

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“VALIDACIÓN DE MODELOS REGIONALES CLIMÁTICOS DEL
PROYECTO CORDEX EN EL PERÚ”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título de:

INGENIERO METEORÓLOGO

JONATHAN AARÓN PAREDES QUISPE

Lima – Perú

2024

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

TSP

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

12%

PUBLICACIONES

12%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Rossa O'Briain. "Climate change and European rivers: An eco-hydromorphological perspective", Ecohydrology, 2019 Publicación	1%
2	escholarship.org Fuente de Internet	1%
3	link.springer.com Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad de Costa Rica Trabajo del estudiante	1%
6	agupubs.onlinelibrary.wiley.com Fuente de Internet	1%
7	repositorio.igp.gob.pe Fuente de Internet	1%
8	Wei Zhang, Jinshu Li, Pan Liu, Xiaohui Lei, Jie Chen, William W.G. Yeh. "When to start an adaptation strategy in response to climate	1%

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“VALIDACIÓN DE MODELOS REGIONALES CLIMÁTICOS DEL
PROYECTO CORDEX EN EL PERÚ”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Presentada por:

JONATHAN AARÓN PAREDES QUISPE

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Maest. Cs. Alessandri Canchoa Quispe
PRESIDENTE

Mg. Sc. Julio Alfonso Arakaki Kiyán
MIEMBRO

Dr. Alexis Nicolás Ibáñez Blancas
MIEMBRO

Mg. Sc. Jerónimo García Villanueva
ASESOR

AGRADECIMIENTOS

A mi núcleo familiar, madre y hermanas, por su amor incondicional y su apoyo constante en cada uno de mis pasos.

A mi asesor, el Profesor Jerónimo García Villanueva, por su guía experta, paciencia y apoyo durante el desarrollo del TSP. A la Facultad de Ciencias por ser un entorno de aprendizaje que estimula el pensamiento crítico y la innovación.

A la Universidad Agraria por proporcionarme una educación de calidad y recursos que han sido fundamentales en mi formación académica.

A los distinguidos miembros del jurado calificador, por su tiempo, esfuerzo y valiosas aportaciones a mi trabajo.

A todos mis amigos y compañeros que han compartido conmigo esta etapa de crecimiento personal y profesional, gracias por su amistad y buenos momentos.

A cada persona que directa o indirectamente ha contribuido a mi desarrollo, les estoy muy agradecido.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problemática:.....	1
1.2. Objetivo:	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Modelos de Circulación General:	3
2.2. Resolución del Modelo Climático Regional:	4
2.3. Regional Downscaling:.....	4
2.4. Proyecto CORDEX:.....	5
2.5. Validación de modelos climáticos:	5
III. DESARROLLO DEL TRABAJO	6
3.1. Alcance temporal y del ámbito geográfico.....	6
3.2. Datos	6
3.3. Modelos regionales de CORDEX	7
3.3.1. Parametrización del RCM ETA:	7
3.3.2. Parametrización del RCM REMO2009:.....	8
3.3.3. Parametrización del RCM RegCM4:.....	9
3.3.4. Parametrización del RCM WRF:	9
3.3.5. Parametrización del RCM RCA4:.....	9
3.3.6. Variables atmosféricas utilizadas:.....	9
3.4. Metodología.....	11
3.4.1. Preparación de los datos:	11
3.4.2. Circulación para niveles altos en Sudamérica:	12
3.4.3. Métricas estadísticas.	13

3.4.4. Diagrama de Taylor:	14
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
4.1. Análisis de patrones espaciales	15
4.1.1. Climatología de PC a 200hPa.....	15
4.1.2. Climatología de PC a 850hPa.....	16
4.1.3. Climatología de humedad específica a 850 hPa.....	17
4.1.4. Climatología de la temperatura a 2m:	18
4.1.5. Climatología de los acumulados de precipitación:	18
4.2. Diagrama de Taylor	19
4.2.1. Viento zonal en 200 hPa.	19
4.2.2. Viento zonal en 850 hPa	20
4.2.3. Humedad específica en 850 hPa	20
4.2.4. Temperatura a 2 metros	21
4.2.5. Precipitación acumulada trimestral	21
V. CONCLUSIONES	23
VI. RECOMENDACIONES.....	24
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Direcciones de los datos de RCM del CORDEX, ERA5 y PISCO.....	6
Tabla 2: Áreas para el análisis para el ERA5 (Sudamérica) y el PISCO (Perú).	6
Tabla 3: RCM disponibles para Sudamérica	7
Tabla 4: Detalles de los datos utilizados como observados ERA5 y PISCO.	7
Tabla 5: Variables utilizadas para la evaluación, niveles, abreviatura y unidades	10
Tabla 6: variables utilizadas y disponibles por los RCM, ERA5 y PISCO.	10

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de Circulación General	3
Figura 2: Evolución en la resolución de los modelos climáticos.	4
Figura 3. Ubicación de la AB (A) y ChBN (B) en DEF.....	12
Figura 4. Circulación promedio en 200 hPa en DEF en el periodo 1981-2005 del ERA5 (a) y de los RCM (b hasta s).....	15
Figura 5. Circulación promedio en 850 hPa en DEF en el periodo 1981-2005 del ERA5 (a) y de los RCM (b hasta s).....	16
Figura 6. Distribución de la climatología [1981-2005] de humedad específica (gr/kg) en 850 hPa en DEF, del ERA5 (a) y de los RCM (b hasta s).....	17
Figura 7. Climatología [1981 – 2005] de la temperatura (°C) a 2 metros en DEF.	18
Figura 8. Climatología [1981 – 2005] de los acumulados de precipitación (mm) en DEF.	19
Figura 9. Diagrama de Taylor para el viento zonal en 200 hPa.	20
Figura 10. Diagrama de Taylor para el viento zonal en 850 hPa	20
Figura 11. Diagrama de Taylor para la humedad específica en 850 hPa.....	21
Figura 12. Diagrama de Taylor para la temperatura a 2 metros	21
Figura 13. Diagrama de Taylor para la precipitación acumulada trimestral	22

RESUMEN

En este trabajo se emplearon datos del Re-Análisis Europeo de Quinta generación (ERA5), la base de datos “Peruvian Interpolated data of the SENAMHI’s Climatological and hydrological Observations” (PISCO) y 18 Modelos Climáticos Regionales (RCM) con resoluciones espaciales de 0.22° y 0.44° en el área de Perú y Sudamérica respectivamente. El trabajo se centró en las variables de temperatura, precipitación, humedad específica y viento. Se evaluó el desempeño de los RCM en la representación de patrones espaciales durante el trimestre Diciembre – Enero – Febrero (DEF) entre 1981 y 2005, utilizando ERA5 para Sudamérica y PISCO para Perú. Las métricas estadísticas utilizadas incluyeron BIAS, RMSE y correlación espacial. Los RCM ETA, Remo2015 y RCA4, basados en los Modelos Climáticos Globales (GCM) HadGem2-ES, mostraron las mejores métricas al comparar con los datos de ERA5 y PISCO, junto con REMO y RCA4 utilizando el GCM MPI-ESM-LR.

Palabras clave: RCM, ERA5, PISCO, RMSE, BIAS, correlación espacial.

ABSTRACT

In this work, data from the Fifth Generation European Re-Analysis (ERA5), the 'Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations' (PISCO) database, and 18 Regional Climate Models (RCMs) with spatial resolutions of 0.22° and 0.44° in the Peru and South America area respectively were employed. The study focused on the variables of temperature, precipitation, specific humidity, and wind. The performance of RCMs in representing spatial patterns during the December - January - February (DJF) quarter between 1981 and 2005 was evaluated, using ERA5 for South America and PISCO for Peru. Statistical metrics used included BIAS, RMSE, and spatial correlation. The ETA, Remo2015, and RCA4 RCMs, based on the HadGem2-ES Global Climate Models (GCMs), exhibited the best metrics when compared to ERA5 and PISCO data, along with REMO and RCA4 using the MPI-ESM-LR GCM.

Keywords: RCM, ERA5, PISCO, RMSE, BIAS, spatial correlation.

I. INTRODUCCIÓN

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) es la entidad peruana encargada de brindar oportunamente información meteorológica y climatológica, así como pronósticos del tiempo y alertas tempranas, predicciones estacionales y proyecciones de escenarios de cambio climático en el país. Esta última función se ha adquirido mayor notoriedad desde la creación de La Ley Marco sobre Cambio Climático en el Perú (Ley N° 30754). Esta ley le da las facultades y responsabilidades al SENAMHI de generar información climática y proyecciones futuras de escenarios de cambio climático en el país. Esto implica recopilar, analizar y difundir datos climáticos relevantes, así como realizar estudios y análisis de escenarios futuros del clima. En este sentido, se participó en el equipo de trabajo del SENAMHI, con quienes se han desarrollado el estudio de validación de los modelos regionales climáticos del “Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment”, los que fueron analizados para identificar a los que logran representar las condiciones atmosféricas y superficiales en América del Sur (SAM). Aunque para SAM, a diferencia de Europa o norte América, solo se dispone información de cuatro GCM.

1.1. Problemática:

Los GCM y los RCM pueden ser herramientas útiles para proporcionar proyecciones climáticas (IPCC, 2013). Los GCM son la principal herramienta para las proyecciones de cambio climático; sin embargo, estos no logran simular el clima local (Rummukainen, 2016), esta limitación es resuelta por los RCM quienes son la herramienta esencial para el análisis del clima local y sus cambios apoyado en una cuadrícula (grilla) más pequeña se esperan también errores más pequeños (Pasten-Zapata, 2019). De esta forma, los RCM suplen la necesidad de simular procesos y fenómenos climáticos no resueltos en los GCM. La escala espacial (resolución horizontal) más fina permite reconocer montañas, costas, lagos, etc., que pueden influir sustancialmente en el clima de una región (Gutowski, 2020). Los RCM también tienen un grupo, el World Climate Research Program (WCRP) para diseñar los protocolos de proyección llamado CORDEX. La información de los modelos CORDEX fueron dispuestos en el 2014; para el dominio SAM: 1) El Modelo Climático Regional

versión 4 (RegCM4), 2) el REMO versión 2015 (REMO2015), 3) el modelo Eta ejecutado en Brasil y 4) el modelo WRF.

1.2. Objetivo:

1.2.1. Objetivo general

Validar física y estadísticamente los modelos regionales climáticos del CORDEX en el trimestre de diciembre – enero – febrero, verano del hemisferio sur.

1.2.2. Objetivos específicos

Realizar la validación física y estadística en diferentes niveles isobáricos, del viento en 200 hPa y humedad específica en 850 hPa de los modelos climáticos regionales de CORDEX respecto al reanálisis ERA5 en DEF.

Realizar la validación física y estadística de la temperatura a 2m y precipitación de los modelos climáticos regionales de CORDEX respecto a la base de datos PISCO en DEF.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Modelos de Circulación General:

Los GCM están diseñados para representar los procesos interrelacionados del suelo, los océanos y la atmósfera, nos brindan guía sobre las temperaturas, las precipitaciones y otras variables climáticas. Aunque los modelos de circulación general proporcionan detalles de eventos meteorológicos individuales de breve duración en el distante futuro, estos no se utilizan directamente, sino que trabajamos con representaciones estadísticas del clima futuro. Tales representaciones pueden incluir información como la temperatura media, la precipitación anual media, el número de eventos de precipitaciones en exceso de 25 mm (ejemplo de acumulado) en un día que ocurren al año y el número de días secos consecutivos al mes.

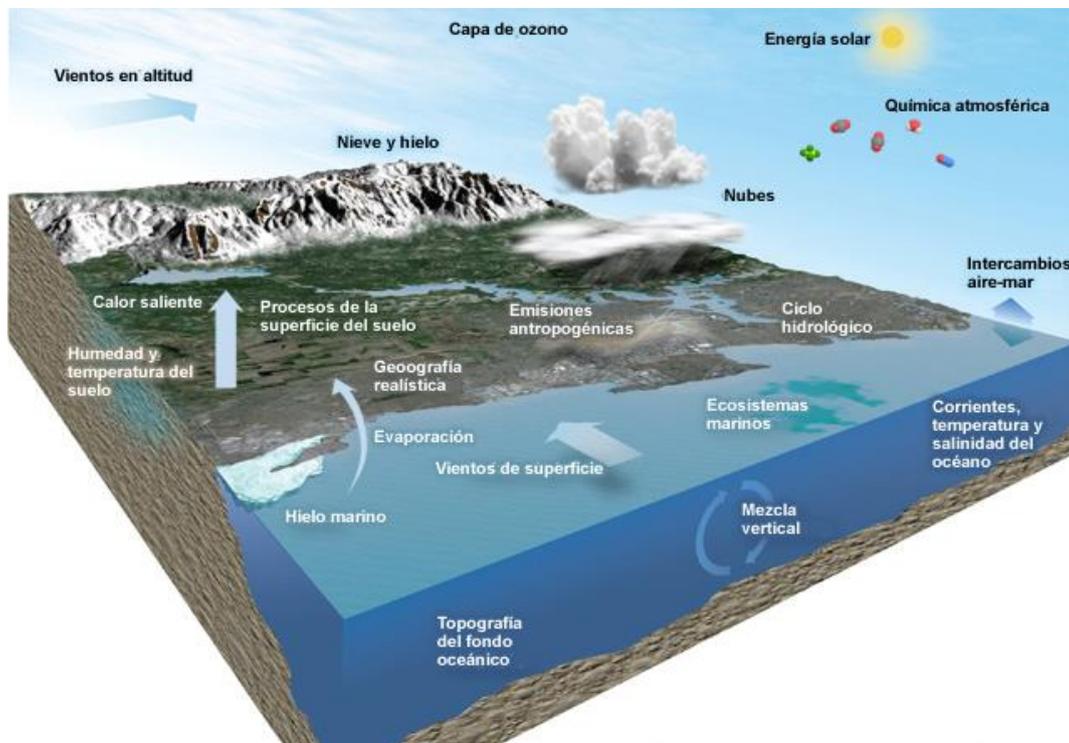


Figura 1: Modelo de Circulación General

Estos modelos se utilizan con frecuencia para simular el clima del pasado como paso inicial para la simulación de los climas futuros. Cuando un modelo de circulación general simula

de manera confiable las complejas interacciones entre los procesos de un clima del pasado, aumenta nuestra confianza en su capacidad de simular los eventos del futuro.

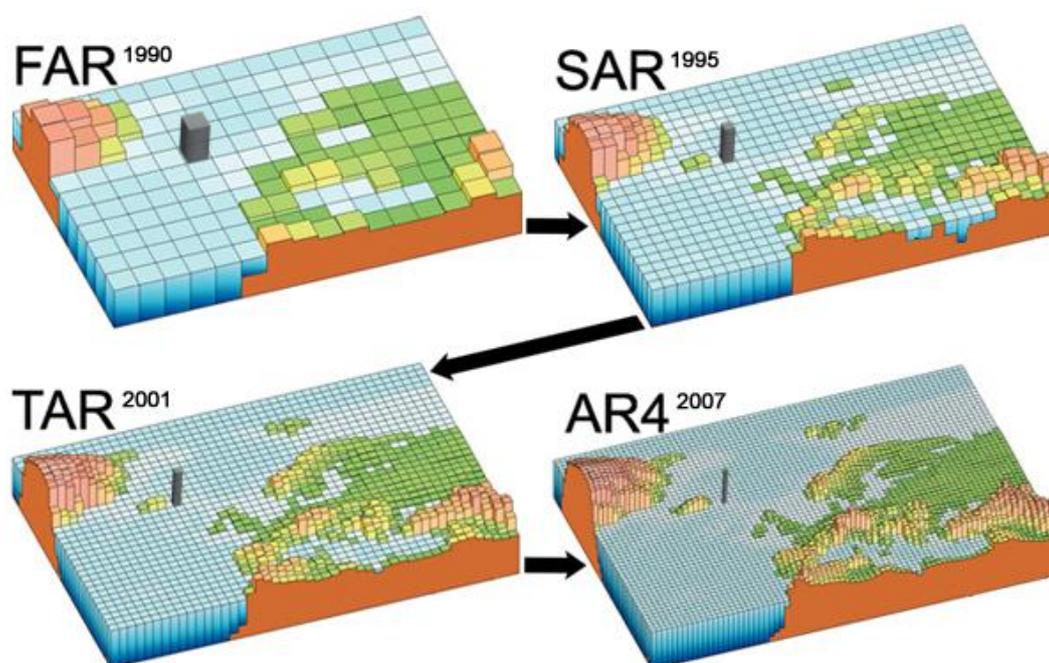


Figura 2: Evolución en la resolución de los modelos climáticos.

2.2. Resolución del Modelo Climático Regional:

La característica más útil de un modelo climático para aplicaciones de escala regional es la de tener una resolución espacial suficientemente fina para representar con exactitud los detalles topográficos. La resolución espacial de los GCM mejoró entre la publicación del primer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en 1990, y la del cuarto, en 2007, y mejoró aún más en el GCM utilizado para el informe actual. Pero normalmente los datos del GCM siguen siendo demasiado gruesos para resolver adecuadamente ciertas estructuras importantes, como las cordilleras y los litorales. Para aumentar la utilidad de los modelos globales de baja resolución en aplicaciones regionales, se recurre a los procesos de corrección de sesgos y de reducción de la escala espacial.

2.3. Regional Downscaling:

Un GCM puede proporcionar información de predicción confiable en escalas de alrededor de 1000 por 1000 km que cubren lo que podría ser un paisaje muy diferente (desde llanuras costeras muy montañosas hasta planas, por ejemplo) con un potencial muy variable para inundaciones, sequías u otros eventos extremos. Los RCM y la reducción empírica

estadística, aplicados en un área limitada e impulsados por GCM pueden proporcionar información en escalas mucho más pequeñas que respaldan una evaluación y planificación de impacto y adaptación más detalladas, lo cual es vital en muchas regiones vulnerables del mundo.

Los GCM nos pueden proporcionar proyecciones de cómo el clima de la tierra puede cambiar en el futuro. Estos resultados son la principal motivación para que la comunidad internacional tome decisiones sobre la mitigación del cambio climático. Sin embargo, los impactos de un clima cambiante, y las estrategias de adaptación requeridas para enfrentarlos, ocurrirán en escalas más regionales y nacionales. Aquí es donde Regional Downscaling tiene un papel importante que desempeñar al proporcionar proyecciones con mucho mayor detalle y una representación más precisa de eventos extremos localizados.

2.4. Proyecto CORDEX:

El proyecto CORDEX, es marco del Programa Mundial de Investigación Climática (WCRP) para evaluar el desempeño del modelo climático regional a través de un conjunto de experimentos destinados a producir proyecciones climáticas regionales.

2.5. Validación de modelos climáticos:

La validación de modelos climáticos es un proceso que compara las salidas del modelo con observaciones (mediciones reales) y/o reanálisis (mediciones estimadas a partir de datos reales) para evaluar la precisión y realismo de representan las condiciones climáticas. Este proceso se realiza para confirmar la capacidad del modelo de simular condiciones climáticas actuales y pasadas con fiabilidad, fortaleciendo la confianza en sus proyecciones futuras (IPCC, 2021).

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

Para el presente estudio se utilizaron datos con resolución temporal de 1 mes del proyecto CORDEX, reanálisis ERA5 y la base de datos PISCO. Todos los datos se han preparado para utilizarlos en formato NetCDF. En la tabla 1 se indica las direcciones de enlace de descarga de los datos utilizados.

Tabla 1: Direcciones de los datos de RCM del CORDEX, ERA5 y PISCO

Nombre	Dirección de descarga
RCM CORDEX	https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/
ERA5	https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means?tab=form de Copernicus
PISCO	ftp://r-publi_dgh2:s0loLectur%40@ftp.senamhi.gob.pe/

3.1. Alcance temporal y del ámbito geográfico

Para la verificación de los RCM del CORDEX se utilizó el área de Sudamérica para el análisis de las variables en altura y el área de Perú para las variables de superficie, los detalles se presentan en la tabla 2:

Tabla 2: Áreas para el análisis para el ERA5 (Sudamérica) y el PISCO (Perú).

Área	Sudamérica	Perú
Latitud	-50° - 18,5°	-18,75 - 0,25
Longitud	260° - 331°	278,5° - 293°
Periodo	1979 - 2005 (mensual)	1981 - 2005 (mensual)
Observado utilizado	ERA5	PISCO

3.2. Datos

Se utilizaron 18 modelos regionales climáticos del proyecto CORDEX (tabla 3), datos ERA5 y la base de datos PISCO (tabla 4); todos estos datos en el periodo 1981-2005, siendo estas 2 ultimas bases de datos las que se consideraran como datos observada para la validación.

3.3. Modelos regionales de CORDEX

Tabla 3: Lista de RCM utilizados, GCM, Modelo regional, Instituto, Experimento, Resoluciones temporales y espaciales, Abreviaturas de los RCM utilizadas

Tabla 3: RCM disponibles para Sudamérica

N°	Modelo Climático Global (GCM)	Modelo Regional	Experimento	Resolución Temporal / Horizontal
M 1	HadGEM2-ES	RegCM4-7	MOHC	Mensual / 0,22°
M 2	MPI-ESM-MR	RegCM4-7	MPI-M	Mensual / 0,22°
M 3	NorESM1-M	RegCM4-7	NCC	Mensual / 0,22°
M 4	HadGEM2-ES	REMO2015	MOHC	Mensual / 0,22°
M 5	MPI-ESM-LR	REMO2015	MPI-M	Mensual / 0,22°
M 6	NorESM1-M	REMO2015	NCC	Mensual / 0,22°
M 7	CanESM2	RCA4	CCCma	Mensual / 0,44°
M 8	CSIRO-Mk3-6-0	RCA4	CSIRO-QCCCE	Mensual / 0,44°
M 9	EC-EARTH	RCA4	ICHEC	Mensual / 0,44°
M 10	IPSL-CM5A-MR	RCA4	IPSL	Mensual / 0,44°
M 11	MIROC5	RCA4	MIROC	Mensual / 0,44°
M 12	HadGEM2-ES	RCA4	MOHC	Mensual / 0,44°
M 13	MPI-ESM-LR	RCA4	MPI-M	Mensual / 0,44°
M 14	NorESM1-M	RCA4	NCC	Mensual / 0,44°
M 15	GFDL-ESM2M	RCA4	NOAA-GFDL	Mensual / 0,44°
M 16	CanESM2	WRF341I	CCCma	Mensual / 0,44°
M 17	HadGEM2-ES	ETA	MOHC	Mensual / 0,44°

Tabla 4: Detalles de los datos utilizados como observados ERA5 y PISCO.

Nombre	Resolución temporal / Horizontal	Dominio	Periodo utilizado
ERA5	Mensual / 0,25°	GLOBAL	1981-2005
PISCO	Mensual / 0,1°	PERU	1981-2005

3.3.1. Parametrización del RCM ETA:

El modelo Eta es hidrostático con una resolución horizontal de 40 km y otra de 20 km, ambos con 38 capas verticales, cubriendo casi toda Sudamérica. Este modelo regional fue desarrollado en la Universidad de Belgrado (Mesinger et al., 1988; Black, 1994), utilizando la malla E de Arakawa (Arakawa y Lamb, 1977) y la coordenada vertical η (Mesinger, 1984). La integración temporal se realiza mediante la técnica 'split-explicit' (Gadd, 1978). Los

procesos turbulentos se tratan con el esquema de Mellor-Yamada (1974). Los esquemas de parametrización de radiación larga (Fels y Schwarzkopf, 1975) y corta (Lacis y Hansen, 1974) fueron desarrollados por el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos. El modelo utiliza un esquema Betts-Miller modificado para la convección (Janjic, 1994). El esquema de superficie está representado por el esquema OSU (Chen et al., 1997). En este trabajo, la versión actualizada del modelo Eta se adapta para estudios de cambio climático. La temperatura superficial del mar se obtiene de los modelos oceánicos globales acoplados: HadGEM2-ES y MIROC5, y se actualiza diariamente. La humedad inicial del suelo y las temperaturas del suelo se derivan de los modelos globales. Los límites laterales se actualizan cada 6 horas. Se descarta el primer año de integración del análisis. El modelo se configuró con una resolución de 20 km y 38 niveles verticales. La cima del modelo está establecida a 25 hPa. El área de simulación del modelo regional fue limitada por las coordenadas: 100° O-30° O; 30° N-50° S.

3.3.2. Parametrización del RCM REMO2009:

Resumen de las especificaciones de REMO utilizadas para las simulaciones de CORDEX:

- Versión del Modelo: REMO 2009 hydrostatic
- Coordenada/ Niveles Verticales: Hybrid/ 27-31
- Esquema de Advección: Semi-lagrangian
- Paso de Tiempo: 240 s
- Esquema Convectivo:

Tiedtke DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2)

Nordeng DOI: [10.21957/e34xwhysw](https://doi.org/10.21957/e34xwhysw)

Pfeifer DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos4020214>

- Esquema de Radiación:

Morcrette et al. DOI: [10.1007/s10584-009-9739-3](https://doi.org/10.1007/s10584-009-9739-3)

Giorgetta and Wild DOI: [10.1007/s00703-007-0275-2](https://doi.org/10.1007/s00703-007-0275-2)

- Difusión Vertical de la Turbulencia:

Louis DOI: [0006-8314/79/0172-0187\\$02.40](https://doi.org/10.1006-8314/79/0172-0187$02.40)

- Esquema de Microfísica de Nubes:

Lohmann and Roeckner DOI: 10.1007/BF00207939

- Esquema de Superficie Terrestre:

Hagemann DOI: 10.17617/2.2344576

- Rechid et al. DOI: 10.1007/s00704-008-0003-y

3.3.3. Parametrización del RCM RegCM4:

La parametrización de este modelo incluye esquemas para la superficie terrestre, la capa límite planetaria y los flujos aire-mar, una configuración mixta de convección y banda tropical, modificaciones en los esquemas existentes de transferencia radiativa en la capa límite. Los detalles de cada uno de los esquemas mencionados se pueden encontrar en: <https://doi.org/10.3354/cr01018>

3.3.4. Parametrización del RCM WRF:

Las parametrizaciones utilizadas en el RCM WRF para el proyecto CORDEX están detalladas en el siguiente documento técnico desarrollado por la UBA:

https://wiki.cima.fcen.uba.ar/mediawiki/images/8/85/CDXWRF_version2.pdf

3.3.5. Parametrización del RCM RCA4:

Las parametrizaciones utilizadas en el RCM RCA4 para el proyecto CORDEX están detalladas en la siguiente cartilla informativa:

<https://glisa.umich.edu/wp-content/uploads/2021/05/RCA4-Report-Card-page-1.pdf>

3.3.6. Variables atmosféricas utilizadas:

Las variables utilizadas fueron el viento y humedad relativa para el análisis de la circulación en niveles, mientras que para el análisis en superficie se utilizó la temperatura y precipitación (tabla 5). En esta tabla se indica la disponibilidad de cada variable por modelo CORDEX, ERA5 y PISCO.

Tabla 5: Variables utilizadas para la evaluación, niveles, abreviatura y unidades

Variable	Niveles	Abreviatura	Unidades
Viento zonal	200 y 850 hPa	u200 y u850	m/s
Viento meridional	200 y 850 hPa	v200 y v850	m/s
Humedad específica	850 hPa	hus850	g/kg
Temperatura 2 m	Superficie	t2m	°C
Precipitación total	Superficie	pr	mm

Tabla 6: variables utilizadas y disponibles por los RCM, ERA5 y PISCO.

N°	FUENTE	Variables de altura y superficie						
		u	v	u	v	hus	t2m	pr
		200	200	850	850	850		
1	PISCO						x	x
2	ERA5	x	x	x	x	x		
3	RegCM4 HG2ES	x	x	x	x	x	x	x
4	RegCM4 MPI	x	x	x	x	x	x	x
5	RegCM4 NCC	x	x	x	x	x	x	x
6	REMO HG2ES	x	x	x	x	x	x	x
7	REMO MPI	x	x	x	x	x	x	x
8	REMO NCC	x	x	x	x	x	x	x
9	RCA4 CanESM2	x	x	x	x	x	x	x
10	RCA4 CSIRO	x	x	x	x	x	x	x
11	RCA4 ICHEC	x	x	x	x	x	x	x
12	RCA4 IPSL	x	x	x	x	x	x	x
13	RCA4 MIROC	x	x	x	x	x	x	x
14	RCA4 HG2ES	x	x	x	x	x	x	x
15	RCA4 MPI	x	x	x	x	x	x	x
16	RCA4 NCC	x	x	x	x	x	x	x
17	RCA4 GFDL	x	x	x	x	x	x	x
18	WRF CanESM2	x	x	x	x	x	x	x
19	ETA HG2ES	x	x	x	x	x	x	x

3.4. Metodología

3.4.1. Preparación de los datos:

a) Uniformización de los datos:

Este proceso consistió en uniformizar las unidades de las variables en los RCM de CORDEX, PISCO y ERA5. Las variables uniformizadas fueron: viento zonal, viento meridional, humedad específica, temperatura (tabla 7). Además, los modelos CORDEX y los datos de PISCO se interpolaron usando la técnica bilineal disponible en el software Climate Data Operators (CDO) a la resolución espacial de 0.25° del ERA5.

Tabla 7: variables uniformizadas de los RCM, ERA5 y PISCO.

Variable	Unidades iniciales	Factor de conversión	Unidades finales
Viento	m s-1	-	m s-1
Humedad específica	kg kg-1	x1000	g kg-1
Temperatura	K	-273,15	°C
Precipitación	kg m-2 s-1	x2592000	mm

b) Agregaciones temporales:

Para el análisis se realizaron agregaciones temporales según la variable. En el caso de la precipitación se realizó el acumulado trimestral de los meses (diciembre, enero, febrero). Para las demás variables (viento, humedad, temperatura) se realizó el promedio simple de los tres meses mencionados. Para todos estos cálculos se utilizó el CDO (Climate Data Operators), considerando el periodo de 1981 a 2005. Para evitar el uso de trimestres incompletos, se consideró para los cálculos desde marzo del primer año hasta noviembre del último año.

3.4.2. Circulación para niveles altos en Sudamérica:

Tabla 8: Patrones de Circulación en niveles altos y bajos en DEF.

Patrón de circulación	Nivel isobárico	Descripción
Alta de Bolivia (AB)	200 hPa	Circulación atmosférica de giro antihorario sobre Sudamérica centrado sobre Bolivia, (Gilford et al.,1992)
Chorro de bajos niveles (ChBN)	850 hPa	Flujo de velocidades sobre los 12m/s y que se presenta con mayor frecuencia en la estación de verano del hemisferio sur, (Marengo et al., 2004)

El primer análisis utilizó los datos del ERA5 para evaluar la representación del trimestre DEF, identificándose los patrones de circulación (PC) en niveles altos y bajos. Para esto, se utilizó el PC de la Alta de Bolivia (AB) en el análisis en niveles altos (200 hPa ~12km), su configuración climática de la AB en DEF la sitúa sobre continente, con centro sobre Bolivia. En niveles bajos (850 hPa ~1500m) se identificó el chorro de bajos niveles (ChBN) al oriente de los andes centrales del Perú. Los detalles de los sistemas se presentan en la tabla 8 y en la figura 3.

En la figura 1 se enmarca las configuraciones de la atmosfera en niveles altos, medios y bajos. En A se usa el rectángulo azul para señalar la ubicación de la AB en 200 hPa para el trimestre DEF. En B se muestra la ubicación de los reflejos del APS y AAS (cuadrados azul claro) y curvatura del viento asociado a la corriente en chorro (flecha azul claro) en DEF en 850 hPa.

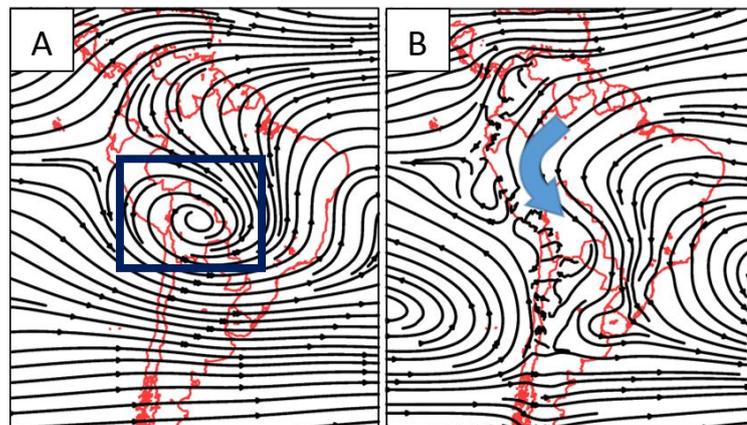


Figura 3. Ubicación de la AB (A) y ChBN (B) en DEF.

3.4.3. Métricas estadísticas.

Se han utilizado 3 métricas estadísticas, BIAS, RMSE y correlación espacial, la cuales ha sido definidas por los autores citados a continuación.

Mugume et al. (2016) describe el BIAS o sesgo, también conocido como error medio (EM), se obtiene promediando las diferencias (D_{ij}) sobre el número de casos. Para un resultado de modelo dado, M_j , el EM se calcula a partir de:

$$EM_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{ij}$$

Un valor de sesgo cercano a cero indica que los valores del modelo están de acuerdo con los valores reales con cero, lo que implica que no hay sesgo.

Mugume et al. (2016) describe al RMSE como la raíz cuadrada de la diferencia de los promedios al cuadrado (D_{ij}^2) y es una medida estadística popular para evaluar el desempeño del modelo numérico en la investigación atmosférica. Para un modelo, j , el RMSE se define de la siguiente manera:

$$RMSE_j = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{ij}^2 \right]^{1/2}$$

El RMSE es un buen criterio para clasificar la precisión de un modelo y un índice bajo indica una mayor precisión.

Schober et al. (2018) describe la correlación es una medida de una asociación monótonica entre 2 variables. Una relación monótonica entre 2 variables es aquella en la que (1) a medida que aumenta el valor de 1 variable, también lo hace el valor de la otra variable; o (2) a medida que aumenta el valor de 1 variable, disminuye el otro valor de la variable.

Una relación lineal entre 2 variables es un caso especial de una relación monótonica. Muy a menudo, el término "correlación" se usa en el contexto de una relación tan lineal entre 2 variables aleatorias continuas, conocida como correlación de momento-producto de Pearson, que se abrevia comúnmente como "r". Para facilitar la interpretación, se usa comúnmente un coeficiente de correlación de Pearson, este coeficiente es una medida adimensional de la covarianza, que se escala de tal manera que varía de -1 a $+1$.

3.4.4. Diagrama de Taylor:

En climatedataguide.ucar.edu se describen los diagramas de Taylor como gráficos que proporcionan "un resumen estadístico conciso de cuán bien coinciden los patrones entre sí en términos de su correlación, su diferencia de raíz media cuadrática y la razón de sus variaciones". El diagrama de Taylor proporciona un marco gráfico que permite comparar un conjunto de variables de una variedad de (por ejemplo) uno o más RCM con datos de referencia. Los datos de referencia pueden basarse en observaciones reales o reanálisis. Todas las variables deben estar en la misma resolución, por lo que puede ser necesario interpolar la cuadrícula de datos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se han dividido en el análisis de los patrones espaciales de la circulación, que será relacionado a la validación física que muestra la configuración espacial de los vientos al lograr representar la posición y configuración de la circulación conocida como Alta de Bolivia, en el verano del hemisferio sur. Los niveles isobáricos utilizados son 200 hPa y 850 hPa. La validación estadística se representa por medio de los estadísticos BIAS, RMSE y correlación espacial, utilizando el diagrama de Taylor, para las variables viento zonal, viento meridional, humedad específica, temperatura y precipitación.

4.1. Análisis de patrones espaciales

4.1.1. Climatología de PC a 200hPa

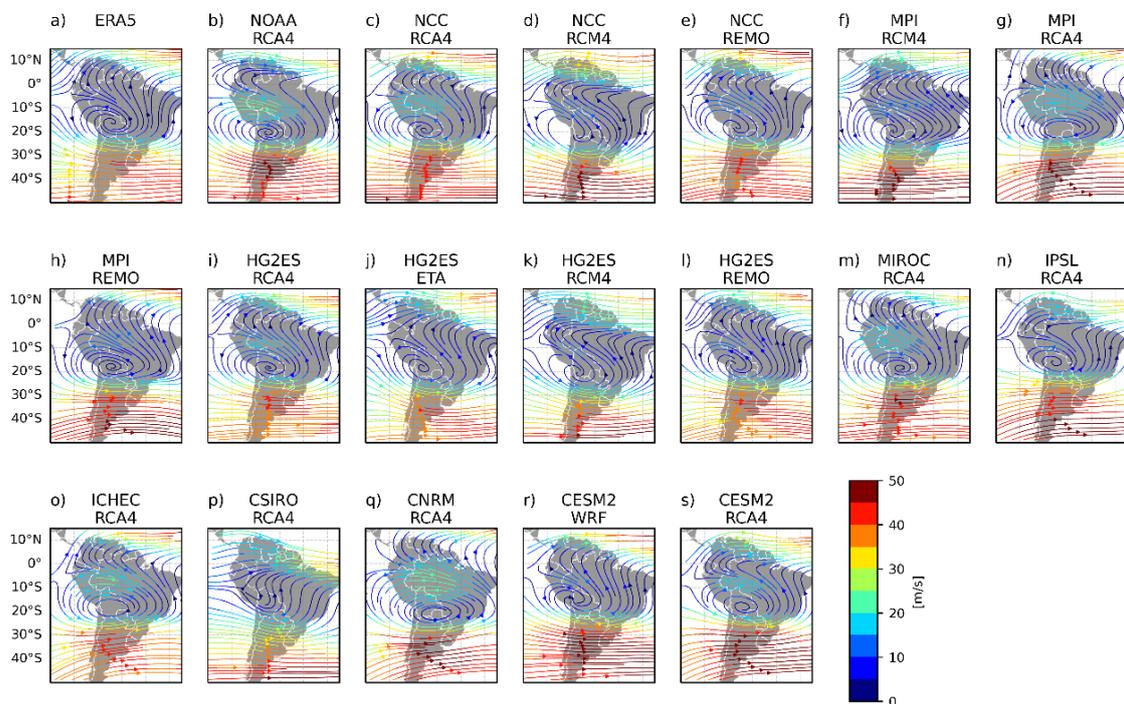


Figura 4. Circulación promedio en 200 hPa en DEF en el periodo 1981-2005 del ERA5 (a) y de los RCM (b hasta s).

Se observó que la circulación sobre Sudamérica en DEF a 200 hPa de ERA5 y los RCM, y se encontró que la AB fue bien representada por la mayoría de modelos, no obstante, en la mayoría de los RCM su núcleo se vio ligeramente desplazado hacia el suroeste.

El ERA5 resuelve la presencia de la Vaguada del Noreste de Brasil (VNEB) y de un collado al sur de Ecuador (CSE), estas dos configuraciones de la atmosfera características del verano, en el hemisferio sur, son representados por la mayoría de RCM, durante este trimestre los modelos que representaron mejor la AB y los patrones de circulación de VNEB y CSE son: ETA HG2ES, REMO MPI y REMO HG2ES. El RCM que menos se asemeja a lo presentado por el ERA5 es el RCA4 CSIRO.

4.1.2. Climatología de PC a 850hPa

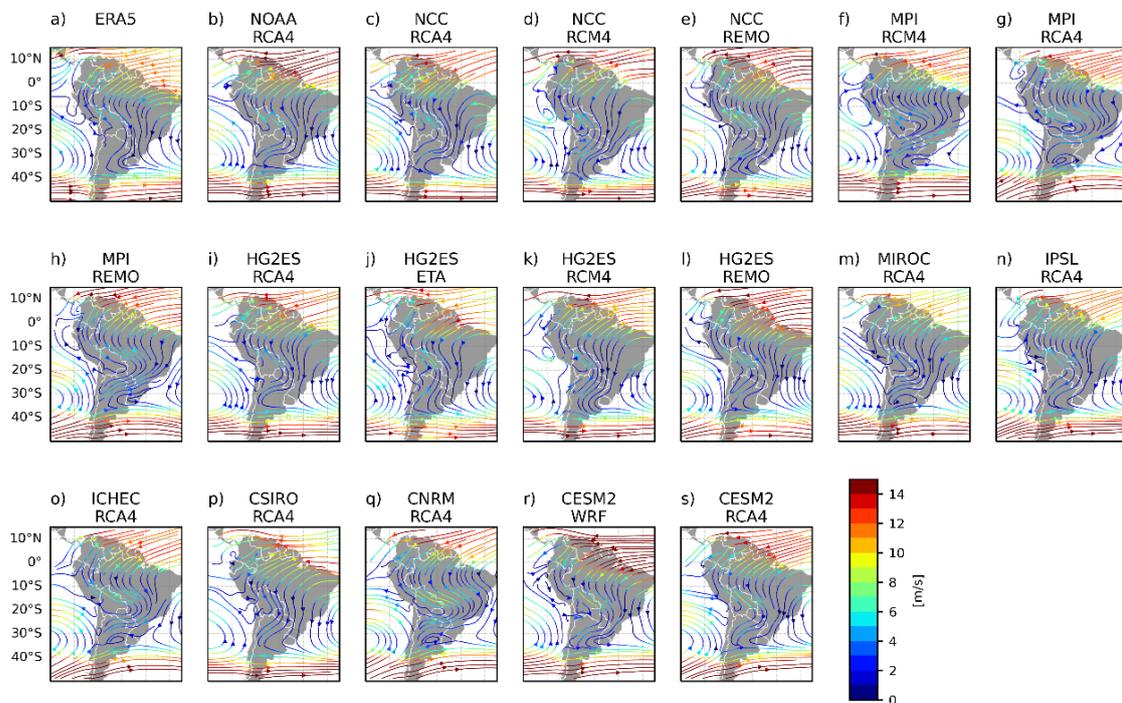


Figura 5. Circulación promedio en 850 hPa en DEF en el periodo 1981-2005 del ERA5 (a) y de los RCM (b hasta s).

El ERA5 reflejó un PC predominante de 2 núcleos antihorarios los cuales son reflejo de los anticiclones del Pacífico sur y del Atlántico Sur; así también, se visualizó el reflejo de una circulación que bordea la región de los Andes orientales llamada chorro de niveles bajos (ChBN). Los RCM, en general, mostraron la configuración de los dos núcleos sobre el Pacífico y el Atlántico, así como la configuración del ChBN. Los RCM que presentaron mejor similitud visual a esta configuración son el ETA HG2ES, el REMO HG2ES y el RCA4 HG2ES.

La mayoría de RCM resolvieron con dificultad el giro del flujo del este en la Cordillera de los Andes Sur que está asociado al ChBN. Los RCM que visualmente se asemejan más al ERA5 son el ETA HG2ES, el WRF CasESM2 y el REMO HG2ES.

4.1.3. Climatología de humedad específica a 850 hPa

Se observó que el ERA5, en el trimestre DEF, refleja la mayor concentración de humedad específica en 850 hPa (hus850), alrededor de 14 de 15 gramos por kilogramo. Sobre la Amazonia en general presentaron los valores más altos, siendo limitada al oeste por los Andes orientales de Perú donde presentó una disminución marcada. La distribución de hus850 mostró un mínimo con valores por debajo de los 5 gr/kg sobre el Pacífico Oriental que limita con el continente sudamericano desde los -12° de latitud sur (figura no mostrada). Los RCM mostraron que la distribución de hus850 fue semejante, visualmente, al ERA5. Los RCM que más se aproximaron al ERA5 fueron el WRF CanESM2 y el REMO HG2ES. El RCM ETA HG2ES también reflejó la sequedad; sin embargo, los valores fueron menores al promedio.

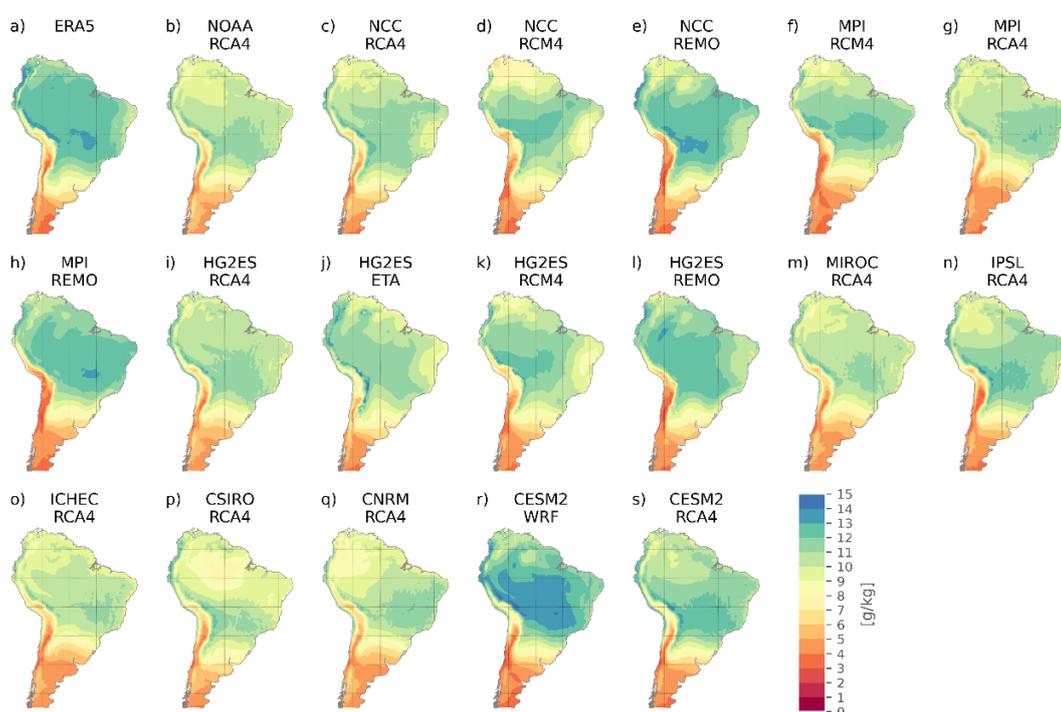


Figura 6. Distribución de la climatología [1981-2005] de humedad específica (gr/kg) en 850 hPa en DEF, del ERA5 (a) y de los RCM (b hasta s).

En general la mayoría de RCM muestran una distribución de hus850 similar a la referencia (ERA5). Esta distribución de la hus850 en Sudamérica fue mejor representada por WRF CanESM2, REMO HG2ES, REMO MPI y ETA HG2ES.

4.1.4. Climatología de la temperatura a 2m:

La climatología en DEF de la temperatura a 2m (t2m) de PISCO, mostraron la distribución espacial con dos áreas marcadamente mayores, siendo la selva y la costa Norte de Perú las más altas; mientras que, en la zona andina centro – sur la t2m tuvo sus valores mínimos. La t2m en general muestra una buena distribución de máximas temperaturas hacia la zona de Selva y Costa Norte y de mínimas temperaturas hacia la zona andina Sur. La mayoría de RCM representaron de forma óptima esta variable, destacándose el WRF CanESM2 y el RCA4 MPI. Aunque los RCM tienden a subestimar la temperatura en la zona andina sur y centro.

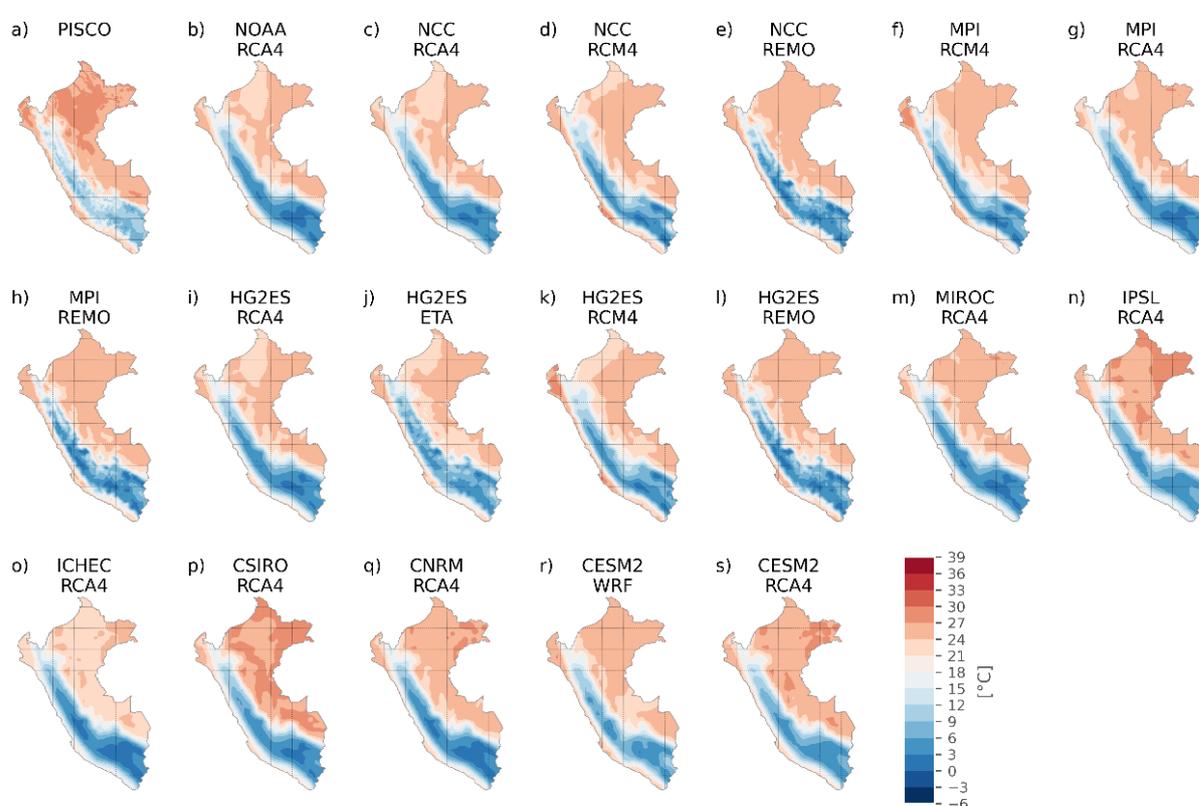


Figura 7. Climatología [1981 – 2005] de la temperatura (°C) a 2 metros en DEF.

4.1.5. Climatología de los acumulados de precipitación:

La climatología de la precipitación de PISCO en DEF mostró los núcleos de mayores acumulados hacia la vertiente Oriental del centro y sur de los Andes peruanos, la mayoría de RCM mostraron estos núcleos hacia la vertiente Oriental centro y sur, sin embargo, son sobrestimados. Los RCM que se aproxima a la distribución espacial de el dato de referencia

en cuando a la precipitación acumulada son: el ETA HG2ES, el RCA4 HG2ES y el REMO MPI.

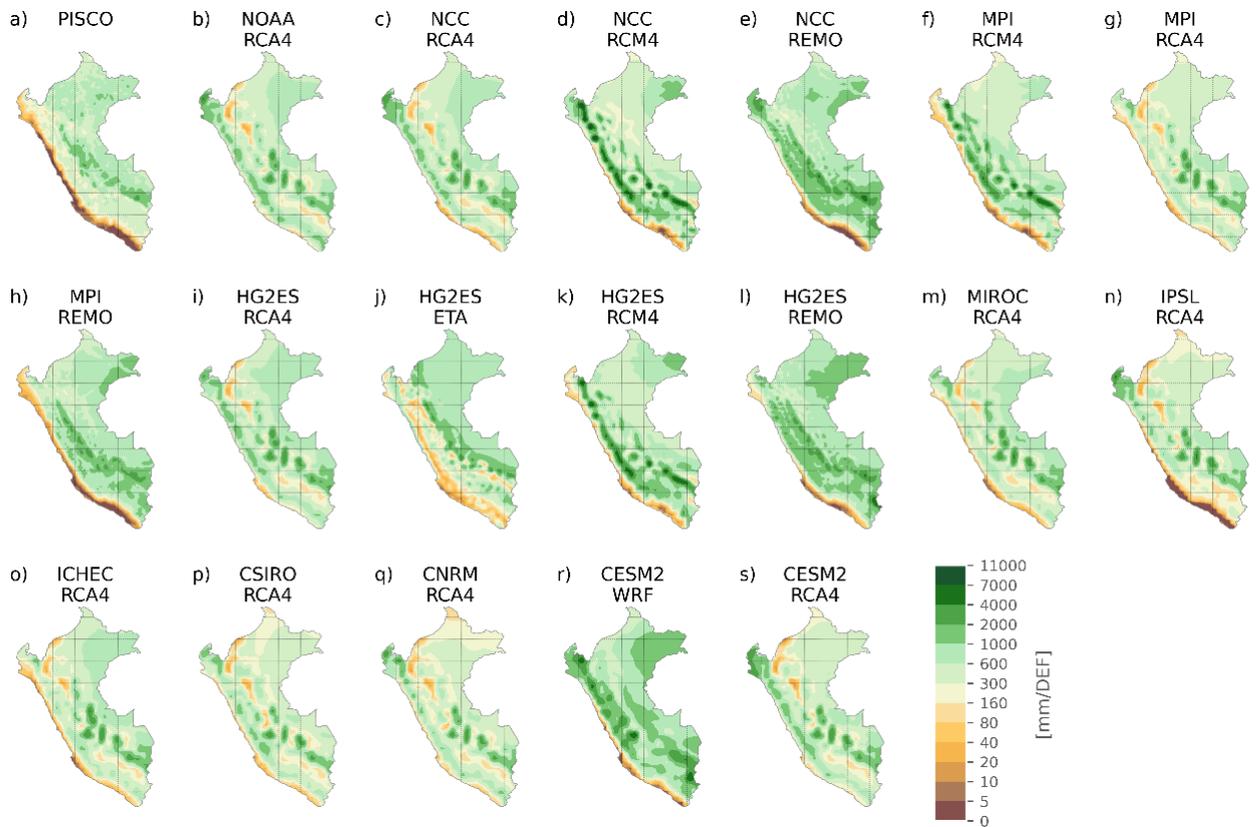


Figura 8. Climatología [1981 – 2005] de los acumulados de precipitación (mm) en DEF.

PISCO mostró también valores bajos de precipitación en las zonas transición, aunque mostrando un acumulado mayor hacia la zona de Selva y ceja de selva, una distribución similar muestra el WRF CanESM2 y el RCA4 HG2ES. El RCM más cercano a lo mostrado por los datos de PISCO es el ETA HG2ES.

4.2. Diagrama de Taylor

4.2.1. Viento zonal en 200 hPa.

Se observó que la correlación espacial del viento zonal en 200 hPa a nivel de Sudamérica alcanza hasta 0.9 de correlación espacial (figura 9). El modelo con las mejores correlaciones en DEF es el WRF CanESM2. El peor RCM es el RegCM4 NCC.

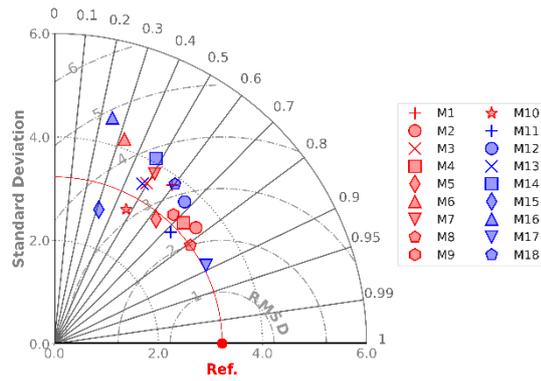


Figura 9. Diagrama de Taylor para el viento zonal en 200 hPa.

4.2.2. Viento zonal en 850 hPa

En la figura 10 se observó que la correlación espacial de los 18 RCM a nivel de Sudamérica en general se presentó correlaciones altas, variando desde los 0.6 hasta los 0.9. La desviación estándar también fue bastante cerca a la referencia ERA5.

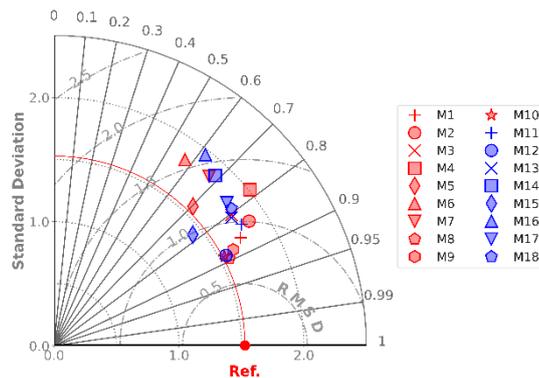


Figura 10. Diagrama de Taylor para el viento zonal en 850 hPa

4.2.3. Humedad específica en 850 hPa

Se observó (figura 11) que la correlación espacial de los RCM con el ERA5 en DEF para esta variable se alcanzó los valores sobre los 0.9 en dos RCM. De estos se destacan con las correlaciones más altas el WRF CanESM2 y el REMO HG2ES. Se observa también en DEF que las correlaciones oscilan entre los 0.7 y 0.9. En promedio los errores están por debajo de 2gr/kg, un valor bajo para considerarlo en una climatología.

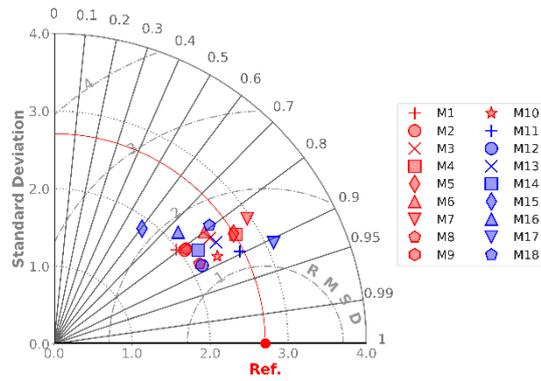


Figura 11. Diagrama de Taylor para la humedad específica en 850 hPa

4.2.4. Temperatura a 2 metros

En la figura 12 se observó que la correlación espacial de la variable temperatura en DEF son superiores a 0.8 y llegando incluso hasta 0.95 en algunos RCM. Por otro lado, el erro en esta variable esta alrededor de los 2 °C.

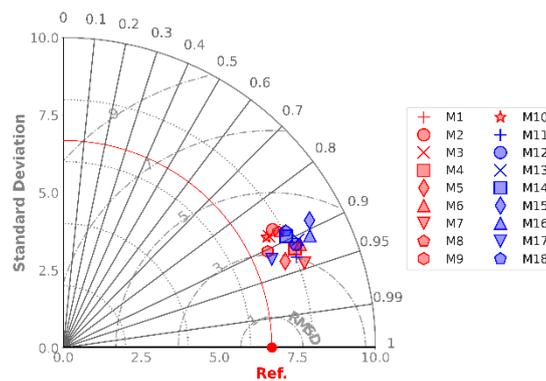


Figura 12. Diagrama de Taylor para la temperatura a 2 metros

4.2.5. Precipitación acumulada trimestral

En la figura 13 se observó en la correlación espacial de la variable precipitación entre los RCM y PISCO en DEF, diferencias notables. En relación a otras variables analizadas, la precipitación presenta valores negativos en esta métrica. Las correlaciones más bajas se dan en DEF que es justamente el trimestre donde en promedio se tienen los mayores acumulados en comparación de los otros trimestres. El RCM que mejor representa a PISCO es el ETA HG2ES que alcanza 0.7 de correlación espacial. En relación al RMSE, el error bordea los 300 mm/DEF.

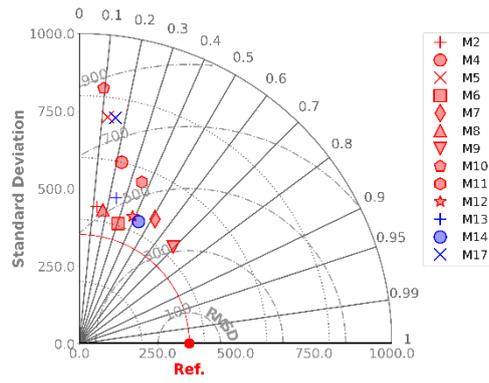


Figura 13. Diagrama de Taylor para la precipitación acumulada trimestral

V. CONCLUSIONES

- La validación de los RCM del CORDEX para el trimestre DEF ha demostrado una representación adecuada de los patrones climáticos; tanto en niveles altos de la atmósfera y en las variables climáticas de superficie.
- La configuración de flujos en altura (200 hPa) y en niveles bajos (850 hPa) de los RCM logra representar al reanálisis ERA5. Los resultados confirman la validación física y estadística, diferenciándose el modelo ETA del INPE como el RCM que logra representar la circulación en Sudamérica, simulando de forma clara la Alta de Bolivia. Respecto a la humedad específica, los RCM exhiben una distribución espacial similar a la observada en ERA5, mostrando la mejor representación en los RCM que utilizan el HadGEM2-ES como GCM input.
- Existe concordancia espacial entre los RCM y la base de datos PISCO, lo que se ve reflejado también en los estadísticos BIAS, RMSE y correlación. Esto indica una significativa representación de la temperatura del aire a 2 metros y de la precipitación acumulada trimestral. Se identificaron algunas discrepancias en algunas regiones de los Andes centro y sur. A pesar de estos desafíos, los RCM demuestran una notable capacidad para simular las condiciones climáticas generales.

VI. RECOMENDACIONES

- Los RCM que se utilizaron solo cuentan con históricos hasta el 2005, por lo que la comparación con los datos observados (PISCO) se vio limitada a el rango de años de 1981 hasta el 2005. Se recomienda realizar la validación de los históricos usando los RCM elaborados a partir de los datos del CMIP6 que contarán con mayor cantidad de años para comparar con los datos de PISCO.
- Para las métricas de las variables de temperatura y precipitaciones, es necesario solo realizar los cálculos en el área de interés para así evitar los errores que se presentan en la zona de los Andes de Ecuador.
- Es recomendable evitar cambiar la resolución de los datos observados, debido a que esto trae como consecuencia la pérdida de datos si se pasa de una malla (cuadrícula) más pequeña a una más grande, y crear información cuando se hace el paso contrario.
- El diagrama de Taylor usando métricas calculadas espacialmente da mejores resultados, por lo que se recomienda su uso para futuras evaluaciones.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Demissie, T. A., & Sime, C. H. (2021). Assessment of the performance of CORDEX regional climate models in simulating rainfall and air temperature over southwest Ethiopia. *Heliyon*, 7(8), e07791. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07791>
- Endris, H. S., Omondi, P., Jain, S., Lennard, C., Hewitson, B., Chang'a, L., ... & Tazalika, L. (2013). Assessment of the Performance of CORDEX Regional Climate Models in Simulating East African Rainfall. *Journal of Climate*, 26(21), 8453–8475. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00708.1>
- Gilford, M. T., Vojtesak, M. J., Myles, G., Bonam, R. C., & Martens, D. L. (1992). South America South of the Amazon River--A Climatological Study (No. USAFETAC/TN--92/004). AIR FORCE ENVIRONMENTAL TECHNICAL APPLICATIONS CENTER SCOTT AFB IL.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2013). Cambio climático 2013 - Bases físicas: Resumen para responsables de políticas, resumen técnico, preguntas frecuentes. Ginebra: IPCC. <https://library.wmo.int/idurl/4/50646>.
- Gutowski, W. J., Ullrich, P. A., Hall, A., Leung, L. R., O'Brien, T. A., Patricola, C. M., Arritt, R. W., Bukovsky, M. S., Calvin, K. V., Feng, Z., Jones, A. D., Kooperman, G. J., Monier, E., Pritchard, M. S., Pryor, S. C., Qian, Y., Rhoades, A. M., Roberts, A. F., Sakaguchi, K., Urban, N., & Zarzycki, C. (2020). The ongoing need for high-resolution regional climate models: Process understanding and stakeholder information. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(5), E664-E686. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0113.1>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... & Georgopoulou, E. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change

- projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14(2), 563-578.
<https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Kim, J., Waliser, D. E., Mattmann, C. A., Goodale, C. E., Hart, A. F., Zimdars, P. A., ... & Jack, C. (2014). Evaluation of the CORDEX-Africa multi-RCM hindcast: systematic model errors. *Climate dynamics*, 42(5-6), 1189-1202.
<https://doi.org/10.1007/s00382-013-1751-7>
- Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., ... & Nikulin, G. (2014). Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7, 1297-1333. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014>
- Marengo, J., Cornejo, A., Satyamurty, P., Nobre, C., & Sea, W. (1997). Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. *Monthly Weather Review*, 125(11), 2759-2786. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<2759:CSITAE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<2759:CSITAE>2.0.CO;2)
- Mugume, I., Basalirwa, C., Waiswa, D., Reuder, J., Mesquita, M. d. S., Tao, S., & Ngailo, T. J. (2016). Comparison of Parametric and Nonparametric Methods for Analyzing the Bias of a Numerical Model. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2016, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2016/7530759>
- Pasten-Zapata, E., Sonnenborg, T. O., & Refsgaard, J. C. (2019). Climate change: Sources of uncertainty in precipitation and temperature projections for Denmark. *GEUS Bulletin*, 43. <https://doi.org/10.34194/GEUSB-201943-01-02>
- Reboita, M. S., Da Rocha, R. P., Souza, C. A. D., Baldoni, T. C., Silva, P. L. L. D. S., & Ferreira, G. W. S. (2022). Future Projections of Extreme Precipitation Climate Indices over South America Based on CORDEX-CORE Multimodel Ensemble. *Atmosphere*, 13(9), 1463. <https://doi.org/10.3390/atmos13091463>
- Rummukainen, M. (2016). Added value in regional climate modeling. *WIREs Clim Change*, 7: 145-159. <https://doi.org/10.1002/wcc.378>
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation Coefficients. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>

- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Vautard, R., Gobiet, A., Jacob, D., Belda, M., Colette, A., Déqué, M., ... & Halenka, T. (2013). The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Climate Dynamics*, 41(9-10), 2555-2575. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1714-z>
- Zhang, W., Lei, X., Liu, P., Wang, X., Wang, H., & Song, P. (2019). Identifying the Relationship between Assignments of Scenario Weights and their Positions in the Derivation of Reservoir Operating Rules under Climate Change. *Water Resources Management*, 33(1), 261-279. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2101-7>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>