

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Selección de los Modelos de Proyección para el Cambio Climático del
CMIP6 con mejor desempeño para el territorio ecuatoriano

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería Oceanográfica

Presentado por:

Joel Rubén Morán Armendáriz

María José Novillo Coello

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, Nina y Tito, quienes me han acompañado y se han preocupado por darme siempre la mejor educación a lo largo de toda mi vida. Quienes se han esforzado en brindarme todas las oportunidades y comodidades para que no me faltara nada, no solo en esta etapa, sino también durante toda mi vida. Mis padres quienes, con su paciencia y su amor infinito, me ayudan a crecer como persona y alcanzar cualquier meta que me proponga.

-Joel Morán

El esfuerzo y dedicación de esta tesis es de mis padres Milton y Mitzi y de mis dos hermanas menores Ornella y Mercedes. Les dedico cada paso que doy porque con su guía y apoyo incondicional sé que puedo hacer lo que sea. Es también de mis dos abuelitas, que son mi fuente de alegría, de sabiduría y humildad. Y por último y no menos importante, a cada una de las personas que en estos 25 años ha confiado en mis capacidades y me han empujado a siempre hacer más. Esto no lo he hecho sola, es de todos ustedes.

-María Novillo

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios, y a la Virgen, Nuestra Madre, por cuidarnos y bendecirnos a lo largo de nuestras vidas. También, por habernos permitido conocer personas y amistades tan especiales, que sin duda alguna tienen un lugar en nuestro corazón.

Agradecemos a nuestros padres, quienes nos aman, cuidan y guían en todo este camino de preparación profesional, por su confianza y soporte para que logremos completar una de las etapas más importantes para nosotros.

Agradecemos a nuestros amigos incondicionales: Dayanna, Denisse, Yarib, Daniela y muchos más que sin ellos no habiésemos conseguido nada. Los amigos son la luz de nuestras vidas.

Agradecemos a cada uno de los docentes de la facultad, a nuestros tutores de las pasantías, a nuestro cliente CIIFEN con mención especial a F. Costas por su confianza y seguimiento constante en el desarrollo de este trabajo.

-J. Morán y M. Novillo

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Joel Rubén Morán Armendáriz* y *María José Novillo Coello* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”.



Joel Rubén Morán
Armendáriz



María José Novillo
Coello

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:

**LUIS MIGUEL
ALTAMIRANO
PEREZ**

Luis Altamirano MSc.

PROFESOR DE LA MATERIA



Firmado electrónicamente por:

**JONATHAN MARCELO
CEDENO OVIEDO**

Jonathan Cedeño MSc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El cambio climático es una realidad irrefutable, en donde cada país debe centrar sus intereses para crear capacidades resilientes en sus territorios. Ecuador enfrenta diferentes riesgos frente al cambio del clima por su ubicación geográfica, vulnerabilidad económica y cultural. Por lo que, los modelos climáticos globales son una herramienta imprescindible para genera una visión de un futuro simulado bajo diferentes escenarios de desarrollo socioeconómico para fortalecer la toma de decisiones. Los modelos de proyección son de acceso libre y publicados existen cerca de 39 modelos, pero son de compleja comprensión y presentan limitaciones al ser analizados individualmente como: resoluciones bajas por lo que no tiene exactitud para simular climas regionales y nacionales; alto requerimiento de procesamiento computacional y además de limitadas publicaciones realizadas para la región Sudamericana.

Se plantea seleccionar los modelos con escala reducida estadísticamente, con mejor desempeño en el territorio ecuatoriano utilizando métricas estadísticas, empleando los diagramas de Taylor, comparando observaciones de temperatura y precipitación mensual de 1985 – 2014 y con estos mejores modelos mostrar las proyecciones hasta el 2100 los escenarios extremos. Los mejores modelos para ambos parámetros son: TaiESM1, BBC-CSM2-MR y FGOALS-g3 dando un preámbulo a generar algún ensamble multivariantes para mejorar sus salidas. Las proyecciones de los escenarios extremos hasta el año 2100 muestran una tendencia de incremento de 1.5°C y con picos elevados de precipitación.

Este trabajo es el preámbulo para generar escenarios de las proyecciones de cambio climático regionales, aplicando una reducción de escala dinámica efectiva y generación de cartografía y proyecciones a futuro.

Palabras Clave: CMIP6, escenarios de cambio climático, modelos de proyección climática, diagramas de Taylor.

ABSTRACT

Climate change is an irrefutable reality, where each country must focus its interests to create resilient capacities in its territories. Ecuador faces different risks from climate change due to its geographic location, economic and cultural vulnerability. Therefore, global climate models are an essential tool to generate a vision of a simulated future under different scenarios of socioeconomic development to strengthen decision-making. The projection models are freely available and there are about 39 published models, but they are complex to understand and have limitations when analyzed individually, such as: low resolutions, so they are not accurate enough to simulate regional and national climates; high requirement of computational processing and in addition to limited publications made for the South American region.

It is proposed to select the models with statistically reduced scale, with the best performance in the Ecuadorian territory using statistical metrics, using Taylor diagrams, comparing observations of temperature and monthly precipitation from 1985 - 2014 and with these best models show the projections until 2100. extreme scenarios. The best models for both parameters are: TaiESM1, BBC-CSM2-MR and FGOALS-g3 giving a preamble to generate some multivariable ensemble to improve their outputs. The projections of the extreme scenarios up to 2100 show a trend of increase of 1.5° C and with high precipitation peaks.

This work is the preamble to generate scenarios of regional climate change projections, applying an effective dynamic downscaling and generation of cartography and future projections.

Keywords: *CMIP6, climate change scenarios, climate projection models, Taylor diagrams.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Justificación del Problema.....	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4. Marco Teórico	4
Modelos Climáticos Globales.....	4
CMIP6.....	5
Escenarios de Cambio Climático	5
Escenarios SSP.....	6
Método de Reducción de Escala Estadística.....	7
Métricas de Evaluación.....	8
CAPÍTULO 2.....	10
2. METODOLOGÍA	10
2.1. Selección de los datos a utilizar	11
2.1.1. Selección y descarga de los GCM.....	11
2.1.2. Selección de datos observados	13

2.2. Reducción de Escala Estadística	15
2.3. Evaluación de las Métricas Estadísticas.....	15
2.4. Elaboración del Ranking de los GCM.....	15
2.5 Generación de series de tiempo para dos escenarios extremos.....	16
CAPÍTULO 3.....	17
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	17
3.1. Reducción de Escala Estadística	17
Temperatura del Aire	17
Precipitación	19
3.2. Métricas de Evaluación Estadística	21
Temperatura del Aire	21
Precipitación	23
3.3. Sesgo	25
3.4. Elección de los Modelos.....	26
Temperatura del Aire	26
Precipitación	26
3.5. Resultados Escenarios de Cambio Climático (SSP1-SSP3)	27
Modelo de Proyección Climática CAMS-CSM1-0: Variable Temperatura del Aire	27
Modelo de Proyección Climática TaiESM1: Variable Precipitación	29
3.6. Análisis de Costos	31
CAPÍTULO 4.....	32
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	32
4.1. Conclusiones.....	32
4.2. Recomendaciones.....	33
BIBLIOGRAFÍA.....	34
APÉNDICES.....	37

ABREVIATURAS

GCM	Global Climate Models/General Circulation Models
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Version 6
WGCM	Working Group of Coupled Modelling
WCRP	World Climate Research Programme
ITCZ	Intertropical Convergence Zone
RCM	Regional Circulation Models
WCRP GSC	World Climate Research Programme Grand Science Challenge
AR6	Sixth Assessment Report
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ESGF	Earth System Grid Federation
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas del Cambio Climático
CNCC	Comunicaciones Nacionales para el Cambio Climático
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
PNDU	Política Nacional de Desarrollo Urbano
MAE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
RMSE	Root Mean Square Error

SIMBOLOGÍA

°C	Grados Celsius
°K	Grados Kelvin
kg/m ² s	Flujo de Precipitación
m	Metro
km	Kilómetro
mm	Milímetro

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1.1 Distintos escenarios de cambio climático contemplados en el AR6 del IPCC. Fuente: IPCC.	7
Ilustración 1.2 Ejemplo de Diagrama de Taylor mostrando una comparación estadística. Fuente: (Taylor K. E., Taylor Diagram Primer, 2005).	9
Ilustración 1.3 Relación geométrica entre las métricas de evaluación para representar el diagrama de Taylor. Fuente: (Taylor K. , 2001).	9
Ilustración 2.1 Proceso de flujo para el proyecto de investigación. Fuente: Autores.	10
Ilustración 2.2 Estaciones meteorológicas definidas para este proyecto de investigación. Fuente: Autores.	14
Ilustración 3.1 Resultados de los modelos de proyección climática para la variable temperatura del aire. Fuente: Autores.	18
Ilustración 3.2 Resultados de los modelos de proyección climática para la variable precipitación. Fuente: Autores.	20
Ilustración 3.3 Resultados del diagrama de Taylor de los modelos de proyección climática para la variable temperatura del aire. Fuente: Autores.	22
Ilustración 3.4 Resultados del diagrama de Taylor de los modelos de proyección climática para la variable precipitación. Fuente: Autores.	24
Ilustración 3.5 Sesgo estadístico para cada modelo del CMIP6 en referencia a cada estación para los parámetros de temperatura y precipitación	25
Ilustración 3.6 Modelos de Proyección Climática para la variable temperatura del aire. Fuente: Autores.	26
Ilustración 3.7 Modelos de Proyección Climática para la variable temperatura del aire. Fuente: Autores.	26
Ilustración 3.8 Modelo de Proyección Climática CAMS-CSM1-0 aplicado en los escenarios SSP1-SSP3. Fuente: Autores.	28
Ilustración 3.9 Modelo de Proyección Climática TaiESM1 aplicado en los escenarios SSP1-SSP3. Fuente: Autores.	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Atributos y características de los GCM. Fuente: ESGF.	11
Tabla 2.2 Modelos disponibles y aplicados para este proyecto de investigación. Fuente: Autores	12
Tabla 2.3 Características de las estaciones meteorológicas para este proyecto de investigación. Fuente: Autores	14
<i>Tabla 2.4</i> Estadísticos de evaluación aplicados. Fuente: Autores.....	16
Tabla 3.1 Presentación de los 5 modelos de proyección climática con mayor frecuencia por las estaciones meteorológicas, para las variables de temperatura del aire y precipitación. Fuente: Autores.	27
Tabla 3.2 Costos de los Implementos y Herramientas del proyecto de investigación. Fuente: Autores.....	31
Tabla 3.3 Costos de los Salarios del personal del proyecto de investigación. Fuente: Autores.	31

CAPÍTULO 1

1. Introducción

El cambio del sistema climático es irrefutable, una realidad que se ha convertido en el centro de atención de diferentes comunidades, gobiernos internacionales y la academia en los últimos años (Fan, Duan, Wu, Xing, & Shen, 2022). La evidencia sugiere que el cambio climático ya ha influido en la magnitud y frecuencia de algunos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos a nivel mundial. Se observa que a medida que los impactos del cambio climático se vuelven más dramáticos, su efecto en una variedad de extremos climáticos en Sudamérica será cada vez más importante y jugará un papel más significativo en los impactos de los desastres, así como las sequías en la Amazonía y el noreste de Brasil, las precipitaciones extremas que han provocado deslizamientos de tierra e inundaciones (Marengo, et al., 2014). Los impactos locales del cambio climático significan que cada país tendrá que hacer frente de manera diferente a los demás. Los riesgos que enfrenta Ecuador surgen no solo de los asociados a su posición geográfica a lo largo de la línea ecuatorial, sino también de las vulnerabilidades económicas y culturales, la preparación para el futuro y la importancia del cambio climático para la sociedad (Toulkeridis, et al., 2020).

Los GCM se han convertido en una herramienta importante y vital para proyectar futuros cambios en el clima; su fiabilidad depende de su capacidad para reproducir características climáticas históricas y actuales. Con este fin, el WCRP ha promovido un conjunto de experimentos conocidos como el CMIP desde la década de 1990, que han entregado simulaciones sistemáticas y de alta calidad para comprender mejor los cambios climáticos pasados y hacer proyecciones y estimaciones de incertidumbre del futuro (Anna & Hargreaves, 2011) (Eyring, et al., 2016).

1.1. Descripción del problema

El CMIP se ha desarrollado mediante fases hasta llegar a lo que hoy en día es su sexta fase, cuya estructura se encuentra más avanzada y se incluyen gran variedad de GCM generados por 49 grupos de diferentes partes del mundo como: EE. UU., China, Inglaterra, entre otros (Taylor, et al., 2018).

Los datos de los GCM del CMIP6 son de acceso libre y de contenido uniforme interinstitucionalmente, y estos presentan un gran catálogo de parámetros, instituciones,

modelos, experimentos, actividades, dimensiones temporales y espaciales y más; además de una guía de usuario(www.pcmdi.llnl.gov/CMIP6/Guide/dataUsers.html), si bien esto es una gran herramienta y oferta al usuario, es también todo un desafío al elegir las opciones correctas para el obtener lo que el usuario busca.

El sistema ESGF (www.esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/) ofrece a los usuarios simplicidad al momento de filtrar los atributos para obtener exactitud en lo que se desea utilizar, pero aun así el reconocer y definir cada uno de estos atributos es un reto para quienes acceden a estos datos, existen sitios donde detallan cada uno de los atributos y sus elementos (www.clipc-services.ceda.ac.uk//dreg/index.html) para poder reconocer abreviaciones y parámetros correspondientes. Por lo que los usuarios que no frecuentan los GCM del CMIP se encuentran frente a un verdadero reto al momento de buscar, filtrar y descargar los datos (Eyring, et al., 2016).

Los GCM desarrollan simulaciones de manera precisa y efectiva del clima a escala global, esto es gracias a su alta resolución espacial que facilita la obtención de resultados más detallados; no obstante, se presentan ciertas incertidumbres y dificultades al simular el clima a escala regional y nacional, lo que ocasiona errores y un análisis inexacto para representar el clima respectivamente.

A pesar de ser relativamente nuevo este proyecto, ya existen diversas publicaciones en el mundo refiriendo regiones polares, europeas y asiáticas, pero muy limitadas son los estudios y trabajos realizados en marco del CMIP6 en la región Sudamericana. En referencia a la CMNUCC, los países del sur de América elaboran las proyecciones a futuro en sus CNCC en base a los informes de evaluación del IPCC, vigente desde el 2021, el AR6 que muestra los SSP; en base a esto los grupos de trabajo y gubernamentales nacionales elaboran escenarios de cambio climático para sus territorios, pero estas se actualizan cada 6 años y requieren un trabajo muy minucioso. Para Ecuador, existe registro de escasos trabajos, a más de los observados por PNDU y MAE, en este contexto.

Los GCM son capaces de representar estados climáticos a escala global a continental, pero no a escala regional. Sin embargo, la información a escala regional es crucial para desarrollar medidas de adaptación y proteger las estructuras socioeconómicas y los ecosistemas (Kreienkamp , Lorenz, & Geiger, 2020).

1.2. Justificación del Problema

Realizar proyecciones a futuro sobre el cambio climático a nivel mundial permite alcanzar una percepción sobre la evolución del mundo con base a distintos aspectos como la

emisión de gases de efecto invernadero y el desarrollo socioeconómico de los países; además si se cuenta con los recursos necesarios para aplicar las variables respectivas en los modelos climáticos, ayudará a obtener mejores resultados y desarrollar un adecuado análisis para afrontar esta problemática con decisiones de adaptación y mitigación a nivel nacional y regional.

Existe una gran diversidad de modelos de proyección futura del cambio climático en el CMIP6 a disposición, esto implica que las proyecciones deben ser evaluadas y comprendidas junto con sus limitaciones y alcances para su uso, con la finalidad de considerar el conjunto de incertidumbres generadas por diferentes fuentes y entrelazadas unas con otras en diferentes procesos de modelado (Velásquez Fernández, 2021), durante el desarrollo de análisis y la toma de decisiones. No obstante, implementar cualquiera de estos modelos de proyección climática para un estudio localizado tiene su grado de complejidad e incertidumbre, debido a que los modelos no describen el clima con una precisión similar ni se desempeñan exitosamente para todas las regiones del planeta (Velásquez Fernández, 2021) porque la resolución espacial de estos modelos es demasiado amplia (>250km) y la aplicación de ciertas variables para una región en específico, pueda significar una desventaja al momento de generar las proyecciones climáticas (Llamocca Huamani, 2022).

La importancia del trabajo realizado reside en que indica aquellos modelos de proyección futura del cambio climático más adecuados para las investigaciones y estudios realizados de manera localizada en el Ecuador, esto permitirá un menor consumo de recursos computacionales y tiempo, la respectiva definición y aplicación de variables de acuerdo con las condiciones del área de estudio.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Seleccionar los modelos de proyección climática del CMIP6 con mejor desempeño para los parámetros de temperatura y precipitación en el Ecuador, mediante la aplicación de métricas estadísticas para generar proyecciones a futuro en los diferentes escenarios de Cambio Climático en el territorio nacional.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar los modelos de proyección climática tomando en cuenta que cumplan con tener datos histórica y en los cuatro escenarios (SSP1, SSP3, SSP4, SSP5) para los parámetros de temperatura del aire y flujo de precipitación.

- Extraer series de tiempo mensuales para los parámetros simulados en referencia a las observaciones medidas en diez de las estaciones meteorológicas del INAMHI con datos ausentes menores al 14% para el periodo de 1985 – 2014.
- Evaluar con métricas estadísticas como RMSE, Correlación y Sesgo los datos observados versus los datos simulados de los modelos para cada estación.
- Elaborar el ranking de los cinco modelos de proyección climática para los parámetros temperatura y precipitación en el Ecuador.
- Graficar dos escenarios extremos (SSP1 – SSP3) para temperatura y precipitación de los modelos de proyección climática en el ranking 1 respectivamente en el periodo 2015 - 2100.

1.4. Marco Teórico

Modelos Climáticos Globales

Los GCM son las mejores herramientas y las más usadas para mejorar la comprensión del clima y generar estimaciones del cambio climático futuro que sean beneficiosos para todo aquel proyecto que investigue sobre sus posibles consecuencias (IPCC, y otros, 2007). Estos modelos se basan en leyes físicas de la atmósfera y en la parametrización de procesos, así como movimientos de las masas de aire, formación de la nubosidad, efectos del océano, entre otros; por tal motivo, es fundamental que los modelos reflejen de manera similar la interacción entre la atmósfera y el océano, siendo capaces de evaluar el efecto que los cambios en los forzamientos climáticos (concentración de gases de efecto invernadero, irradiancia solar, etc.) producen en un gran número de variables a escala global (Linés, 1995).

Los GCM cuentan con una resolución baja, cuyos valores fluctúan entre 1 y 3 grados de arco. Su resolución no es suficiente para la representación del clima a escala regional, puesto que los fenómenos locales relacionados con la geología y los fenómenos a escalas espaciales y temporales más pequeñas no se representan lo suficiente, y en un área de estas dimensiones hay distintos valores de precipitación y temperatura (Armenta Porras, Villa Cedeño, & Jácome, 2016).

Para poder solucionar las dificultades de escala en los modelos, se utilizan distintos métodos de reducción de escala que son los siguientes (Armenta Porras, Villa Cedeño, & Jácome, 2016):

- **Estadísticos:** Métodos que intentan reproducir estadísticas de largo plazo y las condiciones locales mediante el análisis del comportamiento de los datos

observados de una variable en un largo periodo.

- **Dinámicos:** Emplean RCM. Estos modelos utilizan datos de GCM como entrada y se pueden configurar para ejecutarse a una resolución más detallada y aplicarlos en una región o sitio en específico. No obstante, mostrar más detalles en la representación requiere mayor capacidad de cómputo y el tiempo de ejecución de estos modelos es mayor que el de los modelos globales.
- **Dinámico-Estadísticos:** Consiste en una combinación de los dos métodos anteriores para la reducción de escala. Generalmente se empieza con la reducción de escala dinámica a una resolución aceptable, mostrando aspectos importantes de la circulación general del área de estudio (de 25 a 50km), luego con los datos de simulación se desarrolla una reducción de tasa estadística, basada en los datos observados de las estaciones.

CMIP6

El CMIP empezó sus actividades desde 1995 mediante la coordinación de experimentos de modelos climáticos donde participan diversos equipos internacionales para el modelamiento a nivel mundial; hoy en día el CMIP se encuentra en su sexta fase, cuya WCRP GSC considera los siguientes parámetros (Eyring, et al., 2016):

- Nubes, Circulación y Sensibilidad Climática
- Cambios en la criosfera
- Climas extremos
- Aumento regional del nivel del mar
- Disponibilidad del agua
- Predicción climática a corto plazo
- Ciclos biogeoquímicos y cambio climático

En este proyecto se aplicaron dos escenarios que permiten alcanzar una amplia perspectiva de futuros climáticos simulados (caracterización de las próximas décadas a siglos), tomando en consideración estudios e investigaciones realizadas por una gran variedad de comunidades e instituciones científicas, que incluyen temas como los impactos del cambio climático, análisis del clima, los procesos y observaciones del clima y también los modelos de proyección climática.

Escenarios de Cambio Climático

Un gran número de instituciones internacionales incluyendo universidades, comunidades científicas, centros meteorológicos y de investigación en clima, han desarrollado e implementado hasta la fecha, diversas herramientas y metodologías debido a los cambios observados en el sistema climático y los probables impactos a corto y largo plazo; entre estas herramientas se tiene las proyecciones globales del clima a futuro, las cuales permiten comprender mejor las interacciones entre el sistema climático de la Tierra, los ecosistemas y las actividades humanas.

Dichas proyecciones se las definen como “escenarios”, que consisten en descripciones coherentes, internamente consistentes y convincentes de un posible estado futuro del mundo (IPCC-DDC & P.-D., 2013). Cada uno de estos escenarios representan un futuro alternativo bajo determinadas condiciones en un tiempo definido (Armenta Porras, Villa Cedeño, & Jácome, 2016).

Para el proyecto se emplearon dos escenarios de cambio climático elaborados en el AR6, donde se los definen como SSP y detallan los futuros alternativos de desarrollo socioeconómico que muestran cómo podría evolucionar el mundo en las siguientes décadas considerando distintos aspectos (evolución de las economías, niveles de desigualdad futuros, el cambio demográfico y tecnológico, entre otros) y los desafíos que conllevan estos cambios para la mitigación y la adaptación.

Escenarios SSP

Es importante mencionar que cada escenario considera también los niveles de emisiones de GEI, los cuales producen cambios en el incremento de la temperatura global, y por ende, cambios en el clima futuro que pueden influir en las alternativas para adaptarse a los impactos del cambio climático. A continuación, se detalla cada uno de los escenarios del AR6 como se muestra en la Ilustración 1:

- **SSP1 (“Sustentabilidad”)**: Escenario que asume un bajo crecimiento de la población, alto crecimiento económico, altos niveles de educación, gobernabilidad, una sociedad globalizada, cooperación internacional, desarrollo tecnológico y conciencia ambiental; es decir, que este escenario representa bajos niveles de desafíos de mitigación y adaptación.
- **SSP3 (“Fragmentación”)**: Escenario que asume alto crecimiento poblacional y bajo desarrollo económico, y una sociedad regionalizada con poca conciencia ambiental; por ende, este escenario representa un nivel alto de desafíos para la adaptación y mitigación.

- **SSP4 (“Desigualdad”)**: Escenario que asume que la tecnología avanza en los países desarrollados, pero no toda la población logra beneficiarse de ello; por ende, este escenario representa un nivel alto para la adaptación.
- **SSP5**: Escenario que asume una muy alta dependencia de los combustibles fósiles y un bajo crecimiento en la población, un elevado crecimiento económico y un alto desarrollo humano; por ende, este escenario representa un elevado nivel de desafío para la mitigación.
- **SSP2**: Escenario intermedio, donde sus asunciones se encuentran entre las que corresponden a la SSP1 y SSP3.

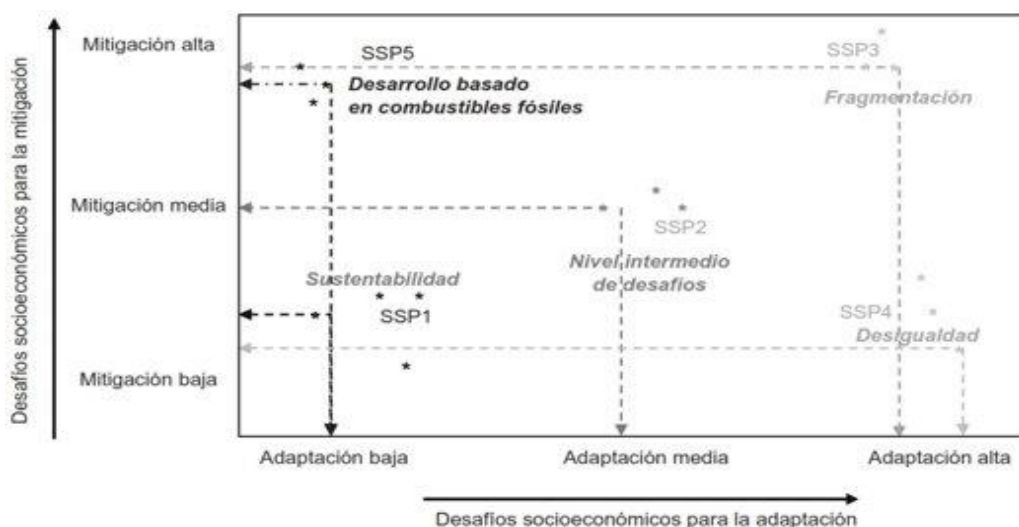


Ilustración 1.1 Distintos escenarios de cambio climático contemplados en el AR6 del IPCC. Fuente: IPCC.

Método de Reducción de Escala Estadística

La “Corrección del Sesgo” (Pabón, 2011) consiste en reducir la diferencia entre los datos observados y los datos simulados a través de la aplicación de una constante de ajuste a los datos simulados por los modelos globales, utilizando la siguiente ecuación:

$$X_{i,j}^* = \alpha_j X_{i,j}^{mod} \quad (1.1)$$

Donde $X_{i,j}^*$ representa el dato ajustado de la variable X del año i-ésimo y del mes j-ésimo; $X_{i,j}^{mod}$ representa el dato simulado de la variable X del año i-ésimo y del mes j-ésimo; α_j es la constante de ajuste para el mes j-ésimo y se obtiene como:

$$\alpha_j = \frac{\overline{X_j^{obs}}}{\overline{X_j^{mod}}} \quad (1.2)$$

Donde $\overline{X_j^{obs}}$ representa el promedio multianual de la serie de datos observados para el mes j-ésimo; y $\overline{X_j^{mod}}$ representa el promedio multianual de la serie de datos simulados para el mes j-ésimo.

Métricas de Evaluación

Se aplicaron métricas de evaluación en este proyecto, las cuales consisten en evaluar el desempeño a través de una comparación entre los datos obtenidos de los modelos globales empleados y los datos observados:

- **Correlación:** Establece una correlación entre dos variables cuantitativas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra, y se expresa como:

$$c = \frac{\sum_{n=1}^N (f_n - f) \times (0_n - \bar{0})}{[\sum_{n=1}^N (f_n - f)^2 \times (0_n - \bar{0})^2]^{1/2}} \quad (1.3)$$

- **BIAS:** Medida de exactitud que obtiene la diferencia entre el dato simulado y el dato medido de la variable, y se expresa como:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - f) \quad (1.4)$$

- **Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE):** Medida de desempeño cuantitativa que consta de la raíz cuadrada de la sumatoria de los errores cuadráticos. El RMSE amplifica y penaliza con mayor fuerza aquellos errores de mayor magnitud, y se expresa como:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - 0_n)^2 \right]^{1/2} \quad (1.5)$$

- **Diagrama de Taylor:** Los diagramas de Taylor proporcionan de forma gráfica el grado de coincidencia de un conjunto de datos con las observaciones; dicha similitud entre ambos datos se cuantifica de acuerdo con su correlación, la raíz del error medio cuadrático y su desviación estándar (Taylor K. , 2001). Estos diagramas permiten evaluar diferentes aspectos de modelos complejos o también para calibrar la habilidad relativa de muchos modelos distintos (IPCC, y otros, 2001).

Como se puede observar en la Ilustración 2, un ejemplo de diagrama de Taylor que muestra una comparación estadística con observaciones de las estimaciones de ocho modelos del patrón global de la precipitación media anual.

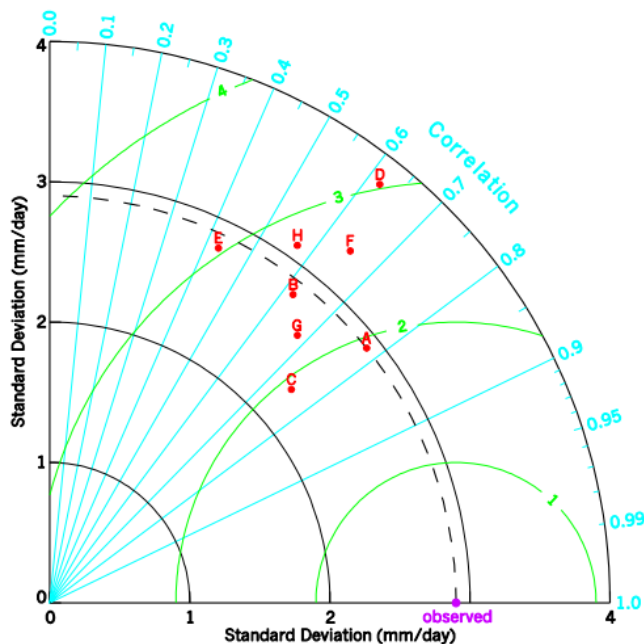


Ilustración 1.2 Ejemplo de Diagrama de Taylor mostrando una comparación estadística. Fuente: (Taylor K. E., Taylor Diagram Primer, 2005).

Además, el diagrama de Taylor puede ser representado mediante una relación geométrica donde se consideran las métricas de evaluación mencionadas anteriormente, y se lo expresa en la siguiente ecuación:

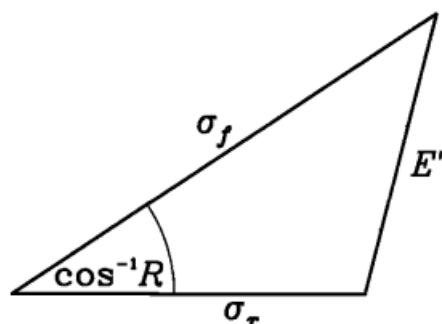


Ilustración 1.3 Relación geométrica entre las métricas de evaluación para representar el diagrama de Taylor. Fuente: (Taylor K. , 2001).

$$E'^2 = \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f\sigma_r R, \quad (1.6)$$

Donde R representa el coeficiente de correlación entre el conjunto de datos y los datos observados, E' representa la raíz del error medio cuadrático entre el conjunto de datos y los datos observados; por último, σ_f^2 y σ_r^2 representan las desviaciones estándar (Taylor K. E., Taylor Diagram Primer, 2005).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El desarrollo de la propuesta de solución se llevó referenciada por las metodologías aplicadas para las CNCC de Perú, Colombia y Ecuador (Ambiente, Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2016) (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA, 2015) (Ambiente, Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático, 2017). En estos documentos nacionales referidos a los planes de acción de cada nación frente al Cambio Climático se plantean metodologías para poder seleccionar los GCM que representen de mejor forma el clima regional y nacional. Pero, como se expuso anteriormente estos modelos tienen varias limitaciones al simular a bajas escalas debido a que sus resoluciones son de aproximadamente de entre 100 y 250 km. La descarga de los datos de los GCM está disponible en 2 diferentes sitios webs como: ESGF (WCRP, 2022), Copernicus (Europea, 2022), siendo este último un interfaz comprensible con el usuario, pero usa los datos del CMIP6 desde el nodo del ESGF. En la publicación de (Almazroui, y otros, 2021) exponen una metodología similar a la que se emplea en la mencionadas Comunicaciones, con la diferencia que hacen la aplicación de un método de *downscaling* dinámico (Dixon, Harris, & Knutson, 2018), que permite acercar los GCM a una escala mayor representando por medio de interpolación y correcciones de errores de una mejor simulación. Las metodologías planteadas por las CNCC obtienen como producto final generación de escenarios de Cambio Climático en base a un ensamble de los mejores modelos seleccionados y con resolución más alta (Armenta Porras, Villa Cedeño, & Jácome, 2016).

Basados en la metodología de (Ambiente, Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático, 2017), se estructuró el procedimiento para el tiempo establecido y lograr el desarrollo de este proyecto. Se siguió el siguiente proceso de flujo de la Ilustración 4.

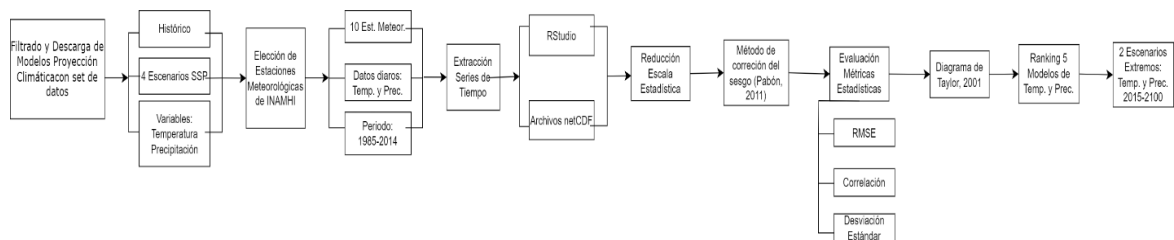


Ilustración 2.1 Proceso de flujo para el proyecto de investigación. Fuente: Autores.

A continuación, se detalla cada uno de los pasos realizados en la metodología seleccionada:

2.1. Selección de los datos a utilizar

En este apartado se expone el proceso para obtener los datos de los GCM a ser analizadas y los datos observados que sirvieron de base comparativa. Para ambos se utilizó datos de temperatura del aire y precipitación.

2.1.1. Selección y descarga de los GCM

Los GCM del CMIP6 son caracterizados por contener y ser descritos por diferentes atributos, como se mencionan en el capítulo 1, con estos, partiendo de la disponibilidad de 39 modelos en el descargador del ESGF (esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/), se realizó un inventario de los modelos disponibles con datos de temperatura del aire y flujo de precipitación para el periodo histórico de 1850 – 2014 además de los 4 SSP (SSP1, SSP2, SSP3, SSP5) utilizando los filtros como se muestra en la Tabla 2.1, es importante aclarar que el interfaz del ESGF está en inglés y cada atributo y características para los modelos también lo están, por lo que las características a ser específicas se escriben en inglés para su correcto uso en el sistema de descarga.

Tabla 2.1 Atributos y características de los GCM. Fuente: ESGF.

Atributo	Característica
Actividad	CMIP, ScenarioMIP
Tipo de fuente	AOGCM
Identificación de experimento	Historical, SSP126, SSP245, SSP370, SSP585
	r1i1p1f1
Etiqueta de red	gn
Identificación de tabla	Amon
Frecuencia	mon
Campo	atmos
Variable	ta ($^{\circ}K$), pr ($\frac{kg}{m^2s}$)
CF nombres estándar	air temperature, precipitation flux

Los datos de temperatura y precipitación fueron transformados a las unidades de $^{\circ}C$ y mm respectivamente, utilizando factores de conversión. Los detalles de cada uno de los atributos están explicados y referenciados en un documento de nombre de archivos, estructura de directorios y atributos globales (Durack, et al., 2018) y además en el vocabulario de control del sitio GitHub (Durack, et al., CMIP6_CVs, 2018).

Se obtuvieron como resultados 15 modelos disponibles con todas las características requeridas, como se muestra en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2 Modelos disponibles y aplicados para este proyecto de investigación. Fuente: Autores

Modelos	Institución y Nombre	Resolución	
		Latitud (º de arco)	Longitud (º de arco)
ACCESS-CM2	Australian Community Climate and Earth System Simulator-Coupled Climate Model2	1,25	1,875
ACCESS-ESM1-5	Australian Community Climate and Earth System Simulator-Earth System Model1-5	1,25	1,875
BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center-Climate System Model2-Medium Resolution	1,125	1,125
CAMS-CSM1-0	Chinese Academy of Meteorological Sciences-Climate System Model1-0	1,125	1,125
CAS-ESM2-0	Chinese Academy of Sciences-Earth System Model2-0	1,40625	1,40625
CESM2-WACCM	Community Earth System Model version 2-Whole Atmosphere Community Climate	0,9375	1,25
CMCC-CM2-SR5	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici-Climate Model2-Small Resolution5	0,9375	1,25
CMCC-ESM2	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici-Earth System Model2	0,9375	1,25
CanESM5	Canadian Earth System Model version 5	2,8125	2,8125
FGOALS-g3	Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model-Grid Point version 3	2,25	2
IITM-ESM	Indian Institute of Tropical Meteorology-Earth System Model	1,914894	1,875
MIROC6	Model for Interdisciplinary Research On Climate version 6	1,40625	1,40625
MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute-Earth System Model version 1.2-Large Resolution	1,875	1,875
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute-Earth System Model version 2.0	1,125	1,125
TaiESM1	Taiwan Earth System Model version 1	0,9375	1,25

La descarga del set de datos de cada modelo varió dependiendo de cada uno, algunos están agrupados en periodos de 10 años, otros 1 años y otros contienen en un solo archivo todo el periodo histórico (1850 – 2014); los archivos para cada parámetro en son de formato *netCDF*, los cuales según (UCAR, 2018) son formatos de archivos que permiten guardar datos científicos de varias dimensiones y cambiantes, como temperatura y precipitación; los archivos de cada modelo se componen de variables como: latitud, longitud, altura de presión y el valor del parámetro de temperatura y precipitación respectivamente, la descarga se realizó utilizando *R-Studio* con las librerías adecuadas para el tratamiento de archivos *netCDF*. De igual manera se seleccionó y descargó los datos de los escenarios del periodo de (2015 – 2100).

Las series de tiempo generadas para cada uno de los 15 modelos fueron extraídas para cada una de las 10 estaciones metrológicas con mediciones de temperatura y precipitación de referencia del INAMHI, con el fin de comparar y observar el comportamiento de los modelos. Por lo que, se extrajo 10 series de tiempo para cada modelo en referencia a las coordenadas y altura de las estaciones que se mencionan en la siguiente sección.

2.1.2. Selección de datos observados

Los datos observados diarios son de las mediciones históricas de (1985 – 2014) del INAMHI de las estaciones meteorológicas distribuidas en el país: 32 estaciones de Temperatura Media y 137 estaciones de Precipitación. Estos datos fueron estandarizados y validados por la institución en mención y fueron utilizados solo para el desarrollo de este proyecto y se mantiene confidencialidad con aquello. Las mediciones de las estaciones de ambos parámetros muestran un 86% de datos presentes en todo el periodo, siendo la estación M0221 de las islas Galápagos con cerca del 14% de datos ausentes, correspondientes a todo el año 2012 sin registros. Se realizó una revisión inicial con los datos de los modelos extrayendo la serie de tiempo referenciando las coordenadas para cada una de las estaciones, resultando que, los modelos no tienen registros para alturas de presión mayores a 100,000 Pa, es decir, alturas menores a 30 msnm, por lo que se escogieron 10 estaciones (tabla), las mismas para temperatura y precipitación, repartidas en las regiones sierra, oriente e insular según se observa en la ilustración, con el objetivo de que se representen la mayor extensión del territorio nacional.

Tabla 2.3 Características de las estaciones meteorológicas para este proyecto de investigación. Fuente: Autores

	Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	msnm (m)
M0002	LA TOLA	-0.23	-78.37	2,480
M0004	RUMIPAMBA – SALCEDO	-1.02	-78.59	2,685
M0007	NUEVO ROCAFUERTE	-0.92	-75.42	265
M0008	PUYO	-1.51	-77.94	960
M0031	CAÑAR	-2.55	-78.95	3,083
M0103	SAN GABRIEL	0.6	-77.82	2,860
M0123	EL CORAZÓN	-1.13	-79.08	1,471
M0146	CARIAMANGA	-4.33	-79.55	1,950
M0180	ZARUMA	-3.7	-79.61	1,100
M0221	SAN CRISTÓBAL - GALÁPAGOS	-0.9	-89.61	6

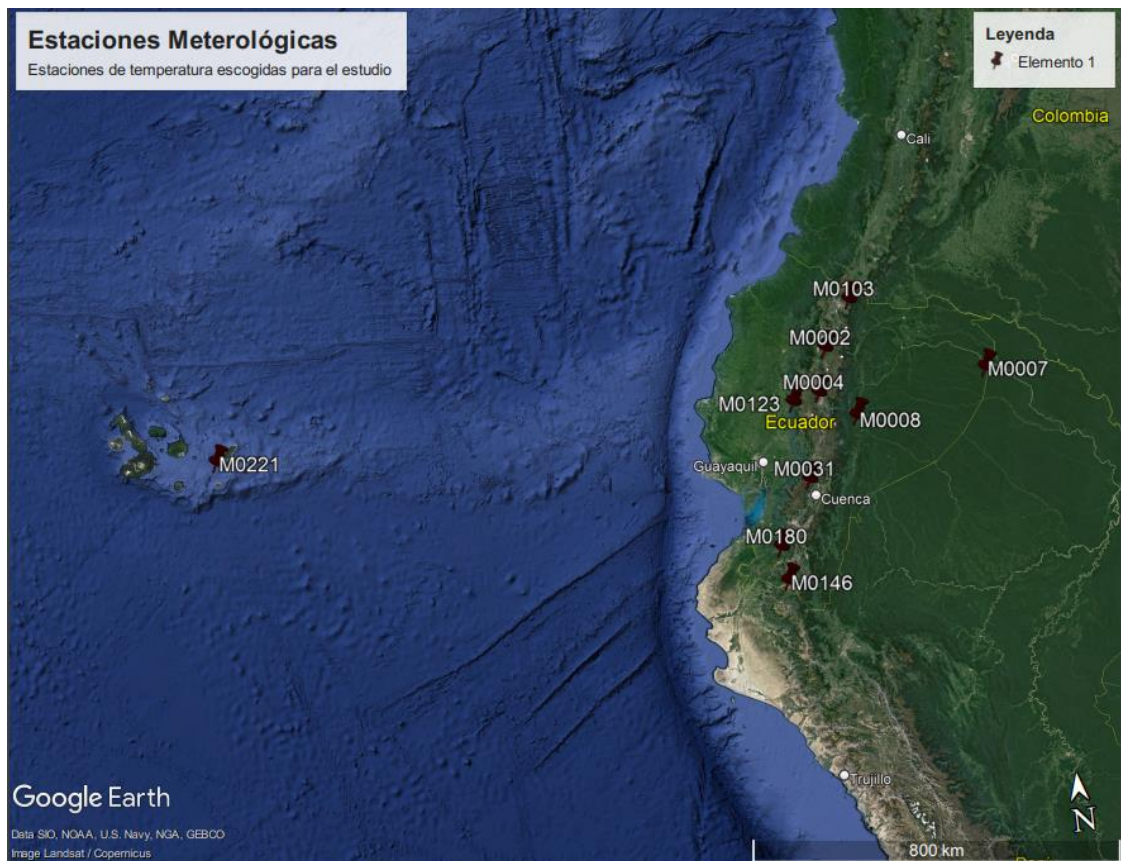


Ilustración 2.2 Estaciones meteorológicas definidas para este proyecto de investigación. Fuente: Autores.

Las series de tiempo de las 10 estaciones mencionadas fueran promediadas para obtener valores mensuales para los 30 años de mediciones que se usaron en este proyecto.

2.2. Reducción de Escala Estadística

El método de la “Corrección del Sesgo” (Pabón, 2011), como se expuso en el capítulo 1 dentro del marco teórico se aplicó para reducir la escala estadísticamente de los datos simulados con los datos observados. Se generaron series de tiempo multianuales tanto de temperatura y precipitación, siendo estos valores de promedios mensuales en razón los cuales permiten obtener el factor de corrección para cada dato de las series mensuales.

Es importante aclarar que, para hacer uso de este método, se deben utilizar datos observados de al menos 10 años seguidos, y así tener las series multianuales promedio confiables y coherentes con la variabilidad climática de cada una de las estaciones analizadas (Armenta Porras, Villa Cedeño, & Jácome, 2016). En la sección de resultados se muestran las series multianuales y la interpretación del factor alfa para cada mes de las estaciones meteorológicas.

2.3. Evaluación de las Métricas Estadísticas

Luego que las series de tiempo simuladas fueron corregidas con el factor de ajuste de la corrección del sesgo se procedió a evaluar las métricas estadísticas: correlación, raíz del error medio cuadrático y el sesgo, como se enuncia en el capítulo 1. Se utilizó el diagrama de (Taylor K. , 2001) para obtener una representación gráfica de la relación que existe entre los 3 estadísticos. Los gráficos de los diagramas para cada una de las estaciones se presentan en la sección de resultados. Los diagramas muestran los 15 modelos ubicados según su RMSE centrado en referencia con los datos observados, Correlación y Desviación. Estándar, también explicado a detalle en el marco teórico del Capítulo 1. El sesgo fue analizado independiente para cada modelo en todas las estaciones y se muestra en resultados la interpretación y diagramas correspondientes de los valores obtenidos.

2.4. Elaboración del Ranking de los GCM

La elaboración del *ranking* de los modelos de proyección se realizó basado a los diagramas de Taylor y los valores del sesgo de cada una de las estaciones. Cada diagrama representó la relación de los 3 estadísticos mencionados anteriormente y

mostrados en la Tabla 2.4, y se eligieron 3 modelos mejores posicionados según el siguiente orden de jerarquía:

Tabla 2.4 Estadísticos de evaluación aplicados. Fuente: Autores

Orden	Estadísticos
1	RMSE
2	Correlación
3	Desviación Estándar

Con los 3 mejores modelos seleccionados de cada una de las estaciones de temperatura y precipitación se hizo un análisis de frecuencias por modelo y por estación; con esto se establece los mejores GCM en todo el territorio ecuatoriano. A partir de los resultados de esto, se elaboró el ranking de los 5 mejores modelos de cada parámetro. La interpretación de los gráficos y tablas de frecuencia se encuentran en la sección de resultados.

2.5 Generación de series de tiempo para dos escenarios extremos

Se graficaron las series de tiempo de los escenarios SPP1 y SSP3, siendo estos extremos positivos y negativos respectivamente. Los parámetros de temperatura y precipitación son desde 1985 hasta el 2100 para cada una de las estaciones analizadas. Se eligió el mejor modelo del ranking para cada parámetro. Se muestran las gráficas para ambos modelos en sus respectivos parámetros y escenarios en la sección de resultados.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Reducción de Escala Estadística

A continuación, se presentan los resultados que se utilizaron para obtener los coeficientes del método de reducción de escala estadística o también conocido como método de corrección del sesgo de (Pabón, 2011), para las dos variables de temperatura del aire y precipitación. Los resultados de las series de tiempo multianuales, los datos observados de las estaciones meteorológicas seleccionadas son representados por una línea continua color negro, mientras que los datos simulados de los modelos de proyección climática son representados por líneas continuas de distintos colores de acuerdo con el nombre de su modelo respectivamente.

Temperatura del Aire

Como se muestra en la Ilustración 3.1, la temperatura del territorio ecuatoriano varía dependiendo de la región y también de la estacionalidad anual. De manera general, los modelos simulan efectivamente las tendencias del parámetro climático, pero en 3 estaciones, los datos observados están muy por encima, aproximadamente una diferencia de 2° a 3° C de los simulados, siendo por aquello que el factor de corrección se sea mayor y permita aumentar los valores simulados de las series mensuales para su estación correspondiente. La estación de las Galápagos es la que más cercanía en tendencia y rangos de temperatura tuvo, con un aumento para los meses de la estación húmeda con registros desde 24° a 27° C, como se observa en la gráfica de la serie multianual para esta estación, los modelos mantienen un factor de corrección del sesgo de entre 0.92 a 1.16, valores que corrigen en baja escala los valores de cada una de las simulaciones de cada modelo para su respectiva estación. Las estaciones de la zona norte de la sierra (M0002 y M0004) presentan una tendencia bastante regular, sin cambios considerables por estaciones, con registros de entre 14° y 15° C. Ambas estaciones son las que obtuvieron un factor de corrección mayor a 5, debido a que la temperatura simulada por la mayoría de los modelos (excepto MPI-ESM1-2-LR, que registró cerca de 23° C) fue de entre 7.5 y 11° C y la observada cercana a 16° C. La estación M0007 ubicada en el oriente ecuatoriano, presenta una temperatura observada considerablemente sin cambios estacionales, con un decrecimiento a 25° C en los meses

de junio hasta agosto; pero ciertos modelos simulan muy marcado esta caída de temperatura en estos meses con un alfa de corrección cercano a 1.39.

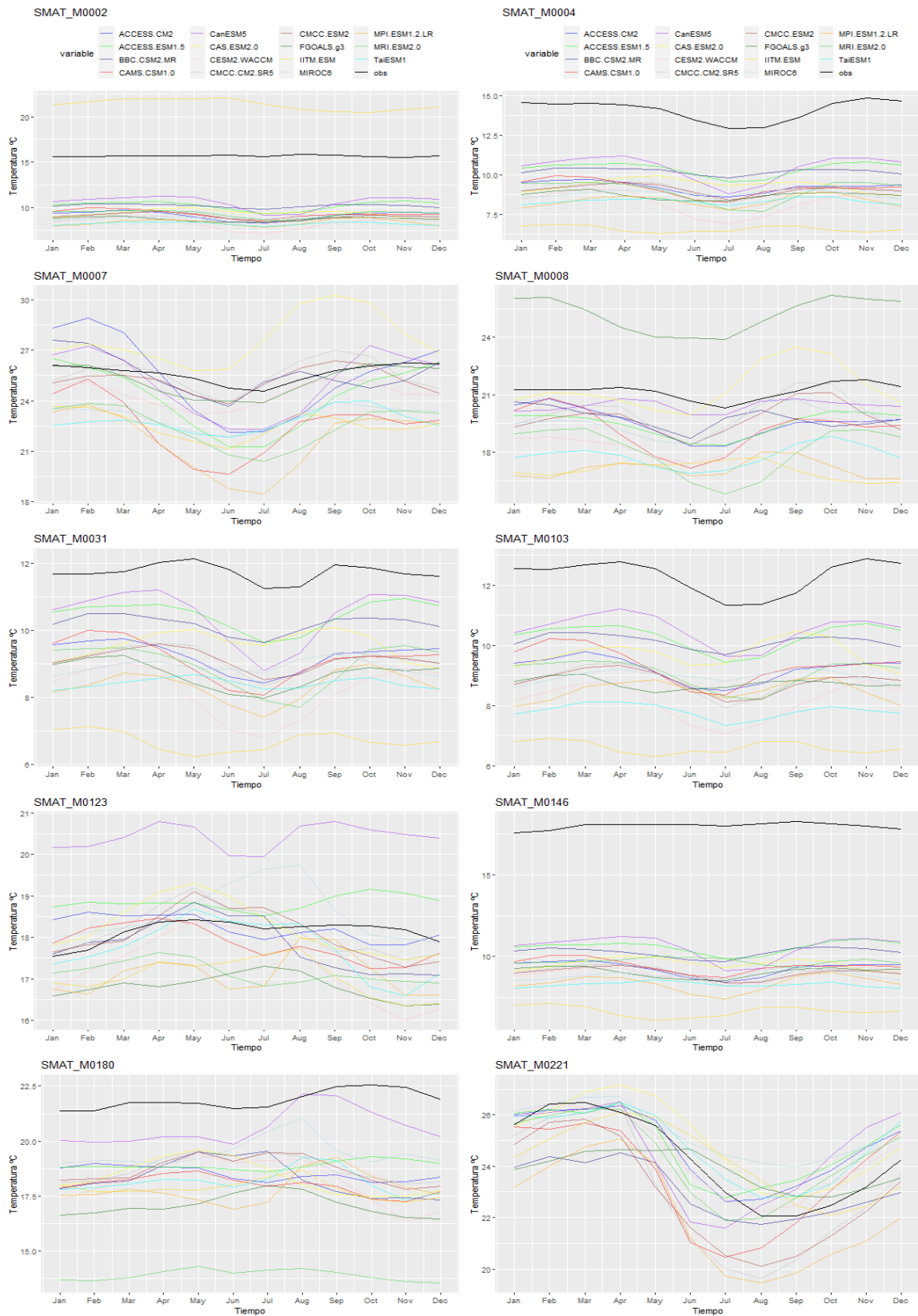


Ilustración 3.1 Resultados de los modelos de proyección climática para la variable temperatura del aire. Fuente: Autores.

Precipitación

La precipitación del territorio ecuatoriano está marcada por las dos estaciones existentes: la época húmeda entre noviembre y mayo, y la época seca entre junio y octubre. De manera general, las estaciones seleccionadas en la zona continental tienen un muy buen ajuste a las tendencias establecida por los datos observados, como se muestra en la Ilustración 3.2. Existen dos modelos (FGOALS-g3 y CanESM5) que, para las estaciones de la sierra norte y central, sobrestiman los datos de precipitación con más de 40 mm en la época húmeda y 19 mm en época seca, cuando registran en como máximo en cada una de estas épocas 2 mm y 0 mm respectivamente en la serie observada. En la estación del Puyo, en la Amazonía ecuatoriana cambia la estacionalidad de ambas épocas por varios meses, teniendo el mayor registro de cerca de 10 mm para el mes de junio y 4 mm para el mes de enero. Los GCM si mantienen esta tendencia, pero la subestiman en los meses de julio y agosto con valores simulados de 3 mm aproximadamente. La estación M0221, en la isla de San Cristóbal, registra ausencia de precipitación de para los meses de junio hasta noviembre. La zona insular tiene a registrar aumento de precipitación en los meses de febrero y marzo. Los modelos, la mayoría de ellos, sobrestiman los milímetros de precipitación hasta 8 mm en el mes de febrero y mayo. Estos picos de los modelos que resaltan de la tendencia de los datos observados son aquellos que otorgan factor de corrección bajo para poder reducir la escala estadística de los modelos en la estación correspondiente.

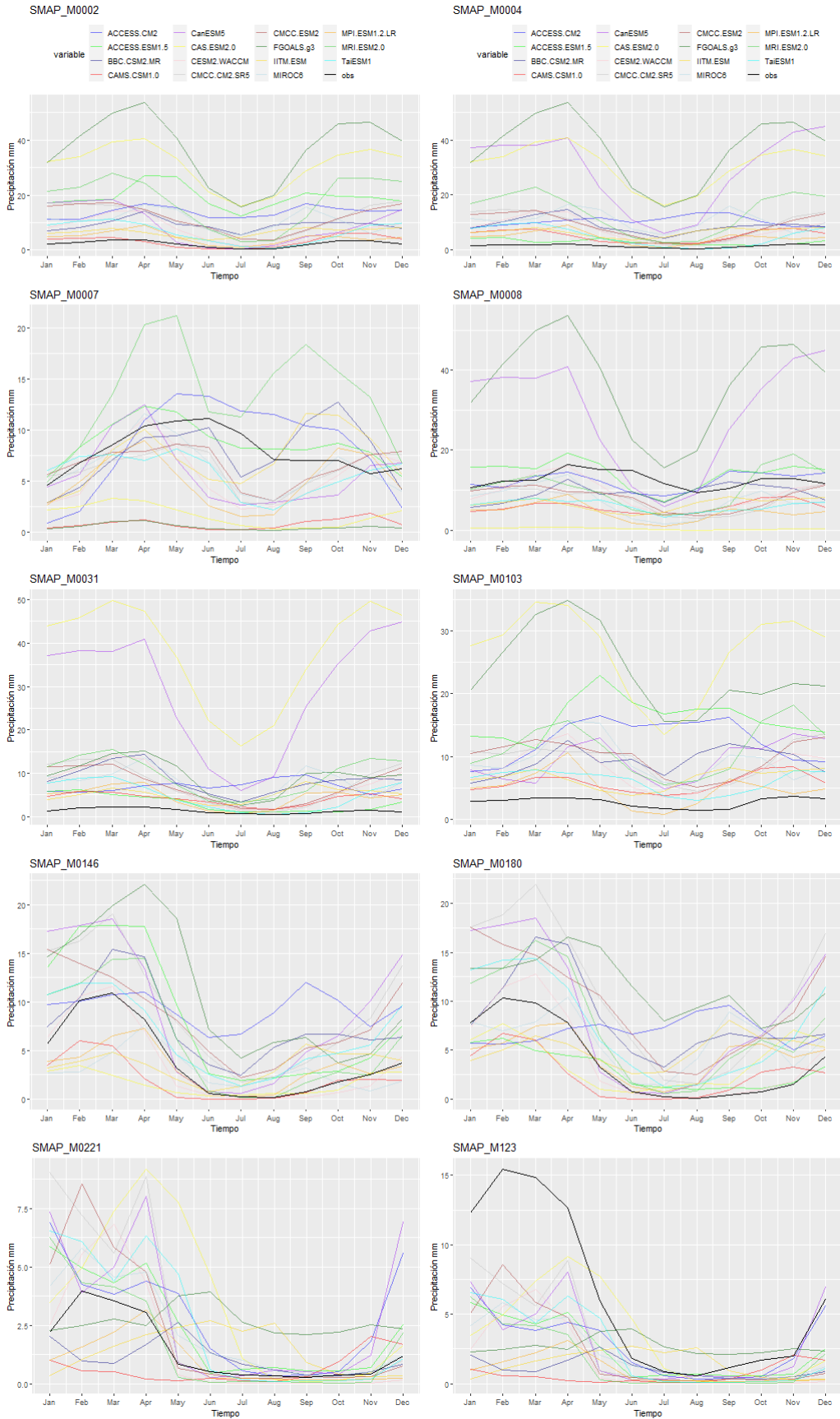


Ilustración 3.2 Resultados de los modelos de proyección climática para la variable precipitación. Fuente: Autores.

3.2. Métricas de Evaluación Estadística

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del diagrama de Taylor para las variables de temperatura del aire y precipitación; de los cuales, los datos observados de las estaciones meteorológicas son representados por un punto pequeño ubicado en el eje "X", mientras que los datos simulados de los modelos de proyección climática son representados por puntos de distintos colores de acuerdo con el nombre del modelo respectivamente. Los valores de cada estadístico se pueden revisar en la Sección de Apéndices. Los resultados de la correlación para cada estación evaluada en todos los 15 modelos se encuentran en el apéndice C y los del RMSE en apéndice B.

Temperatura del Aire

En la Ilustración 3.3, existen 3 gráficas que son diferentes al resto, mostrando un semicírculo, a diferencia de las otras 7 que son un cuarto de círculo, esto se debe a que en las estaciones M0002, M0123 y M0146 hay modelos que poseen una correlación negativa a los datos observados. Estas correlaciones son bajas entre -0.3 y -0.001. Como se expuso en el capítulo anterior, la metodología para elegir los tres mejores modelos de cada una de las estaciones es bastante simple utilizando este método gráfico de los diagramas de Taylor siendo una alternativa efectiva y útil al momento de evaluar estadísticamente los modelos de proyección climática. En base a la relación de los 3 estadísticos en consideración, la estación con los modelos mejor relacionados a los datos observados es las M0103, debido a que posee un bajo RMSE y una correlación alta.

De manera independiente, las estaciones que tuvieron menor registro del RMSE fueron: M0008, M0031, M0103 y M0180 con valores de entre 0.5° C y 1° C. Aquellas con mayor correlación fueron: M0004, M0007, M0103 y la estación de las Galápagos (M0221) fue la que mayor RMSE tuvo cercano a 1.5°C, pero tuvo la mayor correlación cercana a 0.7. La mayoría de los modelos en cada una de las estaciones mantuvieron una distancia reducida al arco de desviación estándar, siendo la mayor parte con registros de desv. estand. mayor que la de los datos observados.

Ahora de manera específica en los modelos, cada estación presenta los modelos no tan dispersos entre sí, según los estadísticos. En el caso de las estaciones de la sierra norte (M002 y M0004), presentan comportamientos bastante diferentes, con correlaciones distantes y RMSE altos, pero con coincidencias en los 2 de los 3 mejores modelos para cada una de las estaciones: BBC-CSM2-MR y CAMS-CSM1-0 con correlaciones de distantes, pero con RMSE cercanos. Para el oriente ecuatoriano (M0007 y M0008) solo

tienen una coincidencia con TaiESM1 con los valores de correlación y RSME cercanos entre sí. Los otros dos modelos seleccionados como mejores para estas estaciones poseen una correlación menor y mayor RMSE con respecto al coincidente.

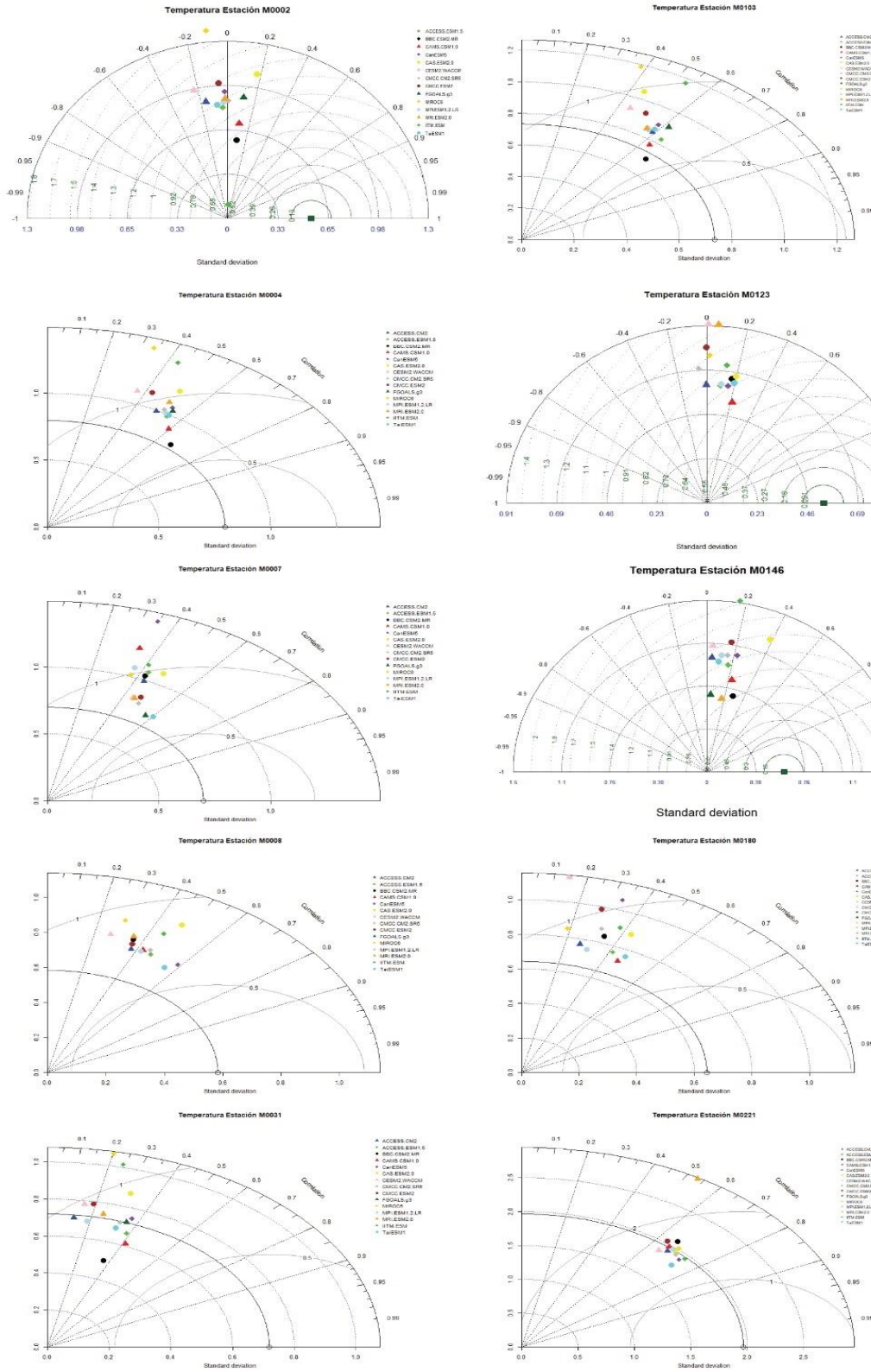


Ilustración 3.3 Resultados del diagrama de Taylor de los modelos de proyección climática para la variable temperatura del aire. Fuente: Autores.

Precipitación

En la Ilustración 3.4, existe un gráfico que es diferente al resto, mostrando un semicírculo, debiéndose a que en la estación M0103 el modelo CMCC-CMS2-SR5 tiene una correlación negativa cercana a 0 con respecto a los datos observados. En base a la relación de los 3 estadísticos en consideración, la estación con los modelos mejor relacionados a los datos observados es las M0031, debido a que posee un bajo RMSE entre 0.5 y 1 mm y una correlación alta cercana a 0.5. Esta estación, junto con la M0004, fueron las que tuvieron menor RMSE de todas las 10 analizadas. Este valor oscila entre 0.75 mm. Aquellas con mayor correlación fueron: M0002, M0031, M0146 y M0180. La estación de las Galápagos (M0221) para este parámetro, tuvo baja correlación en todos los modelos y un RMSE cercano a 2.5mm. La mayoría de los modelos en cada una de las estaciones mantuvieron distancias considerables con arco de desviación estándar, siendo la mayor parte con registros de desviación estándar menores que la de los datos observados.

Específicamente los modelos, cada estación presenta a cada GCM no tan dispersos entre sí, según los estadísticos, a excepción de las estaciones de la región amazónica. En el caso de las estaciones de la sierra norte (M002 y M0004), presentan comportamientos bastante similares, con correlaciones relativamente cercanas y RMSE en diferencia de 0.5 mm. Posee coincidencias en los 1 de los 3 mejores modelos para cada ambas estaciones: BBC-CSM2-MR. Para el oriente ecuatoriano (M0007 y M0008) todos sus modelos poseen correlaciones cercanas a 0.3 y RMSE de entre 4 y 6 mm solo tienen una coincidencia con TaiESM1 con los valores de correlación de 0.6 y 0.4 respectivamente y RSME menor para la estación de Puyo. Los otros dos modelos seleccionados como mejores para estas estaciones poseen correlaciones y RMSE cercanos.

3.3. Sesgo

En la ilustración 3.5 se muestran los sesgos de las series de tiempo de cada estación para los 15 modelos evaluados. Estas gráficas son a partir de los datos del cálculo del sesgo que se muestra en Apéndice A.

La distancia medida de los datos desde la media para cada parámetro en sus respectivos modelos es baja para la temperatura, en su mayoría siendo negativas en un rango desde 0.005°C y 0.065°C y positivamente muy pocas estaciones, entre 0°C y 0.036°C , lo que indica que la temperatura de todas las estaciones evaluadas está cercana a la meda, por lo que no poseen gran diferencia una con otra. Para el modelo FGOALS-g3 se calculó un sesgo positivo de 0.035°C . El modelo con mayor sesgo para el parámetro de temperatura fue el MRI-ESM2-0, donde se obtuvo un sesgo de cerca de -0.065°C . La precipitación, por el contrario de la temperatura, presenta mayores sesgos, es decir valores más lejanos de la media de cada estación. El sesgo de la precipitación presenta sesgos positivos y negativos, siendo los negativos las que abundan. Los valores positivos están entre 0.01 mm y 6 mm y los negativos desde 0.01 mm hasta 10 mm . El modelo CMCC-CM2-SR5 es el que presentó mayor sesgo para todas las estaciones evaluadas, siendo las de mayor registro M0007 y M0031.

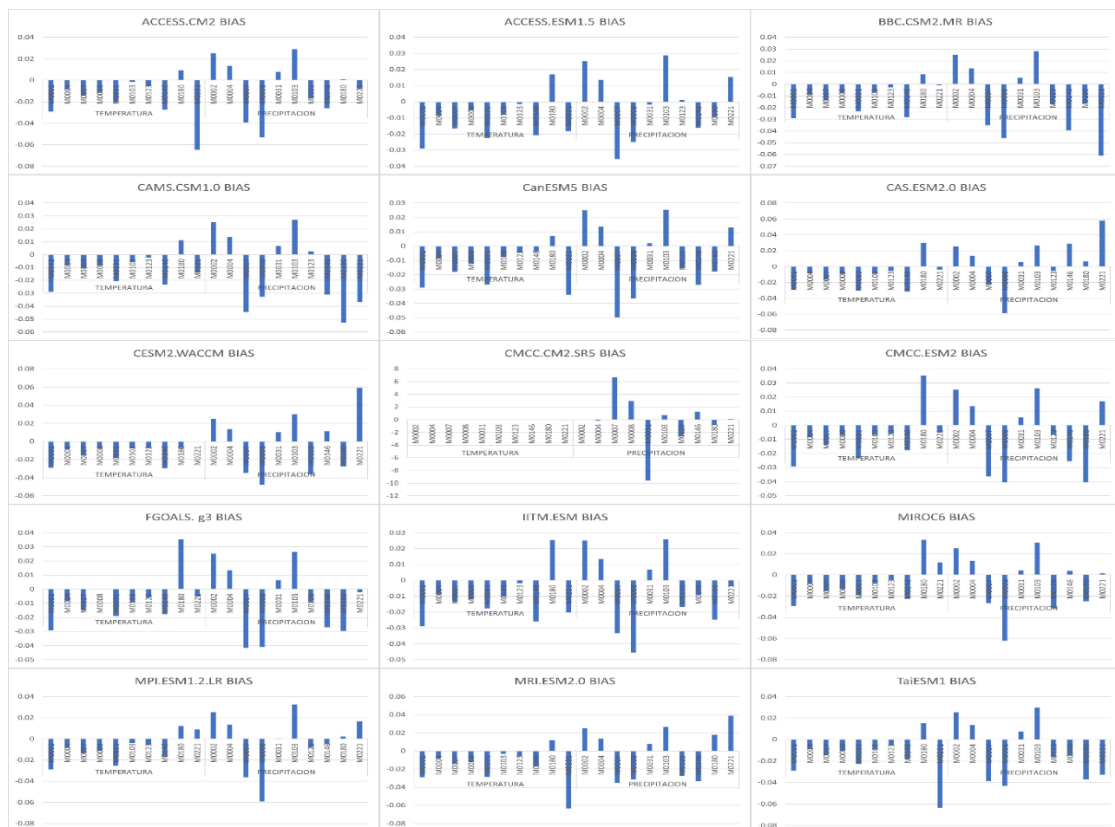


Ilustración 3.5 Sesgo estadístico para cada modelo del CMIP6 en referencia a cada estación para los parámetros de temperatura y precipitación

3.4. Elección de los Modelos

En el Ilustración 3.6 e Ilustración 3.7, se muestran los resultados del análisis y elección a partir de los diagramas de Taylor donde, en base a la metodología, se escogen los cinco mejores modelos basados en la frecuencia de estos dentro de las 30 preselecciones de todas las estaciones permitiendo una adecuada selección de los 5 mejores GCM en todo el territorio ecuatoriano. Los resultados de los valores de cada frecuencia se encuentran en apéndice D.

Temperatura del Aire

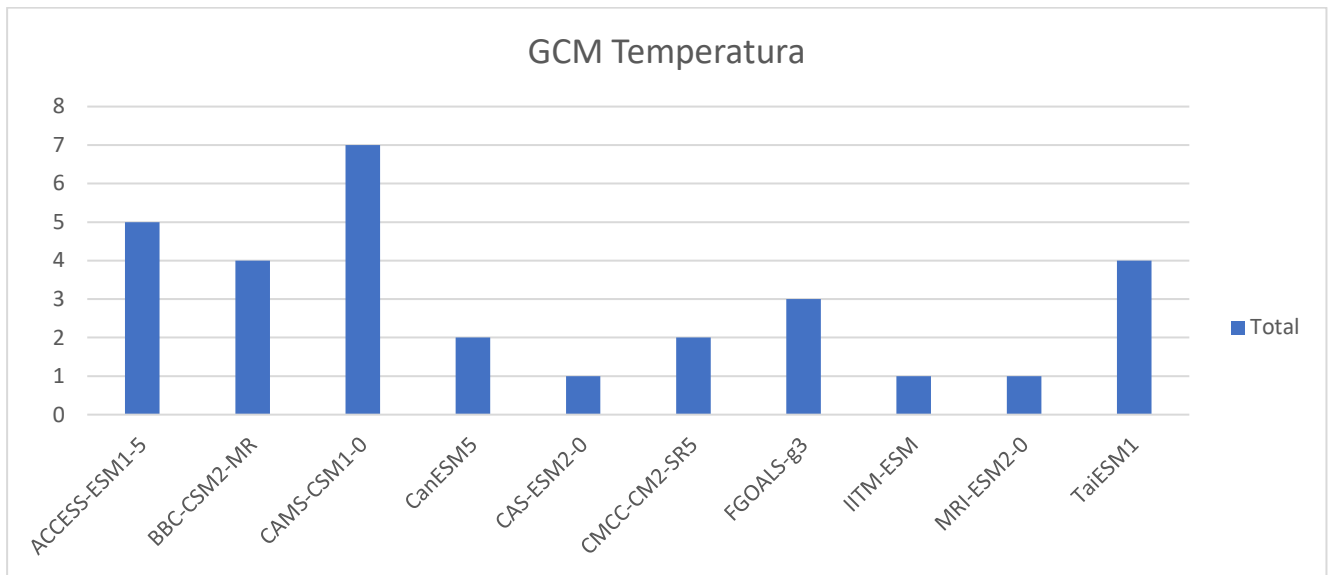


Ilustración 3.6 Modelos de Proyección Climática para la variable temperatura del aire.
Fuente: Autores.

Precipitación

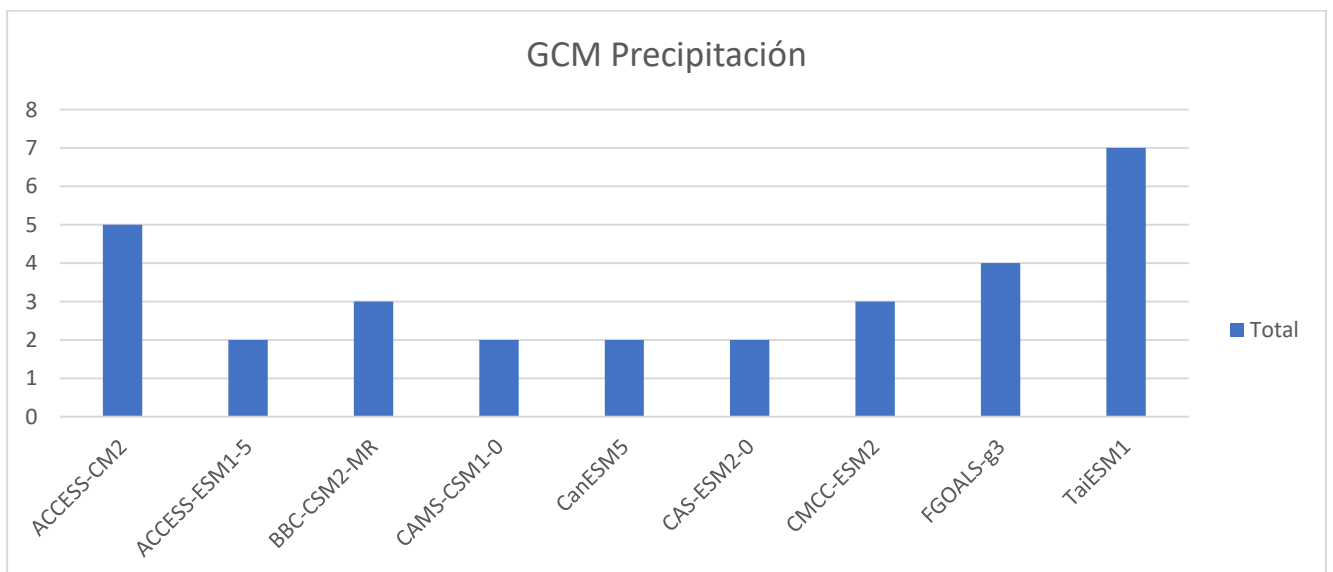


Ilustración 3.7 Modelos de Proyección Climática para la variable temperatura del aire.
Fuente: Autores.

En la Tabla 3.1, se definen los 5 modelos de proyección climática con mayor frecuencia por las estaciones meteorológicas. Como se puede observar, el modelo de proyección climática con mayor frecuencia para la variable de temperatura del aire es el CAMS-CSM1-0 con un valor de 7; mientras que, el modelo de proyección climática con mayor frecuencia para la variable de precipitación es el TaiESM1 con un valor de 7. Estos dos modelos de proyección climática se emplearon para evaluarlos en los dos escenarios climáticos de SSP1 y SSP3.

Tabla 3.1 Presentación de los 5 modelos de proyección climática con mayor frecuencia por las estaciones meteorológicas, para las variables de temperatura del aire y precipitación. Fuente: Autores.

Temperatura del aire		Precipitación	
Modelo	Frecuencia	Modelo	Frecuencia
CAMS-CSM1-0	7	TaiESM1	7
ACCESS-ESM1-5	5	ACCESS-CM2	5
BBC-CSM2-MR	4	FGOALS-g3	4
TaiESM1	4	BBC-CSM2-MR	3
FGOALS-g3	3	CMCC-ESM2	3

3.5. Resultados Escenarios de Cambio Climático (SSP1-SSP3)

A continuación, se presenta el resultado de la aplicación de los mejores modelos de proyección climática tanto para la variable de temperatura del aire como para la variable de precipitación, en los dos escenarios de cambio climático previamente definidos: SSP1 y SSP3.

Modelo de Proyección Climática CAMS-CSM1-0: Variable Temperatura del Aire

Como se puede observar en la Ilustración 3.7, se presentan los resultados del modelo de proyección climática CAMS-CSM1-0 de la variable de temperatura del aire para los dos escenarios de cambio climático. Para el escenario climático de SSP1, se manifestó un incremento gradual de la temperatura de aproximadamente 0,5°C hasta el año 2100 en la mayoría de las estaciones meteorológicas; no obstante, en las estaciones de M0007, M0123 y M0180, no se presentó un incremento notable en la temperatura del aire para el territorio ecuatoriano. Por otro lado, para el escenario climático de SSP3, se

expuso un incremento ligeramente brusco de la temperatura de aproximadamente 1,5°C hasta el año 2100 en todas las estaciones meteorológicas; especialmente en las estaciones de M0002, M0004, M0031, M0103 y M0146 donde se presentó un incremento mayor a 1,5°C de la temperatura del aire. Además, la estación M0103 presenta una tendencia más positivas que las mencionadas.

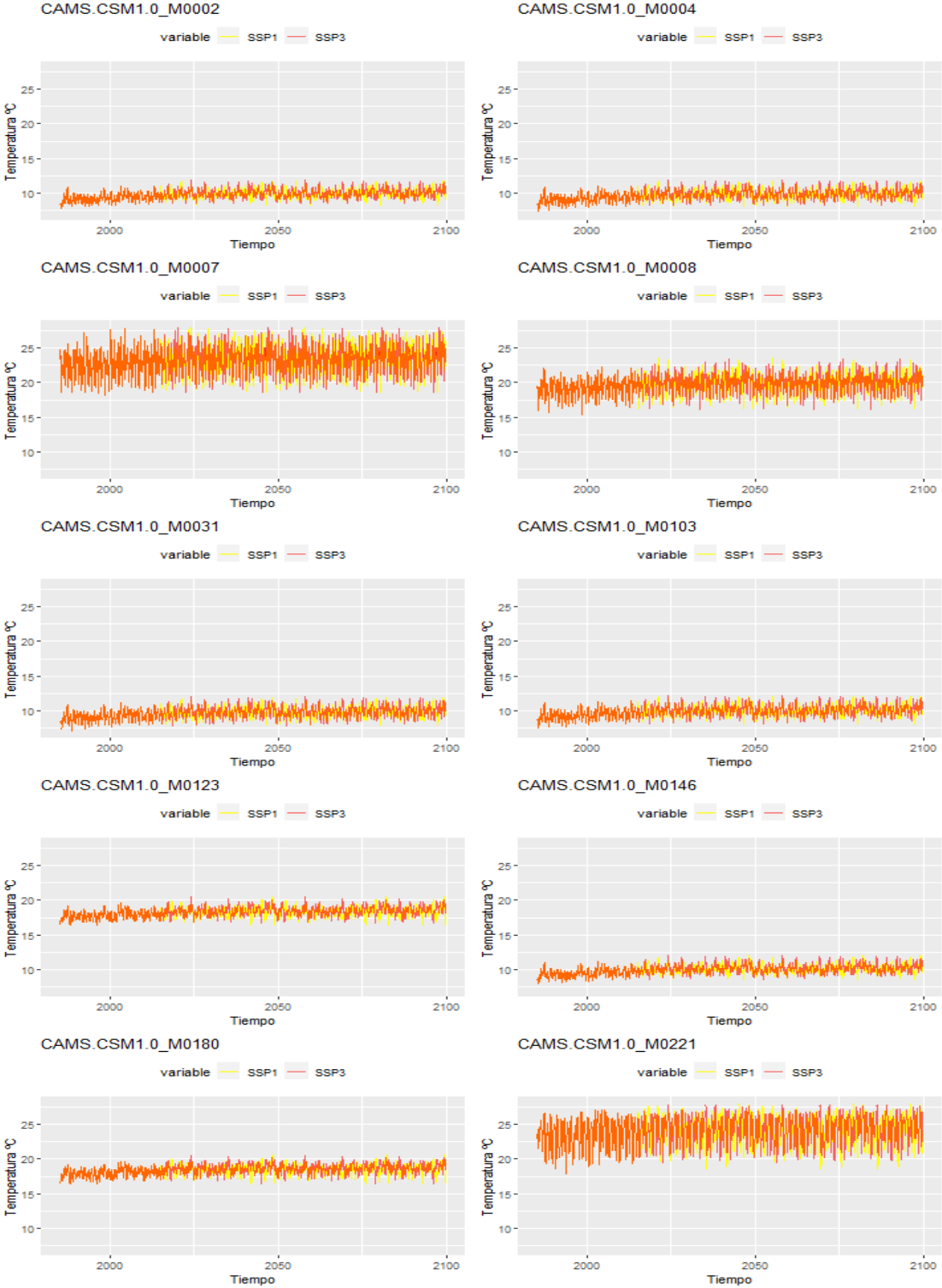


Ilustración 3.8 Modelo de Proyección Climática CAMS-CSM1-0 aplicado en los escenarios SSP1-SSP3. Fuente: Autores.

Modelo de Proyección Climática TaiESM1: Variable Precipitación

En la Ilustración 3.8, se presentan los resultados del modelo de proyección climática TaiESM1 de la variable de precipitación para los dos escenarios de cambio climático. Para el escenario climático de SSP1, se presentó un considerable incremento en el flujo de precipitación mayor a 10mm en todo el territorio ecuatoriano hasta el año 2100, además de la presencia de valores extremos del flujo de precipitación durante los años previos y posteriores al año 2050. Para el escenario climático de SSP3, se presentaron valores casi constantes de flujo de precipitación, específicamente en las estaciones de M0002, M0004, M0123, M0146 y M0180, las cuales registraron valores menores a 20mm. Adicionalmente, en las estaciones de M0031, M0123, M0146 y M0180 se obtuvieron los valores más altos del flujo de precipitación en comparación con las demás estaciones meteorológicas.

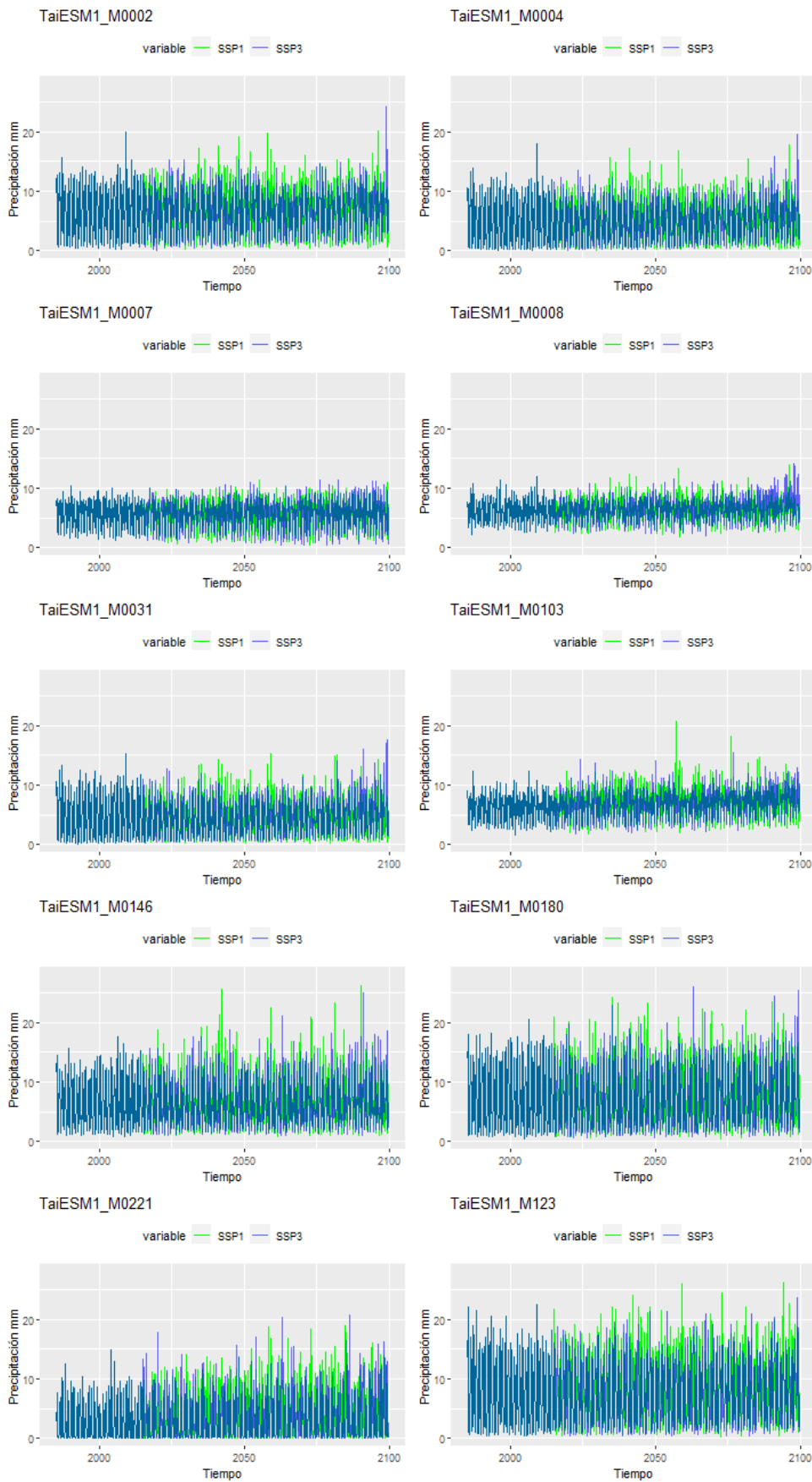


Ilustración 3.9 Modelo de Proyección Climática TaiESM1 aplicado en los escenarios SSP1-SSP3. Fuente: Autores.

3.6. Análisis de Costos

En la Tabla 3.2 y Tabla 3.3, se detallan los costos involucrados en el desarrollo del proyecto de investigación, para lo cual se realizó una adecuada clasificación de los costos en dos grupos: Implementos y Herramientas, y Salarios. El primer grupo incluye el costo del equipo computacional de alta gama, y la descarga del software RStudio, modelos CMIP6 y datos observados de las estaciones meteorológicas son de acceso libre. Mientras que, el segundo grupo incluye los salarios de los dos ingenieros oceanográficos durante los cuatro meses que duró la realización de este proyecto.

Tabla 3.2 Costos de los Implementos y Herramientas del proyecto de investigación. Fuente: Autores.

Implementos y Herramientas	Cantidad	Precio Unitario	Costo	Descripción
Computadora: Core I7 – 16Gb RAM – 1Tb SSD	1	\$1,200.00	\$1,200.00	
Software R - RStudio	1	\$0.00	\$0.00	Libre acceso
Modelos CMIP6	15	\$0.00	\$0.00	Libre acceso
Datos observados estaciones metereológicas: Temperatura y precipitación	167	\$0.00	\$0.00	Libre acceso
TOTAL			\$1,200.00	

Tabla 3.3 Costos de los Salarios del personal del proyecto de investigación. Fuente: Autores.

Salarios	Cantidad	Precio Unitario	Costo
Ingenieros Oceanográficos	2	\$4,000	\$8,000.00
Observaciones: Duración del Proyecto 4 meses.			
TOTAL			\$8,000.00

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Los GCM elegidos con mejor desempeño, desde el primero en el ranking hasta el quinto en el territorio ecuatoriano fueron los siguientes: para temperatura: CAMS-CSM1-0, ACCESS-ESM1-5, BBC-CSM2-MR, TaiESM1 y FGOALS-g3 y para precipitación: TaiESM1, ACCESS-CM2, FGOALS-g3, BBC-CSM2-MR y CMCC-ESM2 respectivamente, siendo BBC-CSM2-MR, TaiESM1 y FGOALS-g3 coincidentes para ambos parámetros climáticos.
- Se obtuvieron 15 GCM con las simulaciones históricas y de los 4 escenarios SSP para los parámetros de temperatura y precipitación. Actualmente existen 39 modelos disponibles en el sitio ESGF de descarga de estos.
- Los modelos de proyección climática del CMIP6 individualmente tienen limitantes al simular climas regionales y nacionales.
- El software de acceso libre R-Studio y sus diferentes librerías para trabajar archivos netCDF funcionó de manera efectiva, pero tiene presentó limitaciones por la capacidad de memoria del equipo utilizado.
- Las mediciones de precipitación y temperatura de las 10 estaciones meteorológicas escogidas presentaron un correcto desempeño y presentaban más del 84% de confianza al tener los sets de datos completos.
- Los datos de temperatura de cada estación se acoplan mejor a los datos observados en referencia al RMSE y la Correlación; a diferencia de los datos de precipitación que presentan mejores Correlaciones, pero mayor RMSE.
- El método de relación de 3 estadísticos de forma gráfica de los diagramas de Taylor permite realizar análisis más optimizados frente a valores observados y simulados.
- El sesgo revisado fue considerablemente bajo para los datos de temperatura y con ciertos picos extremos para los datos de precipitación. Esto indica que los valores de temperatura tienen mejor ajuste para la temperatura con respecto a su media.
- Las simulaciones hasta el 2100 en ambos escenarios muestran una tendencia de aumento de temperatura a partir del 2050. Las simulaciones en ambos escenarios

muestran picos extremos de precipitación entre los años 2060-2080.

- El estudio realizado es el preámbulo para poder generar escenarios de las proyecciones de cambio climático regionales, utilizando ensambles entre los mejores modelos seleccionados, reducción de escala dinámica y generación de cartografía, como se muestra en la tercera CNCC.

4.2. Recomendaciones

- El acceso a los GCM es libre, con diferentes aspectos que requieren un nivel intermedio de búsqueda e interpretación utilizando los recursos otorgados por WRCP. Es importante generar una guía de usuario resumida y específica para usuarios que facilite su acceso y uso.
- Utilizar un equipo computacional con suficiente capacidad de memoria gráfica y de almacenamiento para generar la descargar y uso de los datos de los GCM.
- Incorporar en el estudio las mediciones para ambas variables de todas las estaciones meteorológicas con set de datos completos y disponibles considerando las limitaciones a bajas alturas.
- Para el procesamiento de los datos formato netCDF en R-Studio, utilizar librerías como Ráster para obtener series de tiempo específicas sin tener que cargar en la memoria del ordenador todo el set de datos.
- Impulsar trabajos de investigación en la academia utilizando todos los atributos y características de los GCM debido que es novedoso y de gran impacto para la toma de decisiones nacionales y regionales.
- Se requiere un nivel intermedio de manejo de lenguaje de programación por lo que, quien posea el interés y dedicación podría generar productos utilizando un software de licencia libre y equipos de uso diario.

BIBLIOGRAFÍA

- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M., Rashid, I., Kamil, S., Abid, M., . . . Sylla, M. (2021). *Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America*. Universidad de King Abdulaziz. doi:10.1007/s41748-021-00233-6
- Ambiente, M. d. (2016). *Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Dirección General de Cambio Climático, Desertificación y Recursos Hídricos, Lima.
- Ambiente, M. d. (2017). *Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático*. Subsecretaría de Cambio Climático, Quito.
- Anna, J., & Hargreaves, J. (2011). Understanding the CMIP3 multimodel ensemble. *J Clim* 24, 4529–4538. doi:<https://doi.org/10.1175/2011JCLI3873.1>
- Armenta Porras, G. E., Villa Cedeño, J. L., & Jácome, P. S. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*. Obtenido de <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/EQU/14%20Proyecciones%20de%20Clima%20Futuro%20para%20Ecuador%20en%20base%20a%20IPCC-AR5.pdf>
- Dixon, K., Harris, L., & Knutson, T. (2018). *Climate Model Downscaling*. Obtenido de Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - NOAA: <https://www.gfdl.noaa.gov/climate-model-downscaling/#:~:text=Dynamical%20downscaling%20refers%20to%20the,or%20local%20scales%20of%20interest.>
- Durack, P., Taylor, K., Doutriaux, C., Mizielinski, M., Nadeau, D., & Juckes, M. (2018). *CMIP6_CVs*. Obtenido de GitHub: https://github.com/WCRP-CMIP/CMIP6_CVs
- Durack, P., Taylor, K., Doutriaux, C., Mizielinski, M., Nadeau, D., Juckes, M., . . . Stockhause, M. (2018). *CMIP6 Global Attributes, DRS, Filenames, Directory Structure, and CV's*. WRCP. Obtenido de <https://goo.gl/v1drZI>
- Europea, U. (08 de Septiembre de 2022). *CMIP6 climate projections*. Obtenido de Copernicus Climate: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=overview>

- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937 - 1958. doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016
- Fan, X., Duan, Q., Wu, Y., Xing, C., & Shen, C. (2022). Evaluation of historical CMIP6 model simulations and future projections of temperature over the Pan-Third Pole region. *Environmental Science and Pollution Research* 29, 26214–26229. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-021-17474-7>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2015). *Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2011 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones - Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá.
- IPCC, Houghton, J., Ding, Y., Griggs, D., Noguer, M., van der Linden, P., . . . Johnson, C. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate Change*. Cambridge University Press. Obtenido de http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/317.htm#fig84
- IPCC, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., . . . Miller, H. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC-DDC, & P.-D., I. (2013). *Definition of Terms Used Within the Pages DDC*.
- Kreienkamp , F., Lorenz, P., & Geiger, T. (2020). Statistically Downscaled CMIP6 Projections Show Stronger Warming for Germany. *Atmosphere* 2020, 11(11), 1245. doi:<https://doi.org/10.3390/atmos11111245>
- Linés, A. (1995). *Modelos Climáticos y sus resultados. Aplicación a la Región Mediterránea*. Asociación Meteorológica Española. Obtenido de <https://www.raco.cat/index.php/ButlletiSCFQMT/article/21892/302612>
- Llamocca Huamani, J. (2022). *Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos con CMIP5 para el Perú*. Revista Geográfica. doi:10.35424/regeo.164.2022.1085
- Marengo, J. A., Chan Chou, S., Torres, R. R., Giarolla, A., Alves, L. M., & Lyra, A. (2014). *Climate Change in Central and South America: Recent Trends, Future Projections, and Impacts on Regional Agricultura*. CGIAR Research Program on Climate

- Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Copenhagen, Denmark: CCAFS Working Paper no. 73. Obtenido de https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/41912/Climate%20change%20in%20CA%20and%20SA%20final_.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Pabón, J. D. (2011). *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia - Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Taylor, K. (2001). *Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram*. Journal of Geophysical Research. Obtenido de <http://www.pcmdi.llnl.gov/publications/ab55.html>
- Taylor, K. E. (2005). *Taylor Diagram Primer*. Report. Obtenido de https://pcmdi.llnl.gov/staff/taylor/CV/Taylor_diagram_primer.pdf
- Taylor, K. E., Jukes, M., Balaji, V., Cinquini, L., Denvil, S., Durack, P. J., . . . Stockhouse, M. (2018). *CMIP6 Global Attributes, DRS, Filenames, Directory Structure, and CV's*. WCRP-CMIP . Obtenido de <https://goo.gl/v1drZI>
- Toulkeridis, T., Tamayo, E., Simón-Baile, D., Merizalde-Mora, M. J., Reyes-Yunga, D. F., Viera-Torres, M., & Heredia, M. (2020). CAMBIO CLIMÁTICO SEGÚN LOS ACADÉMICOS ECUATORIANOS - PERCEPCIONES VERSUS HECHOS. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* Vol. 31(1), 21 - 46. doi:<http://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.02>
- UCAR. (2018). *Network Common Data Form (NetCDF)*. Obtenido de UNIDATA: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>
- Velásquez Fernández, S. (2021). *Evaluación de la capacidad de los modelos CMIP6 para simular la evapotranspiración y precipitación en el Norte de Suramérica*. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Medellín. Obtenido de https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/20034/3/VelasquezSusana_2021_EvaluacionCapacidadModelos.pdf
- WCRP, W. C. (2 de March de 2022). *WCRP Coupled Model Intercomparison Project (Phase 6)*. Obtenido de ESGF Node llnl: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>

APÉNDICES

APÉNDICE A

Resultados del Sesgo

	Temperatura del aire °C										
	Modelos	M0002	M0004	M0007	M008	M0031	M0103	M0123	M0146	M0180	M0221
1	ACCESS-CM2	-0,02902	-0,00866	-0,01416	-0,01171	-0,02035	-0,00162	-0,0055	-0,02737	0,009141	-0,06476
2	ACCESS-ESM1-5	-0,02902	-0,00866	-0,01648	-0,00561	-0,02235	-0,00801	-0,00133	-0,02081	0,016937	-0,01828
3	BBC-CSM2-MR	-0,02902	-0,00866	-0,01367	-0,00788	-0,02319	-0,00704	-0,00263	-0,02806	0,008362	-0,00089
4	CAMS-CSM1-0	-0,02902	-0,00866	-0,01047	-0,00876	-0,02042	-0,00566	-0,00233	-0,02331	0,011096	-0,01415
5	CanESM5	-0,02902	-0,00866	-0,018	-0,01187	-0,02688	-0,00788	-0,00445	-0,00386	0,007129	-0,03385
6	CAS-ESM2-0	-0,02902	-0,00866	-0,01637	-0,00955	-0,03019	-0,00915	-0,0053	-0,03166	0,029897	-0,00369
7	CESM2-WACCM	-0,02902	-0,00866	-0,01509	-0,00801	-0,01838	-0,00776	-0,00743	-0,02925	-0,00715	NA
8	CMCC-CM2-SR5	-0,02902	-0,00866	-0,01687	-0,00962	-0,02636	-0,00658	-0,00406	-0,01444	0,028779	-0,06415
9	CMCC-ESM2	-0,02902	-0,00866	-0,01396	-0,00706	-0,02326	-0,00677	-0,00597	-0,0178	0,035281	-0,00505
10	FGOALS-g3	-0,02902	-0,00866	-0,01493	NA	-0,01904	-0,00924	-16,7868	8,231367	-20,91	-39,8183
11	IITM-ESM	-0,02902	-0,00866	-0,01357	-0,01188	-0,01783	-0,01022	-0,00181	-0,0259	0,025412	-0,02017
12	MIROC-6	-0,02902	-0,00866	-0,01528	-0,013	-0,01924	-0,0082	-0,00444	-0,02234	0,033304	0,011939
13	MPI-ESM1-2-LR	-0,02902	-0,00866	-0,01349	-0,01159	-0,02556	-0,00395	-0,00558	-0,0168	0,012066	0,009027

14	MRI-ESM2-0	-0,02902	-0,00866	-0,01426	-0,01203	-0,02885	-0,00292	1,000287	7,670204	-4,28451	-14,0563
15	TaiESM1	-0,02902	-0,00866	-0,01456	-0,01068	-0,02258	-0,00917	-0,00533	-0,01805	0,015311	-0,06337

	Precipitación mm										
	Modelos	M0002	M0004	M0007	M008	M0031	M0103	M0123	M0146	M0180	M0221
1	ACCESS-CM2	0,02516	0,013544	-0,03912	-0,05297	0,007913	0,02906	-0,0166	-0,0261	0,00129	-0,0078
2	ACCESS-ESM1-5	0,02516	0,013544	-0,03555	-0,02492	-0,00189	0,02869	0,00115	-0,0163	-0,0097	0,01537
3	BBC-CSM2-MR	0,02516	0,013544	-0,03497	-0,04592	0,00552	0,02821	-0,0168	-0,0392	-0,0164	-0,0609
4	CAMS-CSM1-0	0,02516	0,013544	-0,04458	-0,03264	0,006655	0,02707	0,00267	-0,0309	-0,0528	-0,0368
5	CanESM5	0,02516	0,013544	-0,04976	-0,03649	0,002013	0,02537	-0,0154	-0,0271	-0,0177	0,01287
6	CAS-ESM2-0	0,02516	0,013544	-0,02269	-0,05823	0,00583	0,0268	-0,0055	0,0288	0,00645	0,05793
7	CESM2-WACCM	0,02516	0,013544	-0,03488	-0,04762	0,010255	0,03	-0,0358	0,01136	-0,0274	0,0591
8	CMCC-CM2-SR5	-3219617	-0,17736	6,701056	2,933157	-9,6022	0,74466	-2,5544	1,26533	-0,8271	0,1143
9	CMCC-ESM2	0,02516	0,013544	-0,03613	-0,0405	0,00563	0,02614	-0,0066	-0,0255	-0,0403	0,017
10	FGOALS-g3	0,02516	0,013544	-0,04154	-0,04103	0,00638	0,02644	-0,0088	-0,027	-0,0295	-0,0023
11	IITM-ESM	0,02516	0,013544	-0,03339	-0,04553	0,00676	0,02574	-0,0169	-0,0091	-0,0247	-0,0038
12	MIROC-6	0,02516	0,013544	-0,02676	-0,06217	0,004365	0,030464	-0,0315	0,00402	-0,0251	0,00148
13	MPI-ESM1-2-LR	0,02516	0,013544	-0,03629	-0,05919	0,000486	0,032441	-0,0079	-0,0045	0,00229	0,01653

14	MRI-ESM2-0	0,02516	0,013544	-0,03508	-0,03114	0,007676	0,026666	-0,0275	-0,0335	0,01783	0,03908
15	TaiESM1	0,02516	0,013544	-0,03845	-0,04296	0,007347	0,029636	-0,016	-0,0152	-0,0369	-0,0328

APÉNDICE B

Resultados RMSE

Temperatura del aire °C											
	Modelos	M0002	M0004	M0007	M008	M0031	M0103	M0123	M0146	M0180	M0221
1	ACCESS-CM2	1,10024	0,91892	0,93374	0,76294	0,94213	0,72057	0,81086	1,15336	0,86399	1,57053
2	ACCESS-ESM1-5	1,00079	0,86589	0,99087	0,71198	0,76969	0,66652	0,76601	1,03709	0,77000	1,56001
3	BBC-CSM2-MR	0,75470	0,66254	0,96923	0,81173	0,71143	0,57456	0,76419	0,77623	0,86611	1,66414
4	CAMS-CSM1-0	0,84197	0,77522	1,17444	0,74430	0,72656	0,64808	0,66583	0,90448	0,71540	1,61749
5	CanESM5	1,09203	0,92287	1,35652	0,63102	0,82455	0,75775	0,74534	1,08988	1,04046	1,40994
6	CAS-ESM2-0	1,11911	1,03438	0,96753	0,85055	0,94313	0,97619	0,76477	1,17153	0,84356	1,54295
7	CESM2-WACCM	1,21612	1,08769	0,83302	0,86892	0,97673	0,89266	1,06162	1,24214	1,22781	NA
8	CMCC-CM2-SR5	1,02437	0,91867	0,78376	0,73591	0,82971	0,75529	0,89718	1,11843	0,90993	1,49352
9	CMCC-ESM2	1,16360	1,05574	0,82476	0,79043	0,96006	0,84219	0,96447	1,21351	1,01555	1,70252
10	FGOALS-g3	0,99465	0,89681	0,68706	NA	0,81781	0,73341	16,87972	8,27906	21,05428	40,17365
11	IITM-ESM	0,55142	1,24515	1,04376	0,81390	1,09316	0,99724	0,83642	1,54658	0,89103	1,40142
12	MIROC-6	1,54614	1,37450	0,99611	0,92470	1,15922	1,13033	0,92228	1,92924	0,96441	1,56539
13	MPI-ESM1-2-LR	1,02895	0,88913	1,04144	0,74179	0,90180	0,74078	0,76950	1,13476	0,82525	1,57589
14	MRI-ESM2-0	1,04797	0,96269	0,82557	0,82666	0,89758	0,75064	1,44143	7,71270	8,77527	14,27987
15	TaiESM1	1,03687	0,87038	0,66811	0,62632	0,81295	0,73538	0,74084	1,09749	0,72801	1,36795

	Precipitación mm										
	Modelos	M0002	M0004	M0007	M008	M0031	M0103	M0123	M0146	M0180	M0221
1	ACCESS-CM2	1,4208	0,9262	4,2169	4,50763	0,86189	1,54566	3,66235	3,17197	2,74170	2,73727
2	ACCESS-ESM1-5	1,4140	1,4818	3,0926	5,04845	1,13466	1,67584	5,80323	3,35305	3,56479	2,96505
3	BBC-CSM2-MR	1,4197	1,0049	4,5509	9,10015	0,90458	1,72374	3,92007	3,40224	2,91575	2,99115
4	CAMS-CSM1-0	1,7618	1,0071	6,8064	5,16030	0,84015	1,65034	4,83289	3,82088	3,38030	3,30933
5	CanESM5	1,6701	0,9733	5,0796	5,34079	0,86009	1,69694	3,87213	3,66648	3,11774	2,70441
6	CAS-ESM2-0	1,3181	0,8891	3,9486	4,37475	0,78141	1,48088	4,78550	3,95782	3,04493	2,70934
7	CESM2-WACCM	1,5292	1,0259	4,4108	4,20445	0,89869	1,72240	5,03896	3,91339	3,28955	2,72929
8	CMCC-CM2-SR5	1.4523	1,0722	7,4739	5,00741	10,62726	1,97741	7,85910	4,03574	3,16403	2,71802
9	CMCC-ESM2	1,3670	0,9261	3,2333	6,22104	0,83854	1,54545	3,62787	3,39905	2,64824	2,86700
10	FGOALS-g3	1,3162	0,9141	5,4382	5,55106	0,82920	1,47498	3,86992	3,79443	2,86656	2,51514
11	IITM-ESM	1,4691	1,0401	3,7606	6,01863	0,93409	1,71416	4,58715	3,54152	3,11065	3,27393
12	MIROC-6	1,6302	1,1272	4,0734	3,98022	1,01431	1,82521	4,21345	5,29113	3,03209	2,75298
13	MPI-ESM1-2-LR	1,5127	1,0633	3,8755	4,50763	0,89828	1,83866	4,07262	3,70600	2,80410	2,58274
14	MRI-ESM2-0	1,4594	1,0190	4,0203	5,04845	0,91813	1,60554	6,72820	4,82607	4,15348	2,79596
15	TaiESM1	1,3766	0,9942	2,9474	9,10015	0,87428	1,54537	3,75959	3,30272	2,58374	2,53938

APÉNDICE C

Resultados Correlación

	Temperatura del aire °C										
	Modelos	M0002	M0004	M0007	M008	M0031	M0103	M0123	M0146	M0180	M0221
1	ACCESS-CM2	-0,16244	0,48992	0,43427	0,37672	0,12187	0,58893	-0,00747	0,03510	0,26264	0,67169
2	ACCESS-ESM1-5	-0,03775	0,54282	0,42622	0,46381	0,38413	0,64009	0,09922	0,16893	0,41259	0,68499
3	BBC-CSM2-MR	0,09932	0,66555	0,42391	0,36041	0,36316	0,67668	0,17239	0,28867	0,34176	0,66171
4	CAMS-CSM1-0	0,10497	0,59364	0,34019	0,42322	0,41233	0,62907	0,21212	0,23007	0,45836	0,66073
5	CanESM5	-0,02055	0,53092	0,34530	0,58509	0,36644	0,58092	0,15435	0,22088	0,33085	0,73229
6	CAS-ESM2-0	0,17772	0,50376	0,47885	0,47849	0,30876	0,44441	0,19755	0,38757	0,42712	0,68996
7	CESM2-WACCM	-0,22732	0,36808	0,44419	0,26408	0,15440	0,44341	0,00561	0,03761	0,14537	NA
8	CMCC-CM2-SR5	0,00431	0,51155	0,48827	0,44916	0,32947	0,55816	-0,05534	0,15090	0,31594	0,70495
9	CMCC-ESM2	-0,05811	0,42202	0,47347	0,36633	0,19014	0,50688	-0,00522	0,16364	0,28144	0,63519
10	FGOALS-g3	0,11448	0,54290	0,56733	NA	0,35447	0,61607	0,24425	0,03667	0,10274	0,65487
11	IITM-ESM	0,02583	0,42949	0,40852	0,44769	0,24195	0,53155	0,12455	0,16783	0,37739	0,74088
12	MIROC-6	-0,10054	0,33571	0,36890	0,29308	0,20130	0,38211	0,01456	-0,07940	0,18795	0,68877
13	MPI-ESM1-2-LR	-0,02869	0,52924	0,36509	0,41712	0,18456	0,56755	0,10452	0,10809	0,30228	0,67760
14	MRI-ESM2-0	-0,02039	0,50549	0,45324	0,35598	0,24415	0,55810	0,05600	0,16743	0,02259	0,52992
15	TaiESM1	-0,07943	0,54672	0,60030	0,55496	0,32504	0,58486	0,19428	0,08926	0,47135	0,73726

	Precipitación mm										
	Modelos	M0002	M0004	M0007	M008	M0031	M0103	M0123	M0146	M0180	M0221
1	ACCESS-CM2	0,58554	0,50494	0,35289	0,30620	0,49592	0,41868	0,83165	0,74795	0,79609	0,37956
2	ACCESS-ESM1-5	0,59230	0,21801	0,51044	0,28379	0,35594	0,30415	0,67387	0,72006	0,70232	0,28169
3	BBC-CSM2-MR	0,59854	0,43138	0,27809	0,11977	0,45729	0,30272	0,80863	0,71530	0,77290	0,30212
4	CAMS-CSM1-0	0,40826	0,40960	0,19581	0,28859	0,51934	0,32474	0,73507	0,66129	0,71803	0,28841
5	CanESM5	0,48906	0,45411	0,29017	0,24537	0,49244	0,34375	0,81183	0,67075	0,74654	0,38504
6	CAS-ESM2-0	0,64625	0,55091	0,37628	0,11459	0,58247	0,45906	0,73312	0,65803	0,75500	0,35257
7	CESM2-WACCM	0,53168	0,40368	0,28284	0,24214	0,45603	0,31030	0,71862	0,64114	0,72742	0,33579
8	CMCC-CM2-SR5	0,26147	0,49201	0,35380	0,25516	0,48339	-0,05697	0,23705	0,66733	0,77353	0,38849
9	CMCC-ESM2	0,61632	0,50425	0,46316	0,26032	0,51002	0,40408	0,83457	0,70851	0,80974	0,25885
10	FGOALS-g3	0,64806	0,51720	0,24274	0,28394	0,52443	0,46869	0,81223	0,65043	0,77889	0,42851
11	IITM-ESM	0,56673	0,37930	0,38950	0,25914	0,41535	0,29730	0,74154	0,68805	0,74584	0,23498
12	MIROC-6	0,49797	0,32726	0,29986	0,12766	0,38386	0,25891	0,78556	0,51072	0,76563	0,31583
13	MPI-ESM1-2-LR	0,54349	0,36551	0,38439	0,23440	0,45995	0,27729	0,79223	0,66478	0,78613	0,40958
14	MRI-ESM2-0	0,56574	0,41013	0,31628	0,14916	0,42903	0,38210	0,58017	0,51258	0,60579	0,34525
15	TaiESM1	0,61376	0,42926	0,54068	0,36535	0,47420	0,40231	0,82237	0,72501	0,81892	0,42864

APÉNDICE D

Resultados Frecuencia

Temperatura del Aire °C			
ACCES-ESM1-5	5	CAS-ESM2-0	1
M0004	1	M0123	1
M0008	1	CMCC-CM2-SR5	2
M0031	1	M0007	1
M0103	1	M0221	1
M0180	1	FGOALS-g3	3
BBC-CSM2-MR	4	M0002	1
M0002	1	M0007	1
M0004	1	M0031	1
M0103	1	IITM-ESM	1
M0146	1	M0221	1
CAMS-CSM1-0	7	MRI-ESM2-0	1
M0002	1	M0146	1
M0004	1	TaiESM1	4
M0031	1	M0007	1
M0103	1	M0008	1
M0123	1	M0123	1
M0146	1	M0180	1
M0180	1		
CansESM5	2		
M0008	1		
M0221	1		

Precipitación mm			
ACCESS-CM2	5	CAS-ESM2-0	2
M0002	1	M0031	1
M0008	1	M0103	1
M0123	1	CMCC-ESM2	3
M0146	1	M0007	1
M0180	1	M0103	1
ACCESS-ESM1-5	2	M0180	1
M0007	1	FGOALS-g3	4
M0146	1	M0004	1
BBC-CSM2-MR	3	M0031	1
M0002	1	M0103	1
M0004	1	M0221	1
M0146	1	TaiESM1	7
CAMS-CSM1-0	2	M0002	1
M0008	1	M0007	1
M0031	1	M0008	1
CanESM5	2	M0103	1
M0004	1	M0123	1
M0221	1	M0180	1
		M0221	1