

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL  
DEL MAR Y NIVEL DEL MAR EN LAS COSTAS DE SUDAMÉRICA  
Y OCÉANO PACÍFICO TROPICAL USANDO MODELOS DEL CMIP5**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título de:

**INGENIERO METEORÓLOGO**

**ERICK ALEXIS ALVAREZ SANCHEZ**

Lima – Perú

**2024**

---

La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación  
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)

# REVISION

## INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

11%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

Asesor

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorio.lamolina.edu.pe">repositorio.lamolina.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
2	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	2%
3	<a href="http://www.minam.gob.pe">www.minam.gob.pe</a> Fuente de Internet	2%
4	<a href="https://repository.udistrital.edu.co">repository.udistrital.edu.co</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://mdpi-res.com">mdpi-res.com</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://tpos2020.org">tpos2020.org</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://orcid.org">orcid.org</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="https://ah.lib.nccu.edu.tw">ah.lib.nccu.edu.tw</a> Fuente de Internet	<1%
9	<a href="https://bora.uib.no">bora.uib.no</a> Fuente de Internet	<1%

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**“PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL  
DEL MAR Y NIVEL DEL MAR EN LAS COSTAS DE SUDAMÉRICA  
Y OCÉANO PACÍFICO TROPICAL USANDO MODELOS DEL CMIP5”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METEORÓLOGO**

Presentado por:

**ERICK ALEXIS ALVAREZ SANCHEZ**

Sustentada y aprobado por el siguiente jurado:

---

Dr. Alexis Nicolás Ibáñez Blancas  
PRESIDENTE

---

Maest. Oscar Enrique Tang Cruz  
MIEMBRO

---

Mg. Sc. Victoria Doris Calle Montes  
MIEMBRO

---

Mg. Sc. Weidi Flores Villanueva  
ASESOR

## **DEDICATORIA**

*Con mucho amor a mis padres: Gloria Sanchez y Pablo Alvarez que con mucho esfuerzo fueron el soporte para poder cumplir mi meta de ser profesional y dar un paso más para alcanzar mis sueños.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi asesor y maestro, Mg. Sc. Weidi Flores Villanueva, que con dedicación y paciencia motivó mi pasión por la investigación.*

*A mis maestros, Delia Acuña Dazarte, Ever Menacho Casimiro, Alexis Nicolas Ibáñez Blancas y Juana Ravines Ruiz por apoyarme en mi formación como profesional y motivarme a lograr mis objetivos.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.2.1. Objetivo general .....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. CAMBIO CLIMATICO .....	3
2.2. CMIP5 .....	3
2.3. Trayectorias Representativas de Concentración (RCP) .....	4
2.4. FENOMENO EL NIÑO.....	4
2.5. NIÑO MODOKI Y CANONICO .....	5
2.6. REVISION BIBLIOGRÁFICA .....	6
III. DESARROLLO DEL TRABAJO .....	7
3.1. AREA DE ESTUDIO.....	7
3.2. DATOS.....	7
3.3. OBTENCIÓN DE VARIABLES PARA EVALUACIÓN DE NDM. ....	9
3.4. BIAS.....	9
3.5. CAMBIOS Y TENDENCIA LINEAL .....	10
3.6. INDICE “ONI” .....	10
3.7. INDICE “E” y EOF’S .....	10
3.8. PROCEDIMIENTO .....	11
3.8.1. Análisis de TSM y NDM .....	11
3.8.2. Análisis del ENSO .....	11
IV. RESULTADOS Y DISCUSION .....	12
4.1. Validación TSM.....	12
4.2. Proyecciones Futuras de la TSM .....	19

4.3. Validación del Nivel del Mar (NDM).....	26
4.4. Proyecciones Futuras de NDM.....	28
4.5. ENSO (El Niño Oscilación del Sur) y sus cambios.....	33
V. CONCLUSIONES.....	38
VI. RECOMENDACIONES.....	39
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
VIII. ANEXOS.....	42

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Lista de variables del CMIP5 disponibles para el estudio .....	8
Tabla 2: Tendencia del NDM promedio global de los modelos del CMIP5 durante el periodo 1981-2100. ....	31
Tabla 3: Número de Eventos El Niño y La Niña según el índice ONI en los modelos CMIP5 para el Periodo 1981-2005. ....	34
Tabla 4: Número de eventos Fuertes EP – El NIÑO para 3 distintos periodos en 16 modelos del CMIP5. ....	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Regiones utilizadas para el análisis del ENSO (NOAA) – .....	5
Figura 2: Sectores de análisis oceánico para el presente estudio .....	7
Figura 3: Tendencia lineal de las anomalías de TSM (°C/década) para el periodo 1981-2005 en los datos observados. En cuadros los sectores de análisis.....	13
Figura 4: Tendencia lineal de las anomalías de TSM (°C/década) para el periodo 1950-2005 en los datos observados. En cuadros los sectores de análisis. En anexos (Figura 62) imagen con mayor resolución donde se puede apreciar el enfriamiento en la lengua fría “cold tongue” .....	13
Figura 5: Tendencia de las anomalías de TSM para el periodo 1981-2005 en los datos observados. Con su valor promedio por sector en líneas rojas, línea de tendencia en línea negra punteada y el valor de 0 de anomalía en línea azul punteada. Valores significativos indicados con un “*”. .....	14
Figura 6: Tendencia de las anomalías de TSM para el periodo 1950-2005 en los datos observados. Con su valor promedio por sector en líneas rojas, línea de tendencia en línea negra punteada y el valor de 0 de anomalía en línea azul punteada. Valores significativos indicados con un “*”. .....	14
Figura 7: Tendencia lineal de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 durante el periodo 1981-2005. Valores significativos indicados con un “/”. .....	15
Figura 8: Tendencia lineal de las anomalías de TSM en el promedio de los modelos del CMIP5 durante el periodo 1981-2005. Valores significativos indicados con un “/”.....	15
Figura 9: Tendencia lineal de las anomalías de TSM en el promedio de los modelos del CMIP5 durante el periodo 1981-2005. En líneas rojas el valor promedio anual, en línea negra punteada la recta de tendencia y en línea	

azul punteada el valor de 0° de anomalía. Valores significativos indicados con un “*”.....	15
Figura 10: BIAS de la TSM para los modelos del CMIP5 en el periodo 1981-2005. Valores significativos indicados con un “*”.....	16
Figura 11: Ciclo anual de los modelos del CMIP5 en diagrama de cajas y en línea roja los datos observados para el periodo 1981-2005.....	17
Figura 13: EOF1 en forma de correlación de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 indicando la variancia explicada en porcentaje. Periodo 1981-2005.....	18
Figura 14: Gráfico tipo violín que indica el diagrama de cajas y la distribución de las anomalías de TSM para el periodo 1981-2005 en los distintos sectores de análisis para cada modelo y observado.....	18
Figura 15: Cambios de la TSM en promedio para los años 2036-2065 con respecto a 1981-2005 en los modelos del CMIP5.....	19
Figura 16: Cambios de la TSM en promedio para los años 2080-2100 con respecto a 1981-2005 en los modelos del CMIP5.....	20
Figura 17: Tendencia lineal de anomalías de TSM para el periodo 1981-2100 en los modelos del CMIP5.....	20
Figura 18: Tendencia lineal de anomalías de TSM para el periodo 1981-2100 en el promedio de modelos del CMIP5.....	21
Figura 19: Anomalías de TSM de todos los modelos en líneas grises, del promedio en líneas negras, en líneas negras punteadas la recta de tendencia y en punteadas moradas el percentil 10 y 90. Finalmente, en líneas rojas los datos observados. Valores significativos indicados con un “*”.....	21
Figura 20: Diagrama de Cajas de la TSM a nivel mensual para los modelos del CMIP5 durante los periodos 1981-2005 (en gris), 2036-2065 (en azul) y 2080-100 (en rojo).....	22
Figura 21: EOF1 en forma de correlación de las anomalías de TSM durante el periodo 2036-2065.....	22

Figura 22: EOF1 en forma de correlación de las anomalías de TSM durante el periodo 2080-2100. ....	23
Figura 23: Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región Niño1+2. ....	23
Figura 24: Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región Niño3.4. ....	24
Figura 25: Cambios de la TSM para los modelos del CMIP5. En barras azules los cambios al 2036-2065 y en rojo 2080-2100. En línea punteadas se tiene la referencia de 1°, 2° y 4°C. ....	24
Figura 26: Gráfico de alcance para el valor de 2°C en anomalía de TSM en los modelos del CMIP5. ....	25
Figura 27: Gráfico temporal de anomalías de TSM para la región Niño1+2. ....	25
Figura 28: Gráfico temporal de anomalías de TSM para la región Niño3.4. ....	26
Figura 29: Tendencia lineal del nivel del mar observado con Altímetros TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1, Jason-2, y Jason-3. ....	27
Figura 30: Tendencia lineal del nivel del mar en los modelos del CMIP5 1993-2019 (histórico + rep8.5). En “*” las tendencias significativas. ....	27
Figura 31: Tendencia del Nivel del Mar Global observado con altímetros TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1, Jason-2, y Jason-3. ....	28
Figura 32: Cambios del NDM en “cm” para el periodo 2036-2065 (ref. 1981-2005). ....	28
Figura 33: Cambios del NDM en “cm” para el periodo 2080-2100 (ref. 1981-2005). ....	29
Figura 34: Tendencia del NDM del 1981-2100 con respecto al periodo 1981-2005 de todos los modelos en líneas grises, del promedio en líneas negras, en líneas negras punteadas la recta de tendencia y en punteadas moradas el percentil 10 y 90. ....	29
Figura 35: Cambios en el NDM para los modelos del CMIP5. En barras azules los cambios al 2036-2065 y en rojo 2080-2100. En línea punteadas se tiene la referencia de 10, 20 y 40 cm. ....	30

Figura 36: Cambio global del nivel del mar en “cm” para los modelos del CMIP5. Usando la variable “zosga” o “zostoga” (Cambio global del nivel del mar) según su disponibilidad. En promedio en línea negra entrecortada, la recta de tendencia en plomo y en morado el percentil 5 y 95.....	31
Figura 37: Tendencia del NDM promedio global de los modelos del CMIP5 durante el periodo 1981-2100.....	32
Figura 38: Correlación entre las anomalías de TSM y NDM para todo el periodo de análisis. ....	32
Figura 39: Gráfico de dispersión de todos los modelos con respecto a los cambios de la TSM (tos) y NDM para los años 2036-2065 (en puntos azules) y 2080-2100 (en puntos rojos). En anexos (Figura 61) la misma imagen con nombres de los modelos. ....	33
Figura 40: Índice ONI para el periodo 1981-2005. En leyenda la cantidad de eventos El Niño y La Niña en dicho periodo. ....	34
Figura 41: Número de eventos El Niño por modelos CMIP5 durante 3 distintos periodos de 30 años: 1981-2010 (gris), 2036-2065(azul) y 2071-2100 (rojo). ....	35
Figura 42: Desviación estándar de valores del ONI mayores a 0.5 para los 3 distintos periodos en Evaluación. ....	35
Figura 43: Número de eventos La Niña por modelos CMIP5 durante 3 distintos periodos de 30 años: 1981-2010 (gris), 2036-2065(azul) y 2071-2100 (rojo). ....	36
Figura 44: Desviación estándar de valores del ONI menores a -0.5 para los 3 distintos periodos en Evaluación. ....	36
Figura 45: Número de eventos Fuertes – EP- El NIÑO (eventos El Niño canónicos fuertes).....	37
Figura 46: Anomalías de TSM, en líneas rojas el valor observado, en líneas grises los modelos del CMIP5, en línea negra el promedio de los modelos y en línea punteada azul el valor 0 de anomalía para los años 1981-2005. ....	43

Figura 47:Diagrama de cajas del ciclo anual de la TSM en los modelos del CMIP5. Cada línea de color es un modelo. La línea punteada negra indica la TSM observada para el periodo 1981-2005. ....	43
Figura 48:Cambios en el ciclo anual promedio para los modelos del CMIP5. Indicando en rojo los cambios al 2036-2065 y en verde 2080-2100. ....	44
Figura 49: Gráfico temporal de las anomalías de TSM en las regiones de estudio con los datos observados. ....	44
Figura 50: Gráfico temporal de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 en la región O1. ....	45
Figura 51: Gráfico temporal de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 en la región O2. ....	45
Figura 52: Gráfico temporal de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 en la región O3. ....	45
Figura 53: Gráfico temporal de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 en la región ATL. ....	45
Figura 54: Gráfico de alcance para el valor de 1°C en anomalía de TSM en los modelos del CMIP5. ....	46
Figura 55: Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región O1. ....	46
Figura 56: Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región O2. ....	47
Figura 57: Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región O3. ....	47
Figura 58: Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región ATL. ....	48
Figura 59: Correlación del ciclo anual de la TSM con los datos observados. ....	48
Figura 60: Diagrama de Cajas de ZOS a nivel mensual para los modelos del CMIP5 durante los periodos 1981-2005 (en grids), 2036-2065 (en azul) y 2080- 100 (en rojo). ....	49

Figura 61: Gráfico de dispersión de todos los modelos con respecto a los cambios de la TSM y NDM para los años 2036-2065 (en puntos azules) y 2080-2100 (en puntos rojos). Versión con nombres de modelos.....	50
Figura 62: Tendencia lineal de las anomalías de TSM (°C/década) para el periodo 1950-2005 en los datos observados. En cuadros los sectores de análisis. Versión con mayor resolución. Enfriamiento en la lengua fría.....	50

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Validación .....	43
Anexo 2: Proyección futura TSM.....	45
Anexo 3: EXTRAS. ....	50

## RESUMEN

En el presente Trabajo de Suficiencia Profesional se describe la obtención de escenarios futuros para la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Nivel del Mar (NDM) usando modelos del CMIP5, que fue realizado en el marco de una consultoría en el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Se analizaron 16 modelos de los cuales se evaluaron diferencias, tendencias e interrelación par las variables de TSM y NDM a lo largo del siglo 21 y periodo histórico (1981-2005). Para las diferencias se consideró el periodo futuro promedio de: 2036-2065 y 2080-2100. Es así que, se obtienen cambios de la TSM en los sectores de estudio (en el Pacífico Este) que oscilan entre 1°C - 2°C para el primer periodo (2036-2065) y 2°C-4°C para el segundo (2080-2100) siendo la región el Niño1+2 donde se presenta mayor calentamiento. En el caso del Nivel del Mar, se tiene cambios positivos de 10 a 20 cm para 2036-2065 y cambios entre 20 - 40 cm (con alguna excepción) para 2080-2100; añadiendo que el modelo IPSL-CMI5A-LR es el único que muestra cambios negativos para nuestros sectores de estudio. Por otro lado, en el cambio global del nivel medio del mar tenemos una tendencia lineal significativa de 2.55 cm/década para los modelos del CMIP5 en el periodo 1981-2100. Finalmente, en el análisis de eventos El Niño y La Niña para el periodo 2071-2100, obtenemos un aumento de estos episodios en el 62.5% de los modelos.

**Palabras clave:** CMIP5, TSM, NDM, El Niño, La Niña, cambios.

## ABSTRACT

This Professional Proficiency Work (TSP) describes the obtaining of future scenarios for Sea Surface Temperature (SST) and Sea Level (NDM) using CMIP5 models, which was carried out within the framework of a consultancy at the National Service of Meteorology and Hydrology of Peru (SENAMHI). 16 models were analyzed, of which differences, trends and interrelationships were evaluated for the SST and NDM variables throughout the 21st century and historical period (1981-2005). For the differences, the average future period of: 2036-2065 and 2080-2100 was demonstrated. Thus, SST changes are obtained in the study sectors (in the Eastern Pacific) that range between 1°C - 2°C for the first period (2036-2065) and 2°C-4°C for the second (2080-2100) being the El Niño1+2 region where the greatest warming occurs. In the case of Sea Level, there are positive changes of 10 to 20 cm for 2036-2065 and changes between 20 - 40 cm (with some exceptions) for 2080-2100; adding that the IPSL-CMI5A-LR model is the only one that shows negative changes for our study sectors. On the other hand, in the global change in mean sea level we have a significant linear trend of 2.55 cm/decade for the CMIP5 models in the period 1981-2100. Finally, in the analysis of El Niño and La Niña events for the period 2071-2100, we obtain an increase in these episodes in 62.5% of the models.

**Keywords:** CMIP5, SST, NDM, El Niño, La Niña, changes.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. PROBLEMÁTICA

Con el paso del tiempo los modelos de Cambio Climático se mejoran, dándonos mejores pistas del comportamiento futuro de los patrones atmosféricos y oceánicos (Ye et al., 2012). Es por ello, que en cada versión que se publica de estos modelos se realizan múltiples estudios para corroborar su climatología y la proyección que estos muestran a futuro. De esta forma, se consigue retroalimentación para la siguiente generación de modelos.

Dentro de estos análisis, la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y el Nivel del mar (NDM) presuponen un reto pues son variables de gran importancia debido al efecto que pueden llegar tener en eventos climáticos que impactan en gran medida ecosistemas y personas que viven en zonas vulnerables.

Por ejemplo, aumentos de TSM puede incrementar la humedad en continente, aumentando las lluvias a nivel promedio y también alterando su ciclo anual interfiriendo en las temporadas secas y lluviosas; perjudicando el sector agrícola e infraestructura. Además, estos cambios en la temperatura del mar pueden generar pérdida de oxigenación en el océano, perdiendo así hábitats marinos muy importantes para el sector pesquero (MINAM, 2016). En el sector salud, al aumentar la humedad y temperatura, se podría generar proliferación de enfermedades ligadas a insectos y roedores afectando a la población, además de choques de calor.

Cambios en la variabilidad de la TSM, también genera impactos importantes a resaltar. Uno de los más resaltantes es la alteración del fenómeno El Niño. Este fenómeno trae consigo múltiples pérdidas tanto a nivel social, productivo e infraestructura para el Perú. Aumento de las lluvias en las costas, disminución de productos agropecuarios, etc; son algunos ejemplos de efectos perjudiciales que podrían incrementarse con cambios en este evento a futuro (MINAM, 2016).

Por otro lado, el NDM podría tener fuertes impactos en el tema de erosión en zona costera, así como también amenaza a la infraestructura existente, afectando pesca y turismo. Consecuentemente este aumento del NDM promedio podría combinarse con un evento El Niño, generando así mayor ascenso del mar en zonas costeras durante estos periodos (MINAM, 2016).

Por su relevancia, este estudio se centrará en el análisis de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y el Nivel del Mar (NDM) usando las proyecciones del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) (Taylor et al, 2012).

## **1.2. OBJETIVOS**

### 1.2.1. Objetivo general

- Determinar y analizar los cambios en escenarios de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Nivel del Mar (NDM) durante el siglo 21 usando proyecciones de modelos del CMIP5 considerando emisiones RCP8.5.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Obtener y analizar escenarios promedio para los años 2036-2065 y 2080-2100
- Analizar las tendencias lineales para nuestras proyecciones hasta el año 2100.
- Analizar los cambios de frecuencia y magnitud del fenómeno El Niño en nuestras proyecciones.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. CAMBIO CLIMATICO**

El cambio climático según el IPCC se refiere al cambio en el estado del clima que puede ser identificado (por ejemplo, usando pruebas estadísticas) por cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste por un periodo extendido, usualmente décadas o más. Se refiere a cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana (IPCC, 2022).

Este uso difiere del de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), donde el cambio climático se refiere a un cambio del clima que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmosfera global y que esta en la variabilidad climática natural observada durante periodos de tiempo comparables (IPCC,2022).

### **2.2. CMIP5**

En Setiembre del 2008 alrededor de 20 grupos de modelamiento climático alrededor del mundo se reúnen, El Grupo de trabajo en Modelamiento Acoplado (WGCM) del Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP), con la ayuda del proyecto Análisis, Integración y Modelamiento del Sistema Tierra (AIMES) del Programa Internacional de Geosfera-Biosfera, para promover un nuevo conjunto de experimentos con modelos climáticos. Estos experimentos comprenden la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5). Estos experimentos son realizados para llenar vacíos en el entendimiento de cambios en el clima pasados y futuros. El CMIP5 provee contexto para:

- 1) Evaluar los mecanismos responsables en la diferencia a la hora de modelar las retroalimentaciones del ciclo de carbono y con las nubes.
- 2) Examinar la “predictibilidad” climática y explorar la capacidad de predicción de modelos a escalas decadales.
- 3) Determinar por qué los modelos forzados de forma similar muestran tan amplio abanico de respuestas.

Es esperado que las preguntas científicas que aparecen en El Cuarto Reporte de Evaluación (AR4) del Panel Intergubernamental del Cambio Climático sean evaluadas

con el CMIP5 para que al final sean publicadas en el Quinto Reporte de Evaluación (AR5). Estas simulaciones pueden ser usadas de base para explorar y evaluar impactos y promover políticas de relevancia e interés para la sociedad (Taylor et al., 2012).

### **2.3. Trayectorias Representativas de Concentración (RCP)**

Las Trayectorias Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés) son escenarios utilizados en el ámbito del cambio climático para describir diferentes posibilidades de emisiones de gases de efecto invernadero y sus consecuencias en el clima global. Estas trayectorias permiten analizar cómo diversas decisiones humanas y factores socioeconómicos influyen en los niveles futuros de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y, por lo tanto, en el calentamiento global y sus impactos ambientales (IPCC, 2014).

### **2.4. FENOMENO EL NIÑO**

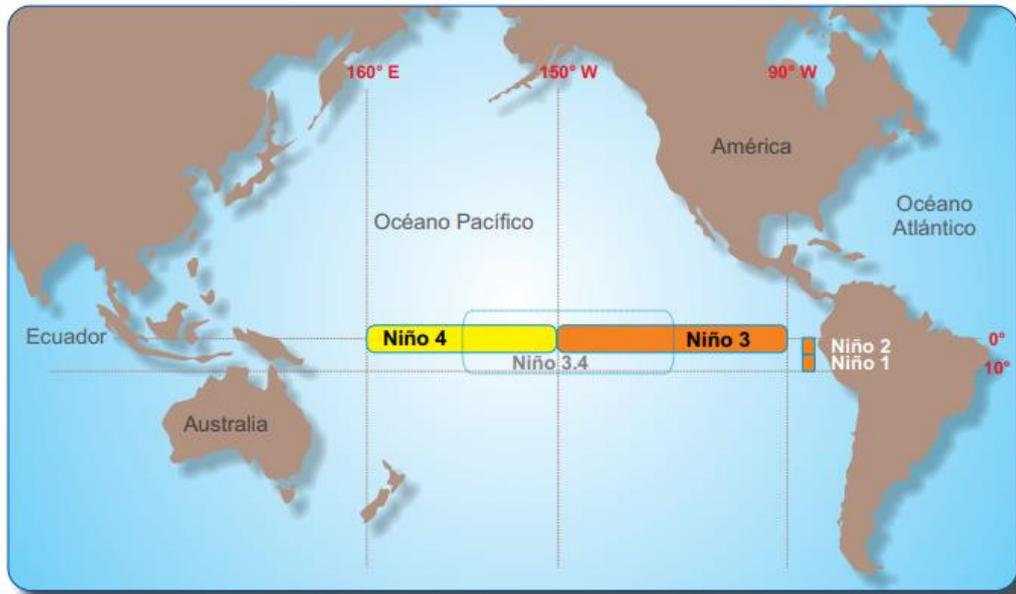
El significado del fenómeno El Niño ha ido cambiando a lo largo de los años. En algunos países de Sudamérica como Perú y Ecuador, se denomina “El Niño” al incremento de la TSM en el litoral de la costa oeste de Sudamérica con ocurrencia de lluvias intensas. Antes, era considerado como un fenómeno local. Actualmente, se le reconoce como el principal modulador de la variabilidad climática interanual en todo el mundo.

El término “El Niño” comprende los cambios observados en la TSM en el Pacífico ecuatorial central, así como los cambios de la presión atmosférica en el Pacífico, desde Australia (Darwin) hasta Tahití (Pacífico tropical central-oriental).

En los últimos años, para centrar la atención en el proceso de la evolución de las temperaturas de la superficie del océano y en los vientos, los científicos han sectorizado la franja ecuatorial del Océano Pacífico en cuatro cuadrantes. La mayoría de ellos concentran su atención en los cuadrantes Niño3 y Niño3.4 para tratar de comprender la formación de este fenómeno (SENAMHI, 2014).

La administración Nacional para el Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos de Norteamérica – NOAA, utiliza el Índice Oceánico El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) para la identificación de El Niño y La Niña. Este índice se calcula promediando 3 meses

consecutivos la serie mensual de las anomalías de la temperatura superficial medidas en el Pacífico Tropical en la Región El Niño 3.4 (5°N- 5°S, 120°-170W) (Ver Figura 1).



**Figura 1:** Regiones utilizadas para el análisis del ENSO (NOAA) –  
**FUENTE:** SENAMHI (2014)

El Niño - Oscilación del Sur (ENSO) es un evento natural de la variabilidad climática en el que se interrelacionan el océano y la atmósfera en la región tropical del Océano Pacífico. Este término se hizo conocido a partir de los años ochenta, cuando la comunidad científica demostró que había una interacción entre el océano y la atmósfera que lo explicaba. La fase cálida del ENSO corresponde a El Niño, mientras que la fase fría del ENSO, corresponde a La Niña (SENAMHI, 2014).

Durante la fase cálida del ENSO (El Niño), la atmósfera tropical se calienta y humedece alterando las zonas de tormentas, las que se desplazan hacia el Pacífico oriental (costa sudamericana).

## 2.5. NIÑO MODOKI Y CANONICO

El “Niño Modoki” se le conoce como una variante de “El Niño”, cuando las aguas cálidas se concentran en el centro del Océano Pacífico Tropical y no desde la zona costera de Perú hacia el oeste. Este tipo de “El Niño” genera muchas alteraciones a nivel global con cambios significativos en diversos tipos de ecosistemas.

Al contrario, eventos del tipo “Niño Canónico”, en función de su evolución temporal. Es decir, cuando el calentamiento del mar se inicia en la costa peruana y se extiende hacia el oeste, con un máximo de calentamiento en el Pacífico central-oriental.

## **2.6. REVISION BIBLIOGRÁFICA**

Para evaluar las proyecciones futuras se tomó en consideración trabajos anteriores. Por ejemplo, para darnos un contexto de la evolución de los modelos del CMIP, en Yeh, S. et al (2012) se nos muestra como en el CMIP5 la tendencia positiva ha sido reducida en el Pacífico tropical con respecto a los modelos del CMIP3. También que ha pasado de tener en el histórico más eventos la Niña a uno de más episodios del Niño.

Por otro lado, ha sido muy debatido el factor de confiabilidad en la tendencia de la TSM debido al bias negativo que se tiene en la mayoría de modelos en la “lengua fría” (cold tongue), siendo esto causante de cambiar parte de la dinámica en la zona tropical. En Olonscheck, D. (2020), se hace un recuento de estos debates para poder tener una noción más clara y como un análisis de la variabilidad interna puede darnos pistas más claras de lo que sucede, reforzando finalmente la viabilidad de estos datos.

En Dong (2014) se analiza si el enfriamiento que sucede desde el año 1979 en el Pacífico Tropical Este es consistente con otras variables atmosféricas e índices. El autor determina este suceso como consistente físicamente.

En Cai et al. (2015), podemos sacar análisis previos del comportamiento del ENSO en escenarios de cambio climático. Dándonos explicaciones físicas con respecto a el aumento en la frecuencia de eventos el Niño y la Niña. Además, nos da ejemplos de cambios en la media que pueden alterar la dinámica en la zona tropical del pacífico. Mientras que, en Cai, W. et al (2018) se encuentra evidencia del aumento en la variabilidad futura del EP-ENSO. De este último estudio, se usará parte de su metodología para nuestros propósitos de evaluación (índice E y C) del Niño y La Niña en el presente estudio.

Con respecto a nivel medio del mar, podemos observar como en Aucan, J. (2018) se hace un análisis tomando en consideración las islas del Pacífico. En este estudio se observan de forma regional para el periodo 2081-2100 (referencia 1986-2005) un cambio de 0.6 a 0.8 m para el Pacífico Oeste Central en la proyección RCP 8.5.

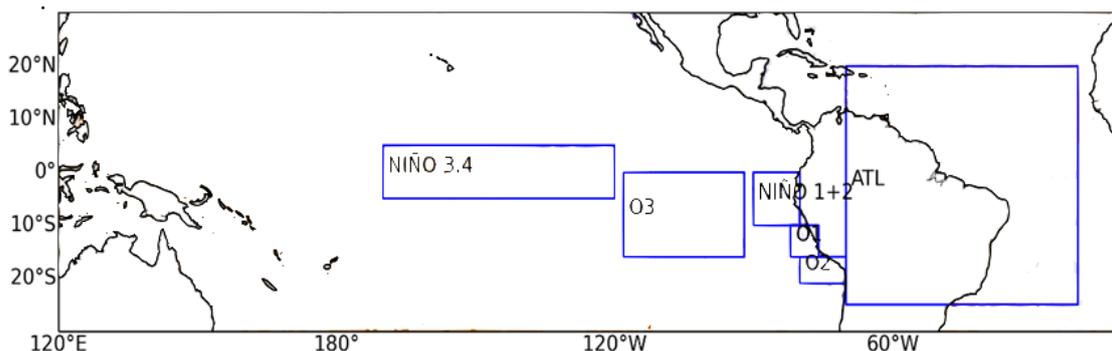
### III. DESARROLLO DEL TRABAJO

El presente estudio es de tipo monográfico, considerando los análisis y distintos gráficos realizados en el marco de una consultoría realizada en el SENAMHI.

#### 3.1. AREA DE ESTUDIO

El área de estudio determinado para el presente trabajo está centrada en el Océano Pacífico Tropical con los límites entre 30°N - 30°S y 120°E - 60°O. Además de esta área, se definen áreas propias para un estudio más sectorizado, además de los ya conocidos para estudios oceánicos del ENSO en la región (Ver Figura 2). Estos sectores son:

- **Niño 1+2:** 0 - 10°S y 90°O - 80°O
- **O1:** 10°S - 16°S y 82°O - 76°O
- **O2:** 16°S - 21°S y 80°O - 70°O
- **Niño 3.4:** 5°N - 5°S y 170°O - 120°O
- **O3:** 0° - 16°S y 118°O - 92°O
- **ATL:** 20°N - 25°S y 70°O - 20°O



**Figura 2:** Sectores de análisis oceánico para el presente estudio

#### 3.2. DATOS

Los datos del CMIP5 que se toman para el estudio están distribuidas según la tabla 1.

En total se consideran 16 modelos bajo el escenario de emisión RCP 8.5, los cuales poseían las variables “tos” que hace referencia a la TSM. Sin embargo, las variables para analizar

NDM (zos, zosga, zossga y zostoga) no están completas en la página fuente del World Climate Research Program (WRCP) (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>).

Por ello, para el análisis del NDM se reduce la cantidad de modelos evaluados según la disponibilidad (Ver Tabla 1).

**Tabla 1:** Lista de variables del CMIP5 disponibles para el estudio

MODELOS	Variables				
	tos	zos	zosga	zossga	zostoga
ACCESS1-0	SI	SI	SI	SI	SI
bcc-csm1-1	SI	SI	SI	SI	SI
CanESM2	SI	SI	SI	SI	SI
CESM1-CAM5	SI	-	-	-	-
CMCC-CM	SI	SI	SI	-	-
CSIRO-Mk3-6-0	SI	SI	-	-	SI
EC-EARTH	SI	SI	-	-	-
GFDL-ESM2M	SI	SI	SI	-	-
GISS-E2-R	SI	SI	SI	-	SI
HadGEM2-ES	SI	SI	-	SI	SI
IPSL-CMI5A-LR	SI	SI	SI	SI	SI
MIROC5	SI	SI	SI	SI	SI
MPI-ESM-LR	SI	SI	SI	SI	SI
MPI-ESM-MR	SI	SI	SI	SI	SI
MRI-CGCM3	SI	SI	SI	SI	SI
NorESM1-M	SI	SI	SI	SI	SI

En el caso de los datos observados se toma lo que se tiene a disposición en el Climate Data Store de COPERNICUS (<https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>). De esta base se descarga la TSM del reanálisis ERA5 el cual nos sirve como observado. Estos datos de TSM tienen como base el producto “Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis” (OSTIA) como se indica en Luo, B. (2020).

Para la información observada del NDM se toma en consideración los datos del Laboratorio para Altimetría Satelital de la NOAA/STAR (LSA):

[https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries.php)

Esta base contiene información concatenada en el tiempo de distintos altímetros como TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1, Jason-2, y Jason-3 los cuales poseen información desde

mediados de 1992 al presente. Estos datos poseen corrección de Barómetro Invertido (BI) pero no incluye el Ajuste Isostático Glacial (AIG o GIA).

### 3.3. OBTENCIÓN DE VARIABLES PARA EVALUACIÓN DE NDM.

Durante el análisis del NDM, sabiendo que la variable “ZOS” es indicativo del cambio dinámico del nivel del mar (debido a las corrientes, cambios en mareas, etc.) y las variables “ZOSGA” y “ZOSTOGA” que solo tienen la dimensión temporal (que representan el cambio global promedio del nivel del mar); se realiza la exclusión de la media global de “ZOS” para que sea reemplazada por “ZOSGA” (cambio total) o “ZOSTOGA” (cambio solo debido a componentes termales) por cada paso de tiempo, (en este caso solo se usó la variable “zostoga” si no se disponía de “zosga”). De esta forma se tiene en consideración tanto la parte dinámica como los cambios expansivos globales en la media del NDM. (Ver [https://pcmdi.llnl.gov/ipcc/standard\\_output.html](https://pcmdi.llnl.gov/ipcc/standard_output.html) para más detalle de las variables). El Método empleado para la obtención del cambio del nivel del mar explicado fue extraído de Richter et al (2017).

Debemos tener en cuenta que en el caso de las variables del NDM hay que ser cuidadoso pues estas conllevan una serie de correcciones (Barómetro Invertido, Corrección del Drift y El Ajuste Glacial Isostático) que son necesarias para su análisis definitivo. En este estudio se dan los primeros alcances de los que nos muestran los modelos sin dichas correcciones ya que la prioridad estuvo en el análisis de TSM y sus variaciones.

### 3.4. BIAS

Bias o error medio, mide la diferencia media entre los datos simulados y observados.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Pronosticado}_i - \text{Observado}_i$$

Dónde:

- N: Total de datos.
- Pronosticado: Valores simulados por el modelo.
- Observado: Valores obtenidos por observación.

### 3.5. CAMBIOS Y TENDENCIA LINEAL

Los cambios se determinaron considerando la diferencia entre distintos periodos de años. Estas medias fueron sometidas a la prueba “t” para muestras independientes, para así determinar si las medias son significativamente diferentes con un alfa (nivel de significancia) del 5%.

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}}$$

Dónde:

- $\bar{X}_1$  = media observada del primer rango de años.
- $\bar{X}_2$  = media observada del segundo rango de años.
- S1= Desviación estándar del primer rango de años.
- S2= Desviación estándar del segundo rango de años.
- n1= Cantidad de daños del primer rango.
- n2= Cantidad de daños del segundo rango.

Para el caso de la tendencia lineal se usó la regresión lineal usando la prueba “t” para evaluar la hipótesis nula si la pendiente es cero (es decir, no hay tendencia). También se utilizó el 5% de significancia. Estos cálculos fueron realizados utilizando la librería de Python “scipy”.

### 3.6. INDICE “ONI”

El índice ONI nos permite indicar si la distribución de calentamiento de la TSM en el océano pacífico Ecuatorial tiene formación para eventos El Niño o La Niña. Está definido como la media móvil de 3 meses consecutivos de anomalías de TSM en la región Niño 3.4. Se recomienda tener en consideración 30 años como base climática para estas anomalías (NOAA, s.f.).

### 3.7. INDICE “E” y EOF’S

El índice “E” nos permite evaluar que tan canónico puede ser un evento el Niño. Es decir, que tan fuerte es el calentamiento a lo largo de las costas de Perú y Ecuador. Este índice esta detallado en Takahashi et al, 2011. Y se define calculando las componentes principales

asociadas a las EOF's sobre el área de -10S y 10N considerando las costas laterales del Océano Pacífico Ecuatorial (Para nuestro estudio se consideró 140E, -80W). Se define como:

$$E = \frac{(PC1 - PC2)}{\sqrt{2}}$$

Dónde:

- E: índice E.
- PC1 Y PC2: Primera y segunda componente principal.

Para el cálculo de las EOF's y las componentes principales se usó la librería de Python "eofs" (Dawson, 2016).

### **3.8. PROCEDIMIENTO**

El presente trabajo tiene la siguiente estructura:

#### **3.8.1. Análisis de TSM y NDM**

- Se realiza la comparación de modelos del CMIP5 con información observada o de Reanálisis. Especialmente observar que tan coincidentes son respecto a la tendencia lineal. Pues depende de que tan similar sea para tener mayor confianza de estas simulaciones.
- Los análisis de TSM se realizan tomando en consideración los rangos de años 1981-2005, 2036-2065 y 2080-2100, para indicar distintos periodos de tiempo. De esta forma se evalúan distintos estadísticos y cambios significativos.
- Los análisis de NDM se realizan tomando en consideración los rangos de años 1981-2005, 2036-2065 y 2080-2100, para indicar distintos periodos de tiempo. De esta forma se evaluarán distintos estadísticos y cambios significativos.
- Se realiza una pequeña Intercomparación usando correlaciones y gráficos de dispersión de las variables evaluadas (TSM y NDM) durante el siglo 21.

#### **3.8.2. Análisis del ENSO**

- Se analiza el ENSO considerando los índices ONI y E para estimar cual es el cambio futuro de esta variabilidad en el Océano Pacífico Tropical. Se utilizan los rangos de años de 1981-2010, 2036-2065 y 2071-2100. Así también, para aplicar nuestros índices se quita la tendencia cuadrática a nuestros datos.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSION

Con respecto al análisis de los resultados, partimos desde la validación antes de llegar a las comparaciones futuras (proyecciones). Dando así un mejor contexto de la información obtenida. Es necesario saber que tan parecidos pueden llegar a ser los modelos de nuestra información de referencia.

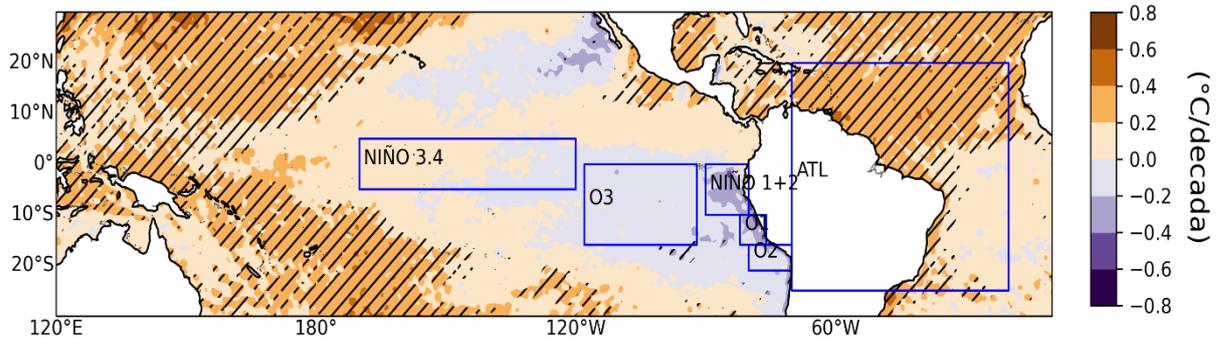
### 4.1. Validación TSM

En el marco de validación debemos tener en cuenta muchos términos que pueden alterar nuestros resultados. Uno de ellos es la selección del periodo de referencia. Si determinamos la tendencia lineal usando distintos periodos podríamos obtener resultados distintos. Por ejemplo, en la tendencia de anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) podemos observar que para el periodo 1981-2005 tenemos valores negativos en el Pacífico Este (PE) (Figura 3) cerca a las costas de Perú bordeando los valores negativos hasta  $-0.4$  °C/década. Estos valores negativos se extienden hasta la región del NIÑO 3.4. Sin embargo, si tomamos el periodo de 1950 -2005 podemos observar que los sectores mencionados anteriormente con tendencia negativa ahora tienen valores positivos llegando a valores de  $0.2$ °C/década (Figura 4). De la misma forma, en el caso del sector Atlántico (ATL) se observan tendencias de  $0.2$  a  $0.6$ °C/década (para 1981-2005) y en el periodo 1950-2005 una tendencia de  $0$  a  $0.1$ °C/década.

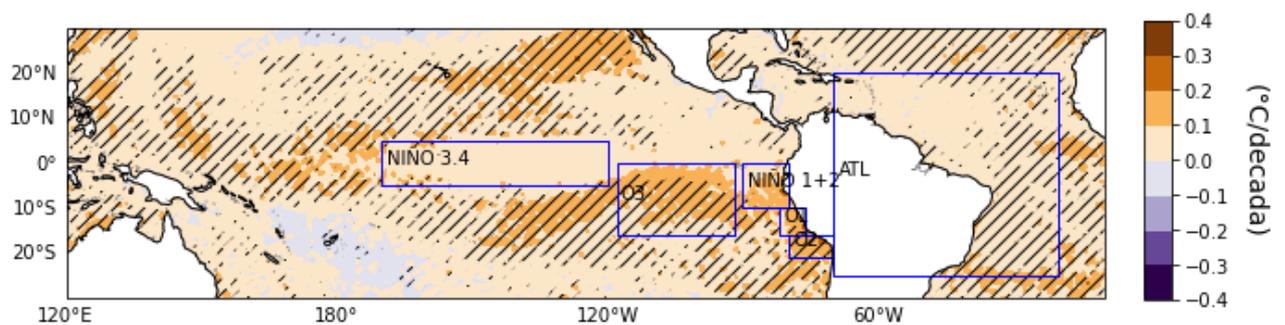
Si nos damos cuenta del comportamiento espacial abordando todo el Océano Pacífico Tropical (OPT) observamos que para el periodo 1981-2005 la tendencia entre el Pacífico Oeste (PO) y Pacífico Este (PE) está claramente marcada con calentamiento en la región PO y enfriamiento en PE. Por otro lado, en el periodo 1950-2005 observamos un comportamiento más homogéneo con respecto al signo (siendo positivo) en el OPT y con mayor calentamiento en el PE que en PO.

Un factor clave a tener cuenta es la significancia de la tendencia (Esta básicamente es la prueba t de student de doble cola al 5% de significancia estadística). Con esta podemos observar que dentro del periodo 1981-2005 este enfriamiento en el PE es no significativo

comparado a sus similares en el PO en donde si se tiene pruebas suficientes para afirmar una tendencia positiva. Del mismo modo, en el periodo 1950-2005 si observamos tendencias positivas en la mayor parte del OPT, siendo así las del PO las más resaltables. En el caso del ATL, si se observa tendencias significativas durante el periodo 1981-2005 mientras que en el periodo 1950-2005 no se puede afirmar que haya una tendencia en el norte de este sector.



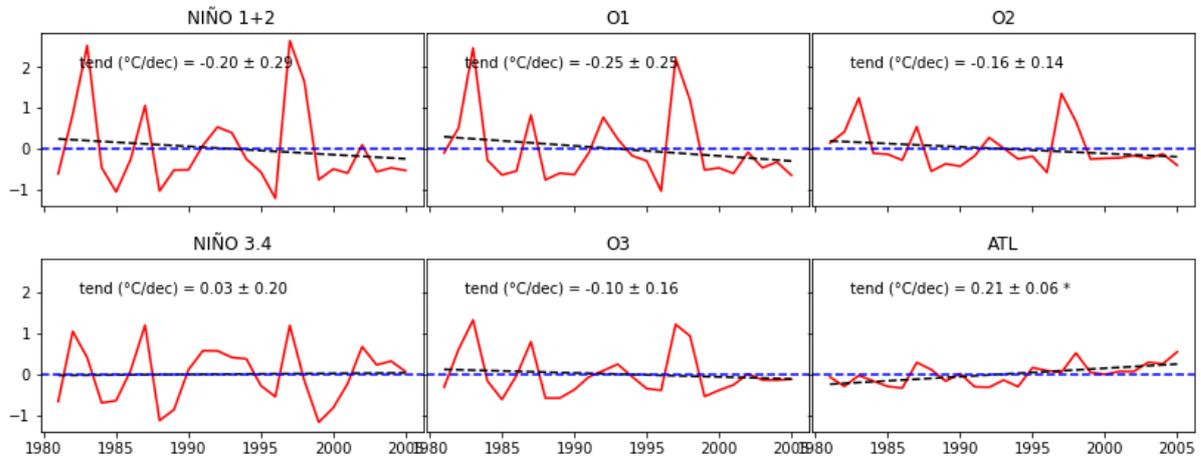
**Figura 3:** Tendencia lineal de las anomalías de TSM (°C/década) para el periodo 1981-2005 en los datos observados. En cuadros los sectores de análisis. En barras las tendencias significativas.



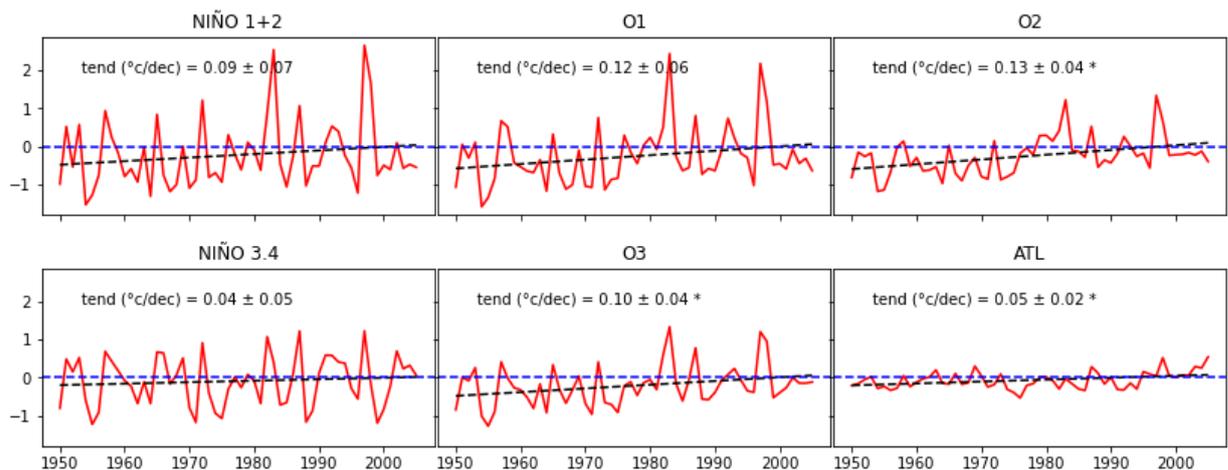
**Figura 4:** Tendencia lineal de las anomalías de TSM (°C/década) para el periodo 1950-2005 en los datos observados. En cuadros los sectores de análisis. En anexos (Figura 62) imagen con mayor resolución donde se puede apreciar el enfriamiento en la lengua fría “cold tongue”.

Si apreciamos este comportamiento con respecto a nuestras regiones de interés. Podemos observar como los valores anuales en el tiempo nos ayuda a explicar algunas características. Si bien en los años 1981-2005 podemos ver la tendencia negativa (Figura 5) no podríamos generalizar que la TSM se está enfriando por la misma no significancia ya que en este periodo se tuvo dos eventos Niño de gran importancia en los años 1982-1983 y 1997-1998 que pueden enmascarar la tendencia en un periodo corto (25 años en este caso). Existen algunos estudios que por otro lado corroboran este enfriamiento con múltiples variables físicas y su consistencia (Dong, L., 2014). Por otro lado, se puede observar claramente en el periodo de 1950-2005 el incremento en las anomalías de TSM (Figura 6) resultan significativas en la Región O2, O3 y ATL. A diferencia del periodo de 1981-2005 donde el único sector con tendencia significativa es ATL. La tendencial lineal nos permite evaluar

cambios, pero debemos tener en consideración sus limitaciones en el análisis de patrones más complejos.



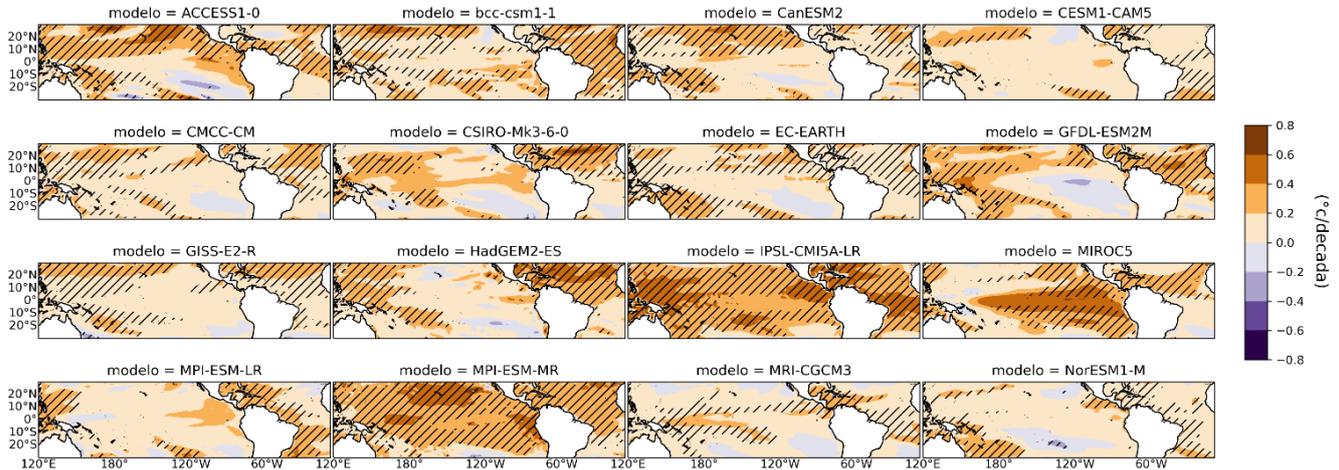
**Figura 5:** Tendencia de las anomalías de TSM para el periodo 1981-2005 en los datos observados. Con su valor promedio por sector en líneas rojas, línea de tendencia en línea negra punteada y el valor de 0 de anomalía en línea azul punteada. Valores significativos indicados con un “\*”.



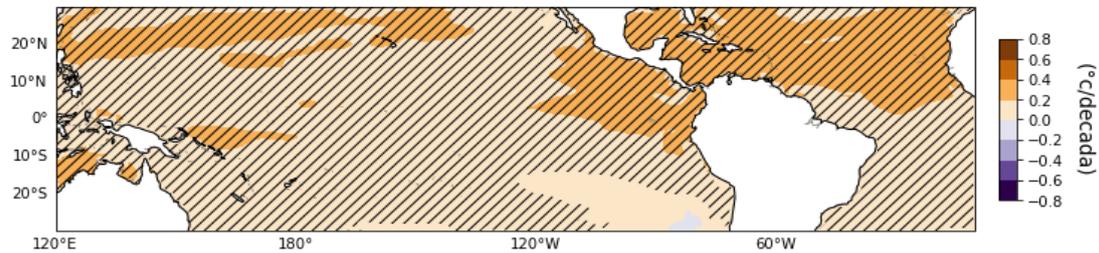
**Figura 6:** Tendencia de las anomalías de TSM para el periodo 1950-2005 en los datos observados. Con su valor promedio por sector en líneas rojas, línea de tendencia en línea negra punteada y el valor de 0 de anomalía en línea azul punteada. Valores significativos indicados con un “\*”.

Si observamos la tendencia a nivel de los 16 modelos del CMIP5 en evaluación podemos decir que el calentamiento es resaltante en el periodo 1981-2005 a diferencia de los observados (Figura 7). Además, este calentamiento varía entre los modelos siendo el comportamiento más común el aumento en el PE y norte del sector ATL. Si tomamos el promedio de estos (Figura 8 y 9), observamos que el calentamiento es predominante para este periodo llegando a ser de entre 0 y 0.4° C/década en el caso de la región tropical. Cabe recalcar que algunos modelos muestran tendencias negativas, pero estas son no significativas. Siendo en el promedio de modelos que, solo la zona sur del PE la que no muestra significancia estadística.

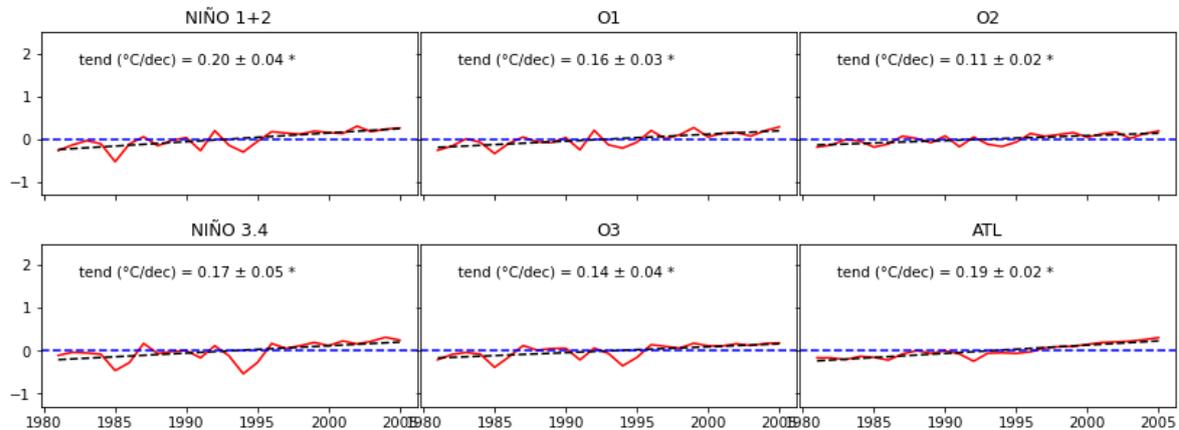
Haciendo un balance entre los sectores observados y los modelos del CMIP5 para el periodo 1981-2005, podemos señalar que las tendencias mayores (positivas, considerando solo las significativas) en los observados se encuentran en el sector ATL ( $0.21^{\circ}\text{C}/\text{década}$ ); mientras que, en los modelos observamos que la región Niño 1+2 es la más resaltante con  $0.2^{\circ}\text{C}/\text{década}$ .



**Figura 7:** Tendencia lineal de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 durante el periodo 1981-2005. Valores significativos indicados con un “//”.

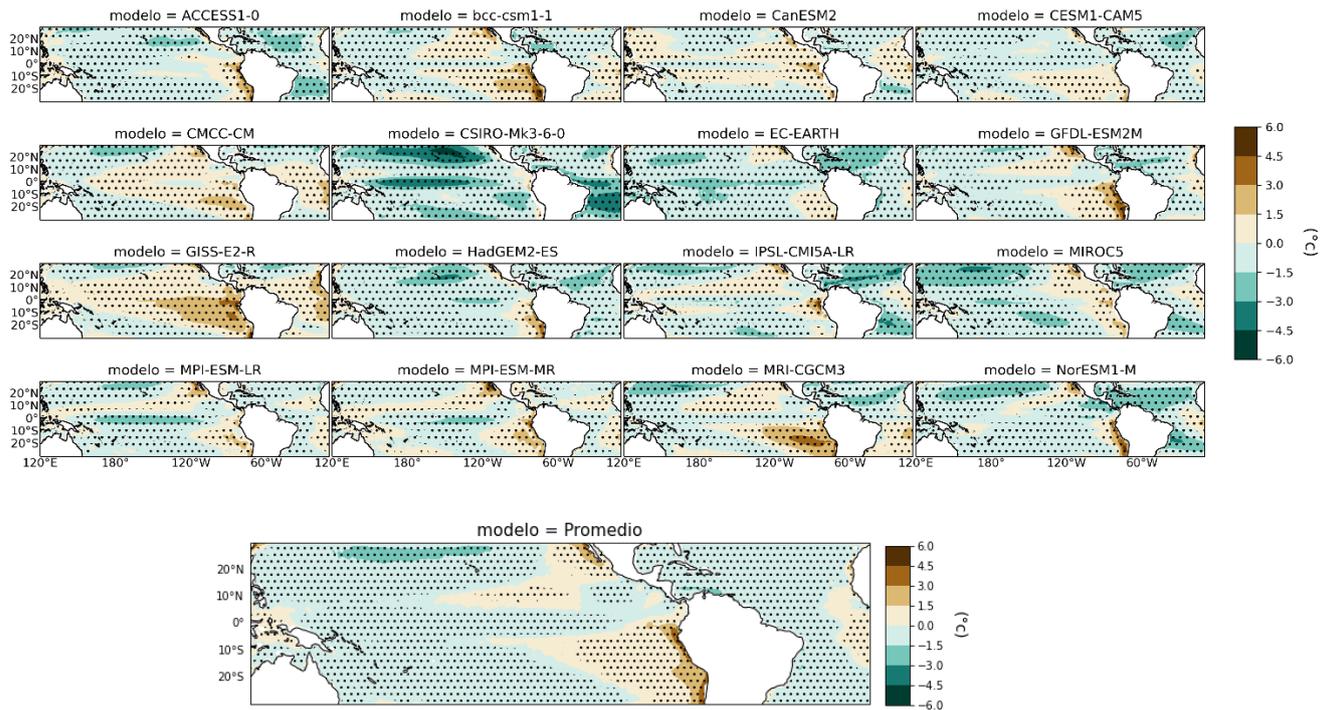


**Figura 8:** Tendencia lineal de las anomalías de TSM en el promedio de los modelos del CMIP5 durante el periodo 1981-2005. Valores significativos indicados con un “//”.



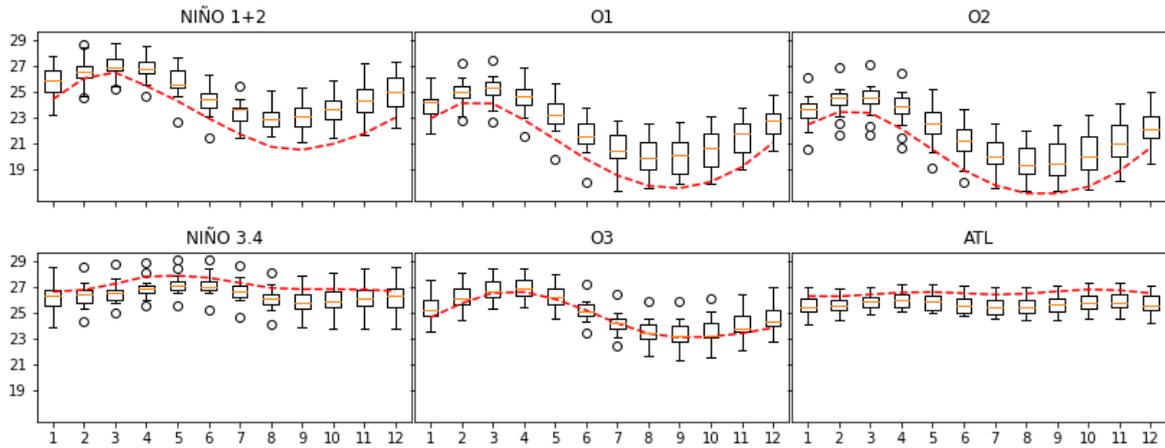
**Figura 9:** Tendencia lineal de las anomalías de TSM en el promedio de los modelos del CMIP5 durante el periodo 1981-2005. En líneas rojas el valor promedio anual, en línea negra punteada la recta de tendencia y en línea azul punteada el valor de  $0^{\circ}$  de anomalía. Valores significativos indicados con un “\*”.

En el caso del BIAS podemos observar que existe una sobrestimación en el PE cerca a las costas de Perú, y subestimación en el Pacifico Central en la mayor cantidad de modelos. Estos valores pueden llegar a estar entre los 6 y -6° C (Figura 10). Se debe tener cuidado con estos valores de bias ya que en alguna medida podrían cambiar la dinámica océano – atmósfera. Resaltamos que el modelo CSIRO-Mk3-6-0 es el que tiene mayores subestimaciones a nivel espacial y en magnitud. Estos aumentos de temperatura podrían traernos algunos cambios en la disponibilidad de vapor de agua y en circulación de viento.



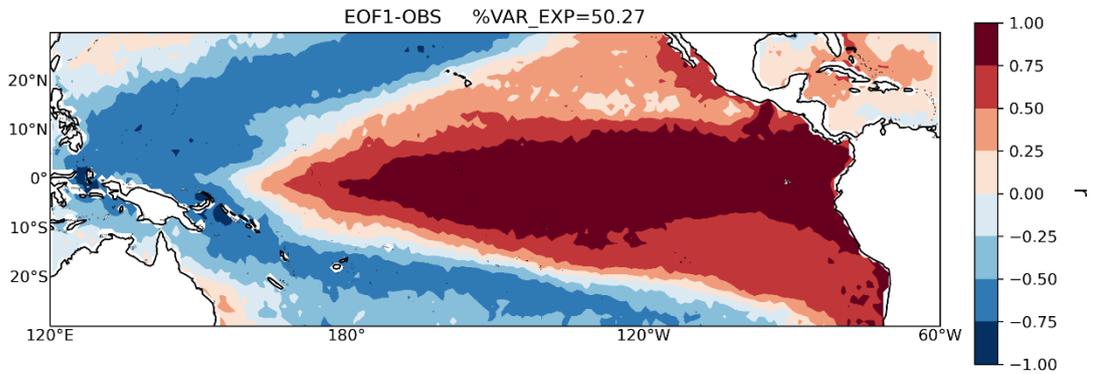
**Figura 10:** Bias de la TSM para los modelos del CMIP5 en el periodo 1981-2005. Valores significativos indicados con un “\*”.

En el ciclo anual observamos que en general las temperaturas de los modelos sobrestiman lo observado (Figura 11). Siendo así para el NIÑO 1+2 los meses invernales y primavera donde se sobrestima en mayor magnitud. La zona del NIÑO 3.4 y ATL muestran que el rango intercuartil de los modelos está por debajo de lo observado dándonos la indicación de subestimación en esta zona. Finalmente, la región que más se acerca a los valores observado es la O3.

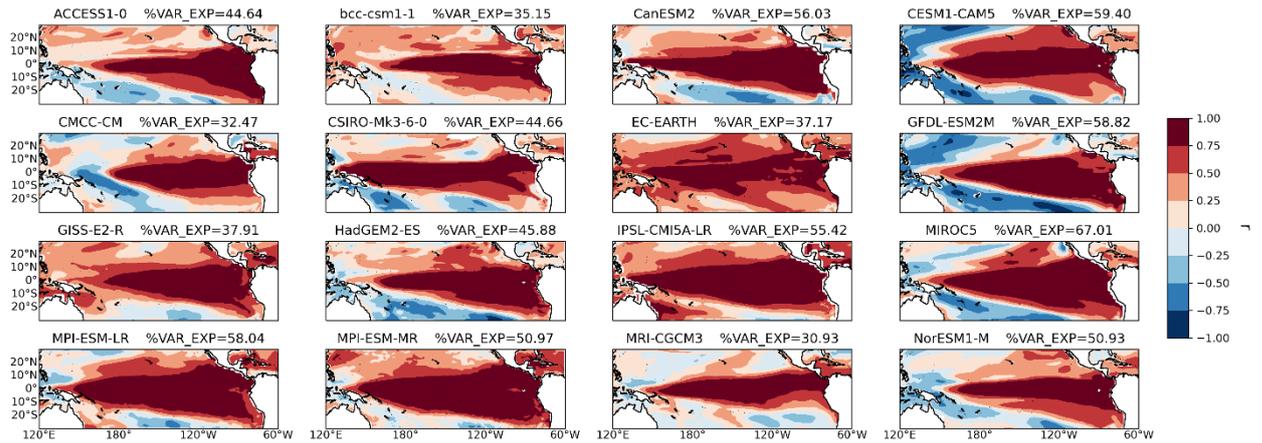


**Figura 11:** Ciclo anual de los modelos del CMIP5 en diagrama de cajas y en línea roja los datos observados para el periodo 1981-2005.

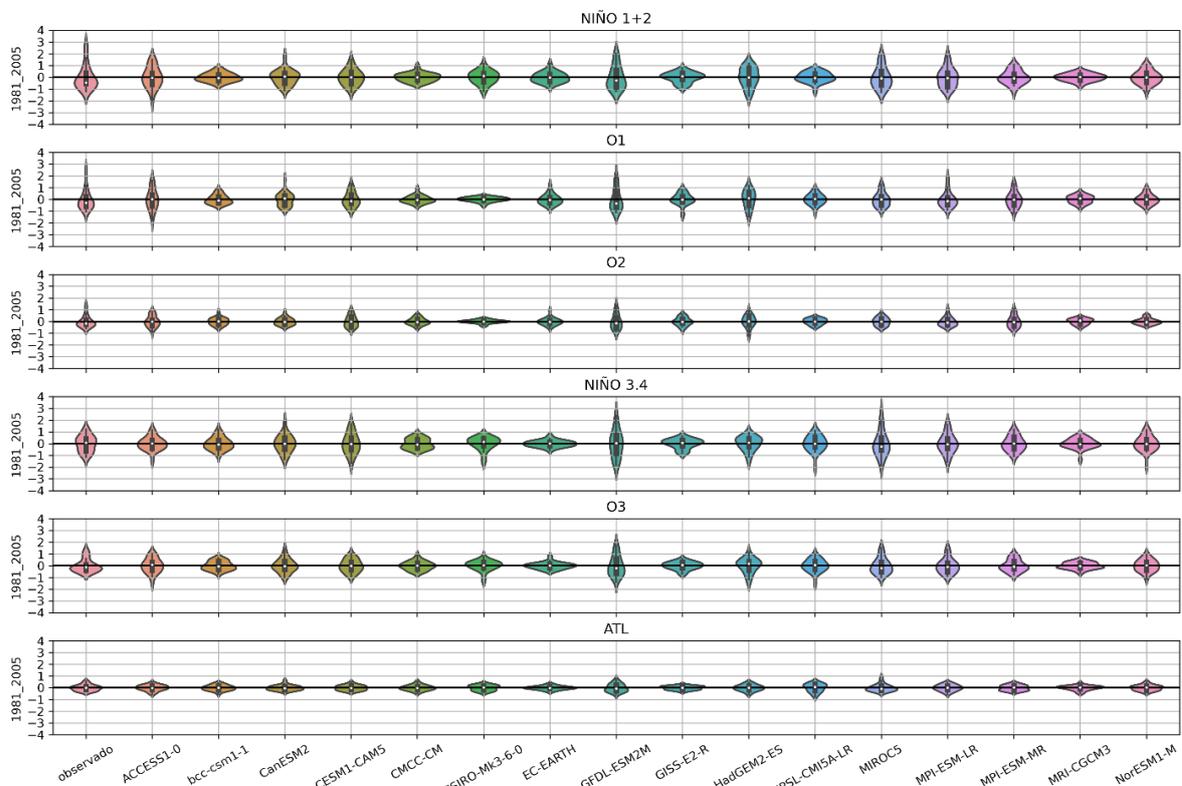
Realizando la evaluación del primer modo de variabilidad (EOF1) notamos en los datos observados la señal inversa entre el PE y central con el PO como la predominante (ENSO característico) (Figura 12). Este modo de variabilidad en los modelos (Figura13) tiende a tener el mismo patrón siendo en algunos EC-EARTH el más incongruente dándonos una señal del mismo signo para toda la zona de estudio. Es importante que la EOF1 tenga similitud con el observado ya que esta nos explica un modo de variabilidad física muy importante para los procesos dinámicos océano atmosfera a escala global.



**Figura 12:** EOF1 en forma de correlación de las anomalías de TSM en los datos observados indicando la variancia explicada en porcentaje. Periodo 1981-2005.



**Figura 13:** EOF1 en forma de correlación de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 indicando la variancia explicada en porcentaje. Periodo 1981-2005.



**Figura 14:** Gráfico tipo violín que indica el diagrama de cajas y la distribución de las anomalías de TSM para el periodo 1981-2005 en los distintos sectores de análisis para cada modelo y observado.

Si observamos la distribución de los datos (Figura 14), el modelo más similar al observado resulta ser el GFDL-ESM2M (seguido del MIROC5, MPI-ESM-LR Y ACCESS1-0) para las distintas regiones. Podemos observar también que algunos modelos no llegan a captar anomalías grandes como si lo muestra el observado, teniendo al final valores más homogéneos en torno a los 0°C de anomalía. Esto nos puede dar a entender que, si existe el evento del Niño en estos modelos, no es tan severo como en nuestros datos observados.

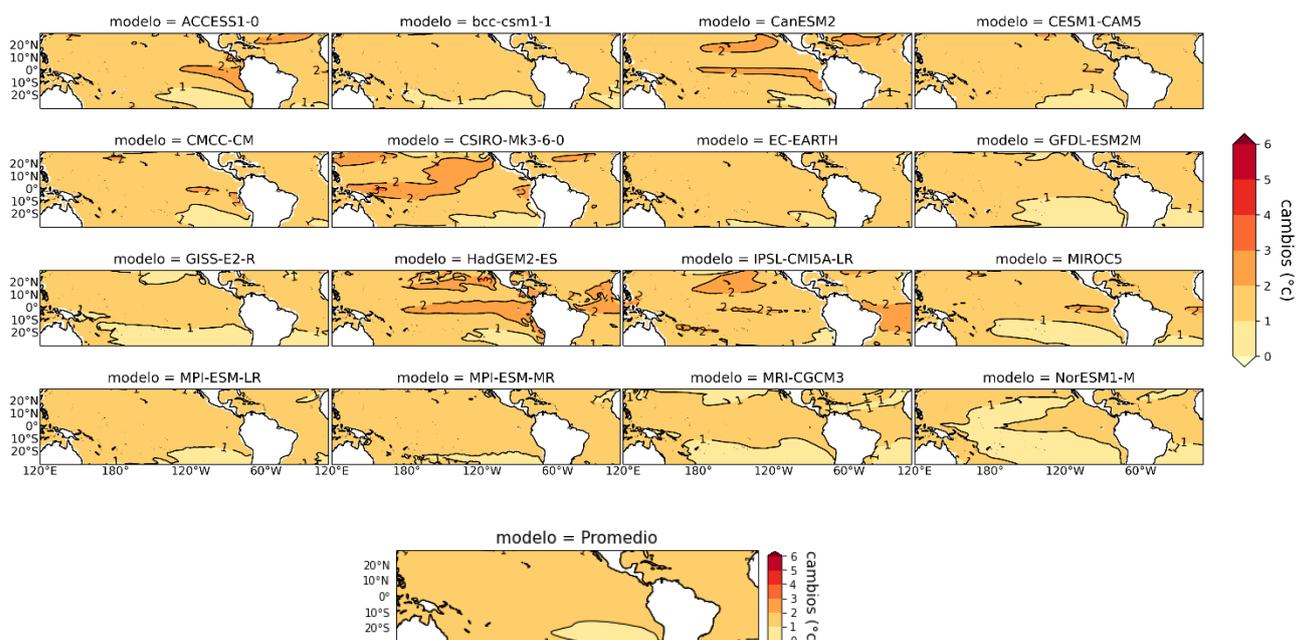
Para nuestros fines de evaluar las proyecciones futuras la validación es una parte importante del análisis porque nos provee de posibles explicaciones a comportamientos futuros (con las tendencias) y su aproximación a lo que podría ocurrir en comparación a los observados. Nos deja más claro cuál es la diferencia entre el mundo del modelo y el mundo de nuestros datos observados.

## 4.2. Proyecciones Futuras de la TSM

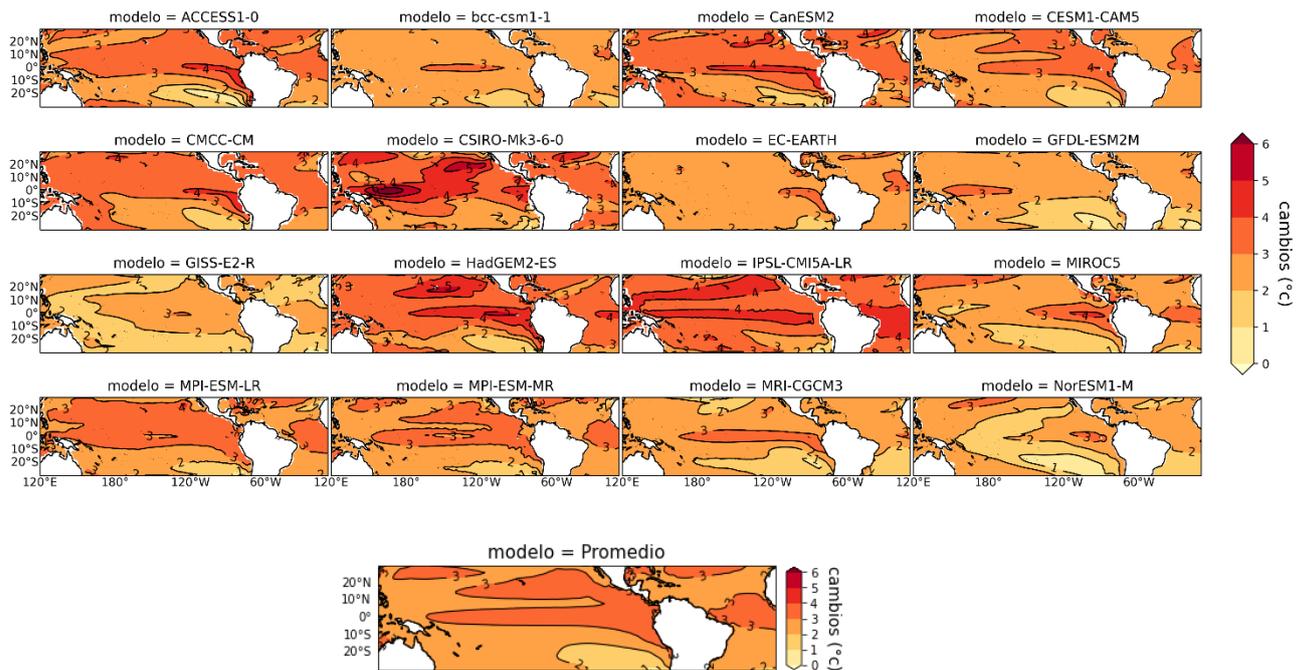
Para las proyecciones futuras la evaluación se centró en los años 2036-2065 y 2080-2100 para obtener los cambios con respecto al periodo de referencia 1981-2005.

Los cambios centrados en los años 2036–2065 muestran valores de hasta 3°C, siendo las latitudes más cercanas a 0° las que mayor cambio positivo poseen (Figura 15). El modelo HadGEM2-ES nos muestra mayores valores de cambio positivo, más predominantes en el PE. En el caso de los cambios al año 2080-2100 podemos observar cambios de un máximo de ~6°C, siendo ~4°C de cambio predominante en el PE (Figura 16).

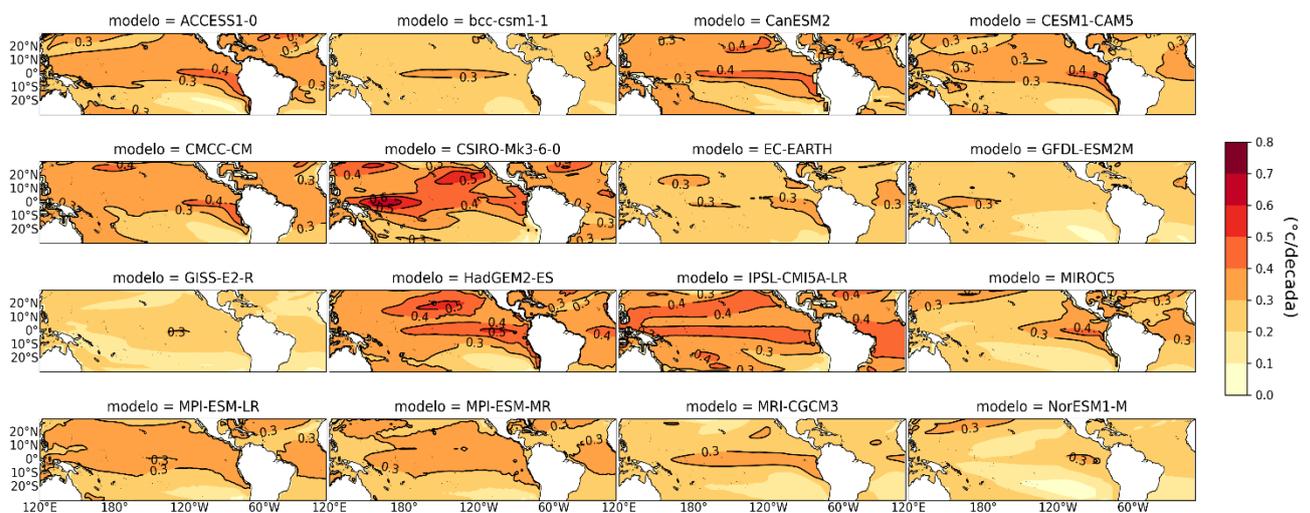
Si observamos el ratio de cambio en una tendencia lineal (Figura 17), las latitudes bajas se calientan más rápido que latitudes altas. De aquí también podemos notar que el PO tiende a tomar valores inferiores con respecto al PE. Esto nos indica mayor calentamiento en las costas de Perú que en las costas de Australia. Además, debemos recalcar que todos los cambios y tendencias en estos mapas resultaron significativos.



**Figura 15:** Cambios de la TSM en promedio para los años 2036-2065 con respecto a 1981-2005 en los modelos del CMIP5.

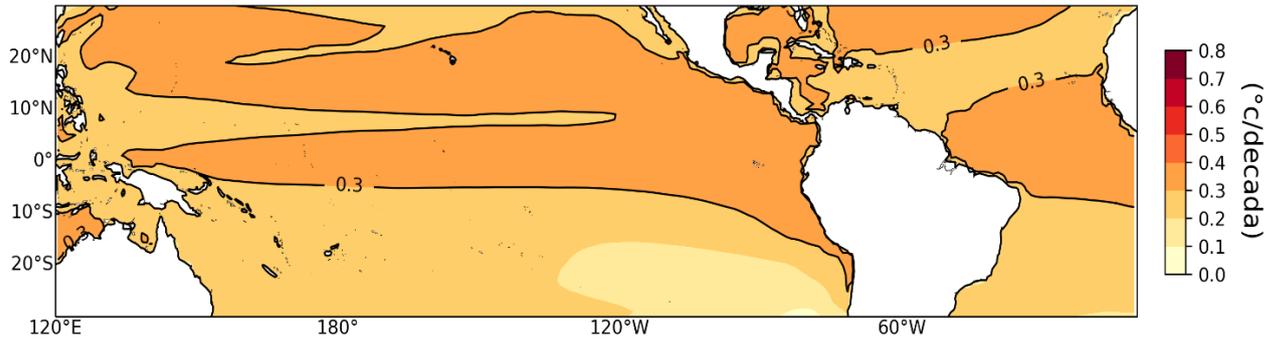


**Figura 16:** Cambios de la TSM en promedio para los años 2080-2100 con respecto a 1981-2005 en los modelos del CMIP5.



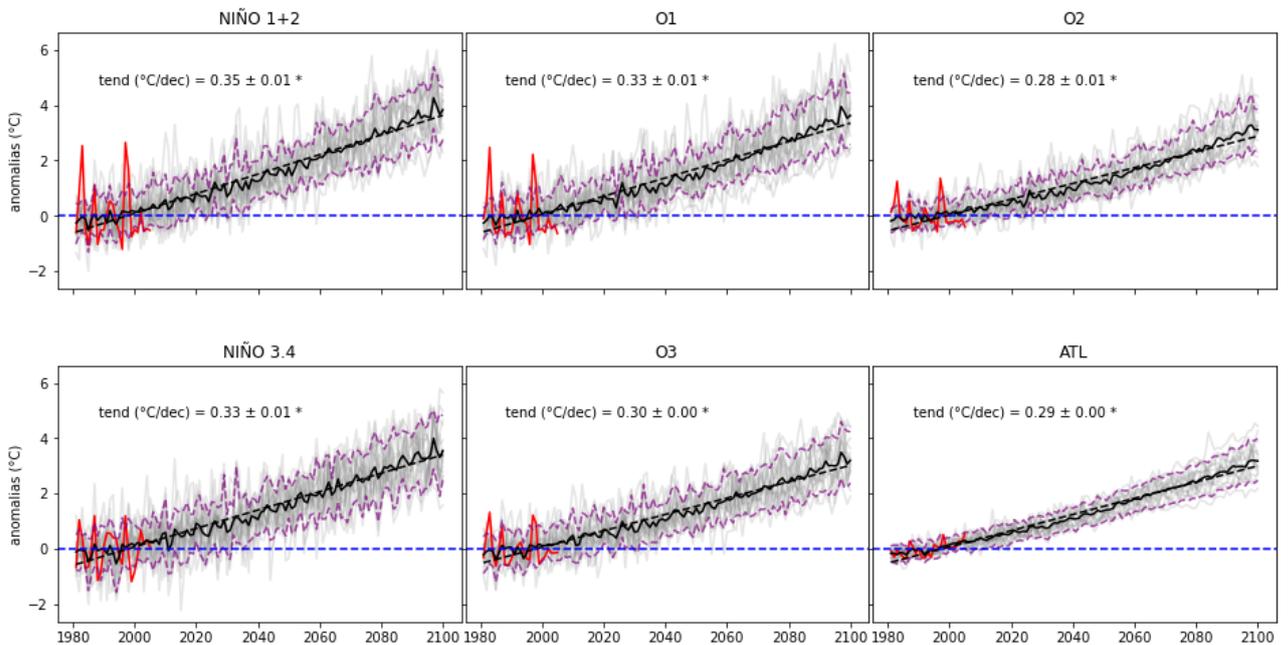
**Figura 17:** Tendencia lineal de anomalías de TSM para el periodo 1981-2100 en los modelos del CMIP5.

Si realizamos el promedio de los modelos y determinamos la tendencia lineal podemos observar claramente el patrón de mayor calentamiento en PE, en comparación con PO (Figura 18). La tendencia lineal a esta escala de tiempo (mayor de 100 años) sí puede resultar más confiable debido a los pocos procesos de variabilidad que podrían interferir en esta escala.



**Figura 18:** Tendencia lineal de anomalías de TSM para el periodo 1981-2100 en el promedio de modelos del CMIP5.

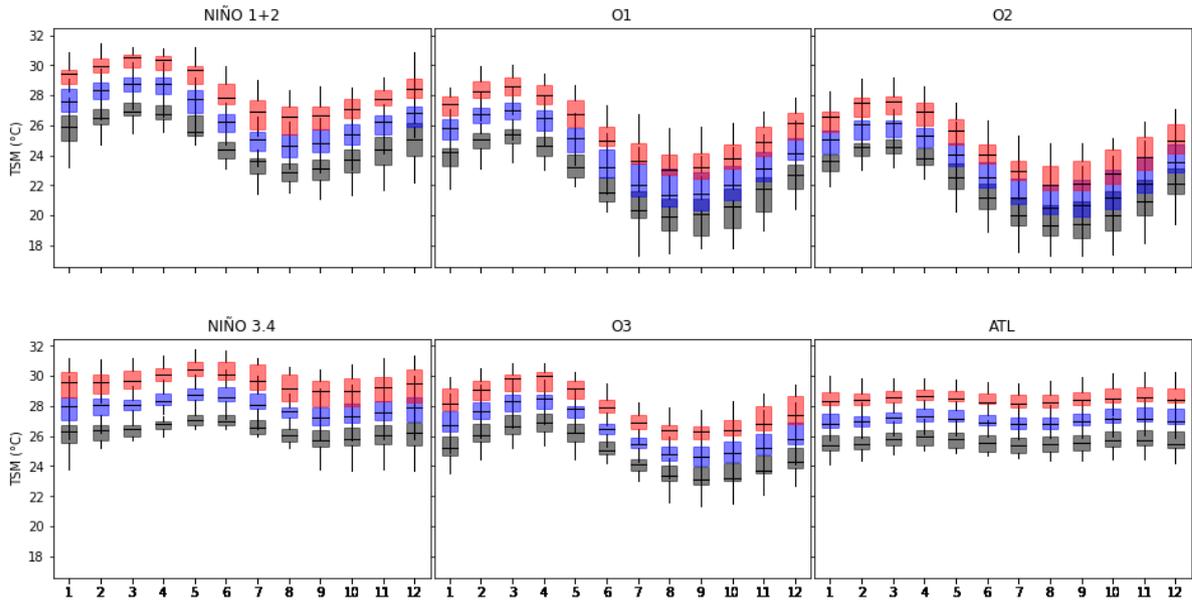
Si analizamos las tendencias por sectores (Figura 19) podemos ver que en la región NIÑO 1+2 tenemos el mayor calentamiento con una razón de  $0.35^{\circ}\text{C}/\text{década}$  en el promedio de modelos. Por otro lado, al aumentar la latitud empieza a disminuir esta tendencia (regiones O1 y O2). Cabe destacar que los observados muestran anomalías más altas en latitudes menores. Todas estas tendencias resultan significativas dándonos cada 30 años un aproximado aumento de  $1^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 19:** Anomalías de TSM de todos los modelos en líneas grises, del promedio en líneas negras, en líneas negras punteadas la recta de tendencia y en punteadas moradas el percentil 10 y 90. Finalmente, en líneas rojas los datos observados. Valores significativos indicados con un “\*”.

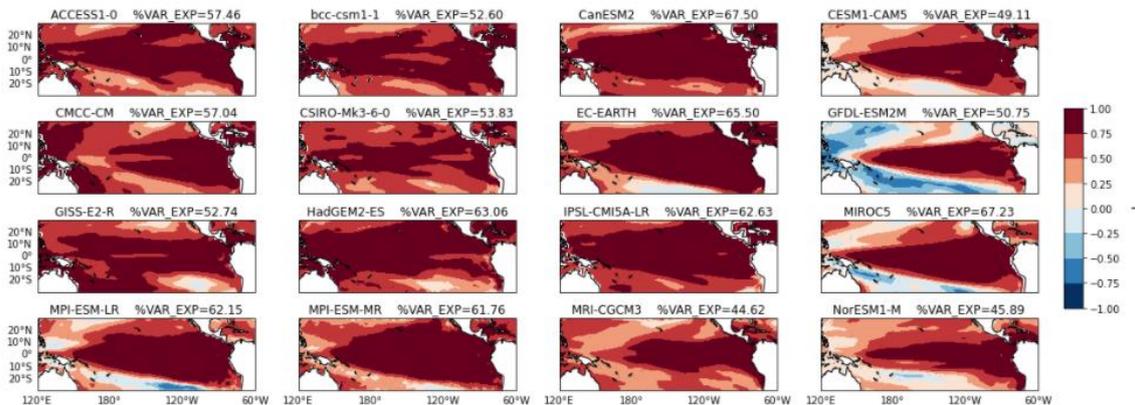
En el caso del ciclo anual (Figura 20) también podemos notar que los mayores cambios se dan en latitudes bajas. También podemos ver que, en el PE la oscilación en los valores de los modelos es mayor en los meses de invierno y primavera (cajas más amplias); y que a futuro se aumenta el tamaño del rango intercuartil para estos meses. En el caso de los

cambios, no se aprecia una diferencia de estos por cada mes, sino que se mantienen homogéneos. Siendo así los cambios casi constantes para el periodo de 2036-2065 de 1.5°-2°C y para 2080-2100 de 3°-3.5°C.

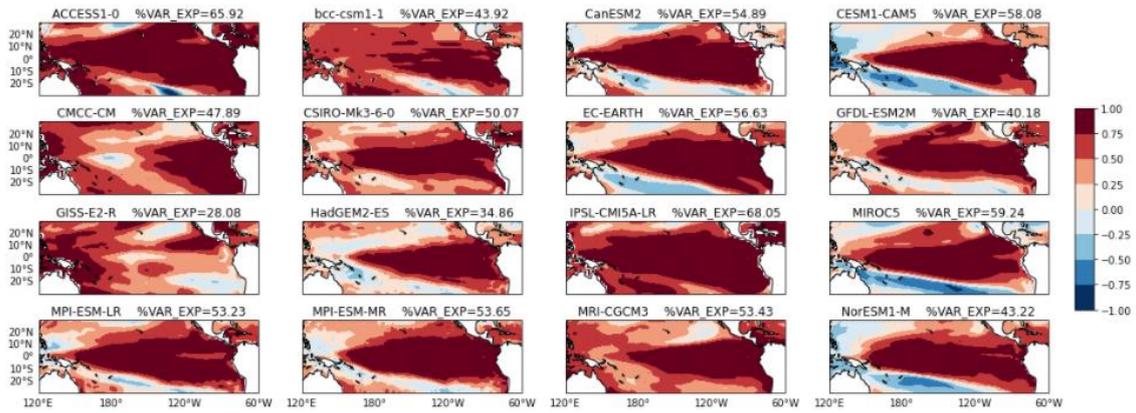


**Figura 20:** Diagrama de Cajas de la TSM a nivel mensual para los modelos del CMIP5 durante los periodos 1981-2005 (en gris), 2036-2065 (en azul) y 2080-100 (en rojo).

A la hora de evaluar EOFs a futuro puede haber algunas consideraciones a tomar en cuenta puesto que la señal en los escenarios RCP8.5 son muy grandes, es decir, la señal del ENSO puede ser consumida por la señal de calentamiento debido al incremento en los gases de efecto invernadero. Sin embargo, hay algunos modelos que si logran mostrar el modo de variabilidad del ENSO aun permanente tanto para el periodo 2036-2065 y 2080-2100 (Figura 21 y 22).

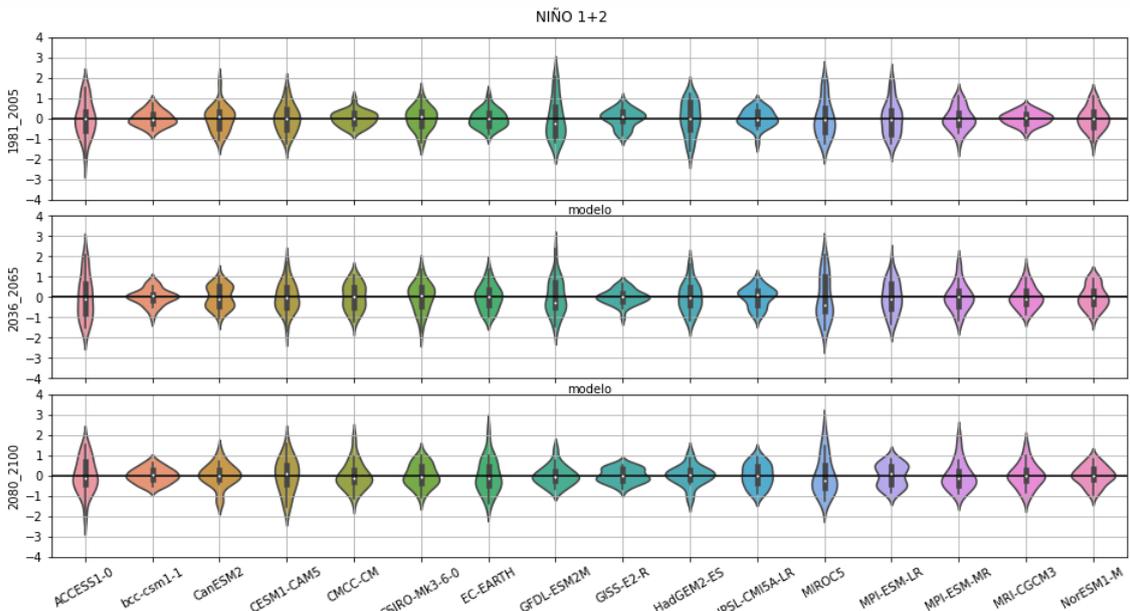


**Figura 21:** EOF1 en forma de correlación de las anomalías de TSM durante el periodo 2036-2065.

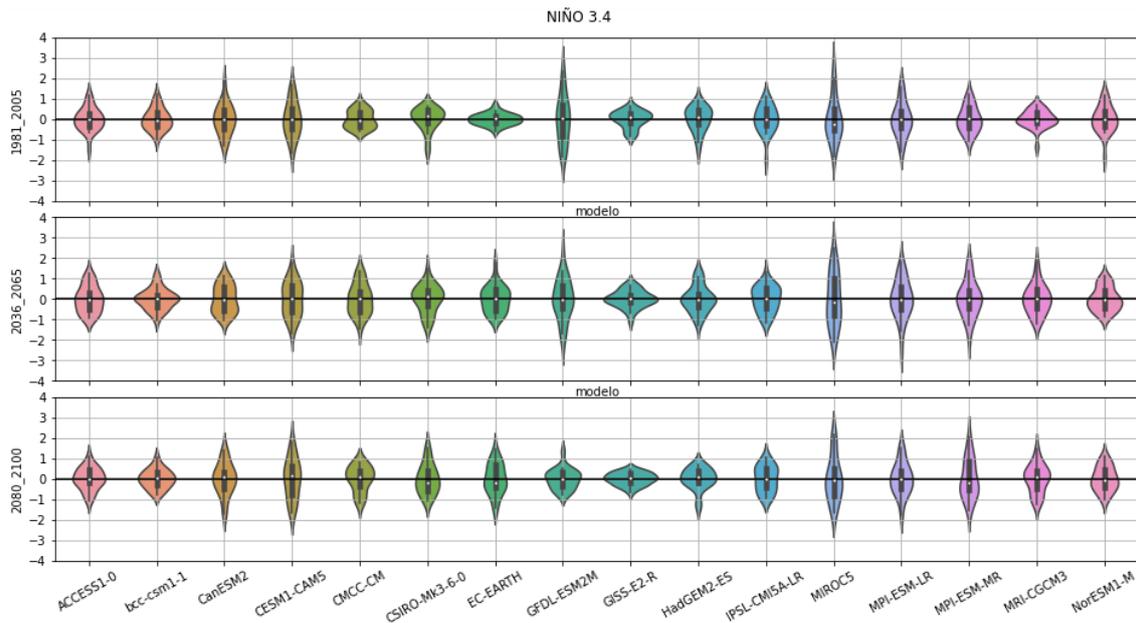


**Figura 22:** EOF1 en forma de correlación de las anomalías de TSM durante el periodo 2080-2100.

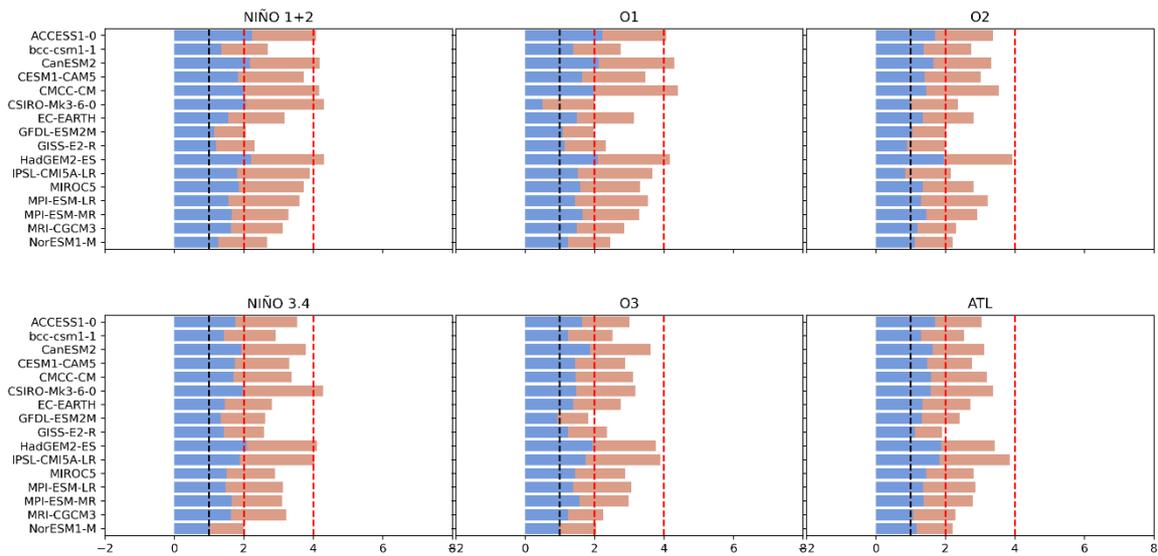
Las distribuciones de las anomalías en periodos futuros (Figura 23 y 24) no tienen un cambio destacable para analizar, mantienen sus formas para estos periodos, así como también sus valores bastante similares. Como excepción, el modelo GFDL-ESM2M disminuye en cuanto a sus valores máximos de anomalía para los años 2080-2100 siendo estos datos más homogéneos en torno a anomalías de 0°C en las regiones el Niño3.4 y 1+2.



**Figura 23:** Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región Niño1+2.



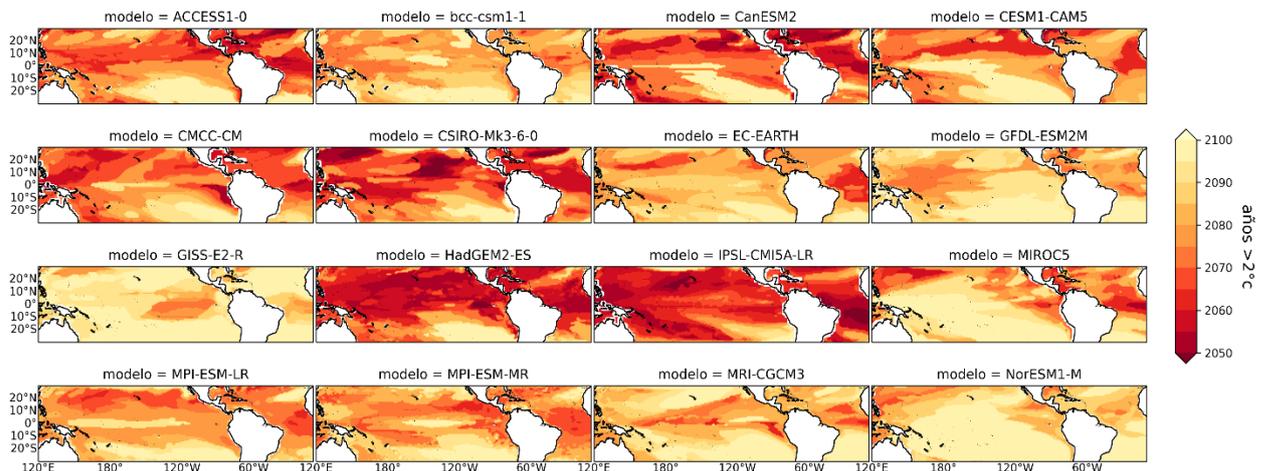
**Figura 24:** Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región Niño3.4.



**Figura 25:** Cambios de la TSM para los modelos del CMIP5. En barras azules los cambios al 2036-2065 y en rojo 2080-2100. En línea punteadas se tiene la referencia de 1°, 2° y 4°C.

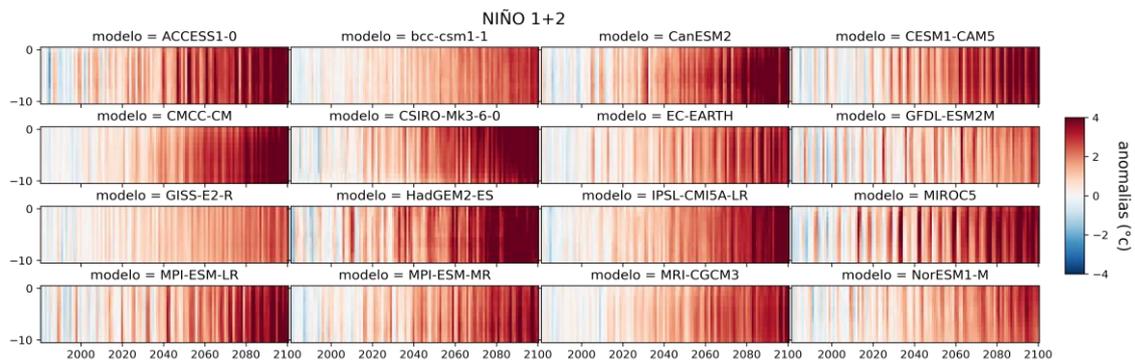
Si sacamos en promedio lo que pasa en cada modelo podemos observar que los cambios para el año 2036-2065 (Figura 25) pasan 1°C llegando algunos modelos a pasar los 2°C como en el HadGEM2-ES y CSIRO-Mk3-6-0. Podemos observar también que los modelos pueden tener diferentes cambios para distintas zonas. Por ejemplo, para la región O1 observamos que los menores cambios los posee el modelo CSIRO-Mk3-6-0; sin embargo, este mismo modelo muestra los mayores cambios en las regiones del NIÑO 1+2 y NIÑO 3.4. Los valores de cambios para los periodos de 2080-2100 están en mayor medida entre 2°C y 4°C siendo la región el NIÑO 1+2 donde se pueden apreciar mayor magnitud.

Si hacemos un análisis temporal de los años en el que los modelos pasan el valor de anomalías 2°C definitivamente (Figura 26) podemos observar que el PE puede llegar a este valor en algunos modelos (la mayoría) mucho más rápido que el PO. El modelo HadGEM2-ES e IPSL-CMIP5A-LR son los que llegan a estos valores mucho más rápido en torno a los años 2050. Mientras que los demás aun tardan un tiempo superior en llegar a la mayor parte de su distribución espacial.

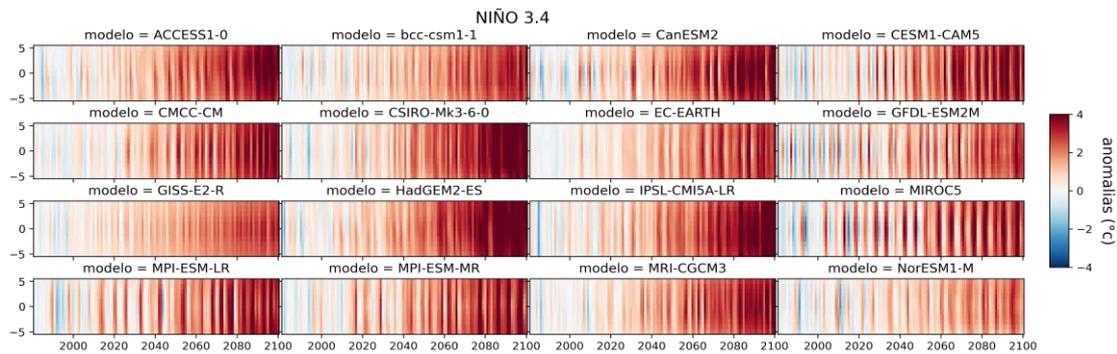


**Figura 26:** Gráfico de alcance para el valor de 2°C en anomalía de TSM en los modelos del CMIP5.

Si hacemos un análisis temporal por sector y modelos (Figura 27 y 28). Podemos ver que existen anomalías (respecto al periodo de referencia 1981-2005) importantes en los modelos GFDL-ESM2M y MIROC5 para la región el NIÑO3.4. Estas claras oscilaciones podrían estar ligadas a eventos el NIÑO en estos modelos. En el caso del NIÑO 1+2 se observa como el modelo HadGEM2-ES tiende a tener valores positivos elevados en años inferiores a 2050.



**Figura 27:** Gráfico temporal de anomalías de TSM para la región Niño1+2.



**Figura 28:** Gráfico temporal de anomalías de TSM para la región Niño3.4.

En este análisis podemos observar además que la mayor cantidad de modelos tienen franjas con menor y mayor anomalías de temperatura, excepto en los modelos HadGEM2-ES Y CSIRO-Mk3-6-0. Dándonos una mejor forma de observar como las oscilaciones en las anomalías de TSM de año en año puede cambiar en cada modelo, siendo más o menos abruptos dependiendo del modelo.

### 4.3. Validación del Nivel del Mar (NDM)

En el caso del nivel del mar debemos recalcar que, debido a la falta de variables oceánicas para el estudio, el modelo CESM1-CAM5 y EC-EARTH quedaron descartados en este apartado.

Para tener un panorama previo, se realizó un análisis de la información observada. Esta fue extraída del Laboratorio para Altimetría Satelital de la NOAA/STAR (LSA):

[https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries.php)

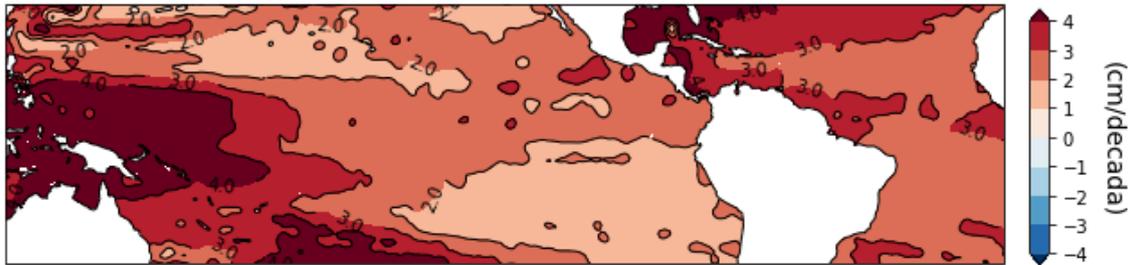
Esta base contiene información concatenada en el tiempo distintos altímetros como TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1, Jason-2, y Jason-3 los cuales poseen información desde mediados de 1992 al presente. Estos datos poseen corrección de Barómetro Invertido (BI) pero no incluye el Ajuste Isostático Glacial (AIG o GIA).

Las tendencias del cambio de nivel del mar en este periodo (1993-2019) muestran valores superiores (por encima de 4 cm/década) en el Pacífico Oeste en comparación al Pacífico Este que posee valores entre 1 y 3 cm/década cerca a las costas de Perú (Figura 29).

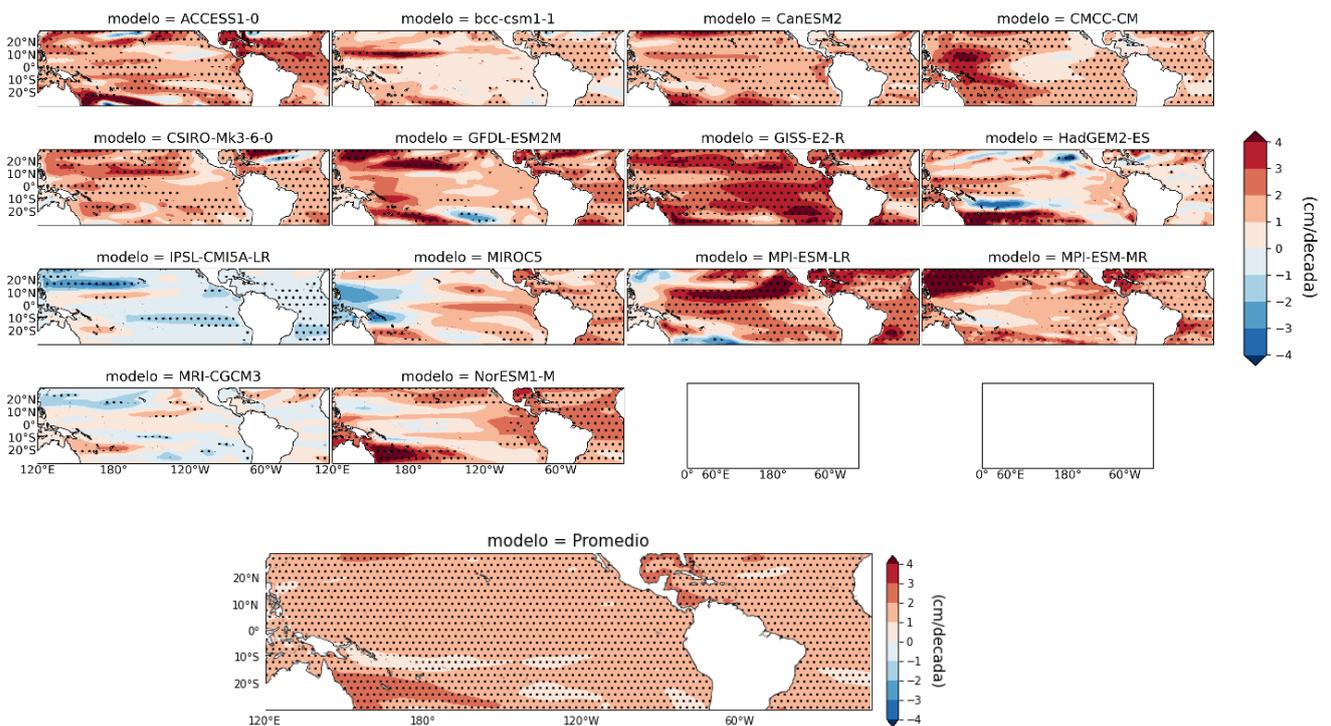
Si comparamos nuestra información observada con la de los modelos del CMIP5 en NDM (siendo estos tomados del histórico + rcp8.5 para el periodo 1993-2019), vemos que los valores positivos de tendencia de estos últimos oscilan en el mismo rango que los datos observados (Figura 30). Sin embargo, existe mucha incongruencia a nivel espacial. El

modelo CMCC-CM es el que más comparte parecido con el observado. Por otro lado, los modelos MIROC5, IPSL-CMI5A-LR y MRI-CGCM3 poseen tendencias negativas en gran parte del océano tropical mostrando valores de hasta  $\sim -3$  cm/década

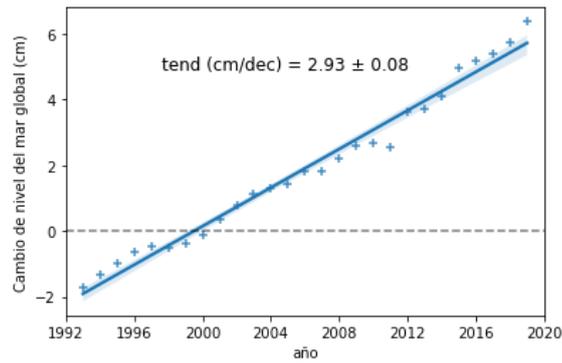
Si determinamos el Nivel del Mar Global promedio, obtenemos una tendencia de 2.93 cm/década en nuestros datos observados (Figura 31), siendo esta una tendencia lineal significativa.



**Figura 29:** Tendencia lineal del nivel del mar observado con Altimetros TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1, Jason-2, y Jason-3.



**Figura 30:** Tendencia lineal del nivel del mar en los modelos del CMIP5 1993-2019 (histórico + rcp8.5). En “\*” las tendencias significativas.

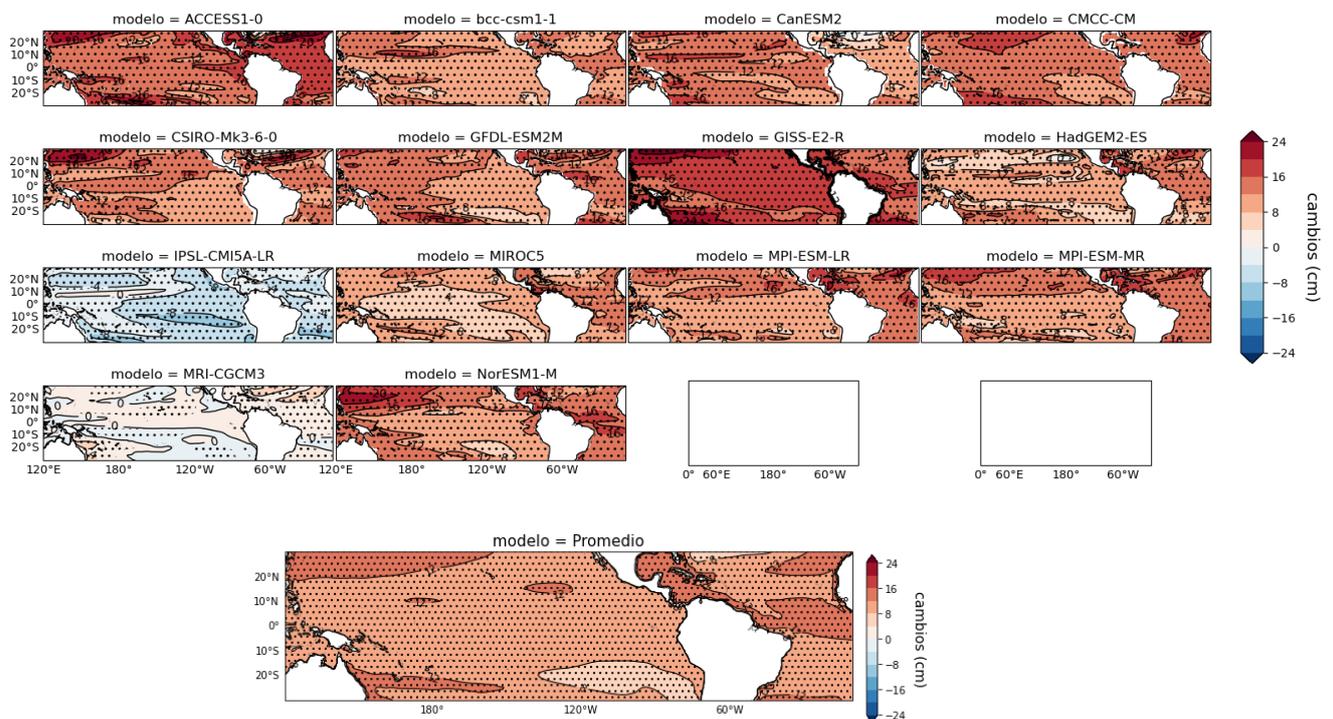


**Figura 31:** Tendencia del Nivel del Mar Global observado con altímetros TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1, Jason-2, y Jason-3.

#### 4.4. Proyecciones Futuras de NDM

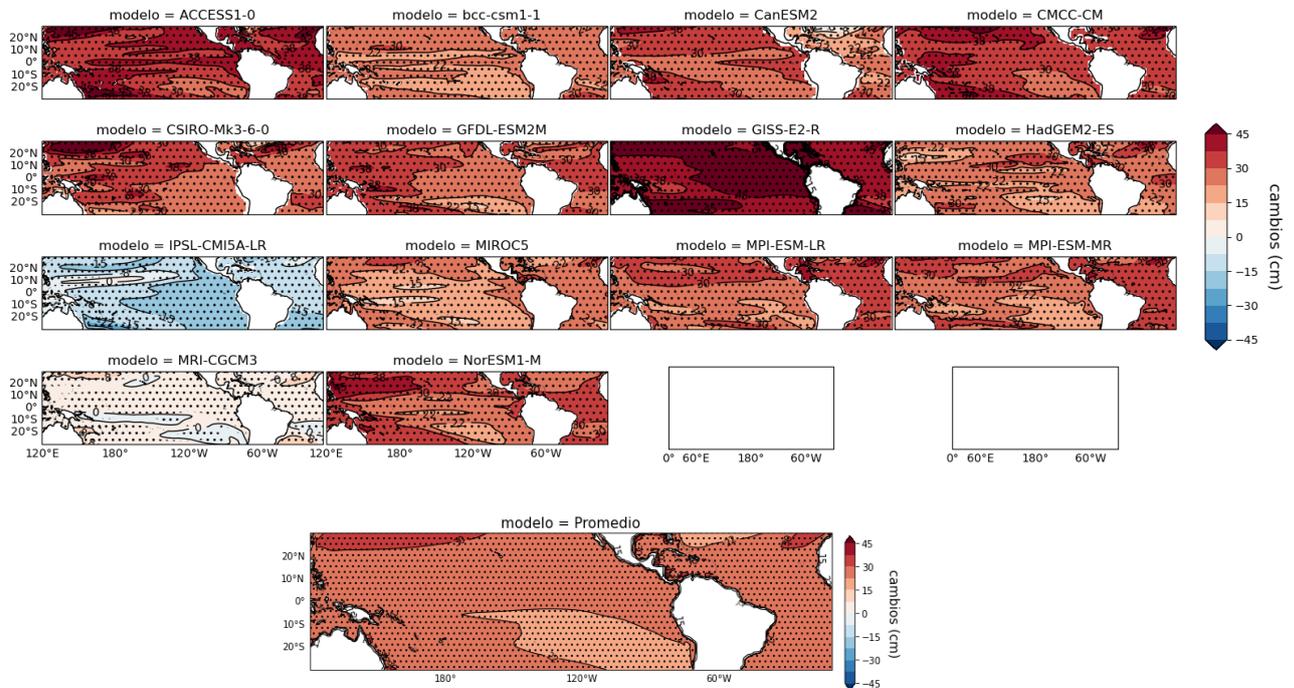
Enfocándonos en los cambios del NDM, observamos que la mayor cantidad de modelos muestran cambios positivos significativos para el periodo 2036-2065 y 2080-2100. Sin embargo, tenemos dos modelos con cambios negativos (IPSL-CMI5A-LR y MRI-CGCM3).

Los cambios del NDM para 2036-2065 (Figura 32) muestran aumentos de hasta 24 cm para nuestra área de estudio. Siendo estos cambios a nivel espacial mayores en el modelo GISS-E2-R. Además, tenemos una proporción mayor que nos muestra mayores cambios en el PO en comparación al PE. Por otro lado, el Océano Atlántico muestra valores más homogéneos en torno a 8 y 16 cm.

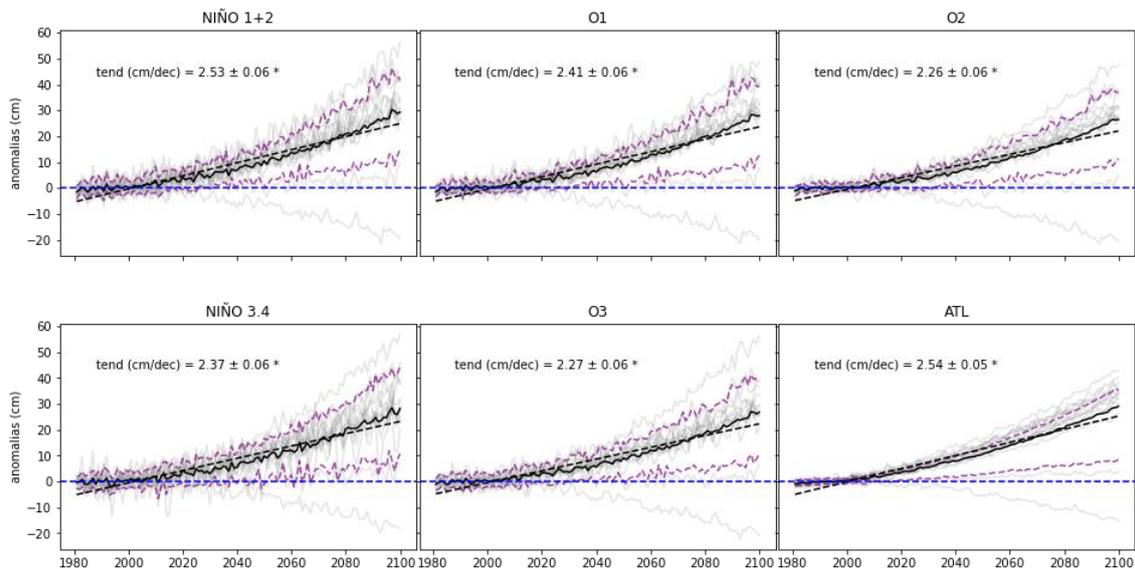


**Figura 32:** Cambios del NDM en “cm” para el periodo 2036-2065 (ref. 1981-2005).

En el periodo 2080-2100 el cambio del NDM de igual forma muestra mayores incrementos en el PO que en el PE (en mayor cantidad de modelos). Siendo así, el modelo GISS-E2-R el que muestra el caso contrario. Además, debemos señalar que los modelos GISS-E2-R y el ACCESS1-0 son los modelos que alcanzan mayor aumento del NDM llegando a tener valores por encima de los 45 cm (Figura 33).



**Figura 33:** Cambios del NDM en “cm” para el periodo 2080-2100 (ref. 1981-2005).

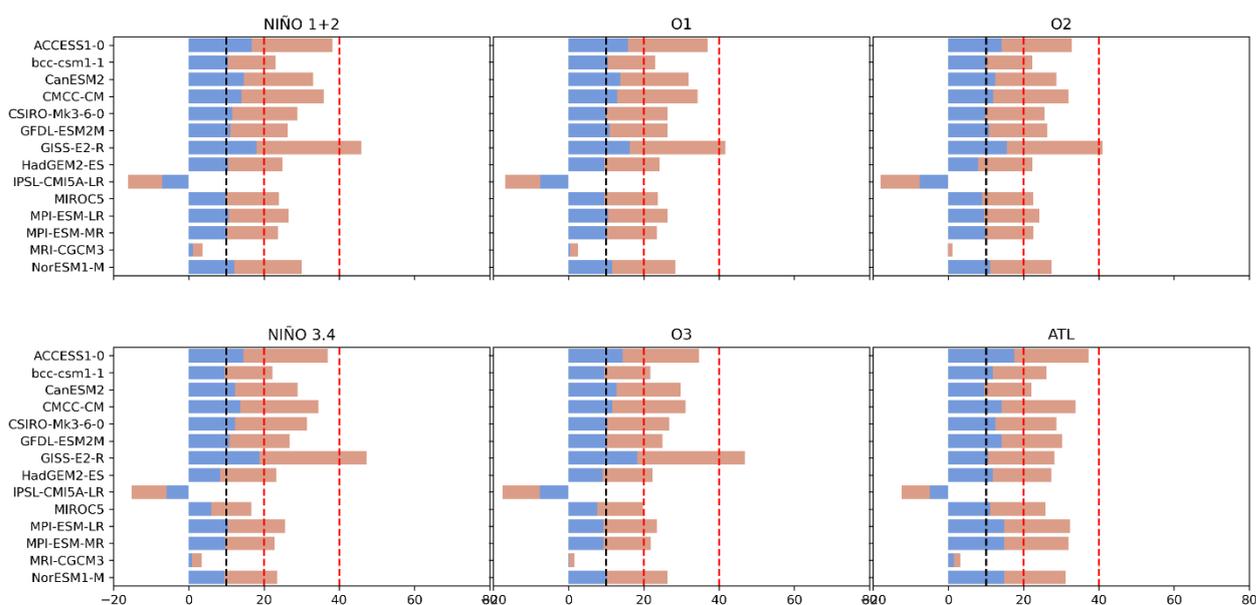


**Figura 34:** Tendencia del NDM del 1981-2100 con respecto al periodo 1981-2005 de todos los modelos en líneas grises, del promedio en líneas negras, en líneas negras punteadas la recta de tendencia y en punteadas moradas el percentil 10 y 90.

Si hacemos una comparación en la tendencia del NDM de los distintos modelos observamos que en promedio se tiene 2.53 cm/década para la región niño 1+2 (siendo este el valor más

grande con respecto a los otros sectores de estudio en el OP) (Figura 34). Además, se tiene una tendencia similar en nuestra región ATL con 2.54 cm/década. Con esta información podemos saber cómo la tendencia va disminuyendo conforme aumentamos de latitud.

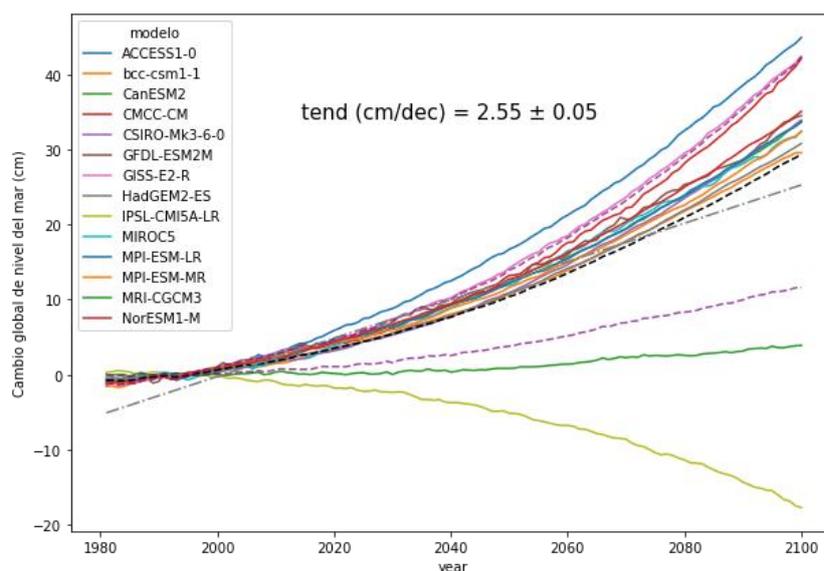
Si analizamos los cambios del nivel del mar de forma conjunta observamos claramente cuál es la posición de cada modelo en cada sector en estudio (Figura 35). El modelo GISS-E2-R es el que muestra mayores cambios positivos para todos los sectores exceptuando ATL (en donde los mayores cambios los muestra el ACCESS1-0. En general, los cambios al 2036-2065 están entre los 10 y 20 cm, mientras que para el 2080-2100 oscilan entre los 20 y 40 cm. Solo tenemos un modelo que nos muestra cambios totalmente negativos (el modelo IPSL-CMI5A-LR). Cabe mencionar que el modelo MRI-CGCM3 es el modelo más conservador con respecto a los cambios, siendo estos no significativos para el periodo 2036-2065 pero si para el 2080-2100.



**Figura 35:** Cambios en el NDM para los modelos del CMIP5. En barras azules los cambios al 2036-2065 y en rojo 2080-2100. En línea punteadas se tiene la referencia de 10, 20 y 40 cm.

Por otro lado, si queremos analizar el efecto termal sobre el nivel del mar global usamos las variables “zosga” o “zostoga” según su disponibilidad en la base. Estos son nuestros datos de referencia para el promedio Global del Nivel del Mar.

Observamos que todos los modelos tienen distintas tendencias positivas excepto el modelo IPSL-CMI5A-LR. Si sacamos el promedio obtenemos una tendencia de 2.55 cm/década para el nivel medio global del mar (Figura 36).

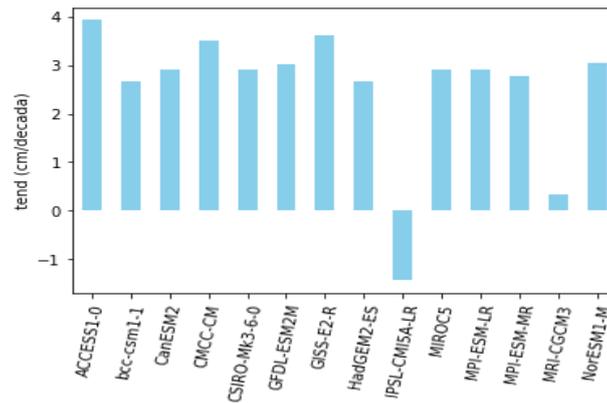


**Figura 36:** Cambio global del nivel del mar en “cm” para los modelos del CMIP5. Usando la variable “zosga” o “zostoga” (Cambio global del nivel del mar) según su disponibilidad. En promedio en línea negra entrecortada, la recta de tendencia en plomo y en morado el percentil 5 y 95.

Si vemos en la Tabla 2 y Figura 37, tenemos todas las tendencias del gráfico anterior en cm/década. Lo primero que se observa es que todas las tendencias son significativas. Estas tendencias generalmente oscilan entre 2 a 4 cm/década siendo la mayor del modelo ACCESS1-0 (con 3.92 cm/década). El modelo MRI-CGCM3 muestra tendencias pequeñas, pero siguen siendo significativas (0.33 cm/década). Y el modelo IPSL-CMI5A-LR es el único con tendencias negativas.

**Tabla 2:** Tendencia del NDM promedio global de los modelos del CMIP5 durante el periodo 1981-2100.

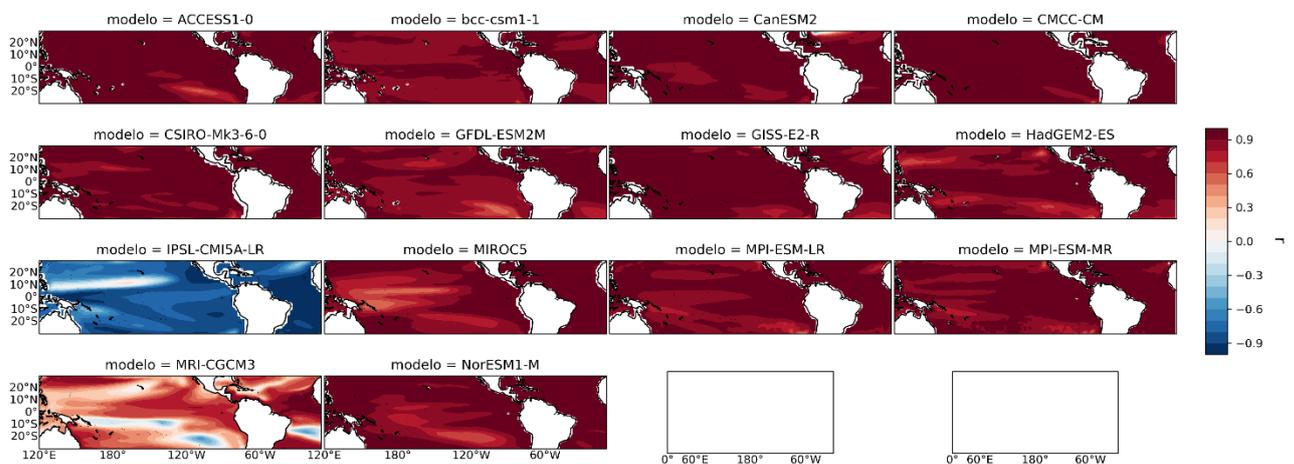
Modelo	tendencia(cm/década)	sig.
ACCESS1-0	3.92 ± 0.07	*
bcc-csm1-1	2.65 ± 0.05	*
CanESM2	2.90 ± 0.06	*
CMCC-CM	3.49 ± 0.09	*
CSIRO-Mk3-6-0	2.90 ± 0.07	*
GFDL-ESM2M	3.01 ± 0.06	*
GISS-E2-R	3.62 ± 0.08	*
HadGEM2-ES	2.67 ± 0.06	*
IPSL-CMI5A-LR	-1.42 ± 0.04	*
MIROC5	2.90 ± 0.05	*
MPI-ESM-LR	2.91 ± 0.06	*
MPI-ESM-MR	2.78 ± 0.05	*
MRI-CGCM3	0.33 ± 0.01	*
NorESM1-M	3.04 ± 0.06	*



**Figura 37:** Tendencia del NDM promedio global de los modelos del CMIP5 durante el periodo 1981-2100

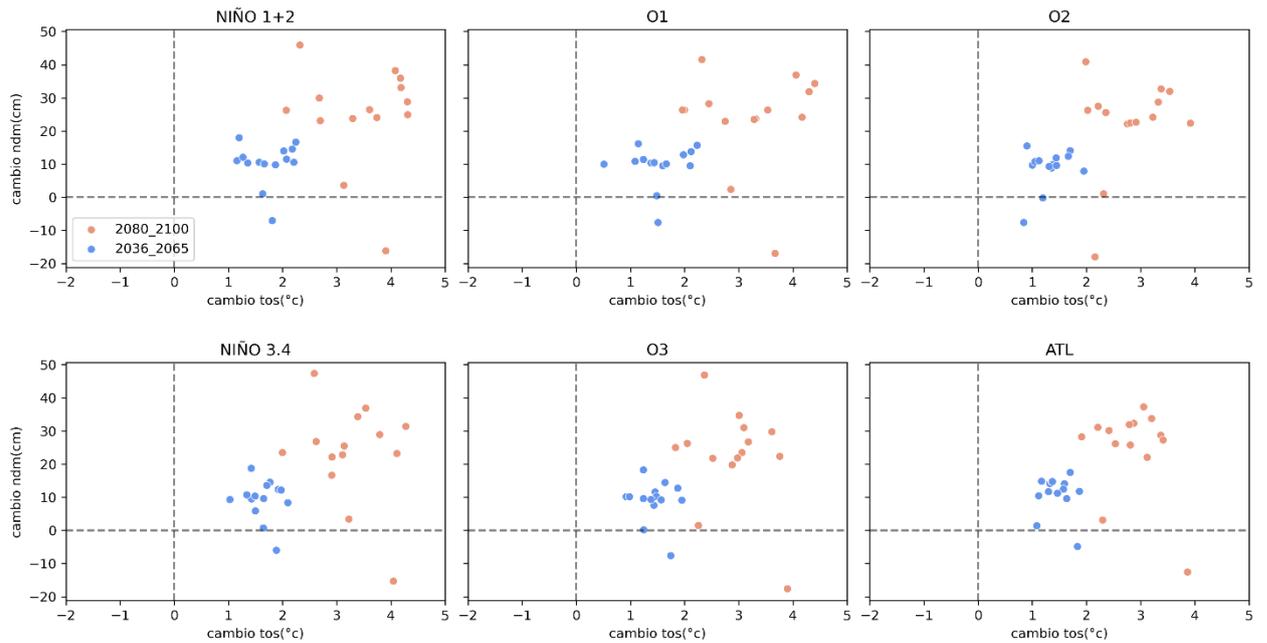
#### 4.1. Relación entre los cambios de TSM y NDM

Si queremos ver cuál es el comportamiento de las anomalías entre la variable TSM y NDM podemos observar en el gráfico (Figura 38) que existe una correlación mayor a 0.6 en la mayor cantidad de modelos. Además, el modelo con menor correlación positiva es el MRI-CGCM3. Aunque también existen algunos en el cual la relación puede llegar a ser totalmente inversa como lo es en el modelo IPSL-CMI5A-LR. Estas correlaciones nos dan una pista acerca de la consecuencia de ambas variables siendo afectadas por un mismo factor o entre ellas.



**Figura 38:** Correlación entre las anomalías de TSM y NDM para todo el periodo de análisis.

Si evaluamos la relación de estas variables con respecto al cambio en los periodos 2036-2065 y 2080-2100 (Figura 39). Se observa que el modelo con mayor cambio en TSM y NDM es el GISS-E2-R Y el ACCESS1-0 con valores entre 30 y 50 cm para nivel del mar y 3 a 5 °C para el cambio en TSM al año 2080-2100.

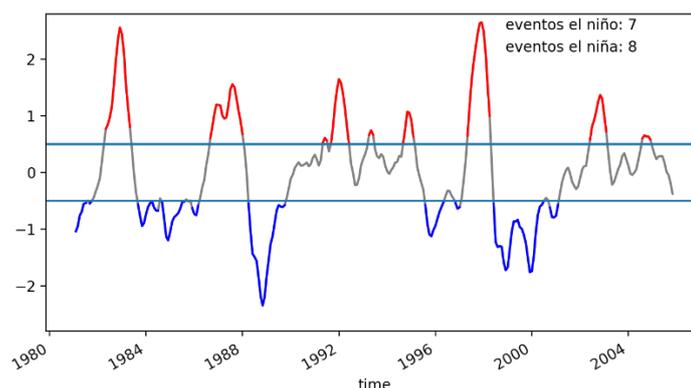


**Figura 39:** Gráfico de dispersión de todos los modelos con respecto a los cambios de la TSM (tos) y NDM para los años 2036-2065 (en puntos azules) y 2080-2100 (en puntos rojos). En anexos (Figura 61) la misma imagen con nombres de los modelos.

#### 4.5. ENSO (El Niño Oscilación del Sur) y sus cambios

Para el caso de los eventos el Niño y la Niña se utilizó el índice ONI (CPC, s.f.) el cual nos permite evaluar la ocurrencia de estos. Además, se utilizaron 3 periodos de 30 años para la evaluación a futuro teniendo en cuenta la homogeneidad en cuanto a la cantidad de años en evaluación: 1981-2010, 2036-2065 y 2071-2100. Para estos análisis se utilizó se quitó la tendencia cuadrática a nuestra información, ya que buscamos evaluar la variabilidad propiamente.

Dado el caso en la Figura 40 en el cual tenemos para el periodo observado (1981-2005) dos eventos el niño de con valores por encima de 2 (del índice ONI), estos son muy conocidos (1982-1983 y 1997-1998) y trajeron consigo efectos importantes en las costas de Perú (además de otros efectos alrededor del país). También tenemos un evento importante la Niña (1988-1989) con valores por debajo de -2. Totalizando así 7 eventos el Niño y 8 eventos la Niña para este periodo observado. Cabe recordar que los eventos el Niño (La Niña) son considerados si cumplen valores por encima (debajo) de 0.5 (-0.5) del índice.



**Figura 40:** Índice ONI para el periodo 1981-2005. En leyenda la cantidad de eventos El Niño y La Niña en dicho periodo.

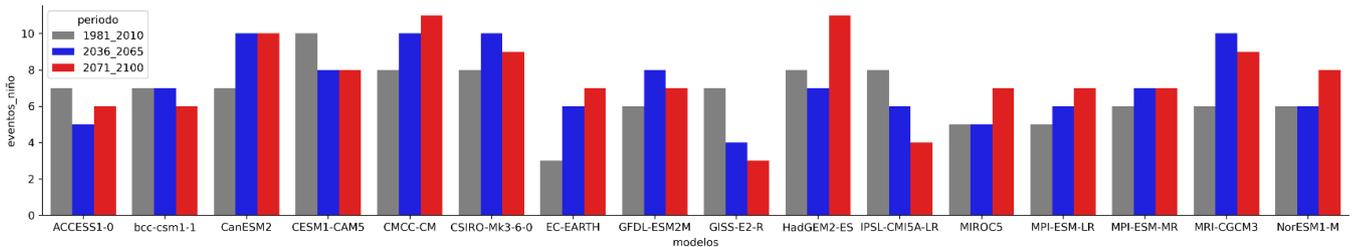
Haciendo un balance de eventos para este mismo periodo en los modelos del CMIP5 obtenemos bastante coincidencia con respecto al número de eventos observados (Tabla 3). En promedio tenemos mayor eventos La Niña que el Niño en los modelos. Además, cabe recalcar que el número de eventos en el 50% de modelos evaluados oscila en  $\pm 1$  con respecto al observado (7 eventos). Por otro lado, el modelo que más se aleja de los valores observados es el EC-EARTH, el cual nos da diferencia de hasta -5 y -6 (para el Niño y la Niña respectivamente) con respecto los números observados.

**Tabla 3:** Número de Eventos El Niño y La Niña según el índice ONI en los modelos CMIP5 para el Periodo 1981-2005.

Modelos CMIP5	El Niño	La Niña
ACCESS1-0	6	6
bcc-csm1-1	6	7
CanESM2	6	7
CESM1-CAM5	8	9
CMCC-CM	7	6
CSIRO-Mk3-6-0	7	4
EC-EARTH	2	2
GFDL-ESM2M	5	7
GISS-E2-R	6	6
HadGEM2-ES	6	5
IPSL-CMI5A-LR	6	7
MIROC5	4	6
MPI-ESM-LR	4	4
MPI-ESM-MR	5	6
MRI-CGCM3	5	2
NorESM1-M	6	7

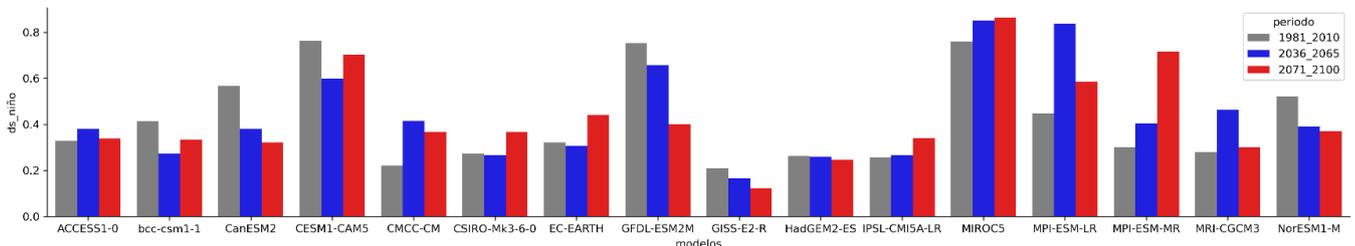
Con respecto a periodos futuros podemos observar que los eventos El Niño en 2036-2065 superan en el 50% (8 de 16) de los modelos a los que suceden en 1981-2010. Mientras que

los de 2071-2100 superan en el 68.75% de los modelos (11 de 16) en el número de eventos el Niño. Entonces tenemos un final de siglo XXI con mayor número de eventos el Niño, superando en promedio de los modelos con 0.8125 eventos más en 2071-2100 con respecto al 1981-2010, teniendo modelos en los que supera en 4 eventos (caso EC-EARTH) y otros en 3 (CanESM2, CMCC-CM, HadGEM2-ES, MRI-CGCM3). (Figura 41).



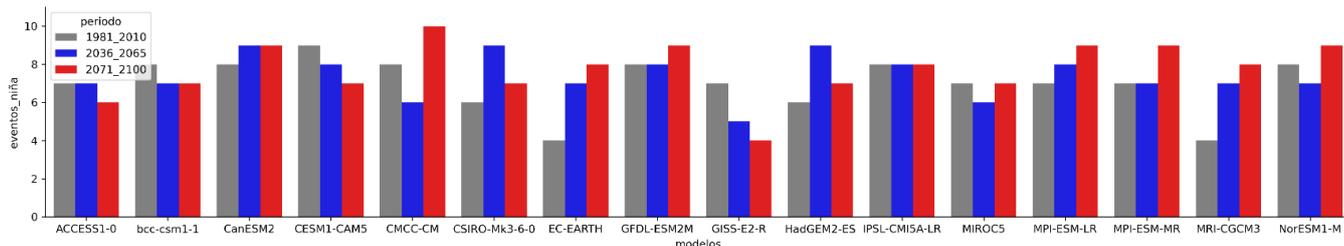
**Figura 41:** Número de eventos El Niño por modelos CMIP5 durante 3 distintos periodos de 30 años: 1981-2010 (gris), 2036-2065(azul) y 2071-2100 (rojo).

Con respecto a las intensidades, se evaluó con respecto a la desviación estándar (ds) a los valores ONI por encima de 0.5 (Figura 42). En el 43.75% (7 de 16) de los modelos en 2036-2065 se supera al periodo 1981-2010 en la ds; mientras que, en 2071-2100 superan el 56.25% (9 de 16) de los modelos. Si bien hay aumento de la intensidad a finales del siglo XXI debemos tener cuidado pues estos valores solo bordean el 50% (de los modelos).



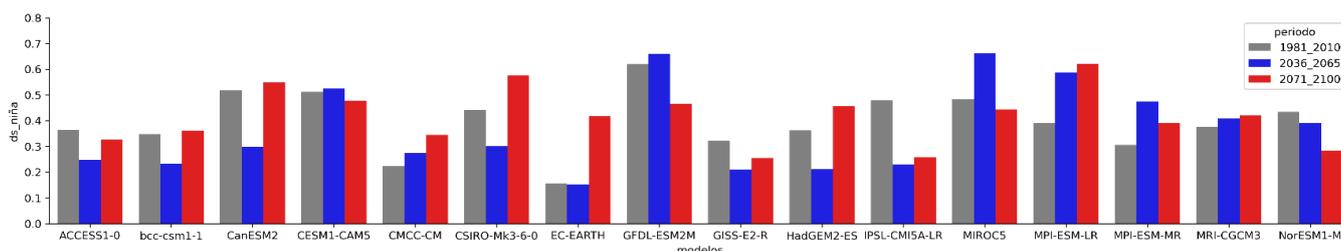
**Figura 42:** Desviación estándar de valores del ONI mayores a 0.5 para los 3 distintos periodos en Evaluación.

Con respecto a eventos La Niña (Figura 43). En 2036-2065 superan en el 37.5% (6 de 16) de los modelos a los que suceden en 1981-2010. Mientras que los de 2071-2100 superan en el 62.5% de los modelos (10 de 16) en el número de eventos La Niña. Entonces tenemos un final de siglo XXI con mayor número de eventos La Niña, superando en promedio de los modelos con 0.75 eventos más en 2071-2100 con respecto al 1981-2010, teniendo modelos en los que supera en 4 eventos (caso EC-EARTH y MRI-CGCM3).



**Figura 43:** Número de eventos La Niña por modelos CMIP5 durante 3 distintos periodos de 30 años: 1981-2010 (gris), 2036-2065(azul) y 2071-2100 (rojo).

En las intensidades de los eventos la Niña (Figura 44), se evaluó con respecto a la desviación estándar (ds) a los valores ONI por debajo de  $-0.5$ . En el 43.75% (7 de 16) de los modelos en 2036-2065, superan al periodo 1981-2010 en la ds; mientras que, en 2071-2100 superan en 56.25% (9 de 16). Si bien hay aumento de la intensidad a finales del siglo XXI debemos tener cuidado pues estos valores solo bordean el 50% de los modelos (similar a intensidades en el caso del Niño).



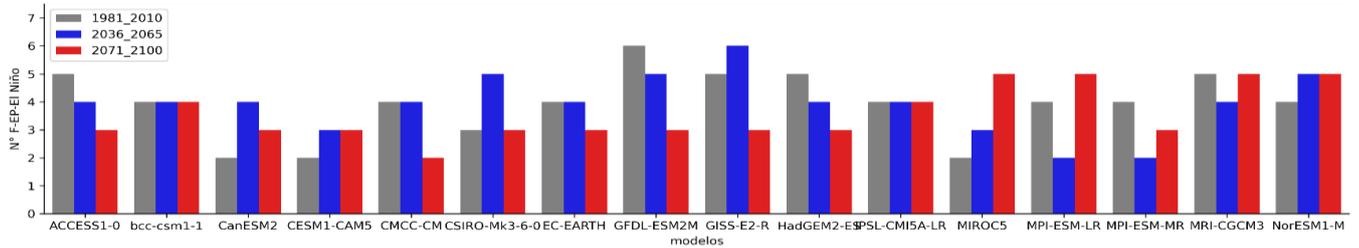
**Figura 44:** Desviación estándar de valores del ONI menores a  $-0.5$  para los 3 distintos periodos en Evaluación.

Si realizamos una evaluación más específica usando el índice E (Takahashi, 2011) podemos mejorar el análisis para los eventos el Niño del tipo canónicos (Pacífico Este) que afectan en mayor magnitud a nuestra región. Conociendo que, en el periodo observado encontramos solo 2 eventos de este tipo los cuales son en 1982-1983 y 1997-1998.

En este análisis se puede observar (Tabla 4) que para eventos futuros tenemos en el periodo 2036-2065 un 37.5% (6 de 16) de modelos que nos indican mayor cantidad de eventos con mayor calentamiento en el Pacífico Este. Mientras que, para el periodo 2071-2100 tenemos un 31.25% (5 de 16) de modelos que indican esto mismo con respecto a nuestra referencia (1981-2010). Entonces los modelos nos indican menor presencia de este tipo de eventos para estos periodos futuros. Sin embargo, podemos ver que algunos modelos indican lo contrario de forma resaltante como es en el modelo MIROC5 donde existen 3 eventos por encima del periodo histórico a finales del siglo XXI. (Figura 45).

**Tabla 4:** Número de eventos Fuertes EP – El NIÑO para 3 distintos periodos en 16 modelos del CMIP5.

Modelos CMIP5	1981_2010	2036_2065	2071_2100
ACCESS1-0	5	4	3
bcc-csm1-1	4	4	4
CanESM2	2	4	3
CESM1-CAM5	2	3	3
CMCC-CM	4	4	2
CSIRO-Mk3-6-0	3	5	3
EC-EARTH	4	4	3
GFDL-ESM2M	6	5	3
GISS-E2-R	5	6	3
HadGEM2-ES	5	4	3
IPSL-CMI5A-LR	4	4	4
MIROC5	2	3	5
MPI-ESM-LR	4	2	5
MPI-ESM-MR	4	2	3
MRI-CGCM3	5	4	5
NorESM1-M	4	5	5



**Figura 45:** Número de eventos Fuertes – EP- El NIÑO (eventos El Niño canónicos fuertes).

## V. CONCLUSIONES

- Los escenarios promedio de TSM de los modelos del CMIP5 muestran aumentos de hasta 3°C para los años 2036-2065, y máximos de 6°C para los años 2080-2100. Este calentamiento es predominante para el PE. Además, se observó que latitudes más cercanas a los 0° son las que mayor calentamiento tendrán, observándose entre los más cálidos al modelo HadGEM2-ES. Por otro lado, en el caso del NDM el aumento para el 2036-2065 llega a los 24 cm mientras que para 2080-2100 se alcanza los 45 cm, siendo los modelos GISS-E2-R y ACCESS1-0 los que alcanzan los valores más elevados. Estos cambios en el NDM muestran contrastes a diferencia de los cambios en TSM donde todos son aumentos. En el NDM podemos encontrar modelos que poseen cambios negativos (como IPSL-CMI5A-LR y MRI-CGCM3). De esta forma, podemos entender que los modelos deben ser analizados de forma conjunta e individual, ya que se puede estar obviando una posibilidad de análisis nuevo en alguno de ellos ocultando su valor distintivo por medio del promedio.
- En el periodo histórico (1981-2005), los modelos del CMIP5 en promedio para la TSM muestran tendencias positivas significativas en nuestros sectores de análisis, siendo la mayor de 0.2°C/década para la región el Niño 1+2. Proyectándonos al año 2100, la tendencia se hace más clara con 0.35°C/década (para el sector Niño 1+2), pudiendo llegar en otros puntos del Océano Pacífico Tropical valores mayores a 0.5°C/década. Por otro lado, en el caso del NDM se observó que estas tendencias no solo eran de aumento, sino también de disminución. En nuestras regiones alcanzan su mayor valor en el Niño 1+2 con 2.53 cm/década, Asimismo, sacando los promedios por sector, observamos que el modelo IPSL-CMI5A-LR es el único que muestra tendencia negativa en ambos periodos de proyección (para nuestros sectores de estudio).
- Se observa aumento de eventos El Niño y La Niña (usando el índice ONI) a finales del siglo XXI (2071-2100) en 68.5% y 62.5% de los modelos, respectivamente. El cambio en la intensidad a futuro de los Eventos el Niño y La Niña bordea el ~50%, es decir, aproximadamente el 50% de los modelos muestran disminución y el otro 50% aumento de intensidad. Además, se observa aumento de eventos del tipo Niño canónico o EP a finales del siglo XXI (2071-2100) en 31.25% de los modelos.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Complementar el análisis con mayor cantidad de variables (viento, presión, etc.).
- Realizar las correcciones correspondientes a las variables de nivel del mar.
- Realizar el mismo análisis con datos del CMIP6 para comparación.
- Aumentar los años de validación.

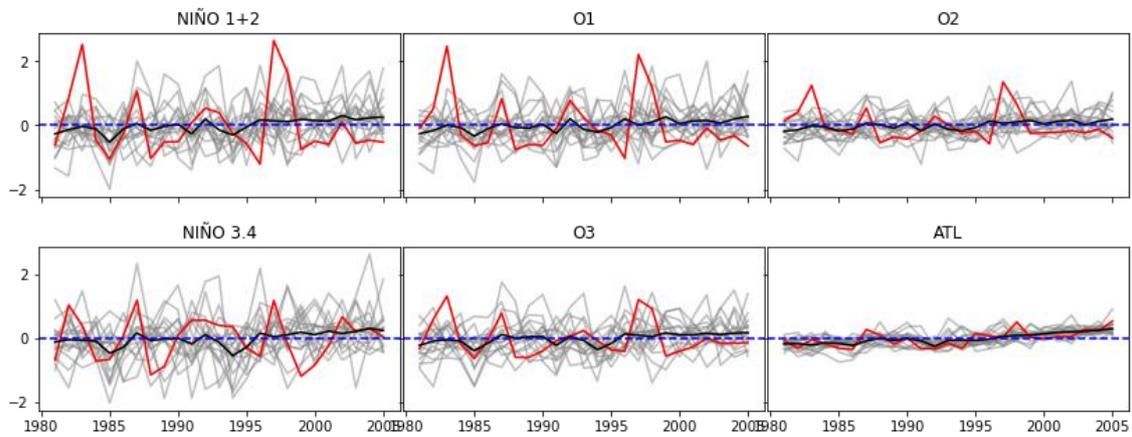
## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aucan, J. (2018). Effects of Climate Change on Sea Levels and Inundation Relevant to the Pacific Islands. Pacific Marine Climate Change Report Card: Science Review 2018, 43-49.
- Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Yeh, S.-W., An, S.-I., Cobb, K. M., Wu, L. (2015). ENSO and greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(9), 849–859. doi:10.1038/nclimate2743
- Cai, W., Wang, G., Dewitte, B., Wu, L., Santoso, A., Takahashi, K., Yang, Y., Carréric A., McPhaden, M. J. (2018). Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming. *Nature*, 564(7735), 201–206. doi:10.1038/s41586-018-0776-
- Dawson, A. (2016). eofs: A Library for EOF Analysis of Meteorological, Oceanographic, and Climate Data. In *Journal of Open Research Software* 4(1), 14. Ubiquity Press, Ltd. <https://doi.org/10.5334/jors.122>
- Dong, L., y T. Zhou (2014), The formation of the recent cooling in the eastern tropical Pacific Ocean and the associated climate impacts: A competition of global warming, IPO, and AMO, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, doi:10.1002/2013JD021395.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Annex I: Glossary. In *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* (541-562). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157940.008
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC.

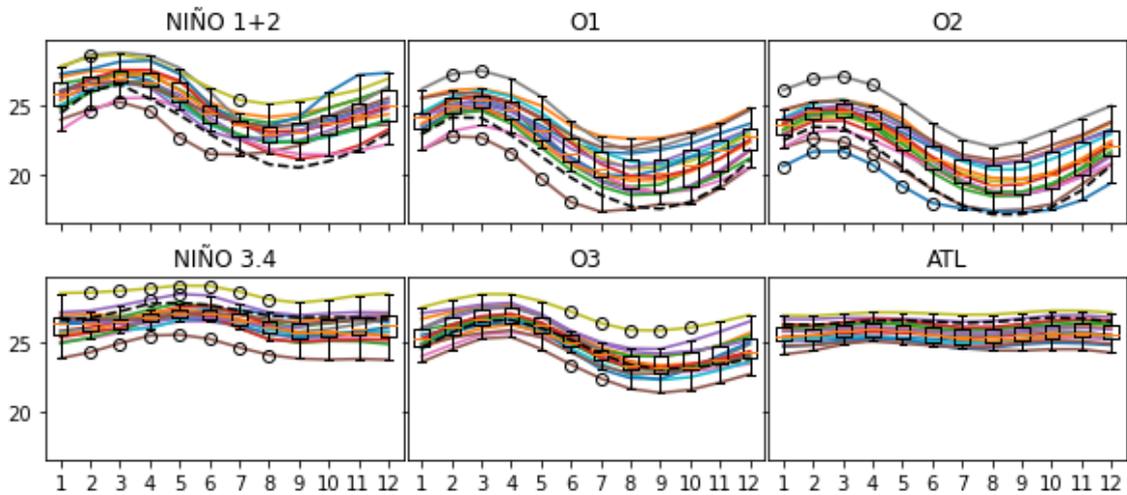
- Luo, B., y Minnett, P. J. (2020). Evaluation of the ERA5 Sea Surface Skin Temperature with Remotely-Sensed Shipborne Marine-Atmospheric Emitted Radiance Interferometer Data. *Remote Sensing*, 12(11), 1873. doi:10.3390/rs12111873
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2016). Avances en la adaptación al cambio climático y el estado de la vulnerabilidad en el Perú. En Ministerio del Ambiente (Ed.). Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (pp. 133-192). Ministerio del Ambiente.
- NOAA (s.f.). Historical El Niño/La Niña episodes (1950-present).  
[https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- Olonscheck, D., Rugenstein, M., y Marotzke, J. (2020). Broad consistency between observed and simulated trends in sea surface temperature patterns. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL086773. <https://doi.org/10.1029/2019GL086773>
- Richter, K., Nilsen, J. E. Ø., Raj, R. P., Bethke, I., Johannessen, J. A., Slangen, A. B. A., & Marzeion, B. (2017). Northern North Atlantic Sea Level in CMIP5 Climate Models: Evaluation of Mean State, Variability, and Trends against Altimetric Observations. *Journal Of Climate*, 30(23), 9383-9398. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0310.1>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (2014). Evolución de la definición de El Niño. El fenómeno El Niño en el Perú. Ministerio del Ambiente.
- Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., y Dewitte, B. (2011). ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, 38(10), n/a–n/a. doi:10.1029/2011gl047364.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., y Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Yeh, S.-W., Ham, Y.-G., y Lee, J.-Y. (2012). Changes in the Tropical Pacific SST Trend from CMIP3 to CMIP5 and Its Implication of ENSO. *Journal of Climate*, 25(21), 7764–7771. doi:10.1175/jcli-d-12-00304.1

## **VIII. ANEXOS**

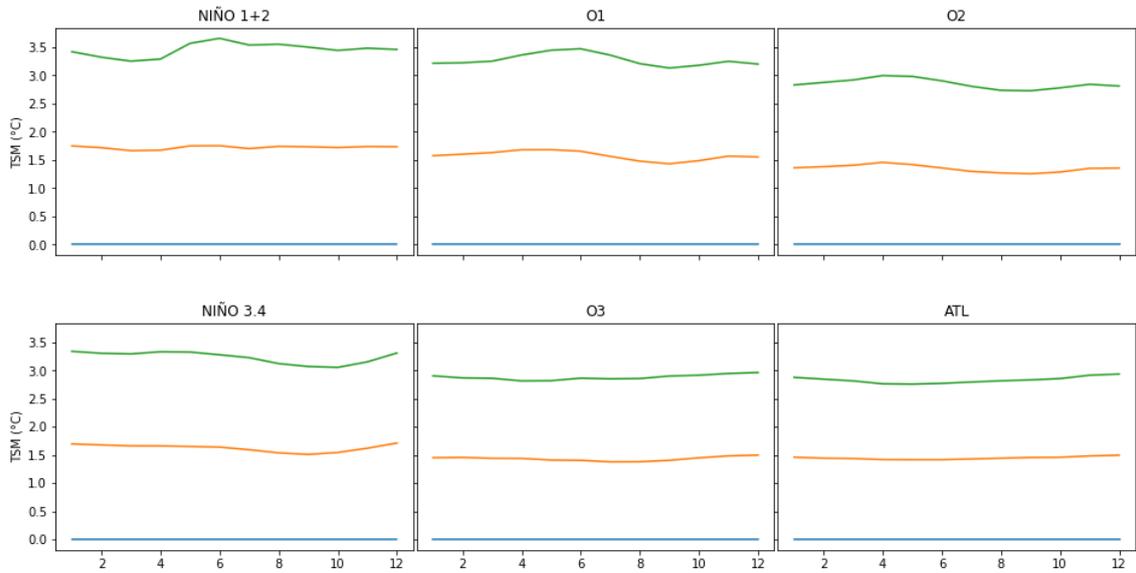
## Anexo 1: Validación



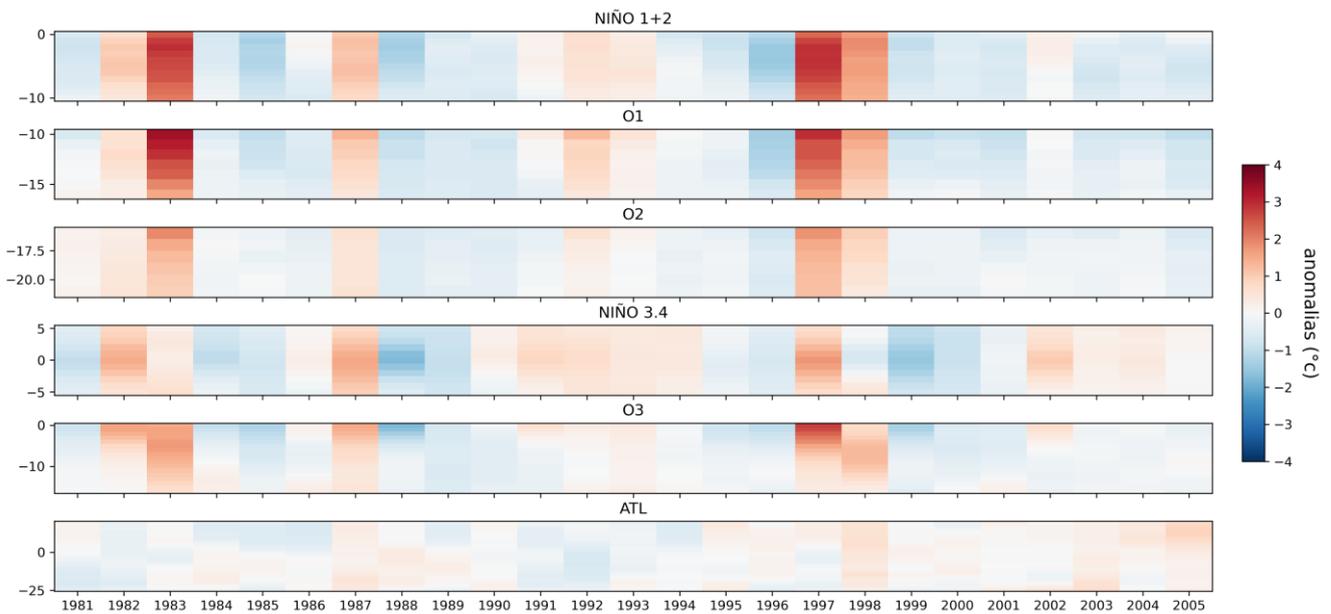
**Figura 46:** Anomalías de TSM, en líneas rojas el valor observado, en líneas grises los modelos del CMIP5, en línea negra el promedio de los modelos y en línea punteada azul el valor 0 de anomalía para los años 1981-2005.



**Figura 47 :**Diagrama de cajas del ciclo anual de la TSM en los modelos del CMIP5. Cada línea de color es un modelo. La línea punteada negra indica la TSM observada para el periodo 1981-2005.



**Figura 48:** Cambios en el ciclo anual promedio para los modelos del CMIP5. Indicando en rojo los cambios al 2036-2065 y en verde 2080-2100.



**Figura 49:** Gráfico temporal de las anomalías de TSM en las regiones de estudio con los datos observados.

## Anexo 2: Proyección futura TSM

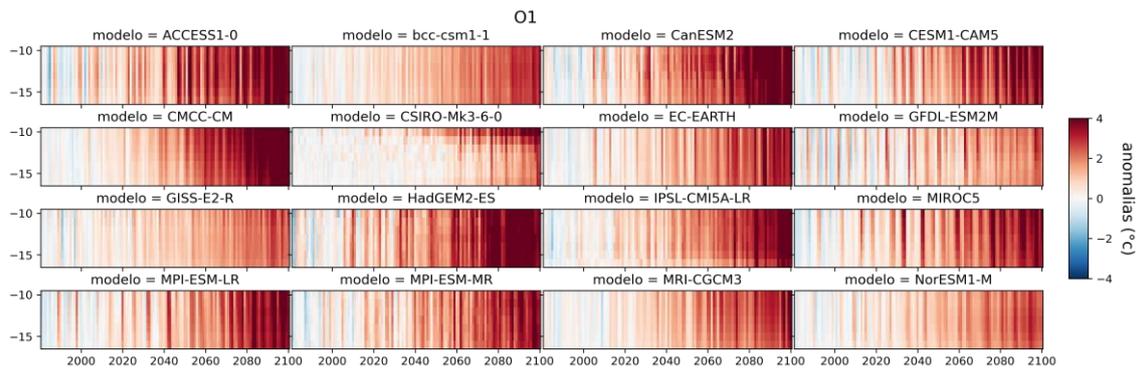


Figura 50: Gráfico temporal de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 en la región O1.

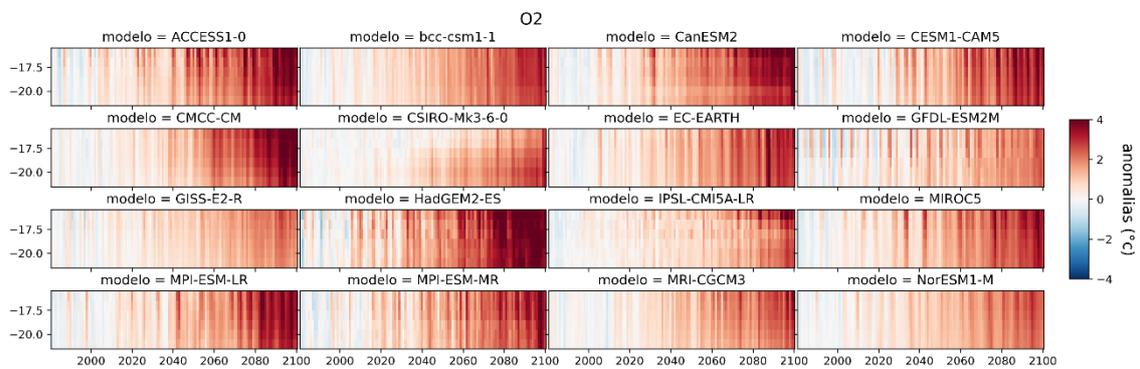


Figura 51: Gráfico temporal de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 en la región O2.

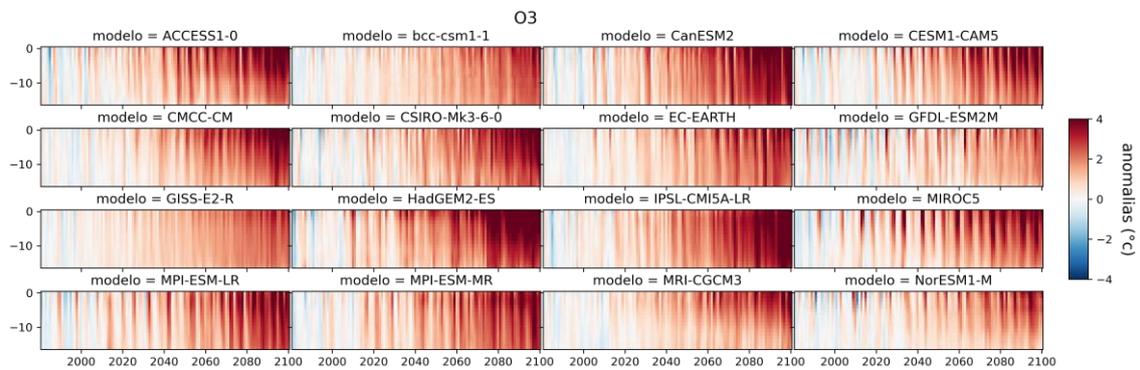


Figura 52: Gráfico temporal de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 en la región O3.

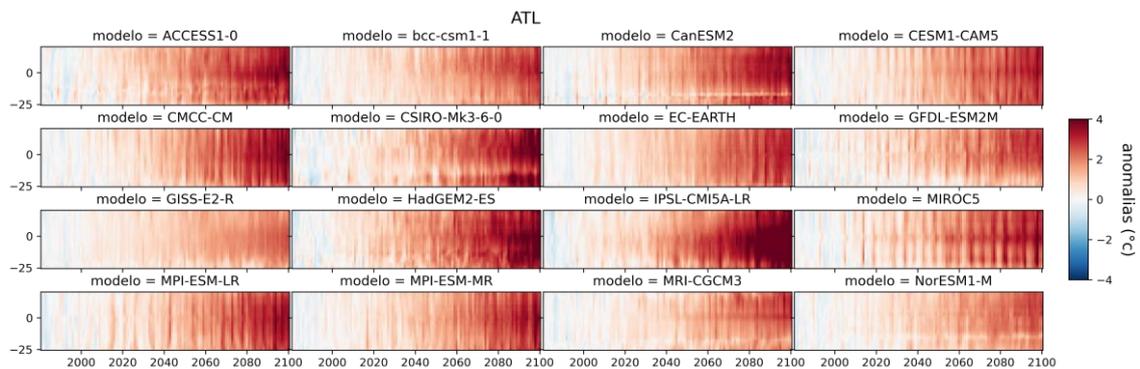
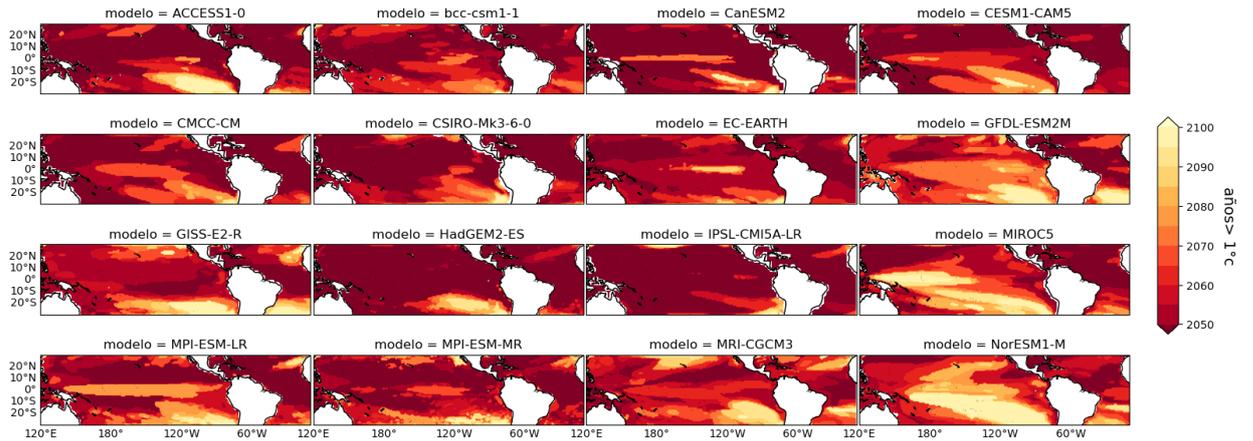
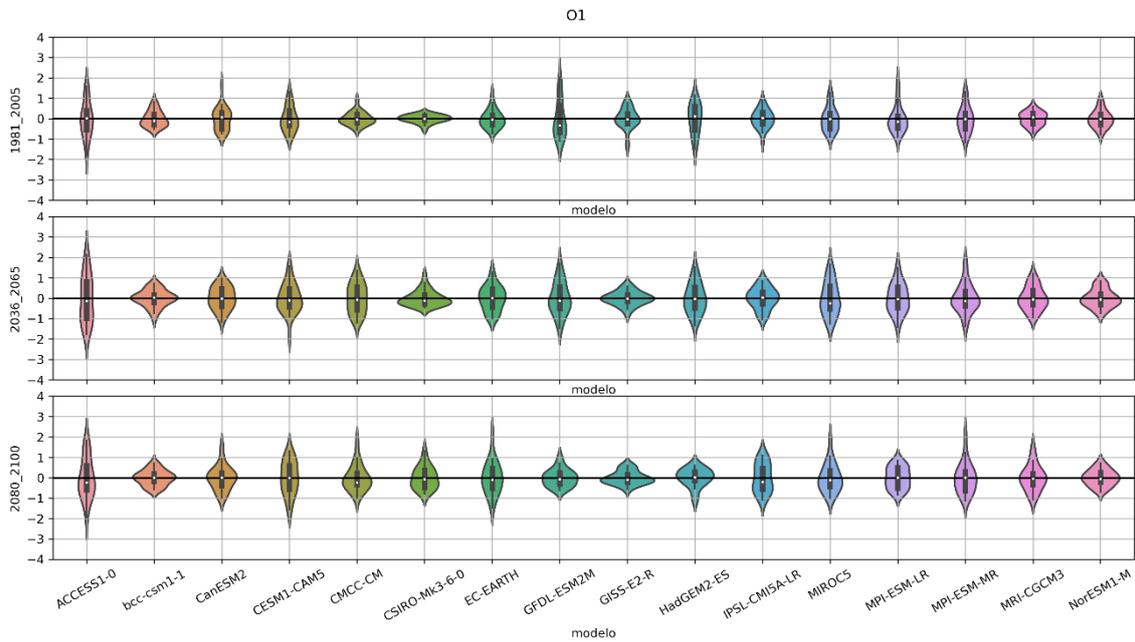


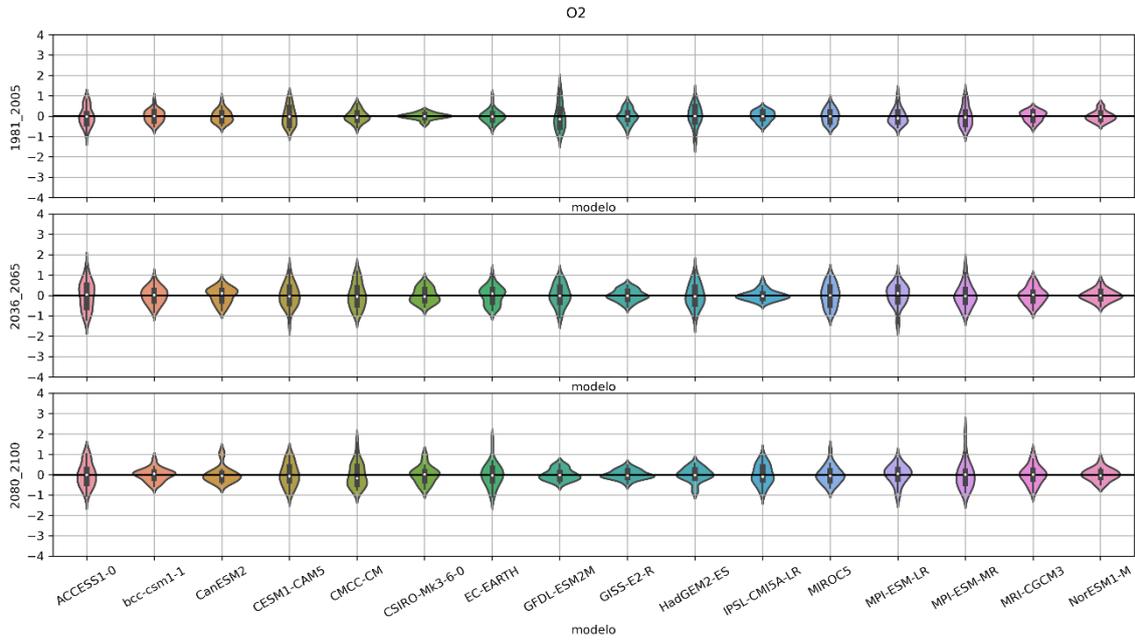
Figura 53: Gráfico temporal de las anomalías de TSM en los modelos del CMIP5 en la región ATL.



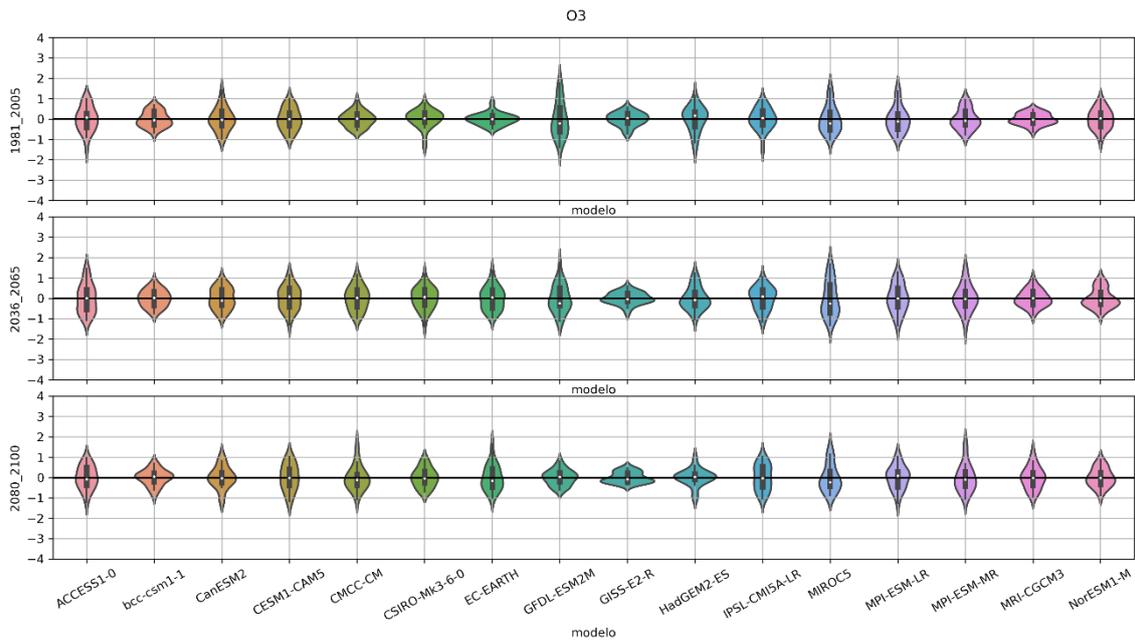
**Figura 54:** Gráfico de alcance para el valor de  $1^\circ\text{C}$  en anomalía de TSM en los modelos del CMIP5.



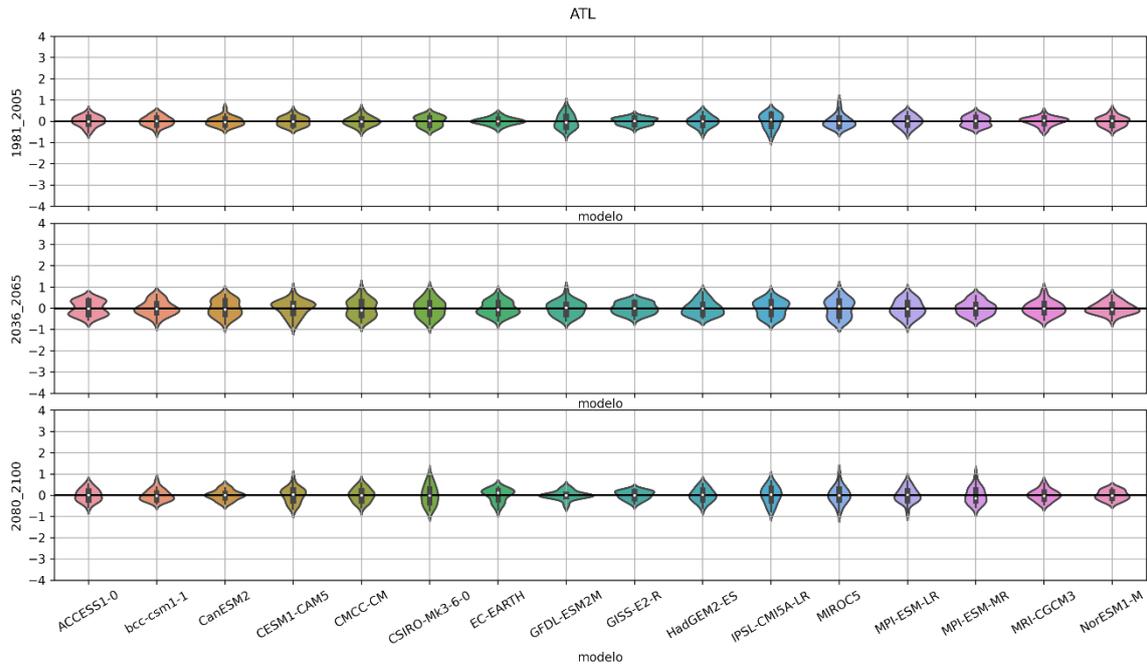
**Figura 55:** Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región O1



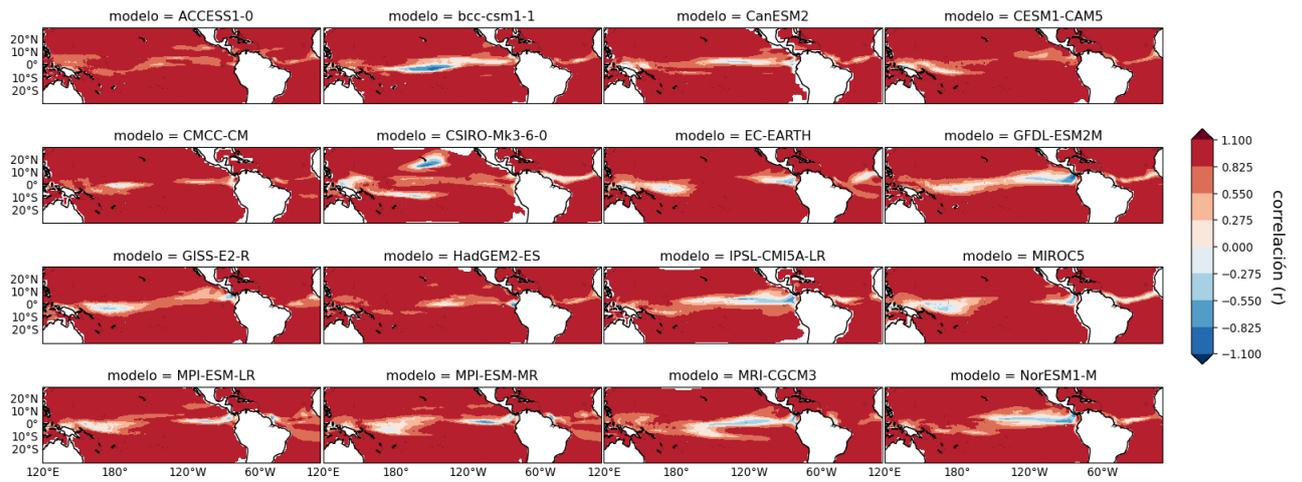
**Figura 56:** Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región O2.



**Figura 57:** Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región O3.

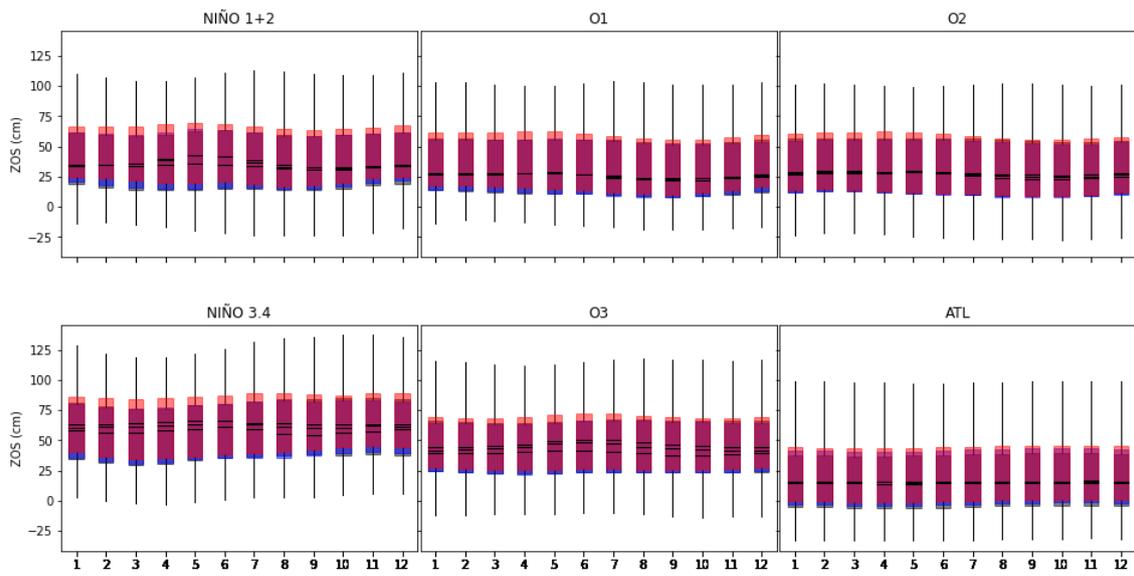


**Figura 58:** Diagrama tipo violín de anomalías de TSM para 3 periodos distintos en la región ATL.



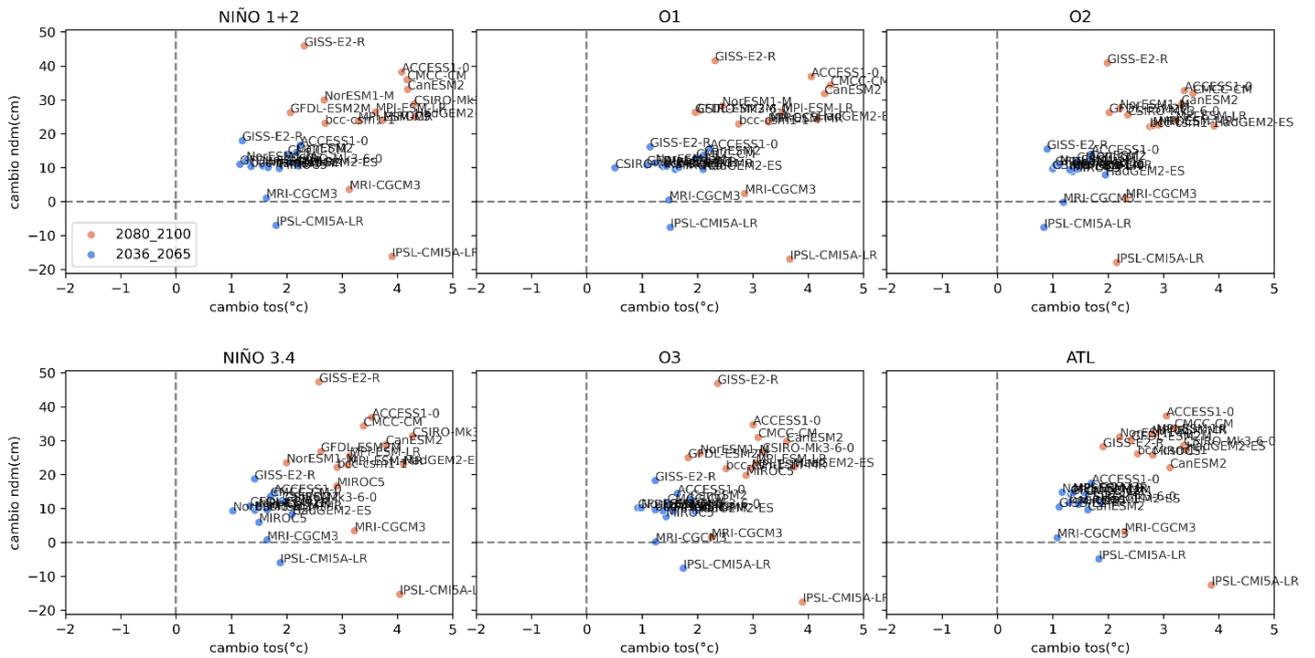
**Figura 59:** Correlación del ciclo anual de la TSM con los datos observados.

### 8.1. Proyección futura NDM.

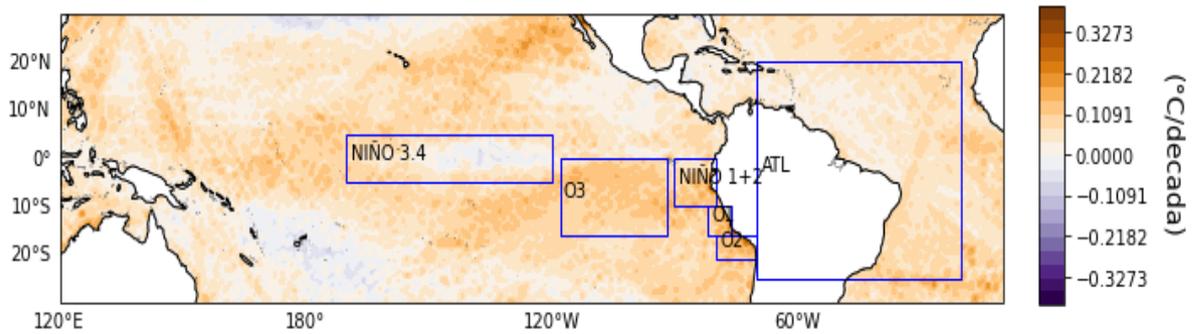


**Figura 60:** Diagrama de Cajas de ZOS a nivel mensual para los modelos del CMIP5 durante los periodos 1981-2005 (en grids), 2036-2065 (en azul) y 2080-100 (en rojo).

### Anexo 3: EXTRAS.



**Figura 61:** Gráfico de dispersión de todos los modelos con respecto a los cambios de la TSM y NDM para los años 2036-2065 (en puntos azules) y 2080-2100 (en puntos rojos). Versión con nombres de modelos.



**Figura 62:** Tendencia lineal de las anomalías de TSM (°C/década) para el periodo 1950-2005 en los datos observados. En cuadros los sectores de análisis. Versión con mayor resolución. Enfriamiento en la lengua fría.