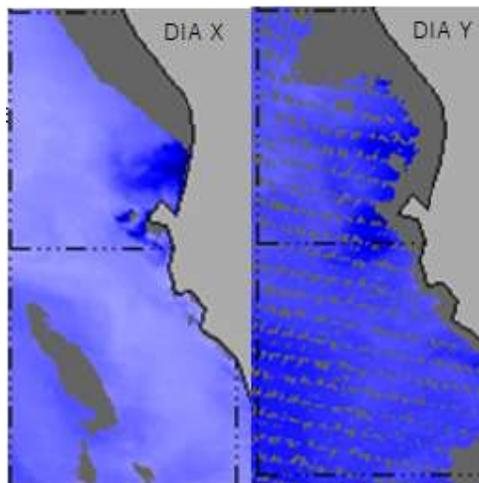


Figura 36. Ejemplos de días X e Y con información satelital disponible de color del mar. Nótese que los mapas contienen información de reflectancia en más del 50% del área de estudio.

### 3.6.2.2. Determinación de la distancia a la costa (mn) de las plumas de aguas blancas.

Se calcularon las distancias a la costa en millas náuticas (mn), usando las coordenadas de los centros geométricos de cada pluma de aguas blancas obtenidas en el proceso de detección. Posteriormente, se realizaron mapas de distribución con el programa Surfer®.

### 3.6.2.3. Determinación del área abarcada por las plumas de aguas blancas (km<sup>2</sup>)

Se calculó el área total abarcada por cada pluma de aguas blancas teniendo como referencia las dimensiones de un pixel. Para determinar las dimensiones de un pixel, primero se debe conocer que las imágenes binarias, producto del algoritmo, tienen dimensiones de 576 filas x 672 columnas y abarcan desde 12°S hasta 18°S (rango de 6°) y desde 73°W hasta 80°W (rango de 7°) como muestra la siguiente figura:

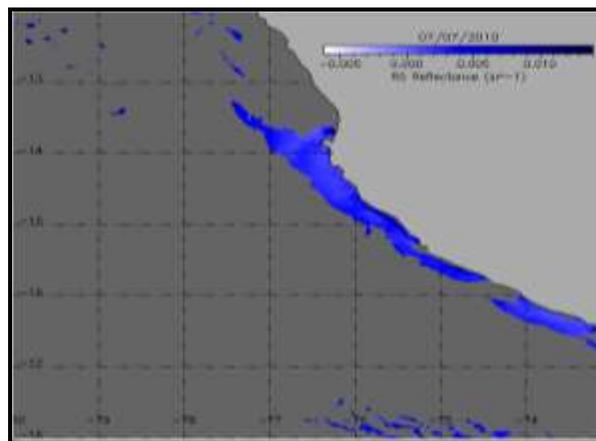


Figura 37. Figura referencial de una imagen compuesta por 576 filas y 672 columnas de pixeles, que abarca 6° de latitud y 7° de longitud.

Posteriormente se realizó la conversión de grados (°) a kilómetros (km), donde:

$$1^{\circ} * \frac{60mn}{1^{\circ}} * \frac{1.852km}{1mn} = 111.12 \text{ km.}$$

Entonces,

En dirección a las latitudes se tiene una dimensión total del mapa de  $111.12 \text{ km} * 6^{\circ} = 666.72 \text{ km}$ , mientras que en dirección a las longitudes se tiene una dimensión total del mapa de  $111.12 * 7^{\circ} = 777.84 \text{ km}$ .

Finalmente se determinaron las dimensiones de un pixel mediante:

$$666.72 / 576 = 1.1575 \text{ km}$$

$$777.84 / 672 = 1.1575 \text{ km}$$

Por lo tanto, el área total aproximada de una pluma de aguas blancas en  $\text{km}^2$  es:

$$\text{Área}_{AB} = 1.1575 \times 1.1575 \times n^{\circ} \text{pixeles positivos}$$

#### **3.6.2.4. Determinación del índice de intensidad de las plumas de aguas blancas**

##### **(IAB)**

Se determinó el índice de intensidad de cada pluma de aguas blancas detectada. Este índice fue calculado como el producto entre el número de pixeles y el nivel de reflectancia promedio.

$$IAB = N^{\circ} \text{pixeles} \times \text{Reflectancia media}$$

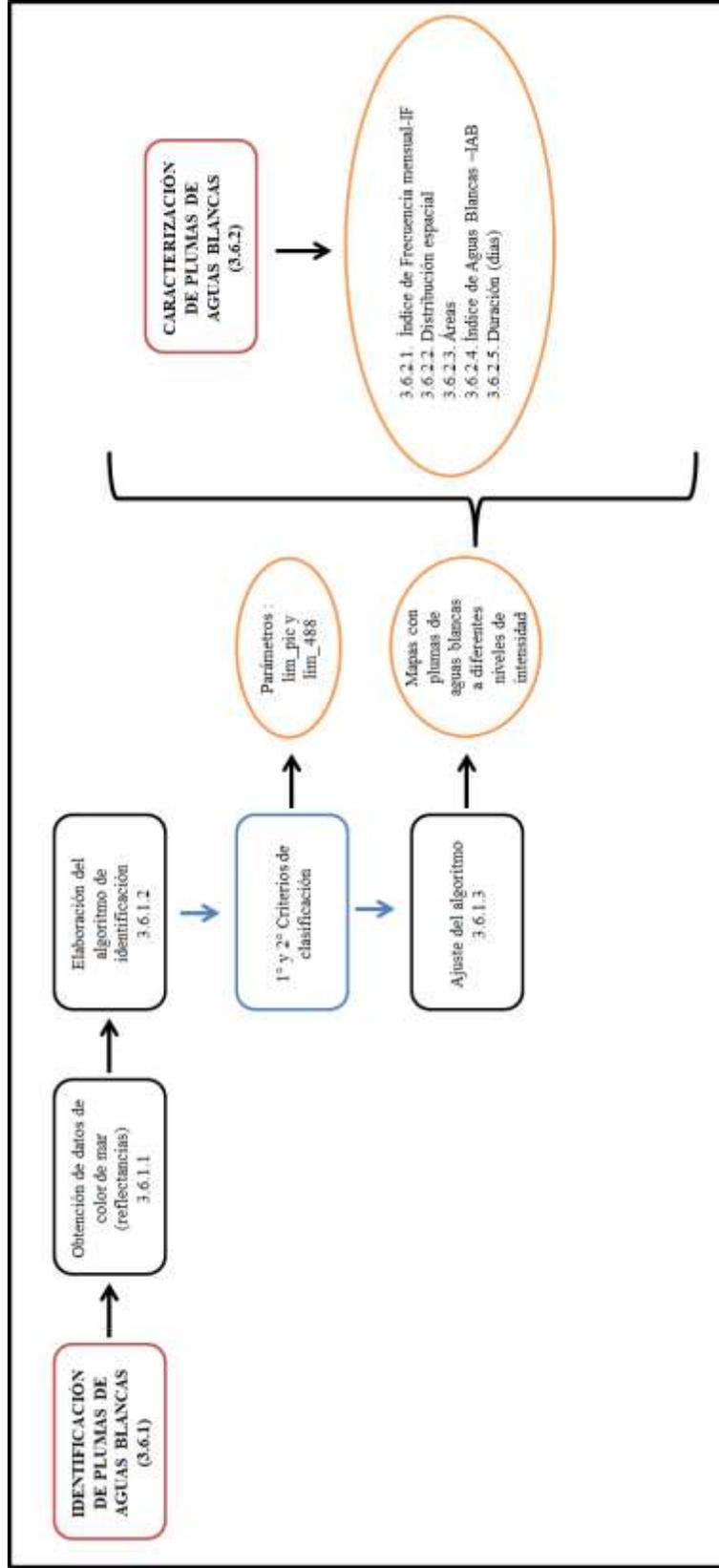


Figura 38. Flujoograma del procesamiento de datos de color del mar para la identificación y caracterización de las plumas de aguas blancas.

### **3.6.3. Procesamiento de las variables oceanográficas**

#### **3.6.3.1. En toda el área de estudio**

- **Vientos Satelitales e índice de Afloramiento**

Dada la región de extracción de la información de vientos satelitales y a la resolución espacial de los escaterómetros, los cuales generan información cada 25 km, se tiene que: Dentro de los 100 km de distancia a la costa existen 4 puntos, mientras que entre los 13 y 15°S existen 8 puntos. Por lo tanto, en toda el área de estudio hubo 32 puntos de información de la intensidad del viento satelital e índice de afloramiento por día.

Se calcularon los promedios diarios de estas variables con todos los puntos que abarca el área de estudio, así como también promedios estacionales y anuales. Posteriormente se elaboraron diagramas de cajas estacionales y anuales. Se utilizaron los softwares MATLAB y RStudio.

### 3.6.3.2. En la Bahía de Paracas

- **Temperatura, oxígeno y gradientes**

Se calcularon los promedios diarios de temperatura y oxígeno para las 3 estaciones de obtención de datos. Se elaboraron series de tiempo diarias para los periodos en los que hubo ocurrencia de aguas blancas cruzando información con las intensidades de aguas blancas (IAB).

Por otro lado, se calcularon promedios estacionales y anuales de temperatura y oxígeno a 5m de profundidad a partir de la información de la estación TPP del monitoreo ambiental de Pluspetrol. Asimismo, se elaboraron gráficos de series estacionales y anuales.

Para representar la estratificación en la columna de agua se calcularon las gradientes de temperatura utilizando datos de la estación TPP por presentar información superficial y de fondo (0 y 5 m). Las gradientes de temperatura se calcularon mediante la siguiente relación:

$$\text{Gradiente de temperatura}_{TPP} = \frac{\text{Temperatura 0 metros} - \text{Temperatura 5 metros}}{5}$$

Unidad de medida: °C/m

Se construyeron gráficos de las series estacionales y anuales de la gradiente de temperatura. Se utilizó el software RStudio en todo el procesamiento de estas variables.

#### **3.6.4. Plan de análisis**

Los objetivos específicos 1 y 2 están relacionados al procesamiento de la información satelital de color del mar (reflectancias). Luego de la aplicación del algoritmo de identificación de aguas blancas a todo el periodo de estudio, se exploraron los mapas resultantes y se compararon con las imágenes satelitales de color real para las mismas fechas. Posteriormente se exploraron de manera mensual y anual los días en los que hubo presencia de aguas blancas y se realizó la técnica de bootstrapping a ambas series para eliminar la influencia de los días con información satelital disponible de color del mar. Se exploraron las características de las aguas blancas como índice de frecuencia, distancia a la costa, áreas e índice de aguas blancas de manera estacional y anual.

Con relación a los cambios ambientales en la columna de agua durante los eventos de aguas blancas al interior de la bahía de Paracas (objetivo específico 3) se promediaron los valores de temperatura y oxígeno de los días previos a las aguas blancas y de los días con presencia de estos eventos. Posteriormente se realizó un análisis de variancias para conocer si existe diferencias significativas entre ambas fases.

Para abordar el objetivo 4 se utilizaron los promedios anuales y estacionales de las velocidades de los vientos satelitales e índice de afloramiento. Se realizó una correlación cruzada de dichas variables explicativas con las áreas acumuladas (km<sup>2</sup>) por las plumas de aguas blancas y los índices de aguas blancas (IAB) para conocer el tipo de relación que existe entre estas ellas.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1. Aplicación del algoritmo de identificación de aguas blancas**

Los mapas resultantes de la aplicación del algoritmo mostraron una correcta detección de plumas de aguas blancas. A continuación, se observa algunos resultados de la aplicación del algoritmo y se comparan con sus respectivas imágenes satelitales de color real para los periodos: del 31-03-2008 al 09-04-2008, del 8 al 10 -05-2009, 11-02-2013, y del 24-03-2015 al 18-04-2015. Los 3 últimos periodos corresponden a reportes realizados por Schunck et al. (2013), Aguirre et al. (2014) y Flores (2016), respectivamente (Figuras 39-42). Los demás mapas con plumas de aguas blancas detectadas en todo el periodo de estudio se muestran en los anexos 1 al 15.

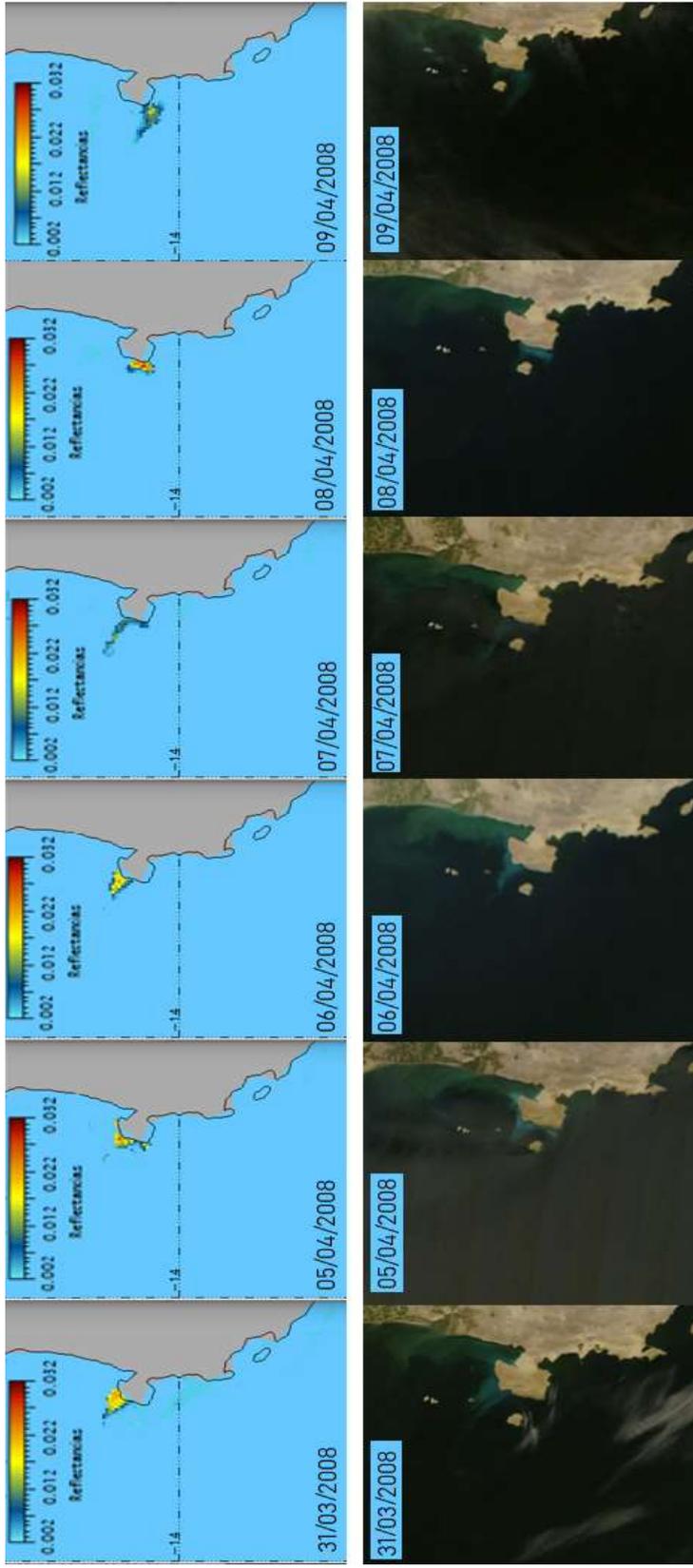
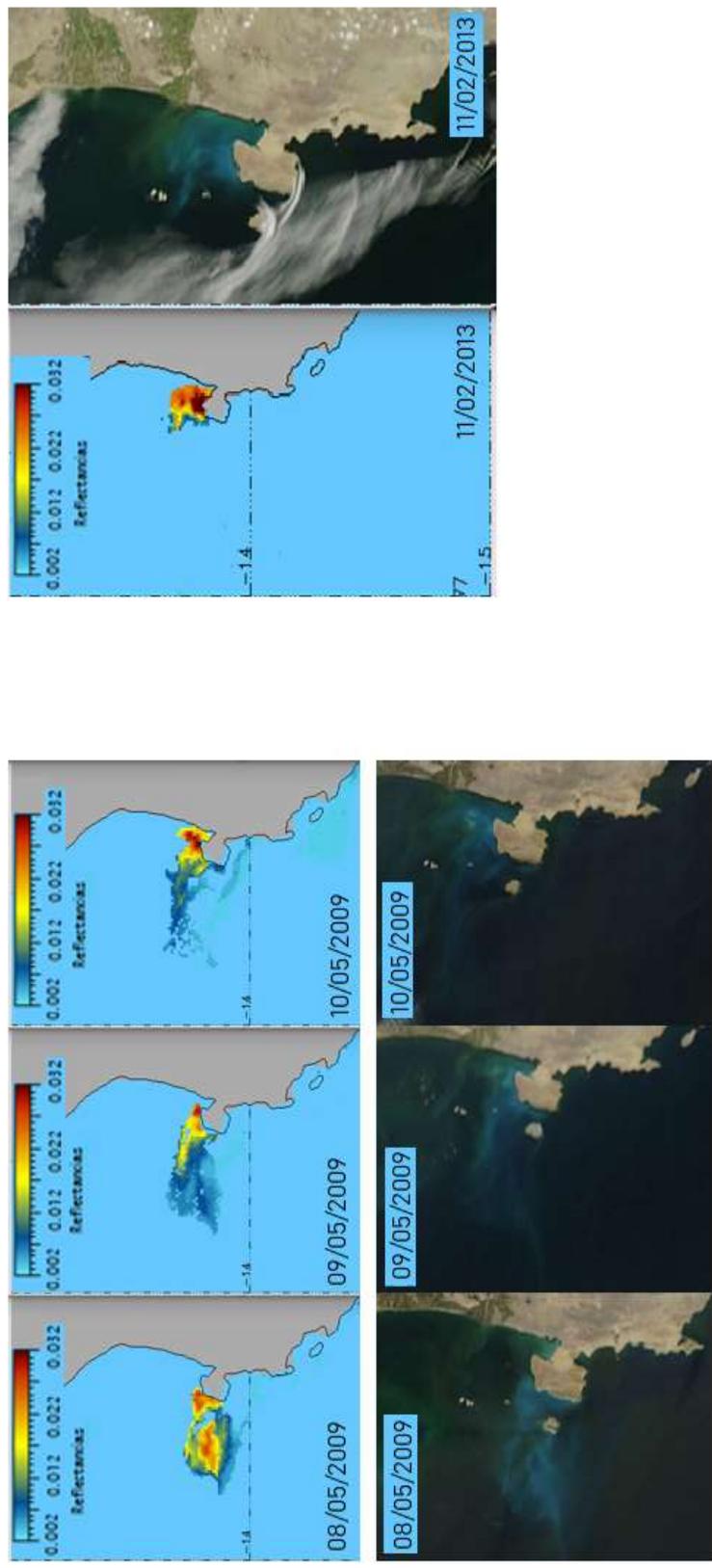


Figura 39. Imágenes diarias obtenidas de la aplicación del algoritmo mostrando la evolución de las plumas de aguas blancas detectadas (superior) en comparación con sus correspondientes imágenes satelitales MODIS de color real (inferior). La barra de color indica los valores de reflectancias a 488nm. Periodo: 31-03-2008 al 09-04-2008



Figuras 40 (izquierda) y 41(derecha). Imágenes diarias obtenidas de la aplicación del algoritmo mostrando la evolución de las plumas de aguas blancas detectadas (superior) en comparación con sus correspondientes imágenes satelitales MODIS de color real (inferior). La barra de color indica los valores de reflectancias a 488nm. Figura 40 corresponde al periodo: del 8 al 10 -05-2009, reportado por Schunck et al. (2013); y la Figura 41 corresponde al 11-02-2013, reportado por Aguirre et al. (2014).

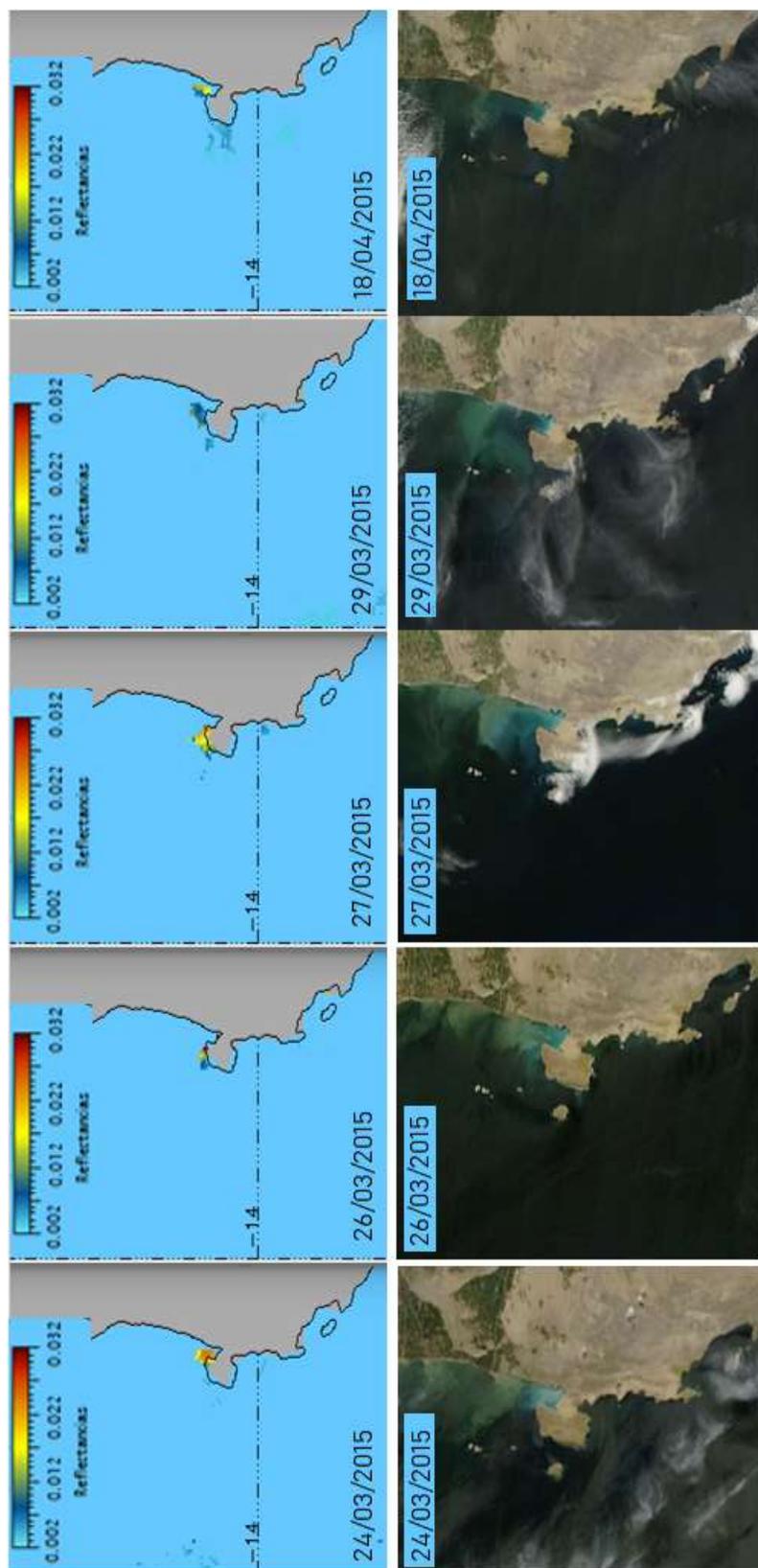


Figura 42. Imágenes diarias obtenidas de la aplicación del algoritmo mostrando la evolución de las plumas de aguas blancas detectadas (superior) en comparación con sus correspondientes imágenes satelitales MODIS de color real (inferior). La barra de color indica los valores de reflectancias a 488nm. Periodo: 24-03-2015 al 18-04-2015, reportado por Flores (2016).

## **4.2. Variabilidad temporal y espacial de los eventos de aguas blancas**

### **4.2.1. Días con presencia de aguas blancas**

El algoritmo de identificación de aguas blancas pudo identificar 385 eventos ocurridos en la zona de estudio entre los años 2000 y 2016, de los cuales 113 se presentaron al interior de la bahía de Paracas, lugar donde existen mayores reportes de la presencia de aguas blancas.

Se observa la variabilidad estacional de la ocurrencia de plumas de aguas blancas en la zona de estudio. El mayor número de días con presencia de aguas blancas se registraron durante abril y mayo, con un total de 82 y 105 días, respectivamente. En la bahía de Paracas, se presentan mayor cantidad de aguas blancas durante el periodo diciembre–mayo, siendo abril el mes que presentó la mayor cantidad, con 24 eventos detectados. Mientras que, entre junio y noviembre, los eventos de aguas blancas disminuyen, para aumentar nuevamente en diciembre. Fuera de la bahía, las mayores cantidades de eventos se presentaron entre marzo y junio, siendo el mes de mayo el más alto con 92 eventos detectados (Figura 43a).

En el 2013 la ocurrencia de aguas blancas fue mayor con un total de 67 días, seguido de los años 2012, 2008, 2009 y 2006 con 47, 44, 43 y 34 días, respectivamente. Mientras tanto, en los años 2002 y 2016 no se detectó ningún día con presencia de aguas blancas en el área de estudio. El número de días con presencia de aguas blancas

al interior de la bahía de Paracas sigue el mismo patrón de comportamiento que el número de días con presencia de aguas blancas fuera de ella, con excepción de los años 2008 y 2009 donde la mayor ocurrencia de los eventos se da fuera de la bahía (Figura 44a). Se realizó un bootstrapping de las series estacionales y anuales del número de días de aguas blancas dentro y fuera de la bahía de Paracas para comprobar que no existe influencia del número de días con información satelital disponible de color del mar en las series antes mencionadas. Con el resultado de la técnica del bootstrapping se elaboraron nuevas series estacionales y anuales y se observó que presentan la misma tendencia que las series originales (Figuras 43b y 44b).

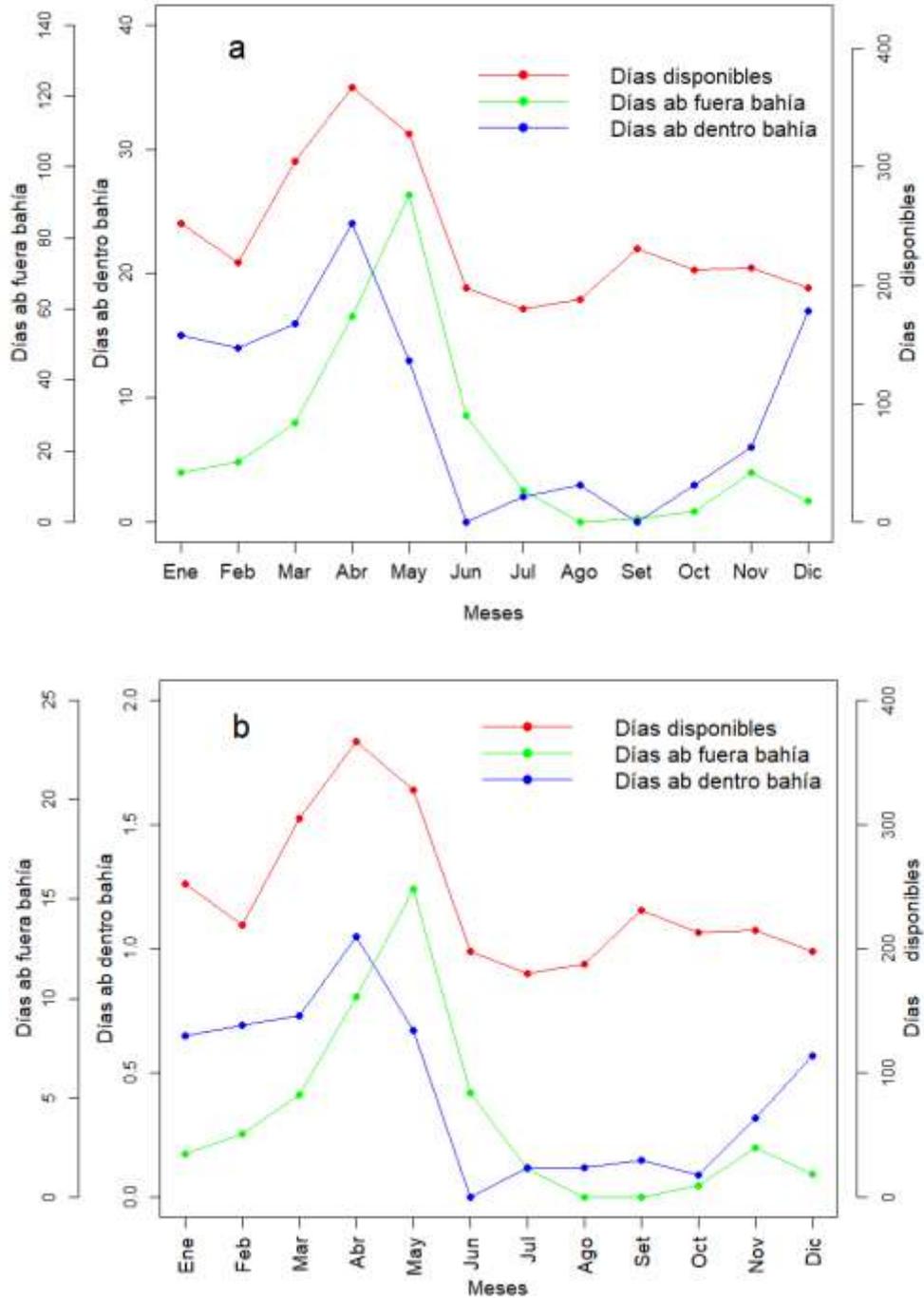


Figura 43. Serie estacional del número total de días: con información satelital disponible de color del mar en el área 13–15°S y 76–77°W (rojo), con presencia de aguas blancas en el área 13–15°S y 76–77°W a excepción de la bahía de Paracas (verde) y con presencia de aguas blancas en la Bahía de Paracas (azul), durante el periodo 2000-2016.

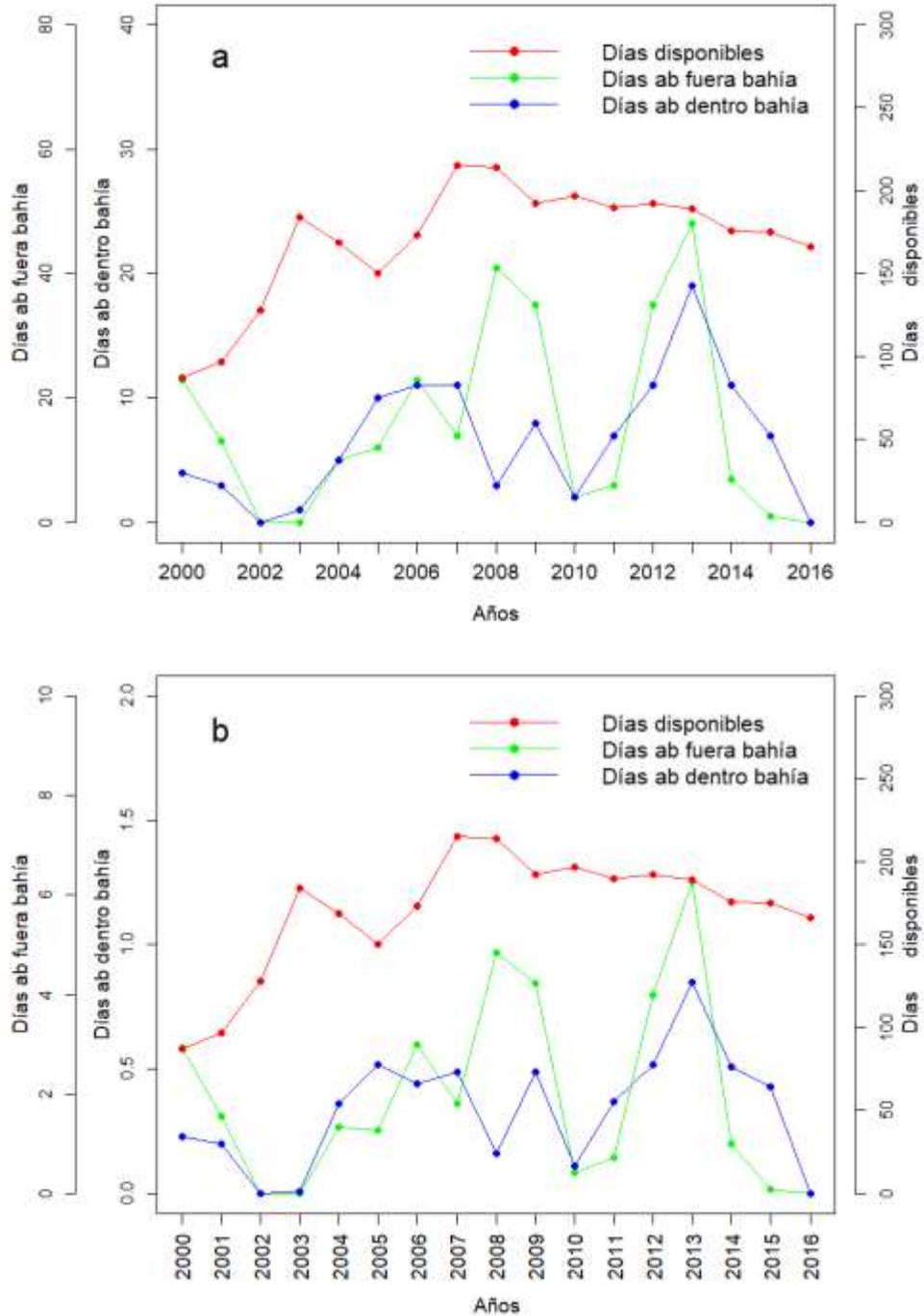


Figura 44. Serie anual del número total de días: con información satelital disponible de color del mar en el área 13–15°S y 76–77°W (rojo), con presencia de aguas blancas en el área 13–15°S y 76–77°W a excepción de la bahía de Paracas (verde) y con presencia de aguas blancas en la Bahía de Paracas (azul), durante el periodo 2000-2016.

Casos notorios donde la cantidad de días con información satelital disponible no influye en la detección del número de días con aguas blancas se han dado durante los años 2002, 2003 y 2016, en donde hubo buena disponibilidad de información satelital, sin embargo, la detección de plumas de aguas blancas fue escasa o nula (Figura 45).

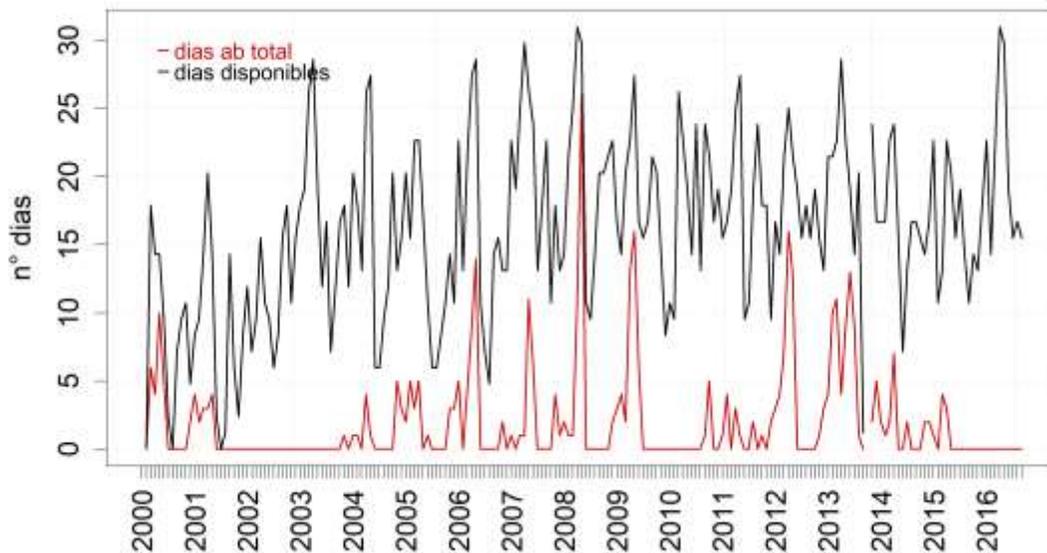


Figura 45. Serie temporal de los días con aguas blancas (línea negra) y los días con dato disponibles de color del mar (línea roja) para el área 13° - 15°S durante el periodo 2000 - 2016.

#### 4.2.2. Índice de Frecuencia (IF)

Los mayores índices de frecuencia mensual se dieron durante los meses de verano y otoño, disminuyen durante el invierno y vuelven a incrementarse en primavera (Figura 46a). Asimismo, la figura 46b indica que durante el año 2013 estos eventos presentaron una mayor frecuencia mensual.

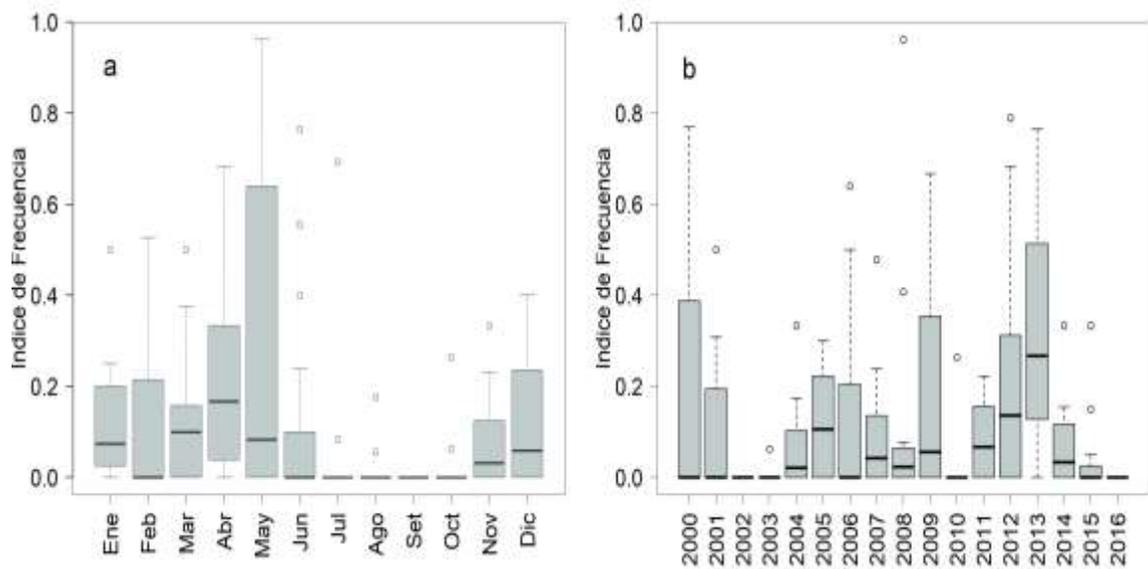


Figura 46. Diagrama de cajas estacional (a) y anual (b) de los índices de frecuencia mensual de aguas blancas.

Particularmente, se observó que durante mayo del 2008 la ocurrencia de plumas de aguas blancas se da en casi todo el mes, detectándose 26 días de presencia de estas aguas (Anexo 16) con un índice de frecuencia de 0.96. Entre otros índices de frecuencia considerables tenemos aquellos correspondientes a mayo del 2000, mayo del 2012, junio del 2013, mayo del 2006 y abril - mayo del 2009 (mencionados en orden decreciente) (Figura 47).

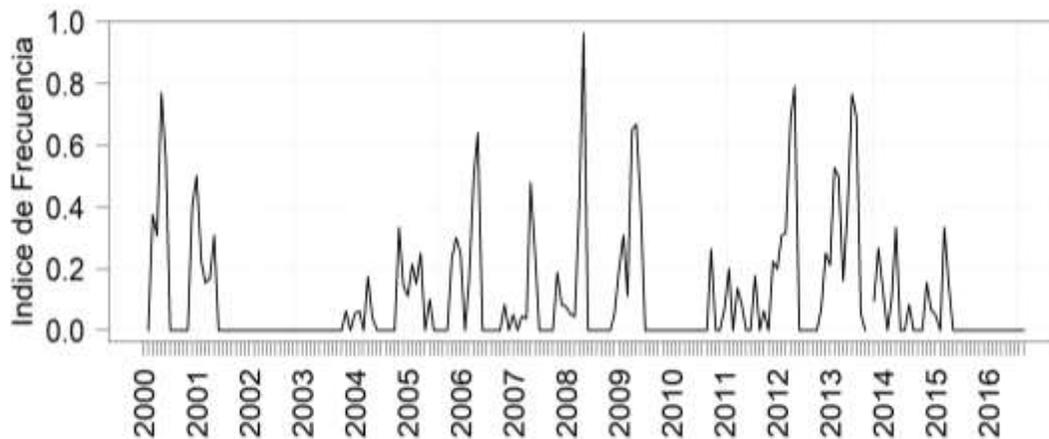


Figura 47. Serie temporal del Índice mensual de Frecuencia (IF) de ocurrencia de aguas blancas durante el periodo 2000-2016 en el área 13–15°S y 76–77°W.

#### 4.2.3. Distribución espacial de las plumas de aguas blancas

Las plumas de aguas blancas se ubicaron dentro de las 25mn durante el periodo 2000-2016, concentrándose mayormente dentro de las 10mn (Figura 48).

Se pudo apreciar un comportamiento estacional en la localización de las plumas de aguas blancas en términos de distancia a la costa (mn). Las plumas se encontraron más alejadas de la costa durante el invierno en comparación con otras estaciones de año. Mientras que, durante primavera y verano, la mayoría de las plumas de aguas blancas, se encontraron más pegadas a la costa. Durante el otoño, principalmente los meses de abril y mayo, se presentaron las mayores distancias a la costa de las plumas de aguas blancas (~24mn en abril y ~18mn en mayo) asociados a un rango de distribución más amplio (Figura 48a). Además, éstos mismos meses, presentaron una

mayor distribución latitudinal, desplazándose más al norte cerca de los 13°S, y al sur de la bahía Independencia, alcanzando los 15°S (Figura 49).

Respecto a la variabilidad interanual, la pluma más alejada (~ 24mn de distancia a la costa) se presentó en el 2005 (Figura 48b) y se ubicó al noroeste de la Bahía de Paracas (Figura 50). Los años 2008 y 2009 también presentaron plumas alejadas con distancias mayores a las 15 mn (Figura 48b). Latitudinalmente, los años 2009 y 2012 presentaron plumas que se extendieron mucho más al sur en comparación con otros años (Figura 50).

En general, durante el periodo de estudio las plumas de aguas blancas se distribuyeron mayormente, alrededor de la península de Paracas y se replegaron a la costa, extendiéndose hacia el sur, aproximadamente hasta la bahía Independencia.

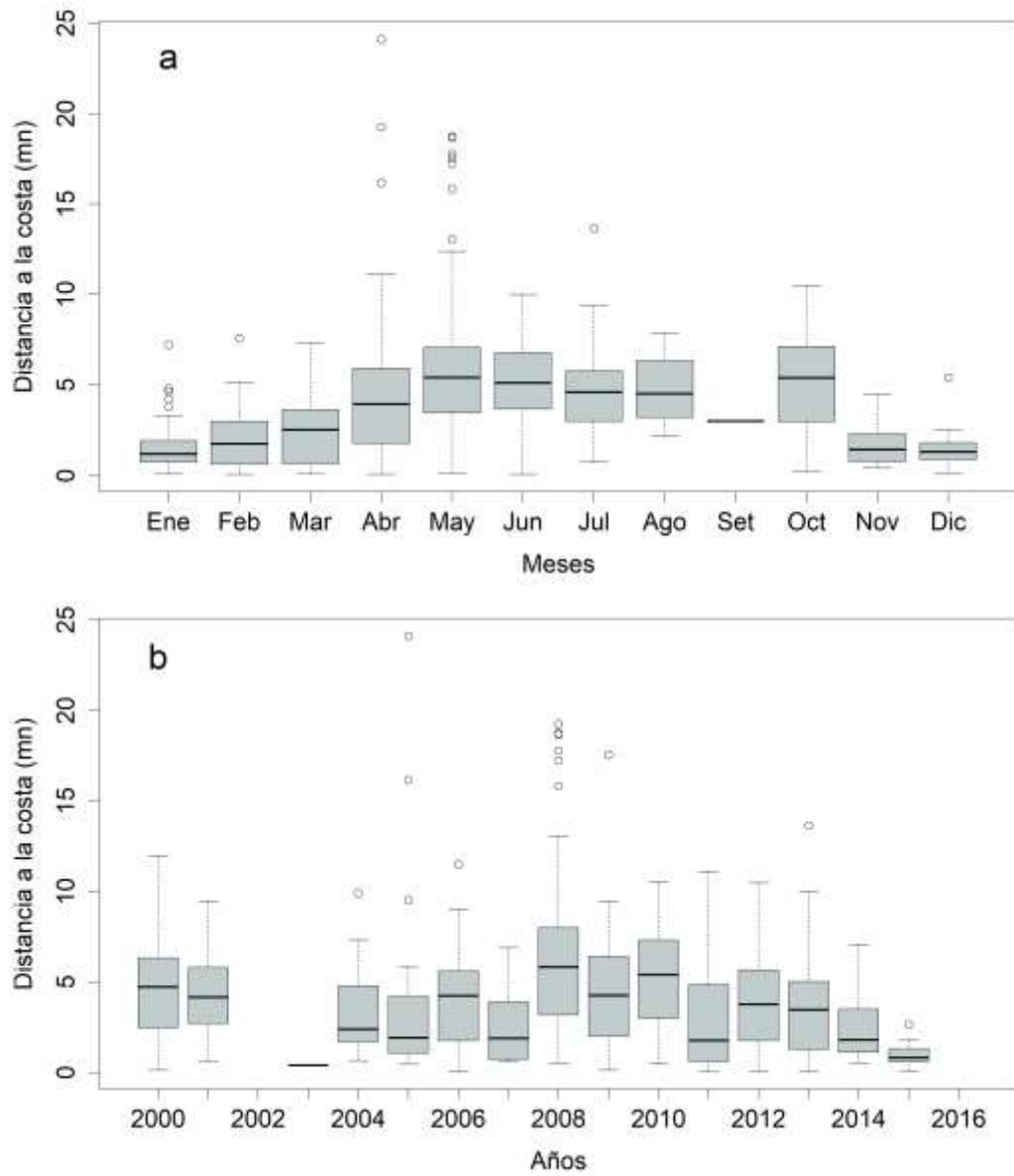


Figura 48. Diagrama de cajas a) estacional y b) anual de la distancia a la costa (mn) de las plumas de aguas blancas durante 2000-2016. Las distancias se calcularon con las coordenadas correspondientes a los puntos medios de las plumas detectadas.

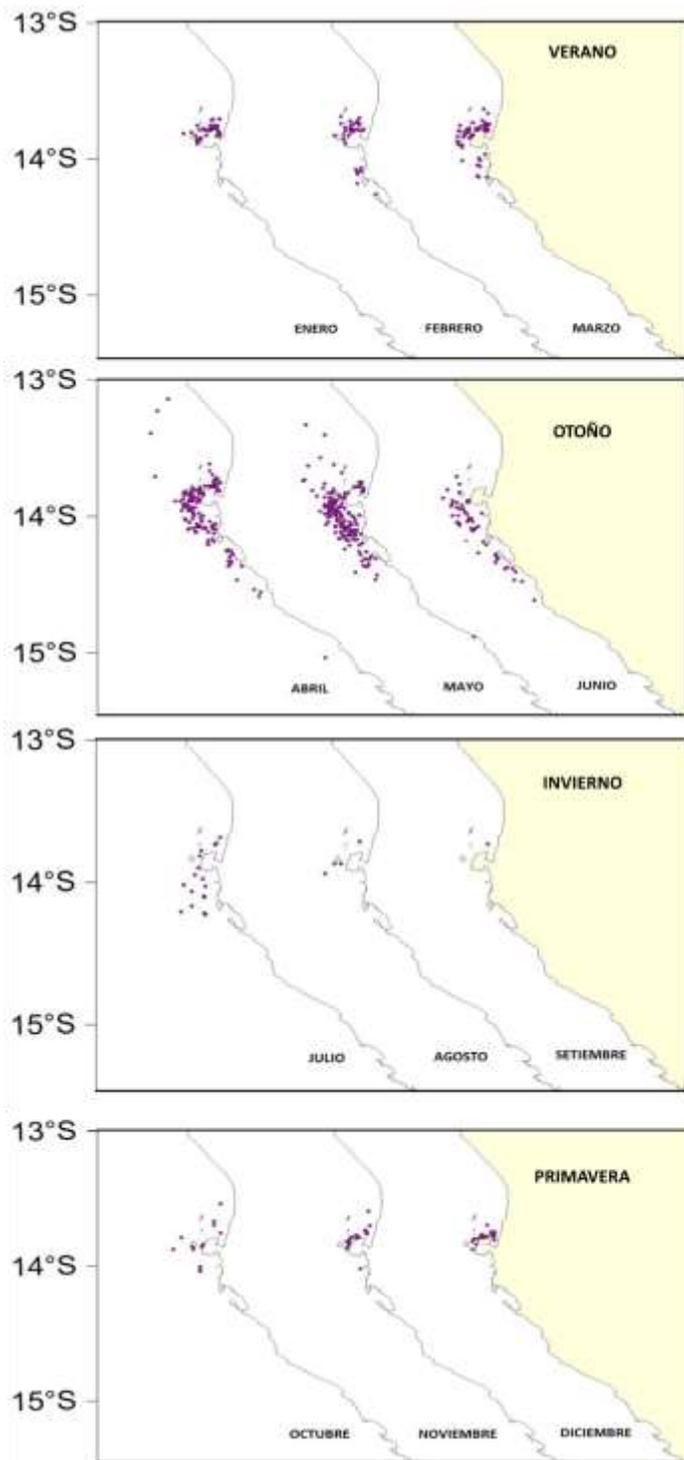


Figura 49. Mapas de distribución estacional de las coordenadas de los centros geométricos de las plumas de aguas blancas.

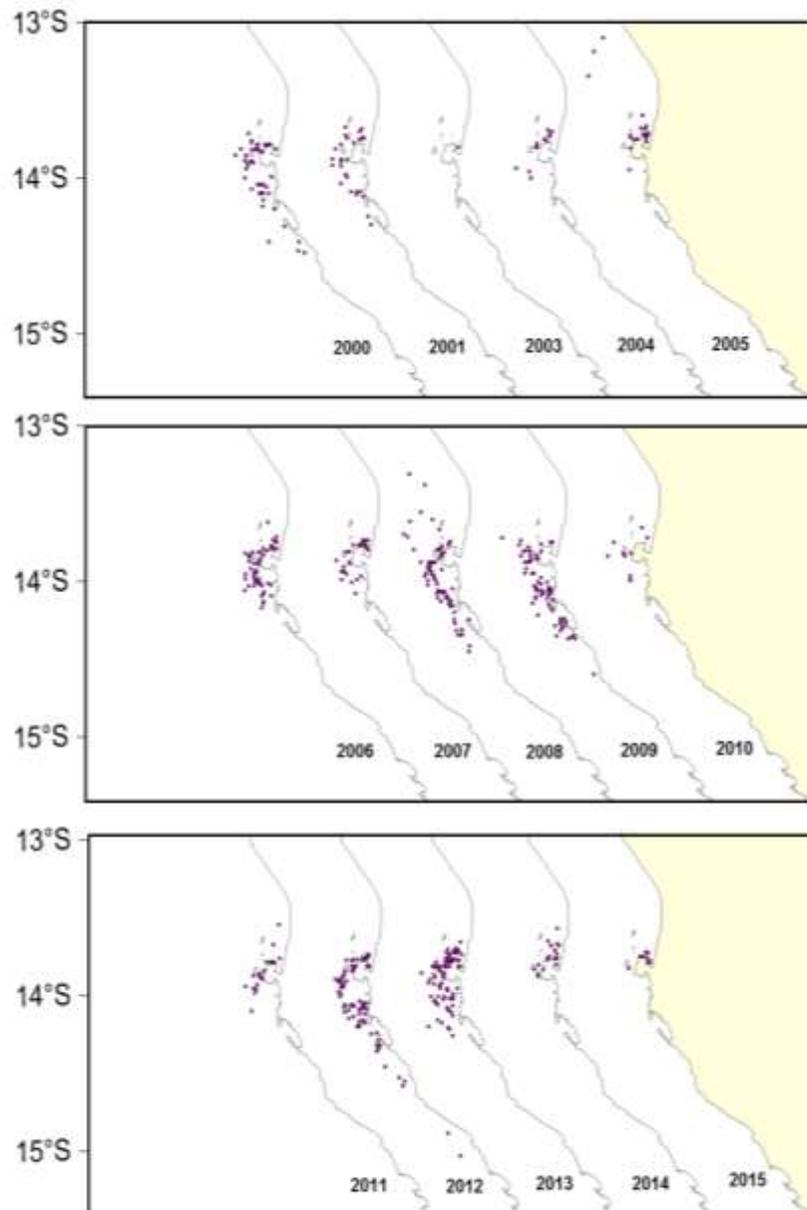


Figura 50. Mapas de distribución anual de las coordenadas de los centros geométricos de las plumas de aguas blancas. No se detectaron aguas blancas en los años 2002 y 2016.

#### 4.2.4. Áreas

Las áreas diarias de las plumas de aguas blancas fueron muy variables en los meses y años como se aprecia en los siguientes diagramas de cajas de la figura 51. Se observa que en los meses de otoño e invierno se presentan las mayores áreas, en donde se encuentran algunas plumas con áreas muy grandes que difieren del resto, lo cual está indicado por los outliers en los meses de abril, mayo y junio. Durante primavera y verano, las plumas de aguas blancas presentaron las áreas más pequeñas, pero también hubo algunos outliers al iniciar la primavera (octubre) y al finalizar el verano (marzo) (Figura 51a). En cuanto a los diagramas de cajas anuales, los años 2008, 2009, 2012 y 2013 presentaron plumas bastante grandes con áreas que llegaron a alcanzar  $\sim 4000 \text{ Km}^2$ , como la que ocurrió en el 2012 (Figura 51b).

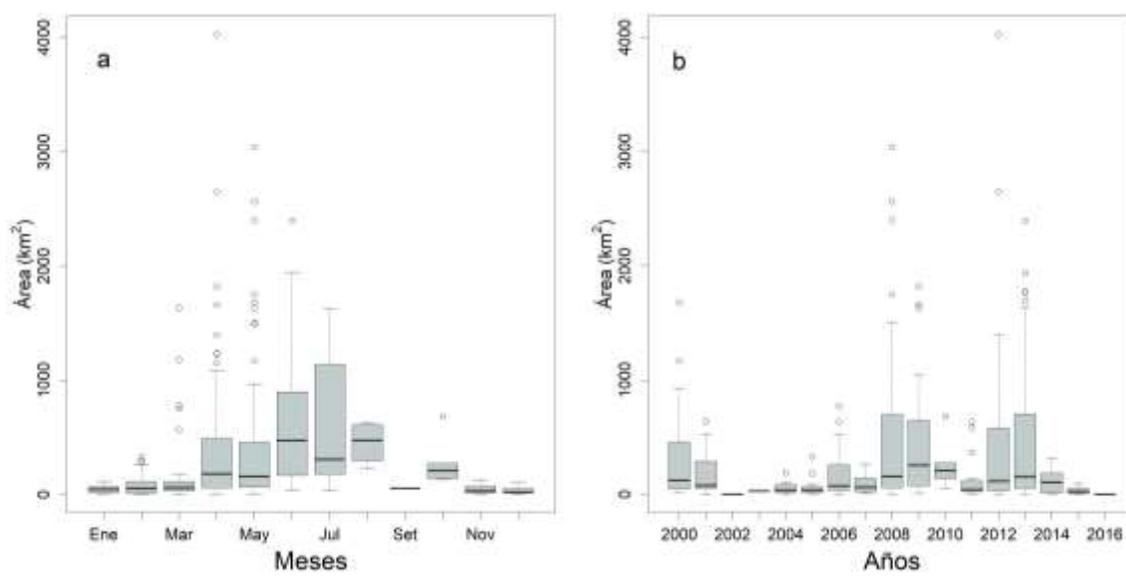


Figura 51. Diagrama de cajas estacionales (a) y anuales (b) de las áreas de las plumas de aguas blancas ( $\text{km}^2$ ).

Analizando las áreas acumuladas de manera estacional y anual se observa que los mayores picos de actividad de aguas blancas se presentaron durante el otoño, entre los meses de abril y junio (Figura 52a), mientras que los años de mayor actividad fueron el 2008, 2009, 2012 y 2013, pero también hubo picos de menor actividad como los años 2000 y 2006 (Figura 52b).

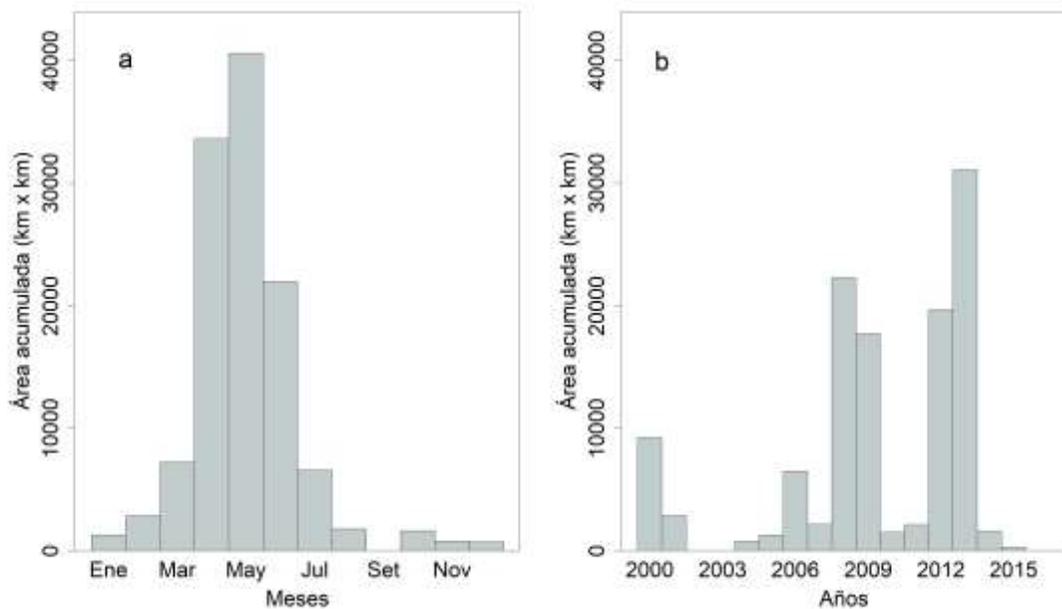


Figura 52. Distribución estacional (a) y anual (b) de las áreas acumuladas (km<sup>2</sup>) de las plumas de aguas blancas.

#### 4.2.5. Índices de Aguas blancas (IAB):

Los IAB presentaron la misma tendencia estacional y anual que las áreas. Los picos máximos ocurrieron en los mismos meses y años que las áreas acumuladas- Así, los mayores picos de IAB se presentaron entre abril y junio (Figura 53a) y en los años 2008, 2009, 2012 y 2013. La variabilidad anual de los IAB se caracterizó por presentar años de alta actividad intercalados con años de bajas actividad, mostrándose cada vez más grandes los picos de mayor actividad durante el periodo de estudio, es decir una tendencia al aumento (Figura 53b).

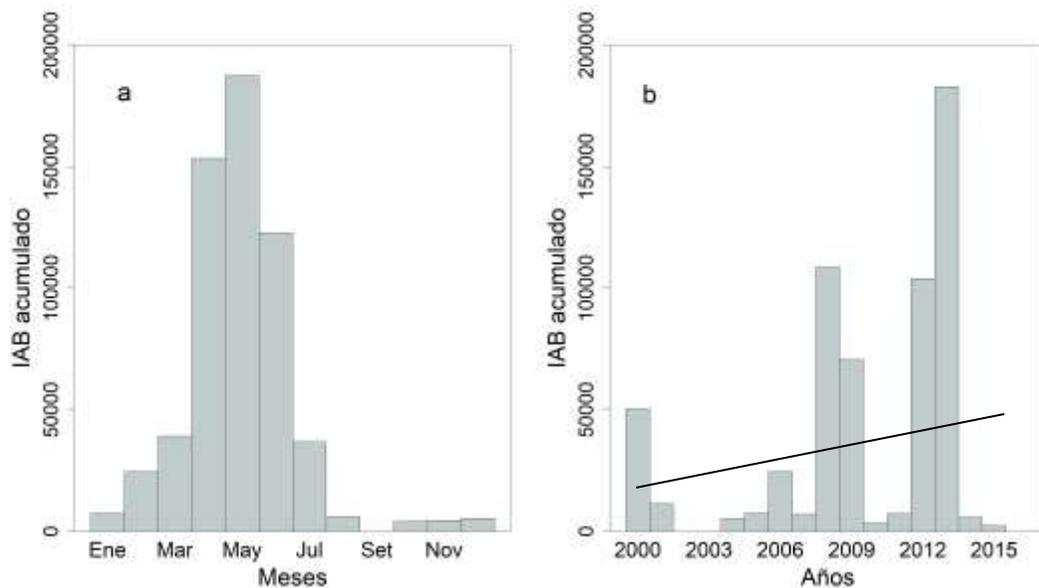


Figura 53. Distribución estacional (a) y anual (b) de los índices de aguas blancas (IAB).

### **4.3. Cambios de la temperatura y oxígeno en la bahía de Paracas durante los eventos de aguas blancas.**

Las series diarias de temperatura y oxígeno indican que se produce una disminución de estos parámetros al iniciarse un evento de aguas blancas, tal y como puede observarse en la Figura 54, para los eventos ocurridos en los periodos abril-junio 2009 y marzo-abril 2015. Las series diarias de oxígeno y temperatura en relación con los demás eventos de aguas blancas desde el 2006 al 2015 se muestran desde el Anexo 17 al Anexo 25.

En la Figura 55 se diferencian dos grupos de promedios diarios de temperatura y oxígeno: correspondientes a los días previos a los eventos de aguas blancas y a los días durante los eventos de aguas blancas en la Bahía de Paracas, determinados a partir de las series diarias en los Anexos 17-25.

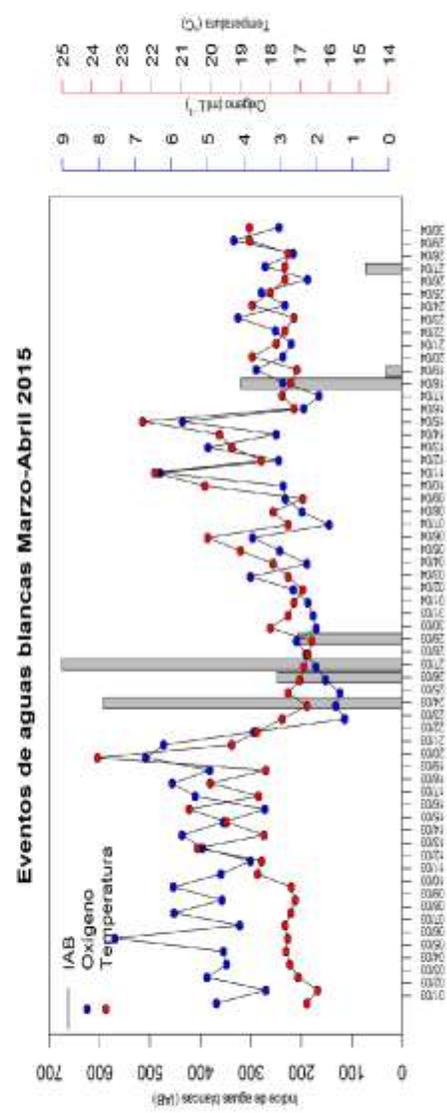
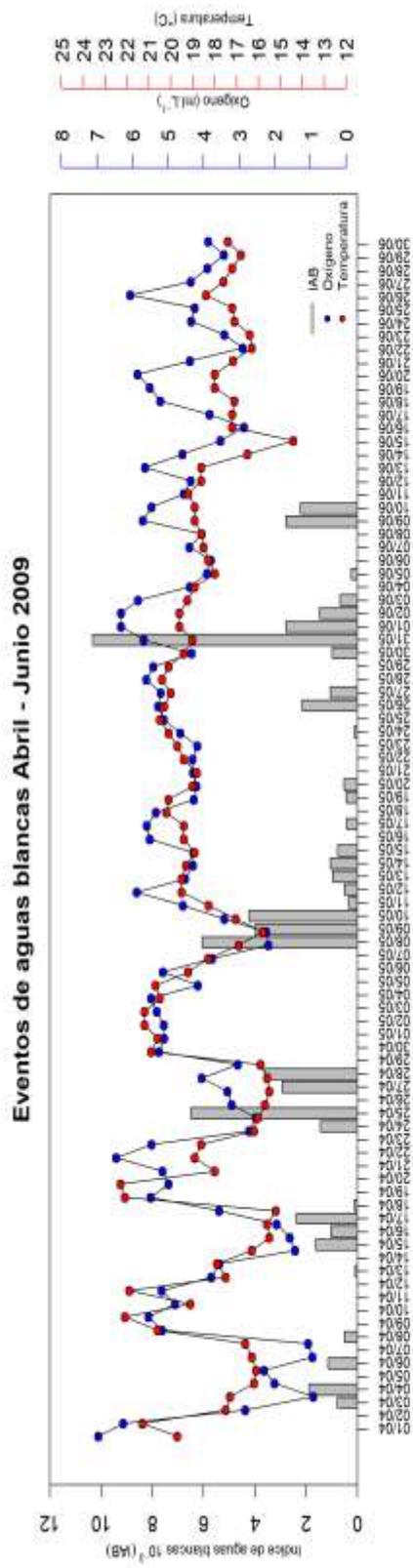


Figura 54. Series diarias de oxígeno (azul) y temperatura (rojo) al interior de la Bahía de Paracas y su relación con los eventos de aguas blancas (IAB) para los periodos abril-junio 2009 y marzo-abril 2015.

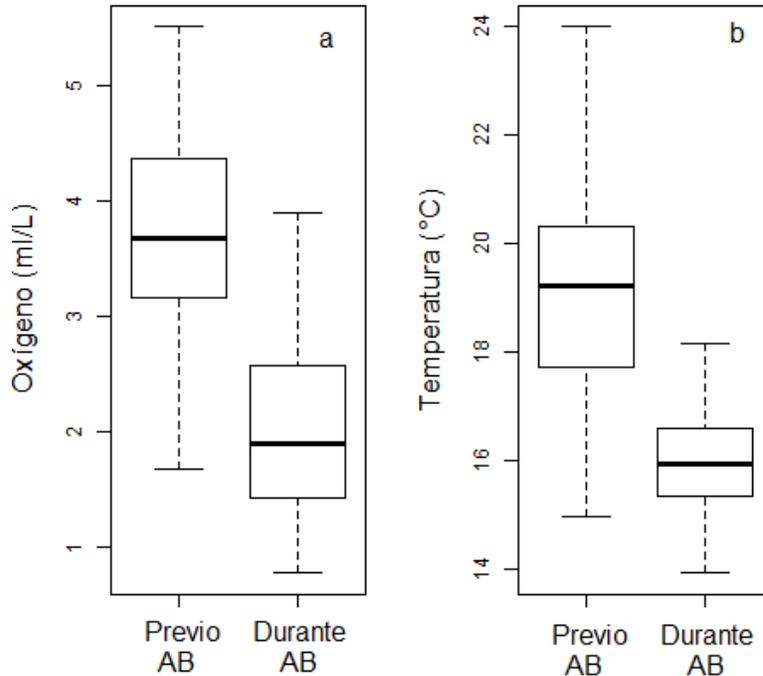


Figura 55. Distribución del oxígeno (a) y temperatura (b) en dos grupos: previo a los eventos de aguas blancas y durante los eventos de aguas blancas ocurridos en la Bahía de Paracas.

Se observa que en los días previos a la presencia de aguas blancas, el oxígeno varió de 1.7 a 5.5 ml.L<sup>-1</sup> y la temperatura estuvo entre los 14.9 y 24 °C. En tanto, durante los eventos de aguas blancas, el oxígeno disminuyó, variando de 0.7 a 3.9 ml.L<sup>-1</sup> y la temperatura de 13.9 a 18.1°C.

Las diferencias entre los promedios de oxígeno de los días previos a las aguas blancas y durante los días con aguas blancas fueron significativamente diferentes ( $t_{34}=7.86$ ;  $p<0.05$ ), comprobando que existe una disminución del oxígeno en la columna de agua

al presentarse los eventos de aguas blancas al interior de la bahía de Paracas. Similar situación se presentó para la temperatura ( $t_{34}=8.47$ ;  $p<0.05$ ).

Con respecto al oxígeno disuelto, las mayores variaciones ocurrieron en diciembre del 2008, disminuyendo en promedio  $3.85 \text{ ml. L}^{-1}$  de  $5.45$  a  $1.60 \text{ ml. L}^{-1}$  (Figura 56a). En el caso de las temperaturas, las mayores variaciones se presentaron durante marzo del 2006 en el cual la temperatura disminuyó  $7.55^{\circ}\text{C}$  en promedio, variando de  $24$  a  $16.45^{\circ}\text{C}$  (Figura 56b).

La climatología del oxígeno, temperatura y gradiente de temperatura al interior de la bahía de Paracas para el periodo 2006-2015 se muestran en la figura 57. Los mayores valores del oxígeno en la bahía Paracas se presentaron en el mes de junio, alcanzando un nivel de  $3.75 \text{ ml. L}^{-1}$ . En febrero se presentaron los niveles más bajos de oxígeno, manteniéndose por debajo de los  $2 \text{ ml. L}^{-1}$  (Figura 57a). En este mes también se observó el pico máximo de estratificación de  $0.32^{\circ}\text{C/m}$  (Figura 57c). Como es de esperarse, las mayores temperaturas se presentaron durante el verano con un promedio máximo de  $18.37^{\circ}\text{C}$  en el mes de marzo, mientras que la temperatura más baja se registró en setiembre con un promedio mínimo de  $15.62^{\circ}\text{C}$ .

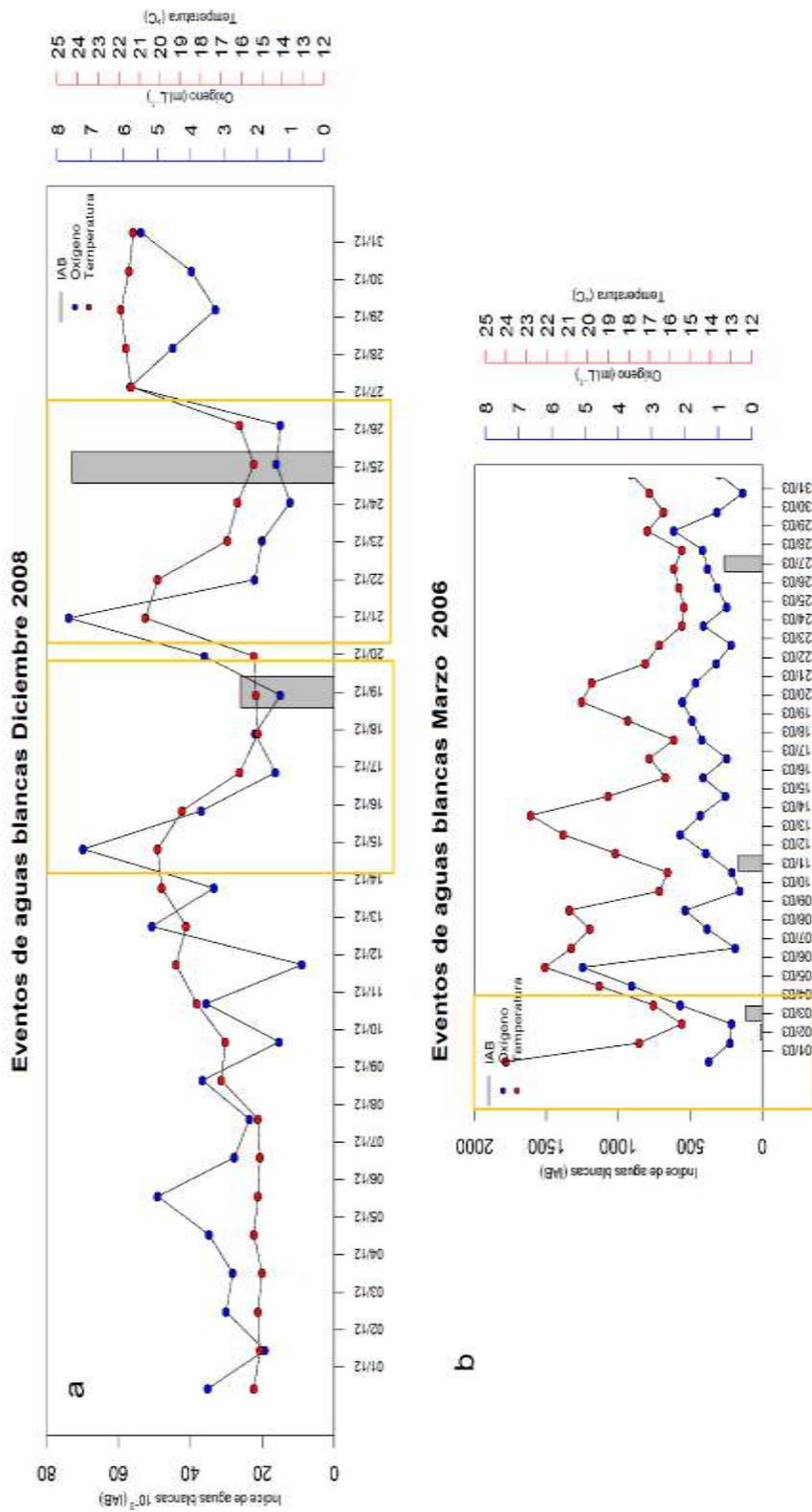


Figura 56. Series diarias de oxígeno y temperatura en relación con los eventos de aguas blancas de los periodos diciembre 2008(a) y marzo 2006(b) al interior de la bahía de Paracas. Los cuadros amarillos muestran las mayores disminuciones de oxígeno en diciembre 2008 (línea azul) y de temperatura en marzo 2006 (línea roja).

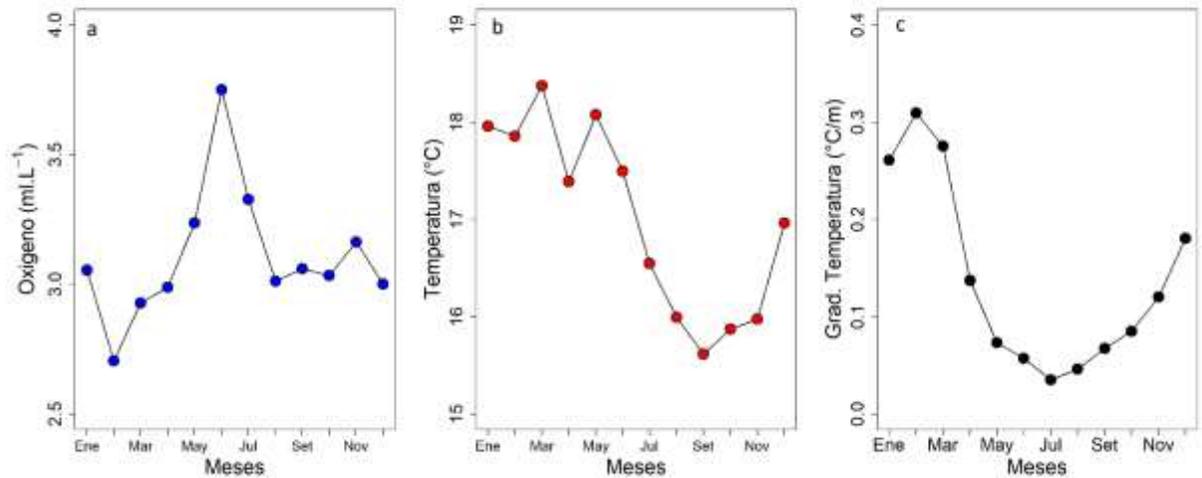


Figura 57. Climatología de oxígeno(a), temperatura (b) y gradiente de temperatura(c) a una profundidad de 5m en la bahía de Paracas a partir de datos de muestreos de Pluspetrol para el periodo 2006-2015.

#### 4.4. Relación del viento satelital e índice de afloramiento con los eventos de aguas blancas.

La velocidad satelital del viento está muy relacionada al índice de afloramiento y siguen un ciclo estacional (Figura 58). Los mayores valores se presentaron durante el invierno, particularmente en el mes de agosto, alcanzando velocidades promedio del viento  $>9\text{m/s}$  y un índice de afloramiento  $\sim 300\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100\text{m}$ . Asimismo, se observa que el mes de marzo presentó la menor variabilidad de estas variables.

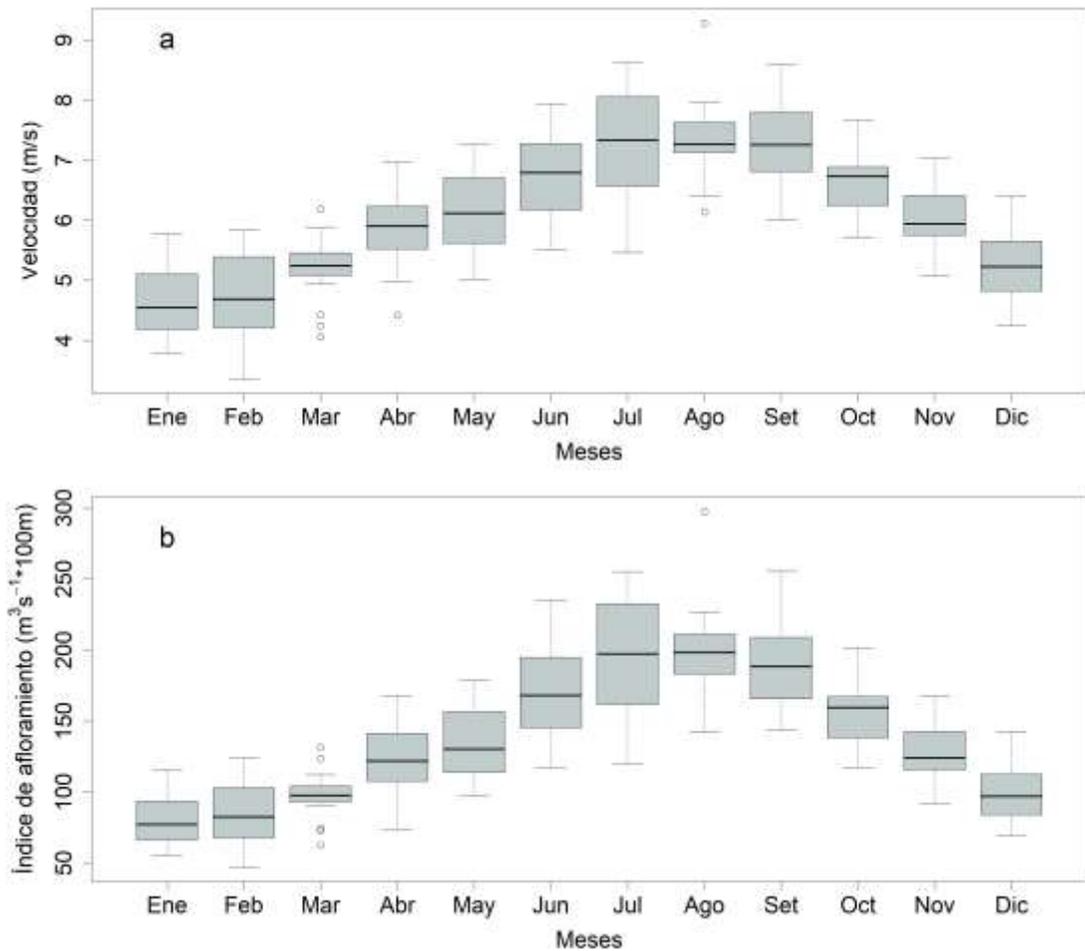


Figura 58. Diagrama de cajas estacionales de la velocidad satelital del viento (a) e índice de afloramiento (b).

Durante todo el periodo de estudio, el comportamiento de la velocidad del viento y del índice afloramiento fueron variables, encontrándose los valores más bajos en el 2012, mientras que los más altos se registraron en el 2007. El año 2002 presentó menores variabilidades de los valores de velocidad del viento e índice de afloramiento que el resto de los años (Figura 59).

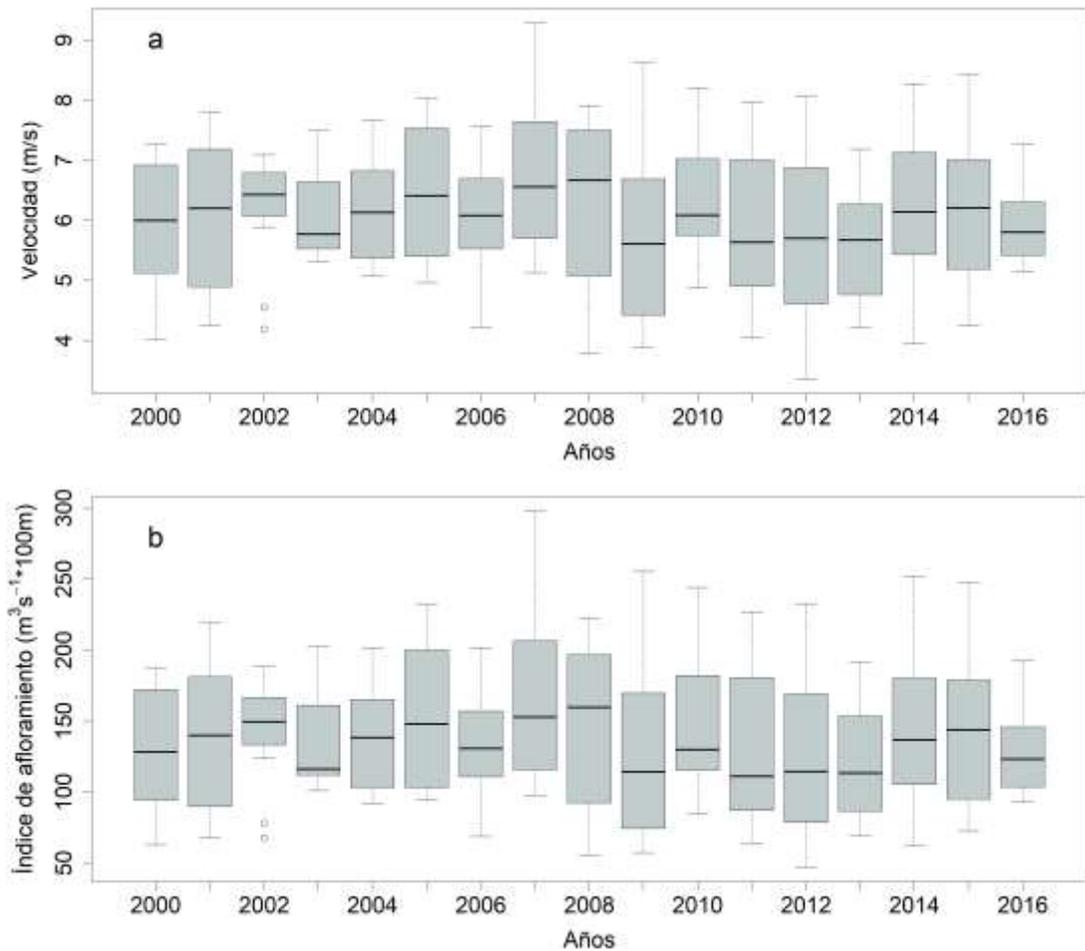


Figura 59. Diagrama de cajas anuales de la velocidad satelital del viento (a) e índice de afloramiento (b)

La correlación cruzada entre el índice de afloramiento y el índice de aguas blancas mostró una correlación negativa significativa ( $p < 0.05$ ) para un lag de 3 meses con un coeficiente de correlación de  $-0.796$  (Figura 60). Este resultado indica que existe un desfase de 3 meses entre ambas variables, ocurriendo el pico máximo de actividad de aguas blancas 3 meses antes que el pico de máximo afloramiento y coincide con el inicio del ciclo estacional del afloramiento y con la caída de la gradiente de temperatura, entre los meses de abril y mayo (Figura 61).

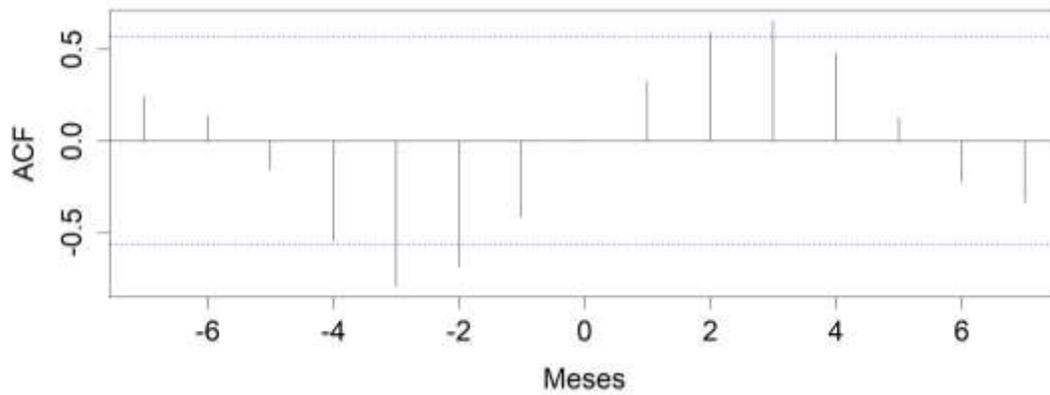


Figura 60. Análisis de correlación cruzada entre el Índice de aguas blancas (IAB) y el Índice de afloramiento. La mayor correlación se muestra en un lag negativo igual a 3 meses.

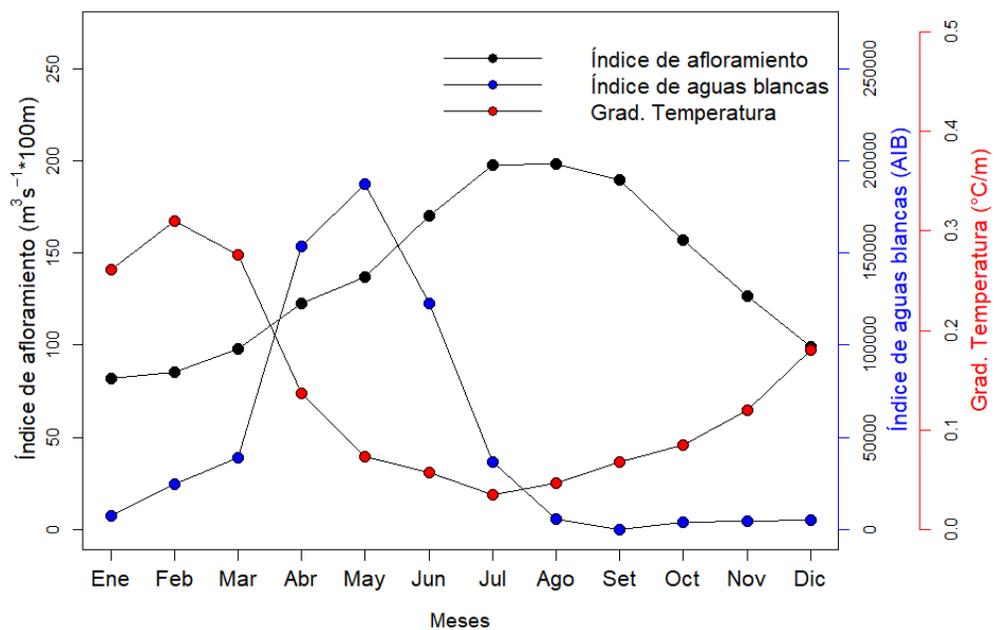


Figura 61. Relación de las series estacionales entre el Índice de afloramiento, el Índice de aguas blancas y la Gradiente de Temperatura.

## **5. DISCUSIÓN**

### **5.1. Verificación del algoritmo de identificación de aguas blancas**

Una manera de verificar el algoritmo de identificación de aguas blancas creado en esta investigación fue por medio de la comparación de las áreas (km<sup>2</sup>) obtenidas por el algoritmo de identificación creado en este estudio, con aquellas resultantes de la aplicación del algoritmo creado por Ohde et al. para el estudio de plumas de aguas blancas en las costas de Namibia (Ohde et al., 2007). Se obtuvo una buena correlación de ambos resultados en cuanto a la variabilidad estacional de ocurrencia de plumas de aguas blancas (no mostrado en esta investigación), sin embargo, fue necesario realizar otro tipo de verificación y asegurar la efectividad del algoritmo.

Para ello, se identificaron las plumas de aguas blancas frente a Pisco, reportadas por diversos autores (Aguirre, 2016; Flores 2016; Schunck et al., 2013) utilizando el algoritmo creado para esta investigación. Para algunas de las fechas reportadas no se presentaron datos disponibles de color del mar debido a la presencia de nubosidad en la zona, por lo que no se pudo hacer uso del algoritmo. Sin embargo, el algoritmo sí pudo detectar presencia de aguas blancas en días cercanos a estas fechas dando a conocer, aproximadamente, la persistencia de estos eventos. En el 2013 las plumas de aguas blancas aparecen y desaparecen a lo largo del verano. La primera aparición reportada fue el día 3 de enero por Aguirre (2016), pero el algoritmo logra detectar

recién una pluma de aguas blancas el día 15 de enero, la cual al parecer tuvo una duración de aproximadamente 4 días, desvaneciéndose para el día 19 de enero. Al día siguiente vuelve a reactivarse la pluma, desapareciendo nuevamente el día 24 de enero. Un nuevo reporte sucede el día 28 de enero (Aguirre, 2016) y que posiblemente se extiende hasta todo el mes de febrero ya que este mismo autor vuelve a reportar la presencia de aguas blancas el día 7 de febrero. En este día posiblemente se haya iniciado un evento intenso y de una duración importante puesto que el algoritmo detectó la presencia constante de la pluma durante varios días, entre el 9 y 17 de febrero, fecha en la cual la pluma parece atenuarse para posteriormente reactivarse y alcanzar gran intensidad 4 días después con una posible duración de hasta al menos el 25 de febrero. En esta fecha la pluma casi desaparece y se la observa fuera de la bahía dirigiéndose al oeste pegada a la península de Paracas. No obstante, las aguas blancas al interior de la bahía de Paracas aún persisten registrándose nuevamente la presencia de éstas el día 4 de marzo (Aguirre, 2016). Este evento, a diferencia de los ocurridos en enero y febrero parece abarcar superficies tanto dentro y fuera de la bahía como se muestran de mejor manera a partir del 20 de marzo, en donde se aprecia plumas más grandes que se extienden bordeando la península desde la bahía de Paracas (ver especialmente el día 25 de marzo). Durante los días siguientes y el resto del año no existen reportes de aguas blancas en la bahía de Paracas y el algoritmo tampoco detectó plumas en ella, solamente se detectaron plumas en la parte oeste de la península. Similar situación se observó en mayo del 2009 (Schunck et al., 2013) donde se reportó grandes plumas oceánicas frente a la península de Paracas y con el pasar de los días se observan apariciones de nuevas plumas de aguas blancas al

interior de la bahía de Paracas, las cuales se extienden hacia el oeste pasando por la península de Paracas (ver días del 8 al 10 de mayo del 2009). Ambos casos citados permiten corroborar que nuestro algoritmo identificó correctamente las plumas de aguas blancas y además permitió conocer la presencia de otras plumas durante los días en los que no se observaron directamente, lo que facilita la determinación de la duración casi real de estos eventos.

Situación contraria se observa en el año 2015 en el cual se reporta presencia de aguas blancas durante los meses de marzo y abril. Un evento de aguas blancas intenso y de importante duración tuvo lugar entre el 22 y 31 de marzo en la bahía de Paracas (Flores, 2016). La abundante nubosidad impidió que el algoritmo detecte la presencia de plumas sulfurosas completas y para todo el periodo, pero sí logró hacerlo en los días 24, 26, 27 y 29 de marzo.

En este último caso mencionado, la observación directa de plumas de aguas blancas resultó ser de mayor utilidad que la información remota para realizar el seguimiento del evento de aguas blancas. Pero cabe resaltar que ambas fuentes de información se complementan para estudios de este tipo y no existe mejor validación que comparar las señales espectrales provenientes de las reflectancias medidas remotamente con aquellas provenientes de mediciones directas en la pluma de agua blanca, así como también constatar la existencia de  $S^{\circ}$  en la superficie decolorada.

## **5.2. Uso de las herramientas satelitales en el estudio de los eventos de aguas blancas.**

El algoritmo de identificación elaborado en este estudio ha permitido llevar a cabo un seguimiento más completo de los eventos de aguas blancas, dando a conocer que los eventos antes reportados eran de mayor duración e intensidad de lo que se conocía. No obstante, la desventaja que se tiene al utilizar el sensoramiento remoto para este tipo de estudios es la presencia de nubes que impiden la captación de luz reflejada desde la superficie del mar por parte de los sensores de color del mar. Como consecuencia, no es posible obtener información satelital, sobre todo en los meses de invierno. Por lo explicado, se trató de corregir este problema haciendo el bootstrapping a las series del número de días con aguas blancas y también considerando en la elaboración del índice de frecuencia solo aquellos días que en los que se dispuso de información satelital de color del mar en más del 50% de la región de estudio. Sin embargo, muchos autores han realizado correcciones de nubosidad mucho más elaboradas que implican aplicar algoritmos para identificar píxeles contaminados por la cobertura nubosa (García-Soto C, 2009). Asimismo, existe la desventaja de que el sensor no capta información de zonas bastante costeras, por lo que en muchos casos no se contó con información en la Bahía de Paracas, no solo por nubosidad, sino también por la limitación que tiene el sensor, aumentando la posibilidad de que la cantidad de eventos de aguas blancas contabilizados al interior de la bahía de Paracas se encuentren sesgados.

### **5.3. Variabilidad estacional y anual de las plumas de aguas blancas en la región 13°-15°LS**

En un reciente estudio acerca de la variabilidad temporal de las plumas de aguas blancas en la parte norte del sistema de afloramiento de la corriente de Benguela (Ohde y Dadou, 2018) se obtuvo que la ocurrencia de las plumas de aguas blancas sigue un ciclo estacional, en donde los picos de mayor actividad se dan a finales del verano e inicios de otoño (entre febrero y abril). Similares resultados se obtuvieron en la presente investigación en la cual, los picos de mayor actividad se presentaron durante el otoño (abril-junio), no obstante, vinieron incrementándose desde el verano (Ver Figura 53a). Cabe resaltar que la fuente de datos satelitales de color de mar es distinta (MODIS para este estudio y MERIS por Ohde y Dadou, 2018), sin embargo, los resultados de la actividad de aguas blancas se mostraron similares, lo que puede significar que la aparición de plumas de aguas blancas en los sistemas de Benguela y Humboldt pueden desencadenarse en similares condiciones ya que ambos sistemas no son ajenos por ubicarse en el hemisferio sur y siguen los mismos procesos estacionales. Así, los periodos de mayor actividad de plumas de aguas blancas en ambos sistemas coinciden con el inicio del ciclo anual de afloramiento, en el cual las intensidades de los vientos empiezan a aumentar. Como consecuencia, el índice de afloramiento (proxy de la intensidad del afloramiento) también se incrementa (Ver Figura 58), lo cual aumenta la probabilidad de liberación de H<sub>2</sub>S proveniente de aguas de fondo al desplazarse aguas superficiales hacia el oeste. Por lo tanto, la actividad de aguas blancas alcanza sus picos máximos en este periodo. En este

sentido, se podría distinguir 2 estudios que confirman la relación del afloramiento con la ocurrencia de aguas blancas. Por ejemplo, Weeks et al. (2004) muestran gráficamente que las plumas de aguas blancas se superponen a las zonas de afloramiento, las cuales se caracterizan por condiciones de bajas temperaturas, indicadoras de un afloramiento intenso. Del mismo modo Ohde (2009) sugiere que el desarrollo de las plumas de aguas blancas está relacionado al transporte de Ekman y que sus áreas se expanden al incrementarse el afloramiento de aguas debido a la intensificación del viento. Por ello, grandes plumas de aguas blancas se han desarrollado a menudo al norte de puntos principales de afloramiento en ambos sistemas, como es el caso de Lüderitz en Namibia (Weeks et al., 2004; Ohde et al., 2007) y San Juan, en Perú (presente estudio).

Los resultados de la presente investigación arrojan una correlación cruzada negativa de la actividad de las aguas blancas (índice de aguas blancas) con el índice de afloramiento con un desfase (lag) de 3 meses y con un factor de correlación de -0.796 (Figura 60), lo cual indica que la mayor actividad de aguas blancas (abril-mayo: otoño) se da 3 meses antes del pico de afloramiento (julio-agosto: invierno).

Dentro de la bahía de Paracas, esto se explica debido a que, durante la etapa de verano, las mayores temperaturas y la presencia, mayormente, de vientos débiles (Flores, 2016) ocasionan estratificación en la bahía disminuyendo los niveles de oxígeno en el fondo, tal y como lo muestra la Figura 57, lo cual favorece la formación y acumulación de  $H_2S$  en el fondo debido al proceso de sulfato reducción. Con el

pasar de los meses, para la estación de otoño, existe una acumulación de  $H_2S$  en fondo que se ve reflejada en los flujos desde el sedimento hacia la columna de agua (Flores, 2016). Además, el inicio de la intensificación de los vientos en el verano tardío e inicios de otoño (entre marzo y mayo) (Flores, 2016) rompe el estado de estratificación de la columna de agua que se había formado y además permite la advección de las aguas de fondo cargadas con  $H_2S$ , el cual se oxida en superficie a  $S^0$ , formando aguas blancas (Minghelli-Roman et al., 2011). A escala diaria, también se ha observado que ocurre este mismo proceso de activación de vientos para la formación de aguas blancas al interior de la bahía, ya que Flores (2016) reportó periodos de vientos con velocidades muy bajas (menor a 1m/s) del 16 al 19 de marzo del 2015, previo al intenso evento de aguas blancas ocurrido entre el 20 y 31 de marzo del 2015. Durante los meses de invierno, especialmente en el mes de agosto donde ocurre el pico de afloramiento (3 meses después del pico de aguas blancas), se presenta los niveles más bajos de actividad de las aguas blancas, lo cual puede deberse a que ya no existe más  $H_2S$  acumulado que pueda oxidarse a  $S^0$  puesto a que fue utilizado meses previos (durante el otoño) (Ohde y Dadou, 2018). Tal situación es corroborada en la investigación de Flores (2016) en donde reportó la disminución de flujos y/o inversión de flujos de  $H_2S$ , actuando la Bahía de Paracas como sumidero hacia finales de junio y además las condiciones de oxígeno aumentan en esa época (Figura 57) permitiendo la degradación de la materia orgánica por otros procesos diferentes a la sulfato reducción, disminuyendo la formación de  $H_2S$ .

Los eventos de aguas blancas detectados al interior de la bahía de Paracas presentan un pico principal en el mes de abril, mientras que los eventos localizados fuera de la bahía, en el mes de mayo. Este comportamiento puede estar gobernado por dos procesos distintos de formación. En el primer caso, es más probable que las aguas blancas en la bahía de Paracas se estén formando por mezcla de la columna de agua debido a la acción de vientos fuertes, advectando aguas de fondo con presencia de  $H_2S$ , dado luego de un periodo de estratificación y vientos calmos ocurrido en verano, tal y como lo explica Minghelli-Roman et al., 2011 para la Laguna de Thau en Francia. Mientras que en el segundo caso, la formación de aguas blancas estaría influenciadas de mayor manera por los vientos oceánicos y el afloramiento costero que desplaza aguas superficiales hacia el oeste, advectando aguas de fondo anóxicas con presencia de  $H_2S$ . Por ello también, las plumas de aguas blancas pueden ser vistas desplazándose y extendiéndose en sentido noroeste.

En el presente estudio se obtuvo que los picos de mayor actividad se dieron en los años 2008, 2009, 2012 y 2013, con presencia de picos menores en el 2000 y 2006 (Figura 52b). Sin embargo, para el sistema de Benguela los picos máximos ocurrieron en los años 2004, 2005 y 2010, presentándose el evento más fuerte en abril del 2005 (Ohde y Dadou, 2018). Ohde y Dadou (2018) discuten que la variabilidad anual está dada por procesos locales como el afloramiento y por procesos remotos como la influencia de masas de agua provenientes del norte de Namibia. En cualquier caso, la influencia de condiciones de bajo oxígeno es clave para favorecer la producción de  $H_2S$  que posteriormente será oxidado a  $S^0$  originando las aguas blancas. Dicho esto,

es importante señalar que la frecuencia de ocurrencia e intensidad de estos eventos posiblemente tienda a aumentar en los próximos años debido a que los océanos están tendiendo a la desoxigenación en el marco del cambio climático (Ito et al., 2017; Manay, 2018). Esta situación podría evidenciarse incluso en la serie anual de áreas e intensidades de aguas blancas acumuladas (Figuras 52 y 53), donde se muestra que las aguas blancas presentan picos de alta actividad seguidos de picos de escasa o nula actividad, pero incrementándose cada vez más los picos máximos (los picos del 2012-2013 resultaron más altos que los del 2008-2009 y estos últimos, más altos que los del 2000 y 2006).

Asimismo, la ocurrencia de los eventos de aguas blancas parecen tener relación inversa con los periodos de ocurrencia del fenómeno El Niño, resultando en este estudio que durante los años denominados como Niño se detectó menor actividad de aguas blancas (Figura 53). Ello se debería a que durante estos fenómenos existe una profundización de la oxiclina, por lo que la columna de agua se encuentra más oxigenada, disminuyendo la probabilidad de formación de aguas blancas. En ese sentido, Gallardo y Espinoza (2008) sugirieron que la presencia de aguas blancas ocurren durante fases La Niña (LN) o frías normales, justo después de haber acontecido un evento El Niño (EN), sin embargo, esto no pudo ser determinado en el presente estudio.

Por otro lado, algunos autores han reconocido que la ocurrencia de aguas blancas es más frecuente de lo que se creía cuando estos eventos aún no se estudiaban con

herramientas satelitales. Esto se puede constatar en las observaciones de Shunck et al. (2013) al encontrar plumas de aguas blancas en la plataforma peruana durante enero del 2009 y posteriormente en mayo del mismo año. Asimismo, en la Bahía de Concepción (Chile), se han registrado eventos de aguas blancas que han persistido casi constantemente durante el verano y cuyo inicio se ha podido observar desde el mes de diciembre del año anterior (Gallardo y Espinoza, 2008). Similar situación también queda evidenciado en nuestros resultados en la mayoría de años.

#### **5.4. Distribución espacial de las plumas de aguas blancas**

Todas las plumas de aguas blancas identificadas por el algoritmo fueron costeras, teniendo como distancia máxima a la costa 25mn. Esto apoya la hipótesis de que las aguas blancas se originan por el desplazamiento de aguas superficiales hacia el oeste y el ascenso de aguas de fondo cargadas en  $H_2S$  como consecuencia del proceso de afloramiento costero. En efecto, decoloraciones turquesas en la superficie del mar ubicadas fuera de la costa podrían no considerarse como tal. Dichas decoloraciones corresponderían a floraciones de cocolitofóridos, los cuales presentan características espectrales similares a las de aguas blancas por la alta dispersión de luz que generan debido a las estructuras calcáreas que poseen estos organismos. Pero se localizan frecuentemente en zonas más oceánicas y no pegadas a la costa como las plumas de aguas blancas (Siegel et al., 2006). Para verificar con exactitud y no caer en error es recomendable comparar información de reflectancia satelital con mediciones in situ.

Ohde et al. (2007) han mostrado que dentro de las bahías en la costa de Namibia se presentaron plumas de aguas blancas más intensas que afuera de ellas. Esta situación se debería a que las bahías son ambientes estables y en condiciones de vientos calmos y altas temperaturas ambientales, se intensifica la estratificación termal. Como consecuencia, se favorece la formación de organismos fitoplanctónicos en superficie, existe mayor sedimentación de materia orgánica producida en superficie, cuya degradación contribuye al consumo de oxígeno y finalmente la formación de  $H_2S$  en fondo, favoreciendo la formación de aguas blancas. Sin embargo, en este estudio se han encontrado eventos muy intensos tanto dentro como fuera de la bahía de Paracas.

#### **5.5. Caracterización de la temperatura y oxígeno durante los eventos de aguas blancas en la Bahía de Paracas**

La concentración de oxígeno en el ambiente puede contribuir a la formación de plumas de aguas blancas. Así, durante el pico máximo de afloramiento, ocurre una mezcla turbulenta en la plataforma continental, resultando un ambiente más oxigenado en la etapa de invierno. En efecto, la formación de  $H_2S$  y posteriormente de aguas blancas, podría verse interrumpidas. Esto sostiene la explicación del por qué la ocurrencia de aguas blancas disminuye durante el invierno (Figuras 46a). Sin embargo, en periodos de concentraciones bajas de oxígeno, se favorece el proceso de sulfato reducción, formando mayores concentraciones de  $H_2S$ .

La climatología CARS de oxígeno disuelto medido en las aguas de fondo en Namibia presenta un ciclo estacional. Muestran picos de hipoxia en el periodo verano-otoño, mientras que la hipoxia se debilita durante el periodo de invierno-primavera (Ohde y Dadou, 2018). Situación semejante se aprecia en la climatología del oxígeno (2006-2015) en la Bahía de Paracas, donde se presentan niveles bajos de oxígeno en el agua durante el verano-otoño, periodo que abarca los meses de mayor actividad de aguas blancas (abril-mayo), mientras que se observa una oxigenación en el mes de junio época en la que la actividad de aguas blancas disminuye en toda el área de estudio (Figura 57a).

Los análisis diarios de oxígeno y temperatura muestran que existe una disminución de estas variables durante los eventos de aguas blancas (Figura 55) al interior de la bahía de Paracas, lo que podría estar indicando el ingreso de aguas frías y pobres en oxígeno, característico de las aguas de afloramiento costero. Aguirre et al. (2014) también determinan los mismos cambios en el oxígeno y la temperatura, además de vientos favorables al afloramiento durante la ocurrencia de los eventos de aguas blancas entre enero y marzo del 2013. Estas aguas podrían estar trayendo consigo altas concentraciones de  $H_2S$  que favorecerían la formación de aguas blancas en la bahía.

## **5.6. Causas antropogénicas y naturales de los eventos de aguas blancas**

Los meses de mayor actividad de aguas blancas dentro y fuera de la bahía de Paracas coinciden con el periodo de mayor actividad industrial pesquera, la cual se da aproximadamente entre los meses de diciembre a julio. Anteriormente a la construcción del emisor submarino de efluentes pesqueros provenientes de la zona industrial de Paracas, se evidenció que el aumento de  $H_2S$  y la disminución del oxígeno disuelto en la columna de agua de la bahía de Paracas se debían a la gran carga de materia orgánica presente en los efluentes pesqueros descargados en la bahía (Cabello y Tam, 2002). En la actualidad no existe tal impacto de los efluentes pesqueros, sin embargo se han producido eventos de mareas rojas asociados a los eventos de aguas blancas aportando también grandes cantidades de materia orgánica durante la etapa de decaimiento, produciendo las condiciones adversas de  $H_2S$  y oxígeno mencionadas (Informe de campo Imarpe, 2015),

Estas condiciones ambientales poco favorables para el ambiente marino han traído como consecuencia varazones y mortandades masivas de organismos. Flores et al (2004) mencionan que el 75% de los casos de las varazones ocurridos entre 1983 y 2004 ocurrieron en periodo de actividad industrial pesquera, con o sin presencia de mareas rojas, reportándose en algunos casos el 100% de mortandad de conchas de abanico (Cabello et al. 2000). Asimismo, Flores (2016) realizó una recopilación de las mortandades y varazones en la bahía de Paracas e indica que la mayoría de estos eventos están asociados a la presencia de aguas blancas y que mayormente toman

lugar entre los meses de diciembre y mayo, que son los meses de en los cuales se presentan mayor cantidad de aguas blancas en la bahía de Paracas, teniendo como picos de máxima actividad en abril y mayo. Este autor también enlista simultáneamente eventos de mareas rojas, periodos de condiciones anóxicas y presencia de sulfuros. Como vemos, éstos son procesos sinérgicos que favorecen la formación de aguas blancas.

Por otro lado, Carbajo (2009) sugiere que en el año 2005 ocurrieron 323 casos de mareas rojas en la bahía de Paracas e incluso se observó que algunas de ellas se dieron de manera simultánea en diferentes partes de la bahía. Precisamente en este año, el presente estudio permitió detectar plumas suaves de aguas blancas que se distribuyeron más al norte en comparación a otros años, alcanzando casi los 13° y además presentaron las mayores distancias a la costa. Lo que podría significar una fuerte relación de los eventos de mareas rojas (y los blooms algales en general) con los eventos de aguas blancas, los cuales podrían aumentar la probabilidad de ocurrir debido a la gran cantidad de materia orgánica que se genera debido a la alta producción fitoplanctónica.

Haciendo una recopilación de los estudios que se han realizado a propósito de los eventos de varazones y mortandades en la bahía de Paracas, se puede sugerir que la contaminación por parte de las industrias pesqueras, además de las condiciones cálidas y estables por la estratificación termal en la columna de agua, favorecieron anteriormente la producción de floraciones algales. Estos procesos naturales y

antropogénicos aportaron gran cantidad de materia orgánica, que tras los procesos de reducción agotaron el oxígeno y produjeron altos niveles de sulfuros, lo cual hizo de la bahía un ambiente crítico para la vida de los organismos. Los sulfuros producidos resultaron ser la fuente de aguas blancas. También, habría que añadir que esa carga de materia orgánica quedó retenida en la bahía, así como se da en lugares de poca circulación, aumentando la contaminación. En la mayoría de estos estudios no se han reportado visiblemente las plumas aguas blancas, sin embargo, muchas veces la formación de estas plumas no se llega a dar, pero sí se percibe un olor peculiar indicativo de presencia de sulfuros en el agua.

Sin embargo, hoy en día, al no existir contaminación por parte de las empresas pesqueras, la ocurrencia de aguas blancas en la bahía de Paracas estaría dada en gran medida por procesos de fuerte estratificación, aumento de producción fitoplanctónica, sedimentación de gran carga de materia orgánica hacia el fondo y producción de sulfuros.

## 6. CONCLUSIONES

La ocurrencia de eventos de aguas blancas en la región 13-15°S no tiene una relación directa con los periodos de intensificación de vientos e incremento del afloramiento, sino más bien presenta una relación cruzada con un desfase de 3 meses. Presentándose los picos de aguas blancas durante los meses de abril-mayo, periodo que corresponde al inicio del ciclo estacional del afloramiento y que se presenta 3 meses antes del pico máximo del afloramiento.

El algoritmo de identificación de aguas blancas desarrollado en este estudio permitió realizar una correcta detección de las plumas de aguas blancas, las cuales coinciden con las plumas de las imágenes satelitales en color real correspondientes. Además, la cantidad de plumas detectadas determinó una estacionalidad que presenta el mismo comportamiento que las plumas sulfurosas ocurridas en el sistema de afloramiento frente a Namibia.

Las plumas de aguas blancas en la región de estudio se localizaron dentro de las 25 mn de distancia a la costa y se centraron principalmente alrededor de la península de Paracas. Asimismo, se obtuvieron mayores frecuencias de ocurrencia durante los meses de abril y mayo, al igual que las áreas acumuladas que abarcaron y los índices de aguas blancas. Las aguas blancas también presentaron una variación interanual donde los años de mayor actividad fueron: 2000, 2006, 2008-2009 y 2012-2013, observándose una tendencia a aumentar durante el periodo de estudio.

La concentración de oxígeno disuelto y la temperatura de la columna de agua al interior de la bahía de Paracas se ven disminuidas significativamente durante los periodos de aguas blancas. Las mayores disminuciones de oxígeno y temperatura fueron de  $3.85 \text{ ml.L}^{-1}$  y  $7.55^{\circ}\text{C}$ , durante diciembre del 2008 y marzo del 2006, respectivamente.

La presente investigación pudo confirmar que las mayores actividades de aguas blancas ocurren durante el inicio del ciclo estacional del afloramiento, entre los meses de abril y mayo y que se estarían dando debido a la advección de  $\text{H}_2\text{S}$  hacia la franja costera. Esto sería posible debido al desplazamiento hacia el oeste de aguas superficiales y el posterior ascenso de aguas de fondo cargadas de este compuesto, motivo por el cual las plumas de aguas blancas se mostraron bastante costeras. Asimismo, la influencia del afloramiento en la formación de aguas blancas se ve reflejada en la disminución de la temperatura y el oxígeno en la bahía de Paracas, situación característica del ingreso de aguas de afloramiento.

## 7. RECOMENDACIONES

Complementar observaciones provenientes del sensoramiento remoto con aquellas realizadas de manera directa sobre las aguas blancas para realizar un seguimiento completo de estos eventos. Esto aplicaría para los eventos que ocurran en un futuro, los cuales deben ser reportados instantáneamente a los centros de investigación como el IMARPE con el fin de tomar todas las muestras de agua y sedimento posibles.

Se recomienda realizar un registro obligatorio de la ocurrencia de eventos de aguas blancas en la zona de estudio con ayuda de los maricultores locales. O de ser el caso, reportar al menos la existencia del olor característico a sulfuros, ya que estos no pueden ser percibido visualmente sino hasta que se produzca la formación de  $S^{\circ}$ .

Esta investigación mostró los principales lugares de ocurrencia de eventos de aguas blancas ocurridos fuera de la bahía de Paracas, por lo que es importante realizar muestreos de agua y sedimento y analizar información oceanográfica de dichas zonas con el fin de brindar un mejor conocimiento de los procesos que intervienen en la formación de estas aguas.

Realizar estudios acerca de la circulación de aguas para conocer la distribución que toman las plumas de aguas blancas.

Extender este estudio a otras zonas del litoral peruano, como por ejemplo la Bahía de Sechura en donde también se ha observado la presencia de estas aguas y comparar si los procesos que intervienen en su formación son los mismos que se han planteado en este estudio.

Automatizar el algoritmo de identificación de aguas blancas que se desarrolló en esta investigación, de tal manera que su uso sea más fácil y rápida.

Medir las reflectancias in situ para ser comparada con las reflectancias satelitales en caso se registre un nuevo evento de aguas blancas, con el propósito de validar el algoritmo creado.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre-Velarde, A., Flye-Sainte Marie, J., Thouzeau, G., y Jean, F. (2014). Impact of low oxygen concentrations on scallop culture in the upwelling-influenced Bay of Paracas, Peru. Poster Presented at the Low Oxygen Environments in Marine, Estuarine and Fresh Waters Colloquium, Liège.

Aguirre-Velarde, A. (2016). Bioenergetics of the Peruvian scallops (*Argopecten purpuratus*) in an environmental context limiting oxygen. Earth Sciences. Université de Bretagne occidentale - Brest.

Amend, J. P., Edwards, K. J., y Lyons, T. W. (Eds.). (2004). Sulfur biogeochemistry: past and present. Boulder, Colorado: Geological Society of America.

Bakun, A., y Weeks, S. J. (2008). The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? *Progress in Oceanography*, 79(2-4), 290-299.

Brüchert, V., Jørgensen, B. B., Neumann, K., Riechmann, D., Schlösser, M., y Schulz, H. (2003). Regulation of bacterial sulfate reduction and hydrogen sulfide fluxes in the central namibian coastal upwelling zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(23), 4505-4518.

Brüchert, V., Currie, B., Peard, K. R., Lass, U., Endler, R., Dübecke, A., Julies, E., Leipes, T., y Zitzmann, S. (2006). Biogeochemical and physical control on shelf anoxia and water column hydrogen sulphide in the Benguela coastal upwelling system off Namibia. En Neretin L. N. (Ed.), *Past and Present Water Column Anoxia*, 64, 161-193. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Brüchert, V., Currie, B., y Peard, K. R. (2009). Hydrogen sulphide and methane emissions on the central Namibian shelf. *Progress in Oceanography*, 83(1-4), 169-179.

Cabello, R., Tam, J., Jacinto, M. (2002). Procesos naturales y antropogénicos asociados al evento de mortalidad de conchas de abanico ocurrido en la bahía de Paracas (Pisco, Perú) en junio del 2000. *Rev. peru. biol.* 9(2): 49-65.

Cabello, R.J., Sánchez, G. (2006) Parámetros ambientales y residuos de contaminantes orgánicos persistentes (COPs) en el litoral costero de Pisco-Paracas, Perú. Invierno austral 2005. *Inf. Inst. Mar Perú* 33(2): 99-110.

Canfield, D. E., Stewart, F. J., Thamdrup, B., De Brabandere, L., Dalsgaard, T., Delong, E. F., Revsbech, N.P., Ulloa, O. (2010). A Cryptic Sulfur Cycle in Oxygen-Minimum-Zone Waters off the Chilean Coast. *Science*, 330(6009), 1375-1378.

Carbajo, L. (2009). Monitoreo de mareas rojas en Bahía Paracas el periodo 2002-2008. Foro: Impacto de las especies exóticas en el ecosistema marino y de aguas continentales Mayo 2009.

Chavez, F.P. 2005. Biological consequences of interannual to multidecadal variability. En: A. Robinson & K. Brink (Eds.), *The Sea*. Harvard University Press, Texas A. & M. Cambridge. p. 643-679.

Copenhagen, W.J. (1953). The periodic mortality of the fish in the Walvis Region. An extract from the article: Copenhagen, W.J., 1953. The periodic mortality of the fish in the Walvis Bay region-a phenomenon within the Benguela Current. Investigational Report Division of Fisheries-Union of South Africa 14, 1-35.

Curie. (1953). *Weather* 8(10)

Dale, A. W; Sommer, S; Lomnitz, U; Bourbonnais, A; Wallmann, K. (2016). Biological nitrate transport in sediments on the Peruvian margin mitigates benthic sulfide emissions and drives pelagic N loss during stagnation events. *Deep-Sea Research I* 112: 123-136.

Donayre, S., Flores, D., y Guardia, A. (2015). Evaluación poblacional de Gari solida (Gray, 1828) en Bahía Independencia-Pisco, junio 2010. *Inf Inst Mar Perú* 42(4): 499-503.

Dugdale R, Goering J, Barber R, Smith R, Packard T. (1977). Denitrification and hydrogen sulfide in the Peru upwelling region during 1976. *Deep-Sea Res* 24:601–608.

Emeis, K.-C., Brüchert, V., Currie, B., Endler, R., Ferdelman, T., Kiessling, A., Leipe, T., Nolipear, K., Struck, U., Vogt, T. (2004). Shallow gas in shelf sediments of the Namibian coastal upwelling ecosystem. *Continental Shelf Research*, 24(6), 627-642.

Evans, C. L. (1967). The toxicity of hydrogen sulphide and other sulphides. *Quarterly Journal of Experimental Physiology and Cognate Medical Sciences*, 52(3), 231-248.

Flores, R., Gutiérrez, D., Tam, J., Sánchez, S., Cabello, R. (2004). Informe Técnico sobre la dinámica de la Bahía Paracas y recomendaciones para su manejo. Informe Interno Instituto del Mar del Perú.

Flores, E. (2016). Impacto de la dinámica oceanográfica en la variación de azufre inorgánico en sedimentos de la Bahía de Paracas. Universidad Peruana Cayetano Heredia.

Fossing, H. (1990). Sulfate reduction in shelf sediments in the upwelling region off Central Peru. *Continental Shelf Research*, 10(4), 355-367.

Fossing, H., Gallardo, V. A., Jørgensen, B. B., Hüttel, M., Nielsen, L. P., Schulz, H., Canfield, D., Forster, S., Glud, R.N., Gundersen, J.K., Küver, J., Ramsing, N.B., Teske, A., Thamdrup, B. y Ulloa, O. (1995). Concentration and transport of nitrate by the mat-forming sulphur bacterium *Thioploca*. *Nature*, 374, 713.

Galindo, O., Quispe, S., Roca, E., Cabrera, A., Saravia, P., y Lorenzo, A. (2013). Evaluación poblacional de concha de abanico *Argopecten purpuratus*, Bahía Independencia-Pisco (10-21 Octubre 2012). *Inf Inst Mar Perú* 40(3-4): 176-186.

Gallardo, V. A., y Espinoza, C. (2008). The evolution of ocean color. En R. B. Hoover, G. V. Levin, A. Y. Rozanov, y P. C. Davies (Eds.). *Proc. SPIE 7097, Instruments, Methods, and Missions for Astrobiology XI*, 70970G.

García-Soto, C. (2009). *Oceanografía y satélites*. Madrid: Tébar, S.L.

Graco, M. I., Ledesma, J., Flores, G., & Girón, M. (2007). Nutrientes, oxígeno y procesos biogeoquímicos en el sistema de surgencias de la corriente de Humboldt frente a Perú. *Rev. peru. biol*, 14(1): 117-128.

Guardia, A., Sarmiento, H., Flores D., Zeballos J. (2012). Extracción de anchoveta (*Engraulis ringens* Jenyns) para consumo humano directo. Pisco, Perú. *Inf. Inst Mar Perú*. 39(1-2):61-71

Gutiérrez, D., Bouloubassi, I., Sifeddine, A., Purca, S., Goubanova, K., Graco, M., Field, D., Laurence, M., Velazco, F., Lorre, A., Salvattecí, R., Quispe, D., Vargas, G., Dewitte, B., Ortlieb, L. (2011). Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid-twentieth century: Recent trends in the Peruvian upwelling. *Geophysical Research Letters*, 38, L07603.

Guzmán, M., Chávez, J., Morón, O., Sánchez, S., Flores, G. (1997). Evaluación de la calidad del medio ambiente marino en la bahía de Pisco-Paracas, 22 a 24 de mayo 1996. *Inf. Prog. Inst. Mar Perú* 54.

Hamukuaya, H., O'Toole, M. J., y Woodhead, P. M. J. (1998). Observations of severe hypoxia and offshore displacement of Cape hake over the Namibian shelf in 1994. *South African Journal of Marine Science*, 19(1), 57-59.

Helly, J. J., y Levin, L. A. (2004). Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(9), 1159-1168.

Henrichs, S. M. y Farrington, J. W. (1984). Peru upwelling region sediments near 15°S. Remineralization and accumulation of organic matter. *Limnology and Oceanography*, 29, 1-19. En: Fossing, H. (1990). Sulfate reduction in shelf sediments in the upwelling region off Central Peru. *Continental Shelf Research*, 10(4), 355-367.

IMARPE. (1997). Aporte al conocimiento de la diversidad biológica marina de la Reserva Nacional de Paracas, Ica Perú.

IMARPE. (2010). Bases técnicas para el ordenamiento pesquero y acuícola de la Bahía de Paracas Línea Base - 2010.

IMARPE. (2010). Informe Nacional sobre el estado del ambiente marino del Perú. Informe de consultoría Convenio IMARPE-CPPS, Callao.

IMARPE. (2015). Nota de prensa: Falta de oxígeno y elevada temperatura en el mar ocasionó muerte de conchas de abanico.

IMARPE. (2016a). Nota de prensa: Alerta de floración algal, asociado a la presencia de especies potencialmente tóxicas en Pisco-Paracas.

IMARPE. (2016b). Nota de prensa: Marea roja (floración algal) y mortandad de recursos hidrobiológicos en Lagunillas-Pisco.

IMARPE. (2016c). Nota de Prensa: Reporte de varamiento de recursos hidrobiológicos frente al litoral de Paracas.

IMARPE (Ed.). (2014). Instituto del Mar del Peru: 1964 - 2014: 50 años de mar y ciencia (primera edición). Callao, Perú.

INRENA (2002). Reserva Nacional de Paracas Plan Maestro 2003-2007.

Ito, T., Minobe, S., Long, M.C., Deutsch, C. (2017). Upper Ocean O2 trends: 1958-2015. *Geophysical Research Letters*, 44(9)

Jacinto, M., Morón, O., Villanueva, P., Cabello, R., Guzmán, M. (1996a). Evaluación de la calidad del medio marino en Bahía Pisco-Paracas (22-24 Febrero 1995) *Inf. Prog. Inst. Mar Perú* 26.

Jacinto, M., Martínez, C., Sánchez, S., Flores, G., Pizarro, L. (1996b) Evaluación de la varazón y contaminación en la Bahía Paracas-Pisco. *Inf. Prog. Inst. Mar Perú* 29.

Jacinto, M., Cabello, R. (1999). Niveles de hidrocarburos de petróleo en el ecosistema marino costero del Perú. Bahías seleccionadas. Periodo 1996. Inf. Prog. Inst. Mar Perú 110.

Jacinto, M. (2014). Propuesta de un sistema de indicadores ambientales y socio económicos en la zona marino costera de Pisco-Paracas. Universidad Nacional de Ingeniería.

Jorgensen, B. B., y Postgate, J. R. (1982). Ecology of the Bacteria of the Sulphur Cycle with Special Reference to Anoxic-Oxic Interface Environments. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 298(1093), 543-561.

Kahru, M., Michell, B. G., Diaz, A., y Miura, M. (2004). MODIS detects a devastating algal bloom in Paracas Bay, Peru. Eos, Transactions American Geophysical Union, 85(45), 465-472.

Lavalle y García. (1917). Memoria Compañía Administradora del Guano 8.

Lavik, G., Stührmann, T., Brüchert, V., Van der Plas, A., Mohrholz, V., Lam, P., Mußmann, M., Fuchs, B. M., Amann, R., Lass, U., Kuypers, M. M. (2009). Detoxification of sulphidic African shelf waters by blooming chemolithotrophs. Nature, 457(7229), 581-584.

Lee, C y Cronin, C. (1982). The vertical flux of particulate organic nitrogen in the sea: descomposition of amino acids in the Peru upwelling area and equatorial Atlantic. Journal of Marine Research, 40, 227-251. En Fossing, H. (1990). Sulfate reduction in shelf sediments in the upwelling region off Central Peru. Continental Shelf Research, 10(4), 355-367.

Levin, L. A. (2002.). Deep-Ocean Life Where Oxygen Is Scarce, American Scientist, 90(5), 436-444.

Luther, G. W., Ma, S., Trouwborst, R., Glazer, B., Blickley, M., Scarborough, R. W., & Mensinger, M. G. (2004). The roles of anoxia, H<sub>2</sub>S, and storm events in fish kills of dead-end canals of Delaware inland bays. Estuaries, 27(3), 551-560.

Mayo, R. (1987). Determinación bioecológica de un area para el cultivo de la concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en la Bahía de Paracas Noviembre, 1986. Bol. Inst Mar Perú. Vol Extraordinario.

Manay, R. (2018) Evaluación de las simulaciones del Holoceno medio de modelos del CMIP5 mediante datos paleoceanográficos y su implicancia para proyecciones

futuras del 4CO<sub>2</sub> para las condiciones ambientales frente a Perú. Universidad Peruana Cayetano Heredia.

Menzel, D. W. y Ryther, J. H. (1960). The annual cycle of primary production in the Bermuda. *Deep-Sea Research*, 6, 351-365. En: Fossing, H. (1990). Sulfate reduction in shelf sediments in the upwelling region off Central Peru. *Continental Shelf Research*, 10(4), 355-367.

Millero, F. J., Hubinger, S., Fernandez, M., & Garnett, S. (1987). Oxidation of H<sub>2</sub>S in seawater as a function of temperature, pH, and ionic strength. *Environmental Science & Technology*, 21(5), 439-443.

Minghelli-Roman, A., Laugier, T., Polidori, L., Mathieu, S., Loubersac, L., y Gouton, P. (2011). Satellite survey of seasonal trophic status and occasional anoxic 'malaïgue' crises in the Thau lagoon using MERIS images. *International Journal of Remote Sensing*, 32(4), 909-923.

Moore, T. S., Dowell, M. D., y Franz, B. A. (2012). Detection of coccolithophore blooms in ocean color satellite imagery: A generalized approach for use with multiple sensors. *Remote Sensing of Environment*, 117, 249-263.

Morón O., Lostanau N., Escudero L. (1988). Parámetros Oceanográficos en Bahía Independencia, Perú, entre Mayo de 1985 y Julio de 1987. *Memorias del 2do Congreso Latinoamericano sobre Ciencias del Mar (COLACMAR) 17-21 Agosto de 1987, Lima, Perú.*

Ohde, T., Siegel, H., Reißmann, J., y Gerth, M. (2007). Identification and investigation of sulphur plumes along the Namibian coast using the MERIS sensor. *Continental Shelf Research*, 27(6), 744-756.

Ohde, T. (2009). Investigation of hydrogen sulphide eruptions along the Namibian coastline using different remote sensing systems. *Cent. Eur. J. Geosci.* 1(3). 340-346

Ohde, T., Dadou, I. (2018). Seasonal and annual variability of coastal sulphur plumes in the northern Benguela upwelling system. *PLoS ONE* 13(2): e0192140.

PNUMA y CONAM. (2007) Informe sobre el Estado del Ambiente Geo Bahía Paracas - Pisco.

Pocklington, R. (1981). Organic matter in upwelling off Northern Perú, November 1977. *Bol. Inst. Mar Perú (Vol. extraordinario ICANE):* 7-14. En Graco, M. I., Ledesma, J., Flores, G., & Girón, M. (2007). Nutrientes, oxígeno y procesos

biogeoquímicos en el sistema de surgencias de la corriente de Humboldt frente a Perú. *Rev. peru. biol.*, 14(1): 117-128.

Quispe, D., Graco, M., Correa, D., Tam, J., Gutiérrez, D., Morón, O., Flores, G., Yamashiro, C. (2010). Variabilidad espacio-temporal de condiciones hidrofísicas en bahía independencia, Pisco – Perú, desde 1995 al 2004, *Ecología Aplicada* 9(1), 9-18.

Rubio, J., Galindo, O., Flores, D., Quispe, S. (2001). *Inf. Prog. Inst. Mar Perú* 151: 3-12.

Ryther, J.H., Menzel, D.W., Hulburt, E.M., Lorenzen C.J. y Corwin N. (1971). The production and utilization of organic matter in the Peru coastal current. *Investigación Pesquera*, 35, 43-59. En Fossing, H. (1990). Sulfate reduction in shelf sediments in the upwelling region off Central Peru. *Continental Shelf Research*, 10(4), 355-367.

Sánchez, G., Tarazona, J., Flores, R., Maldonado, M., Carbajal, G. (1988). Características del Fitoplancton de Invierno en Bahía Independencia, Perú. *Memorias del 2do Congreso Latinoamericano sobre Ciencias del Mar (COLACMAR)* 17-21 Agosto de 1987, Lima, Perú.

Sánchez, G., Córdova, J., Ledesma, J. (1997). Informe ambiental en la zona industrial pesquera de la bahía de Paracas, Pisco, Perú. 25 al 27 de Abril 1997. *Inf. Prog. Inst. Mar Perú* 67: 3-19.

Schulz, H. D., y Zabel, M. (2006). *Marine Geochemistry*, Berlin: Springer.

Schunck, H., Lavik, G., Desai, D. K., Großkopf, T., Kalvelage, T., Löscher, C. R., Paulmier, A., Contreras, S., Siegel, H., Holtappels, M., Rosenstiel, P., Schilhabel, M.B., Graco, M., Schmitz, R.A., Kuypers, M. M., LaRoche, J. (2013). Giant Hydrogen Sulfide Plume in the Oxygen Minimum Zone off Peru Supports Chemolithoautotrophy. *PLoS ONE*, 8(8), e68661.

Segura, M., Galindo, O., Zeballos, J. (1998). Monitoreo del recurso "almeja" (*Gari solida*) en Bahía Independencia. Febrero 1996 - Julio 1998. *Inf. Prog. Inst. Mar Perú*, 96: 3-23.

Siegel, H., Ohde, T., Gerth, M., Lavik, G., y Leipe, T. (2007). Identification of coccolithophore blooms in the SE Atlantic Ocean off Namibia by satellites and in-situ methods. *Continental Shelf Research*, 27(2), 258-274.

Sievert, S. M., Kiene, R. P. y Schultz-Vogt, H. N. (2007). The sulfur cycle. *Oceanography*, 20(2), 117-123.

Solís, J., Carhuapoma, W., Velazco, F., Graco, M. (2012). Validation and quantification of hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) in interstitial water of marine sediments recent. *Inf. Inst. Mar Perú*, 39(1-2): 77-81.

Takeda, S., Nimura, Y., y Hirano, R. (1991). Optical, biological, and chemical properties of Aoshio, hypoxic milky blue-green water, observed at the head of Tokyo Bay. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 47(4), 126-137.

Torrans, E. L., y Clemens, H. P. (1982). Physiological and biochemical effects of acute exposure of fish to hydrogen sulfide. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology*, 71(2), 183-190.

Quijano, J. (2013). Estudio numérico y observacional de la dinámica de Viento Paracas, asociado al transporte eólico hacia el océano frente a la costa de Ica-Perú. Universidad Peruana Cayetano Heredia.

Velazco, F., Solís, J. (2000). Estudio sedimentológico de la bahía de Paracas. *Inf. Prog. Inst. Mar Perú* N° 133, 3-22.

Weeks, S. J., Currie, B., y Bakun, A. (2002). Massive emissions of toxic gas in the Atlantic: Satellite imaging. *Nature*, 415(6871), 493-494.

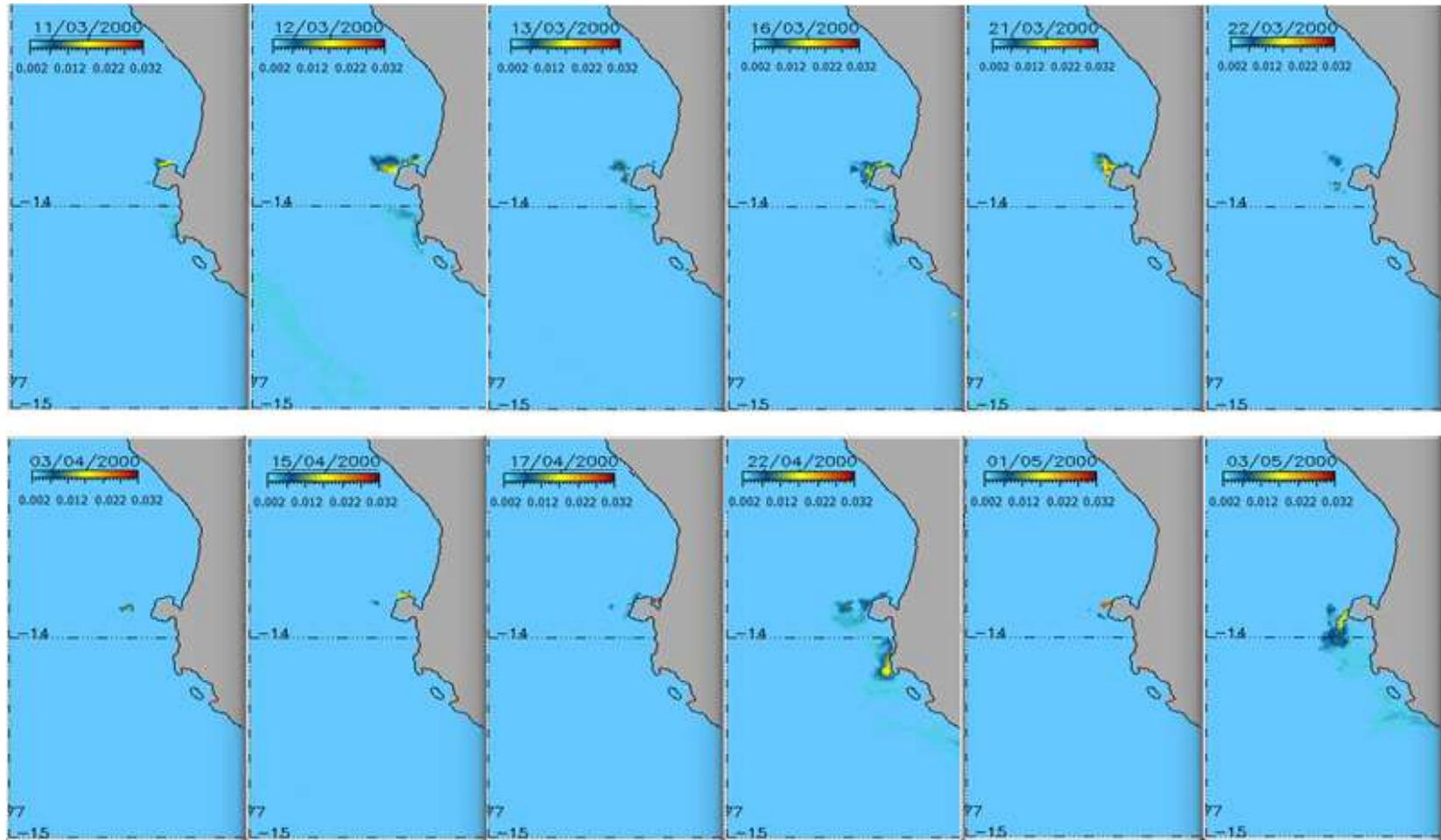
Weeks, S. J., Currie, B., Bakun, A., y Peard, K. R. (2004). Hydrogen sulphide eruptions in the Atlantic Ocean off southern Africa: implications of a new view based on SeaWiFS satellite imagery. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(2), 153-172.

Zhang, J., Gilbert, D., Gooday, A., Levin, L., Naqvi, S. W. A., et al.. Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development. *Biogeosciences*, European Geosciences Union, 2010, 7, 1443-1467.

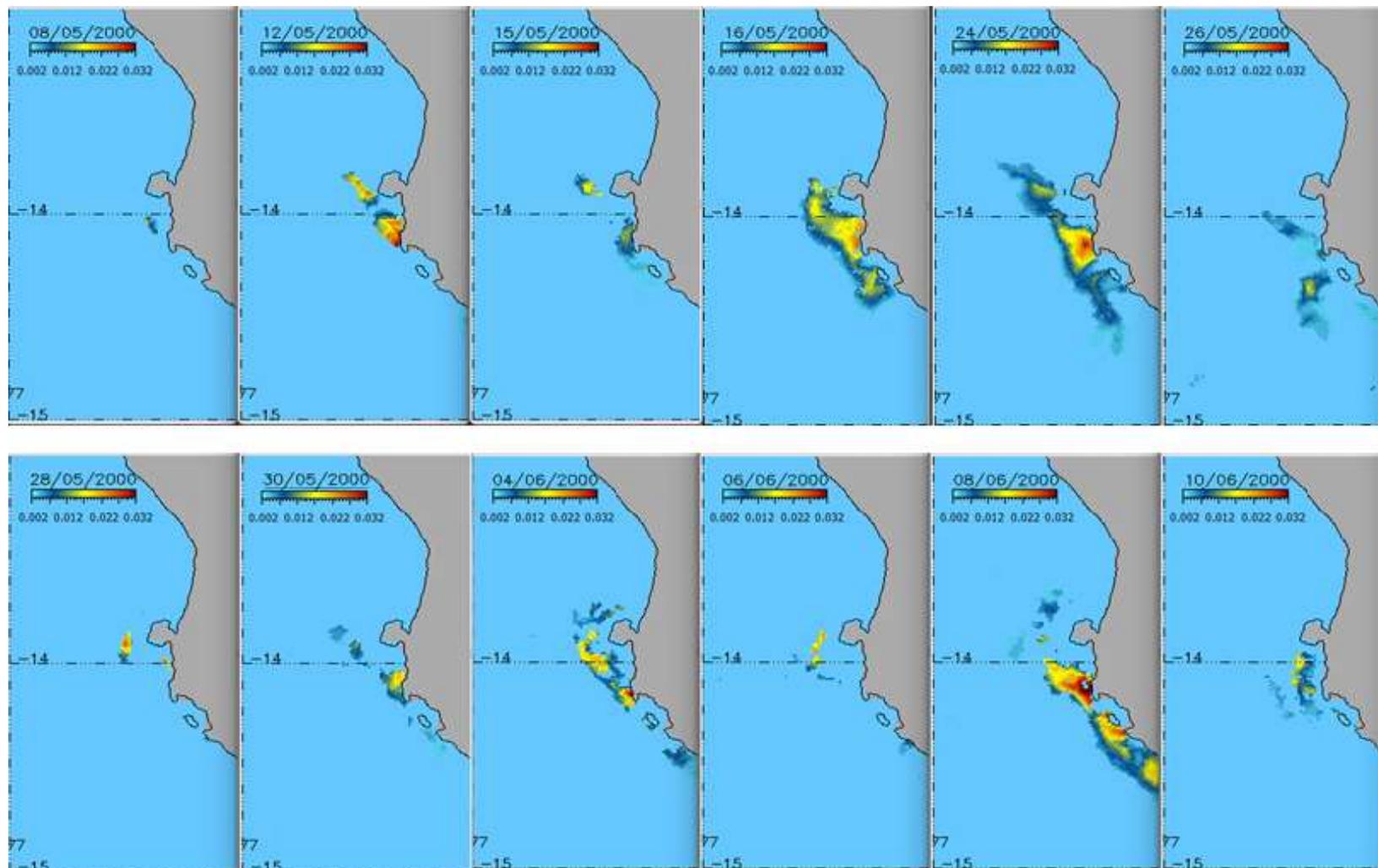
Zuta, S. y Guillén, O.G. (1970). Oceanografía de las aguas costeras del Perú. *Bol. Inst. Mar Perú* (2): 157-324.

# ANEXOS

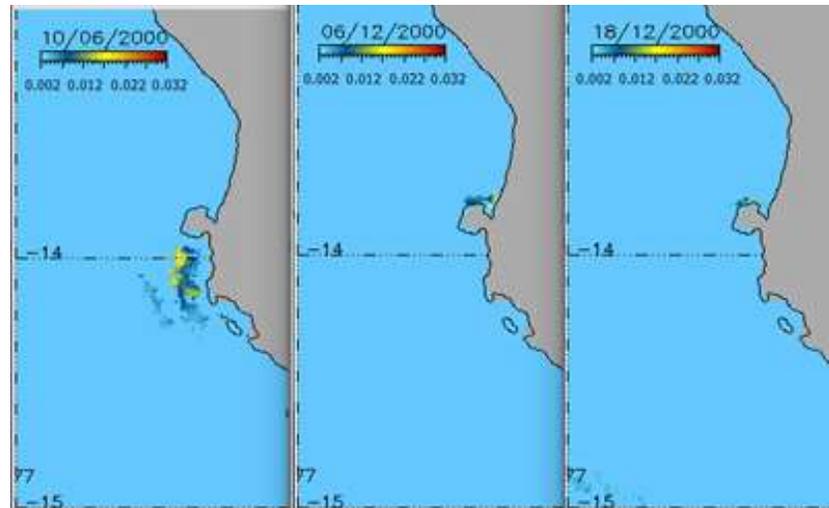
Anexo 1. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2000. La barra de color indica los niveles de reflectancia



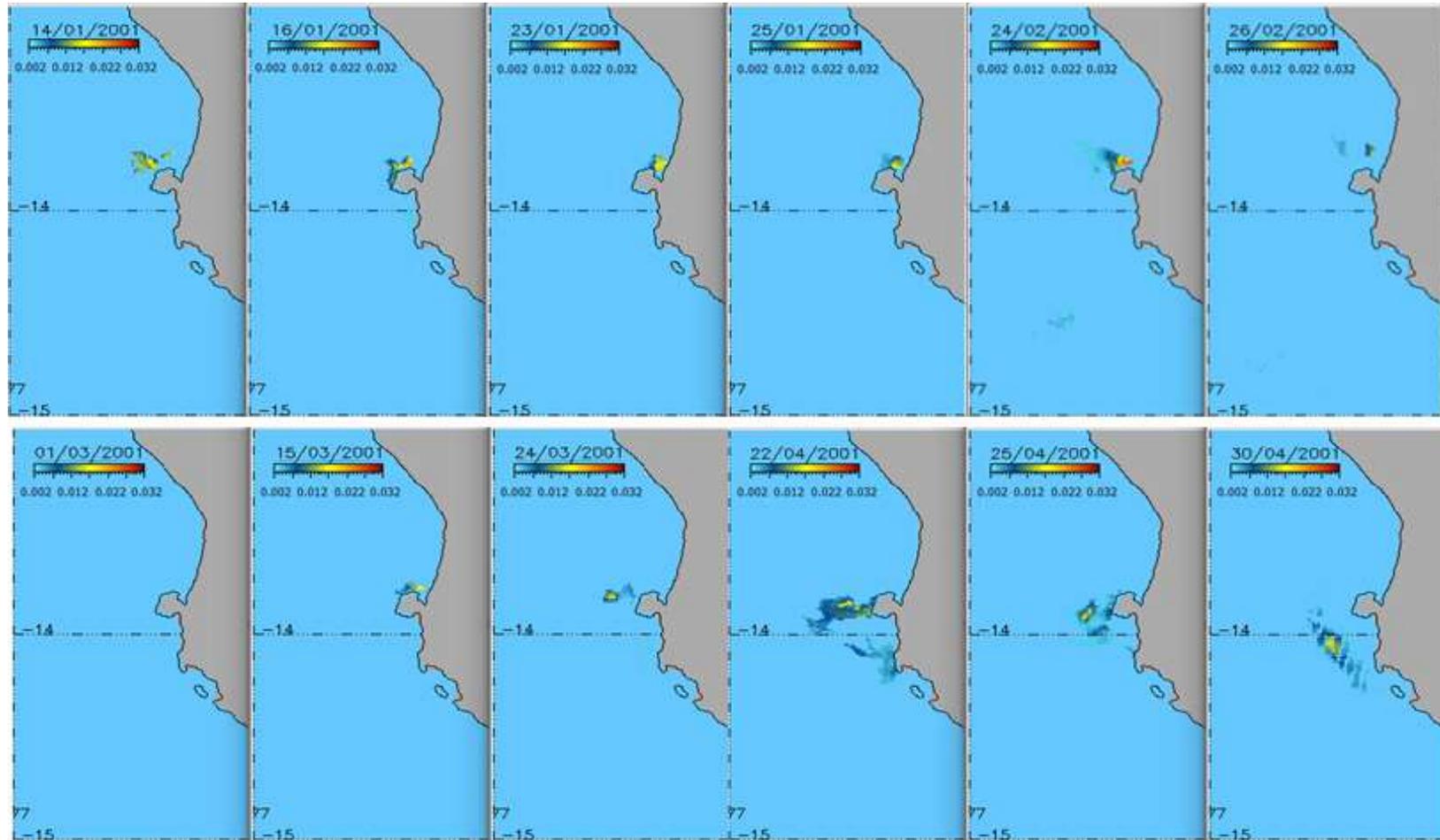
ANEXO 1. Continúa



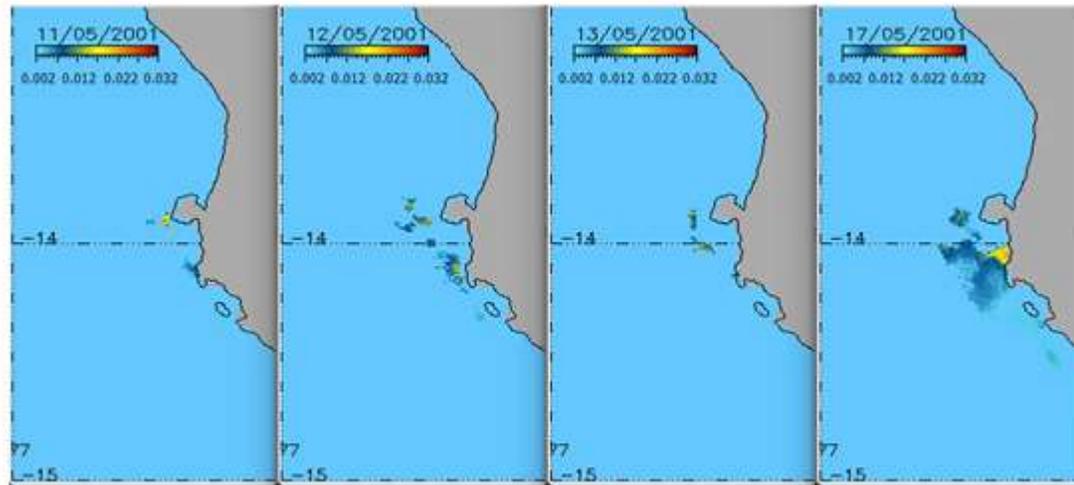
ANEXO 1. Continúa



Anexo 2. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2001. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



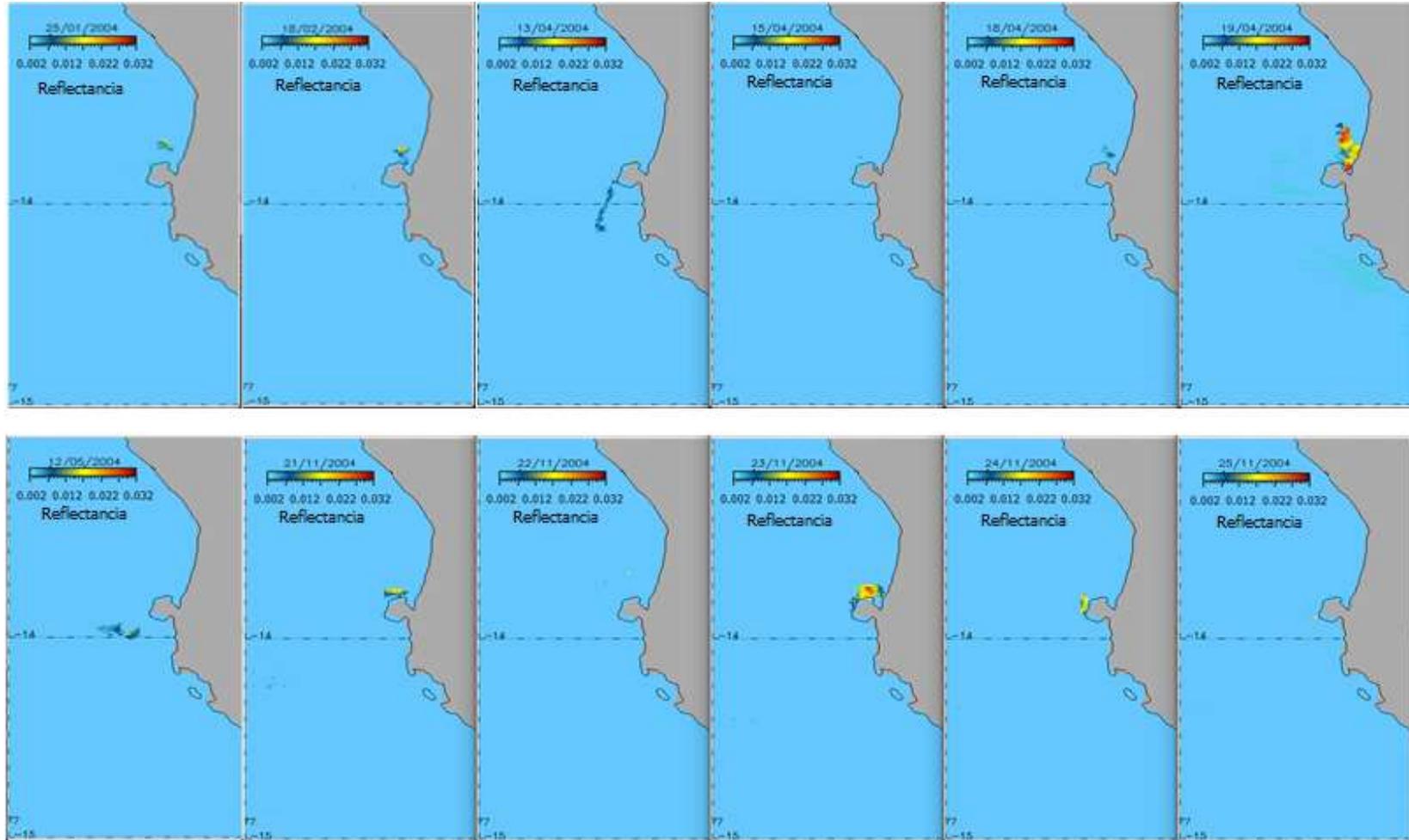
Anexo 2. Continúa



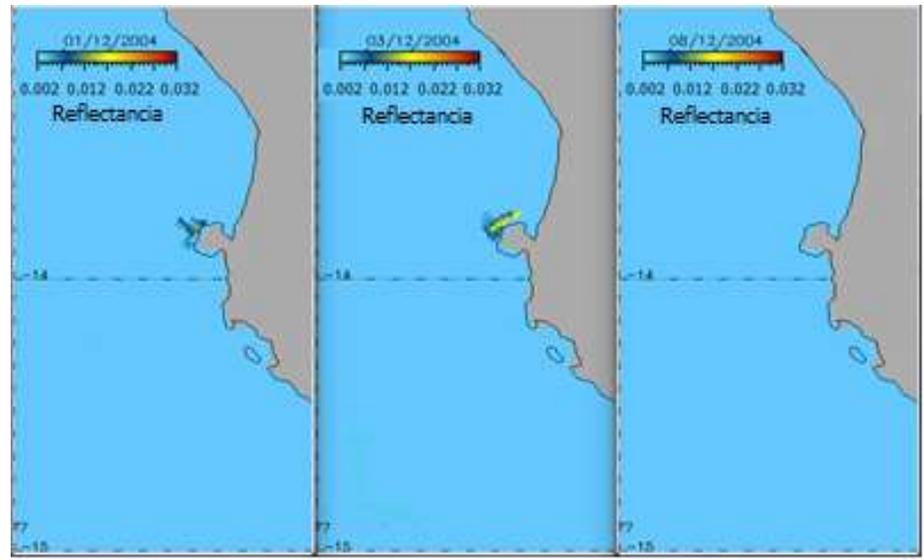
Anexo 3. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2003. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



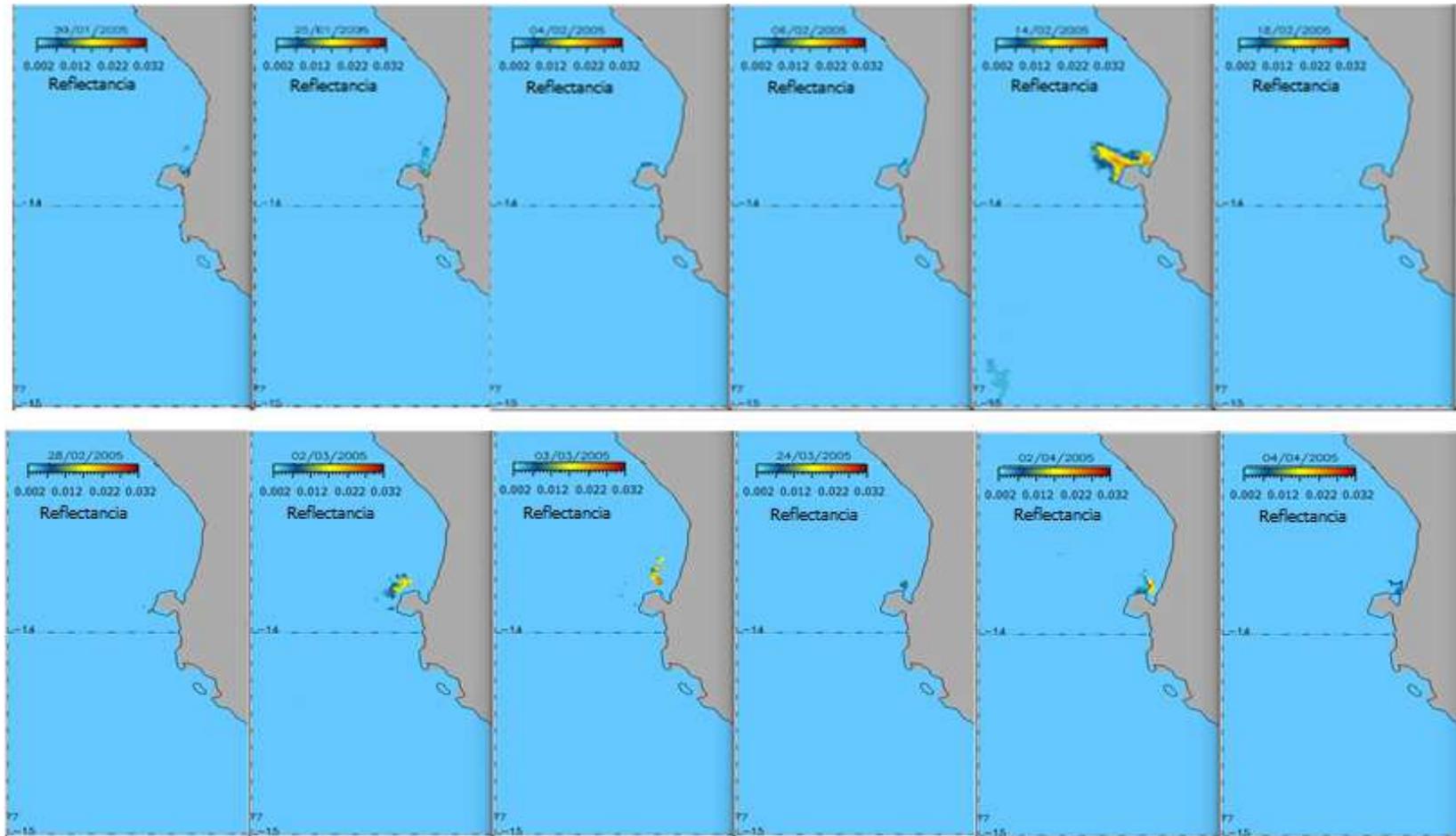
Anexo 4. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2004. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



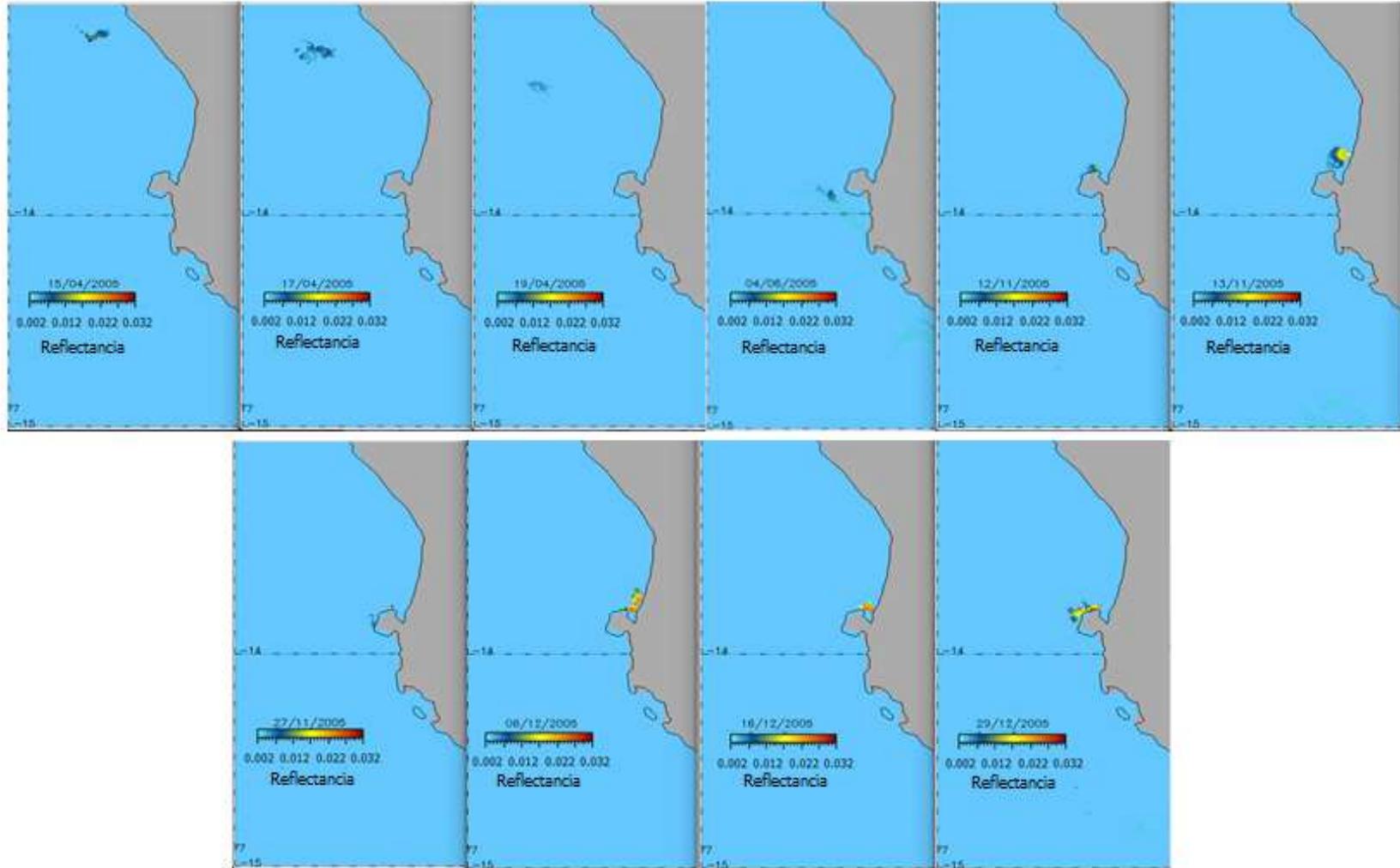
Anexo 4. Continúa



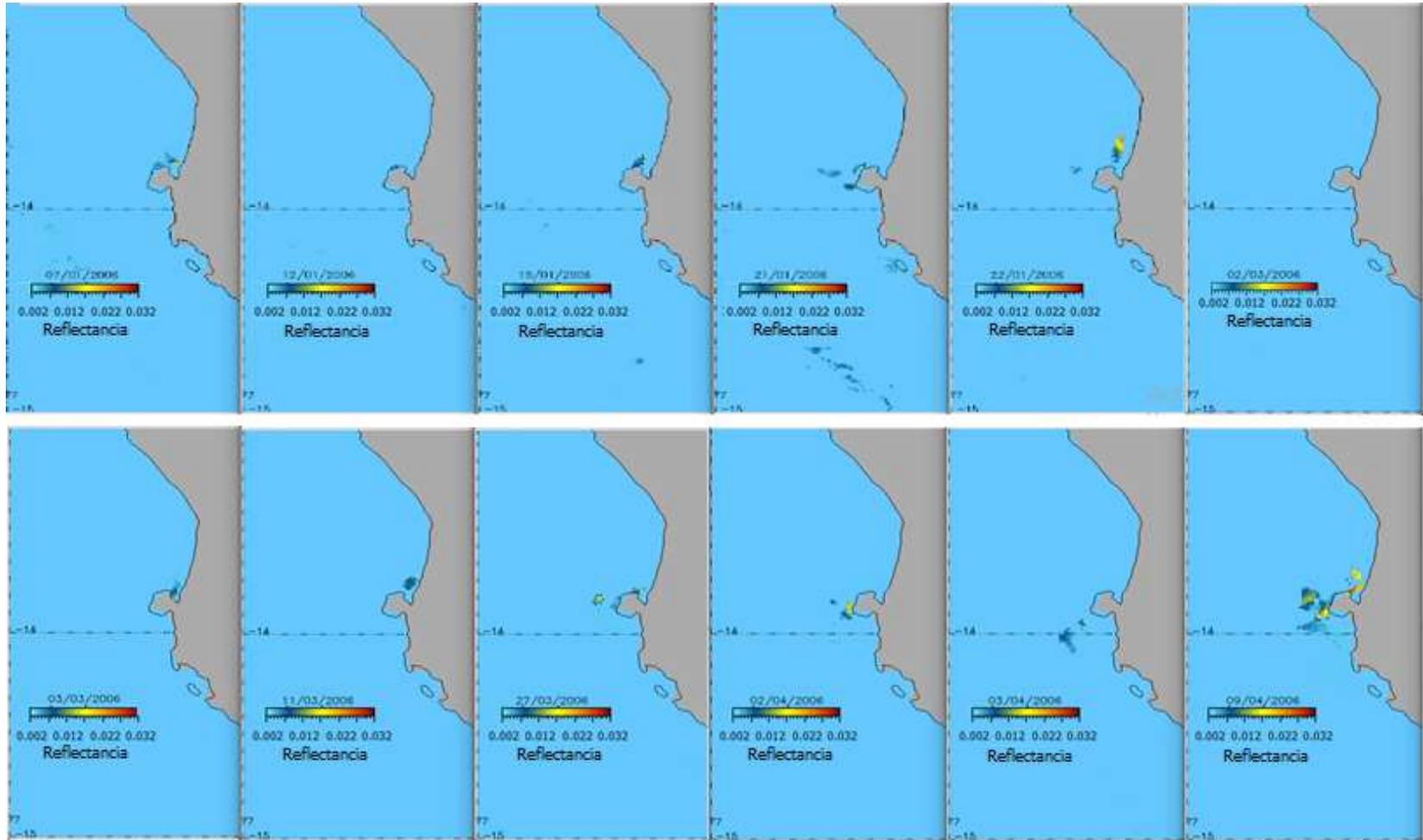
Anexo 5. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2005. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



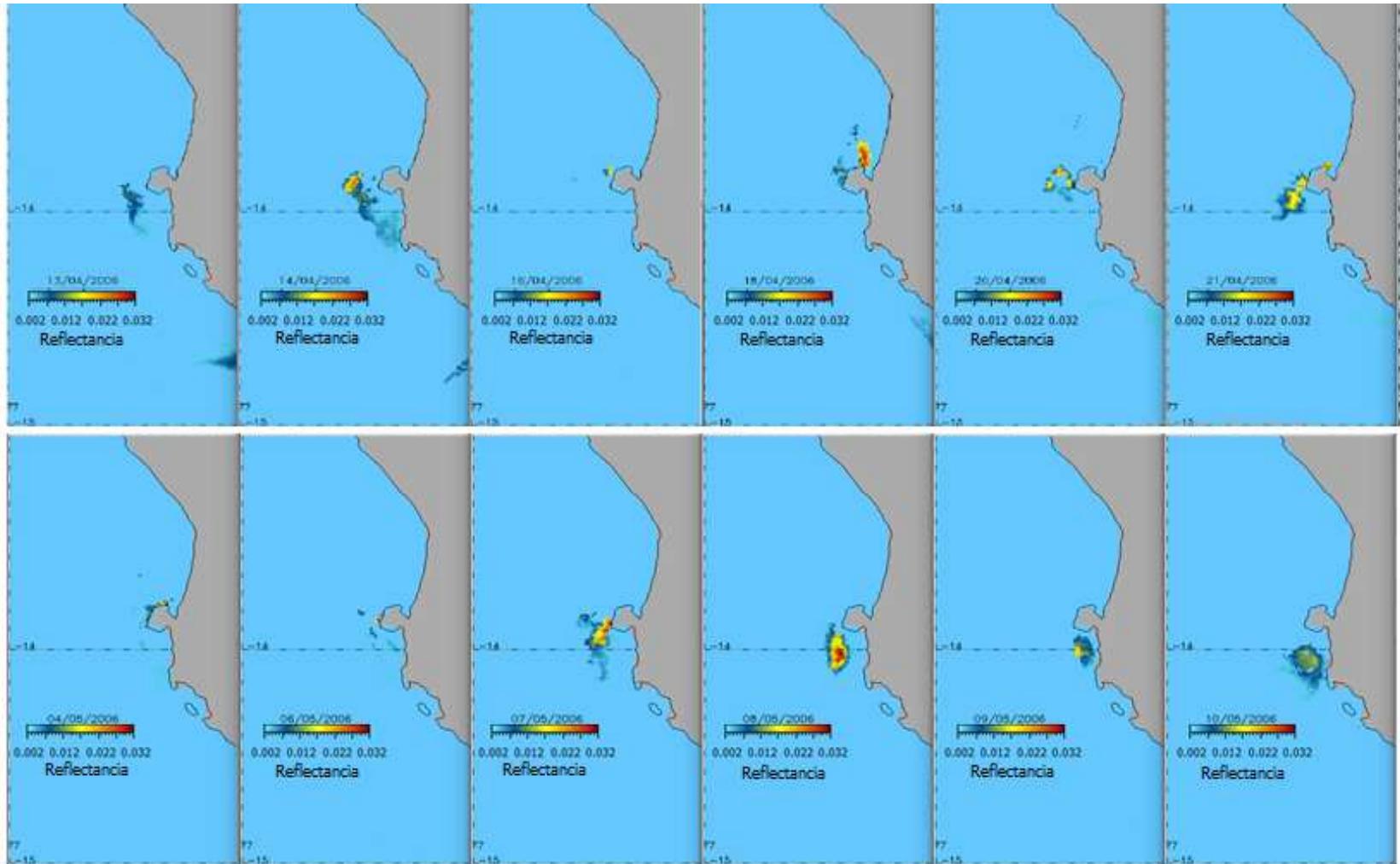
Anexo 5. Continúa



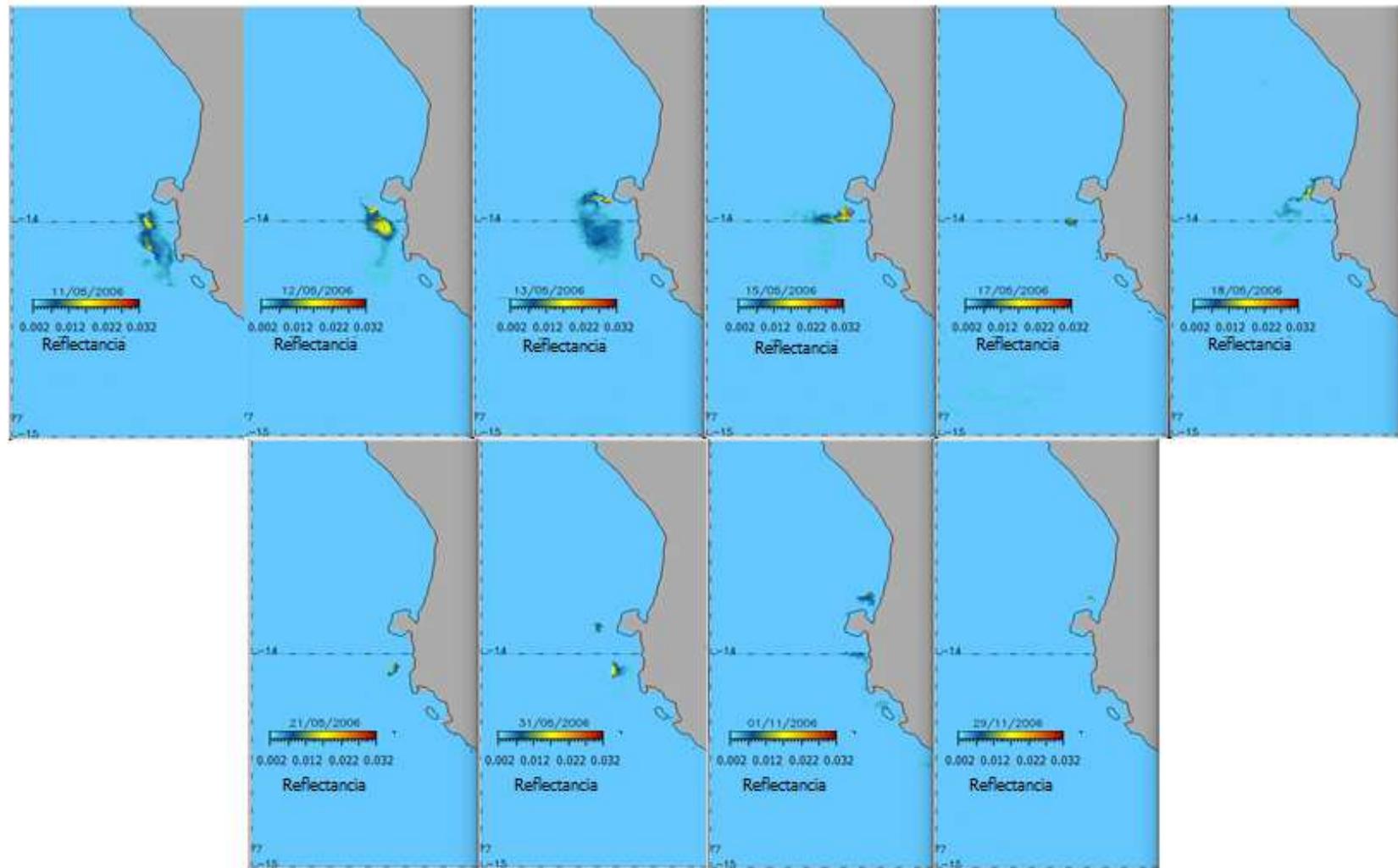
Anexo 6. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2006. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



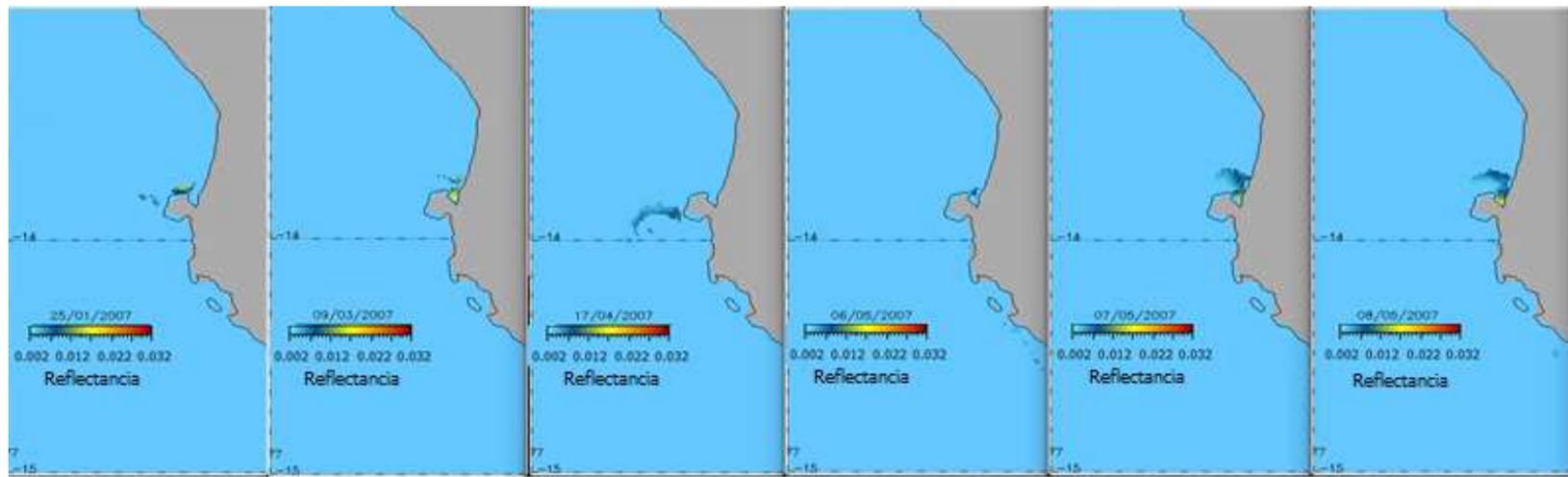
Anexo 6. Continúa



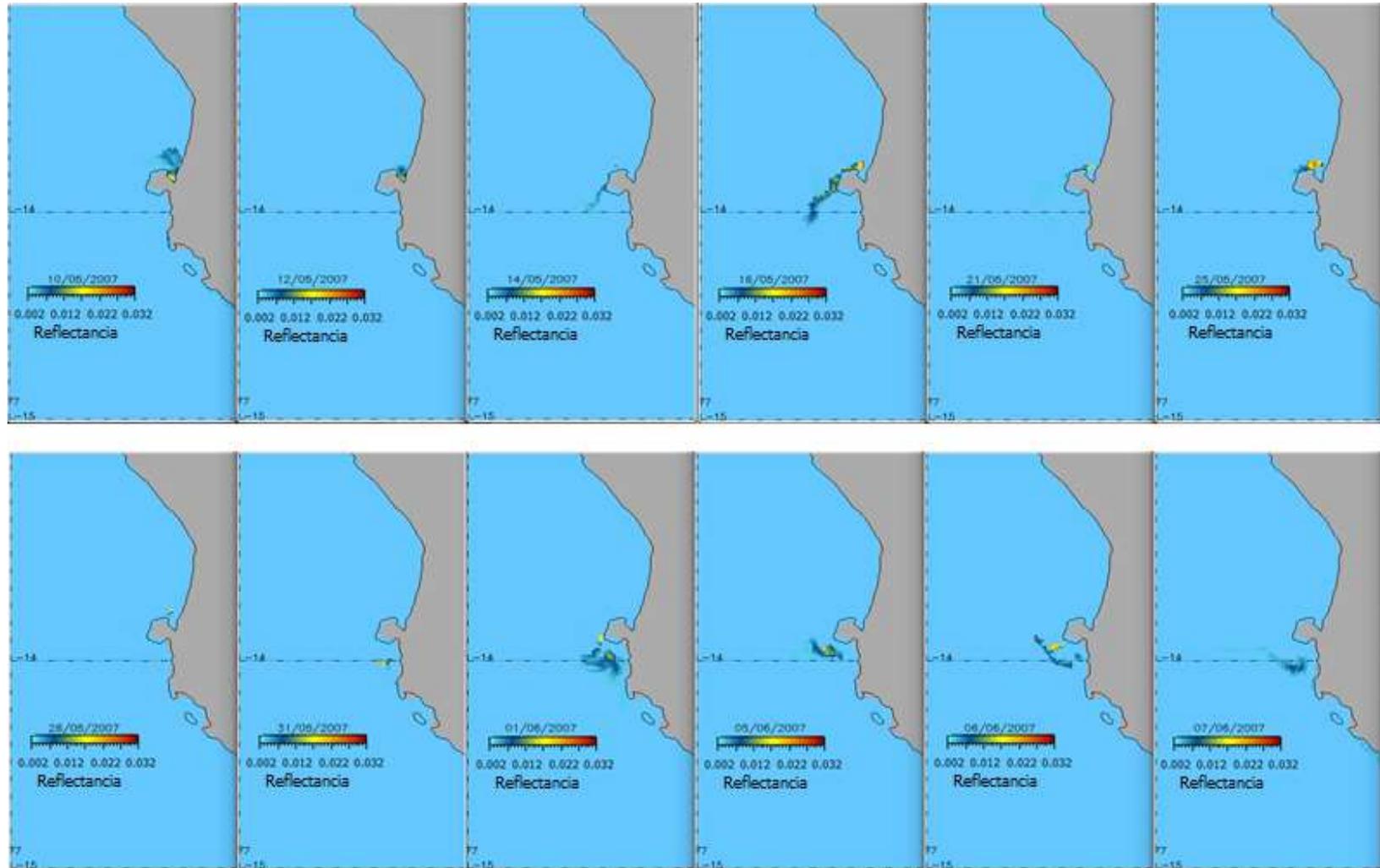
Anexo 6. Continúa



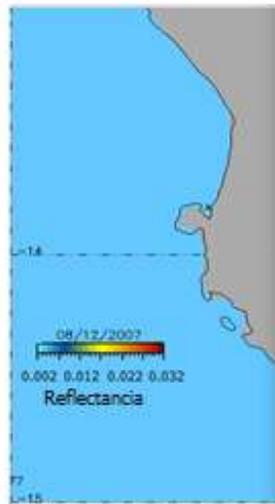
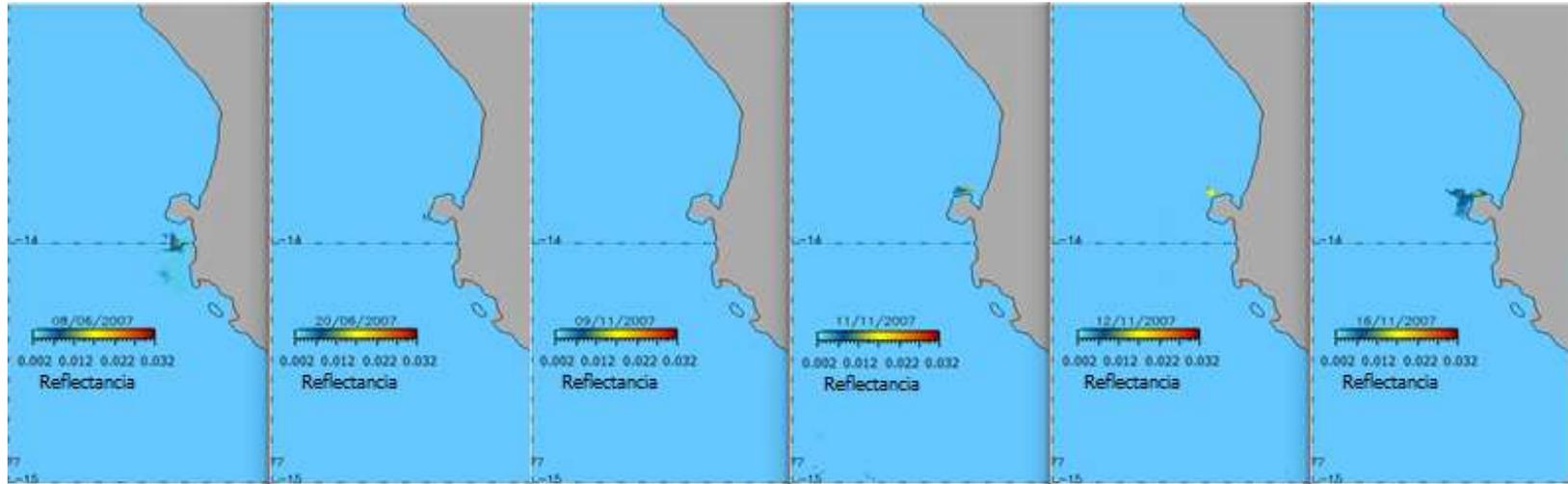
Anexo 7. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2007. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



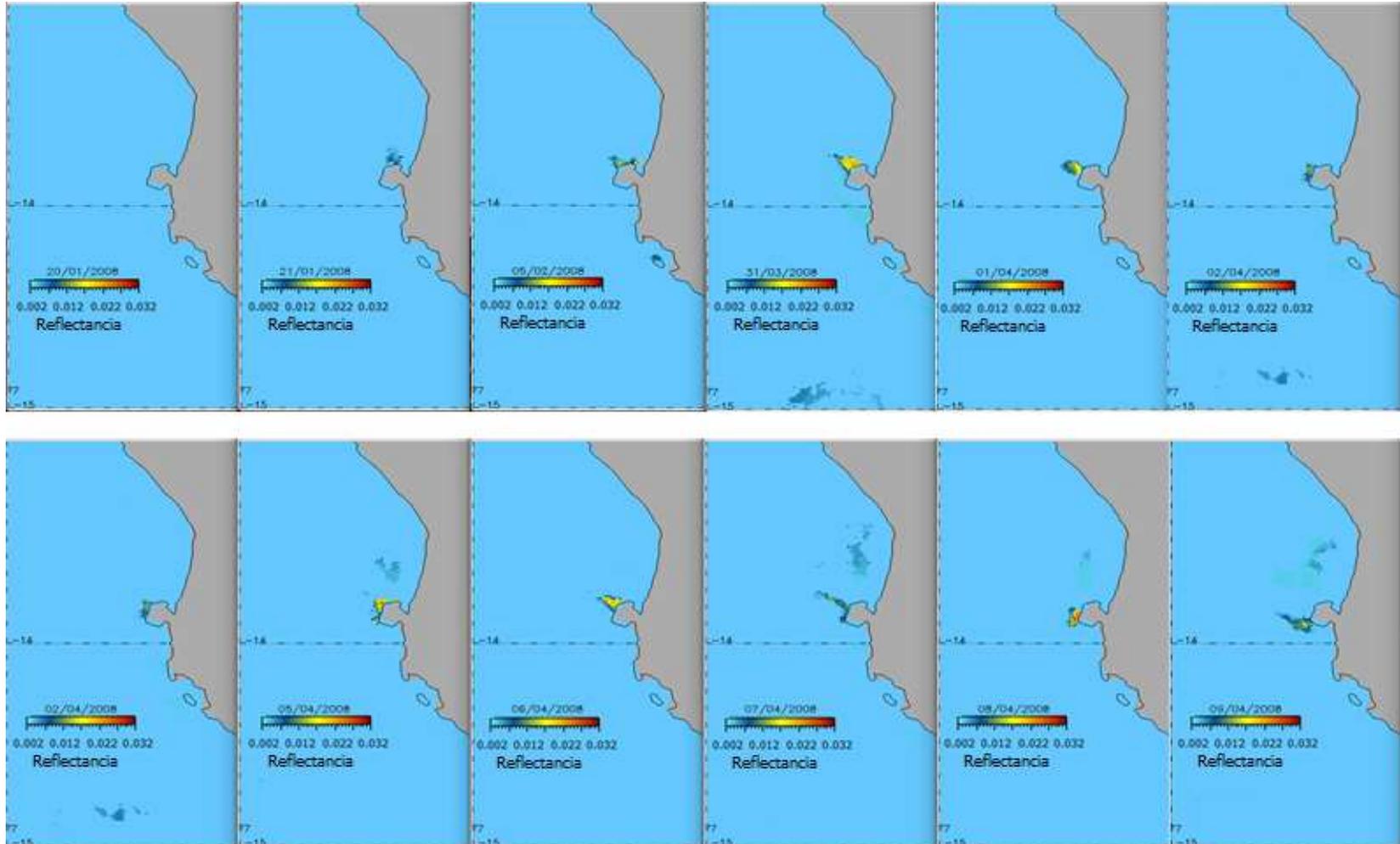
Anexo 7. Continúa



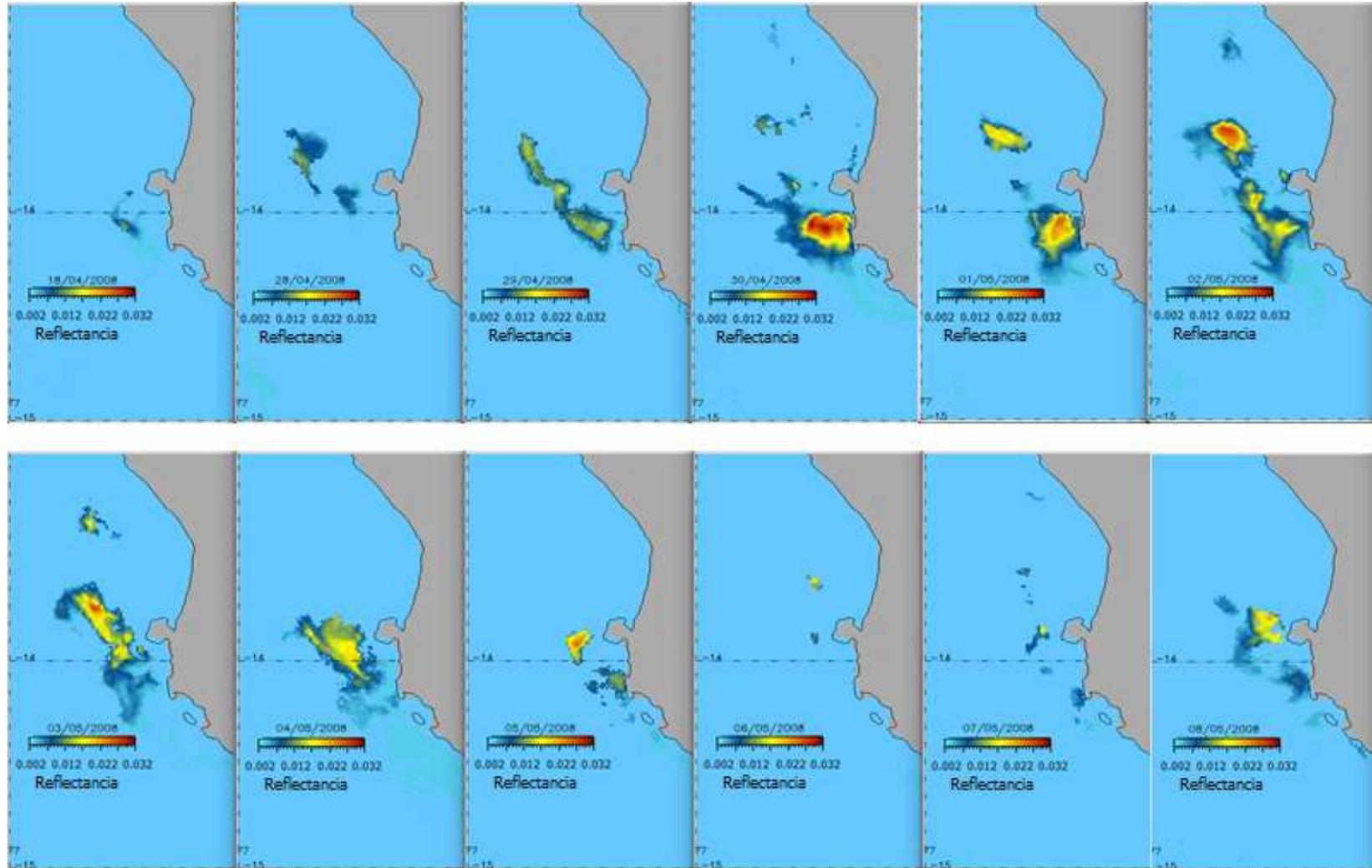
Anexo 7. Continúa



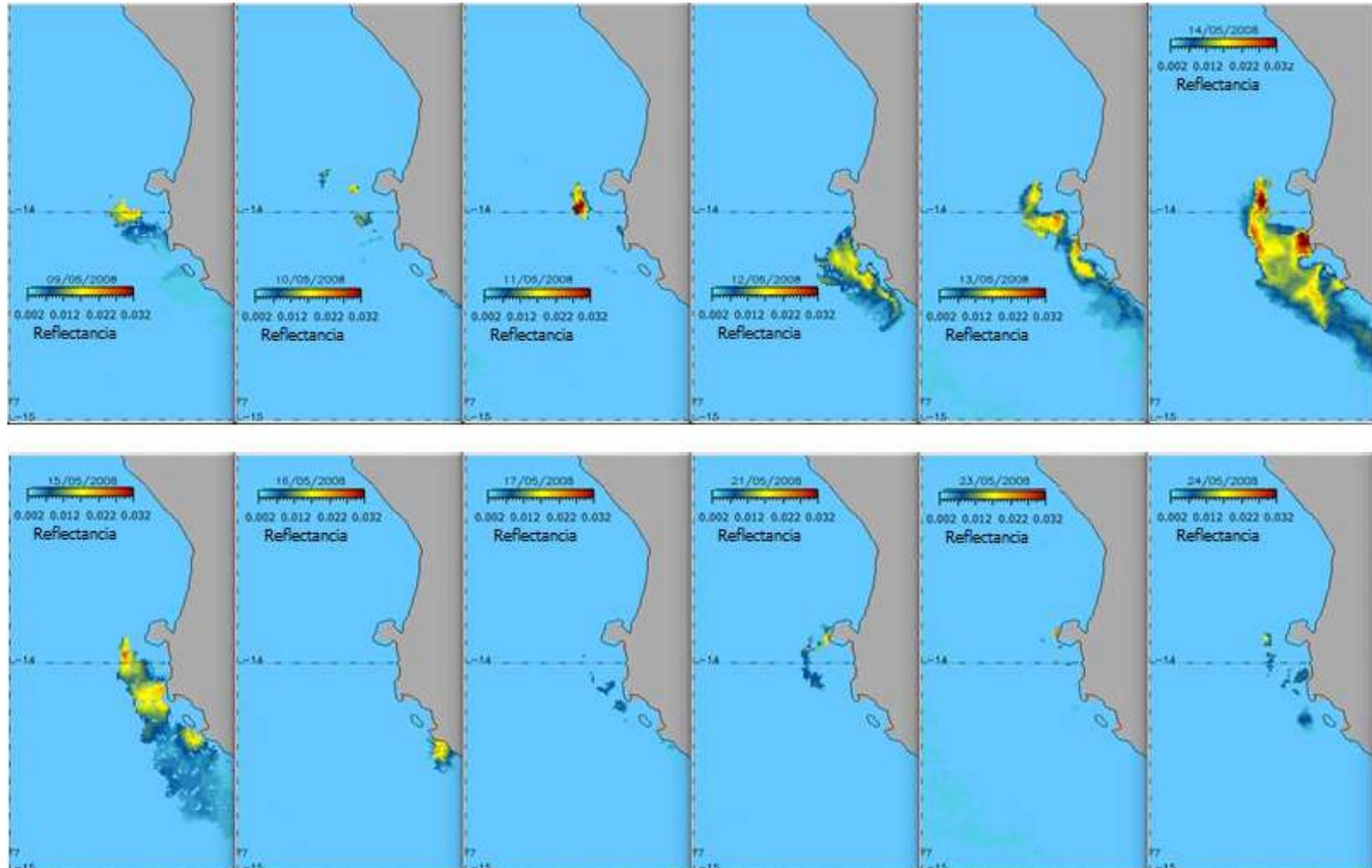
Anexo 8. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2008. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



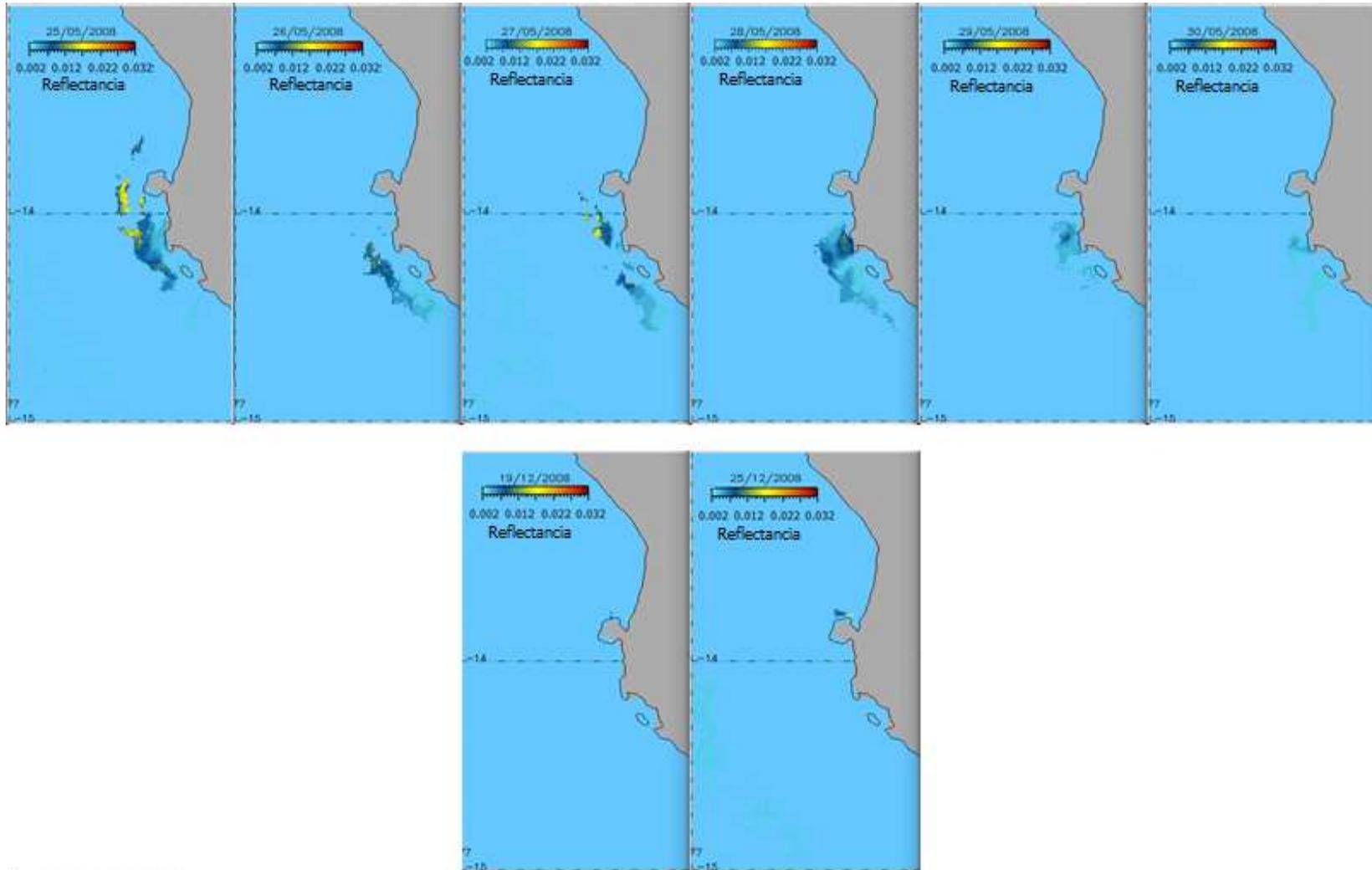
Anexo 8. Continúa



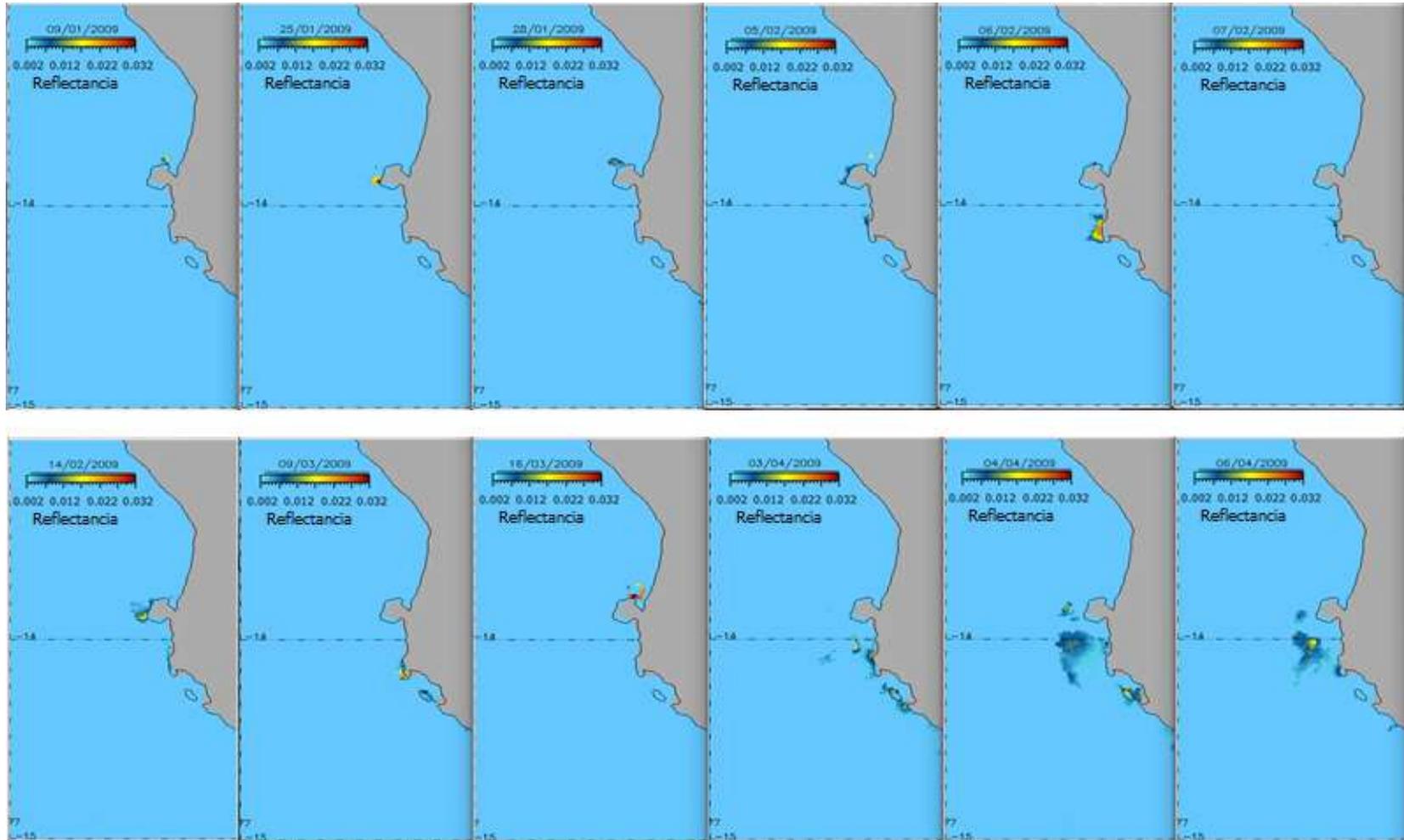
Anexo 8. Continúa



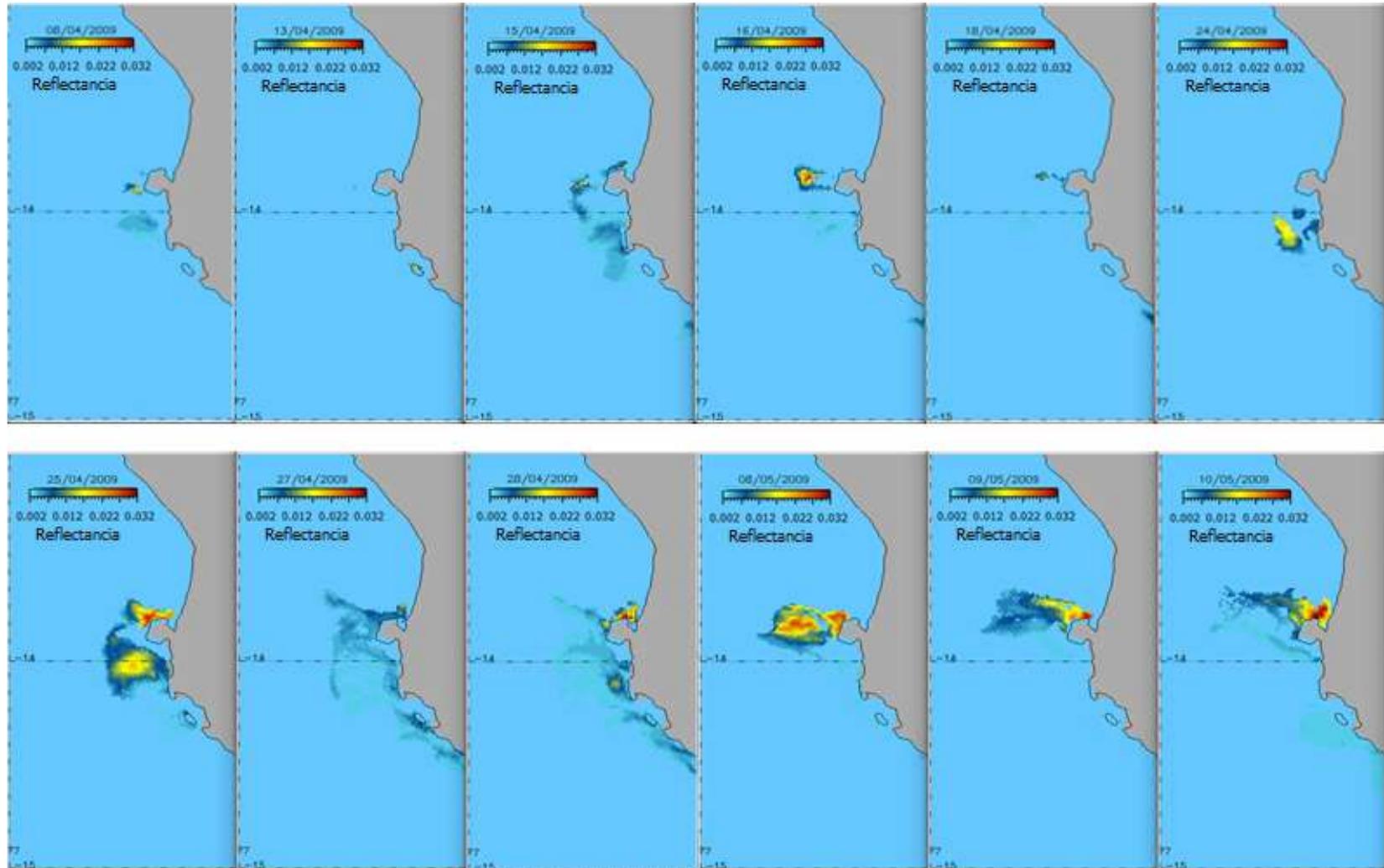
Anexo 8. Continúa



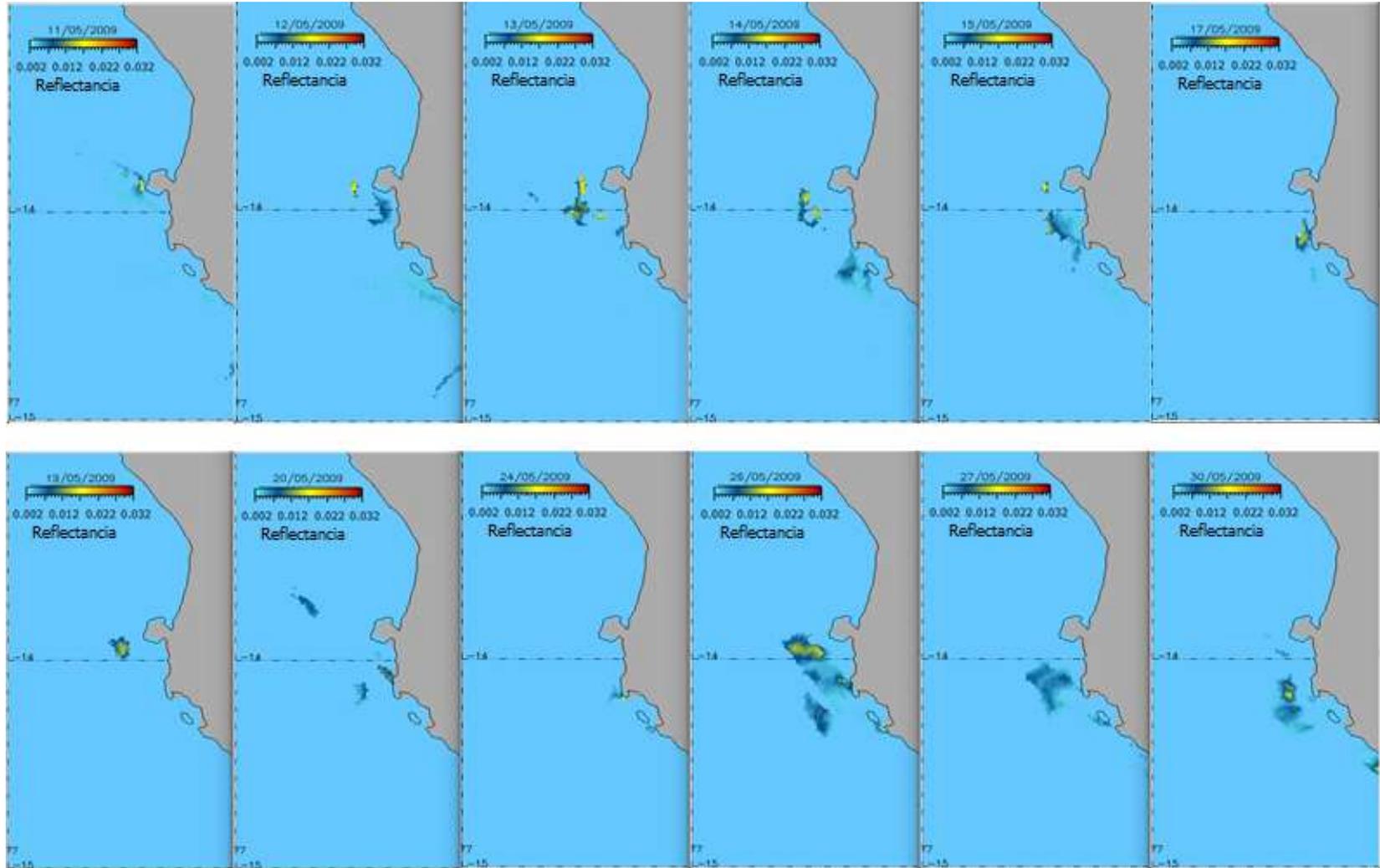
Anexo 9. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2009. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



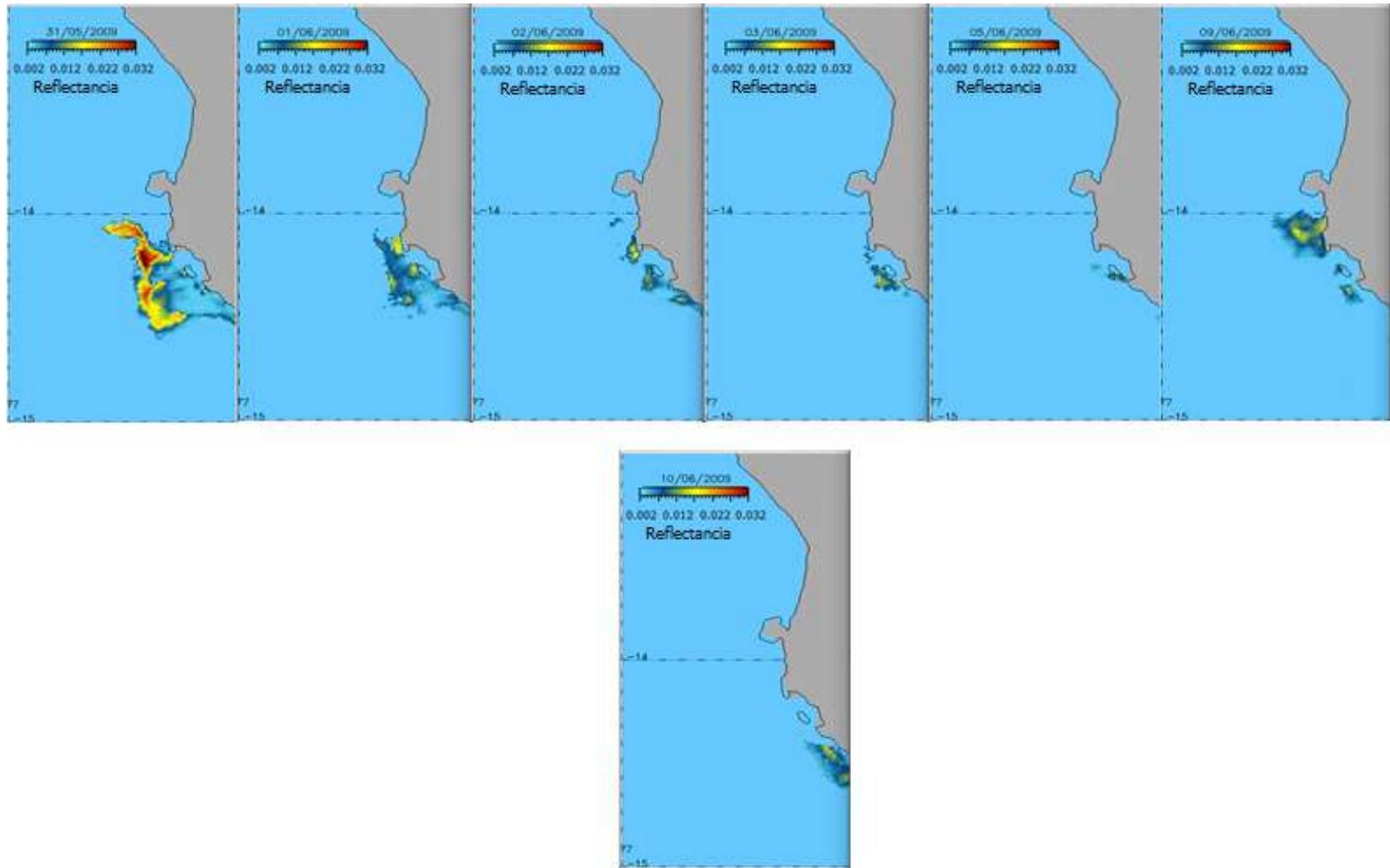
Anexo 9. Continúa



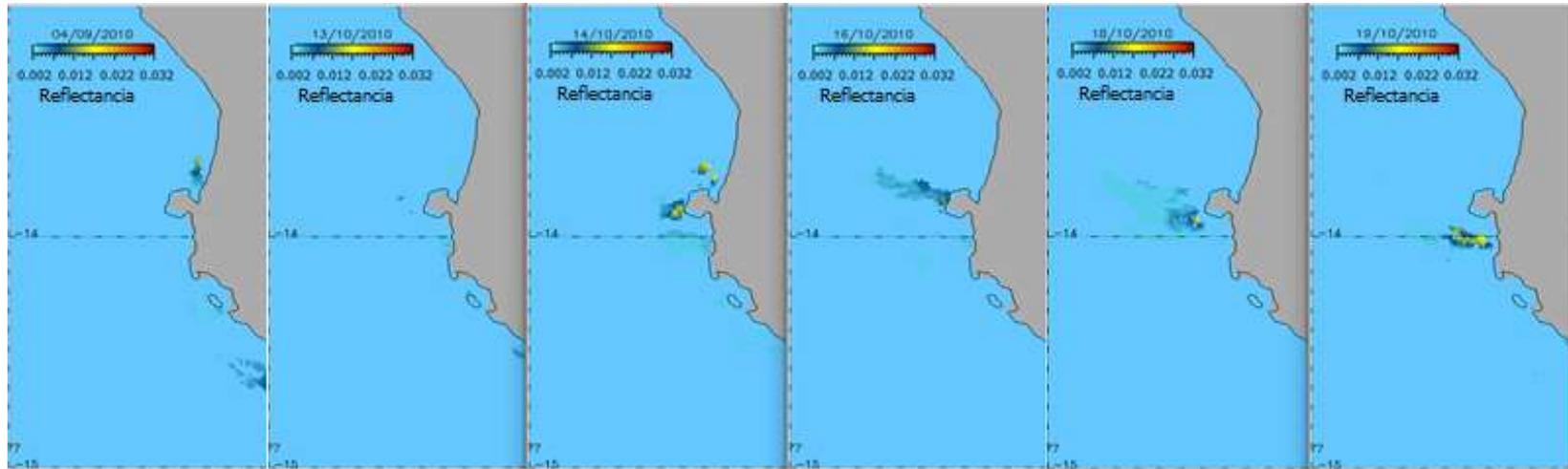
Anexo 9. Continúa



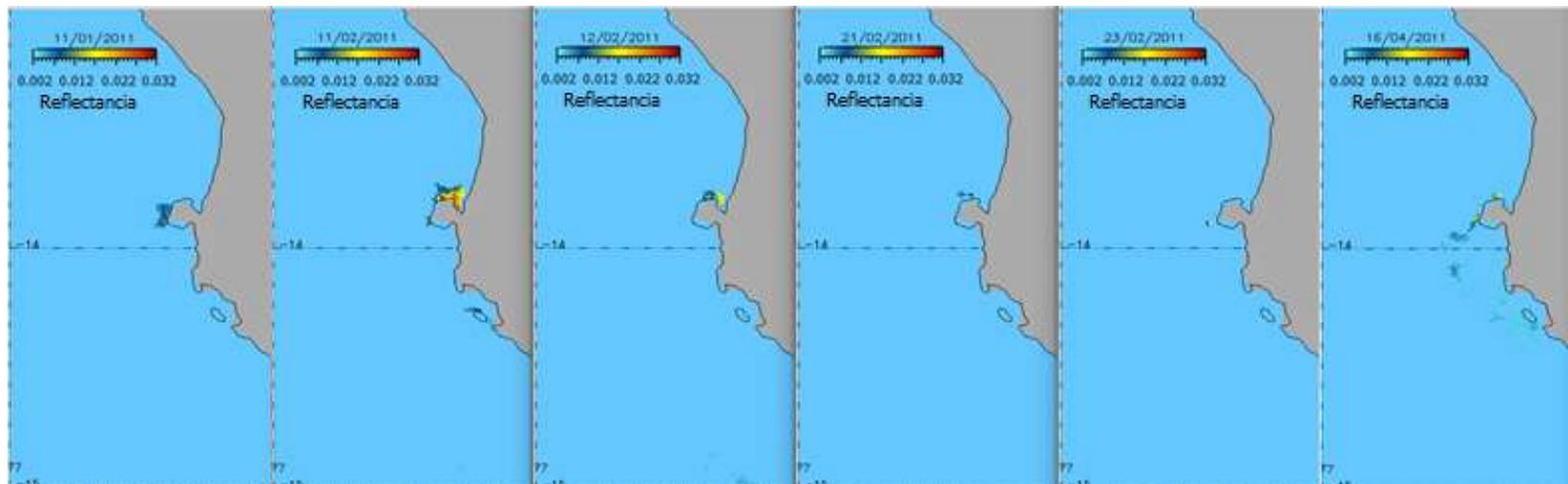
Anexo 9. Continúa



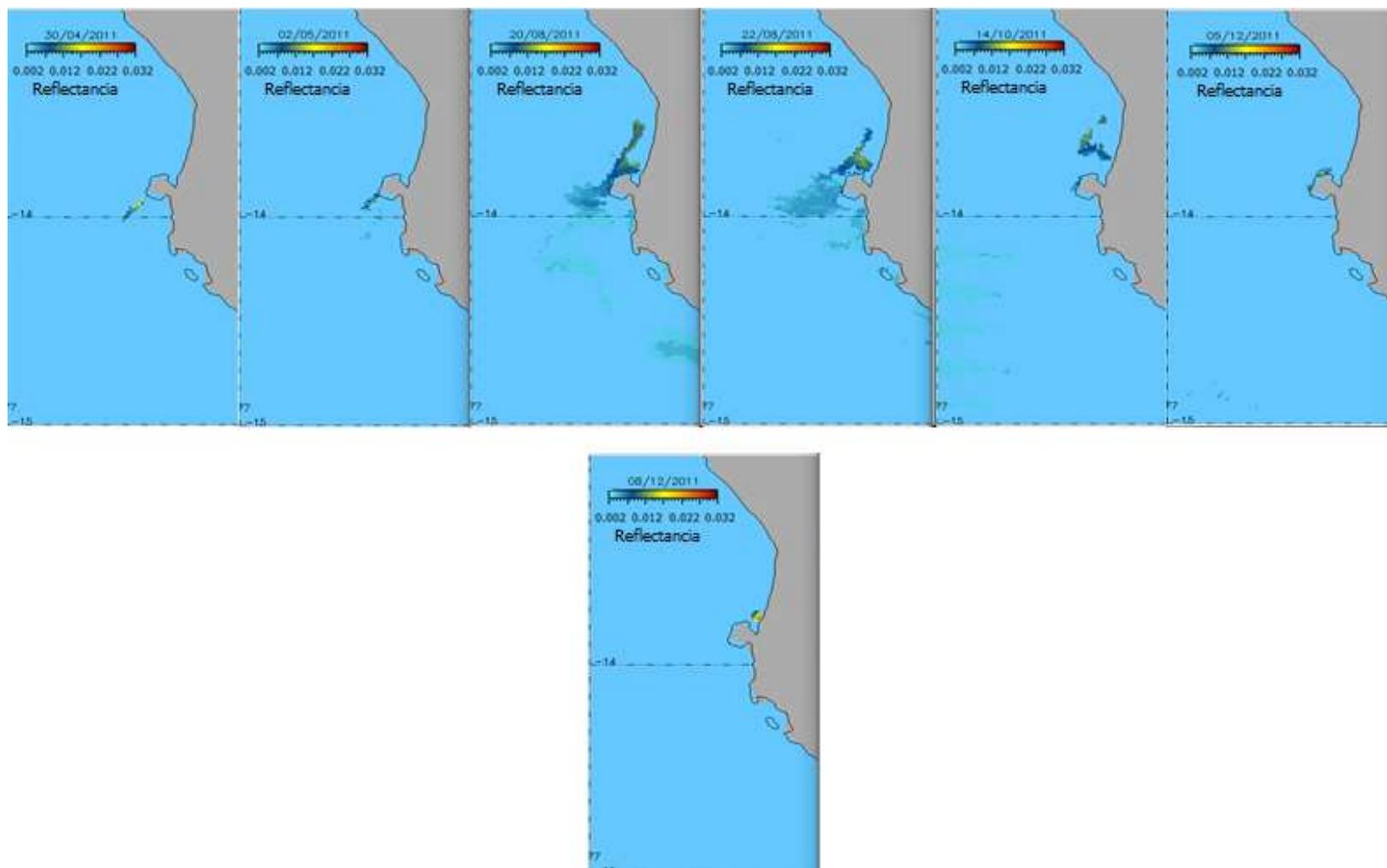
Anexo 10. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2010. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



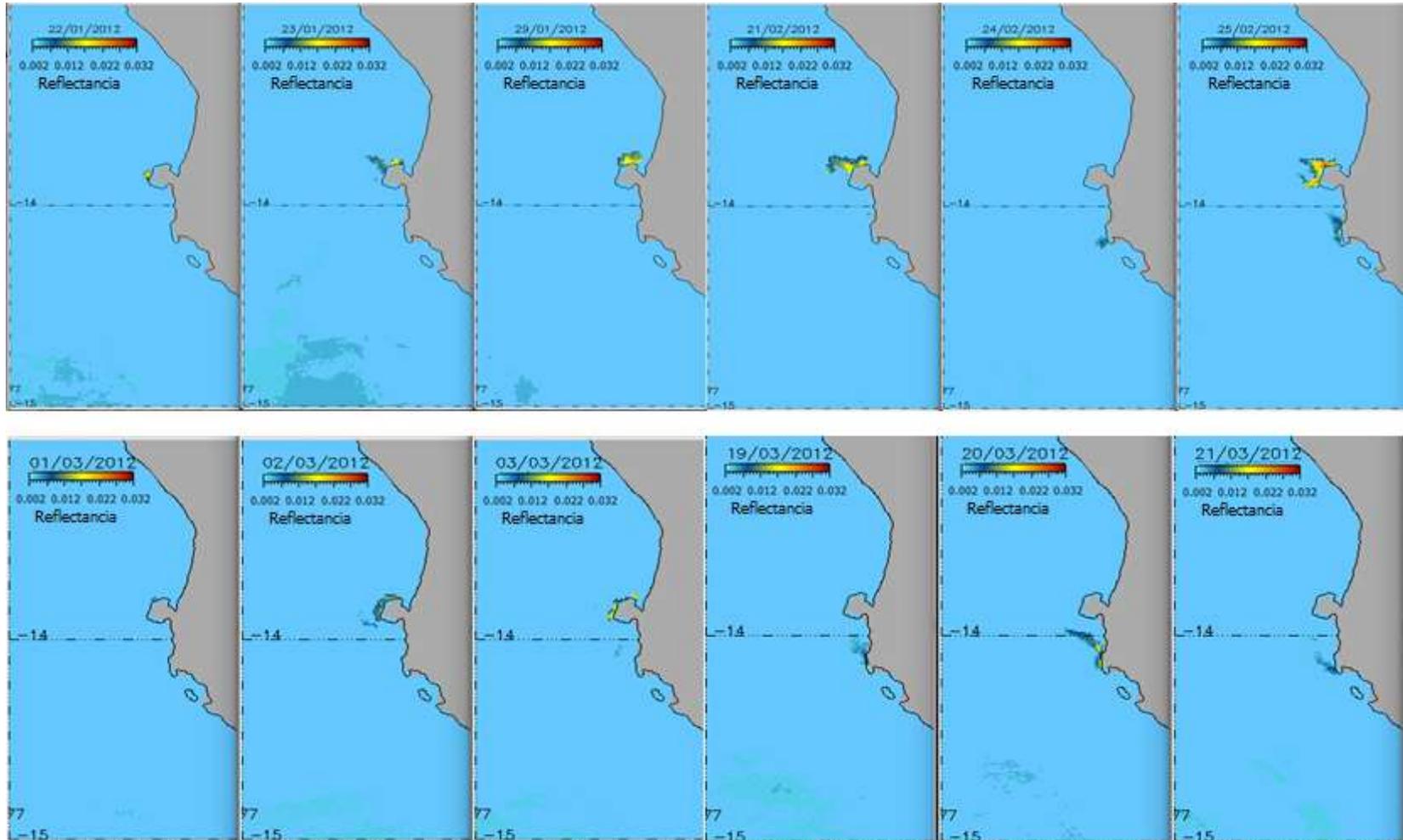
Anexo 11. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2011. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



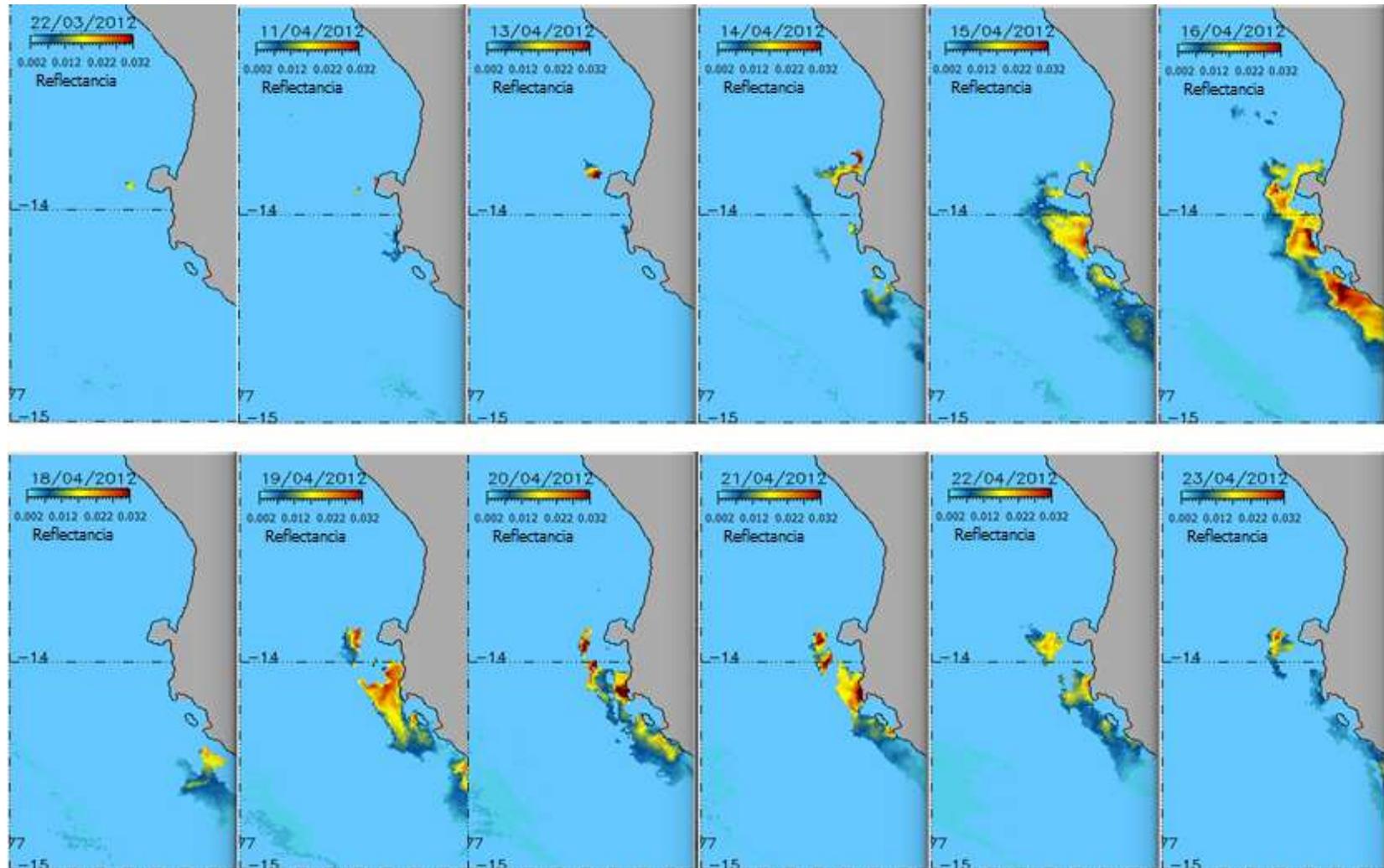
Anexo 11. Continúa



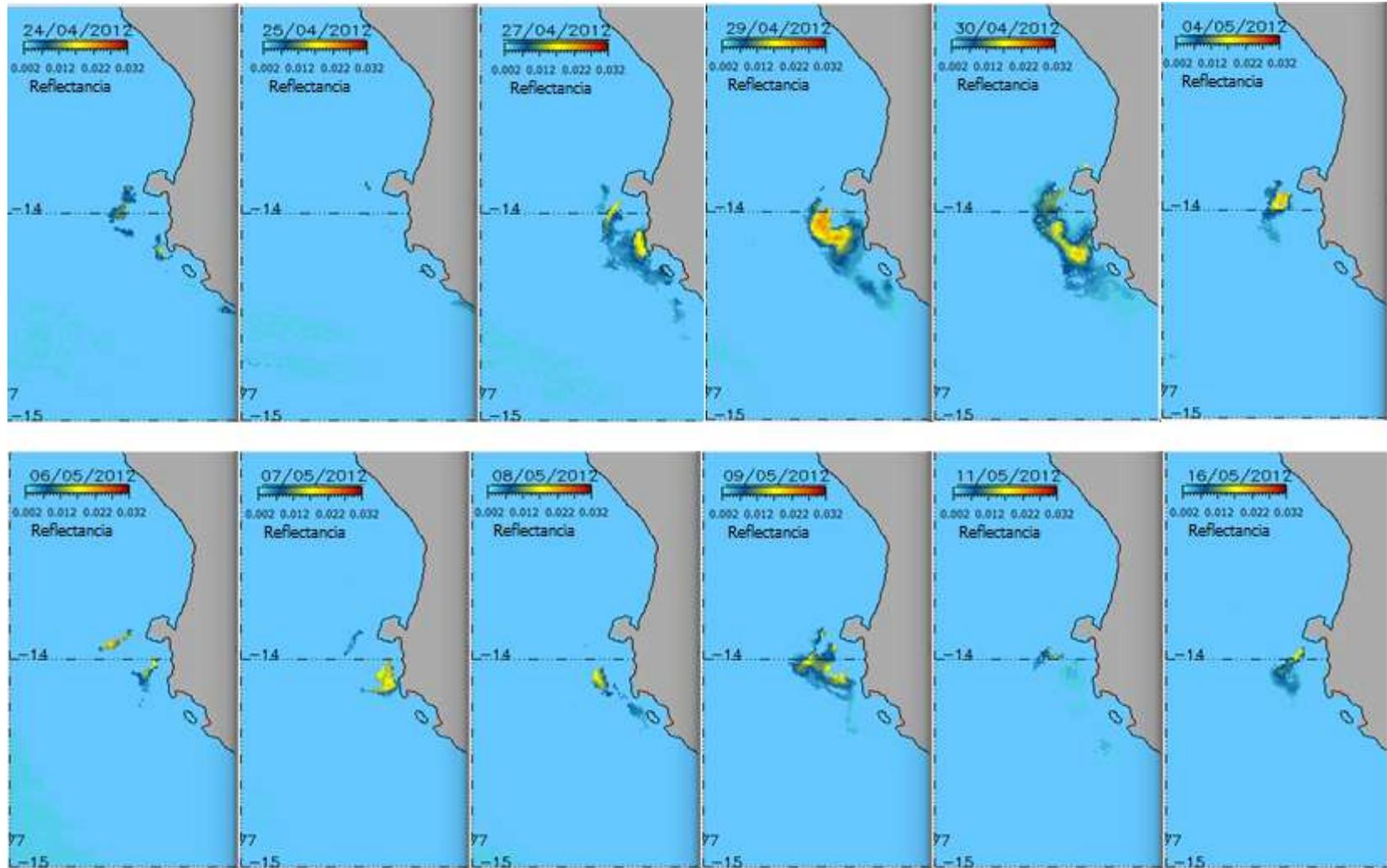
Anexo 12. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2012. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



Anexo 12. Continúa



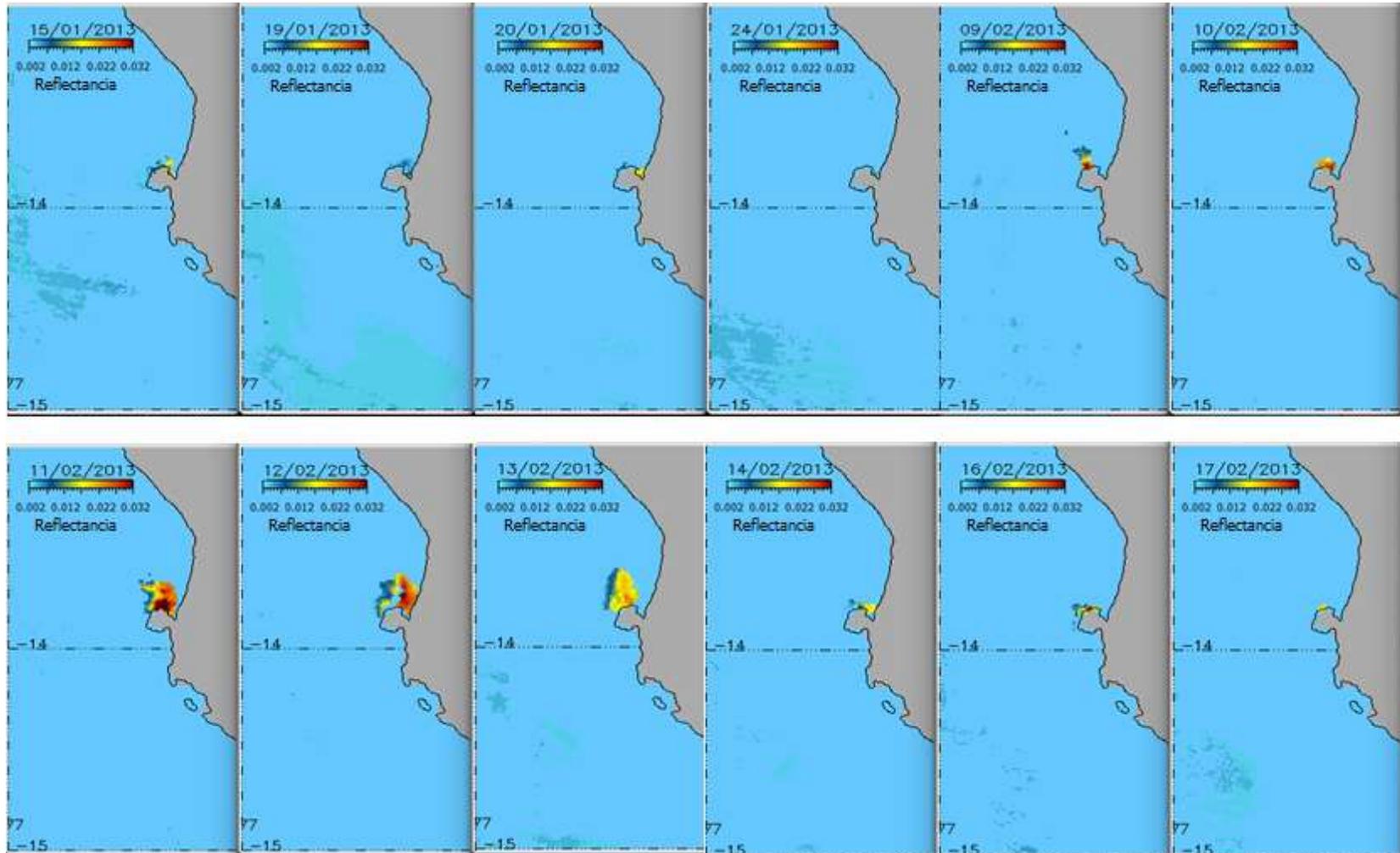
Anexo 12. Continúa



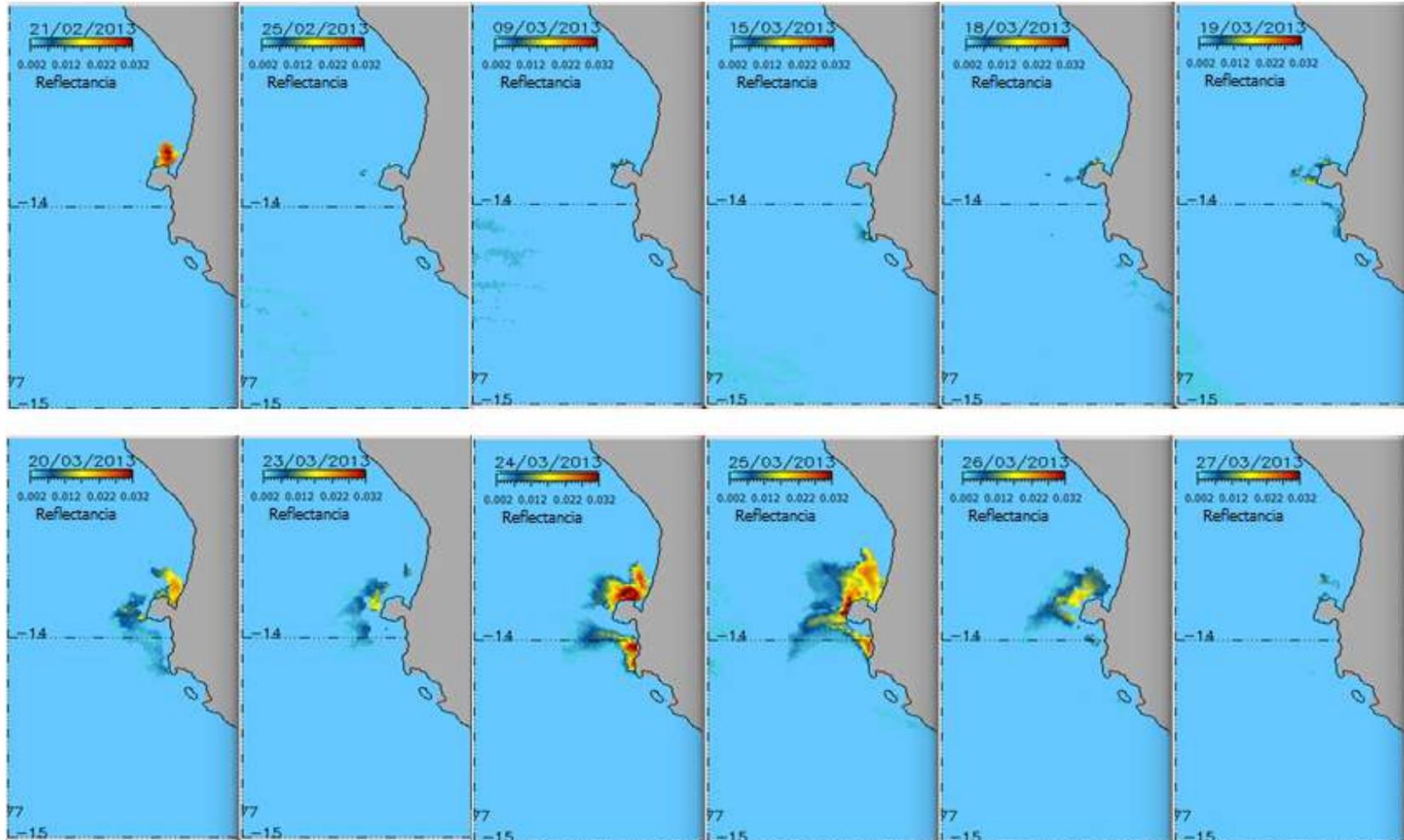
Anexo 12. Continúa



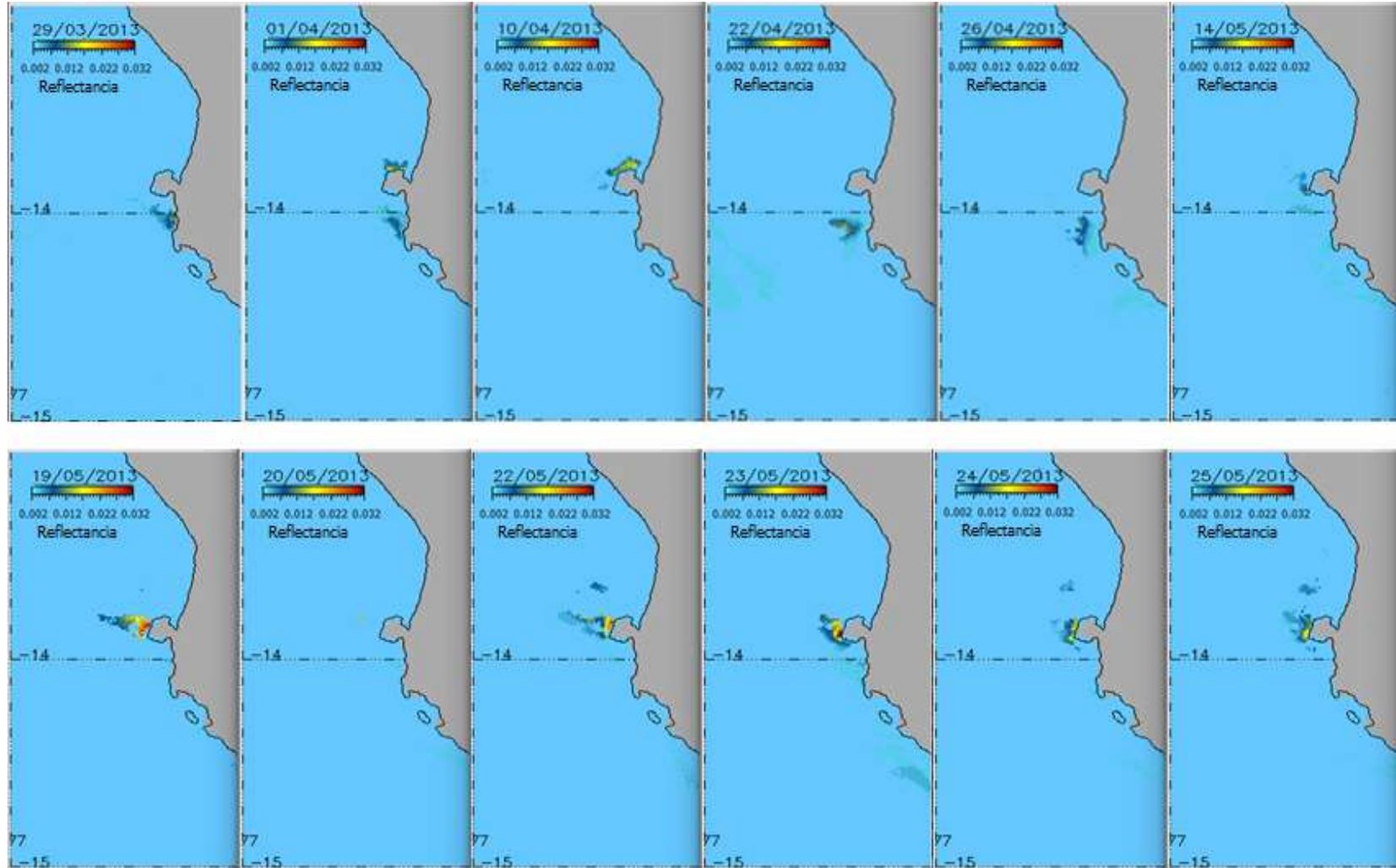
Anexo 13. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2013. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



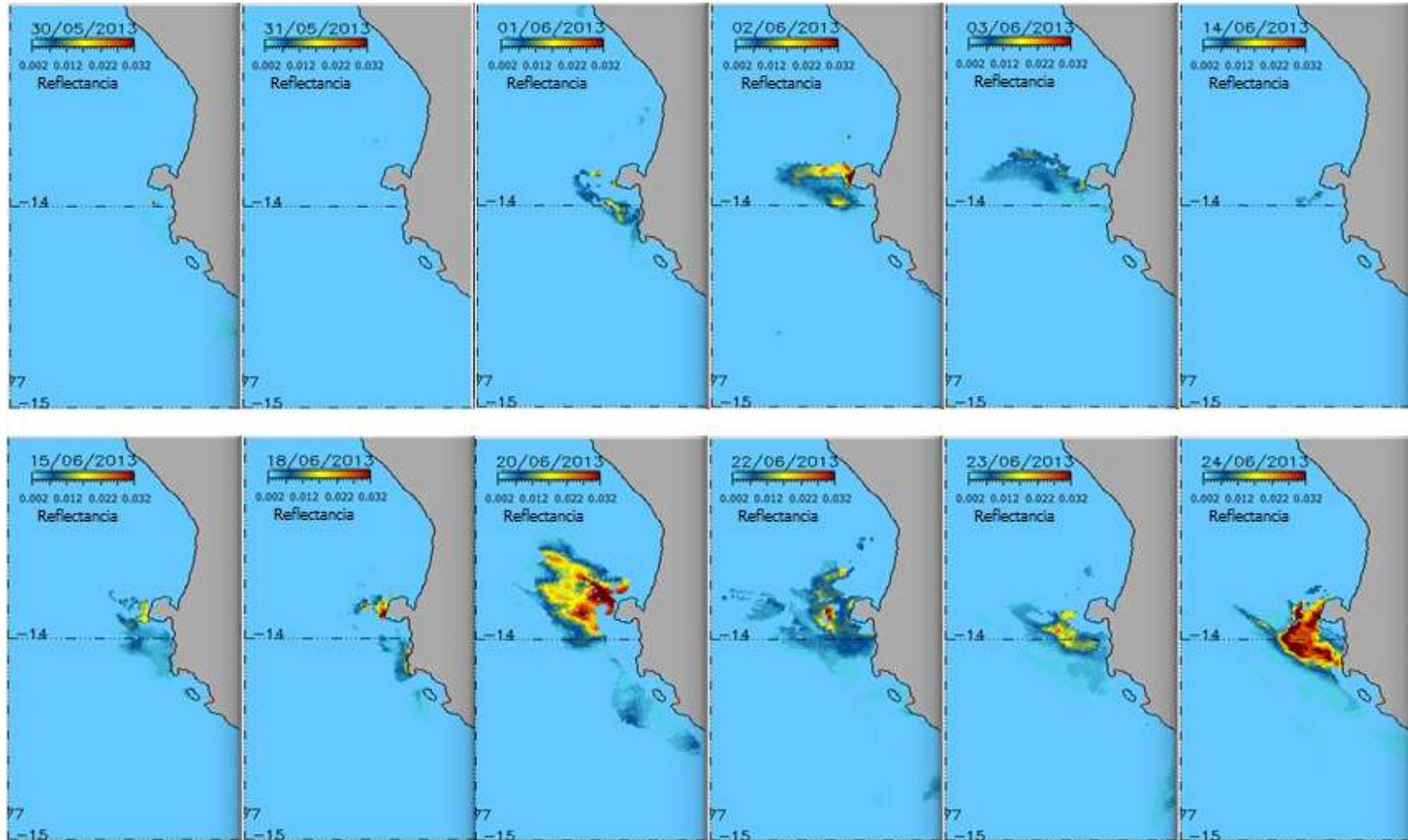
Anexo 13. Continúa



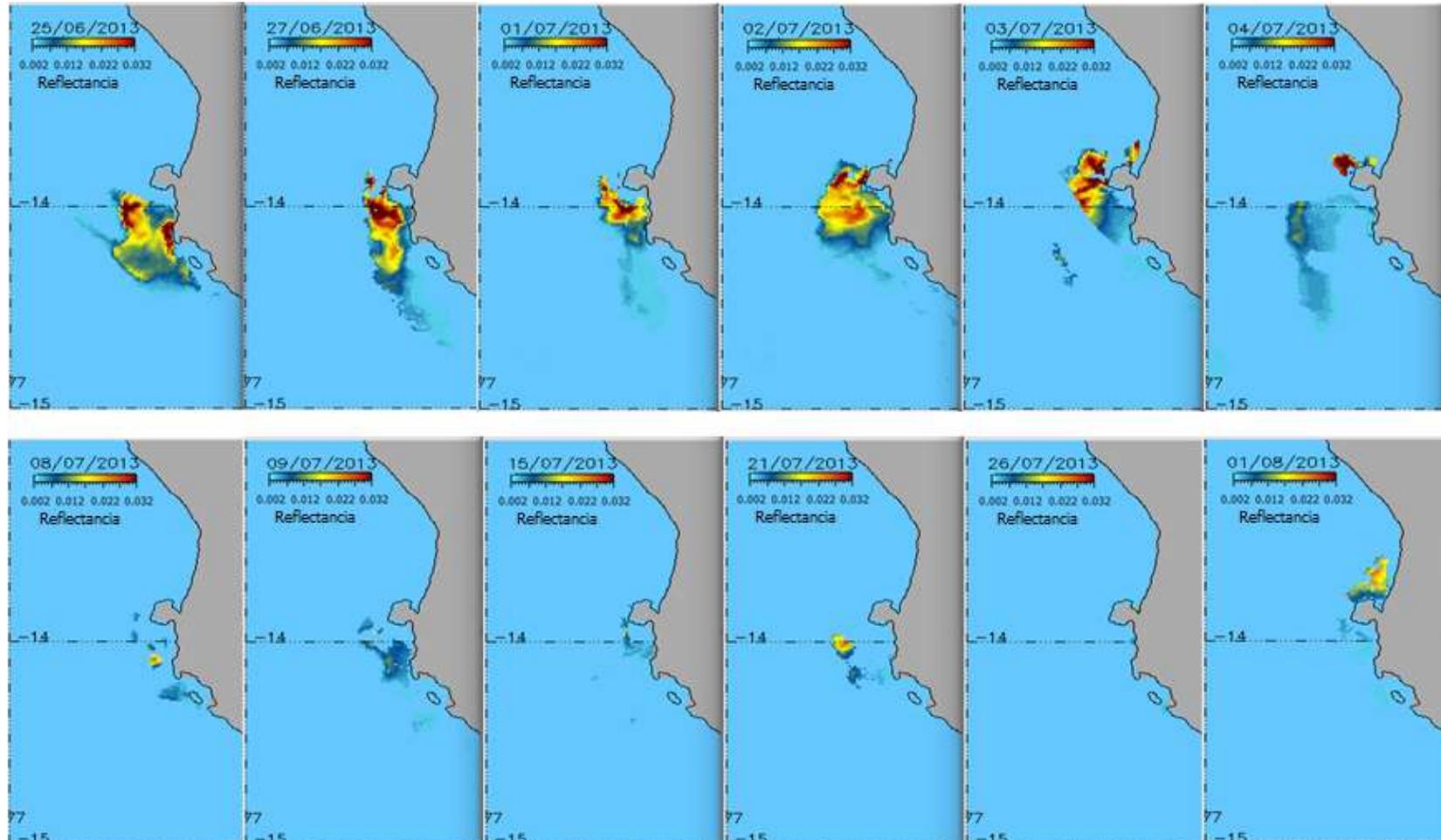
Anexo 13. Continúa



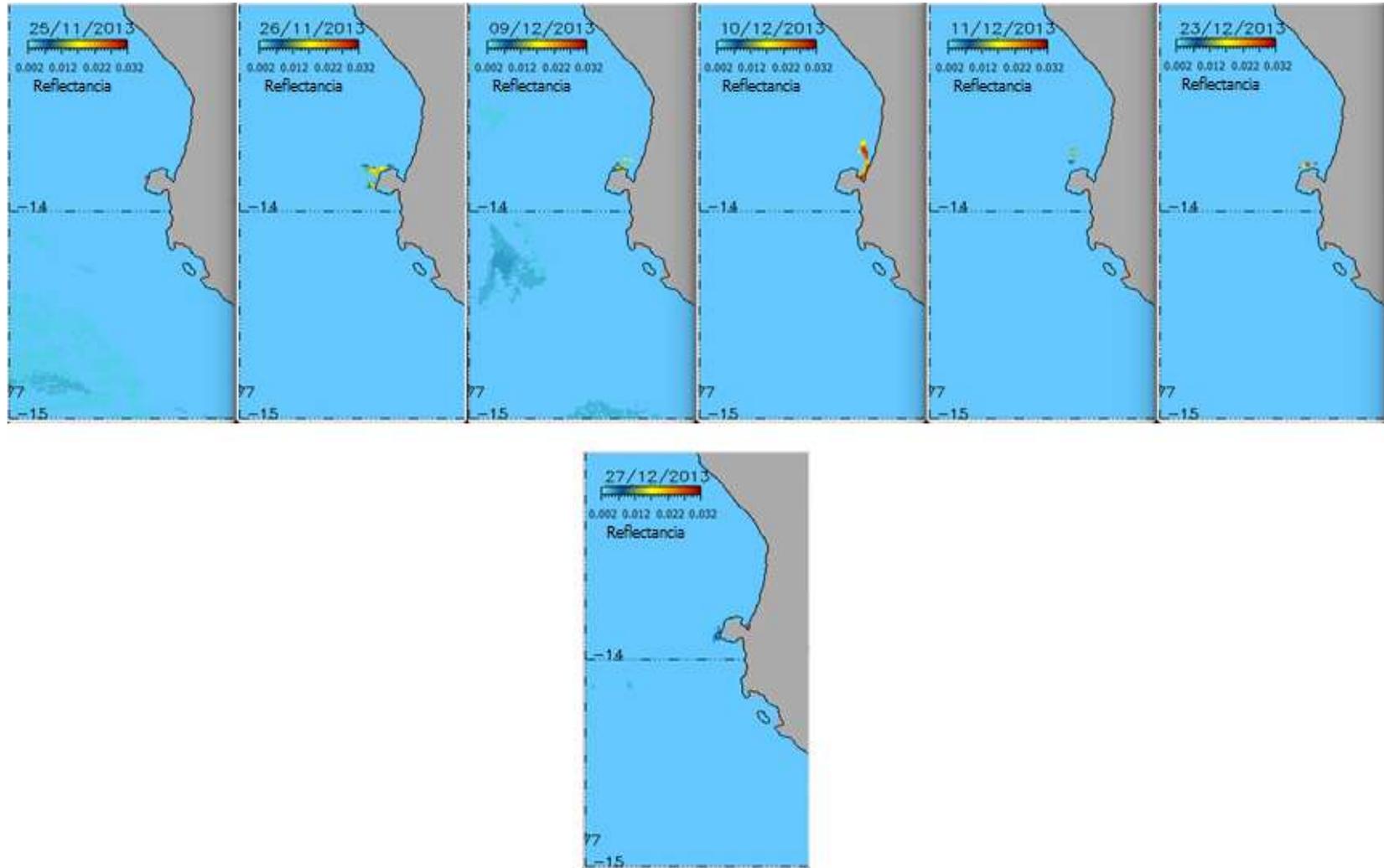
Anexo 13. Continúa



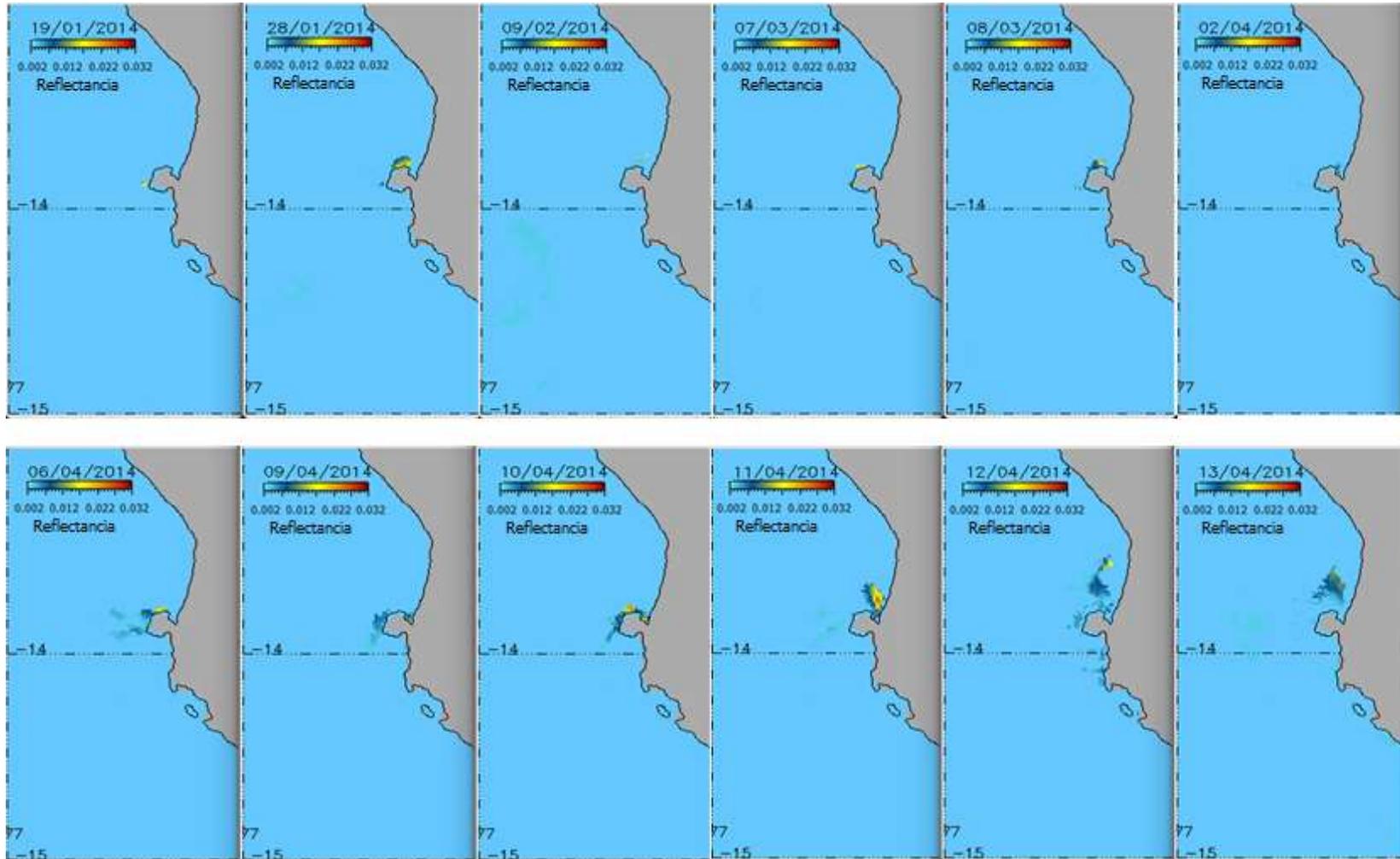
Anexo 13. Continúa



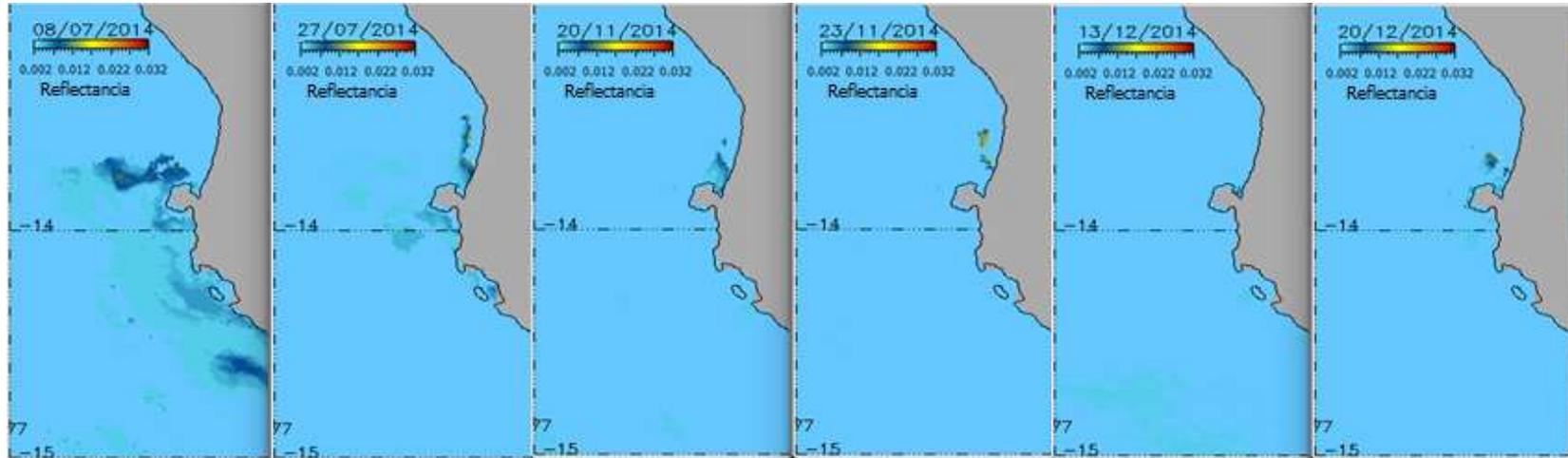
Anexo 13. Continúa



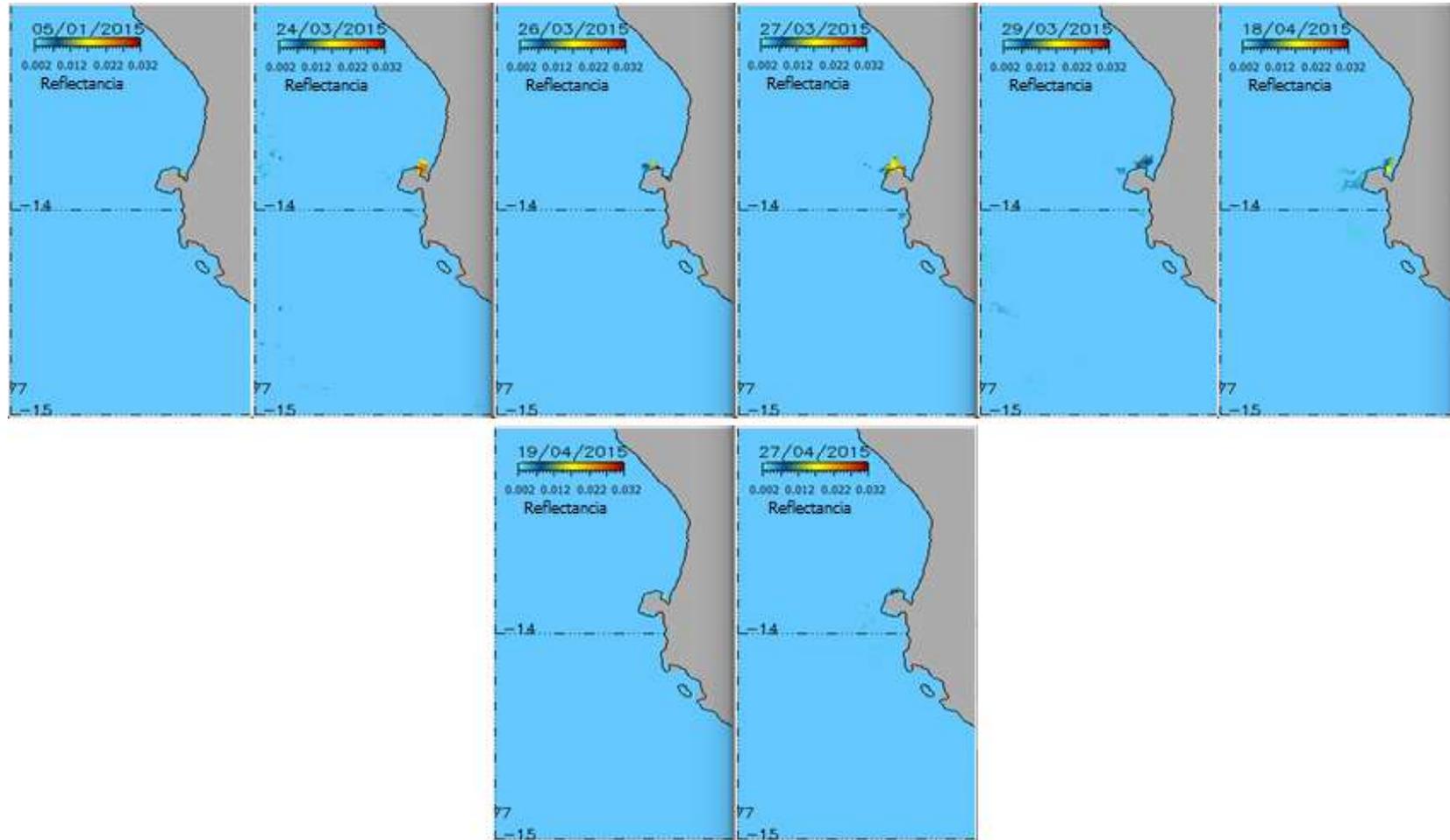
Anexo 14. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2014. La barra de color indica los niveles de reflectancia.



Anexo 14. Continúa



Anexo 15. Plumas de aguas blancas detectadas por el algoritmo de identificación en el año 2015. La barra de color indica los niveles de reflectancia.

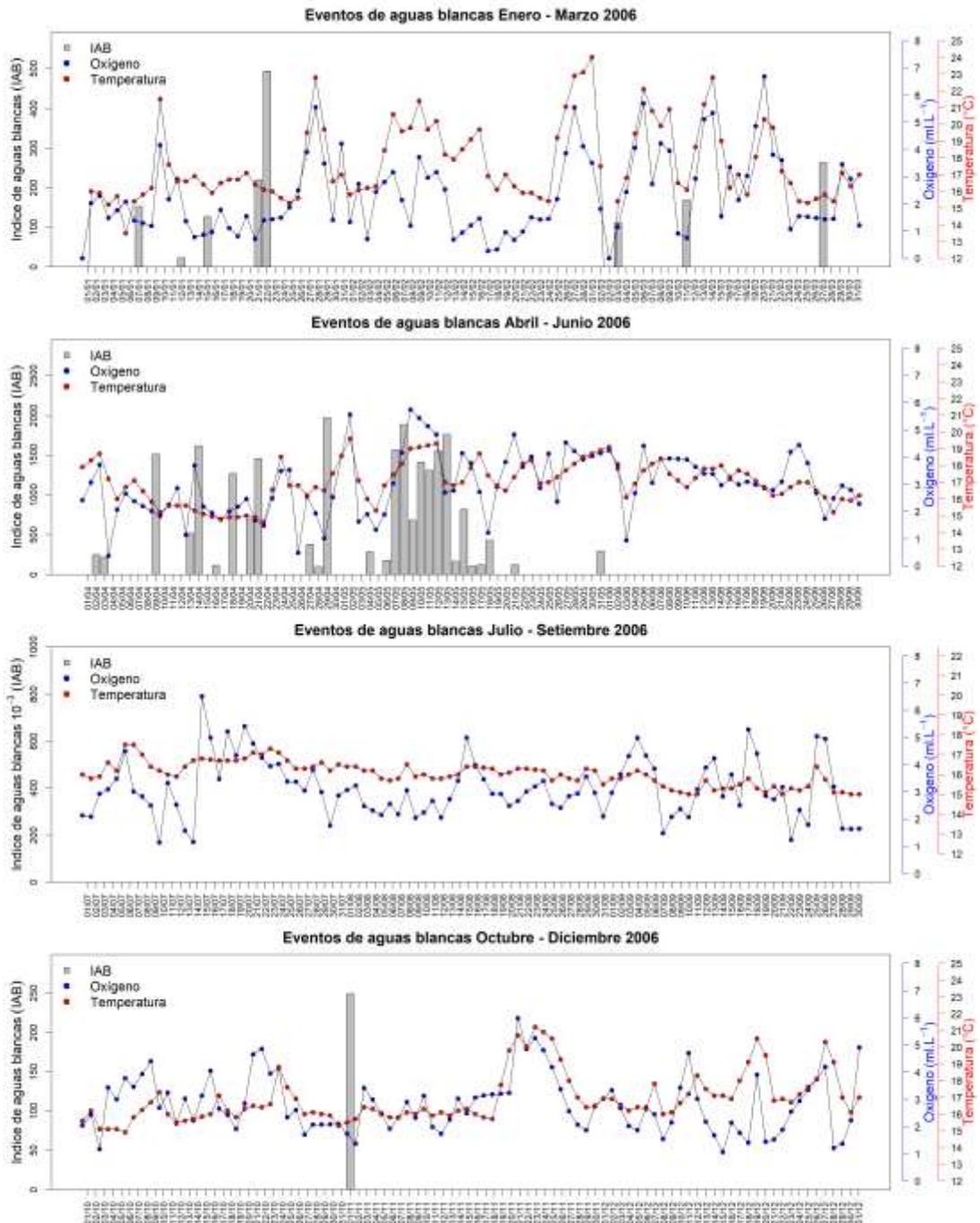


Anexo 16. Tabla del número de días con presencia de aguas blancas por mes y año en la región 13-15°S y 76-77°W

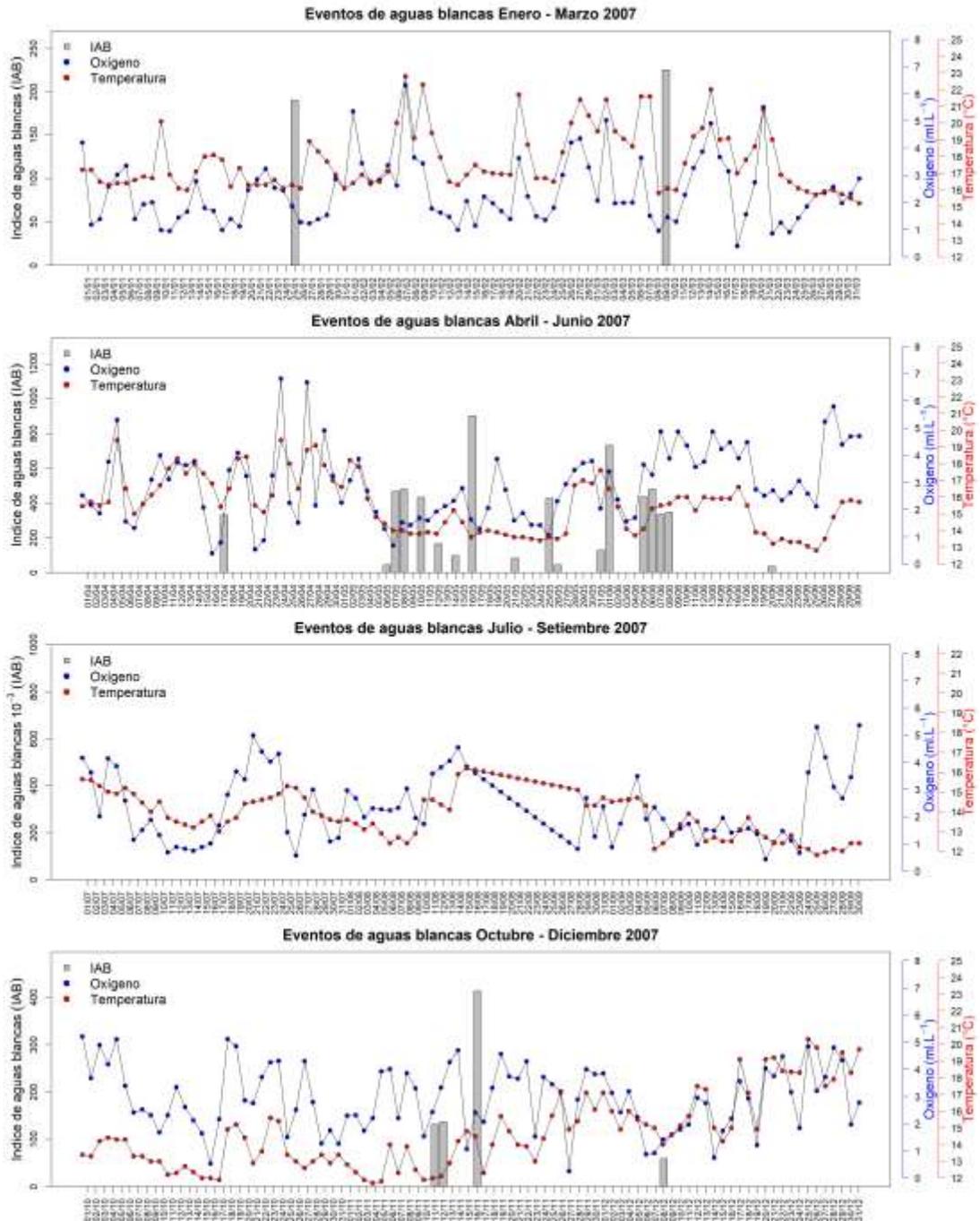
AÑO	MESES												TOTAL
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
<b>2000</b>	SD		6(1)	4(1)	10	5						2(2)	<b>27(4)</b>
<b>2001</b>	4(2)	2	3(1)	3	4								<b>16(3)</b>
<b>2002</b>													<b>0</b>
<b>2003</b>											1(1)		<b>1(1)</b>
<b>2004</b>	1	1		4(3)	1						5(1)	3(1)	<b>15(5)</b>
<b>2005</b>	2(2)	5(3)	3	5(2)		1					3(1)	3(2)	<b>22(10)</b>
<b>2006</b>	5(3)		4(4)	9(3)	14						2(1)		<b>34(11)</b>
<b>2007</b>	1		1(1)	1	11(9)	6					4	1(1)	<b>25(11)</b>
<b>2008</b>	2	1(1)	1	12	26							2(2)	<b>44(3)</b>
<b>2009</b>	3(1)	4(1)	2(1)	12(3)	16(2)	6							<b>43(8)</b>
<b>2010</b>									1	5(2)			<b>68(2)</b>
<b>2011</b>	1	4(2)		2(1)	1			2(2)		1(1)		2(1)	<b>13(7)</b>
<b>2012</b>	3(2)	3	7	16(3)	13(2)						1(1)	3(3)	<b>47(11)</b>
<b>2013</b>	4(4)	10(6)	11(4)	4	9	12	9(1)	1(1)		SD	2	5(3)	<b>67(19)</b>
<b>2014</b>	2	1(1)	2	7(6)			2(1)				2(1)	2(2)	<b>18(11)</b>
<b>2015</b>	1(1)		4(4)	3(2)									<b>8(7)</b>
<b>2016</b>													<b>0</b>
<b>TOTAL</b>	<b>29(15)</b>	<b>31(14)</b>	<b>44(16)</b>	<b>82(24)</b>	<b>105(13)</b>	<b>30</b>	<b>11(2)</b>	<b>3(3)</b>	<b>1</b>	<b>6(3)</b>	<b>20(6)</b>	<b>23(17)</b>	<b>385</b>

SD: Sin Datos Satelitales de color del mar. Los espacios vacíos indican ninguna detección de aguas blancas. Los números entre paréntesis ( ) indican los días de aguas blancas presentados al interior de la Bahía de Paracas.

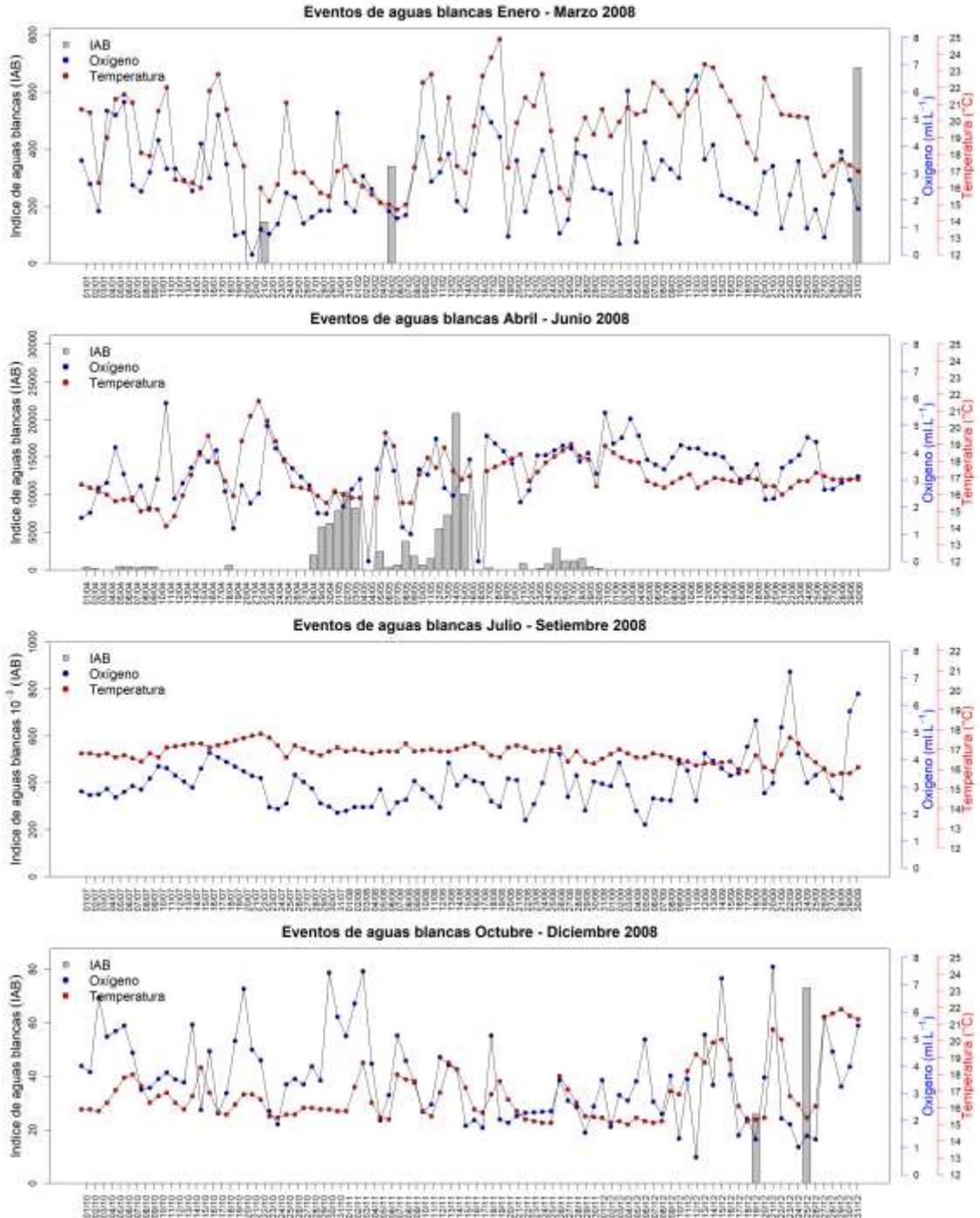
Anexo 17. Series diarias de oxígeno y temperatura de la bahía de Paracas relacionados a los eventos de aguas blancas durante el 2006.



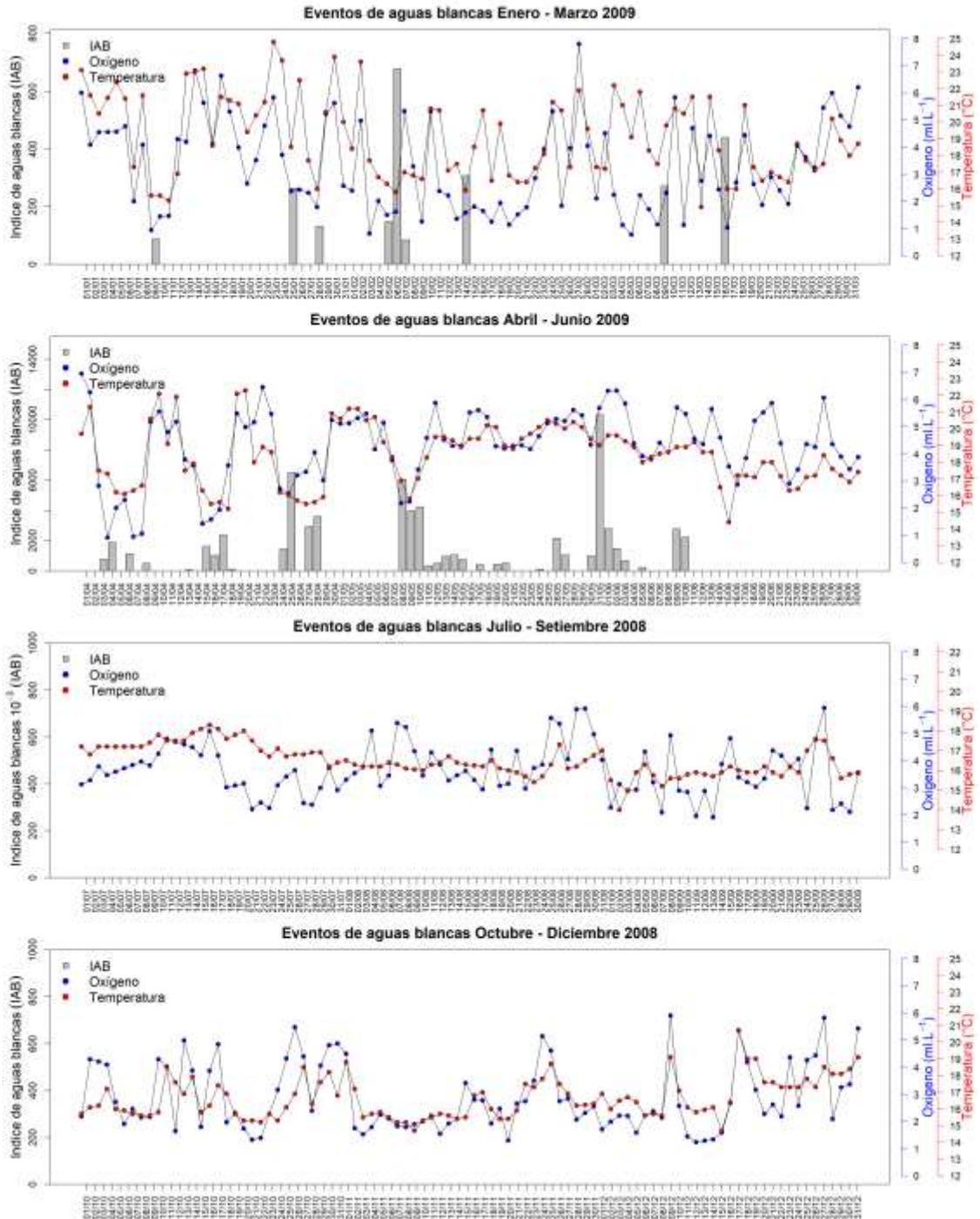
Anexo 18. Series de oxígeno y temperatura de la bahía de Paracas relacionados a los eventos de aguas blancas durante el 2007.



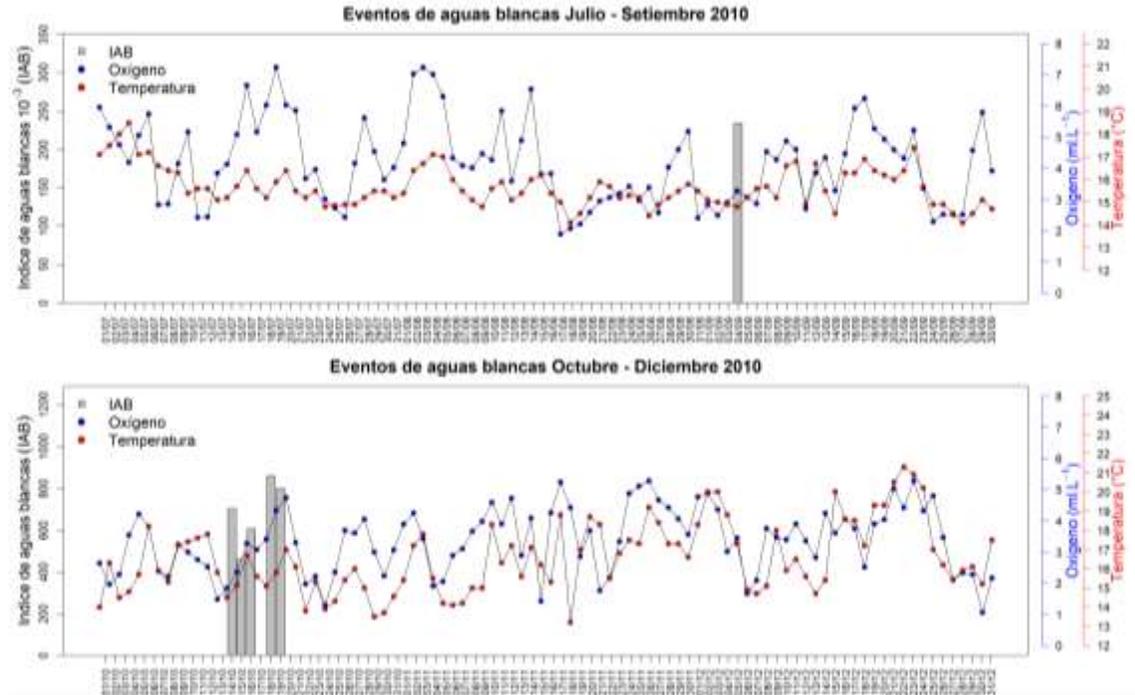
Anexo 19. Series diarias de oxígeno y temperatura de la bahía de Paracas relacionadas a los eventos de aguas blancas durante el 2008.



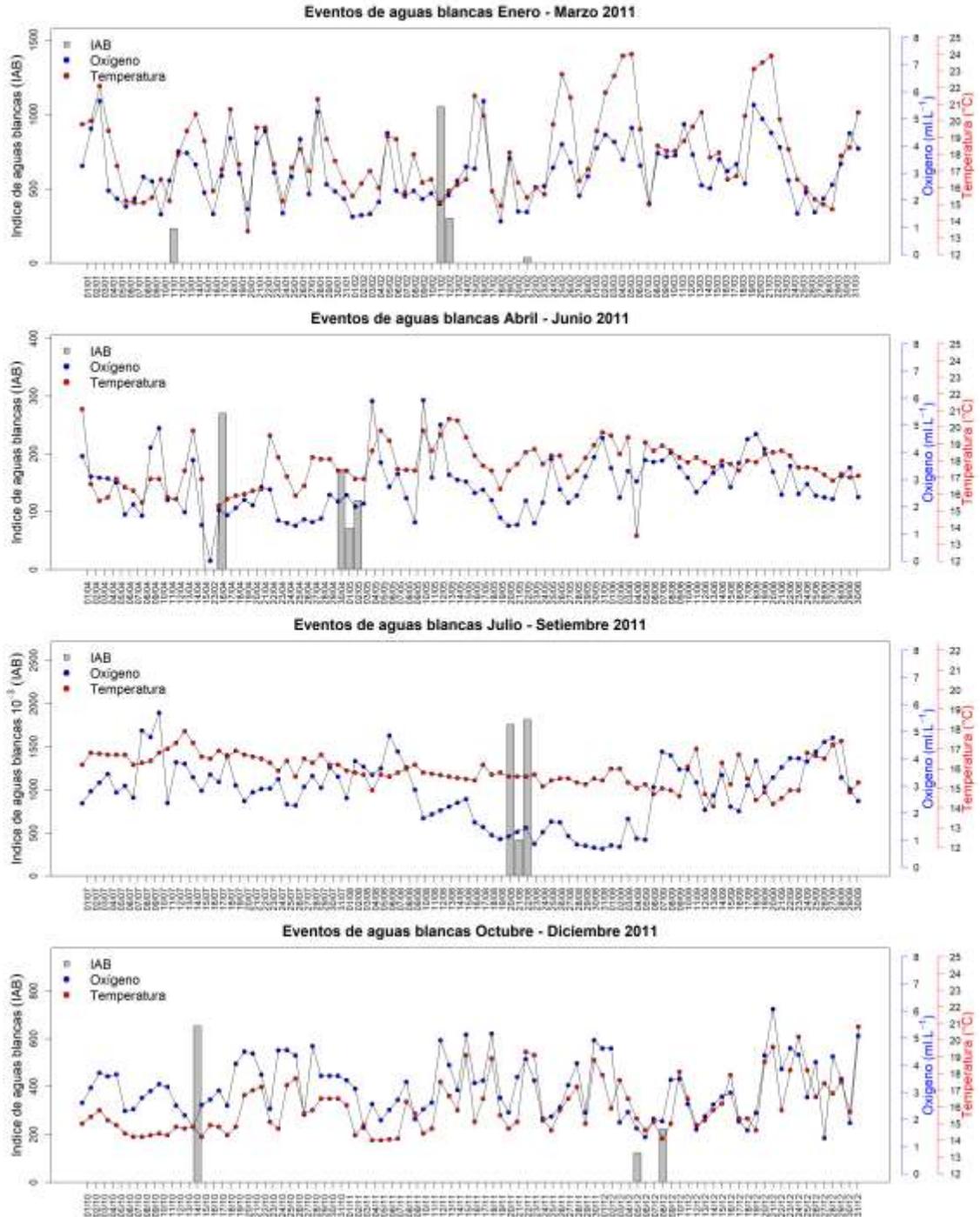
Anexo 20. Series diarias de oxígeno y temperatura de la bahía de Paracas relacionadas a los eventos de aguas blancas durante el 2009.



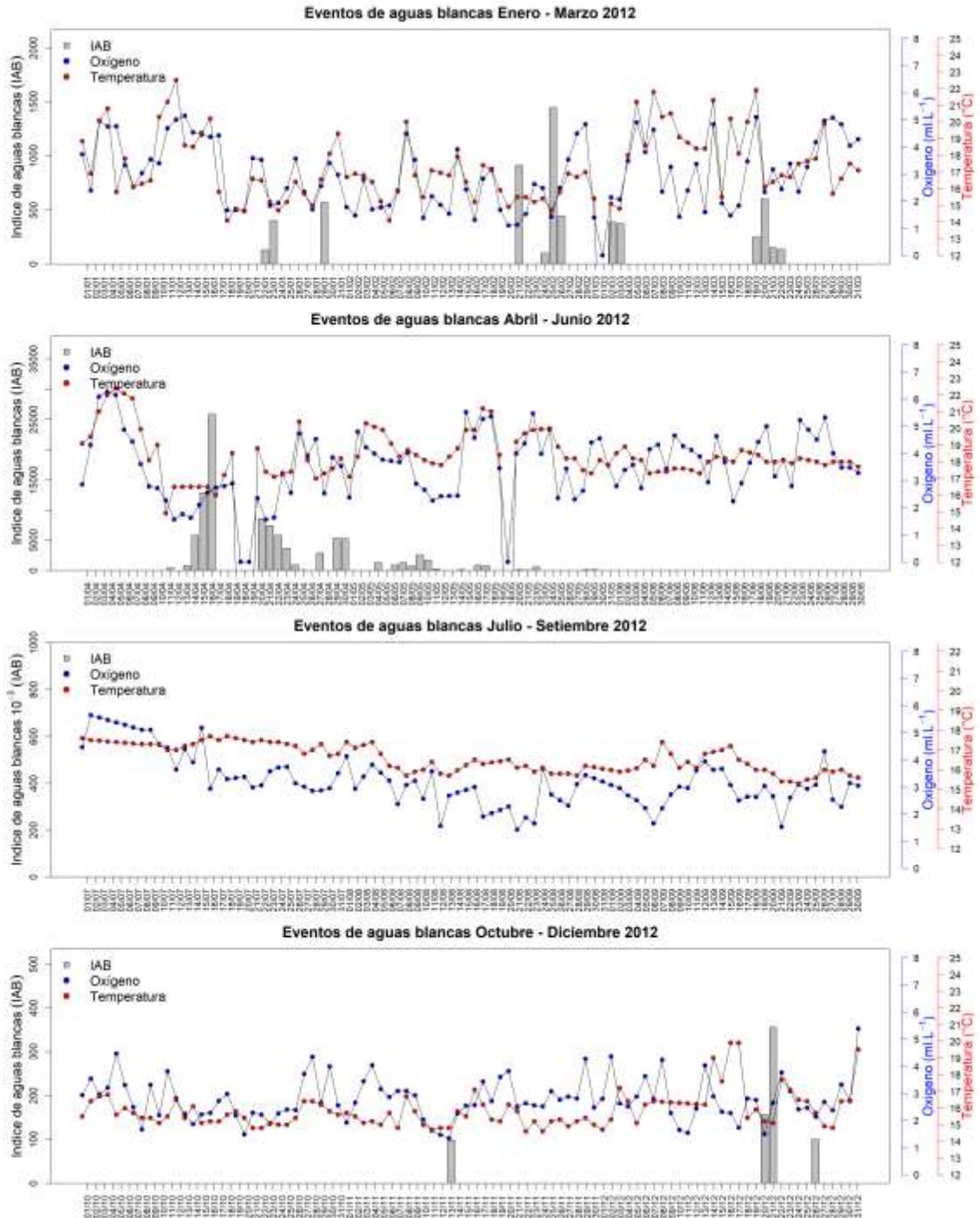
Anexo 21. Series diarias de oxígeno y temperatura de la bahía de Paracas relacionadas a los eventos de aguas blancas durante el 2010.



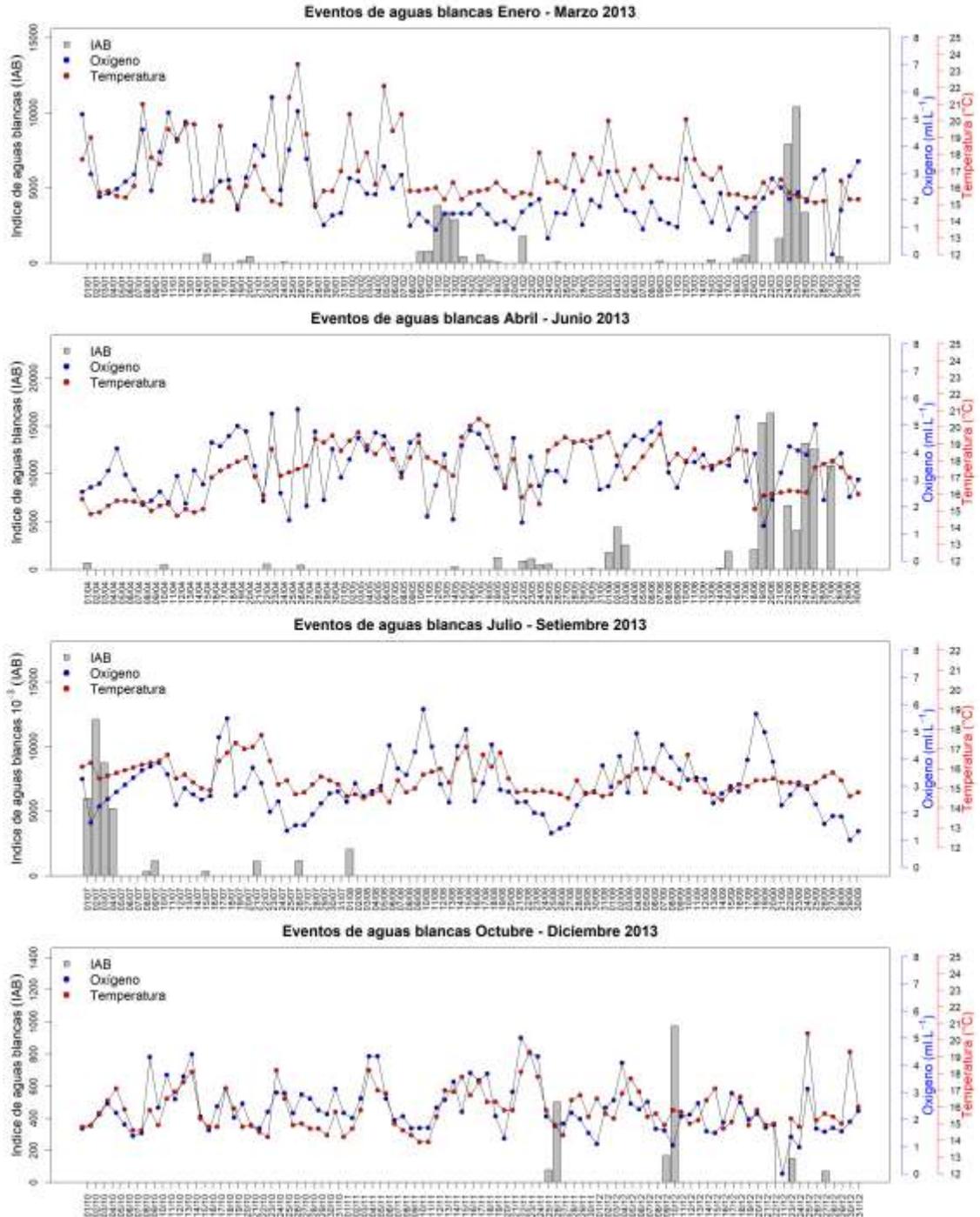
Anexo 22. Series diarias de oxígeno y temperatura de la bahía de Paracas relacionadas a los eventos de aguas blancas durante el 2011.



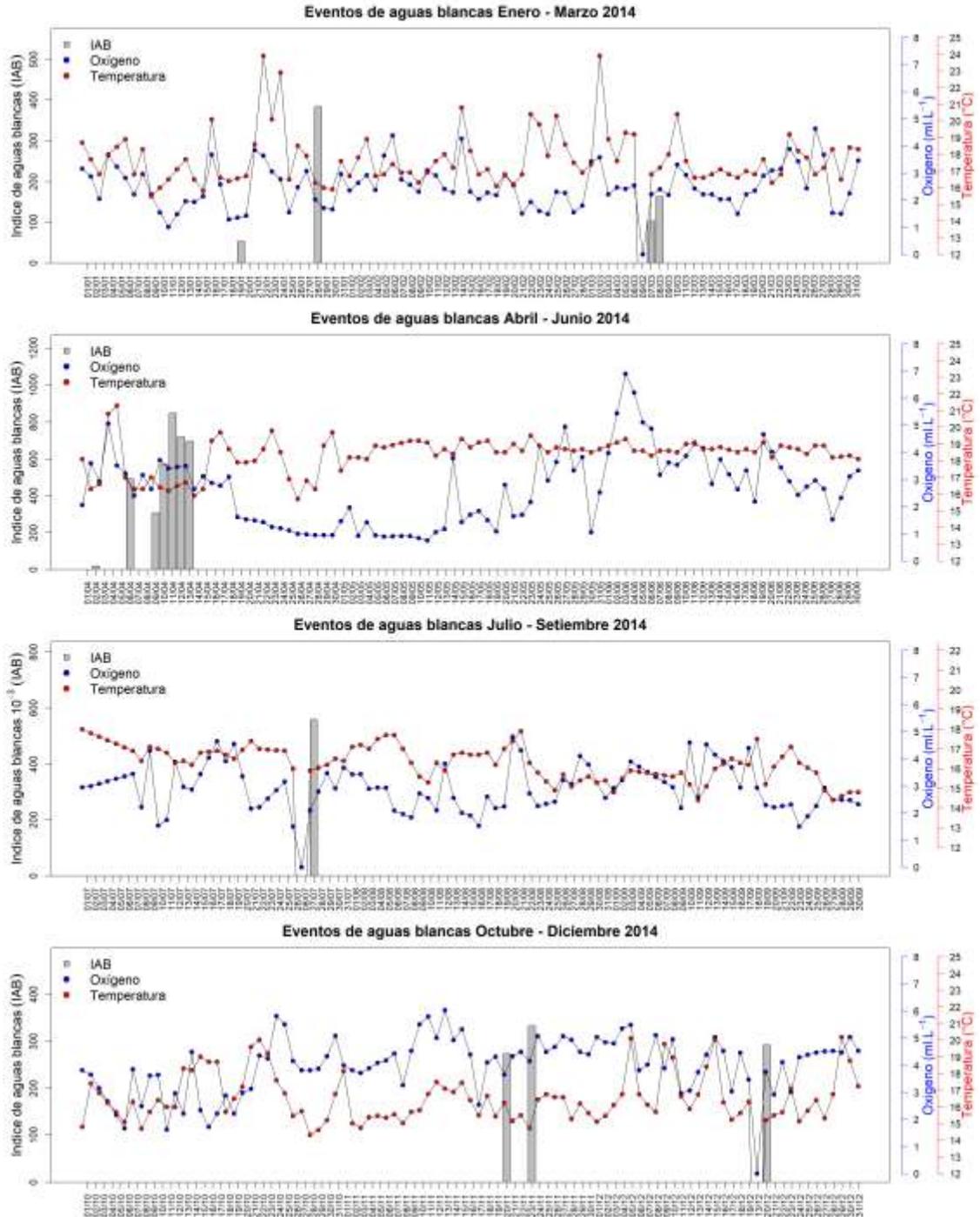
Anexo 23. Series diarias de oxígeno y temperatura de la bahía de Paracas relacionadas a los eventos de aguas blancas durante el 2012.



Anexo 24. Series diarias de oxígeno y temperatura de la bahía de Paracas relacionadas a los eventos de aguas blancas durante el 2013.



Anexo 25. Series diarias de oxígeno y temperatura de la bahía de Paracas relacionadas a los eventos de aguas blancas durante el 2014.



Anexo 25. Series diarias de oxígeno y temperatura de la bahía de Paracas relacionadas a los eventos de aguas blancas durante el 2015.

