

BOLETÍN

INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ

ISSN 0458-7766

VOLUMEN 33, Número 1



Enero - Junio 2018
Callao, Perú



PERÚ

Ministerio
de la Producción

MONITOREO DE LAS AGUAS RESIDUALES VERTIDAS EN LA BAHÍA DEL CALLAO UTILIZANDO IMÁGENES LANDSAT (1985-2015)

MONITORING OF WASTEWATER DISCHARGED INTO THE CALLAO BAY USING LANDSAT IMAGES (1985-2015)

German Velaochaga¹
Han Xu

Carlos Paulino
Edward Alburqueque

RESUMEN

VELAOCHAGA G, PAULINO C, XU H, ALBURQUEQUE E. 2018. Monitoreo de las aguas residuales vertidas en la bahía del Callao utilizando imágenes Landsat (1985-2015). *Bol Inst Mar Perú*. 33(1): 5-12.- Se procesaron imágenes Landsat desde 1985 hasta el 2015 en la zona ubicada entre los ríos Rímac y Chillón, para realizar el monitoreo e identificar los sólidos suspendidos provocados por los colectores residuales y vertederos de los ríos. Se observó aumento de temperatura de hasta 2 °C en zonas con alta concentración de residuos mediante la banda visible y térmica del satélite. Se identificó que después de la construcción del colector submarino se presentaron diferencias de coloración y temperatura con respecto a sus alrededores, además mediante una gráfica de firmas espectrales se comprobó que los residuos causaban un incremento de reflectancia entre los rangos 600-700 nanómetros. Finalmente se encontró alta correlación ($R=0,951$) entre la temperatura in-situ y satelital, lo cual indica que con las medidas del satélite se puede estimar con precisión los valores reales de la temperatura superficial del mar.

PALABRAS CLAVE: Aguas residuales, bahía del Callao, imágenes Landsat, 1985-2015

ABSTRACT

VELAOCHAGA G, PAULINO C, XU H, ALBURQUEQUE E. 2018. *Monitoring of wastewater discharged into the Callao bay using Landsat images (1985-2015)*. *Bol Inst Mar Peru*. 33(1): 5-12.- Landsat images were processed from 1985 to 2015 between the Rimac and Chillón rivers, in order to monitor and identify the suspended solids originated by the waste collectors and landfills located on the aforementioned rivers. An increase in temperature of up to 2 °C was observed in areas with a high concentration of waste through the visible and thermal band of the satellite. It was identified that after the construction of the submarine collector, differences of coloration and temperature appeared. In addition, by means of a graph of spectral signatures it was possible to verify that the residues caused an increase of reflectance between the ranges of 600-700 nanometers. A high correlation ($R = 0.951$) was found between the *in situ* and satellite temperatures, which indicates that by using the measurements of the satellite, the real values of the sea surface temperature can be accurately estimated.

KEYWORDS: wastewater, Callao bay, Landsat images, 1985-2015

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación marina es un problema complejo y reviste carácter mundial debido a los daños que produce en el ecosistema marino (GUILLÉN y AQUINO 1978).

La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar describe la contaminación marina como: "...la introducción por el hombre, directa o indirectamente, de sustancias o de energía en el medio marino, incluidos los estuarios, que produzca o pueda producir efectos nocivos tales como daños a los recursos vivos y a la vida marina, peligros para la salud humana, obstaculización de las actividades marítimas, incluidos la pesca y otros usos legítimos del mar, deterioro de la calidad del agua del mar para su utilización y menoscabo de los lugares de esparcimiento;..." (ONU 1982).

Los desechos domésticos comprenden casi en su totalidad aguas cloacales, restos orgánicos e inorgánicos como alimentos, detergentes, desagües de zonas agrícolas, etc. que se caracterizan por su alto contenido microbiano. De estos residuos, las bacterias fecales tienen alto índice de mortalidad en el mar, ya sea por el nivel de salinidad, la temperatura, la interacción ecológica con otras especies y la radiación ultravioleta; es por este motivo que las descargas de los colectores se realizan en el océano (GUILLÉN et al. 1980).

El material particulado en suspensión juega un papel importante en la determinación de las propiedades ópticas de las aguas oceánicas. Es importante reconocer que el término "material suspendido" no se aplica a un solo tipo de material, sino a toda una familia de materiales con características propias (ROBINSON 1985).

¹ Área de Sensoramiento Remoto AFSR-DGIHSA- Instituto del Mar del Perú – IMARPE. Av. Argentina 2245-Callao, Perú, E-mail: gvelaochaga@imarpe.gob.pe

Las imágenes satelitales permiten identificar y monitorear áreas marinas y costeras contaminadas a través de los canales visible e infrarrojo del espectro electromagnético. Otra de las ventajas que ofrecen los sensores remotos, con respecto a los actuales procesos de medición de calidad de agua, es que se puede tener información del objeto de estudio con la misma resolución espacial y temporal; algo que resultaría imposible con los métodos de medición tradicional (KULKARNI 2011).

El Instituto del Mar del Perú, a través de sus áreas funcionales especializadas, monitorea los parámetros de calidad del ambiente acuático en estaciones puntuales con el objetivo de evaluar, identificar y cuantificar los impactos que generan las actividades antrópicas en el ecosistema marino. Actualmente, existen pocas investigaciones relacionadas a la descarga de aguas residuales en el mar peruano usando información satelital.

El objetivo de este trabajo es investigar la distribución espacial y temporal de las aguas residuales vertidas en el mar del Callao procedente de los colectores en el período 1985 al 2015.

Área de estudio

El mar del Callao es una bahía extensa que está protegida por las islas San Lorenzo y El Frontón, y por los islotes Palomino, Cabinzas y Redondo. Esta zona registra actividades de pesca artesanal muy costera (Fig. 1). La zona costera recibe las descargas de los ríos Rímac y Chillón, además de los efluentes orgánicos e inorgánicos procedente de los colectores de toda la ciudad de Lima, ocasionando en la zona costera un impacto negativo en la calidad de sus aguas.

Antecedentes de la zona de estudio

Según información brindada por SEDAPAL (Tabla 1), hasta antes del 2013 existían tres colectores (Centenario, Bocanegra y Comas) que descargaban sus residuos en la zona costera del Callao.

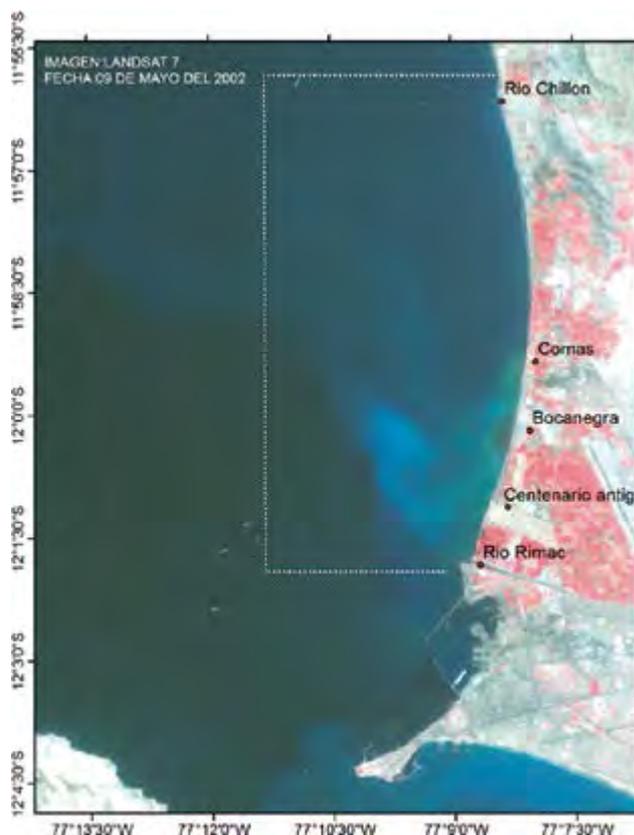


Figura 1.- Imagen Landsat-7 del 9 mayo del 2002. El área de estudio se encuentra delimitada con líneas blancas - Bahía del Callao, Lima-Perú

El 12 de mayo del 2008, según Resolución Presidencial N° 093-2008-CONAM/PCD, se declaró en emergencia ambiental la zona de vertimiento de aguas servidas del interceptor norte ubicada en Taboada por un plazo de 90 días, que recibía las descargas de los colectores Centenario Nuevo, Centenario Antiguo, Bocanegra y Comas; además de aprobar un plan para la recuperación de la zona señalada.

En el 2013 se puso en operación la planta de tratamiento de aguas residuales Taboada (PTAR) que procesa la descarga de los colectores Bocanegra y Comas, mientras que el colector Centenario Antiguo es derivado al colector Centenario Nuevo (Tabla 1).

Tabla 1.- Localización geográfica de colectores antiguos y actuales (Fuente: SEDAPAL) 2014

| Zona de Vertimiento | Puntos de Descarga | | Observaciones |
|---------------------|--------------------|--------------|---|
| | Latitud S | Longitud W | |
| Centenario Nuevo | 12°00'55,78" | 77°08'15,35" | Vertimiento vigente |
| Centenario Antiguo | 12°01'9,5" | 77°08'19,59" | Derivado hacia el colector Centenario Nuevo |
| Bocanegra | 12°00'13,17" | 77°08'12,68" | Derivado hacia PTAR Taboada |
| Comas | 11°59'22,82" | 77°07'58,23" | Derivado hacia PTAR Taboada |
| Taboada | 11°59'35,54" | 77°10'07,47" | Final del emisor submarino |

La profundidad máxima que alcanza el emisario submarino (PTAR Taboada) es 15 metros, y el tratamiento que reciben las aguas residuales antes de ser vertidas al fondo del mar a una distancia de 2,5 km de la costa es con un tratamiento físico avanzado con retención de sólidos hasta 1 mm sin utilizar ningún tipo de agente químico.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

DATOS SATELITALES

Se utilizaron 76 imágenes de los sensores TM del satélite Landsat 5, ETM+ del satélite Landsat 7 y OLI del satélite Landsat 8, para el periodo 1985 al 2015 (Tabla 2), de las cuales se eliminaron aquellas con alta nubosidad, obteniéndose un promedio de 2 a 3 imágenes por año (Fig. 2). La resolución temporal de dichos satélites por la zona de estudio es de 16 días, aproximadamente entre las 09:13 y las 10:16 hora local.

Las imágenes Landsat son proporcionadas gratuitamente por el Servicio Geológico de los EEUU (USGS) y fueron descargadas a través de su portal web Global Visualization Viewer.

Para identificar las áreas de mezcla y desplazamiento de las aguas contaminadas en el mar del Callao se usaron imágenes de falso color; asimismo, se usaron las bandas térmicas del sensor TIRS del satélite Landsat 8, para estimar y comparar las diferencias de temperatura satelital y datos *in situ*, y demostrar lo afirmado por MITCHELL y STAPP (1995), quienes dicen: "...altas cantidades de sólidos en suspensión también pueden causar un aumento en la temperatura del agua superficial, debido a que las partículas suspendidas absorben el calor de la luz solar...".

ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR - TSM

Para obtener la temperatura de brillo se realizó la calibración radiométrica de los sensores TM, ETM+ y TIRS, que consiste en encontrar la relación lineal entre los números digitales (ND) y la radiancia espectral (L_{λ}), registrada por el sensor y expresada en la ecuación (CHANDER *et al.* 2009):

$$L_{\lambda} = a \cdot ND + b ,$$

con :

$$a = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{ND_{\max} - ND_{\min}} ,$$

$$b = L_{\min} - \left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{ND_{\max} - ND_{\min}} \right) \cdot ND_{\min} ,$$

Donde: ND tiene un valor mínimo de cero y máximo de 255 para los sensores TM y ETM+ (8 bits), y el valor máximo de 4095 para el TIRS (12 bits); ND_{\max} y ND_{\min} representan los valores máximo y mínimo de la imagen; L_{\max} y L_{\min} representan los valores de la radiancia espectral máximo y mínimo de la imagen ($W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$). Por tanto, a y b se denotan como los factores de ganancia y sesgo reescalados para un determinado canal en unidades ($W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})/DN$).

Donde: W es vatios; m^2 es metro al cuadrado; sr es estereorradian, μm son micrómetros y DN son los números digitales.

La L_{λ} registrada por el sensor está formada por tres componentes: radiancia emitida por la atmósfera hacia

Tabla 2.- Características de los sensores del satélite Landsat (CHANDER *et al.* 2009, USGS, 2015)

| Sensor-satélite | Rango espectral (μm) | Nº Bandas | Resolución espacial (m^2) | Resolución radiométrica | Resolución temporal | |
|-----------------|-------------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------|---------|
| TM-L5 | Región visible e infrarrojo cercano | 0,45-2,35 | 1-5 y 7 | 30 | 8-bit | |
| | Región térmica | 10,40-12,50 | 6 | 120 | | |
| ETM+ - L7 | Región visible e infrarrojo cercano | 0,45-2,35 | 1-5 y 7 | 30 | 8-bit | 16 días |
| | Región térmica | 10,40-12,50 | 6a, 6b | 60 | | |
| OLI - TIRS L8 | Región visible e infrarrojo cercano | 0,44-2,29 | 1 - 7 | 30 | 12-bit | |
| | Región térmica | 10,90-12,00 | 10 - 11 | 30 | | |

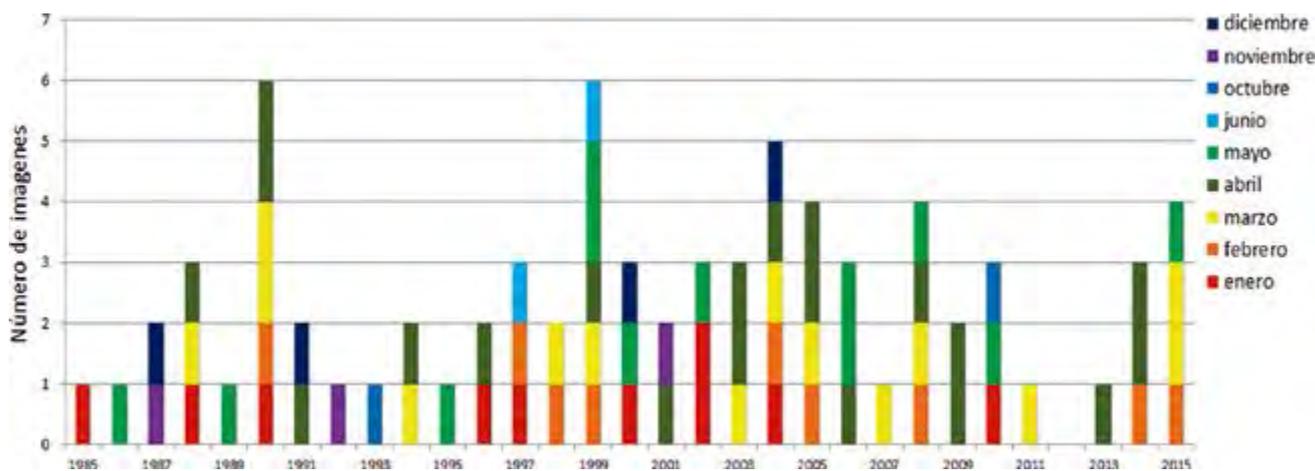


Figura 2.- Imágenes satelitales Landsat utilizadas durante el periodo de estudio

el sensor (L_{\uparrow}); emitida por un objeto de la Tierra, ya sea suelo u océano $B(T_s)$; y emitida por la atmosfera hacia el suelo, reflejada por él y registrada por el sensor L_{\downarrow} . L_{λ} se expresa por la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = \tau_{\lambda} [\epsilon_{\lambda} B(T_s) + (1 - \epsilon_{\lambda})L_{\downarrow}] + L_{\uparrow} ,$$

Donde: ϵ_{λ} es la emitancia superficial del objeto; $B(T_s)$ es la radiancia espectral de un cuerpo negro con temperatura superficial T_s ; τ_{λ} es la transmisividad atmosférica espectral (VINCENT y THOMSON 1972).

El algoritmo unicanal es utilizado para estimar la temperatura superficial del mar (TSM) con el canal térmico (canal 6 para Landsat5, canal 6a o 6b para Landsat7) (JIMÉNEZ-MUÑOZ *et al.* 2014). Como el sensor TIRS-Landsat8 posee dos canales térmicos (canales 10 y 11) se implementó el algoritmo Split window para la estimación de temperatura (ROZENSTEIN *et al.* 2014).

En este trabajo de investigación se ha utilizado el método de referencia de canal en la cual se asigna un valor constante 0,995 a ϵ_{λ} (CLAUS *et al.* 1998) para los cuerpos de agua, y se estima el valor de $B(T_s)$ de cada pixel de la imagen.

Una vez que se tenga la imagen de $B(T_s)$ se estima la temperatura superficial del mar (T_s) usando la ecuación de Planck:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B(T_s)} + 1\right)} ,$$

Donde K_1 y K_2 (en grados Kelvin) son constantes de conversión para una longitud de onda (λ) específica (Tabla 3).

Tabla 3.- Constantes de calibración de los satélites Landsat5, Landsat7 y Landsat8 (CHANDER *et al.* 2009, USGS 2015)

| Satélite | Banda | Sensor | K_1 ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) | K_2 (kelvin) |
|----------|-------------|--------|---|----------------|
| Landsat5 | Banda 6 | TM | 607,76 | 1260,56 |
| Landsat7 | Banda 6a 6b | ETM+ | 666,09 | 1282,71 |
| Landsat8 | Banda 10 | TIRS | 774,89 | 1321,08 |
| | Banda 11 | TIRS | 480,89 | 1201,14 |

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las imágenes Landsat de falso color permitieron identificar la extensión e impacto de las aguas residuales que son vertidas en el mar del Callao sin ningún tipo de tratamiento antes del 2013, las cuales muestran una coloración distinta en los puntos a) Centenario antiguo, b) Bocanegra y c) Comas (Fig. 3).

La alta resolución espacial de las bandas térmicas de los satélites Landsat, permitieron identificar las diferencias de temperatura superficial del mar alrededor de las zonas de descarga de los colectores y del río Rímac, la alta concentración de sólidos suspendidos de las aguas residuales originaron un aumento en la temperatura de hasta 2 °C en los puntos de descarga, debido a mayor absorción de calor (Fig. 4).

La validación entre datos de TSM obtenida con Landsat y datos *in-situ* obtenidos de una prospección en la bahía del Callao realizada por la Unidad de Monitoreo y Gestión Marino Costero (UMGMC) del IMARPE del 23 al 27 de diciembre del 2013, presentó alta correlación ($R= 0,951$); comprobándose la alta capacidad de las bandas térmicas del Landsat para identificar procesos oceanográficos a un nivel más detallado (Fig. 5).

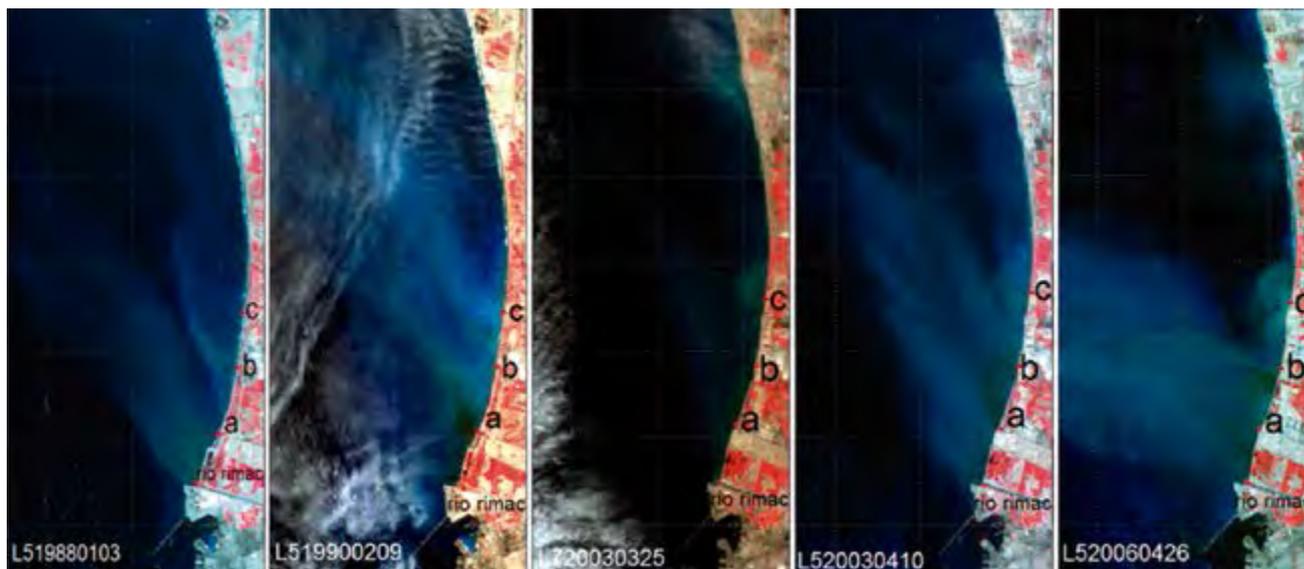


Figura 3.- Imágenes de falso color Landsat que registran la contaminación de la zona costera por efectos de la descarga de aguas residuales de los colectores a) Centenario antiguo, b) Bocanegra y c) Comas, antes de la construcción del colector Taboada

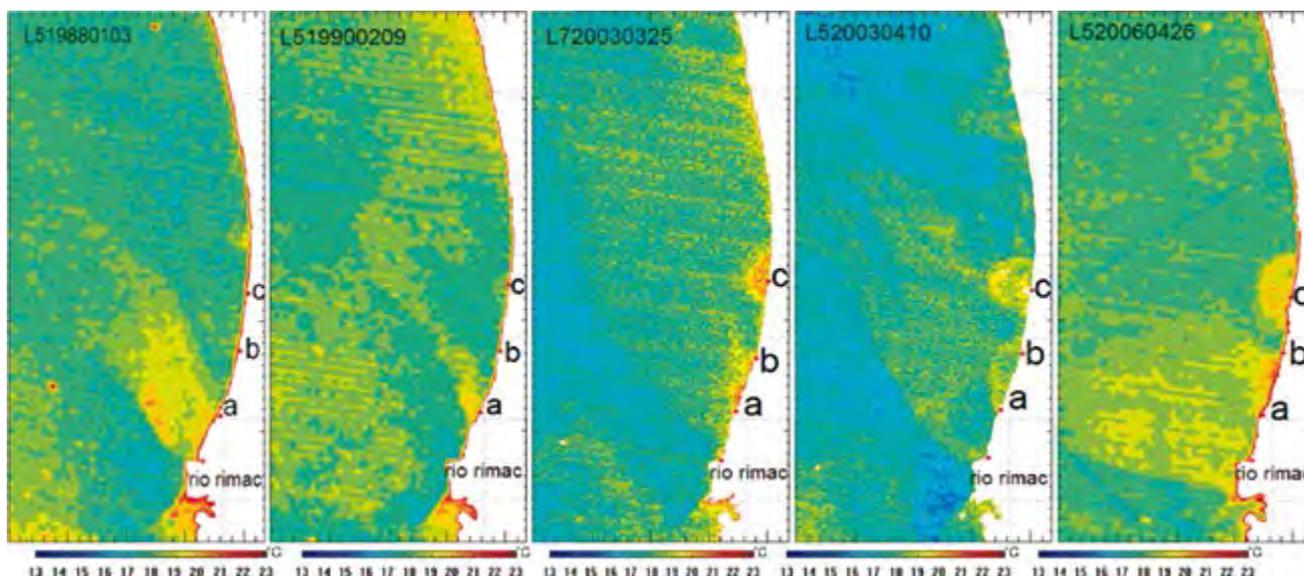


Figura 4.- Imágenes de TSM que registran el incremento de temperatura en el litoral costero como producto de la descarga de aguas residuales de los colectores a) Centenario antiguo, b) Bocanegra, c) Comas

Antes del 2013, la descarga de aguas residuales se realizaba en la zona costera afectando las actividades de pesca y recreación. Posteriormente, con la construcción del colector Taboada la descarga se realiza a 2,5 km de la costa y a una profundidad de 15 metros; sin embargo, por acción de las corrientes marinas las partículas logran ascender a la superficie alrededor del Taboada y se desplazan originando plumas de contaminación que son registradas por las imágenes satelitales (Fig. 6).

Las imágenes de TSM alrededor del emisor submarino PTAR-Taboada muestran disminución de la temperatura superficial, esto comprueba que las aguas del colector logran ascender hasta la superficie disminuyendo la temperatura alrededor.

Por otra parte, en la zona costera hay disminución de descargas de aguas residuales tal como se observa en las imágenes de falso color y TSM (Fig. 7).

La comparación de firmas espectrales en los 6 puntos tomados de la imagen Landsat del 25 de marzo del 2015, permitió identificar las diferentes respuestas de la reflectancia. La firma espectral de los puntos 1 y 2 presenta un pico de reflectancia en 650 nm asociadas a un alto contenido de partículas suspendidas y poca profundidad. El punto 4 también presenta un comportamiento similar a los puntos 1 y 2, pero su amplitud es menor debido a que se encuentra en una zona más profunda. Los puntos 3, 5 y 6 representan el típico comportamiento espectral del agua con pocos sedimentos (Fig. 8).

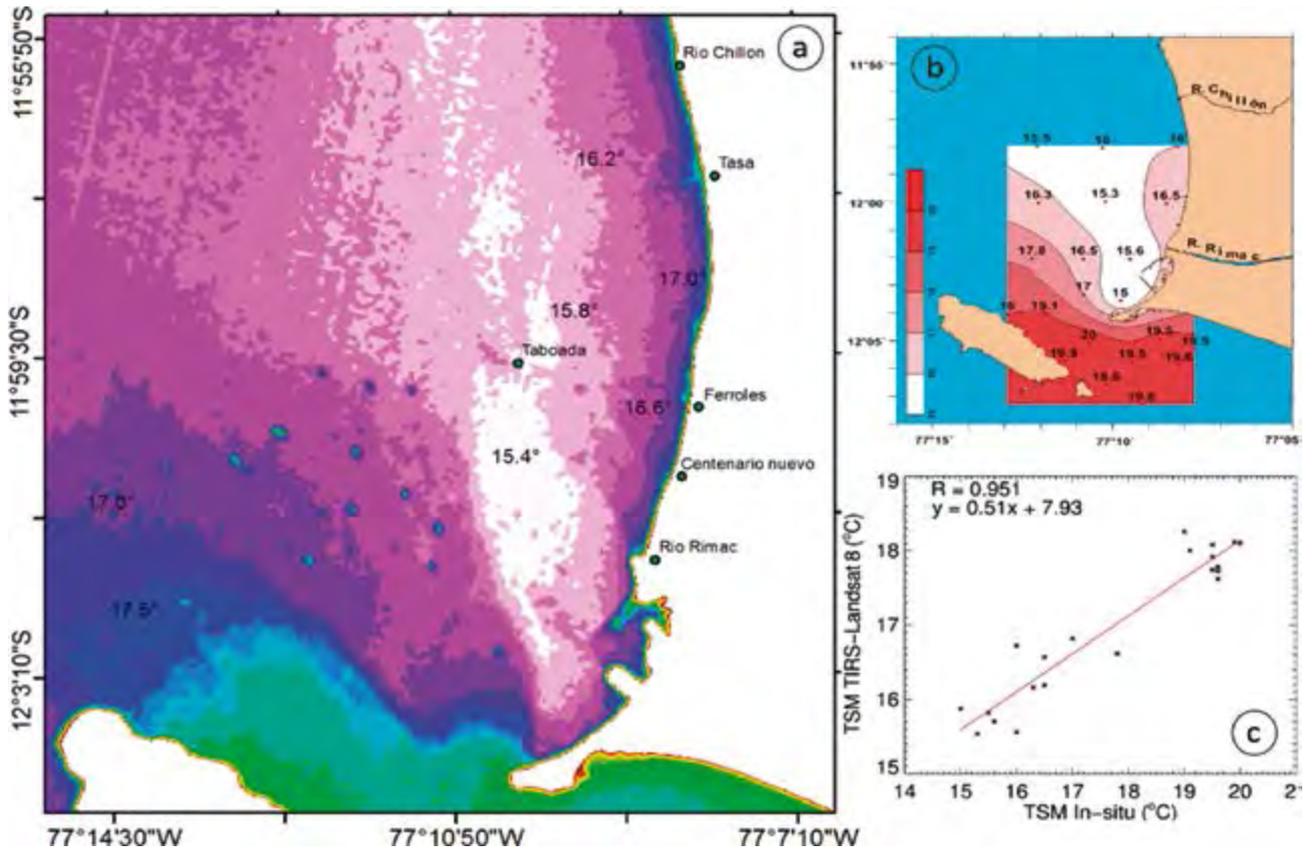


Figura 5.- a) Imagen de TSM del Landsat 8 del 25/12/2013, b) TSM promedio del 23-27/12/2013, fuente: UMGMC –IMARPE, c) Regresión lineal entre datos de TSM Landsat e *in-situ*

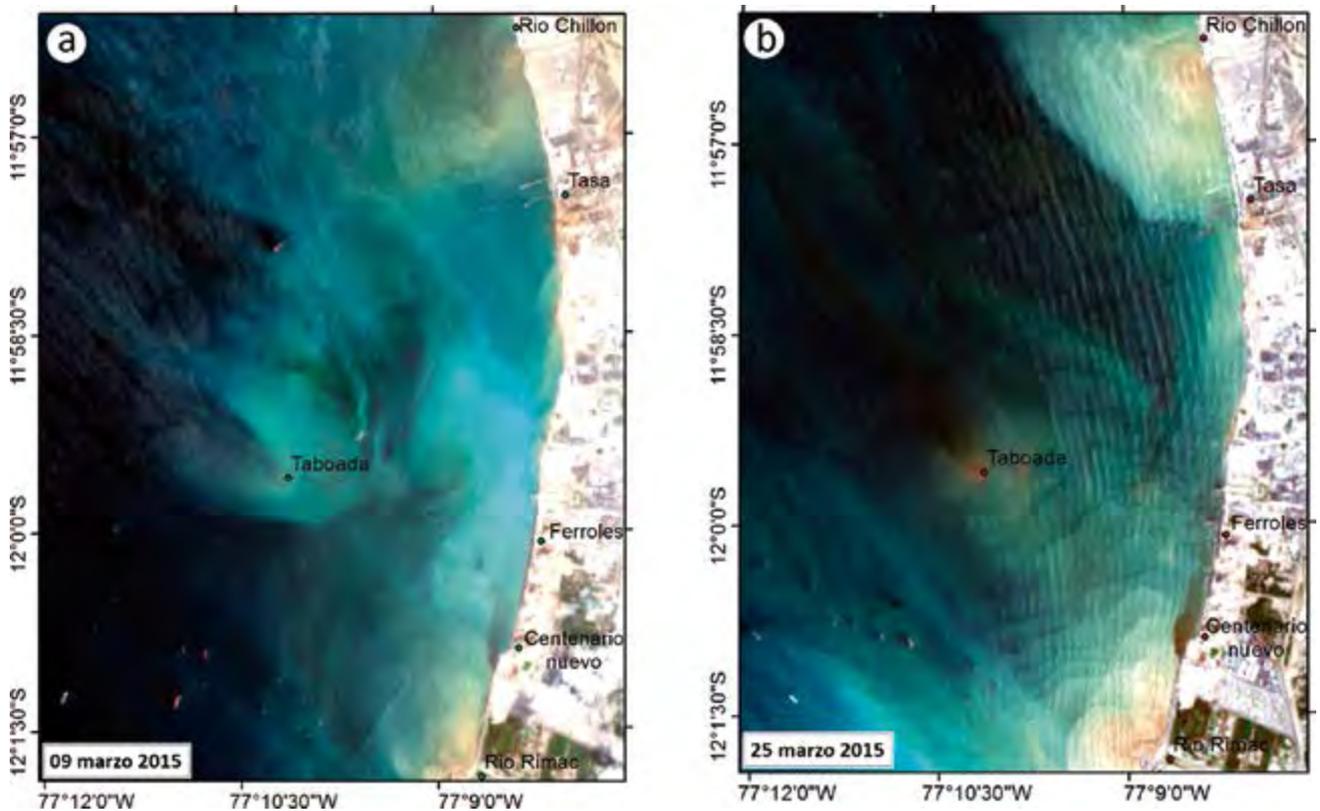


Figura 6.- Imágenes de falso color del Satélite Landsat 8 muestran distinta tonalidad a nivel superficial del colector Taboada en los días a) 9 marzo, b) 25 marzo del 2015

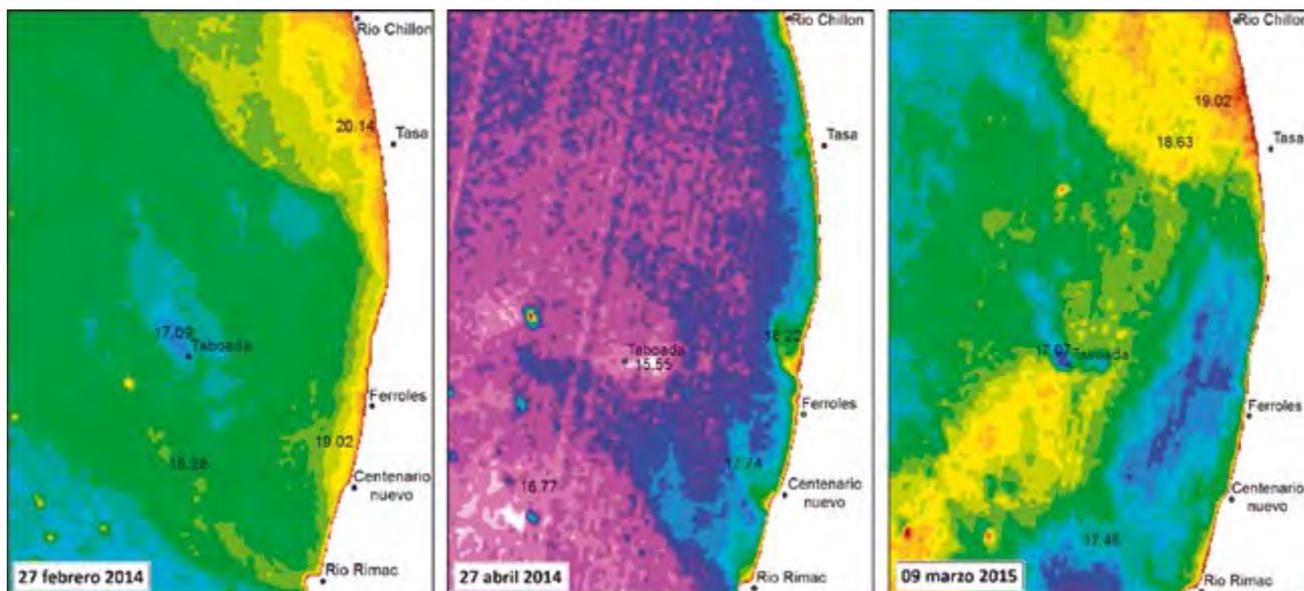


Figura 7.- Imágenes de TSM del Landsat 8, se observa una disminución de la TSM alrededor del PTAR-Taboada

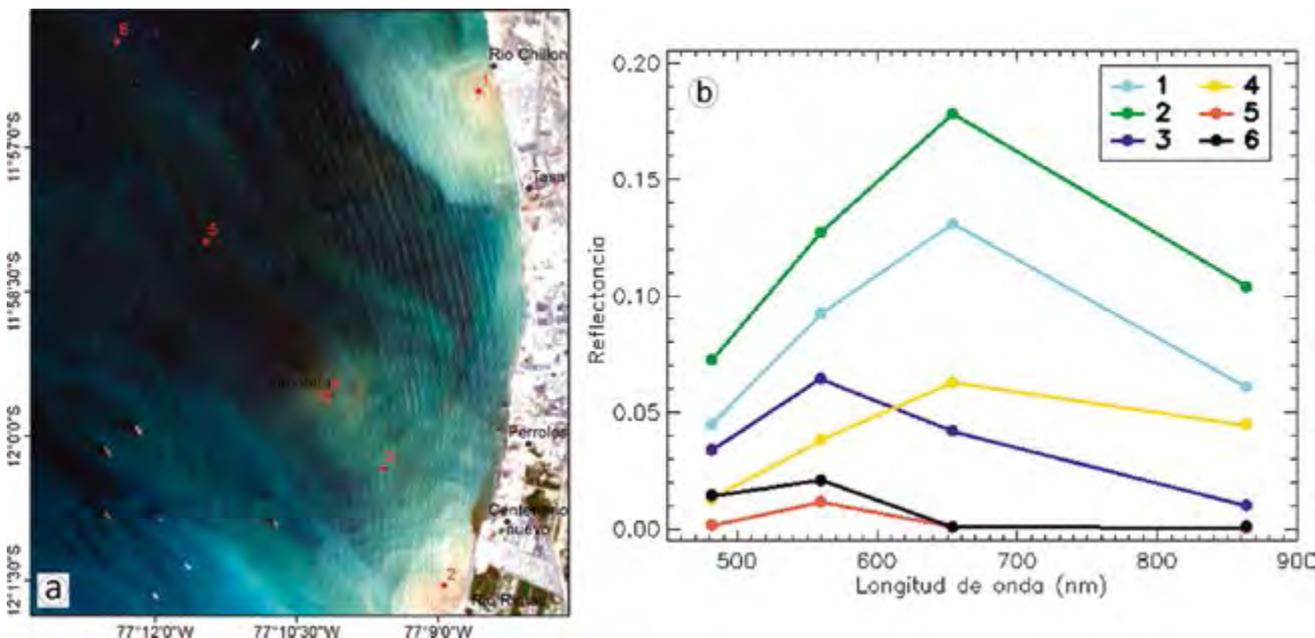


Figura 8.- a) Imagen Landsat del 25 marzo 2015 con 6 puntos de muestreo para determinar la reflectancia del agua de mar, b) Firmas espectrales de los 6 puntos de la Bahía del Callao

GARCÍA AGUDO *et al.* (1987) describe que cuando las materias residuales, incluyendo sustancias flotantes tales como partículas de frutas, heces, etc., se descargan a una profundidad de 20 metros o más, la presión resultante modifica la materia para que no flote y así se sedimente hacia el lecho del mar. Por lo tanto, el impacto de las materias residuales flotantes que no pueden ser removidas por el sistema de tratamiento no debe ser de preocupación.

Asimismo, Russell y Ludwig (1988) nos dicen: "... la dinámica de desplazamiento de los sólidos suspendidos en el mar con respecto a la profundidad de descarga, deberá hacerse a 20 m o más por dos razones: **Primero**,

en zonas donde es posible alcanzar profundidades de 20 m o más, existe estratificación significativa en la columna de agua, especialmente durante los meses de verano. Es decir, donde existe suficiente estratificación de densidad, la pluma mezclada de aguas negras/agua marina no subirá a la superficie del mar, sino que permanecerá sumergida en una ubicación intermedia. **Segundo**, cuando existe estratificación, si el efluente de aguas negras menos denso es mezclado rápidamente con el agua más fría/más densa del fondo del océano, la mezcla resultante será más densa que la capa superficial. Bajo tales condiciones, en algún punto de la columna de agua marina, la mezcla de aguas negras/agua marina encontrará agua de la misma densidad y, por lo tanto, no continuará con su tendencia a ascender..." (Fig. 9).

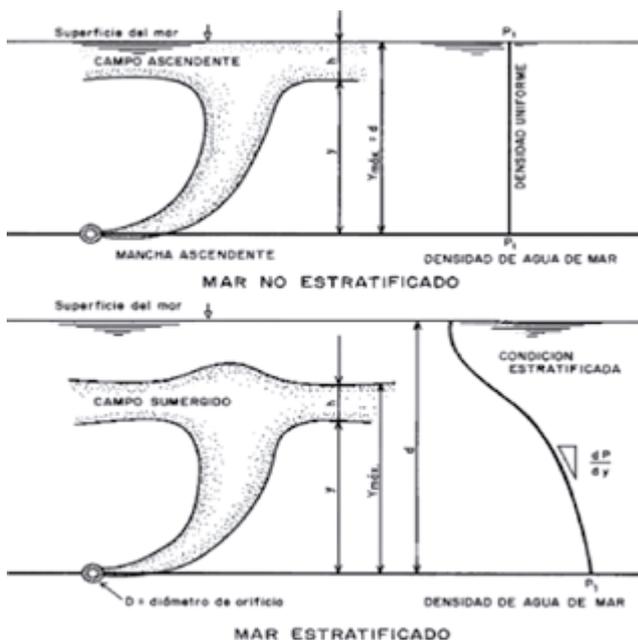


Figura 9.- Diferencias de la dinámica de mezcla de aguas negras y agua marina bajo condiciones estratificadas y no estratificadas de la densidad del agua de mar (RUSSEL y LUDWIG 1988)

Sin embargo, el PTAR-Taboada descarga aguas tratadas a 15 m de profundidad, lo cual podría permitir que las partículas pudieran ascender a la superficie, tal como se observa en las imágenes de falso color.

4. CONCLUSIONES

Las imágenes Landsat han identificado descargas de los colectores y ríos Rímac y Chillón en el espectro visible y térmico alrededor del colector PTAR-Taboada antes y después del 2013. Por lo que es posible usar dichas imágenes para el monitoreo del desplazamiento de las aguas de mezcla y su impacto en las actividades pesqueras y de recreación.

La descarga a 15 metros de profundidad del emisario submarino podría no ser suficiente tal como lo demuestran las imágenes satelitales ya que los residuos son observados en la superficie.

A través de la firma espectral de los seis puntos se confirma el comportamiento de la reflectancia ante la presencia de partículas suspendidas en el océano.

Es importante realizar monitoreos de calidad del agua utilizando un espectro radiómetro con el objetivo de obtener información radiométrica *in situ* para

cuantificar la concentración de partículas suspendidas y conocer las propiedades ópticas de los cuerpos de agua.

5. REFERENCIAS

CHANDER G, MARKHAM B L, HELDER D L. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*. 113: 983-903.

CLAUS F, BRUCE F, ATSUMU O, ANTHONY S. 1998. The baseline surface radiation network pyrgeometer Round-Robin calibration experiment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1: 687-696.

GARCÍA AGUDO E, *et al.* 1987. Evaluation of the efficiency of Santos/Sao Vicente preconditioning station for oceanic submarine outfall, En: *Proceedings of the IAWPRC Marine Disposal Seminar*, Río de Janeiro, Brasil, 1986. Vol. 18(11): 1986 ISBN 008 035 5811, Pergamon Press.

GUILLÉN O, ASTHU V, AQUINO R. 1980. Contaminación Marina en el Perú. Instituto del Mar del Perú. Informe N° 77. Callao – Perú.

GUILLÉN O, AQUINO R. 1978. Contaminación en los puertos del Callao y Chimbote y su efecto en la Productividad. Informe N° 61. Instituto del Mar del Perú.

JIMÉNEZ-MUÑOZ J, SOBRINO J, SKOKOVIC D, MATTAR C, CRISTÓBAL J. 2014. Land surface temperature Retrieval Methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*. Vol. 11, N° 10.

KULKARNI A. 2011. Water Quality Retrieval from Landsat TM Imagery. *Complex adaptive systems*. 6(0): 475-480. doi:10.1016/j.procs.2011.08.088.

MITCHELL K M, STAPP W B. 1995. *Field Manual for water quality monitoring*.

NACIONES UNIDAS (ONU). 1982. *Convención sobre las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar*.

ROBINSON I S. 1985. *Satellite oceanography: An introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. Ellis Horwood series in marine science. 175-184 pp. John Wiley and Sons, Inc., Somerset, N.J. 455 p.

ROZENSTEIN O, QIN Z, DERIMIAN Y, KARNIELI A. 2014. Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS using a Split Window Algorithm. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s140405768

RUSSELL G, LUDWIG. 1988. *Evaluación del Impacto Ambiental. Ubicación y diseño de emisarios submarinos*. Centro de Investigación de Monitoreo y Evaluación King’s College London, Universidad de Londres-Organización Mundial de la Salud. Documento Guía de EIA. Traducido por Henry J. Salas.

VINCENT R K, THOMSON F. 1972. Spectral compositional imaging of silicate rocks. *J. Geophys. Res.* 77: 2465-2472.

SEDAPAL. Acceso a la información. <http://www.sedapal.com.pe>

USGS UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. <http://glovis.usgs.gov/>