VALIDACIÓN DEL PRODUCTO GLORYS12V1 (*MERCATOR OCEAN*) PARA MONITOREO DE TEMPERATURA Y SALINIDAD DEL MAR PERUANO

VALIDATION OF THE GLORYS12V1 PRODUCT (MERCATOR OCEAN) FOR MONITORING SEA SURFACE TEMPERATURE AND SALINITY IN THE PERUVIAN SEA

Carlos Quispe-Ccalluari[1] *Daniel Quispe Ramos*[1]

RESUMEN

Quispe-Ccalluari, C. & Quispe Ramos, D. (2025). Validación del producto Glorys12v1 (Mercator Ocean) para monitoreo de temperatura y salinidad del mar peruano. Inf Inst Mar Perú, 52(1), 52-68.- El área del Ecosistema de Afloramiento Peruano (EAP) situada en el borde oriental del Pacifico Tropical, es frecuentemente impactado por forzantes remotos como por ejemplo la variabilidad de la dinámica del Pacífico ecuatorial, entre otros. Debido a la alta productividad del EAP y su aporte al sector pesquero peruano, es necesario contar con herramientas que puedan complementar el esfuerzo observacional del Imarpe en recopilar información oceanográfica. *Mercator Ocean* ofrece un producto oceanográfico de acceso libre para el monitoreo de las condiciones oceanográficas, pero es necesario validar dicha información. Mediante una comparación climatológica y multianual del producto de *Mercator Ocean* y la información *in situ* de cruceros del Imarpe, se concluye que la temperatura del mar simulado por *Mercator Ocean* tiene buen desempeño, climatológicamente con algunos sesgos en la franja costera. Sin embargo, en la salinidad del mar simulado por *Mercator Ocean*, el desempeño es menor en la región costa norte y centro, por lo que se sugiere corregir la concentración de salinidad superficial del mar a través de métodos estadísticos.

Palabras clave: validación, *Mercator Ocean*, temperatura, salinidad, mar peruano

ABSTRACT

Quispe-Ccalluari, C. & Quispe Ramos, D. (2025). Validation of the Glorys12v1 product (Mercator Ocean) for monitoring sea surface temperature and salinity in the Peruvian sea. Inf Inst Mar Perú, 52(1), 52-68.- The Peruvian Upwelling Ecosystem (PUE), positioned along the eastern boundary of the Tropical Pacific, is frequently influenced by remote forcing mechanisms, including variability in equatorial Pacific dynamics. Given its high productivity and significant contribution to Peru's fisheries sector, it is crucial to develop tools that enhance Imarpe's observational efforts in collecting oceanographic data. Mercator Ocean provides an open-access oceanographic product for monitoring ocean conditions; however, its accuracy requires thorough validation. A climatological and multi-year comparison between Mercator Ocean's outputs and *in situ* data from Imarpe research cruises reveals that the simulated sea temperature generally performs well, though with some coastal biases. In contrast, simulated sea salinity exhibits lower accuracy, particularly in the northern and central coastal regions. To improve reliability, statistical corrections to surface salinity concentrations are recommended.

Keywords: validation, Mercator Ocean, temperature, salinity, Peruvian sea

1. INTRODUCCIÓN

El Ecosistema de Afloramiento Peruano (EAP), situado en el borde oriental del Océano Pacifico Tropical, es uno de los ecosistemas marinos más productivos del mundo (Chavez *et al.*, 2008) debido al afloramiento costero de aguas frías subsuperficiales y ricas en nutrientes. Esta área por su ubicación geográfica, cerca al ecuador, está influenciada localmente por la interacción aire- mar-tierra y de manera remota por la dinámica del Pacifico Ecuatorial entre ellas El Niño- Oscilación Sur (ENOS) y las Ondas Kelvin Ecuatoriales que tienen importantes impactos en el EAP y en el sector socio-económico del Perú. Por tal motivo es necesario un monitoreo constante del área del EAP.

La plataforma virtual del CMEMS (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*), pone a disponibilidad información procesada y organizada procedente del MOI (*Mercator Ocean International*), [https://www.mercator-ocean.fr/], cuya organización a su vez provee información agrupando tres tipos de datos

1 Instituto del Mar del Perú, DGIOCC, cquispe@imarpe.gob.pe

(satelital, *in situ* y modelos). Lellouche *et al.* (2013) indican que el sistema operacional de análisis y pronóstico *Mercator Global Ocean* brinda información científica que permite enfocar un monitoreo sobre las condiciones oceanográficas a escala global, regional e incluso local, con una resolución temporal diaria, con los cuales se podrían generar subproductos que facilitarían el entendimiento de la sociedad en general.

Por lo tanto, es necesario conocer si el producto del sistema operacional de *Mercator Ocean*, reproduce bien los parámetros físicos como la temperatura y salinidad superficiales en el mar peruano, y con ese fin el presente trabajo tiene el objetivo general de validar el producto del sistema de simulación *Mercator Ocean* con datos recopilados por el Imarpe respecto a la temperatura y salinidad en el mar peruano. Los dos objetivos específicos son: (a) realizar una comparación climatológica entre el modelo de *Mercator Ocean* y la base climatológica del Imarpe respecto a la temperatura y salinidad del mar y, (b) realizar una comparación multianual entre el modelo de *Mercator Ocean* y los datos *in situ* registrados por el Imarpe respecto a la temperatura y salinidad del mar.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

a) Datos de registro *in situ* de salinidad y temperatura del mar

El estudio abarcó el área frente a la costa peruana dentro de las 200 mn y al este de 90°W.

Para la validación multianual, se usaron los registros superficiales *in situ* de salinidad (SSM) y temperatura del mar (TSM) obtenidos de cruceros y operaciones oceanográficas a bordo de buques de investigación científica, conducidas por el Imarpe del 2007 al 2019 (12 años) (Figs. 1, 2). En superficie la salinidad fue determinada por equipos portasal GuildLine modelo 8410a, mientras que los registros de temperatura proceden de termómetros de mercurio y sensores térmicos instalados en el casco de los buques, en intervalos de 10 a 20 mn de distancia, durante el trayecto de las operaciones en el mar. Los registros de salinidad y temperatura en sub-superficie o columna de agua proceden de equipos CTD modelo SBE 19plus, los cuales por lo general fueron desplegados hasta 500 m de profundidad, en estaciones que forman secciones perpendiculares a la línea de costa, en zonas habituales de monitoreo de la costa peruana y en secciones de mayor frecuencia temporal.

Para la validación climatológica, se usó una interpolación de la base de datos de perfiles de salinidad y temperatura del Imarpe con perfiles históricos *in situ* para el periodo 1993-2015 (22 años).

b) Datos simulados

Para la validación multianual, se usó la salinidad y temperatura del mar simuladas correspondientes al modelo "GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030", que es un producto del sistema global de análisis y pronóstico de alta resolución PSY4V3R1, sobre un dominio global a una resolución espacial regular de 1/12°, con 50 niveles en la vertical interpolados del modelo de grilla nativa Arakawa C. Incluye el modelo NEMO 3.1, forzantes atmosféricos de ECMWF, esquema de asimilación SAM2 y observaciones asimiladas de SST OSTIA CMEMS, CMEMS *Sea Ice concentration*, CMEMS SLA, perfiles *in situ* del CMEMS database, MDT ajustado, posee climatología WOA 2013 (temperatura y salinidad) debajo de los 2000 m, en condiciones iniciales de Levitus (2009) y batimetría de ETOPO1 y GEBCO8 (Lellouche *et al.*, 2016)

Para la validación climatológica se usó la temperatura y salinidad del mar simuladas correspondiente al producto " GLOBAL-REANALYSIS-PHY-001-025", referidos también como GLORYS2V4, que es un producto de reanálisis global del océano con una resolución horizontal de 1/4°, con 75 niveles verticales forzados con ERA-Interim y cubren el periodo 1993-2015 (https://resources.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-GLO-PUM-001-025-011- 017.pdf). Se calculó una climatología de temperatura y salinidad superficial del mar con periodo base 1993-2015.

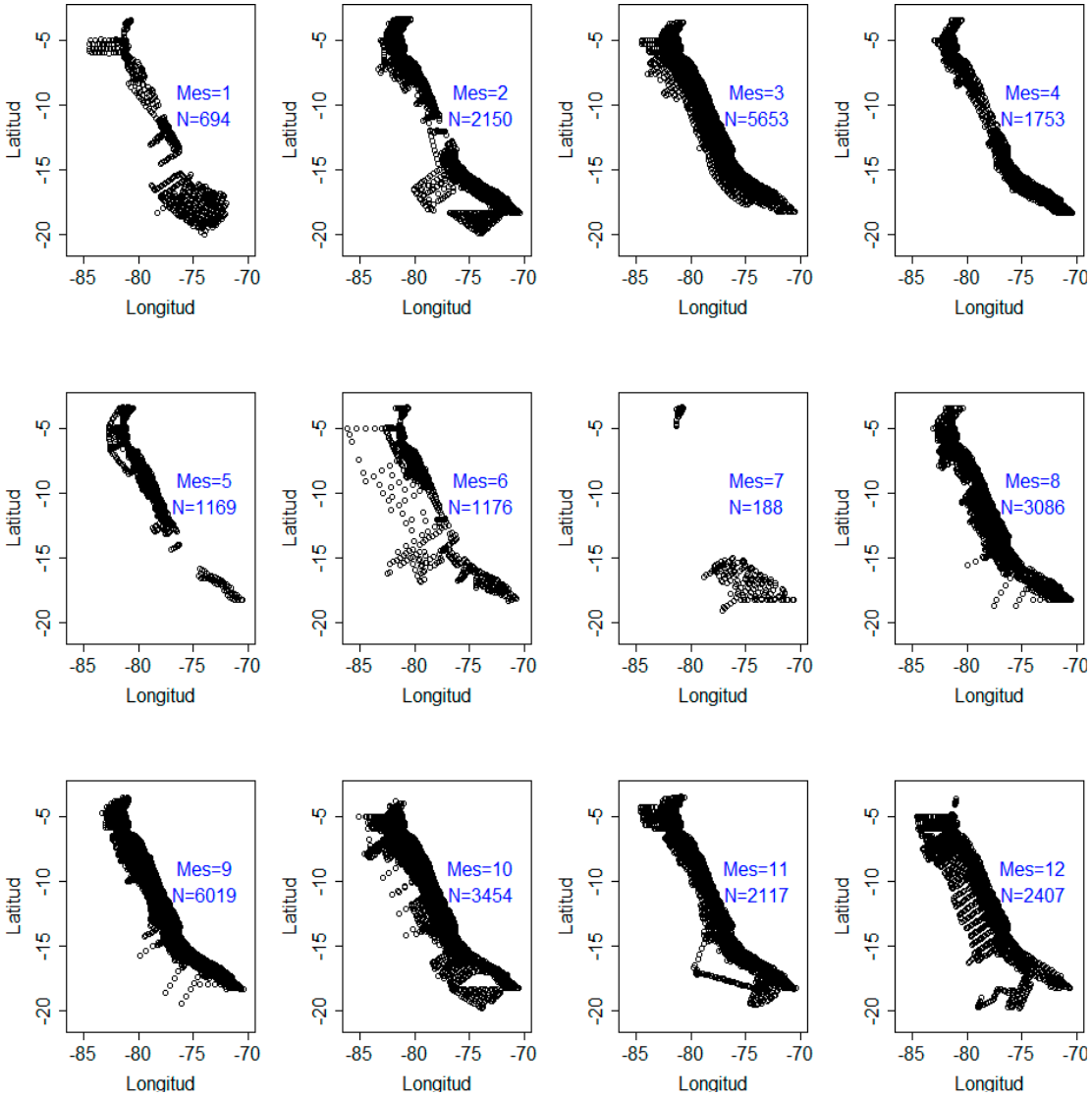

Figura 1.- Salinidad superficial del mar: ubicación de puntos de registro coincidentes con el modelo de *Mercator Ocean* por meses, en los cruceros del 2007 al 2019

Metodología

Tratamiento multianual para el nivel de superficie

Para la validación multianual de la salinidad y temperatura superficial del mar, se realizaron trabajos preliminares en la adecuación de los datos de cruceros, que consiste en: (i) estandarización de los registros de campo y verificación de la consistencia de datos de cruceros, (ii) extracción de puntos coincidentes en latitud y longitud entre los datos superficiales de cruceros y los datos del producto de *Mercator*.

Una vez procesados los datos, se tuvo 29866 puntos coincidentes de SSM y 24864 puntos coincidentes de TSM, desde la línea de costa hasta 150 mn aproximadamente mar afuera.

Para el análisis de los errores, se calculó el error entre datos SSM *in situ* y Modelo, así como para la TSM, de la siguiente manera: Error SSM =SSM Mercator - SSM *in situ* y Error TSM =TSM Mercator - TSM *in situ*. Los valores de los errores variarán entre positivos y negativos, de modo que los valores negativos indicarán, por ejemplo, que la SSM Mercator está por debajo de los valores SSM *in situ* (subestimación), mientras que valores positivos indicarán que la SSM Mercator está por encima de los valores de SSM *in situ* (sobreestimación).

Se empleó un diagrama de cajas para los errores (no mostrado) con el fin de identificar puntos considerados errores extremos (outliers) que sean mayores al corte superior o menores al cor-

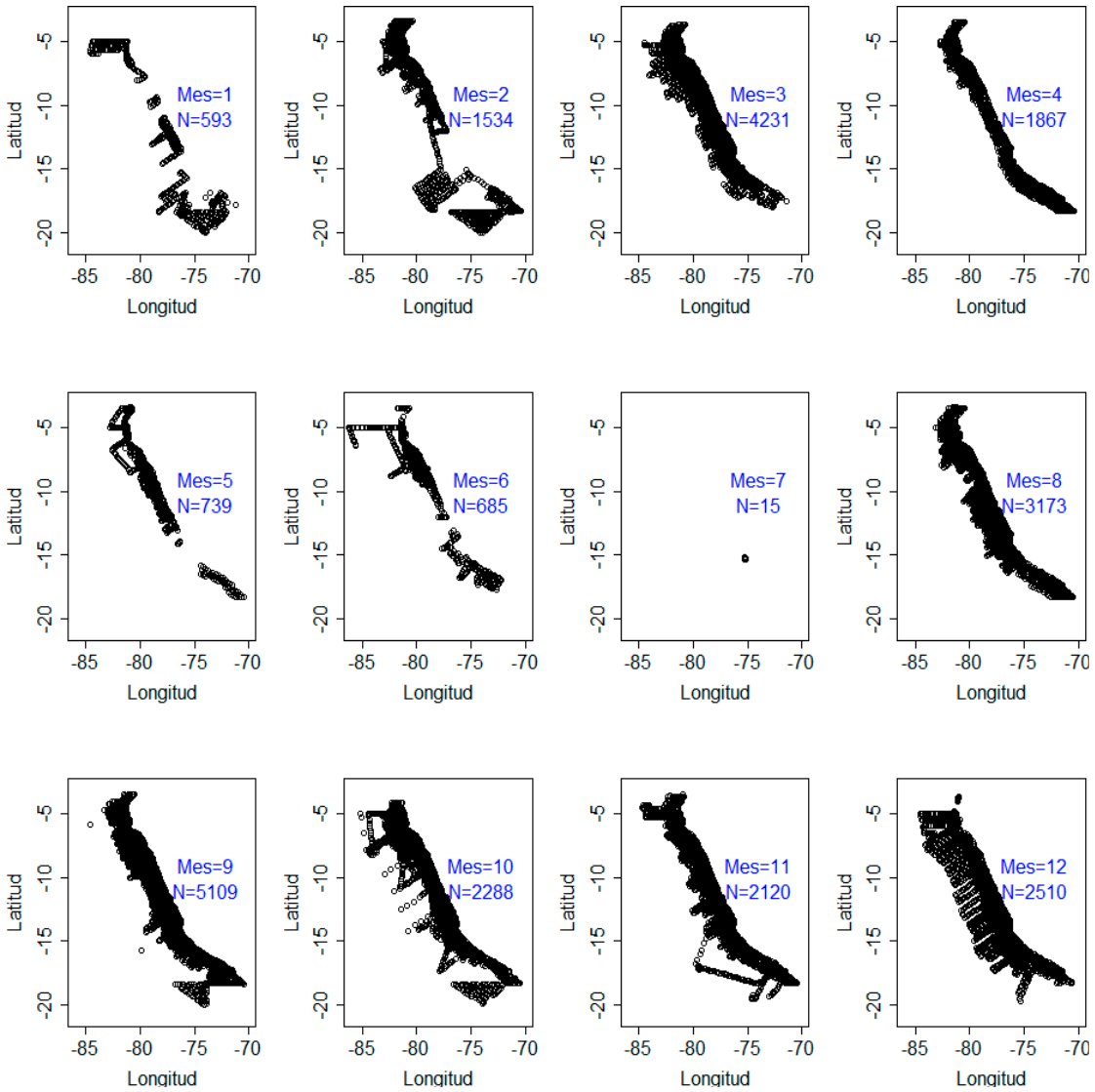

Figura 2.- Temperatura superficial del mar: ubicación de puntos de registro coincidentes con el modelo de *Mercator Ocean* por meses, en los cruceros del 2007 al 2019

te inferior de un diagrama de caja. Los valores de errores negativos que sean menores al corte inferior del diagrama de cajas indican que las simulaciones de *Mercator* están muy debajo del valor observado (subestimación), mientras que los valores de errores positivos que superan el corte superior del diagrama de cajas indican que las simulaciones están muy encima del valor observado (sobreestimación).

Tratamiento multianual para el nivel de subsuperficie

El conjunto de pares coincidentes de data CTD-*Mercator*, fue sometido a una evaluación preliminar encontrándose presencia de datos atípicos en los registros *in situ*. En una primera etapa, se tamizó en base a medianas la diferencia entre cada perfil de salinidad de CTD- *Mercator*, donde la resolución de cada perfil fue a cada metro. Las medianas fueron evaluadas en un diagrama de cajas. Tomando como referencia los límites superior e inferior, se optó considerar en el estudio todos los pares que presentaran diferencias en la mediana menores a 0,2 ups, permitiendo excluir aproximadamente a 4,5% de pares de perfiles no aptos.

Posteriormente, en base al conjunto de datos de salinidad *in situ* seleccionando registros a profundidades determinadas por el modelo menor a 500 m, se procedió a excluir pares de datos de valores atípicos (*outliers)*, identificando el límite superior e inferior de los valores extremos de la

salinidad *in situ*, correspondiendo estos valores al umbral entre 32,55 y 35,59 con los cuales se generó un nuevo set de datos. En un subsiguiente paso, se optó por explorar la relación en zonas clasificadas de la siguiente manera: Distancia a la costa: 0-30 mn, 30-100 mn (costero – oceánico), Latitudes: 3° - 6S°, 6° - 10S°, 10° - 14°S, 14° - 19° S, Capas: 0 – 10, 10 – 50, 50 – 200, 200 – 500 m.

Indicadores de Validación

Se calcularon los resúmenes de errores, desviación media absoluta (MAD), Raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE), error porcentual medio (MPE) y la correlación de Pearson entre el valor observado y simulado.

Para la validación también se empleó el Diagrama de Taylor (Taylor, 2001) que proporciona un resumen estadístico del rendimiento de los métodos de complementación de datos de TSM, en términos del coeficiente de correlación, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar. Con este fin, se dividió en ocho áreas: cuatro áreas costeras y cuatro áreas oceánicas.

Las áreas costeras se consideraron dentro de las 30 mn hacia la costa (0-30 mn): área 1 (3° - 6°S), área 3 (6° - 10°S), área 5 (10° - 14°S) y área 7 (14° - 19°S). Las áreas oceánicas, respetadas entre 40 mn y 150 mn (costero-oceánico) fueron: área 2 (3° - 6°S), área 4 (6° - 10°S), área 6 (10° - 14°S) y área 8 (14° - 19°S).

3. RESULTADOS

Comparación entre simulaciones de *Mercator Ocean* y registros *in situ*

Salinidad superficial del mar

Una comparación de mapas climatológicos mensuales (base climatológica: 1993-2015) entre datos del modelo y registros *in situ*, muestra la diferencia entre estas dos informaciones en la tercera columna de la Figura 3, en la que resaltan las mayores diferencias en la zona norte de Perú, asociado a la influencia de las aguas ecuatoriales, ya que la climatología basada en el modelo presentó bajos valores en la zona ecuatorial. Además, de enero a abril se observa que la data del modelo subestima los valores de la data observada desde la latitud 10°S, aproximadamente, hasta la línea ecuatorial con diferencias superiores a 0,2 ups, principalmente en las zonas costeras. Mientras que, de mayo a setiembre, los datos del modelo subestiman los datos observados, aproximadamente desde 4°S hasta la línea ecuatorial. Para octubre, noviembre y diciembre, los datos del modelo subestiman los valores observados, aproximadamente desde 6°S hasta la línea ecuatorial.

El análisis de correlación entre la SSM basada en el modelo y los registros *in situ*, mostraron una distribución espacial positiva en casi todo el dominio, principalmente en la zona costa norte-centro, dentro de las 100 mn desde 4°S hasta 11°S, así como en zonas oceánicas frente a la zona centro sur de Perú, lo que muestra que los ciclos anuales en casi todo el dominio están en fase (Fig. 4a). Sin embargo, también se observó áreas de correlación negativa, distribuidas en zonas costeras de la costa sur de Perú, desde Ilo hasta Pisco, así como también en zonas oceánicas frente a Salaverry, llegando a detectarse alrededor de los 10°S y 85°W, lo que indicaría zonas con características opuestas a la variación climatológica mensual. La distribución espacial de la desviación media absoluta (MAD) (Fig. 4b), mostraron que, al norte de 5° S, se presentan zonas con valores altos de desviación con respecto a la climatología observada, indicando mayores diferencias entre los datos climatológicos del modelo y los valores observados que superan a 0,6 ups, mientras que, al sur de los 5°S, los valores del MAD son bajos. Cabe señalar, la distribución espacial del PME (Fig. 4c), indica que al norte de 4°S existe una clara subestimación de la climatología de la SSM.

Temperatura superficial del mar

La comparación de mapas climatológicos mensuales de temperatura en superficie con datos modelados y registrados *in situ* entre 1993-2015, la diferencia entre estas dos informaciones se muestra en la tercera columna de la Figura 5, y muestra que el patrón climatológico mensual generado a partir de modelos, presentó valores por arriba de lo registrado durante la primavera y el verano austral, además se resalta que las mayores diferencias se presentan en la zona norte de Perú, asociado posiblemente a la influencia de las aguas ecuatoriales. Asimismo, en la figura 5, se muestra que el producto de Mercator tuvo errores de estimación entre el rango de -1,5 °C y +1,9 °C.

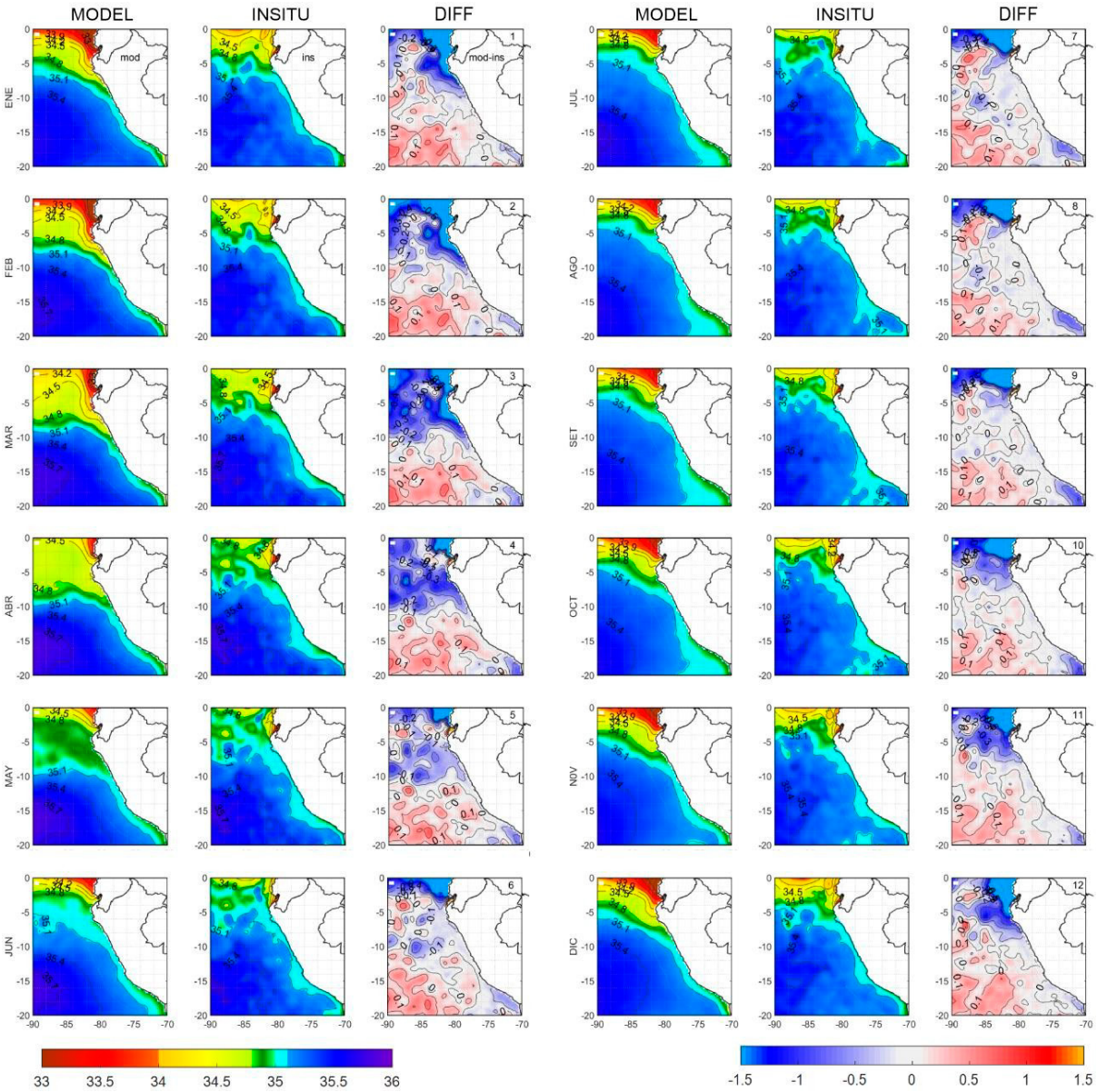

Figura 3.- Mapas climatológicos mensuales de SSM del modelo e *in situ* y la diferencia de mapas en ups. Periodo 1993-2015

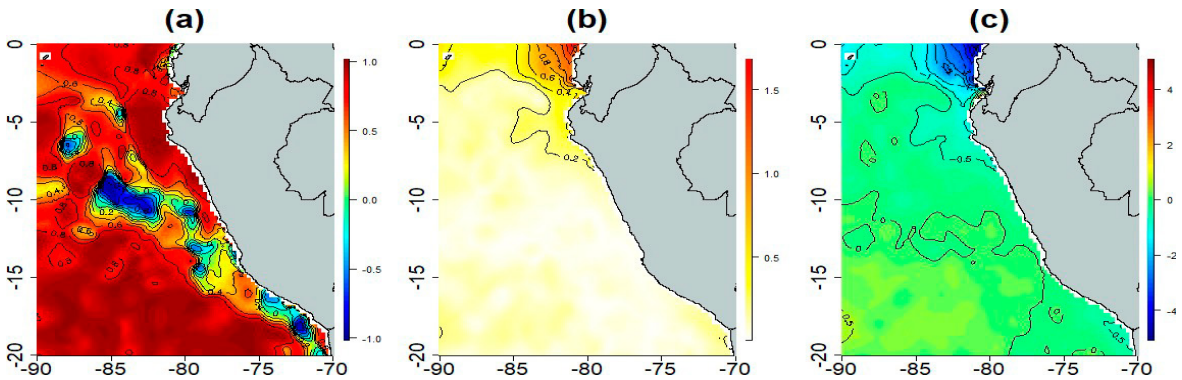

Figura 4.- Mapa de (a) correlación (b) desviación media absoluta (MAD) en ups y (c) error porcentual medio (MPE) entre la climatología simulada y observada de la SSM. Periodo base 1993-2015

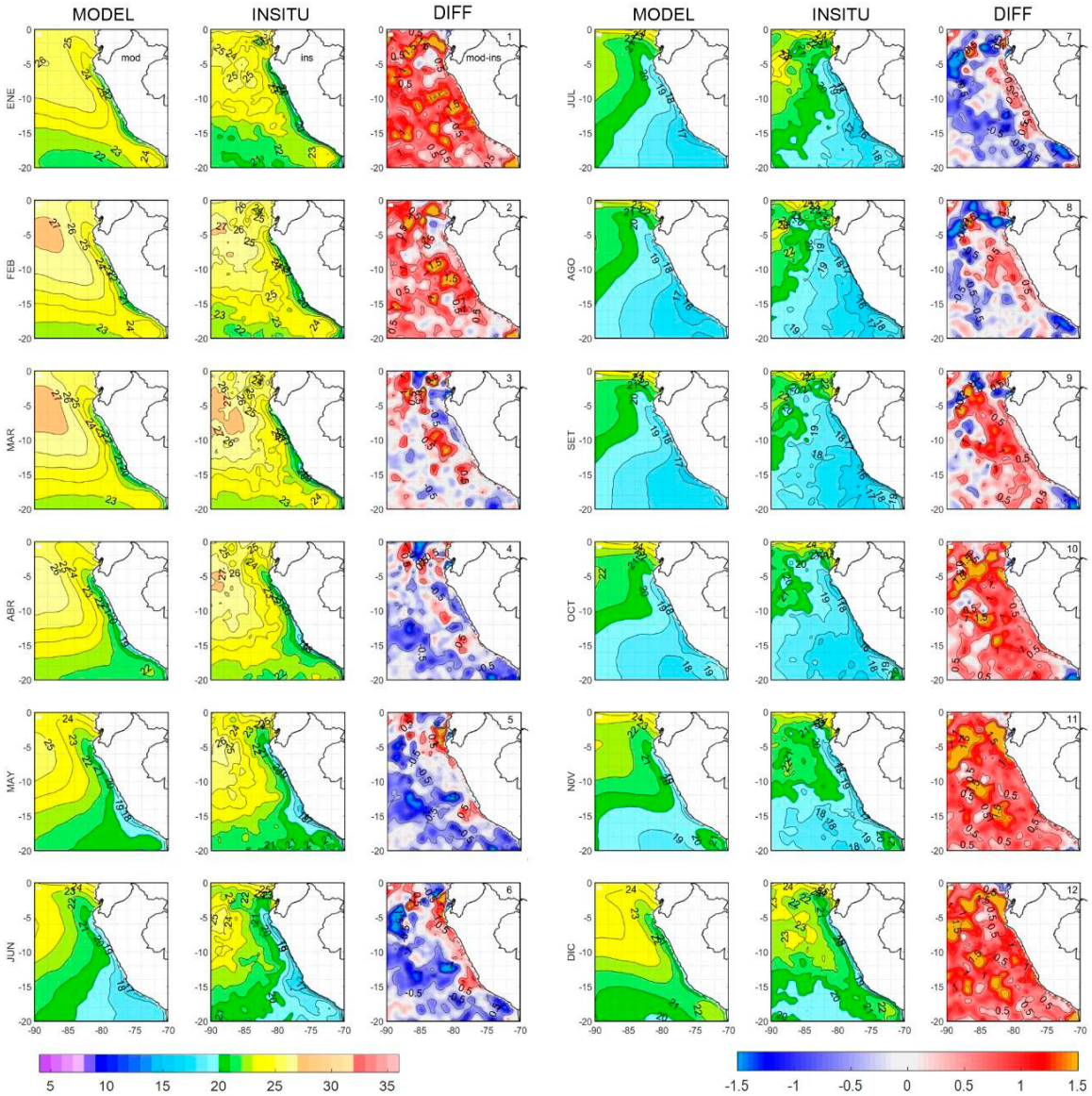

Figura 5.- Mapas mensuales climatológicos de TSM del modelo e *in situ* y la diferencia de Mapas en ups. Periodo 1993-2015

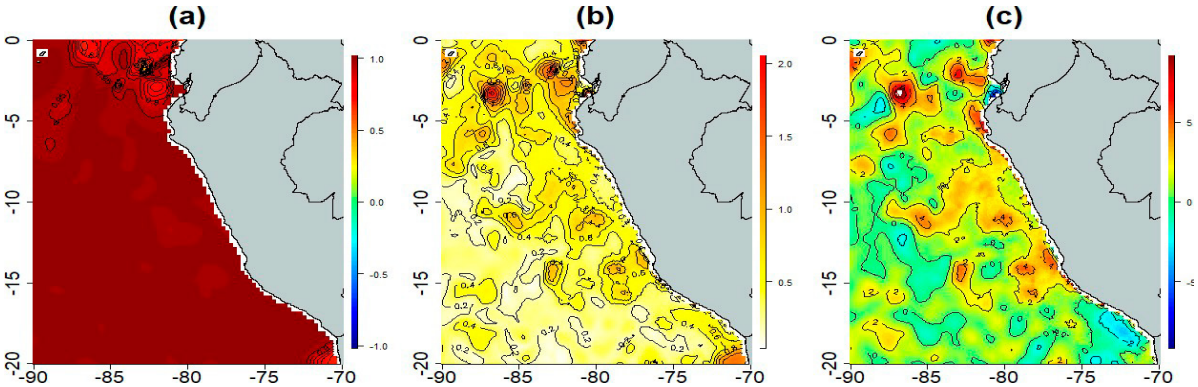

Figura 6.- Mapa de (a) correlación (b) desviación media absoluta (MAD) en °C y (c) error porcentual medio (MPE) entre la climatología simulada y observada de la TSM. Periodo base 1993-2015

La desviación media absoluta (MAD) indica que en casi toda el área del mar peruano la climatología del producto de Mercator está desviado de la climatología observada del IMARPE en promedio con valores menores a 1 °C. Solo al norte de los 5°S, en la zona oceánica presentan áreas con diferencias absolutas, mayores a 1 °C, aproximadamente. Por otro lado, el error porcentual medio (MPE) indica que, en gran parte de toda el área del mar peruano la climatología del producto de *Mercator* tiene valores positivos, lo que indicaría sus valores están por arriba de la climatología observada con porcentajes mayores al 2% en cada pixel. El mapa de correlaciones indica que las climatologías de *Mercator* y los datos de IMARPE tienen alta correlación positiva en todo el dominio del mar peruano, por lo tanto, ambas bases de datos están fase (Fig. 6).

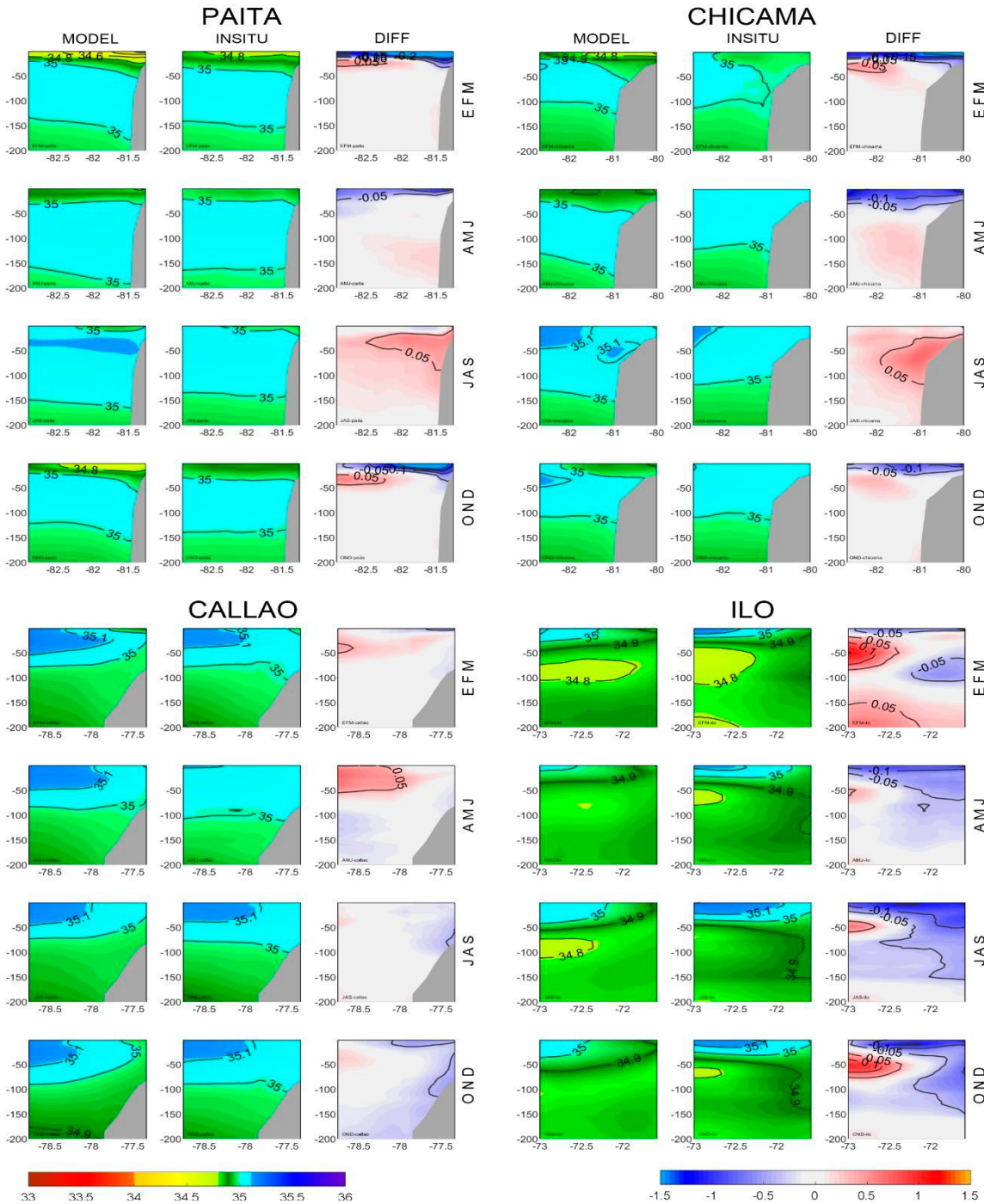

Figura 7.- Comparación de secciones verticales de salinidad del mar hasta 200 metros de profundidad; climatologías en verano (EFM), otoño (AMJ), invierno (JAS) y primavera (OND) del modelo e *in situ*, y su diferencia frente a) Paita (5°S), b) Chicama (7°S), c) Callao (12°S) y d) Ilo (17°S)

Comparación climatológica de salinidad y temperatura sub superficial del mar

Frente a Paita, se procesó una sección en 5°S, 90-80°W y profundidad de 0 a 200 metros con datos contenidos en el modelo Mercator, calculándose promedios de verano, otoño, invierno y primavera. Esta información se comparó con la obtenida *in situ* (Fig. 7) los resultados indican que, en verano, otoño y primavera, los valores de salinidad en la franja costera tienden a ser subestimados por el modelo Mercator. En invierno, en la capa de 0 a 80 m de profundidad, el modelo ligera-

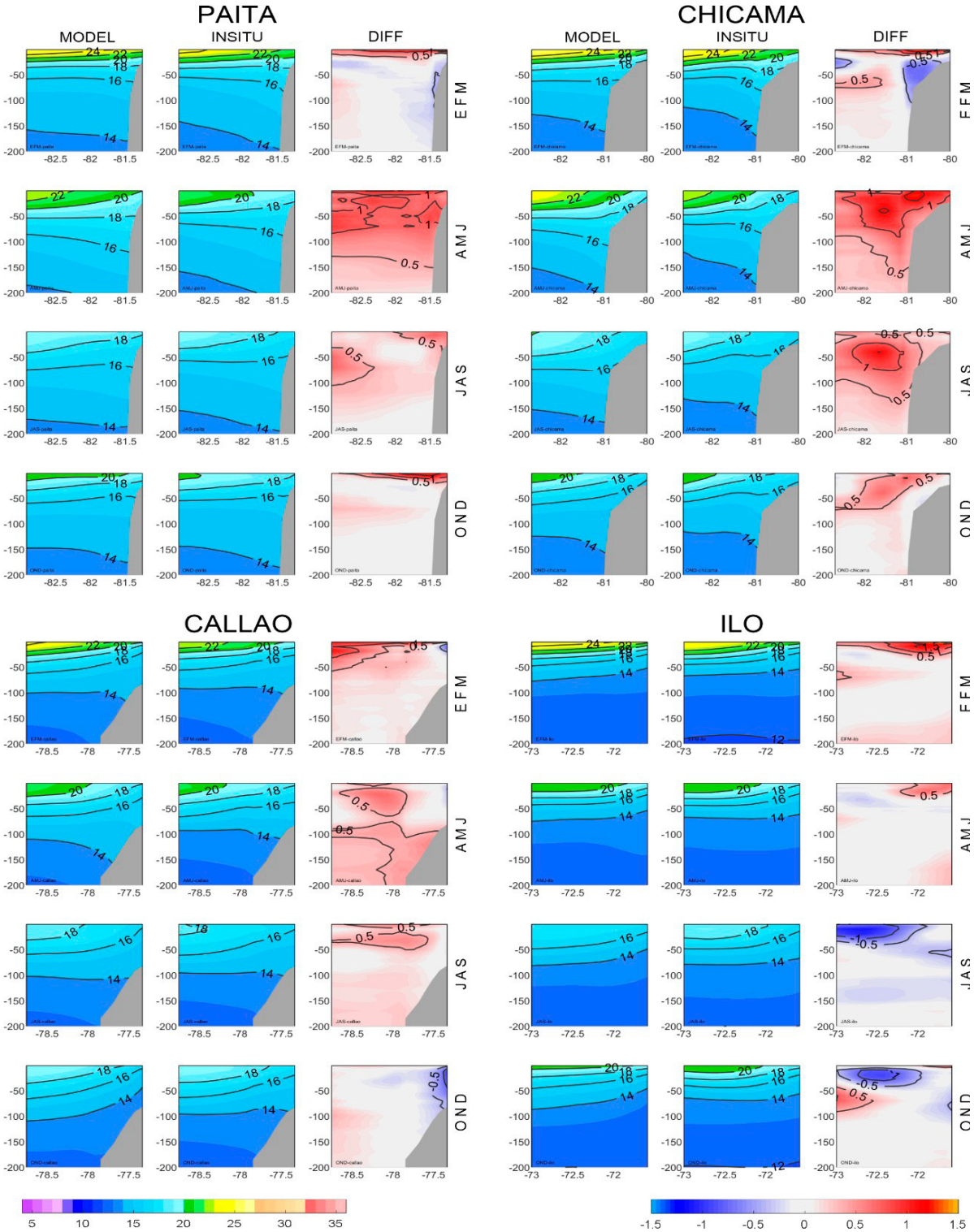

Figura 8.- Comparación de secciones verticales de temperatura del mar hasta 200 metros de profundidad, en verano (EFM), otoño (AMJ), invierno (JAS) y primavera (OND) del modelo e *in situ*, y su diferencia frente a) Paita (5°S), b) Chicama (7°S), c) Callao (12°S), d) Ilo (17°S)

mente sobrestimó los valores de salinidad. En la misma Figura 7, frente a Chicama se observó, en la franja costera que, durante el verano, por un lado, el modelo tiende a subestimar los valores de concentración de salinidad en la capa superficial (0-40 m de profundidad) y, por otro lado, se observó disminución gradual de la concentración de salinidad en la capa más profunda (80 m – 500 m) tanto en el modelo como en las observaciones directas. Es necesario señalar que, en verano, otoño y primavera, el modelo tiende a estimar por debajo del valor real los valores climatológicos de la concentración de la salinidad en la zona costera en la capa superficial de 0 a 30 m de profundidad. La sección en 12°S, 79°W-77°W y profundidad 0-500 m, frente a Callao, trabajando con el modelo Mercator, se calcularon promedios de verano, otoño, invierno y primavera, como resultado se puede apreciar que las altas concentraciones de salinidad están en la capa superficial.

Frente a Paita, durante verano y otoño, el modelo subestima la salinidad estacional entre la superficie y 40 metros de profundidad. Mientras que en invierno e inicios de primavera el modelo sobreestima la salinidad entre la superficie y 100 metros de profundidad. Frente a Callao e Ilo, el modelo sobrestima la salinidad entre la superficie y los 150 metros de profundidad, fuera de la zona costera peruana (fuera de los 150 km hacia mar afuera).

Frente a Paita, durante el verano el modelo sobrestima la temperatura en los primeros 20 m de profundidad, mientras que, en otoño e invierno esta sobreestimación podría alcanzar desde la superficie hasta los 150 m de profundidad (Fig. 8). Frente a Callao, en verano otoño e invierno, fuera de la zona costera, el modelo tiende a sobreestimar los valores de la temperatura del mar. Frente a Ilo, el modelo tiende a sobrestimar dentro de los primeros 20 metros de profundidad durante el verano y otoño, mientras que durante el invierno y primavera el modelo tiende a subestimar la temperatura del mar entre la superficie y 60 metros de profundidad (Fig. 8).

Comparación Multianual entre las simulaciones de Mercator Ocean y registros *in situ*

Salinidad superficial del mar (SSM). El análisis de un diagrama de dispersión entre los datos de SSM simulado y observado (Fig. 9), que muestra una correlación de 0,68 para el área en estudio. Se observa un sesgo en la SSM del modelo para menores valores de SSM, es decir el modelo tiende a estimar mayores concentraciones de SSM que lo observado; mientras que para mayores valores de SSM, el sesgo es menor y casi lineal. Un análisis de la correlación lineal entre lo observado y simulado por cada mes (no mostrado) indicó que las correlaciones más bajas (menores a 0,5) se encuentran en marzo, abril y julio, cabe señalar que en junio los datos son mucho menores que el resto de los otros meses (188 días). Mientras que las correlaciones durante agosto y setiembre son ligeramente aceptables. Las correlaciones más altas se encuentran en enero, febrero, mayo y junio (no mostrado). Se ajustó a una regresión lineal (línea azul) en la Figura 9, con un coeficiente de determinación (R^2) = 46%. Sin embargo, dada la dispersión observada de los datos, fue posible ajustar un modelo de regresión lineal por tramos (segmentos) que consta de dos partes o tramos lineales (línea roja), con un coeficiente de determinación (R^2) = 50%. El umbral de cambio de pendiente de la regresión se estimó en la concentración de salinidad del mar de 34,01 ups, las pendientes de la regresión son: $\beta 1$ = 1,364 la cual es pendiente de la regresión donde Xi < 34,01 ups, y ($\beta 1+\beta 2$)= 0,552 es la pendiente para la regresión donde Xi > 34,01 ups, ambas pendientes son significantes con intervalos de confianza al 95%.

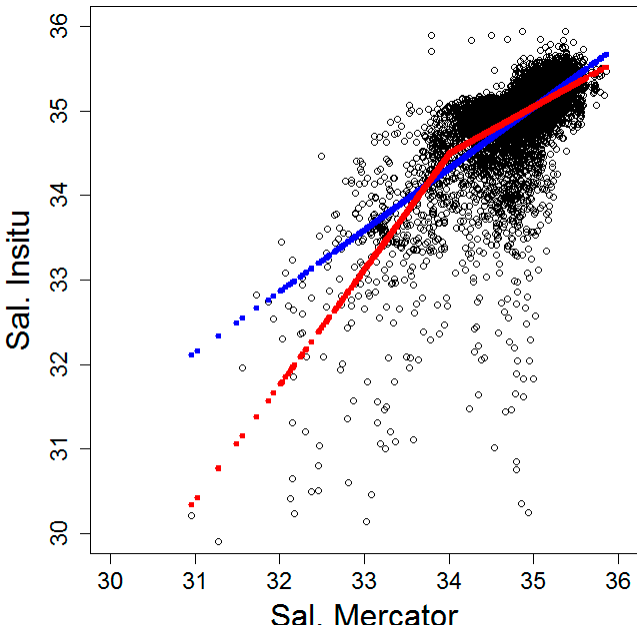

Figura 9.- Diagrama de dispersión de datos de SSM *in-situ* y de Mercator de los puntos coincidentes. Regresión lineal simple (azul) y Regresión por tramos (rojo)

En la Figura 10, se muestra la comparación entre *in situ* y Modelo usando el Diagrama de Taylor de ocho áreas de datos de SSM *in situ* y de Mercator de los puntos coincidentes. En primavera, en casi todas las áreas costeras tienen un mayor error, asimismo en esta misma estación la desviación estándar de la salinidad superficial del mar es sobreestimada por el producto de Mercator, mientras que, en verano, la varianza de la salinidad superficial del mar es subestimada por el producto de Mercator en las áreas costeras en zona norte y zona sur. Mientras que, en la zona oceánica, los errores más altos se logran visualizar durante otoño e invierno.

Se identificaron los errores (residuo) extremos y se analizó su distribución espacial, las ubicaciones con errores extremos negativos (simulaciones que están muy por debajo del valor observado) están principalmente ubicadas en el norte y centro frente a la costa peruana, es decir entre las latitudes 4°S y 11°S, aproximadamente y con menor densidad al sur entre las latitudes 17°S y 18°S (Fig. 11a). Mientras que las ubicaciones con errores (residuos) extremos positivos (simulaciones que están muy por arriba del valor observado) están principalmente ubicadas en el norte frente a la costa peruana, es decir entre las latitudes 3°S y 5°S, aproximadamente y con menor densidad al sur entre las latitudes 14°S y 16°S. Es necesario señalar que los errores extremos son generados con mayor frecuencia en febrero, marzo y abril que son temporadas de lluvias en el norte, lo que podría señalar que la SSM del producto de Mercator, con mayor frecuencia tiende a tener mayor discrepancia durante el periodo estacional de lluvias.

El análisis de correlación por estaciones de los pares coincidentes, mostró que otoño presentó la menor cantidad de pares coincidentes (n= 4071), debido a los escasos registros *in situ* en junio, mientras que invierno presentó la mayor cantidad de pares coincidentes (n= 9293) debido a la mayor cantidad de registros en setiembre. Las condiciones de verano y otoño presentaron valores, bastante parecidos entre sí, mostrando un r = 0,7 ($p < 0,05$), y error en el mismo rango (RMSE= 0,27). En primavera se obtuvo un r = 0,64, con un error de RMSE = 0,17, mientras que en invierno se obtuvo r = 0,55 con un error de RMSE = 0,13, en ambos altamente significativos ($p < 0,05$) (Fig. 12).

Temperatura superficial del mar (TSM). El análisis de un diagrama de dispersión entre los datos de TSM simulado y observado (Fig. 13), muestra una correlación de 0,94 ($p < 0,05$) para el área en estudio. Un análisis de la correlación lineal entre lo observado y simulado por cada mes (no mostrado) indicó que las correlaciones más bajas (entre 0,64 y 0,77) se encuentran en enero y octubre, cabe señalar que en julio solo hay 15 puntos de muestreo, que es mucho menor en comparación con los otros meses. Mientras que las correlaciones del resto de meses son mayores a 0,84 (no mostrado).

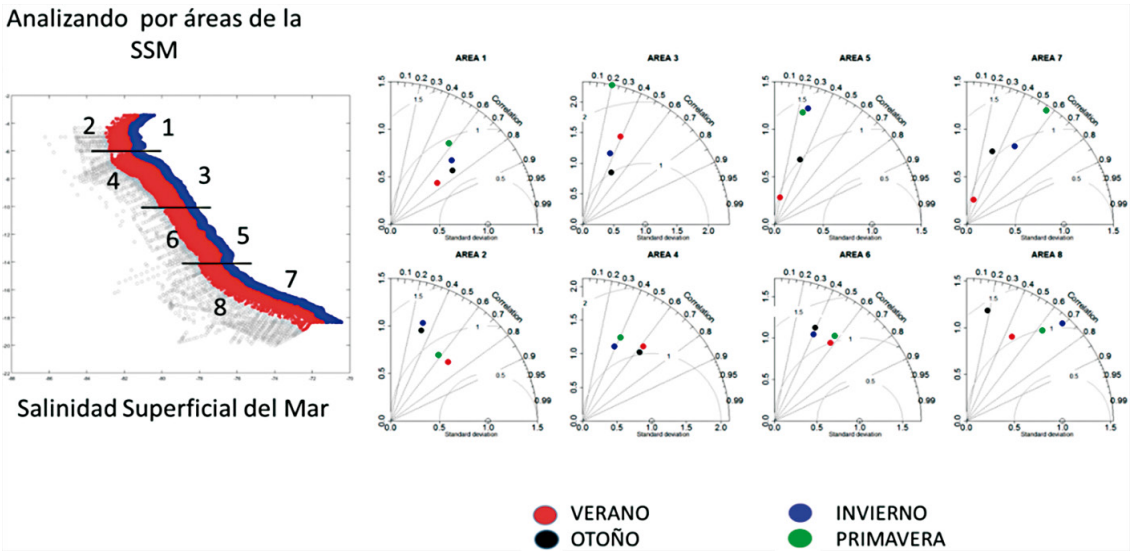

Figura 10.- Comparación entre *in situ* y modelo. Diagrama de Taylor de 8 áreas costeras de datos de SSM *in situ* y de Mercator de los puntos coincidentes

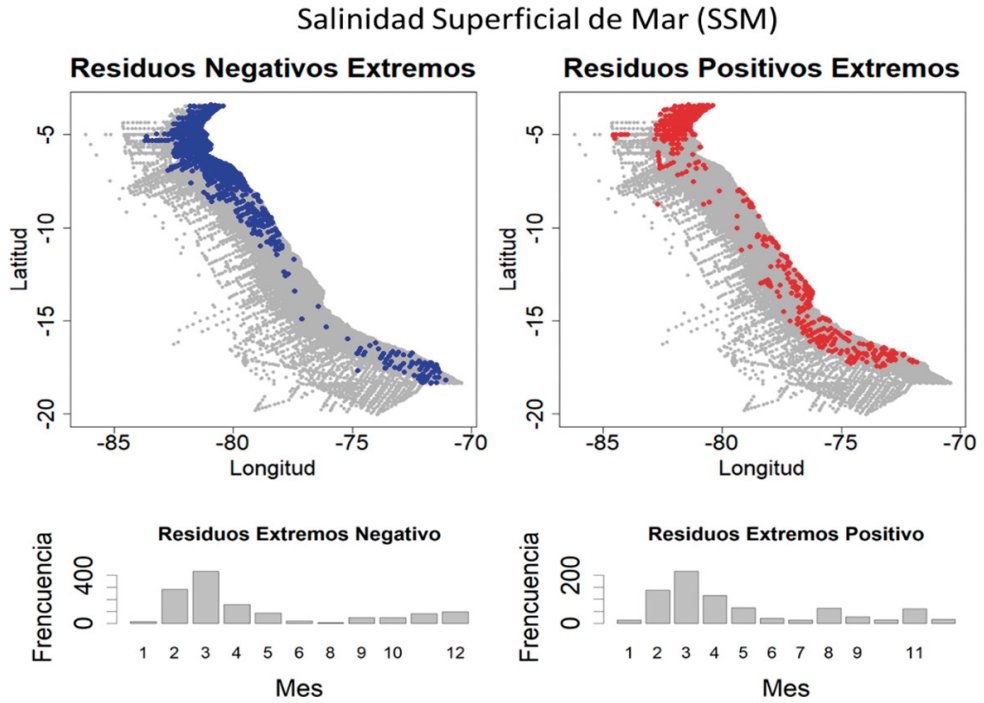

Figura 11.- Distribución espacial de los puntos identificados con máximos errores (a) negativos (subestimación) y (b) positivos (sobreestimación). Distribución de frecuencias de los máximos errores (c) negativos y (d) positivos por mes

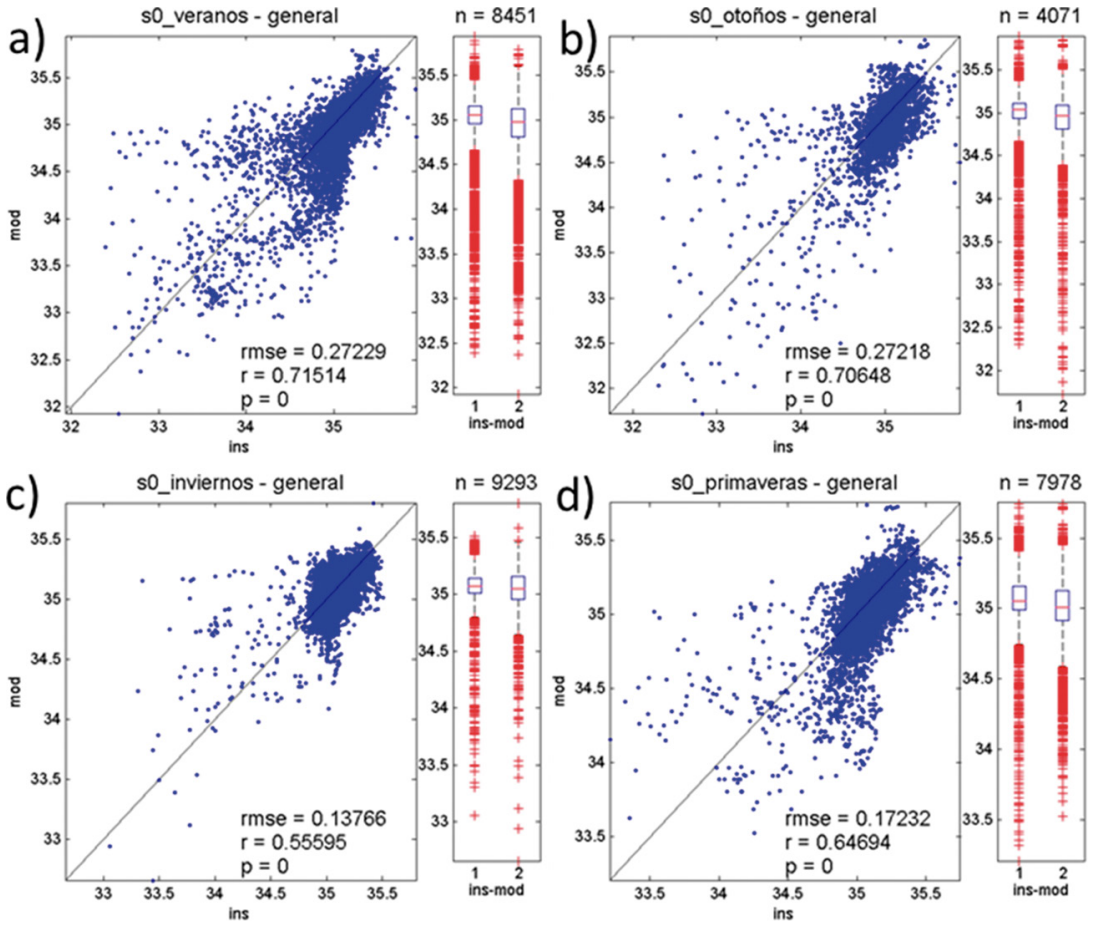

Figura 12.- Comparación de salinidad *in situ* – Mercator, durante: a) verano, b) otoño, c) invierno, d) primavera, en base a diagrama de dispersión, diagramas de caja, numero de pares coincidentes, coeficiente de correlación y error, frente a la costa peruana entre el 2007-2019

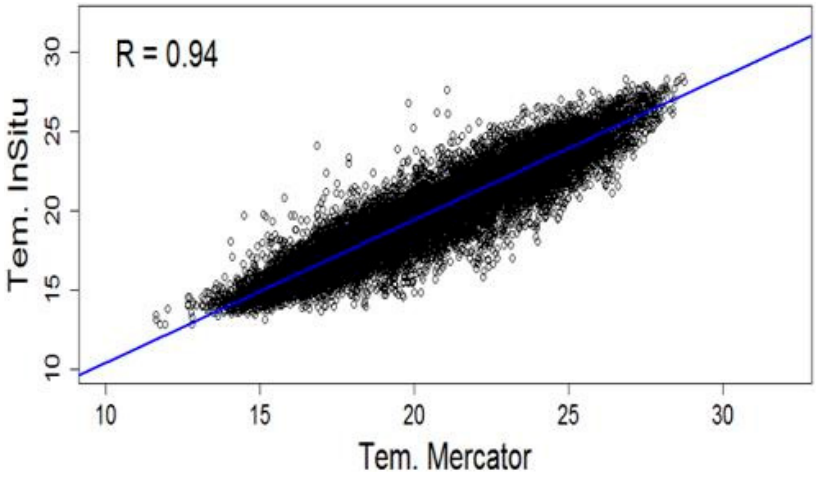

Figura 13.- Gráfico de dispersión de datos *in situ* y modelo de TSM

Se identificó los puntos con errores (residuos) extremos y se analizó su distribución espacial. Las ubicaciones con errores extremos negativos están dispersas con mayor frecuencia entre el centro y sur frente a la costa peruana, es decir entre las latitudes 6°S y 17°S, aproximadamente (Fig. 14a). Mientras que las ubicaciones con errores extremos positivos están principalmente ubicadas al norte, frente a la costa peruana, es decir entre las latitudes 3°S y 8°S, aproximadamente y con menor frecuencia al sur (Fig. 14b). Es necesario señalar que los errores extremos son generados con mayor frecuencia en marzo (Fig. 14c, d) que coinciden con la temporada de lluvias en el norte.

El análisis de correlación por estaciones de los pares coincidentes, mostró altas correlaciones para las cuatro estaciones. Así, en verano con un r = 0,86 con un RMSE de 1,19, otoño e invierno mostraron un r = 0,87, sin embargo, el RMSE en otoño fue mayor (RMSE= 1,24) que en invierno (RMSE = 0,80), mientras que, en primavera, se registró el más alto coeficiente de correlación (r = 0,89), con un RMSE = 0,95 (Fig. 15).

Comparación multianual de salinidad y temperatura sub superficial del mar

Salinidad sub superficial del mar. El análisis de comparación entre registros de salinidad con CTD y estimaciones de Mercator, a través del análisis de correlación mostró que tanto la zona costera como la oceánica, presentaron características de correlación baja y media a profundidades menores a 200 m, sin embargo, a profundidades superiores a los 200 m y a diferentes latitudes, se notó que la correlación positiva adquirió valores altos (Tabla 1). La manifestación del error respecto a la profundidad, presentó un patrón que se caracteriza por mostrar niveles altos de error en la capa somera de 10 m, y que el error tiende a disminuir conforme aumenta la profundidad.

En el norte del Perú, la zona ubicada entre 3° y 6°S, mostró un gradiente de error costa – océano, dentro de las 30 mn de la costa, el valor de error más alto (RMSE = 0,41), mientras que en zonas más oceánicas de 30 a 100 mn el error disminuyó a RMSE = 0,29. Las zonas ubicadas al sur de los 6°S (Punta La Negra), no mostraron está característica de gradiente costa-océano, en la capa de 10 m, presentando de manera indistinta, valores variables de error de RMSE = 0,12 a 0,17, tal es así que, la capa de 0 - 10 m, ubicada al sur de Punta La Negra presentó un error con mediana de RMSE = 0,17.

El error encontrado en la capa de 10 – 50 m, en todas las zonas, varió entre RMSE = 0,10 a 0,16, con una mediana de RMSE = 0,12, donde los valores altos de error se manifestaron al norte de los 6°S (Punta La Negra) y al sur de los 14°S (Pisco). Mientras que en las capas de 50 – 200 m y de 200 – 500 m, el error varió por lo general de RMSE = 0,05 a 0,07, presentándose de manera excepcional un error de 0,09 en la capa de 50 – 200 m, ubicada en la zona costera entre 10° - 14°S, y error de 0,1, en la misma capa, ubicada al sur de los 14°S, sin embargo, las capas de 50 a 500 m, presentaron una mediana de RMSE = 0,07 (Tabla 1).

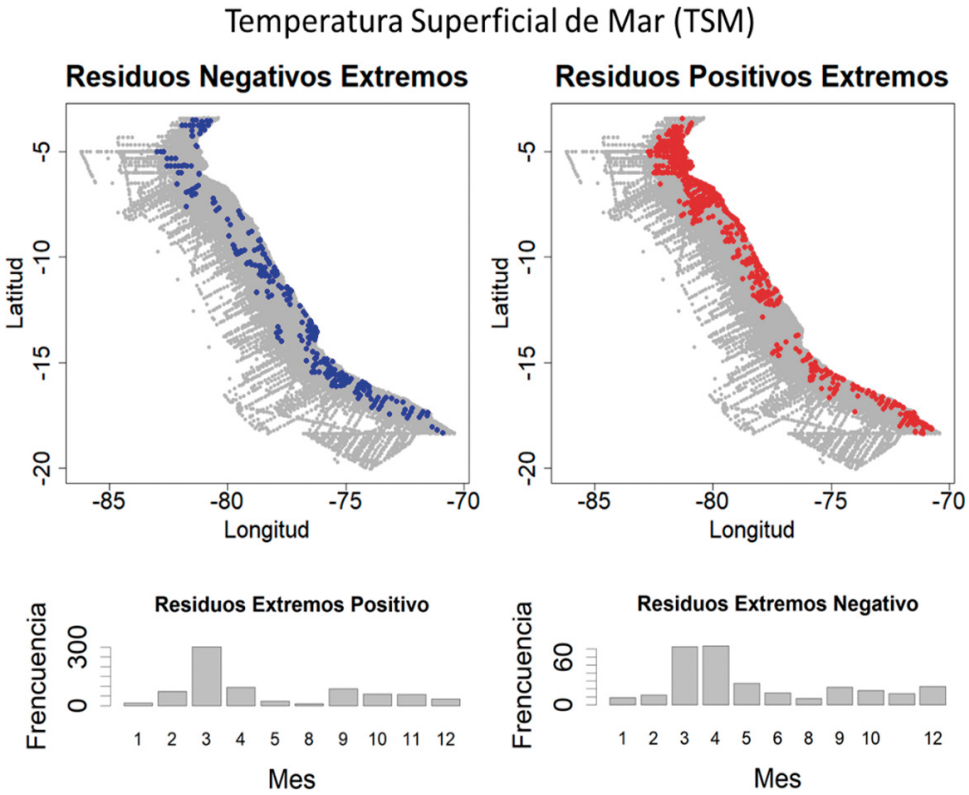

Figura 14.- Distribución espacial de los puntos identificados con máximos errores (a) negativos (subestimación) y (b) positivos (sobreestimación). Distribución de frecuencias de los máximos errores (c) negativos y (d) positivos por mes

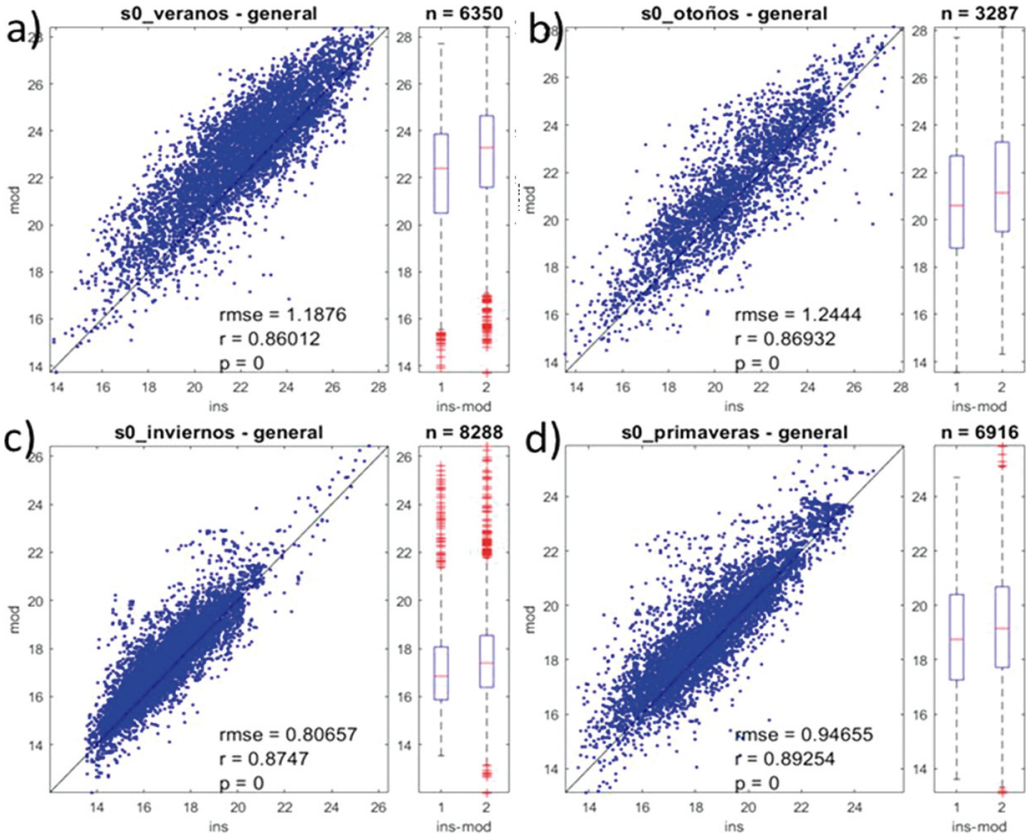

Figura 15.- Comparación de TSM *in situ* – Mercator, durante a) verano, b) otoño, c) invierno, d) primavera, en base a: diagrama de dispersión, diagramas de caja, numero de pares coincidentes, coeficiente de correlación y error, frente a la costa peruana entre el 2007-2019

Tabla 1.- Evaluación por zonas de la relación entre salinidad procedentes de ctd-Mercator, presentando cantidad de registros (n), coeficientes de correlación de Pearson (r) y cuadrados medios del error (RMSE)

Dist. Costa (mn)	Latitud (°S)	Prof. (m)	n	r	rmse	Dist. Costa (mn)	Latitud (°S)	Prof. (m)	n	r	rmse
0 - 30	3 - 6	0 - 10	4311	0,56	0,41	30 100	3 - 6	0 - 10	1315	0,63	0,29
(costero)		10 - 50	7115	0,73	0,14	(oceánico)		10 - 50	2228	0,66	0,16
		50-200	2899	0,35	0,07			50-200	1569	0,49	0,06
		200-250	451	0,8	0,06			200-250	802	0,88	0,06
	6 - 10	0 - 10	4730	0,45	0,17		6 - 10	0 - 10	4123	0,46	0,17
		10 - 50	6670	0,62	0,1			10 - 50	6567	0,61	0,11
		50-200	1509	0,52	0,05			50-200	3760	0,53	0,05
		200-250	235	0,89	0,06			200-250	1013	0,87	0,06
	10 - 14	0 - 10	2086	0,23	0,12		10 - 14	0 - 10	1667	0,28	0,13
		10 - 50	3126	0,47	0,1			10 - 50	2598	0,45	0,1
		50-200	1057	0,41	0,09			50-200	1687	0,54	0,07
		200-250	76	0,88	0,07			200-250	710	0,82	0,07
	14 - 19	0 - 10	1953	0,21	0,15		14 - 19	0 - 10	1949	0,39	0,17
		10 - 50	3009	0,5	0,13			10 - 50	3041	0,47	0,15
		50-200	1618	0,41	0,1			50-200	1925	0,35	0,11
		200-250	523	0,8	0,07			200-250	936	0,78	0,07

Tabla 2.- Evaluación por zonas de la relación entre temperaturas procedentes de ctd-Mercator, presentando cantidad de registros (n), coeficientes de correlación de Pearson (r) y cuadrados medios del error (RMSE)

Dist. Costa (mn)	Latitud (°S)	Prof. (m)	n	r	rmse	Dist. Costa (mn)	Latitud (°S)	Prof. (m)	n	r	rmse
0 - 30	3 - 6	0 - 10	4311	0,87	1,36	30 100	3 - 6	0 - 10	1315	0,86	1,41
(costero)		10 - 50	7115	0,87	1,17	(oceánico)		10 - 50	2228	0,89	1,25
		50-200	2899	0,93	0,72			50-200	1569	0,92	0,66
		200-250	451	0,92	0,65			200-250	802	0,96	0,51
	6 - 10	0 - 10	4730	0,89	1,22		6 - 10	0 - 10	4123	0,89	1,2
		10 - 50	6670	0,87	1,11			10 - 50	6567	0,87	1,16
		50-200	1509	0,93	0,6			50-200	3760	0,91	0,7
		200-250	235	0,96	0,52			200-250	1013	0,96	0,49
	10 - 14	0 - 10	2086	0,81	1,32		10 - 14	0 - 10	1667	0,89	1,03
		10 - 50	3126	0,85	1,11			10 - 50	2598	0,84	1,2
		50-200	1057	0,88	0,65			50-200	1687	0,86	0,71
		200-250	76	0,96	0,49			200-250	710	0,95	0,48
	14 - 19	0 - 10	1953	0,84	1,48		14 - 19	0 - 10	1949	0,93	1,16
		10 - 50	3009	0,78	1,31			10 - 50	3041	0,81	1,49
		50-200	1618	0,78	0,68			50-200	1925	0,77	0,89
		200-250	523	0,95	0,42			200-250	936	0,94	0,51

Temperatura sub superficial del mar. La comparación entre registros de temperatura con CTD y estimaciones de Mercator, mostró una fuerte correlación positiva, cuyos coeficientes encima de los 50 m variaron entre r = 0,78 y 0,93; con una mediana de r = 0,86, mientras que por debajo de los 50 m el coeficiente de correlación tendió a incrementarse, mostrando una mediana de r= 0,93 (Tabla 2).

La manifestación del error en la temperatura respecto a la profundidad, también mostró un patrón que se caracteriza por presentar niveles de error alto en las capas más someras y bajos en capas profundas. La mediana de los errores en capas de 0-10, 10-50, 50-200 y 200-500 m fueron de RMSE = 1,27; 1,18; 0,69 y 0,50, respectivamente (Tabla 2).

4. DISCUSIÓN

Uno de los objetivos del presente estudio fue comparar climatológicamente la temperatura y salinidad del mar simuladas con el modelo del sistema operacional *Mercator Ocean* y con la base climatológica registrada por el Imarpe sobre el mar peruano. Basados en el análisis de los mapas de diferencias de TSM climatológico (Fig. 5),

se observó que cerca de la costa, la TSM muestra un frente costero bien marcado, más fuerte en verano que en invierno, similar a lo obtenido en Grados *et al*. (2018) y Penven *et al*. (2005). Asimismo, se observó un buen desempeño del producto *Mercator Ocean* en la zona costera dentro de los 100 km a la costa, por lo que se podría indicar que el modelo podría simular bien la TSM de las aguas costeras frías. Sin embargo, fuera de la costa, durante setiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero, el modelo de *Mercator Ocean* tiende a estimar por arriba del patrón climatológico de TSM, mientras que, es casi opuesto para abril, mayo, junio, julio y agosto, que es cuando el modelo de *Mercator Ocean* tiende a estimar por debajo del patrón climatológico de TSM (Fig. 5). Basados en el análisis de los mapas de diferencias de SSM climatológico (Fig. 3), se observó que el modelo subestima los valores de la climatología observada al norte de 10°S durante enero, febrero, marzo y abril, lo que podría indicar que el modelo podría no simular bien las Aguas Ecuatoriales Superficiales (Grados *et al*., 2018).

Otro de los objetivos, del presente estudio fue realizar una comparación multianual de la temperatura y salinidad del mar entre lo simulado por el sistema *Mercator Ocean* y los registros del Imarpe. El análisis basado en la correlación de la concentración de la salinidad superficial del mar (SSM) entre lo simulado y observado es 0,68 ($p<0,05$), lo que indica que al ajustar una regresión lineal se tuvo un coeficiente de determinación (R^2= 0,46), y al ajustar a un modelo de regresión lineal por tramos (segmentos) se logró incrementar el coeficiente de determinación (R^2) de 46% a 50%, lo cual podría sugerir un método de corrección a la SSM del producto de Mercator, con la desventaja de solo usarse para la superficie y en la región costera (área de estudio).

Un análisis usando el diagrama de Taylor para las cuatro zonas costeras (Fig. 16), omitiendo la zona más costera, es decir sin el área dentro de las 10 mn hacia la costa, muestran mejores indicadores del modelo, lo que podría indicar que el modelo es sesgado en áreas más costeras posiblemente por la descarga de los ríos, sin embargo, en primavera siempre los indicadores son bajos.

Con respecto a las capas subsuperficiales, el patrón decreciente del nivel de error obtenido en las comparaciones de salinidad, fue congruente con los resultados presentados por el servicio de monitoreo de ambiente marino de COPERNICUS (CMEMS-GLO-QUID-001-024), donde reportaron de manera general un error de RMS = 0,199 para la capa de 0-5 m y 0,166 para la capa de 5-100 m, disminuyendo hasta 0,057 entre 300-800 m. Mientras que en el presente estudio se encontró que estos valores de error pueden variar de acuerdo a la ubicación espacial, siendo más crítico la zona ubicada al norte de los 6°S, donde la influencia de las aguas ecuatoriales es mayor, más que todo cerca de la costa dentro de las 300 mn, donde se logró encontrar un error que supera los 0,4 en la capa de 0-10 m.

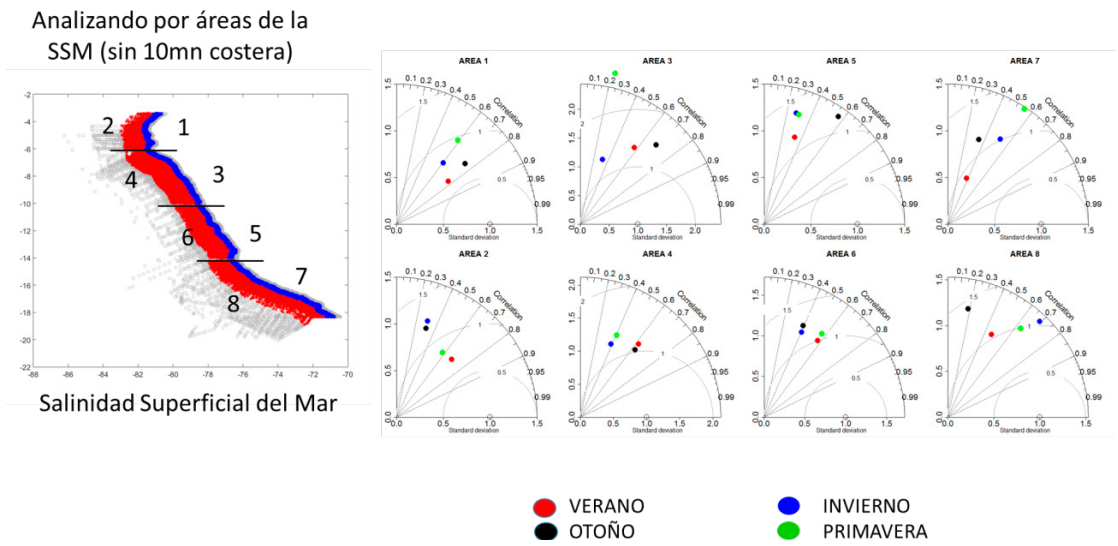

Figura 16.- Comparación entre *in situ* y modelo. Diagrama de Taylor de ocho áreas costeras de datos de SSM *in-situ* y de Mercator de los puntos coincidentes, sin considerar las primeras 10 mn

En el caso de la temperatura, los resultados de COPERNICUS no muestran un error que disminuya conforme se incrementa la profundidad. Sin embargo, para la costa peruana, se pudo observar, que el error disminuye en capas de mayor profundidad.

5. CONCLUSIONES

En superficie, con respecto al ciclo anual, existe una correlación positiva aceptable (> 0,5) entre el ciclo anual de los datos de SSM de Base Climatológica del Imarpe y *Mercator Ocean* en la zona costa norte-centro desde 4°S hasta 11°S, sin embargo, durante el verano austral, al norte de 10°S existe un mayor distanciamiento en las diferencias entre la climatología observada y simulada de SSM; mientras que, en la costa sur el nivel de asociación es bajo (< 0,5). Con respecto a la temperatura superficial, existe una buena correlación positiva (> 0,7) en el mar peruano entre el ciclo anual de los datos TSM *in situ* y Mercator.

En superficie, con respecto a la información multianual, se observó que el producto de Mercator simuló la SSM por debajo de lo observado en la zona norte y centro hasta 12°S durante el verano austral. Mientras que, el producto de Mercator simuló la TSM por arriba de lo observado en la zona norte y centro durante febrero, marzo y abril.

En promedio, en verano y a nivel subsuperficial (capa entre 0 – 30 m), el modelo tiende a estimar valores de salinidad por debajo de los valores de concentración observados en la franja costera frente a 5°S, 7°S y 12°S. Cabe señalar, que esta subestimación observada en la franja costera durante el verano, también es marcada en otoño y primavera.

La salinidad, en capas someras, presentó mayor error con tendencia a disminuir conforme aumenta la profundidad; sin embargo, dentro de las 30 mn, el error fue mayor en comparación con el área fuera de las 30 mn, lo que nos muestra que el error de las simulaciones estuvo asociado a la profundidad y al gradiente costa-océano. Por otro lado, se encontró que la zona ubicada entre 3° y 6°S dentro de las 30 mn, no está bien representada por las simulaciones, registrándose un error atípico (RMSE > 0,4). La correlación de la salinidad entre registros *in situ* y las simulaciones varió entre 0,21 y 0,7 para la profundidad comprendida entre 0 y 200 m, mientras que, por debajo de los 200 m, las correlaciones fueron mayores a 0,78.

En cambio, entre 0 y 10 m de profundidad, la temperatura presentó el error (RMSE) de 1,27, mientras que de 200-500 m fue de 0,50, lo que indica que el error de estimación de temperatura en la columna de agua, disminuye conforme aumenta la profundidad. Mientras que las altas correlaciones positivas entre 0-50 m, presentaron un promedio de r = 0,86 y debajo de los 50 m se incrementó hasta un r = 0,93.

6. REFERENCIAS

Chavez, F. P., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Soler, P. & Csirke, J. (2008). The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, *79*(2–4), 95–105. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.012

Grados, C., Chaigneau, A., Echevin, V. & Domínguez, N. (2018). Upper ocean hydrology of the Northern Humboldt Current System at seasonal, interannual and interdecadal scales. *Progress in Oceanography*, *165*, 123-144. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.05.005

Lellouche, J-H., Legalloudec, O., Regnier, C., Levier, B., Greiner, E. & Drevillon, M. (2016). *Quality information document. For Global Sea Physical Analysis and Forecasting Product GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024*. Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/46419/1/CMEMS-GLO-QUID-001-024.pdf

Lellouche, J-M., Le Galloudec, O., Drevillon, M., Regnier, C., Greiner, E., Garric, G., Ferry, N., Desportes, C., Testut, C.-E., Bricaud, C., Bourdalle-Badie, R., Tranchant, B., Benkiran, M., Drillet, Y., Daudin, A. & De Nicola, C. (2013). Evaluation of global monitoring and forecasting systems at Mercator Océan. *Ocean Science*, *9*, 57–81. https://doi.org/10.5194/os-9-57-2013

Penven, P., Echevin, V., Pasapera, J., Colas, F. & Tam, J. (2005). Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru current system: A modeling approach. *Journal of Geophysical Research*, *110*, C10021. https://doi.org/10.1029/2005JC002945

Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, *106*(D7), 7183-7192. https://doi.org/10.1029/2000JD900719