

HIDROGRAFÍA Y ESTRATIFICACIÓN EN LA BAHÍA DE MIRAFLORES. MARZO-SETIEMBRE 2014

HYDROGRAPHY AND STRATIFICATION IN MIRAFLORES BAY (MARCH-SEPTEMBER 2014)

J. Quispe¹ L. Vásquez W. García O. Morón
L. Pizarro G. Flores S. Sánchez R. Flores

RESUMEN

QUISPE J., VÁSQUEZ L., GARCÍA, W., MORÓN O., PIZARRO L., FLORES G., SÁNCHEZ S., FLORES R. 2022. *Hidrografía y estratificación en la bahía de Miraflores. Marzo-setiembre 2014. Inf Inst Mar Perú. 49(1): 122-136.*- Con datos hidrográficos de dos prospecciones, realizadas en marzo y setiembre 2014, se describe la hidrografía y estratificación en la bahía de Miraflores (BM) asociadas a condiciones cálidas y frías en ambos periodos. En marzo se presentó una condición estratificada y cálida, con máximos valores de frecuencia de Brunt Väisälä (FBV) y de vorticidad potencial (VP); asimismo la termoclina, haloclina y pycnoclina fueron pronunciadas, debido principalmente a la mayor radiación solar recibida. En setiembre, la columna de agua fue más homogénea y fría con presencia de una capa de mezcla débil y somera. La distribución de la temperatura potencial, salinidad y densidad potencial tuvo una relación directa con la estacionalidad y con la configuración de la bahía en el aspecto espacial. Se espera que los resultados obtenidos en el presente estudio contribuyan a un conocimiento más completo de la oceanografía costera de la región, principalmente de la bahía de Miraflores.

PALABRAS CLAVE: estratificación, hidrografía, mecanismos físicos

ABSTRACT

QUISPE J., VÁSQUEZ L., GARCÍA, W., MORÓN O., PIZARRO L., FLORES G., SÁNCHEZ S., FLORES R. 2022. *Hydrography and stratification in Miraflores Bay (March-September 2014). Inf Inst Mar Peru. 49(1): 122-136.*- Based on hydrographic data from two surveys, conducted in March and September 2014, we describe the hydrography and stratification in Miraflores Bay (MB) associated with warm and cold conditions during both periods. In March, there was a stratified and warm condition, with maximum values of Brunt-Väisälä frequency (BVF) and potential vorticity (PV). Likewise, the thermocline, halocline, and pycnocline were noticeable, mainly due to the higher solar radiation received. In September, the water column was more homogeneous and colder with the presence of a weak and shallow mixing layer. The distribution of potential temperature, salinity, and potential density had a direct relationship with seasonality and with the spatial configuration of the bay. We expect that our results will contribute to a more complete knowledge of the coastal oceanography of the region, mainly in Miraflores Bay.

KEYWORDS: stratification, hydrography, physical mechanisms

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras constituyen ecosistemas heterogéneos debido a que sus aguas son afectadas por diferentes procesos que alteran su variabilidad, como son las interacciones con la atmósfera (radiación solar, enfriamiento, precipitaciones y vientos), procesos oceanográficos (mareas, surgencia costera y mezcla) y/o interacciones con el continente (drenaje de agua dulce) (DÁVILA y VALDÉS, 2015). Estudios sobre la variabilidad espacial y estacional de temperatura, salinidad y densidad consideran que estas propiedades son importantes en una variedad de procesos oceanográficos, debido a que cambian en espacio y tiempo, produciendo gradientes horizontales

y verticales que modifican los patrones de circulación, y que, a su vez, se relacionan con las condiciones morfológicas, las profundidades, mareas, aportes fluviales y subterráneos y la acción de los vientos (BANNER, 1990; CHARNOCK, 1955). La combinación de estas características permite mayor o menor penetración de la luz hacia el fondo de la columna de agua, situación que favorece o inhibe la productividad primaria (OBESO, 2003).

Hasta ahora existen escasos antecedentes oceanográficos básicos que comparen o abarquen en conjunto estas propiedades y que profundicen en las variaciones hidrográficas espaciales y temporales en cada una de ellas.

¹ IMARPE, DGIOCC, AFIOF, jqquispe@imarpe.gob.pe

Este estudio describe y compara las condiciones hidrográficas en la bahía de Miraflores (12,0°S-12,2°S y 77,0°W- 77,2°W, Perú) durante dos prospecciones realizadas en marzo y setiembre 2014, que abarcaron un número importante de datos oceanográficos de CTD registrados a lo largo, ancho y profundidad en la bahía. El planteamiento y desarrollo de esta investigación, supuso que la variación espacial y temporal de temperatura potencial (TP), salinidad (S), densidad potencial (DP) y corrientes marinas (CMs) en la bahía Miraflores (BM), están determinadas principalmente por la radiación solar, la acción de los vientos, descarga continental y el flujo impulsado por el gradiente de densidad. El objetivo del presente estudio fue analizar la variabilidad temporal (estacional) y espacial (longitudinal, transversal y profundidad) de la Temperatura Potencial (TP), Salinidad (S), Densidad Potencial (DP), Vorticidad Potencial (VP) y la estratificación (Frecuencia de Brunt Väisälä; FBV) en BM durante las prospecciones realizadas. La investigación forma parte del Proyecto "Estudio integrado de la Dinámica de procesos Físicos y Biogeoquímicos en ecosistemas de Borde Costero" del IMARPE.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El Perú es uno de los países con mayor diversidad de ecosistemas, en parte debido a la alta variabilidad climática que se manifiesta tanto en territorio como en el mar adyacente. La denominada zona marina costera (ZMC), está constituida principalmente por la interconexión de tres medios extensos: el océano, la atmósfera y el continente, de modo que cualquier variación en estos factores impacta directamente en el clima y condiciones de vida en conjunto del sistema costero. Para comprender la dinámica de la ZMC, es necesario tener en cuenta que la principal característica del mar peruano está dada por la existencia de menor temperatura respecto a aguas oceánicas ubicadas a la misma distancia de la línea ecuatorial. Esto es resultado de la interacción atmósfera y océano, que genera afloramientos de aguas profundas y frías con altos contenidos de nutrientes, los que a través de la fotosíntesis generan vida microscópica que es eficientemente canalizada a los niveles superiores de la cadena trófica (CHENG *et al.*, 2010).

Como antecedentes de estudios, SÁNCHEZ y DELGADO (1996) señalaron que la zona norte de BM se caracteriza por registrar valores altos de temperatura superficial del mar, debido a que la geomorfología (La Punta e islas) provoca una circulación lenta en la zona con la consecuente ganancia de calor por la radiación solar. Según ZUTA y GUILLÉN (1970) y (BAKUN *et al.*, 1973), las variaciones estacionales del sistema de corrientes en la zona, están influenciadas por las aguas de afloramiento. Además, la intensidad de los vientos costeros es variable, según la estación del año, con una predominancia del sureste (SE). La configuración de la línea litoral y la topografía de fondo juegan un rol importante en la circulación, motivo por el cual las aguas frías profundas que ingresan a la zona dan lugar a la formación de remolinos ciclónicos y anticiclónicos, tanto en superficie como en fondo, convirtiéndola en un área muy dinámica (MORÓN, 1994). En la capa superficial, en verano se presentan flujos predominantes hacia el norte, con ciertas desviaciones hacia el este y oeste, mientras que en otoño los flujos son de intensidad variable. Cerca al fondo, los flujos en el verano y en otoño son hacia el norte, aunque las intensidades son mayores respecto a la superficie en el verano (MORÓN, 1994). Por otra parte, CORREA *et al.* (2008) determinaron patrones de temperatura, salinidad y circulación local en la bahía del Callao mediante modelación numérica, indicando que cuando se realizaron simulaciones con escenarios de viento norte se mostró que el transporte de las descargas hipotéticas se desplazó hasta la bahía de Miraflores.

Colección de datos

La red de 32 estaciones hidrográficas en BM se muestra en la figura 1, panel izquierdo. La sección hidrográfica (SH) localizada frente a La Perla (Fig. 1, panel derecho) tiene 5 estaciones espaciadas a ~1 km de distancia entre sí, desde la costa (estación 4) hasta ~7,5 km costa afuera (estación 8), mientras que al sur la SH frente a playa Pescadores (Fig. 1, panel derecho) tiene 4 estaciones espaciadas a ~1 km de distancia desde la costa (estación 29) hacia costa afuera (estación 32). Cada estación fue muestreada en marzo y setiembre 2014. Las variables hidrográficas, se midieron usando un CTD 19 Plus V2, marca Sea

Bird Electronics, obteniéndose perfiles verticales de presión, temperatura y conductividad. Los procedimientos de recopilación y procesamiento de datos, se encuentran en los manuales y programas del equipo.

Los datos de las corrientes marinas fueron colectados con un correntómetro acústico tipo Doppler (ADCP), RDI Instruments de 300hrz, que fue fijado al casco de la embarcación en modo arrastre. En la navegación y ubicación de las estaciones hidrográficas se usó un GPS de marca Garmin. Los datos de viento (magnitud y dirección) se obtuvieron de los registros horarios obtenidos en la estación meteorológica ubicada en la Sede Central del IMARPE para los días de muestreo del 24-25 de marzo y 29-30 de setiembre del 2014.

Área de estudio

Esta área se encuentra en la costa central del Perú, al sur de la bahía del Callao, comprendida entre las latitudes 12,0°S y 12,2°S y entre las longitudes 77,0°W y 77,2°W. Se caracteriza por presentar en la línea de costa las playas Carpayo, Los Cocos, Mar Brava, Chorrillos y La Herradura. En el límite norte en dirección N-W, se encuentran ubicadas las islas San Lorenzo y Frontón. La BM presenta un clima seco y árido, con pocos aportes de agua dulce en invierno (SÁNCHEZ y DELGADO, 1996). Está influenciada por el sistema de la Corriente Costera Peruana y el ingreso de las aguas costeras frías (ACF) del afloramiento costero.

Mecanismos físicos (estratificación y mezcla)

La estratificación es la propiedad que tienen las masas de agua a ordenarse en capas a lo largo de la dirección vertical como consecuencia de gradientes de densidad (SIMPSON *et al.*, 1990). Estos a su vez, pueden ser producidos por variaciones térmicas, así como por concentración de sólidos disueltos y de suspensión en aguas superficiales y fondo. El principal proceso generador del calentamiento térmico es la radiación solar que alcanza la superficie del agua; como consecuencia de esto, la duración y el período de estratificación dependen de manera directa de las condiciones climáticas (PORTO *et al.*, 1991).

Metodología

Se realizaron gráficas de perfiles verticales promedio de la TP, S y DP, así como de la distribución horizontal en los niveles 1, 5 y 10 m de profundidad. La variabilidad en la distribución de estos parámetros se comparó por niveles (capas) a 1 m, 5 m y 10 m de profundidad; mientras que en la vertical las comparaciones fueron entre las secciones y perfiles promedio de la SH La Perla (LP) y la SH playa Pescadores (PP), durante ambos periodos de muestreo. Para el análisis y visualización, los datos se graficaron con ayuda de los programas TEOS 10, *Ocean Data View* (ODV) y *Sigma Plot*. Para comparar la distribución de propiedades en superficie y en la vertical, el área de estudio se dividió en tres zonas: norte (ZN) que comprende las estaciones 1 a 8, centro (ZC) con las estaciones 9 a 23 y sur (ZS), con las estaciones 24 a 32 (Fig. 1, panel izquierdo).

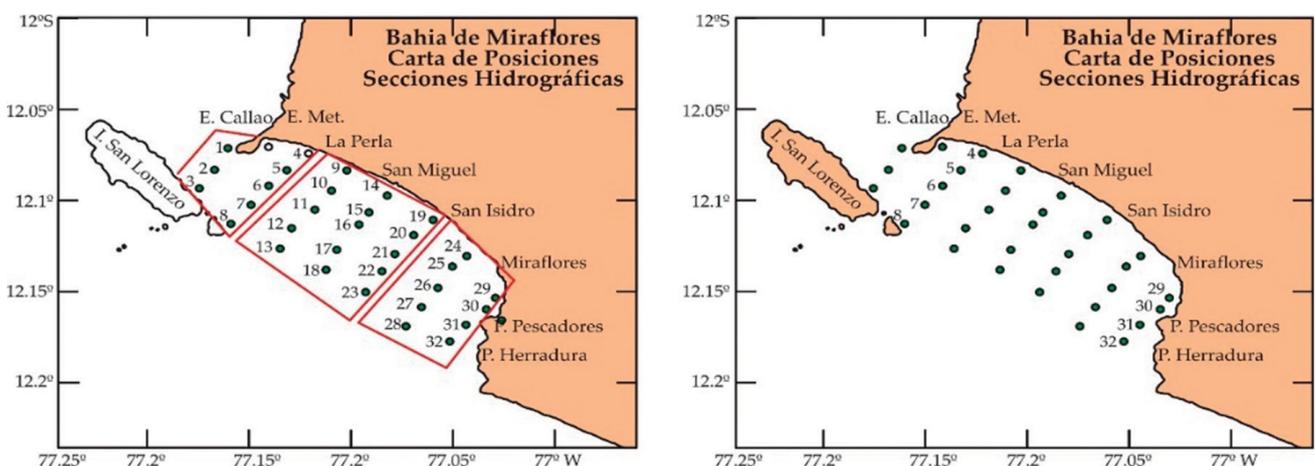


Figura 1.- Localización de la Bahía de Miraflores. Se muestra la distribución de estaciones hidrográficas en el panel izquierdo y las estaciones de las líneas (secciones) analizadas en el panel derecho, durante 24-25 marzo y 29-30 setiembre 2014

Se determinó el parámetro de estratificación Φ (Joules por metro cubico, J/m^3) dado por SIMPSON (1981), el cual es una medida de la energía necesaria para mezclar verticalmente la columna de agua por unidad de volumen, y se define de acuerdo a la siguiente ecuación (SIMPSON *et al.*, 1974):

$$\phi = \frac{g}{H} \int_{-h}^0 z(\rho(z) - \bar{\rho}) dz \quad (1)$$

donde H es la profundidad, z la coordenada vertical (positiva a la superficie), ρ la densidad, $\bar{\rho}$ la densidad promedio del agua de mar y g la aceleración de la gravedad.

Se determinó la mezcla debido a la acción del viento a partir de la ecuación (OBESO *et al.*, 2012):

$$\frac{d\phi}{dt} = -\delta C_{as} \rho_a \frac{U_w^3}{H} \quad (2)$$

donde U_w es la velocidad del viento en m/s a 10 m sobre la superficie, C_{as} ($6,4 \times 10^{-5}$) es el coeficiente efectivo del esfuerzo de arrastre para la superficie, δ (0,023) es el coeficiente de eficiencia de mezcla y ρ_a es la densidad del aire ($1,2 \text{ kg/m}^3$); las unidades de la mezcla por viento están en W/m^3 (CHARNOCK, 1981).

Asimismo, se calculó la frecuencia de Brunt-Väisälä (N) para cuantificar la importancia de la estratificación, que se obtiene por la expresión siguiente (PLATA y FILONOV, 2007):

$$N = \sqrt{\frac{g}{\bar{\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial z}} \quad (3)$$

donde N es la frecuencia de Brunt-Väisälä (ciclos/h), g es la aceleración de la gravedad, $\bar{\rho}$ es la densidad promedio de la parcela de agua desplazada y $\frac{\partial \rho}{\partial z}$ es el gradiente vertical de densidad ($\text{kg m}^{-3} \text{ m}^{-1}$).

Asimismo, se determinó la vorticidad potencial considerada como uno de los conceptos importantes en la oceanografía física para la comprensión de los movimientos de fluidos en un sistema rotatorio. Se usó la siguiente ecuación:

$$\frac{D\xi}{Dt} + (\xi + f) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

Donde la vorticidad está dada por:

$$\xi = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Finalmente, se determinó un índice de anomalías térmicas ('LABCOS-Callao') en la estación Callao empleando la metodología usada por QUISPE y VÁSQUEZ (2015), con registros de temperatura superficial en la estación Callao-IMARPE (Bahía Callao), periodo 1976-2017.

3. RESULTADOS

Temperatura superficial (TS) por niveles.- En superficie la temperatura promedio fue mayor en marzo respecto a la media y desviación estándar de setiembre. En los niveles de 5 y 10 m se mantuvieron los mayores valores de marzo, aunque con menor diferencia respecto a setiembre (Tablas 1, 2; Figs. 2, 3).

Tabla 1.- Valores promedio y desviación estándar por niveles de la TSM, SSM, densidad potencial y corrientes marinas en Bahía de Miraflores

Profundidad (m)	Fecha	TSM (°C)	SSM (ups)	Densidad potencial (kg/m³)	Corrientes marinas (cm/s)
0	24 y 25 marzo	20,3 (1,3)	34,9 (0,1)	24,5 (0,3)	13,9 (6,6)
	29 y 30 setiembre	16,5 (0,5)	34,9 (0,1)	25,6 (0,2)	18,2 (12,5)
5	24 y 25 marzo	17,4 (1,1)	34,9 (0,1)	25,2 (0,3)	11,1 (6,3)
	29 y 30 setiembre	15,4 (0,9)	34,9 (0,05)	25,8 (0,2)	24,4 (13,4)
10	24 y 25 marzo	16,1 (0,5)	35,0 (0,02)	25,7 (0,1)	15,1 (6,2)
	29 y 30 setiembre	14,5 (0,2)	35,0 (0,03)	26,1 (0,05)	17,5 (10,7)

Tabla 2.- Valores promedio por zonas de la TSM, SSM, y densidad potencial, en Bahía de Miraflores

Fecha	Estaciones	TSM (°C)	SSM (ups)	Densidad potencial (kg/m ³)
24-25 Marzo	De 1 a 8	21,4 (ZN, 0 m)	34,9 (ZN, 0 m)	24,5 (ZN, 0 m)
		17,8 (ZN, 5 m)	34,9 (ZN, 5 m)	25,2 (ZN, 5 m)
		16,6 (ZN, 10 m)	34,9 (ZN, 10 m)	25,2 (ZN, 10 m)
29-30 setiembre	De 1 a 8	16,7 (ZN, 0 m)	34,9 (ZN, 0 m)	25,6 (ZN, 0 m)
		15,9 (ZN, 5 m)	34,9 (ZN, 5 m)	26,0 (ZN, 5 m)
		14,9 (ZN, 10 m)	35,0 (ZN, 10 m)	26,0 (ZN, 10 m)
24-25 Marzo	De 9 a 23	20,8 (ZC, 0 m)	34,9 (ZC, 0 m)	24,4 (ZC, 0 m)
		17,8 (ZC, 5 m)	34,8 (ZC, 5 m)	25,0 (ZC, 5 m)
		16,2 (ZC, 10 m)	34,8 (ZC, 10 m)	25,0 (ZC, 10 m)
29-30 setiembre	De 9 a 23	16,4 (ZC, 0 m)	34,9 (ZC, 0 m)	25,7 (ZC, 0 m)
		15,5 (ZC, 5 m)	34,9 (ZC, 5 m)	26,1 (ZC, 5 m)
		14,5 (ZC, 10 m)	35,0 (ZC, 10 m)	26,1 (ZC, 10 m)
24-25 Marzo	De 24 a 32	18,6 (ZS, 0 m)	34,9 (ZS, 0 m)	24,6 (ZS, 0 m)
		16,3 (ZS, 5 m)	34,9 (ZS, 5 m)	25,6 (ZS, 5 m)
		15,6 (ZS, 10 m)	34,9 (ZS, 10 m)	25,6 (ZS, 10 m)
29-30 setiembre	De 24 a 32	16,3 (ZS, 0 m)	34,8 (ZS, 0 m)	25,6 (ZS, 0 m)
		15,1 (ZS, 5 m)	35,0 (ZS, 5 m)	26,1 (ZS, 5 m)
		14,4 (ZS, 10 m)	35,0 (ZS, 10 m)	26,1 (ZS, 10 m)

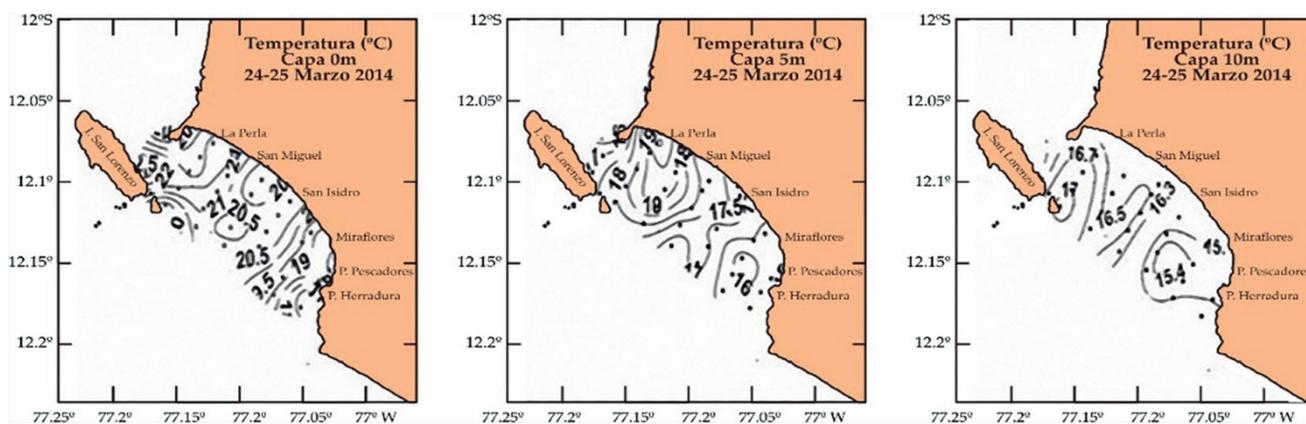


Figura 2.- Distribución superficial de la temperatura (°C) por niveles, 24-25 marzo 2014. Panel izquierdo capa superficial, panel central capa de 5 m y panel derecho capa de 10 m de profundidad

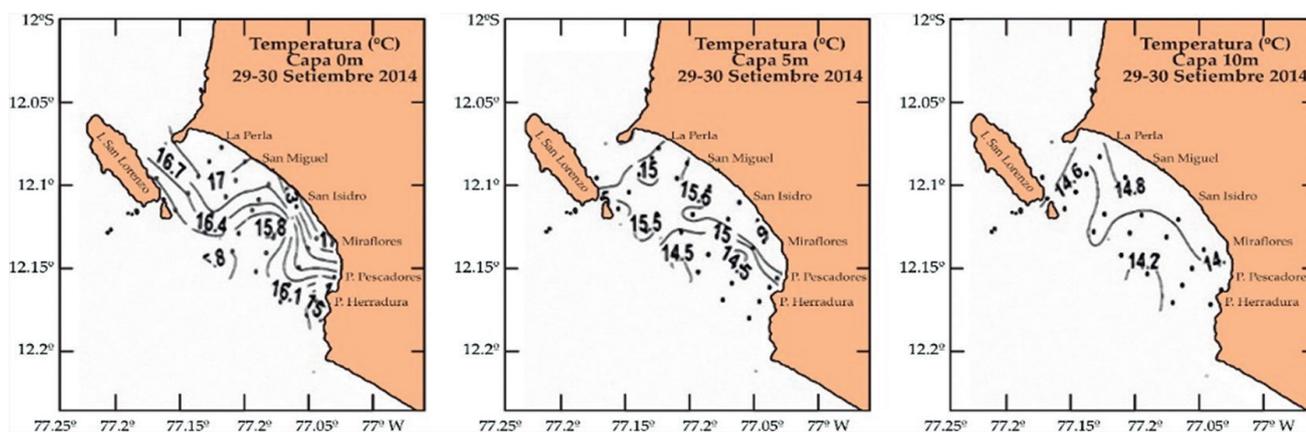


Figura 3.- Distribución superficial de la temperatura (°C) por niveles, 29-30 setiembre 2014. Panel izquierdo capa superficial, panel central capa de 5 m y panel derecho capa de 10 m de profundidad

En la Tabla 1, se muestran los valores medios y desviación estándar de la temperatura, salinidad, densidad potencial y corrientes marinas a 0 m, 5 m y 10 m de profundidad. En la Tabla 2, se muestran los valores promedio de la temperatura, salinidad, densidad potencial distribuidos por zonas (norte, centro y sur) y también por niveles.

En ambas prospecciones, se determinó las diferencias de temperatura en la columna de agua, así como una disminución gradual de temperatura de norte a sur, en cada capa.

Salinidad superficial (SS).- La salinidad en marzo registró en promedio 34,9 ups en superficie, aumentando a 35,0 ups hacia el fondo (nivel 10 m de profundidad); condiciones similares fueron

registradas en setiembre. Los rangos de variación en la superficie fueron de 0,2 ups en marzo y de 0,3 ups en setiembre (Tablas 1, 2; Figs. 4, 5).

Densidad Potencial (DP).- En marzo se registró la menor DP (σ_t) promedio de los dos monitoreos (24,1 kg/m^3). El promedio para superficie fue 24,5 kg/m^3 con una diferencia de 1,2 kg/m^3 entre el valor máximo y mínimo, mientras que, en setiembre, estos valores fueron 25,6 kg/m^3 y 1,4 kg/m^3 . Las diferencias entre ambas prospecciones se deben a mayor presencia de aguas frías de mayor densidad en setiembre respecto a lo encontrado en marzo. Se observó mayor gradiente vertical en marzo respecto a setiembre, con valores de 12×10^{-2} y 5×10^{-2} (kg/m^3)/m, respectivamente (Tablas 1, 2; Figs. 6, 7).

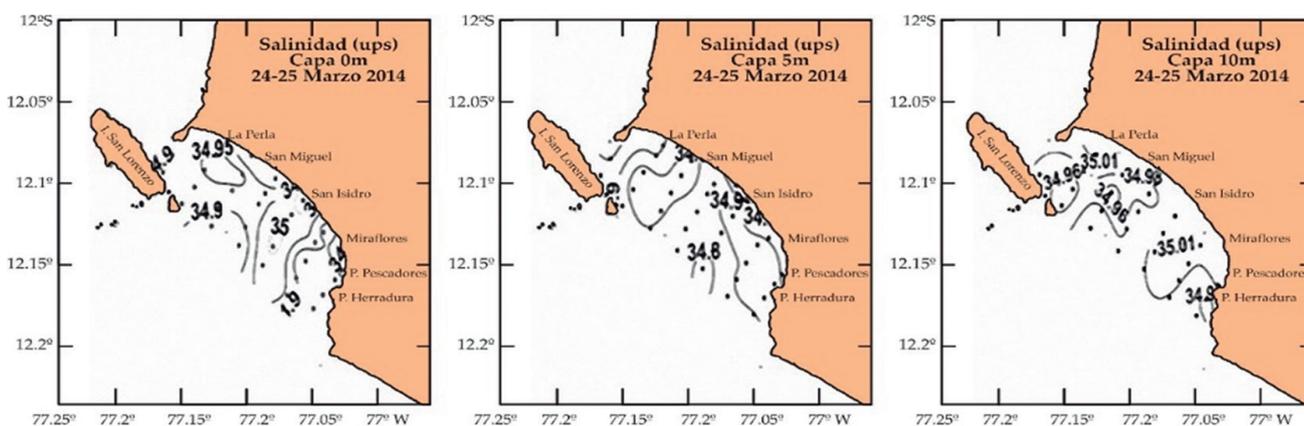


Figura 4.- Distribución superficial de salinidad (ups) por niveles, 24-25 marzo 2014. Panel izquierdo capa superficial, panel central capa de 5 m y panel derecho capa de 10 m de profundidad

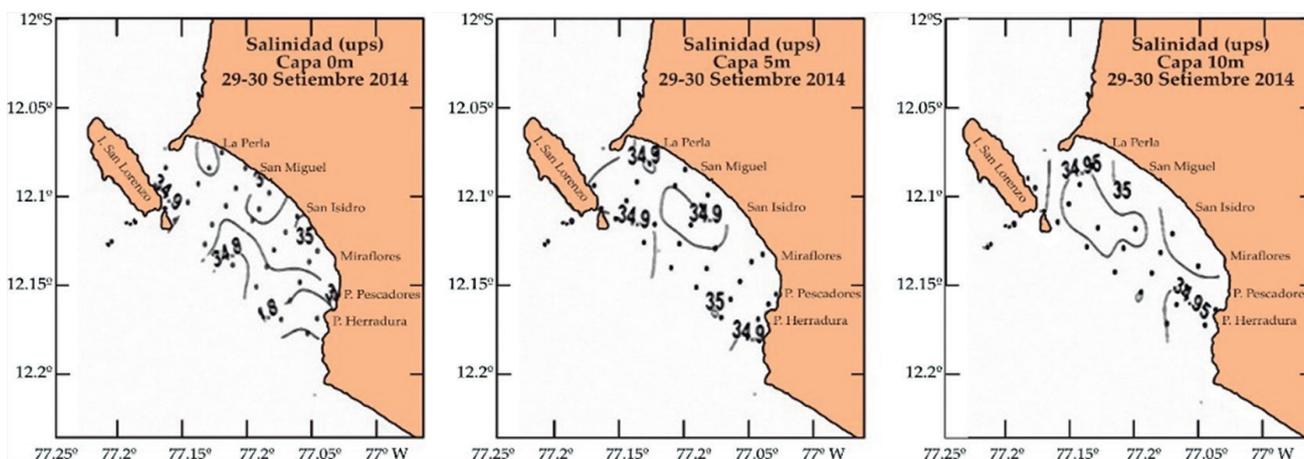


Figura 5.- Distribución superficial de la salinidad (ups), 29-30 setiembre 2014. Panel izquierdo capa superficial, panel central capa de 5 m y panel derecho capa de 10 m de profundidad

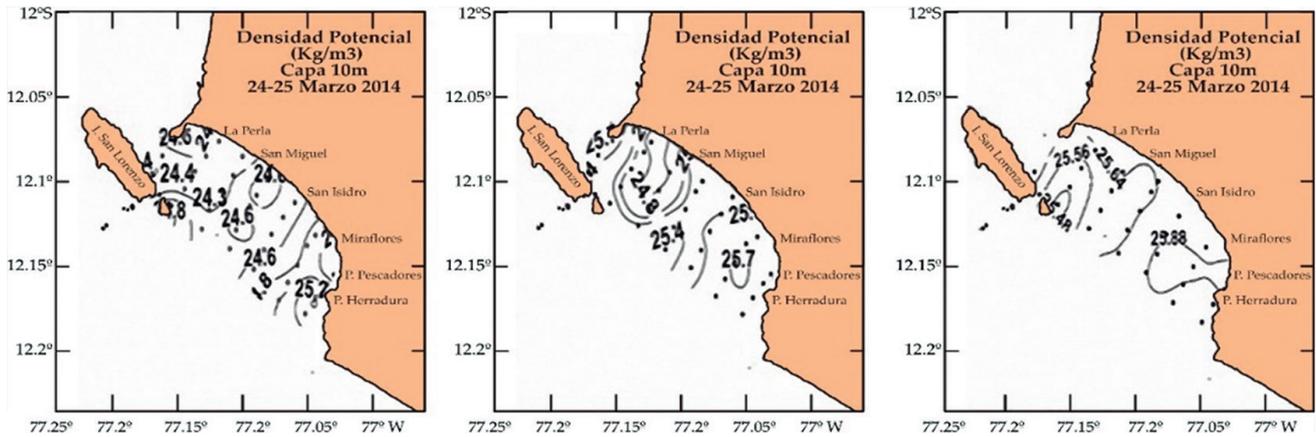


Figura 6.- Distribución superficial de la densidad potencial (kg/m^3), 24-25 marzo 2014. Panel izquierdo capa superficial, panel central capa de 5 m y panel derecho capa de 10 m de profundidad

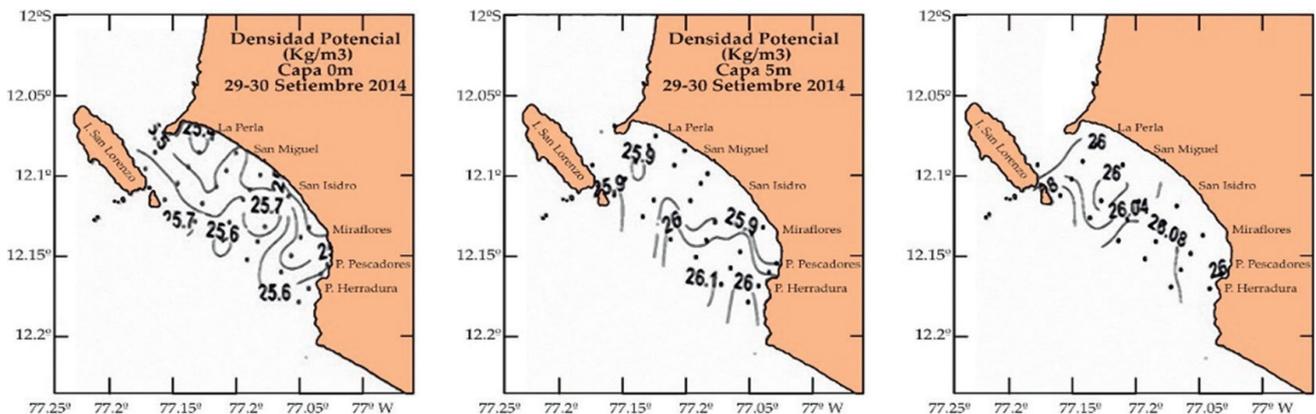


Figura 7.- Distribución superficial de la densidad potencial (kg/m^3), 29-30 setiembre, 2014. Panel izquierdo capa superficial, panel central capa de 5 m y panel derecho capa de 10 m de profundidad

Distribución vertical de propiedades físicas

Sección La Perla.- En marzo, las distribuciones verticales de temperatura potencial (TP), salinidad y DP mostraron dos capas diferenciadas, una estratificada sobre 8 m de profundidad y la otra homogénea por debajo de 8 m de profundidad. La DP en la primera capa (sobre los 8 m de profundidad) presentó variaciones entre 24,2 y 25,4 kg/m^3 , en cambio, por debajo de los 10 m, se encontró una capa homogénea de DP con valores alrededor de 25,5 kg/m^3 (Fig. 8). La TP varió entre 21,5 °C y 17,5 °C sobre 8 m, mientras que por debajo de 10 m se mantuvo constante en 17 °C. En la capa somera se determinaron altos valores de la Frecuencia de Brunt-Väisälä (hasta ~28 ciclos/h) (Fig. 10, panel superior izquierdo, línea color negro). Separada de esta capa superficial por la termoclina, se extendió una capa homogénea (debajo de los 10 m de profundidad).

En el caso de la salinidad, en la capa superficial (0 – 2 m) el valor fue 34,9 ups, disminuyendo en promedio a 34,85 ups sobre 6 m y luego a 34,9 ups debajo de 10 m, valor que se mantuvo homogéneo hasta el fondo, ~16 m de profundidad, (Fig. 8, panel superior central). En setiembre, la sección vertical mostró la presencia de aguas frías de mayor DP en comparación a marzo. La ausencia de fuertes gradientes verticales en las variables evaluadas sugiere mayores procesos de mezcla en la columna de agua, debido a menor insolación y mayor intensidad de vientos (por estacionalidad), lo cual se verifica al observar los bajos valores de la Frecuencia de Brunt-Väisälä (~16 ciclos/h) (Fig. 10, panel superior izquierdo, línea color azul).

Sección Playa Pescadores.- En marzo, la distribución de la TP reflejó la presencia dominante de aguas más frías y de mayor densidad respecto

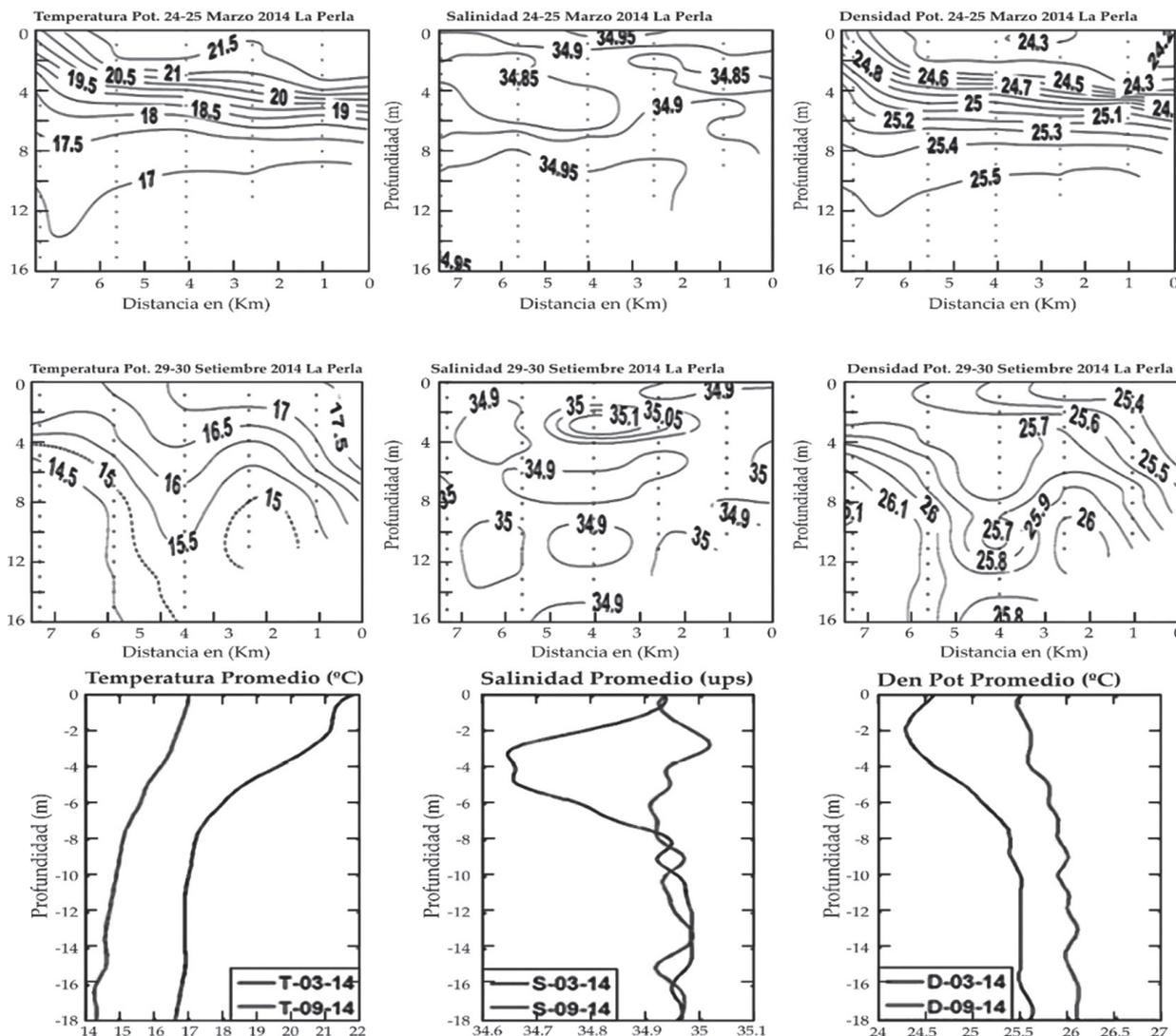


Figura 8.- Panel superior sección transversal frente a La Perla (zona norte), 24-25 marzo 2014. Izquierda temperatura potencial (°C), centro salinidad (ups) y derecha densidad potencial (kg/m³). Panel intermedio sección transversal frente a La Perla (zona norte), 29-30 setiembre 2014. Izquierda temperatura potencial (°C), centro salinidad (ups) y derecha densidad potencial (kg/m³) Panel inferior perfiles verticales promedio, línea de color negro 24-25 marzo, y línea de color azul 29-30 de setiembre, 2014, frente a la sección La Perla (zona norte). Izquierda temperatura potencial (°C), centro salinidad (ups) y derecha densidad potencial (kg/m³)

a la sección La Perla. A los 3 m de profundidad, la TP mostró estratificación débil, lo cual se comprobó al observar el valor que alcanzó la Frecuencia de Brunt Väisälä cerca de la superficie (~21 ciclos/h), que disminuye a ~15 ciclos/h a 5 m y a ~8 ciclos/h a 11 m (Fig. 10 panel inferior izquierdo, línea color negro). La distribución de salinidad en la columna de agua presentó valores mínimos próximos a costa y costa afuera sobre 4 m de profundidad. En la parte central las aguas fueron homogéneas en salinidad (34,9 ups) hasta 10 m de profundidad; por debajo de esta profundidad se encontró una capa homosalina de 35 ups en toda la sección. En la distribución

de la DP se apreció en la costa este, el ascenso de las isopicnas de 24,9 a 25,2 kg/m³, con una estratificación horizontal desde 4 m hasta ~10 m de profundidad; entre 10 y 24 m de profundidad, se registró una capa de mezcla homogénea de DP (25,8 kg/m³). En setiembre, la distribución térmica registró menores valores en comparación a marzo; la salinidad presentó variaciones mínimas sobre la capa de 10 m de profundidad; y debajo de estos 10 m se registró una capa homosalina. La distribución de la DP mostró en la zona central el ascenso de las isopicnas configurando una zona o una capa de mezcla homogénea con DP de 26,0 kg/m³ (Fig. 9).

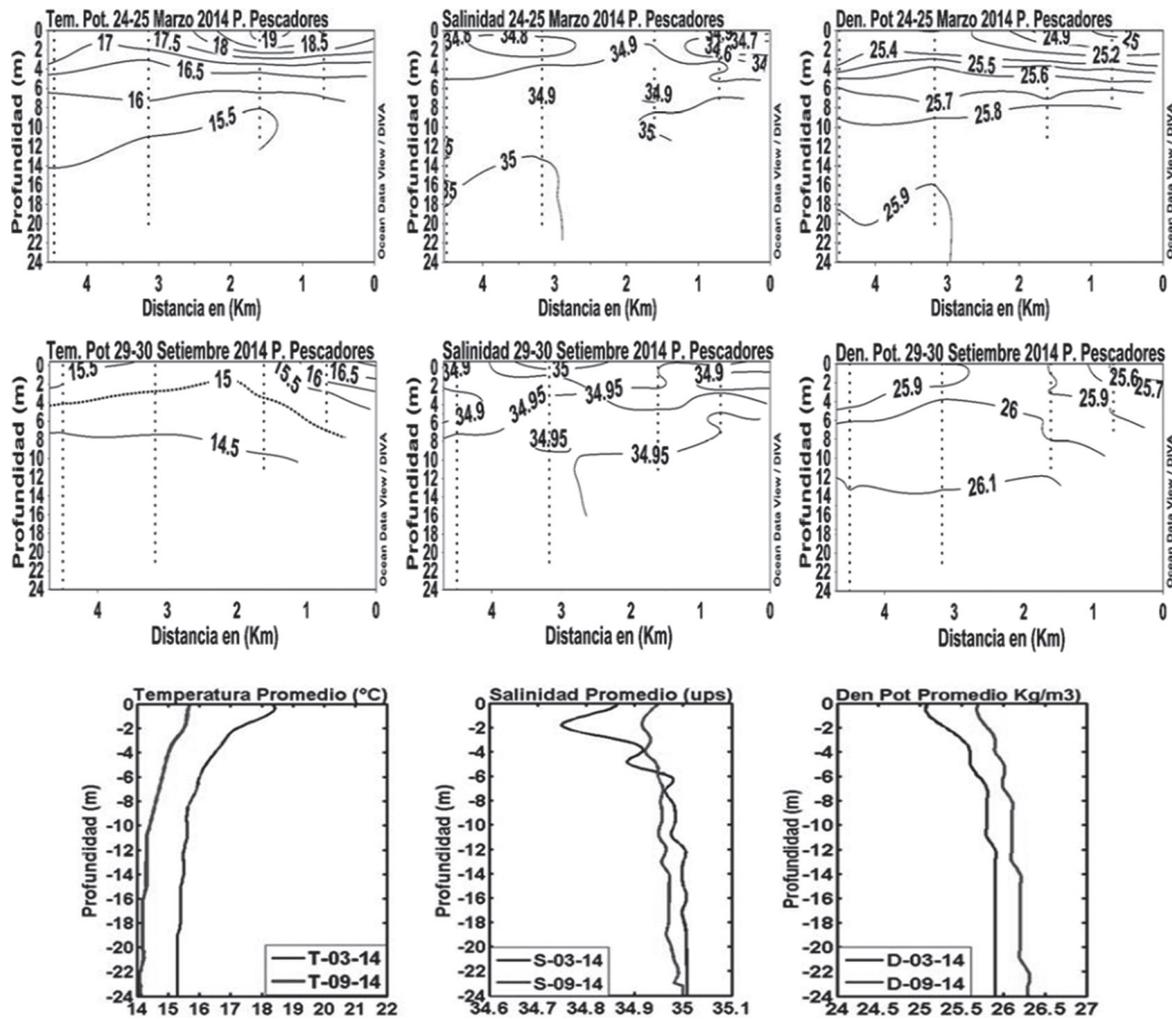


Figura 9.- Panel superior sección transversal frente a Playa Pescadores (zona sur), 24-25 marzo 2014. Izquierda temperatura potencial (°C), centro salinidad (ups) y derecha densidad potencial (kg/m³). Panel intermedio sección transversal frente a Playa Pescadores (zona sur), 29-30 setiembre 2014. Izquierda temperatura potencial (°C), centro salinidad (ups) y derecha densidad potencial (kg/m³). Panel inferior perfiles verticales promedio, línea color negro 24-25 marzo, y línea color azul 29-30 de setiembre 2014 frente a la sección Playa Pescadores (zona sur). Izquierda temperatura potencial (°C), centro salinidad (ups) y derecha densidad potencial (kg/m³)

Perfiles promedio de estratificación y vorticidad potencial

Sección La Perla.- La distribución de la TP durante el muestreo de marzo, (Fig. 8, panel inferior izquierdo, línea color negro), presentó una media de 17,9 °C, una termoclina sobre 8 m de profundidad y un gradiente de temperatura de 0,42 °C/m en los primeros 10 m de profundidad. Asimismo, se encontró un parámetro de estratificación Φ de 35,3 J/m³, un valor máximo (~27 ciclos/h) de Frecuencia de Brunt-Väisälä a 5 m de profundidad (Fig. 10, panel superior izquierdo, línea color negro) y una vorticidad potencial de $7 \times 10^3 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, (Fig. 10, panel superior derecho, línea color negro). El parámetro de estratificación Φ presentó alta variación sobre

la sección con menor valor de 26,5 J/m³ lejos de la costa (estación 7), incrementándose en la parte central a 36,8 J/m³ (estación 6), para luego disminuir a 27,0 J/m³ e incrementarse nuevamente a 30,9 J/m³ (estaciones 5 y 4, respectivamente). En el muestreo de setiembre (Fig. 8, panel inferior izquierdo, línea color azul), la TP en el perfil vertical registró un valor medio de 15,3 °C. No se identificó a la termoclina, en su lugar se observó una disminución gradual de la TP del orden de 0,2 °C/m. Los parámetros de estratificación, Frecuencia de Brunt-Väisälä y vorticidad potencial disminuyeron respecto a marzo, siendo los máximos 17,6 J/m³, ~16 ciclos/h y $2,5 \times 10^3 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, respectivamente (Fig. 10, panel derecho, línea color azul), localizados a 2 m de profundidad.

Durante el monitoreo de marzo 2014, se registró una salinidad media en la columna de 35,0 ups. La haloclina estuvo presente desde la superficie y 8 m de profundidad, con un gradiente halino de $0,03 \text{ m}^{-1}$ (Fig. 8, panel inferior central línea color negro). En setiembre la sección registró un valor promedio de salinidad de 35,0 ups, la estructura de la haloclina fue débil entre la superficie y los 5 m de profundidad y el gradiente halino fue de $0,01 \text{ m}^{-1}$ (Fig. 8, panel inferior central, línea color azul). En marzo, la distribución promedio de la DP reflejó una pincloina diferenciada entre 2 y 8 m de profundidad, con una media vertical de $25,2 \text{ kg/m}^3$ (Fig. 8, panel inferior derecho, línea color negro). En cambio, en setiembre, la distribución de la DP presentó una media vertical de $25,9 \text{ kg/m}^3$, ausencia de pincloina y una capa de mezcla de $\sim 4 \text{ m}$ de profundidad (Fig. 8, panel inferior derecho, línea color azul).

Sección Playa Pescadores.- Durante el monitoreo de marzo, (Fig. 9, panel inferior izquierdo, línea color negro), en el perfil vertical de TP la media fue $15,8 \text{ }^\circ\text{C}$, con presencia de una termoclina débil. El parámetro de estratificación Φ alcanzó $12,7 \text{ J/m}^3$ y se obtuvo un valor máximo de Frecuencia de Brunt-Väisälä de $\sim 21 \text{ ciclos/h}$ a los 3 m de profundidad y vorticidad potencial de $4 \times 10^3 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (Fig. 10, panel inferior izquierdo, línea color negro).

Asimismo, se puede apreciar un gradiente menor de temperatura ($0,25 \text{ }^\circ\text{C/m}$ en los primeros 10 m de profundidad) en comparación con la sección La Perla durante el mismo periodo de muestreo. El parámetro de estratificación Φ presentó una variación espacial alternada, ubicándose el valor menor ($10,9 \text{ J/m}^3$) en la estación 30 (costa afuera) y el máximo valor de ($19,6 \text{ J/m}^3$ en la estación 31. En el muestreo de setiembre (Fig. 9), panel inferior izquierdo línea color azul), la TP registró un valor medio de $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$ y ausencia de termoclina, presentándose sobre 2 m de profundidad y disminución gradual de la TP del orden de $0,12 \text{ }^\circ\text{C/m}$. El valor de estratificación registró el mismo valor del muestreo de marzo ($12,7 \text{ J/m}^3$), con disminución de la Frecuencia de Brunt-Väisälä a $\sim 10 \text{ ciclos/h}$ (Fig. 10, panel inferior izquierdo, línea color azul) y vorticidad potencial de $1,2 \times 10^3 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, (Fig. 10, panel inferior derecho, línea color azul), siendo los valores máximos registrados a 3 m de profundidad. En marzo, se registró un promedio de salinidad en la vertical de 35,0 ups, la haloclina se encontró entre la superficie y 6 m de profundidad, con gradiente halino de $0,02 \text{ m}^{-1}$ (Fig. 9, panel inferior central, línea color negro). Durante setiembre, se registró un promedio de 35,0 ups, la estructura vertical no mostró presencia de una haloclina definida, el gradiente halino disminuyó a $0,01 \text{ m}^{-1}$ (Fig. 9, panel inferior central, línea color azul) con cambios mínimos hacia el fondo.

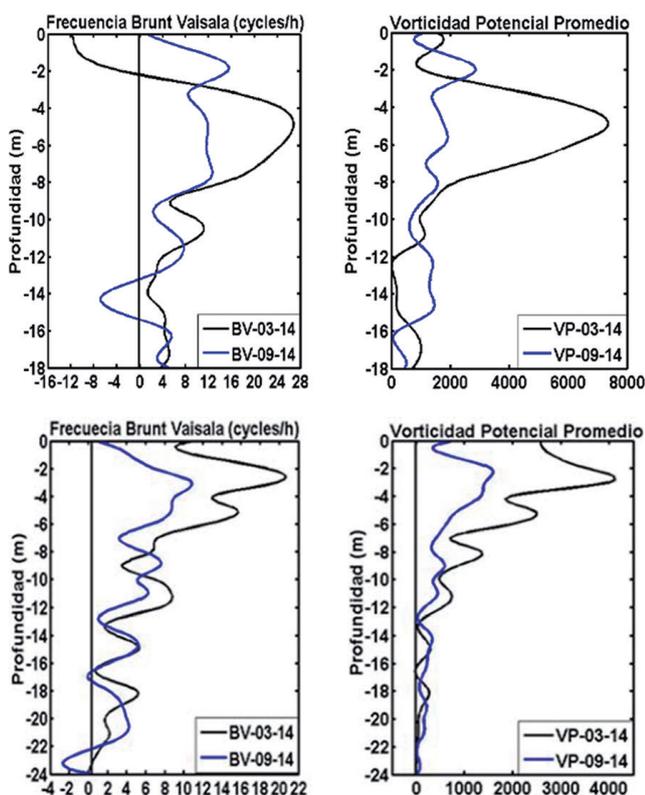


Figura 10.- Panel superior perfiles verticales promedio, color negro 24-25 marzo, 2014 y color azul 29-30 de setiembre 2014 frente a la sección La Perla (zona norte). Izquierda frecuencia de Brunt-Väisälä (cycles/h), y derecha vorticidad potencial ($1/\text{m}^2\text{s}^2$). Panel inferior perfiles verticales promedio, color negro 24-25 marzo, 2014 y color azul 29-30 de setiembre 2014, frente a la sección Playa Pescadores (zona sur). Izquierda frecuencia de Brunt-Väisälä (cycles/h), y derecha vorticidad

La distribución vertical de la DP (monitoreo de marzo) reflejó la presencia de una pincloina débil hasta 4 m de profundidad, con una media vertical de $25,8 \text{ kg/m}^3$, (Fig. 9, panel inferior derecho, línea color negro). En cambio, durante setiembre, la DP presentó media vertical de $26,0 \text{ kg/m}^3$, ausencia de pincloina y capa de mezcla de $\sim 2 \text{ m}$ de profundidad (Fig. 9, panel inferior derecho, línea color azul).

Series temporales de magnitud y dirección de vientos durante periodos de muestreo

La velocidad del viento para el periodo de muestreo (PM) del 24 y 25 de marzo varió entre 0,7 y 3,9 m/s; mientras que del 29 al 30 de setiembre varió entre 0,4 y 3,0 m/s, (Fig. 11). Para el PM de marzo (Fig. 11, serie color azul), los valores mínimos (> 1,0 y < 1,5 m/s) se registraron entre las 5:00–8:00 horas del día 24, y entre las 03:00 y 10:00 horas del 25 de marzo; notándose que ese mismo día se registró el mínimo valor puntual (0,7 m/s) a las 6:00 y a las 12:00 horas; los valores más altos (> 3,0 y < 3,9 m/s) se registraron entre las 15:00–21:00 horas. Durante el PM de setiembre (Fig. 11, serie color verde), los menores valores (> 1,0 y < 1,5 m/s) se registraron entre las 18:00–24:00 horas (30 de setiembre) y los mayores (> 2,5 y < 3,0 m/s) entre las 14:00 –16:00 horas del 30 de setiembre. Se observó que en horas de la tarde y noche se registraron las máximas intensidades tanto en marzo como en setiembre.

Índices costeros

Se preparó una serie temporal de ATSM con datos de temperatura superficial registrada en la estación fija Carpayo ubicada en coordenadas geográficas: 12,07°S y 77,14°W, (Fig. 1, bahía Miraflores), en función a los datos registrados en el periodo 2013–2015. En la Figura 12 se comparan la ATSM en la estación Carpayo y el índice LABCOS-Callao; en ambas series se muestran los ciclos de calentamiento y enfriamiento. Durante el muestreo de marzo se registraron condiciones cálidas en la estación fija Carpayo, sin embargo el índice LABCOS-Callao indicó condiciones neutras, en tanto, para setiembre las condiciones fueron frías en Carpayo y neutras

según el índice LABCOS; lo cual, sugiere que a pesar de encontrarse contiguas ambas bahías, la geomorfología de la línea de costa condiciona que los procesos en ambas bahías sean diferentes, con lo cual se corrobora que la variabilidad térmica en la estación fija Carpayo sea independiente de la estación costera Callao.

Distribución superficial de Corrientes Marinas (CMs) en marzo y setiembre 2014

En esta sección se comparan las estructuras de campos horizontales de velocidad a 1 m y 10 m de profundidad durante los muestreos de marzo y setiembre 2014. A nivel de 1 m de profundidad, en marzo los flujos variaron de 2,0 a 25,8 cm/s, con promedio de 13,9 cm/s; mientras que en setiembre variaron de 8,6 a 28,6 cm/s con promedio de 18,2 cm/s. A 10 m de profundidad, en marzo los flujos variaron de 4,4 a 25,8 cm/s con promedio de 15,1 cm/s; y en setiembre de 6,1 a 27,9 cm/s con promedio de 17,5 cm/s. En general, la intensidad promedio en ambas capas fue menor en marzo respecto a lo registrado en setiembre. Se registraron flujos que ingresan a la bahía por la zona sur (La Herradura y Miraflores), girando luego hacia fuera de la bahía frente a Chorrillos. Otros flujos se desplazaron al norte siguiendo la línea de costa para luego realizar giros anticiclónicos que convergen con giros ciclónicos frente al circuito de playas para dirigirse hacia fuera de la bahía; en la zona norte se presentaron flujos débiles sin una dirección predominante. En general los flujos estuvieron asociados a remolinos tanto ciclónicos como anticiclónicos, debidos posiblemente a: irregularidad en la frecuencia de los vientos, geomorfología de la línea de costa (La Punta) y presencia de islas en la zona norte.

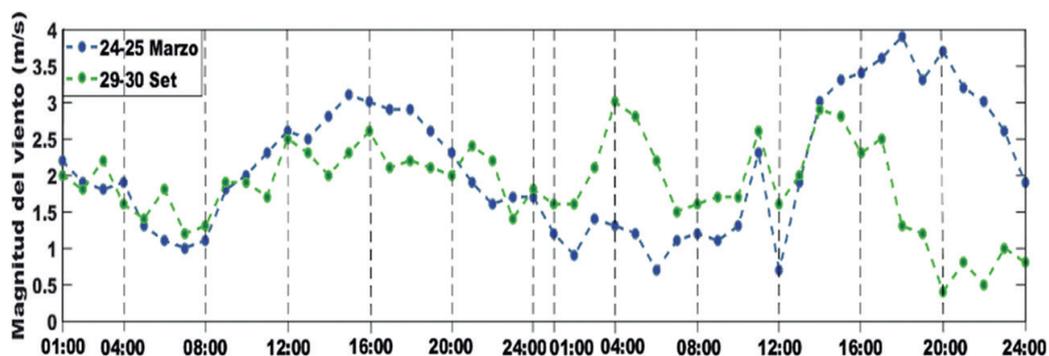


Figura 11.- Serie superpuesta, magnitud de vientos (m/s) en la Bahía de Miraflores Periodos de muestreo, 24-25 marzo, y 29-30 setiembre, 2014. Fuente Estación Meteorológica, IMARPE

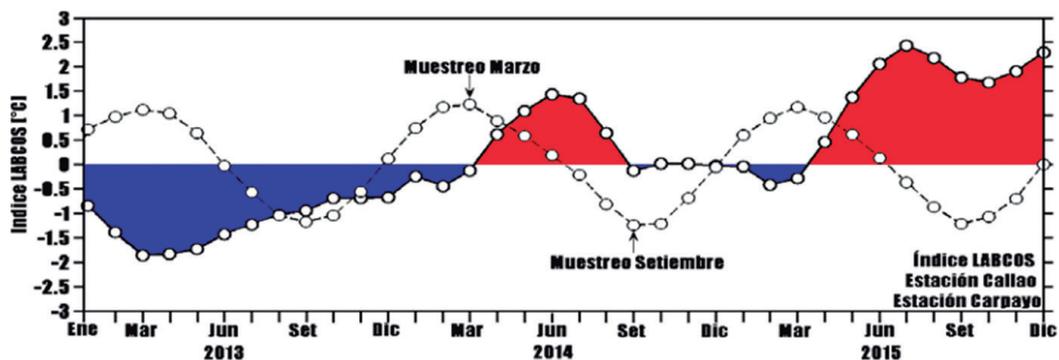


Figura 12.- Índice LABCOS calculado para la Estación Callao (Periodo 1976-2017), superpuesto la serie de la ATSM en Estación Fija Carpayo. Se muestra solo el periodo comprendido entre 2013-2015

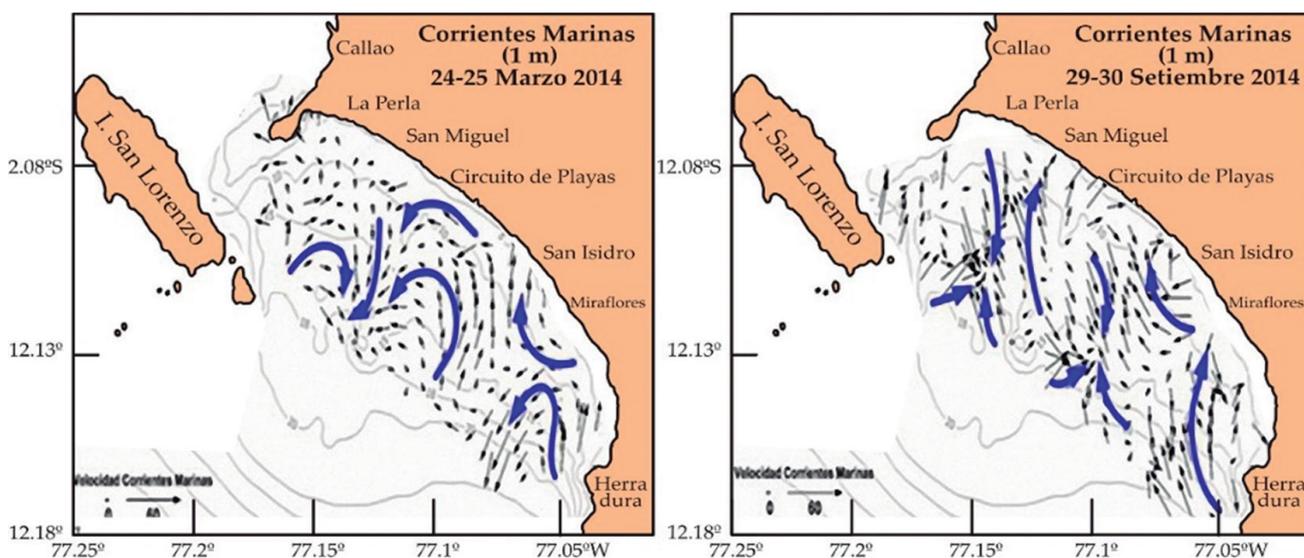


Figura 13.- Campos de velocidad horizontal (cm/s) en la Bahía de Miraflores, 2014. Capa de 1m de profundidad, 24-25 de marzo (izquierda) y 29-30 de setiembre (derecha)

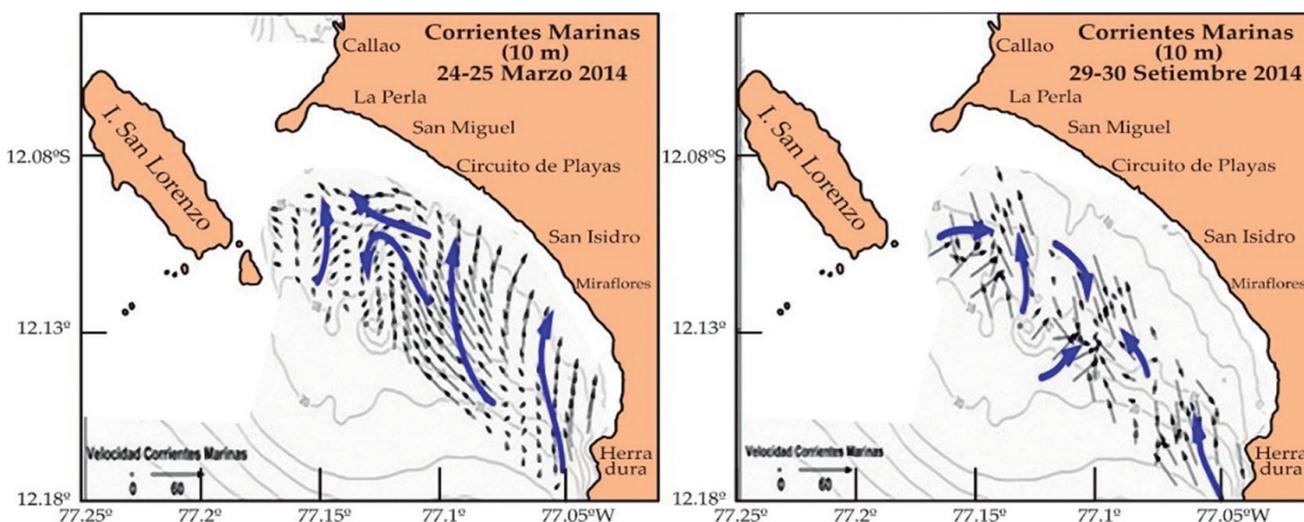


Figura 14.- Campos de velocidad horizontal (cm/s) en la Bahía de Miraflores, 2014. Capa de 10 m de profundidad, 24 y 25 marzo (izquierda) y 29 y 30 setiembre (derecha)

En cambio, a 10 m de profundidad el campo de flujos fue más homogéneo, ingresando los flujos por el sur, entre San Isidro y La Herradura, con dirección noreste (NE) posiblemente para dejar la bahía por la zona entre La Punta y la isla San Lorenzo, aunque frente al Circuito de Playas también se presentó un remolino anticiclónico. Por otro lado, la proyección de los flujos hacia la línea de costa y la disminución de la profundidad del fondo, provocaría que parte de estos flujos se desplacen hacia la superficie.

En setiembre, también el campo de velocidades en la capa superficial presentó muchos giros, resaltando dos zonas de convergencia, una frente a San Isidro y la otra frente a San Miguel (Fig. 13). A 10 m de profundidad, se observó un comportamiento similar a la capa superficial: ingreso de agua por el sur (flujos ingresando a la bahía) y zonas de convergencia frente a San Isidro y San Miguel. Por otro lado, también se determinó que los flujos en la capa de fondo fueron más intensos que en la capa superficial en promedio (Fig. 14).

4. DISCUSIÓN

La Tabla 3 muestra aspectos relevantes comparativos entre los dos muestreos realizados. En marzo de 2014, la condición estratificada y cálida, además de la disminución de la temperatura, salinidad y densidad con la profundidad dio origen a la presencia de termoclina, haloclina y picnoclina intensas. Esto refleja que las condiciones térmicas de las aguas en esta zona costera, se caracterizaron por registrar valores elevados, debido a la ausencia de afloramientos y al calentamiento superficial por radiación solar, conforme con lo reportado por SÁNCHEZ y DELGADO (1996).

Durante setiembre, el ascenso de las isothermas, isohalinas e isopicnas en la sección transversal La Perla y playa Pescadores, respondió a la presencia de aguas frías, menos saladas y más densas, transportadas a superficie por el afloramiento costero.

La concavidad de las isothermas, isohalinas e isopicnas en la zona central de la bahía en septiembre de 2014, con incidencia en la sección La Perla indican la posible existencia de un giro anticiclónico en la parte central. Los gradientes (longitudinal, latitudinal y en profundidad) de temperatura, salinidad y densidad en bahía Miraflores durante las condiciones estratificadas y cálidas, presentaron mayor intensidad en marzo que en septiembre 2014. Las homogeneidades de temperatura potencial, salinidad y densidad potencial registradas en la bahía durante setiembre 2014, fueron producidas por la menor radiación solar recibida, Los valores de FBV indicaron la importancia de la estratificación en la bahía.

Contribuyeron al mecanismo físico de la estratificación, el calentamiento con máximo valor del índice de estratificación calculado de 35,3 J/m³ en la sección La Perla y de 17,6 J/m³ en playa Pescadores en el monitoreo de marzo, valores que disminuyeron en setiembre notándose menor estratificación. El proceso de mezcla tuvo su origen esencialmente en los vientos y en los cambios térmicos. Se calculó la mezcla por el viento (usando la ecuación 2) resultando valores medios de 3*10⁻⁶ W/m³ en marzo y 5*10⁻⁶ W/m³ en setiembre, considerados de magnitud débil. Resultados similares fueron encontrados por OBESO (2003).

Tabla 3.- Comparación entre los valores característicos obtenidos durante los monitoreos de marzo y setiembre, 2014. Bahía Miraflores

Monitoreo	Vientos	Corrientes marinas	Radiación solar	Temperatura	Capa de mezcla	Estratificación
Marzo	Menores intensidades	Menores intensidades	Mayor insolación	Mayores valores	Mínima	Mayor
Setiembre	Mayores intensidades	Mayores intensidades	Menor insolación	Menores valores	Máxima	Menor

5. CONCLUSIONES

Los flujos de circulación más intensos en la bahía de Miraflores se localizaron en la zona sur, en tanto que en la zona norte fueron débiles, notándose la convergencia de flujos principalmente en la zona central de la bahía.

A nivel espacial, la bahía de Miraflores presenta condiciones térmicas diferenciadas entre la zona sur frente a playa Pescadores, de aguas de menor temperatura, y la zona norte frente a La Perla, de mayor temperatura, en ambos periodos de medición.

La BM varió de condiciones estratificadas y cálidas en marzo, a un medio homogéneo y frío en setiembre, debido a los cambios en la radiación solar entre ambos periodos de medición.

Durante el muestreo de setiembre las estructuras horizontales se presentaron con tres modos de transporte: a) flujos al norte frente a la Perla; b) entre San Miguel y Miraflores resaltan convergencias y divergencias por la interacción de flujos al norte, y c) al sur de Miraflores los flujos se caracterizaron por ser predominantes del sur ingresando por advección, siguiendo la línea de costa (SANAY & VALLE-LEVINSON, 2005).

En general, la variabilidad de las condiciones oceanográficas al exterior de la bahía controla la circulación interior de la BM, debido a que modifica el transporte y las corrientes formando giros por inestabilidades en la columna de agua.

Finalmente, se concluye que la distribución de la TP, S y DP en la BM difieren espacial y estacionalmente, producto de la radiación solar, estratificación por calentamiento, flujos de densidad y mezcla debido a la acción por viento.

Agradecimientos

Este trabajo fue parte del Proyecto Estudio integrado de los Procesos Físicos y Biogeoquímicos en ecosistemas de Borde Costero, con el objetivo de caracterizar procesos Físicos, Químicos y Biológicos en Ecosistemas del Borde Costero en áreas seleccionadas, con énfasis en la generación de las Floraciones Algales Nocivas (FAN), que estuvo inmerso en programa de Investigaciones en Oceanografía y Cambio Climático del Instituto del Mar.

6. REFERENCIAS

- BAKUN, A. (1973). Coastal Upwelling Indices, West coast of North America, 1946-71. NOAA Technical Report NMFS SSRF, 67, 103 p.
- BANNER, M. (1990). On the influence of the sea state on the winds stress. *Int. TOGA. Sc. Cont. Proc. WCRP.*, 43: 139-144.
- CHARNOCK, H. (1955). Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 81: 639-640.
- CHARNOCK, H. (1981). Air-sea interaction. In: B.A. Warren & C. Wunsch (eds.). *Evolution of physical oceanography*. MIT Press, Boston, Mass. pp. 482-503.
- CHENG, P., VALLE-LEVINSON, A., CD WINANT, C. D., PONTE, A. L. S., GUTIERREZ-VELASCO G., WINTERS, K. B. (2010). Upwelling-enhanced seasonal stratification in a semiarid bay. *Continental Shelf Research*, 30: 1241-1249.
- CORREA, D., TAM, J., PASAPERA, J., SAAVEDRA, M., INGUNZA, A. (2008). Modelado de la Circulación Marina y Descargas Hipotéticas en la Bahía del Callao-Perú. *Inf Inst Mar Perú*. 35(3): 181-192.
- DÁVILA, M., VALDÉS, J. (2015). Variabilidad temporal de las masas de agua costeras en la Bahía de San Jorge, Antofagasta, Chile 23°S (2008-2012). *Rev. de Biología Marina y Oceanografía*, 50(1): 61-80.
- MORÓN, O. (1994). Condiciones Oceanográficas de la Bahía del Callao, 1994. Proyecto CORDE-CALLAO. Área de Interacción Océano Recurso. Inf. Instituto del Mar del Perú-Callao.
- OBESO, M. (2003). Variabilidad espacio temporal de las condiciones oceanográficas de la Bahía de la Paz, BCS, México. Tesis Doctoral, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN, La Paz, Baja California Sur, 337 pp.
- OBESO, M., GAVIÑO, J., OBESO, H. (2012). Variabilidad espacial y estacional de temperatura, salinidad y densidad en Bahía de Concepción, Golfo de California, México. *Rev. De Biología Marina y Oceanografía*, 47(3): 489-502.
- PLATA, L., FILONOV, A. (2007). Marea interna en la parte noroeste de la Bahía de Banderas, México. *Ciencias Marinas*, 33(2): 197-215.
- PORTO, M., BRANCO, S., LUCA, S. (1991). Caracterización de Calidad de Agua. En: Porto, R. L. L.; Branco, S.; Cleary, R. et al. *Hidrología Ambiental*. v.3. Sao Paulo: Edusp: Asociación Brasileira de Recursos Hídricos.
- QUISPE, J., VÁSQUEZ, L. (2015). Índice "LABCOS" para la Caracterización de eventos El Niño y La Niña frente a la costa del Perú. *Boletín Trimestral Oceanográfico*, Vol. 1, N°1-4.
- SANAY, R., VALLE-LEVINSON, A. (2005). Wind-induced circulation in semienclosed homogeneous, rotating basins. *J. Phys. Oceanogr.*, 35(12), 2520 - 2531, doi:10.1175/JPO2831.1.
- SÁNCHEZ, S., DELGADO, E. (1996). Mareas Rojas en el Área del Callao (12°S) 1980-1995. Área de Fitoplancton y Productividad Primaria, Dirección de Oceanografía Biológica. Informe Progresivo, Inst Mar Perú. N° 44.

- SIMPSON, J. H., HUNTER, J. R. (1974). Fronts in the Irish Sea. *Nature*, 250, 404-406.
- SIMPSON, J. H. (1981). The shelf sea front: implication of their existence and behavior. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 302: 531-546.
- SIMPSON, J. H., BROWN, J., MATTHEWS, J., *et al.* (1990). Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification
- ZUTA, S., GUILLÉN, O. (1970). Oceanografía de las aguas costeras del Perú. *Bol Inst Mar Perú*. 2(5): 157-324.