



Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Física

PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO CON EL MODELO REGCM EN GUATEMALA

Laura Guissela Portillo Rosales

Asesorada por Dr. Enrique Pazos Avalos

Guatemala, febrero de 2025

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

**PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO CON
EL MODELO REGCM EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JEFATURA DEL
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POR

LAURA GUISELA PORTILLO ROSALES
ASESORADA POR DR. ENRIQUE PAZOS AVALOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN FÍSICA APLICADA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2025

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



CONSEJO DIRECTIVO INTERINO

Director	M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
Representante Docente	M.Sc. Ana Verónica Carrera Vela
Representante Docente	M.A. Pedro Peláez Reyes
Representante de Egresados	Lic. Urías Amitaí Guzmán García
Representante de Estudiantes	Elvis Enrique Ramírez Mérida
Representante de Estudiantes	Oscar Eduardo García Orantes
Secretario	M.Sc. Freddy Estuardo Rodríguez Quezada

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

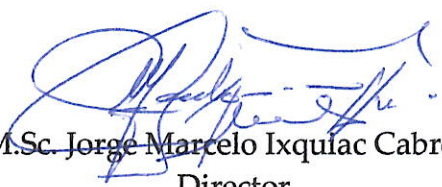
Director	M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
Examinador	PhD. Ana Beatriz Cosenza Muralles
Examinador	Dr. Angel Giovanni Ramírez García
Examinador	Dr. Juan Adolfo Ponciano Castellanos
Secretario	M.Sc. Freddy Estuardo Rodríguez Quezada

Ref. D.DTG. F001-2025
Guatemala 21 de febrero de 2025

El Director de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Coordinador de la Licenciatura en Física Aplicada, al trabajo de graduación titulado: "PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO CON EL MODELO REGCM EN GUATEMALA", presentado por la estudiante universitaria Laura Guissela Portillo Rosales, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
Director



AGRADECIMIENTOS

Primero, quiero agradecer a mi asesor Enrique Pazos, cuya paciencia fue un regalo en mis momentos de incertidumbre, por estar siempre dispuesto a responder cada pregunta, por orientarme con sabiduría y por brindarme la confianza de realizar este trabajo junto a él.

Segundo, gracias a INSIVUMEH, por abrirme las puertas de sus instalaciones y permitirme realizar esta investigación cuya importancia es de interés para este servicio meteorológico y para el país. Gracias por el apoyo y por darme las herramientas para poder crecer profesionalmente y descubrir nuevas perspectivas.

Gracias a las generaciones de mujeres luchadoras que han pavimentado el camino antes que yo. A mis abuelas y bisabuelas Ofelia, Tomy, Lizette y Miriam, cuyo amor y fortaleza me siguen guiando, a través de su ejemplo, en cada paso que doy. Su sabiduría y valentía son un legado que llevo dentro.

Gracias a aquellas partes de mi ser, que vienen de lejos, de generaciones pasadas, de aquellos que nunca conocí pero que viven en mí. A mis abuelos Carlos y Mario, que muy pocos conocieron, pero cuyas esencia siguen presentes en mi vida, dándome fuerza y raíces profundas.

Gracias a mis padres, Karen y Carlos, los mejores papás del mundo. Son mi faro, mi refugio, mi guía. Han sido mi ejemplo de amor incondicional y perseverancia, capaces de enfrentar todas las dificultades. Gracias por protegernos y darnos una visión de amor hacia nuestro exterior, por todo lo que me han dado, por su amor incansable, por enseñarme a nunca rendirme y a trascender.

A mis hermanos, Jr., Carlos, Lucía, Ofelia y Emma, quienes son parte de mi ser en una forma tan profunda y única. Somos uno mismo, más que cualquier otra unidad. Las relaciones que compartimos son las más puras y especiales, y en este camino de la vida, vamos juntos, siempre, con el mismo amor y apoyo.

A mis amigos reales, por su compañía, por su amor y por estar siempre ahí, haciendo que los momentos de alegría y de dificultad fueran más llevaderos. A cada uno de ustedes, gracias por ser parte fundamental de este proceso.

A los catedráticos de mi escuela, por ser fuentes de conocimiento, por enseñarme a mirar el mundo con una perspectiva más amplia y profunda. En especial, a María Eugenia, por su dedicación y por asesorar mis prácticas, brindándome su sabiduría y orientación.

Gracias de manera particular, a mí misma. Agradezco no haberme permitido rendirme, por dar lo mejor de mí en cada paso, por haber puesto todo mi ser y amor en este camino, por mantener la determinación y la pasión, aún cuando el cansancio y la duda intentaron frenarme. Estoy agradecida por la fuerza que he descubierto en mí.

Gracias a esta vida, por darme tantos portentos hermosos, por cada lección, por cada desafío que me ha permitido crecer. Gracias también por este regalo tan hermoso que es la física, una carrera que me ha maravillado, que ha expandido mi mente y que me ha mostrado un poco de la belleza infinita del universo.

Gracias a todos los que, de una u otra manera, han sido parte de este camino.

DEDICATORIA

A mis padres, por alentarme a seguir mis sueños en este mundo "despierto". A mis hermanos, por soñar conmigo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
1. OBJETIVOS	1
2. INTRODUCCIÓN	3
3. CAMBIO CLIMÁTICO	7
3.1. Clima cambiante	10
4. MODELOS CLIMÁTICOS	13
4.1. RegCM	15
4.1.1. Ecuaciones físicas	16
4.1.2. Modelos de superficie de la tierra	19
4.1.3. Parametrizaciones	21
5. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	25
5.1. RCP	25
5.2. SSP	27
6. METODOLOGÍA	29
6.1. Datos	29
6.2. Variables climáticas	30
7. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO	33
7.1. Instalación y Descarga de datos	33
7.2. Simulación	34
CONCLUSIONES	45

RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	55

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Temperatura global superficial reconstruida, simulada y observada. [10]	11
4.1. Modelos de circulación general. Tomado de Dr. David Viner, Climatic Research Unit [11]	14
4.2. Niveles de presión. [2]	17
5.1. Escenarios de cambio climático del AR5.[6]	26
5.2. a) cambio en temperatura b) cambio en precipitación, para el periodo 2081-2100, en referencia a 1986-2005.[6]	27
7.1. Precipitación - Kain-Fritsch vs Tiedtke - RCP85 vs SSP5	36
7.2. Temperatura media - Kain-Fritsch vs Tiedtke - RCP85 vs SSP5	38
7.3. Temperatura máxima - Kain-Fritsch vs Tiedtke - RCP85 vs SSP5	39
7.4. Temperatura mínima - Kain-Fritsch vs Tiedtke - RCP85 vs SSP5	40
7.5. Temperatura mínima - Kain-Fritsch SSP5 - región recortada	41
7.6. Promedio de área precipitación	41
7.7. Promedio de área temperatura media	42
7.8. Promedio de área temperatura máxima	42
7.9. Promedio de área temperatura mínima	43
7.10. Precipitación - Kain-Fritsch vs Tiedtke vs ENACTS - histórico	44

ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Cobertura del suelo/ Clases de vegetación	21
--	----

1. OBJETIVOS

General

Comparar proyecciones del clima para Guatemala en el intervalo de años 2050-2060, utilizando los escenarios RCP 8.5 y SSP5 y el modelo climático regional RegCM.

Específicos

1. Realizar simulaciones con los esquemas Tiedtke y Kain-Fritsch para el periodo 2000-2010.
2. Realizar simulaciones con los esquemas Tiedtke y Kain-Fritsch para el escenario RCP 8.5 en el intervalo 2050-2060.
3. Realizar simulaciones con los esquemas Tiedtke y Kain-Fritsch para el escenario SSP5 en el intervalo 2050-2060.
4. Comparar las variables de precipitación y temperatura anual de los experimentos anteriores.

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el cambio climático tiene un impacto sobre todas las personas, principalmente las más vulnerables. El riesgo a desastres está determinado por la naturaleza del evento natural extremo, la exposición y la vulnerabilidad. La exposición se refiere a la existencia de comunidades en los lugares donde se presenta el evento extremo y la vulnerabilidad se refiere a qué tanto se pueden ver afectadas por el evento y la resiliencia que se tenga.

Guatemala es un país cuya población es altamente vulnerable, más del 56 % de la población se encuentra en pobreza y más del 22 % se encuentra en pobreza extrema. Donde más del 75 % de la pobreza es en el área rural. Lo cual implica que gran parte de la población se encuentra en riesgo de sufrir efectos desfavorables causados por los eventos naturales extremos, tales como perder acceso al agua, la vivienda, familia, medios de vida, etc.

El aumento en la temperatura puede causar incendios, pérdida de cultivos, riesgos sanitarios, etc; el aumento en la precipitación puede causar inundaciones, deslaves, socavamientos, etc. Por lo tanto, los estudios de cambio climático constituyen una gran necesidad, tanto desde un punto de vista económico como político y social. [3]

Gracias a los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero proyectados a lo largo del siglo, se pueden realizar proyecciones de variables climáticas para obtener una visión de los posibles cambios en temperatura y precipitación a ocurrir en el país en los años 2050-2060. Dichos resultados son un punto importante de partida para concientizar a la población para que se tomen más medidas de mitigación al cambio climático.

Las proyecciones de cambio climático que se pretenden hacer con este proyecto

tienen un enfoque dinámico, es decir que se obtienen mediante la resolución de ecuaciones físicas que describen el comportamiento de los fenómenos meteorológicos. Este acercamiento promete obtener resultados que complementen a otras investigaciones con un enfoque estadístico. De esta manera se genera información que enriquece los estudios sobre el cambio climático en Guatemala.

El trabajo consiste en generar proyecciones de cambio climático para el intervalo de años 2050-2060, utilizando el modelo RegCM y los escenarios RCP 8.5 y SSP5 con dos esquemas de precipitación, el Tiedtke y el Kain-Fritsch.

En el siguiente informe, primero se describen los conceptos básicos para comprender el significado de los resultados, tales como sistema climático, informe de evaluación del IPCC, cambio climático, escenarios de cambio climático, esquemas de precipitación, proyecciones dinámicas, etc.

Los resultados obtenidos son un gran punto de partida para futuras investigaciones sobre cambio climático en Guatemala, ya que proporcionan una base para hacer proyecciones con un periodo más grande de años, utilizando otros modelos y variables.

Entre más investigaciones como estas surjan, se podrán ver claramente las tendencias en el cambio del clima al final del siglo para Guatemala. Ya que los modelos globales y regionales tienen ciertas limitaciones. Además existe una gran necesidad de proyecciones, ya que para tomar decisiones se deben considerar los posibles futuros en cuanto al sistema climático, para poder reducir impactos, mitigar efectos y adaptar a la sociedad.

La abundancia de proyecciones con distintos acercamientos permiten ver claramente el comportamiento general de determinadas variables como temperatura y precipitación para la región tropical, donde el clima resulta diferente a lo que la mayoría de modelos representan.

De los esquemas de precipitación que se utilizan en esta investigación, Tiedtke es mejor conocido por su abundante uso en las regiones tropicales, ha mostrado una buena representación de la precipitación en comparación a otros esquemas, Kain-Fritsch es un esquema experimental pero que involucra física a una escala más

pequeña y detallada.

Ambos esquemas representan en general de forma acertada el comportamiento de las variables en Guatemala. Es decir, la distribución geográfica de las variables coincide con los datos observados al igual que el comportamiento temporal a lo largo de todos los meses de cada año estudiado.

Sin embargo, se presenta el caso de sobre-estimación de precipitación. Esto puede deberse a la resolución de los datos de entrada. Qué tan acertados puedan llegar a ser los resultados depende de los datos de entrada, todo esto se discute más adelante en el trabajo.

3. CAMBIO CLIMÁTICO

El grupo de trabajo I (WGI) es el responsable de el sexto informe de evaluación (AR6) como contribución al Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Este informe proporciona un resumen de descubrimientos basados en distintas líneas de investigación y evidencias reales, como observaciones, modelos, información paleoclimática y procesos químicos y biológicos dentro del sistema climático.

El reporte AR6 WGI proporciona una evaluación completa y comprensiva de la ciencia física fundamental sobre cambio climático, construida en base al anterior reporte (AR5) y los reportes especiales para facilitar la integración de múltiples líneas de evidencia. Como consecuencia, aumenta la fiabilidad de los descubrimientos. [10]

El primer conjunto de capítulos está dedicado al conocimiento a gran escala del clima, abarcando las observaciones y evidencia paleoclimática, causas de cambios observados y proyecciones. El segundo conjunto de capítulos está compuesto por los componentes principales del sistema climático, como los ciclos del carbono, agua y energía, océano, criósfera y cambios en el nivel del mar. Los últimos capítulos están dedicados a la evaluación de la información climática regional de múltiples líneas de investigación, con especial énfasis en cambios de proyecciones regionales de clima promedio, eventos extremos e impulsores de impacto en el clima.

A continuación se muestra un listado de los conceptos principales a lo largo del AR6.[10]

- Características de la evaluación del cambio climático:
 - Calentamiento global: es el cambio en la superficie de la tierra relativo a una línea base como referencia, ésta dependerá de los objetivos de la investigación. Por ejemplo, el calentamiento global de $2^{\circ}C$ toma como

referencia el periodo de años del 1850-1900, que es el periodo de años más antiguo con suficiente cobertura geográfica.

- Emergencia: es cuando se presentan nuevas condiciones de una variable climática específica dentro de una región, usualmente se expresa como la razón entre el cambio de la variable climática y la amplitud de las variaciones naturales de esa misma variable.
 - Emisiones de dióxido de carbono (CO_2) acumulativo: es la cantidad total de CO_2 emitido a la atmósfera debido a las actividades humanas. Esta medida es importante ya que existe una correlación casi lineal de ésta con el incremento de la temperatura superficial global. También son de importancia para hacer estudios de cómo las emisiones de gases han afectado y podrían afectar. De esta manera se calcula la cantidad neta de CO_2 que puede ser emitido en el futuro sin superar cierto nivel específico de calentamiento como lo es el 1.5°C que se desean llegar como aumento máximo global de temperatura superficial media a finales del siglo.
 - Cero emisiones netas de CO_2 : esto sucede cuando la cantidad de CO_2 emitido a la atmósfera por la actividad humana es igual a la cantidad de CO_2 removido de la atmósfera por un periodo específico de tiempo, por lo que las emisiones netas negativas se refiere a cuando la eliminación de emisiones de CO_2 es mayor a las emisiones antropogénicas.
- Influencia humana en el sistema climático:
 - Desequilibrio en la energía de la tierra: cuando hay un clima estable, la cantidad de energía que la tierra absorbe del sol es aproximadamente la misma que la energía perdida en el espacio que la tierra emitió al reflejar la luz solar y la radiación térmica. Los gases de efecto invernadero y los aerosoles interfieren con este balance, provocando que el sistema gane o pierda energía, a éstos se les llama “factores climáticos”. La fuerza de los factores climáticos se cuantifica a través de el forzamiento radiativo efectivo (ERF), de tal forma que ERF positivo indica calentamiento y el negativo indica enfriamiento.
 - Atribución: es el proceso de evaluar las contribuciones relativas de múltiples factores en los cambios observados en las variables climáticas, tales como temperatura superficial global o nivel global promedio del mar, ocurrencia de climas extremos u otros eventos climáticos. Dentro de los

factores atribuidos se incluye la actividad humana como el aumento de los gases de efecto invernadero y aerosoles, uso de la tierra, etc. Y también están los factores naturales externos como cambios en la radiación solar, erupciones volcánicas, variabilidad interna, entre otros.

- Cambio comprometido, compromiso a largo plazo: los cambios en el sistema climático resultado de actividades pasadas, presentes y futuras continuarán en el futuro lejano, incluso con una fuerte reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Hay aspectos del sistema climático que responden más despacio a la emisión de gases de efecto invernadero que los cambios en la temperatura de la superficie de la tierra, tales como biósfera terrestre, profundidad del océano y la criósfera. Como consecuencia, ya existen cambios sustanciales comprometidos asociados con emisiones de gases de efecto invernadero en el pasado. Por ejemplo, el nivel medio global del mar continuará aumentando por miles de años, incluso si se reducen a cero neto las futuras emisiones de gases de efecto invernadero y se detuviera el calentamiento global, debido al exceso de energía que permanece y continúa a propagarse en lo profundo del océano y los glaciares y coberturas de hielo continúan derritiéndose.[10]
- Información climática para cambio climático regional y evaluación de riesgo:
 - Destilación: proceso de sintetización de información sobre cambio climático desde muchas líneas de evidencia obtenida de una variada fuente de información, tomando en cuenta el contexto del usuario. Esto produce un aumento en la utilidad, usabilidad y relevancia de la información climática, mejorando la confianza en las partes interesadas al expandir las bases de la evidencia utilizada por los servicios climáticos. Tiene especial relevancia en el contexto de co-producción de información climática a escala regional para apoyar la toma de decisiones.
 - Riesgo en el cambio climático: el concepto de riesgo es un aspecto clave en como el ICC evalúa y comunica a los tomadores de decisiones sobre los potenciales consecuencias debidas al cambio climático que puedan afectar a las comunidades y ecosistemas al reconocer la importancia asociada a estos sistemas. Cuando se habla de cambio climático el riesgo puede surgir de los efectos del cambio climático como tal y de la respuesta de la sociedad a estos cambios, dentro de los resultados se podrán encontrar

situaciones de alto riesgo y otras con un impacto menor en los individuos involucrados.

- Impulsores de impacto climático: son las condiciones físicas dentro del sistema climático que pueden impactar directamente sistemas humanos o ecológicos sin poder anticipar si serán perjudiciales o beneficiosos.
- Líneas históricas: este término es utilizado de diferentes formas, una es en trayectorias de emisiones o desarrollos socio-económicos y para describir las distintas posibles trayectorias del clima y condiciones climáticas, en especial cuando se refiere a zonas de interés debido a su altos niveles de riesgo. Líneas históricas físicas se introducen en el AR6 para explorar la incertidumbre en el cambio climático y la variabilidad climática natural para desarrollar y comunicar información climática regional integrada y enfocada en la región de relevancia.
- Baja probabilidad, resultados de alto impacto: aquellos eventos cuya probabilidad de ocurrencia se desconoce, pero cuyos potenciales impactos pueden ser altos en la sociedad y en los ecosistemas. Para la toma de decisiones estos eventos deben ser tomados en consideración por sus grandes consecuencias, a pesar de que no represente el escenario más probable.

3.1. Clima cambiante

El reporte AR6 se hace en el contexto de un sistema climático que está cambiando rápidamente debido a la influencia humana. Existen 5 evaluaciones del IPP desde 1990 y han ido acumulando información consistente del sistema climático. Siendo el cuarto informe el primero en afirmar que el calentamiento del sistema climático es inequívoco. [10]

Cambios sostenidos se han documentado en todos los principales elementos del sistema climático tales como atmósfera, suelo, criósfera, biósfera y océano. Estos cambios son sin precedentes dentro de un contexto a escala multimilenaria, como consecuencia, se presentan la continua pérdida de hielo en todo el mundo, el aumento de contenido de calor en los océanos, aumento del nivel del mar y acidificación en las profundidades del océano.

Las reconstrucciones climáticas del pasado por medio de diferentes metodo-

logías han demostrado que la temperatura superficial global y las concentraciones de CO_2 en la atmósfera están fuertemente acopladas. Los niveles de calentamiento global que no se han visto en millones de años podrían ser alcanzados para el año 2,300, dependiendo de la trayectoria de emisiones que se siga.

Si se considera un escenario intermedio, para ese año se alcanzarían temperaturas similares al calentamiento del Plioceno medio, hace aproximadamente 3.2 millones de años, donde la temperatura global superficial se encontraba entre 2.5°C a 4°C . Si se toma el escenario de emisiones SSP5-8.5 se alcanzarían temperaturas de 6.6°C a 14.1°C para el año 2,300, que se asimila con el clima del Eoceno temprano, hace más de 50 millones de años.

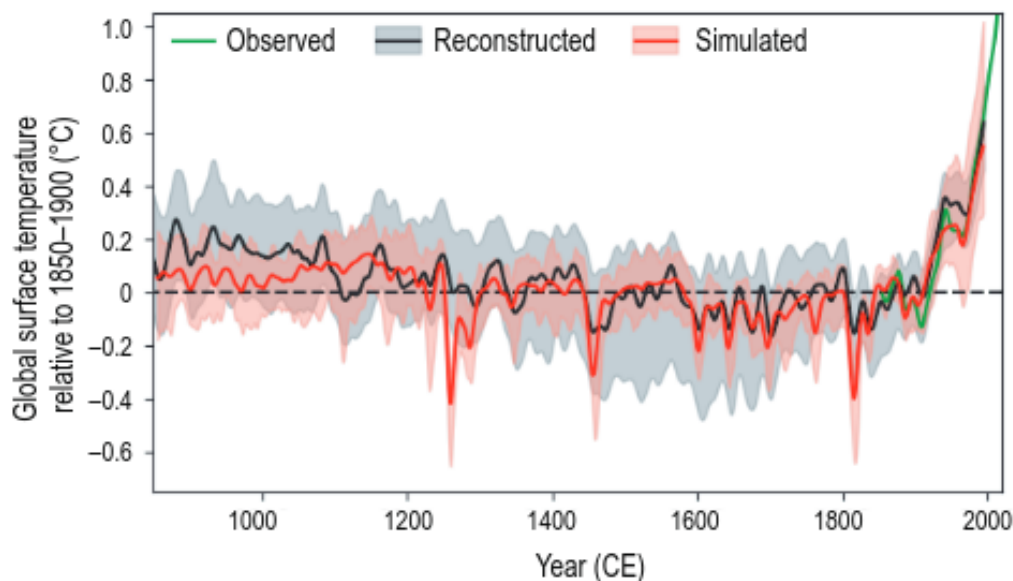


Figura 3.1. Temperatura global superficial reconstruida, simulada y observada. [10]

En la figura 3.1 se puede observar la temperatura global superficial relativa al periodo de tiempo 1850-1900. Los valores de la gráfica se encuentran desde antes del año 1,000 ya que son datos reconstruidos (gris) por distintas metodologías y también datos simulados (rojo). Los datos observados en color verde muestran un rápido aumento desde una sociedad basada en combustibles fósiles.

4. MODELOS CLIMÁTICOS

Los modelos globales, son algoritmos matemáticos que buscan simular las relaciones complejas del clima. Se conocen como modelos generales de circulación (GCM por sus siglas en inglés). Dentro de un modelo se representan los procesos físicos, químicos y biológicos que afectan al sistema climático. Se utilizan para el estudio de la dinámica del sistema climático para hacer proyecciones a futuro.

Las simulaciones con modelos climáticos coordinados y recolectados como parte del programa de investigación mundial sobre clima llamado proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 6 (CMIP6 por sus siglas en inglés), complementadas por un gran rango de resultados de la fase anterior (CMIP5) constituyen una línea clave de evidencia dentro de los estudios sobre cambio climático. [10]

Los modelos de circulación general son modelos numéricos que representan los procesos dentro de la atmósfera, océano, criósfera y superficie del suelo. Actualmente son las herramientas más avanzadas para simular la respuesta del sistema climático global al aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero. [11]

Únicamente los modelos globales junto con modelos regionales anidados pueden tener el potencial de generar aproximados físicos y geográficos consistentes con el cambio climático regional, lo cual es necesario para hacer el análisis de impacto.

Los GCMs describen el clima utilizando una rejilla de 3 dimensiones sobre todo el globo como se muestra en la figura 4.1, la resolución horizontal (250km - 600km) y capas verticales dependerán de cada modelo. Algunos pueden estar conformados por hasta 30 capas en el océano. La resolución de estos modelos es bastante grande en comparación a las zonas de evaluación.

Por otro lado, gran parte de los procesos físicos como aquellos relacionados a la formación de nubes ocurren a escalas más pequeñas y no pueden ser modeladas

adecuadamente. Por lo que sus propiedades deben ser promediadas dentro de la escala grande a través de parametrizaciones.

Esto produce cierto nivel de incertidumbre en las simulaciones de clima futuro utilizando modelos globales, también se puede extraer información de otros mecanismos tales como vapor de agua y calentamiento, nubes y radiación, circulación del océano y albedo de hielo y nieve. Es por esto que estos modelos pueden producir distintas respuestas a las mismas condiciones iniciales, por la forma en que ciertos procesos están modelados.

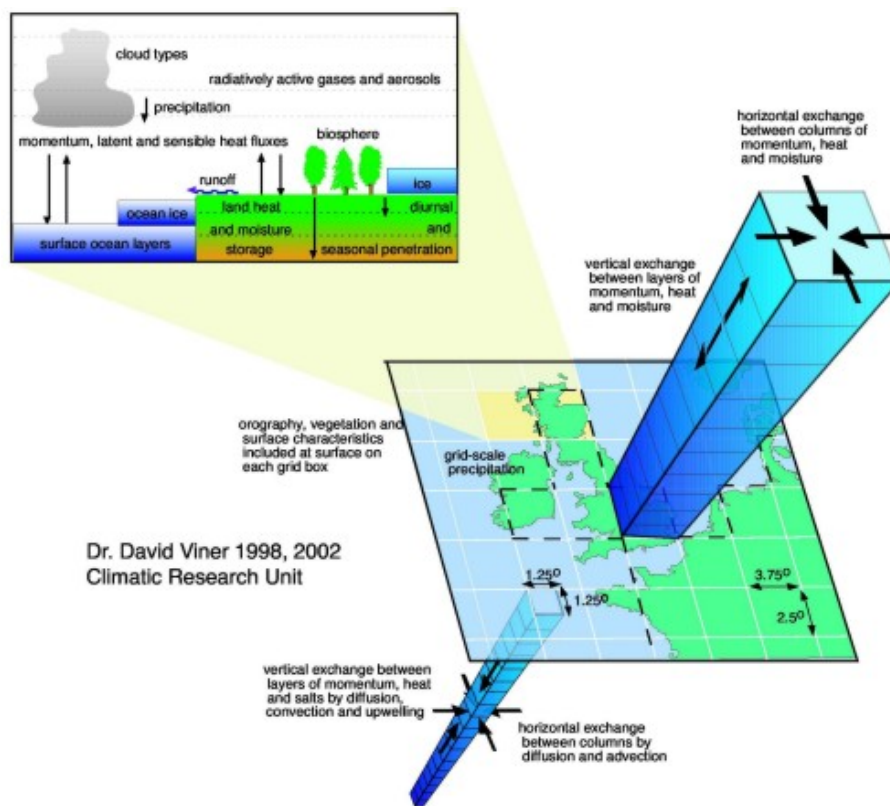


Figura 4.1. Modelos de circulación general. Tomado de Dr. David Viner, Climatic Research Unit [11]

Los modelos globales no toman en cuenta la futura composición de la atmósfera, esto quiere decir que no está garantizado que se obtenga una representación exacta del clima futuro, ni siquiera luego de seleccionar todos los modelos.

En la figura 4.1 se presenta un diagrama de todos los aspectos que se toman en cuenta dentro de los modelos climáticos, tales como el intercambio horizontal y vertical entre columnas de momentum, calor y humedad; intercambio vertical y ho-

horizontal entre capas de momentum, calor, sales por difusión, convección y advección; orografía, vegetación, características de suelo en cada punto de la rejilla.

También contiene información sobre tipos de nubes, precipitación, flujos de calor, momentum, hielo del océano, capas superficiales del océano, calor y almacenamiento de humedad en el suelo, biósfera, hielo, penetración diurna y estacional, gases radiativamente activos y aerosoles. [11]

El clima en los trópicos, y en especial en una zona tan diversa y montañosa como Guatemala, es muy complejo. Por lo que los modelos globales no abarcan la totalidad de las componentes del sistema climático a una escala más fina. Para esto se utilizan los modelos regionales como RegCM, empleados para capturar detalles a una escala más fina a partir de los modelos globales.

4.1. RegCM

El Modelo Regional Climático (RegCM) es un modelo comunitario diseñado para ser utilizado por un gran rango de comunidades. Es público, de código abierto, amigable con el usuario y de código portátil que se puede aplicar a cualquier región del planeta. Es sostenido por una red de científicos coordinados por la sección de física de sistemas de la tierra del Centro Internacional de Física Teórica Abdus Salam (ICTP).

Fue desarrollado a través de los años con la guía de Filippo Giorgi. Históricamente es el primer modelo desarrollado para simulaciones regionales del clima a largo plazo. Ha participado en un gran número de proyectos de inter-comparación de modelos regionales y se utiliza por una amplia comunidad, desde estudio de procesos hasta paleo-clima y proyecciones regionales completas.

El sistema de modelaje RegCM tiene 4 componentes: Terrain, ICBC, RegCM y postprocesador. Terrain e ICBC forman parte del preprocesador del modelo. Las variables terrestres tales como elevación o temperatura superficial del mar y los datos meteorológicos de 3 dimensiones, son horizontalmente interpolados desde una grilla de longitud-latitud a un dominio de mayor resolución. También se llevan a cabo interpolaciones verticales.

La primera parte para ejecutar cualquier simulación es la descarga de los datos

estáticos para localizar en dominio, el programa Terrain es el encargado de este paso. Posterior es la descarga de conjunto de datos de modelo global y de atmósfera ya que serán el punto de partida para que el componente ICBC determine las condiciones iniciales y de frontera para simular un área local.

La información necesaria para localizar el dominio de interés son topografía, tipo de suelo y de manera opcional profundidad de lago para el modelo de lagos y clasificación de textura de suelo para el modelo que permite la simulación del polvo en zonas desérticas. El modelo también necesita alimentarse de datos globales sobre temperatura superficial del mar SST. [1]

El modelo tiene 3 núcleos dinámicos: solucionador de ecuación hidrostática, solucionador de ecuación no-hidrostática con coordenada de presión y el solucionador de ecuación no-hidrostática con coordenada de altura. Las ecuaciones primitivas para los tres solucionadores son distintas y tienen diferentes variables de pronóstico utilizadas para identificar el estado atmosférico. [2]

Dentro del modelo hay componentes de formulación matemática conocidos como esquemas de precipitación, éstos se caracterizan por los parámetros que rigen su funcionamiento y dependen de la topografía del terreno y la resolución numérica.

4.1.1. Ecuaciones físicas

El modelo RegCM resuelve un conjunto de ecuaciones dinámicas que describen el movimiento atmosférico. Al igual que los modelos que se descargan para la ejecución del programa, todos se basan en la resolución de ecuaciones físicas y su relación con el sistema de la tierra, esto quiere decir la topografía, tipo de suelo (desierto, hielo, vegetación, tundra, pradera, ciudad, etc), niveles de la atmósfera, profundidad de los cuerpos de agua, entre otros.

Los modelos que forman parte de CMIP son desarrollados por varios grupos de personas por parte de universidades y servicios meteorológicos, en su mayoría de Europa y norte de América, para describir el comportamiento de las variables actualmente y de forma proyectada.

El solucionador hidrostático utiliza la coordenada sin dimensión σ para definir los niveles del modelo, en la figura 4.2 se muestra la representación esquemática de la estructura de la presión del modelo para KZ capas verticales. T , P y Q son las variables físicas definidas como temperatura, transferencia de calor y presión respectivamente. σ se define como,

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \quad (4.1)$$

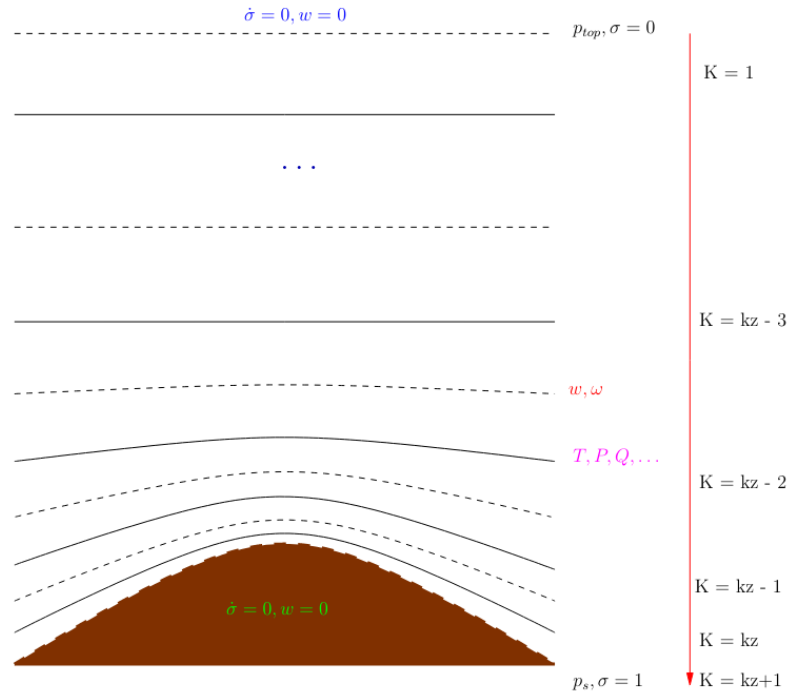


Figura 4.2. Niveles de presión. [2]

Donde p es la presión, p_t es la constante de presión en la cima (nivel superior) y p_s es la presión en la superficie. El modelo resuelve múltiples conjuntos de ecuaciones, además de las posibles parametrizaciones. Para el núcleo dinámico hidrostático se resuelven las ecuaciones de momentum horizontal, las ecuaciones de continuidad para el cálculo de presión en la superficie, la ecuación de la termodinámica, entre otras.

Dentro del modelo hidrostático se encuentran las **ecuaciones de momentum horizontal**,

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* u}{\partial t} = & -m^2 \left[\frac{\partial p^* uu/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vu/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* u \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \\ & - mp^* \left[\frac{\sigma}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + p^* f v + F_H u + F_V u \quad (4.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* v}{\partial t} = & -m^2 \left[\frac{\partial p^* uv/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vv/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* v \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \\ & - mp^* \left[\frac{\sigma}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + p^* f u + F_H v + F_V v \quad (4.3) \end{aligned}$$

Donde u y v son los componentes norte y este de la velocidad, ϕ es la altura geopotencial, f es el parámetro de coriolis, m es el factor de escala del mapa para la proyección que se elija, F_H y F_V representan los efectos de la difusión vertical y horizontal y $p^* = p_s - p_t$ es la diferencial entre la presión de superficie y la de la cima en el modelo. [1]

$\dot{\sigma}$ es la derivada total de la coordenada vertical σ sobre el tiempo t :

$$\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} \quad (4.4)$$

Dada la temperatura virtual T_v ,

$$T_v = T(1 + 0.608Q_v) \quad (4.5)$$

Entonces,

$$\frac{\sigma}{\rho} = \frac{RT_v}{(p^* + p_t/\sigma)} \quad (4.6)$$

La presión en la superficie se calcula mediante la **ecuación de continuidad**:

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial p^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \quad (4.7)$$

La integral vertical de esta ecuación se utiliza para calcular la variación temporal de la presión en la superficie dentro del modelo.

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} = -m^2 \int_0^1 \left[\frac{\partial p^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v/m}{\partial y} \right] d\sigma \quad (4.8)$$

La tendencia de la presión en la superficie de la ecuación 4.8 se utiliza con la integral vertical de la ecuación 4.7 para calcular la velocidad vertical en coordenadas de sigma ($\dot{\sigma}$) para cada nivel dentro del modelo:

$$\dot{\sigma} = -\frac{1}{p^*} \int_0^\sigma \left[\frac{\partial p^*}{\partial t} + m^2 \left(\frac{\partial p^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v/m}{\partial y} \right) \right] d\sigma' \quad (4.9)$$

Donde σ' es una variable ficticia de integración y $\dot{\sigma}(\sigma = 0) = 0$, $\dot{\sigma}(\sigma = 1) = 0$.

También se resuelve la **ecuación de la termodinámica**, definida como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* T}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial p^* u T/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v T/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* T \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + \\ \frac{RT_v \omega}{c_p(\sigma + p_t/p_*)} + \frac{p^* Q}{c_p} + F_H T + F_V T \end{aligned} \quad (4.10)$$

Donde dado la capacidad calorífica del aire seco c_{pd} y el radio de mezcla de vapor de agua q_v :

$$c_p = c_{pd}(1 + 0.8q_v) \quad (4.11)$$

Donde c_p es el calor específico del aire húmedo a presión constante, Q es el calentamiento adiabático, $F_H T$ representa el efecto de mezcla vertical y ajuste seco convectivo. ω es,

$$\omega = \frac{dp}{dt} = p^* \dot{\sigma} + \sigma \frac{dp^*}{dt} \quad (4.12)$$

donde,

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{\partial p^*}{\partial t} + m \left[u \frac{\partial p^*}{\partial x} + v \frac{\partial p^*}{\partial y} \right] \quad (4.13)$$

También se resuelve la **ecuación hidrostática**, la cual se utiliza para calcular las alturas con geopotencial a partir de la temperatura virtual T_v ,

$$\frac{\partial \phi}{\partial \ln(\sigma + p_t/p^*)} = -RT_v \left[1 + \frac{\Sigma q_x}{1 + q_v} \right]^{-1} \quad (4.14)$$

4.1.2. Modelos de superficie de la tierra

Es un paquete de superficie diseñado para describir el papel de la vegetación y la humedad interactiva del suelo en la modificación del intercambio de momentum, energía y calor de agua entre la atmósfera y la superficie. El modelo tiene una capa

de vegetación, capa de nieve, capa de suelo (tierra), 10 cm de grosor o zona de raíz, 1-2 m de grosor y una capa de suelo profunda de 3 metros de grosor.

Se resuelven ecuaciones para las temperaturas del suelo utilizando un método de generalización de la fuerza restaurada. La temperatura del follaje se calcula diagnósticamente a través de la formulación de energía de balance, incluyendo flujos de calor latentes, radiativos y sensibles.

Los cálculos sobre la hidrología del suelo incluyen ecuaciones predictivas para el contenido de agua en las capas del suelo. Estas ecuaciones incluyen precipitación, derretimiento de la nieve, follaje, evapotranspiración, escorrentía superficial, infiltración bajo la zona de raíces e intercambio difuso de agua entre las capas del suelo.

La formulación del movimiento del agua se obtiene de un ajuste a los resultados a un modelo de alta resolución del suelo. Y la escorrentía superficial se expresan como funciones de precipitación y del grado de saturación de agua en el suelo. La precipitación se asume que toma la forma de nieve si la temperatura pasa determinado umbral.[1]

El calor sensible, vapor de agua y flujos de momentum se calculan utilizando la formulación estándar de coeficiente de arrastre basado en la teoría de similaridad de capas de la superficie. El coeficiente de arrastre depende de la dureza de la superficie y la estabilidad atmosférica en la capa de la superficie.

La razón de evapotranspiración superficial dependen de la disponibilidad de agua en el suelo, el paquete del modelo “esquema de transferencia biósfera-atmósfera” (BATS por sus sigas en inglés) tiene 20 tipos de vegetación como se muestra en la siguiente tabla:

1	Cultivo/ agricultura mixta
2	Gramma corta
3	Árbol de hoja perenne y acicular
4	Árbol de hoja caduca y acicular
5	Árbol de hoja caduca y ancha
6	Árbol de hoja perenne y ancha
7	Gramma alta
8	Desierto
9	Tundra
10	Cultivo de regadío
11	Semi árido
12	Capa de hielo/ Glaciar
13	Pantano o ciénaga
14	Aguas en el suelo
15	Océano
16	arbusto perenne
17	arbusto caduco
18	Bosque mixto
19	Mosaico de campo o bosque
20	Mezcla de agua y suelo

Tabla 4.1. Cobertura del suelo/ Clases de vegetación

4.1.3. Parametrizaciones

Dentro del modelo también se resuelven parametrizaciones de procesos físicos como:

- Radiación (longitud de onda corta y larga).
- Convección (Algunas nubes se forman por convección).
- Difusión turbulenta.
- Humedad (Nubes y lluvia).
- Flujo de cambio con la superficie (modelo de suelo y flujos de océano).
- Transporte de traza y química (aerosoles).

En la simulación de este proyecto se utilizan el esquema de Tiedtke y de Kain-Fritsch, los cuales son muy importantes en los modelos regionales ya que simulan los procesos de convección (transferencia del calor por medio del movimiento del fluido, en este caso el aire) y precipitación. La lluvia se puede dar en un ambiente con convección pero también hay nubes no convectivas.

El esquema de **Tiedtke** es ampliamente utilizado al simular regiones tropicales [8]:

- La física involucrada:
 - Emplea una representación de convección profunda mediante un flujo de masa, el cual toma en cuenta al transporte vertical de temperatura y humedad.
 - Incluye el efecto de arrastre y frenado del aire, el arrastre se refiere a la mezcla del aire en el ambiente con las parcelas de aire ascendente. El frenado se refiere a el proceso donde el aire abandona la parcela ascendente. Estos procesos son indispensables al momento de simular la formación de nubes y precipitación.
 - El esquema hace una suposición basada en el equilibrio de la flotabilidad, donde la corriente ascendente está determinada por la flotabilidad del aire ascendente comparado con el ambiente al rededor.
- Principales características:
 - Representa de forma efectiva corrientes convectivas fuertes, las cuales son características de las regiones tropicales y subtropicales como lo es Guatemala.
 - Este esquema toma en cuenta la distribución de humedad dentro de la atmósfera, lo cual contribuye a que cree patrones de precipitación realistas.
 - Parametriza la formación de las nubes y demás procesos asociados, por lo que aporta a los patrones de clima dentro de la escala global y local.

El esquema de Kain-Fritsch es más reciente, ingresa de manera experimental al modelo [9]:

- Física involucrada:

- Este esquema incorpora procesos micro-físicos detallados como la formación de gotas y precipitación.
- Hace la distinción entre corriente ascendente y descendente, proporcionando una mejor representación de los procesos de convección.
- También incluye efectos de arrastre pero hace énfasis en la interacción entre el aire del ambiente y las nubes.
- Principales características:
 - Hace un ajuste de la escala de tiempo para procesos convectivos basado en condiciones ambientales, lo que proporciona una simulación más flexible y realista.
 - Toma en cuenta información resultante de la convección y el ambiente termodinámico circundante, aportando a el perfil de humedad y temperatura.
 - Tiende a producir distribuciones de precipitación más realistas, sobre todo en ambientes convectivos.

Ambos esquemas aumentan la habilidad del modelo RegCM para simular convección y precipitación, se diferencian en la forma en la cual abordar los procesos físicos involucrados. El esquema de Tiedtke es robusto en regiones tropicales y el de Kain-Fritsch se destaca por sus detallados procesos micro-físicos y su adaptabilidad.

5. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Debido a la importancia de los efectos del cambio climático, diversas instituciones al rededor del mundo como universidades y servicios meteorológicos, han desarrollado proyecciones globales del clima. Para que éstas puedan ser comparables, deben cumplir ciertos estándares determinados por los informes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés).

Los modelos están desarrollados en los proyectos de comparación de modelos acoplados (CMIP por sus siglas en inglés), dichos modelos hacen simulaciones de los escenarios de cambio climático.

El IPCC ha realizado 2 informes destacables, el quinto informe de evaluación (AR5 por sus siglas en inglés) y el sexto informe de evaluación AR6. En el AR5 se definen los escenarios de trayectorias de concentración representativa (RCP por sus siglas en inglés). [6]

5.1. RCP

Las trayectorias de concentración representativa son proyecciones de las trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero (GEI). Cada trayectoria describe escenarios de concentración de GEI en partes por millón hasta el año 2100.

Existen diversos escenarios que toman en cuenta distintos factores, para el RCP 8.5 las emisiones continúan aumentando durante todo el siglo, las políticas públicas y la comunidad no habría tenido éxito de mitigar las emisiones. A diferencia de otros escenarios que alcanzan su punto máximo en un año y luego disminuyen. [6]

Los RCP se definen en base a las ecuaciones físicas, químicas y biológicas de los ecosistemas con interacciones de geografía. Además de distintas investigaciones socio-económicas, tecnológicas y ambientales.

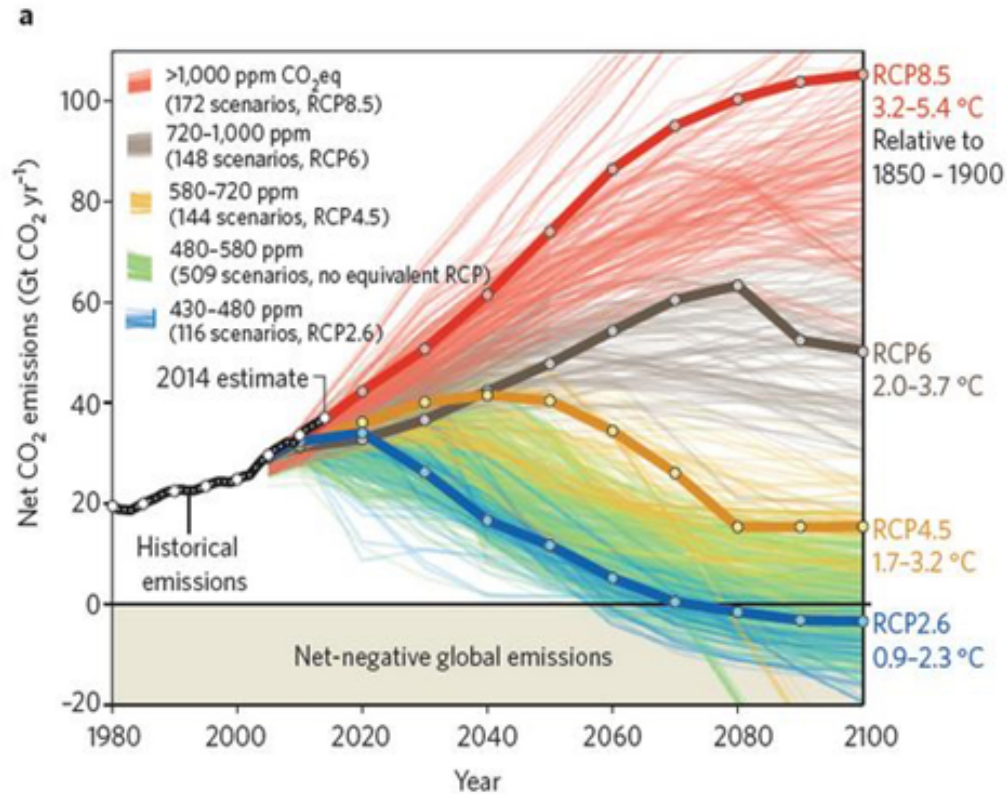


Figura 5.1. Escenarios de cambio climático del AR5.[6]

En la figura 5.1 se pueden observar las distintas trayectorias, siendo la RCP8.5 la más pesimista y la RCP2.6 la más optimista. La línea negra representa la concentración de emisiones histórica hasta el 2014. Las trayectorias donde se presentan grandes concentraciones de GEI se basan en la abundancia del combustible fósil.

El RCP 8.5 supone un gran aumento en combustibles fósiles produciendo un incremento superior a los 5.4 °C de temperatura media global en el año 2100. Sin embargo, en todos los escenarios se prevé que la temperatura media anual aumente de 0.9 a 2.3 °C a finales del siglo. [5]

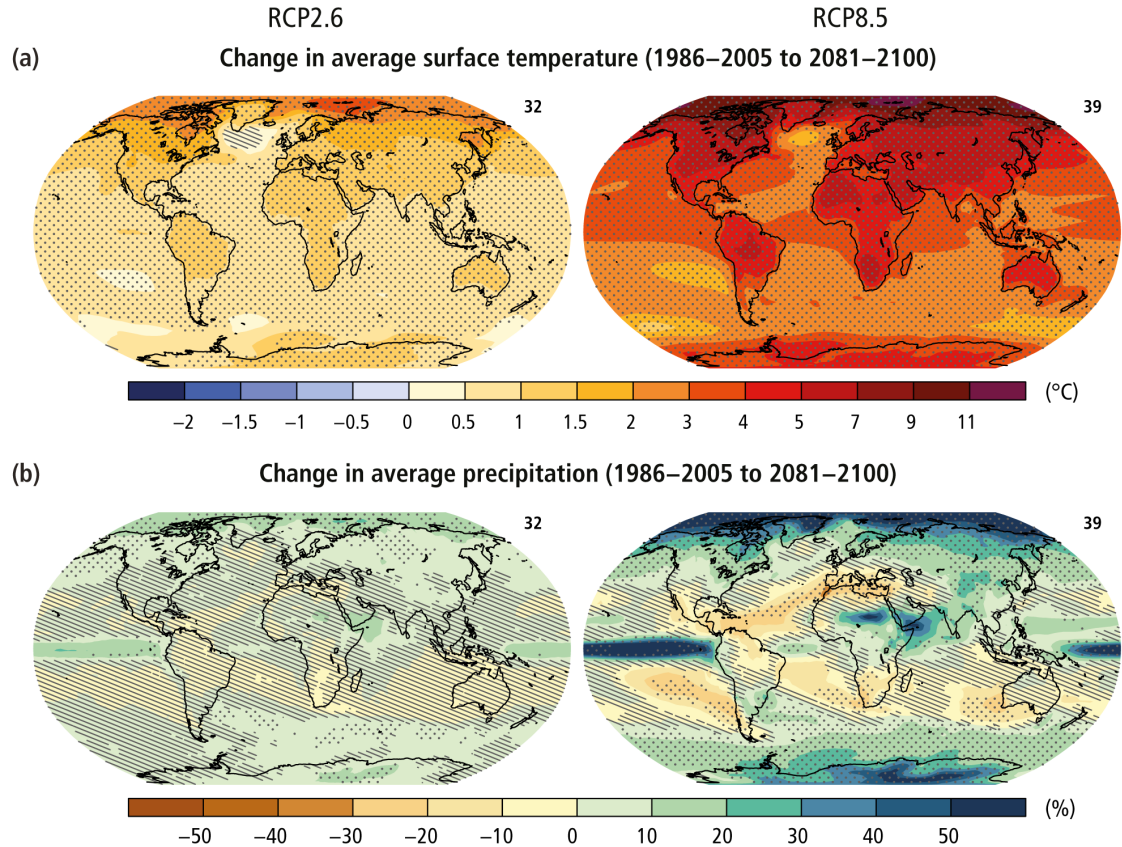


Figura 5.2. a) cambio en temperatura b) cambio en precipitación, para el periodo 2081-2100, en referencia a 1986-2005.[6]

En la figura 5.2 se presenta el cambio en promedio de temperatura superficial y precipitación para el escenario de emisiones más optimista (RCP2.6) y el menos optimista RCP8.5. Los periodos a comparar son las climatologías 1986-2005 y 2081-2100, que son el promedio de 30 años para cada variable. [6]

5.2. SSP

Los escenarios desarrollados en el sexto informe del IPCC (AR6) se conocen como las trayectorias socio-económicas compartidas (SSP, por sus siglas en inglés) son escenarios de cambios socio-económicos proyectados hasta el 2100. De ellos se derivan escenarios de emisiones de GEI.

El SSP5 es el desarrollo impulsado por combustibles fósiles, con bajo crecimiento en la población, un elevado crecimiento económico y un alto desarrollo humano.

Es de los 5 escenarios, el más pesimista. El más optimista es el SSP1, llamado sustentabilidad, con bajo crecimiento de la población, alto crecimiento económico, altos niveles de educación, una sociedad globalizada, cooperaciones internacionales, etc.
[4]

6. METODOLOGÍA

El trabajo consiste en realizar distintas simulaciones empleando el modelo RegCM, para el periodo de años 2050-2060, utilizando los escenarios RCP 8.5 y SSP5 y los esquemas de precipitación de Tiedtke y Kain-Fritsch. Dentro del dominio de Guatemala, con una resolución de 20 kilómetros. Para ello, primero se realizaron varios experimentos para un año.

Luego, a partir de ese ajuste se simula la proyección de 10 años y se calculan promedios, por último se debe hacer más grande el dominio espacial debido a la zona de frontera que se descarta porque las soluciones allí son imprecisas. Los parámetros a modificar son los de esquema de precipitación, resolución y distribución espacial, escenarios de cambio climático, tiempo, etc.

Las simulaciones se realizaron en una computadora del fabricante Dell Inc., modelo Precision 3650 Tower, 2TB de disco duro, 60 GB de RAM, procesador Intel Core i9-10900, velocidad 2.80GHz, 20 núcleos y sistema operativo Debian 11.

Para simular los distintos escenarios hay parámetros que se deben modificar, dentro de el archivo de parámetros se especifica también el modelo correspondiente a CMIP5 o a CMIP6, según el grupo de modelos los parámetros a cambiar serán diferentes.

6.1. Datos

- Para los datos históricos que requiere el modelo se utiliza ERA-INTERIM (EIN15), de los años 2000 al 2010, tomados del servidor del ICTP. Este conjunto de datos se actualiza a tiempo real, donde se describe el clima, olas de océano y condiciones en la superficie. Incluye parámetros que cubren la tropósfera y la estratósfera, ofreciendo un rango de 60 niveles de presión. Este

proyecto finalizó en el 2019, cuenta con una resolución de 83 km.

- Se utiliza el modelo HadGEM2-ES que forma parte del conjunto de modelos CMIP5, dentro de este se encuentra el escenario RCP 8.5, del cual se descargan cada una de las variables hus, ps, ta, ua y va a 6hrLev con la variante r1i1p1 para el periodo de tiempo 2050-2060. Este modelo es la segunda generación de modelos HadGEM, incorporando componentes de sistema terrestre como el de la estratósfera, configuración acoplada de atmósfera y océano, vegetación dinámica, biología del océano y química atmosférica. Con resolución máxima de 200km en el ecuador y alcanzando el mínimo de 120 km a los 55 grados de latitud.
- Además de los escenarios, también se deben descargar archivos de Sea Surface Temperature (SST), pertenecientes al modelo HadGEM2-ES, para que se puedan hacer las proyecciones a futuro y se lean al ejecutar el programa de sst. El programa ICBC también necesita archivos históricos del modelo HadGEM2-ES.
- Del conjunto de modelos de CMIP6 se utilizó MPI-ESM1-2-HR, estos datos se descargaron de los nodos de Earth System Grid Federation (ESGF). Se descargan las mismas variables que para el modelo de CMIP5 con las mismas características y mismo periodo de tiempo. Es la última versión del sistema de modelos del Instituto de Max Planck. Esta versión tiene una resolución más fina (~ 100 km), en comparación a los precursores proporcionados por el CMIP5 y presenta un incremento en la resolución vertical y mejor representación de la orografía. [7]
- Además, dentro de la carpeta de CMIP6 debe estar la carpeta GHG que incluye las proporciones en moles de dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno, etc., en el aire.
- Para comparar con observaciones reales (instrumental) de Guatemala se utiliza el set de datos ENACTS, generado por INSIVUMEH para los años 2000-2010. Es una interpolación de datos reales con datos de reanálisis, con una resolución de 25 km.

6.2. Variables climáticas

La simulación se hará sobre las siguientes variables:

- Temperatura media
- Temperatura máxima
- Temperatura mínima
- Acumulado de precipitación diario

El modelo crea un archivo de salida de precipitación y temperatura cada 3 horas, por lo que de aquí se deben hacer los cálculos de temperatura media, mínima, máxima diaria y de precipitación acumulada en un día. Para esto se utilizan los operadores de NCO, ya que con estos se pueden procesar los archivos y el resultado puede ser interpretado por la herramienta que grafica (Grads).

Otros operadores no funcionaron al tratar de utilizarlos con estos datos de salida. Para la temperatura máxima se tomó el valor máximo cada 8 tiempos, de forma similar para la temperatura mínima. Para la precipitación se tomó el promedio diario y luego se multiplico por 8. Y se hizo la conversión de unidades a mm y $^{\circ}C$.

Para los mapas se generaron scripts en Grads para graficar los datos procesados con NCO y para los promedios de área se utilizó Python luego de haber procesado los datos con CDO.

7. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

El trabajo consistió en cuatro partes. La primera fue investigar sobre el modelo RegCM, instalar el modelo y hacer pruebas para comprobar su funcionamiento. La segunda se trató de la descarga de los datos reales históricos, los modelos globales y los escenarios de emisiones.

La tercera consistió en realizar pruebas de simulación a futuro ajustando distintos parámetros (esquemas, escenarios, zona, tiempo, etc.) y generación de mapas y gráficas para la comparación de los resultados. La última parte fue la redacción del informe final y los últimos ajustes de resultados obtenidos.

7.1. Instalación y Descarga de datos

Para el sistema operativo Debian 11 se necesitaron las librerías libnetcdf-dev, libnetcdf-fort-dev y libmpich-dev que están incluidas en el administrador de paquete. Inicialmente se estaban descargando desde la página oficial y compilando los programas de NetCDF desde la terminal pero esto generó conflictos con otras versiones y el modelo no era capaz de leer archivos. Se tuvo que iniciar la instalación en un usuario nuevo.

Los datos necesarios para la realización de este proyecto de simulación de los años 2050-2060 y 2000-2010 se dividen en dos partes. La primera parte es los datos de entrada (escenarios) y la segunda los archivos de salida de las simulaciones.

EL escenario RCP8.5 del modelo HadGEM2-ES (modelo del CMIP5) ocupó un espacio de 157 GB, más 14 GB de RF (histórico) y 132 GB de SST. Para el modelo de CMIP6 el total de almacenamiento utilizado fue de 2.2 TB, más medio GB de la carpeta GHG que incluye las proporciones en moles de dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno, entre otros, en el aire. Los datos históricos de ERA-INTERIM

ocuparon un total de 122 GB.

Los datos para poder ejecutar el modelo que se descargaron extra a la instalación suman un total de aproximadamente 2.7 TB de almacenamiento.

El total de los archivos que generó las simulaciones fue de 0.7 TB sin tomar en cuenta las simulaciones de prueba y las que salieron mal. Los 0.70 TB de resultados se muestran resumidos en las gráficas que se muestran en la sección de resultados (se resume bastante porque solo tomamos 2 variables de las 49 que genera el modelo).

Por lo tanto se requiere por lo menos un almacenamiento de 4 TB libres para poder replicar este proyecto sin dificultades de almacenamiento.

7.2. Simulación

El tiempo de simulación para los programas terrain y sst tomaron unos minutos, el icbc 2.15 horas y la simulación para cada esquema de precipitación con RCP 8.5 fue de 66 horas utilizando 6 núcleos.

El tiempo de simulación para los programas terrain y sst tomaron unos minutos, el icbc 8 horas y la simulación para cada esquema de precipitación con SSP5 fue de 60 horas utilizando 6 núcleos.

El tiempo de simulación para los programas terrain y sst tomaron unos segundos, el icbc 41 minutos y la simulación para cada esquema de precipitación para el histórico fue de 7 horas utilizando 8 núcleos.

dt es el número de tiempos y ds es la resolución con la que se ejecuta el modelo. La guía de usuario sugiere que dt debe ser máximo 3 veces mayor de ds .

Esa es la condición de estabilidad de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), la cual obedece que la información se propaga a la velocidad del sonido del aire, el método numérico debe tener un tamaño de paso de tal forma que se adelante mucho a la información que se propaga en el medio.

Para las simulaciones se seleccionó un $ds = 20$ y $dt = 50$, sin embargo para

SSP5 (CMIP6) salió el error 'CFL violation', que indica que no se cumplió la condición CFL. Por lo que se redujo $dt = 45$. Esto puede deberse a que en ese escenario se desarrollaron corrientes de viento muy rápidas ya que el incremento en resolución atmosférica horizontal afecta al momento de mayor orden [7].

De ello se puede inferir que en el modelo CMIP6 se observan velocidades del viento significativamente mayores en comparación con el modelo CMIP5. Este aumento en las velocidades del viento puede atribuirse a varias mejoras clave en la versión más reciente del modelo, entre las cuales destacan la incorporación de procesos físicos más detallados y una resolución espacial más fina. Al incluir una mayor cantidad de procesos atmosféricos, como la interacción entre la atmósfera y los océanos, la representación de fenómenos convectivos, y la mejor parametrización de las dinámicas de vientos a gran escala, los modelos CMIP6 son capaces de simular condiciones atmosféricas más complejas y de mayor intensidad, lo que resulta en vientos de mayor velocidad.

El incremento en la resolución espacial también juega un papel fundamental, ya que permite representar con mayor precisión los gradientes de presión y los flujos de aire en escalas más pequeñas. Esto facilita la aparición de vientos más fuertes, que pueden estar relacionados con fenómenos de mayor resolución, como tormentas convectivas, frentes fríos o sistemas de baja presión que no se capturaban con la misma claridad en CMIP5. Estos cambios reflejan la capacidad de CMIP6 para representar con mayor exactitud las condiciones meteorológicas extremas y los fenómenos dinámicos en la atmósfera.

A continuación se muestran mapas de los 10 años promediados de la simulación 2050-2060. Cada figura tiene 4 mapas, por fila se encuentra la comparación entre esquemas de precipitación y por columna entre escenarios de cambio climático.

En la figura 7.1 se puede observar para el escenario RCP 8.5 el esquema de precipitación Tiedtke presenta valores entre 20 y 80 mm de cantidad de lluvia diaria en todo el país. Mientras que Kain-Fritsch muestra valores entre 40 y 160 mm diarios, a excepción de Petén donde los valores promedio son entre 20 y 40 mm para esos 10 años.

En el escenario SSP5 se observa que es Kain-Fritsch el que se muestra más seco

con respecto al otro esquema. Tiedtke alcanza valores superiores a los 220 mm diarios en la región Occidente, en los departamentos de Huehuetenango y San Marcos.

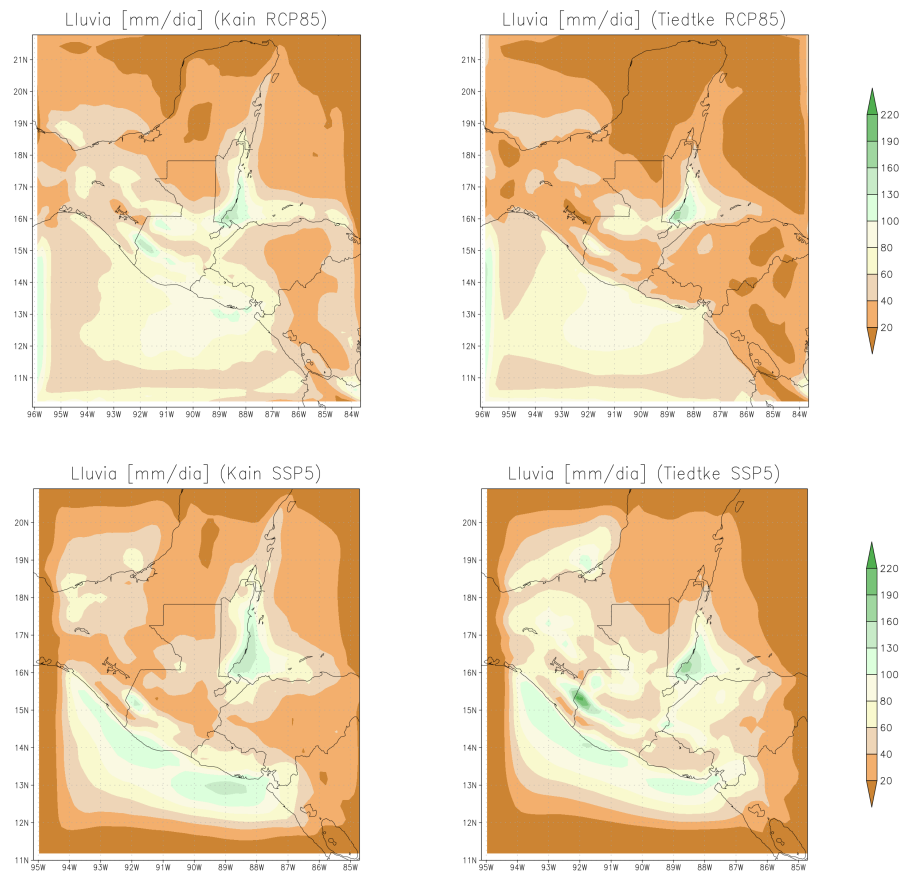


Figura 7.1. Precipitación - Kain-Fritsch vs Tiedtke - RCP85 vs SSP5

Los efectos de borde en la figura 7.1 se aprecian mostrando valores por debajo de los 20 mm en todo el rededor de la figura. La zona de interés para este análisis es únicamente el mapa de Guatemala y la parte del océano Atlántico y Pacífico cercano a la costa. Por lo que la zona de los bordes debe ser descartada para emitir conclusiones.

El efecto de los bordes se ve mucho más marcado para el caso del modelo de CMIP6, esto puede deberse a lo que se había mencionado antes, debido a la mayor resolución se alcanzan velocidades de viento mayores. Esto además de poder generar una violación a la condición CFL, hace que las condiciones en las fronteras sean aún más imprecisas.

En la figura 7.2 se observa para el escenario RCP 8.5 que el esquema Kain-Fritsch muestra temperaturas medias mayores a $30^{\circ}C$ en la parte del océano Pacífico cercana a la costa sur de Guatemala y se extienden más hacia adentro del océano Pacífico que en el esquema de Tiedtke.

La forma en la que está distribuida la temperatura es similar en ambos esquemas, los valores más bajos de temperatura media se encuentran en los departamentos de Huehutenango, Quiché, San Marcos, Quetzaltenango y Totonicapán alcanzando $12^{\circ}C$.

Por otro lado, los valores más altos se encuentra en la costa del Pacífico alcanzando los $30^{\circ}C$. En el departamento de Petén se observa que la temperatura entre $26^{\circ}C$ y $28^{\circ}C$ se extiende más al centro en el esquema de Tiedtke que en el esquema de Kain-Fritsch.

Por otro lado, en el escenario SSP5 no se alcanzan valores superiores a los $30^{\circ}C$, pero en ambos esquemas se muestra un aumento de temperatura en varias zonas de Petén con respecto al otro escenario. También se puede observar que en el esquema de Tiedtke sólo una pequeña región muestra valores por debajo de los $15^{\circ}C$ en el centro-oeste del país.

En el caso de la temperatura, a diferencia de lo observado con la precipitación, no se evidencian efectos tan pronunciados del borde en los resultados del modelo. Esto se debe a que el comportamiento de la temperatura a nivel global está distribuido de manera más homogénea dentro del sistema terrestre, especialmente en las regiones tropicales, donde las variaciones en la temperatura son generalmente menores en comparación con otras variables climáticas. Las temperaturas tienden a ser más uniformes y están influenciadas por factores como la radiación solar, la circulación atmosférica global y las interacciones con los océanos, lo que resulta en un patrón más estable y menos dependiente de las condiciones locales de frontera.

Por lo tanto, al generar las condiciones de contorno para el modelo, los resultados de temperatura no presentan una variabilidad tan significativa como la observada en la precipitación, que está mucho más influenciada por fenómenos de escala local, como las montañas, los vientos o la distribución espacial de la humedad. El comportamiento relativamente uniforme de la temperatura permite que el modelo

obtenga resultados más consistentes y menos sensibles a las condiciones iniciales y de borde. Esto se traduce en una menor divergencia entre las simulaciones realizadas bajo diferentes condiciones de contorno, lo cual puede facilitar la modelización y la predicción de la temperatura a escala global y regional.

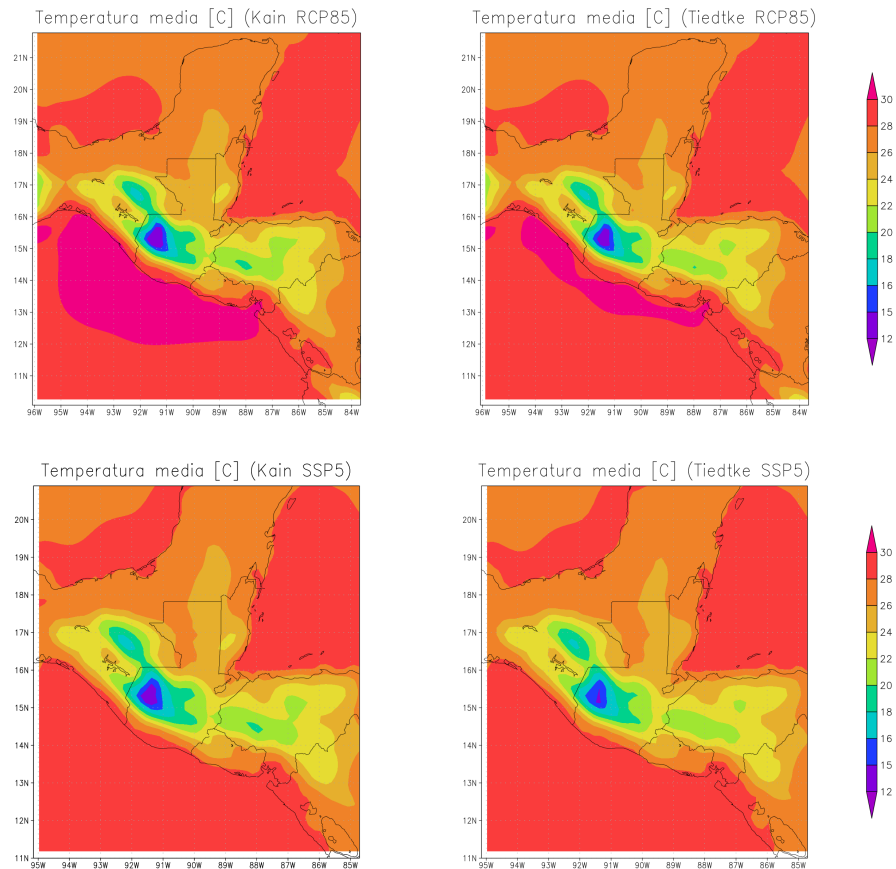


Figura 7.2. Temperatura media - Kain-Fritsch vs Tiedtke - RCP85 vs SSP5

En la figura 7.3 se observan los mapas para temperatura máxima, como en los mapas de temperatura media, aquí también se presentan temperaturas mayores en el escenario RCP 8.5 que en el SSP5, sobre todo en las regiones de la costa al océano pacífico, en el océano y en Petén.

También las temperaturas máximas más bajas se encuentran en el escenario RCP 8.5 y esquema de precipitación Kain-Fritsch, con valores entre $20^{\circ}C$ y $12^{\circ}C$ de temperatura máxima. En cuanto a la distribución de las temperaturas en los cuatro mapas se encuentran las más altas en las regiones norte y sur y las más bajas en la

región centro-oeste del país.

En cuanto a la distribución espacial de la temperatura, se aprecia en ambos esquemas y ambos escenarios que la temperatura máxima alcanza sus valores máximos en las regiones de Petén y costa del Pacífico, mientras que las mínimas en el occidente del país. Esto concuerda con la distribución real observada hasta ahora.

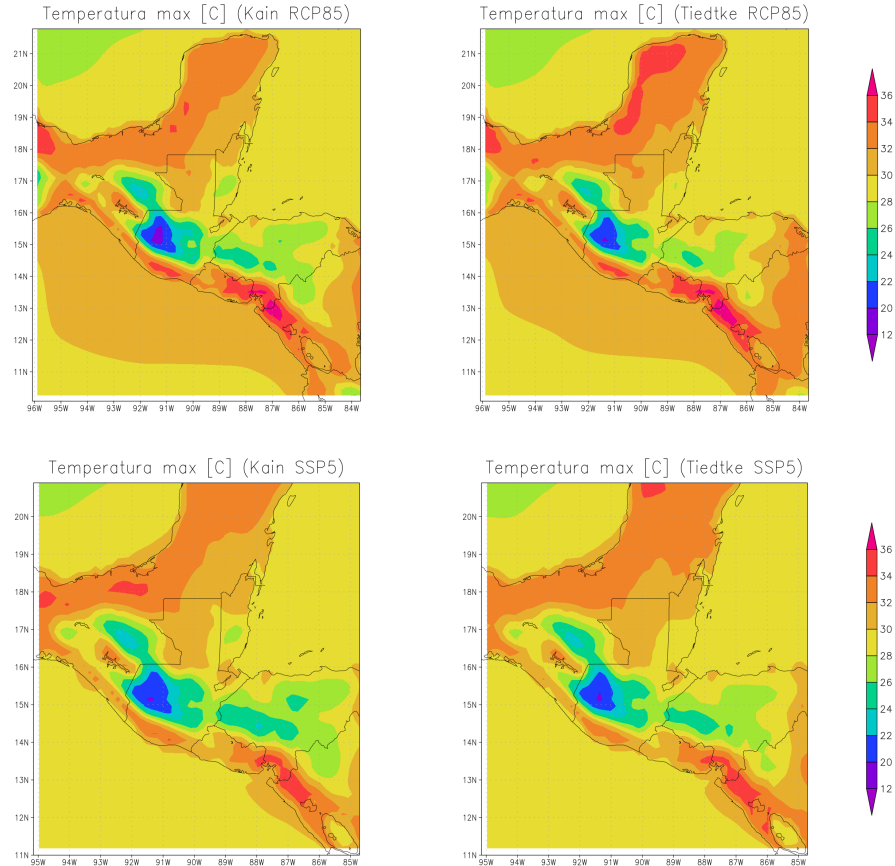


Figura 7.3. Temperatura máxima - Kain-Fritsch vs Tiedtke - RCP85 vs SSP5

En la figura 7.4 se observan los mapas para temperatura mínima. El esquema de Kain-Fritsch para el escenario RCP 8.5 presenta los valores más altos de temperatura mínima en la región del océano Pacífico cercana a la costa de Guatemala.

Sin embargo, en el océano Atlántico es en el escenario SSP5 donde se presentan las temperaturas más altas. La distribución de las temperaturas en los 4 mapas se encuentran las más altas en las regiones norte y sur y las más bajas en el centro-oeste del país.

En cuanto a la distribución espacial de la temperatura mínima, se aprecia en ambos esquemas y ambos escenarios que ésta alcanza sus valores máximos en las regiones de Petén y con mayor intensidad en la costa del Pacífico, mientras que las mínimas en el occidente-centro del país. Esto concuerda con la distribución real observada hasta ahora.

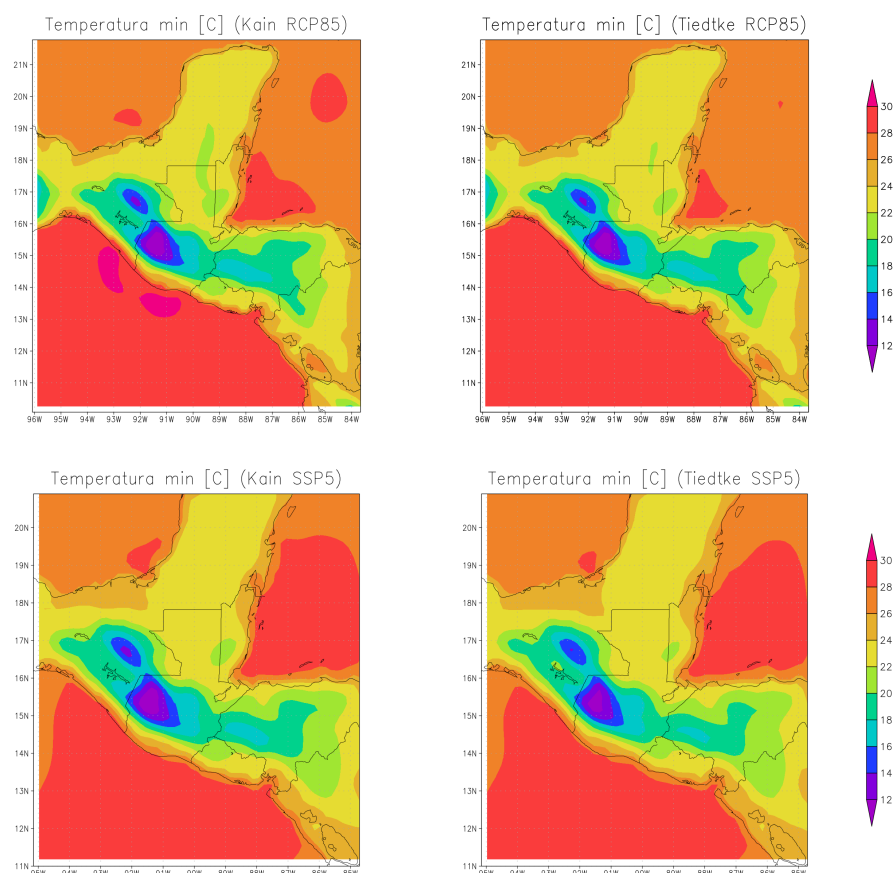


Figura 7.4. Temperatura mínima - Kain-Fritsch vs Tiedtke - RCP85 vs SSP5

Para el cálculo de promedio por área se hizo un recorte de los datos de una región rectangular que abarcara a Guatemala por completo y se eliminara el resto de la zona simulada, para que los valores promedios representen la zona terrestre y así dejar fuera los valores del océano que pueden aplanar las curvas o hacerlas más altas.

En la figura 7.5 se muestra del lado izquierdo el archivo original y del lado derecho la zona recortada para la temperatura mínima del esquema de Kain-Fritsch y escenario SSP5.

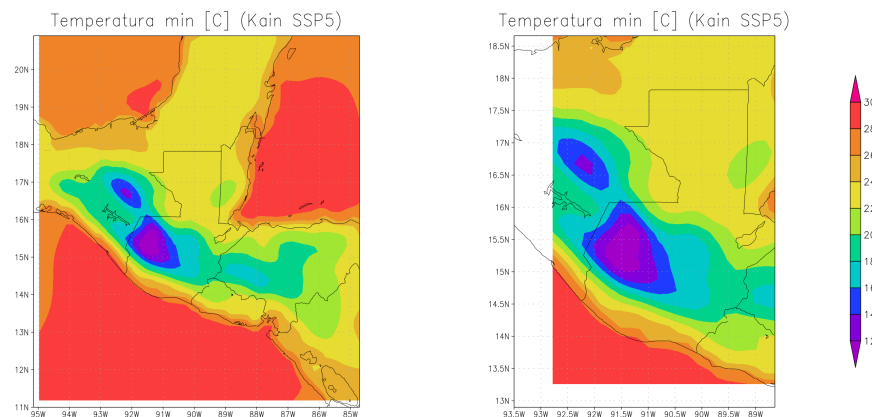


Figura 7.5. Temperatura mínima - Kain-Fritsch SSP5 - región recortada

En la figura 7.6 se muestra el promedio de área calculado mensualmente para lluvia diaria media del periodo de 2050-2060. Entre año y año se observa un comportamiento bi-modal característico de la precipitación en Guatemala que describe las estaciones seca y lluviosa, con su respectiva canícula.

Las líneas amarillas representan al escenario SSP5 siendo Tiedtke la línea más clara y Kain-Fritsch la más oscura. De forma similar, las líneas violeta representan el escenario RCP 8.5, siendo Tiedtke la línea más clara y Kain-Fritsch la más oscura.

El comportamiento bi-modal se aprecia de mejor manera para el escenario SSP5. El escenario RCP 8.5, esquema Kain-Fritsch presenta picos muy pronunciados y en los últimos años más de un pico en el mismo año.

El esquema de Tiedtke de RCP 8.5 no alcanza valores tan altos, incluso menores que en SSP5 pero mantiene la tendencia del otro esquema. En general los valores del SSP5 se mantienen por debajo del RCP 8.5 esquema Kain-Fritsch, a excepción del año 2051.

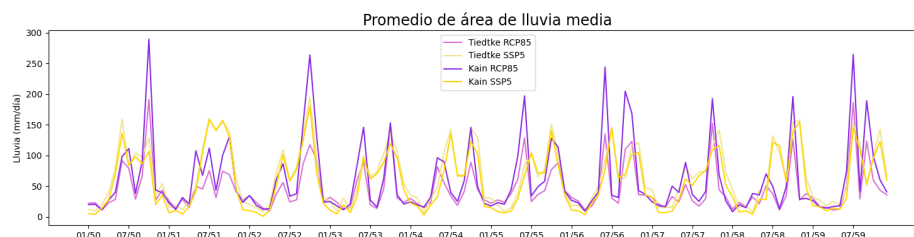


Figura 7.6. Promedio de área precipitación

En la figura 7.7 se puede observar el promedio por área mensual de la temperatura media. En cada año se presenta una caída en la temperatura en los primeros meses del año.

El escenario SSP5 muestra caídas de temperatura más pronunciadas que el escenario RCP 8.5. También se puede apreciar un comportamiento bi-modal, donde a mitad de año las temperaturas medias disminuyen.

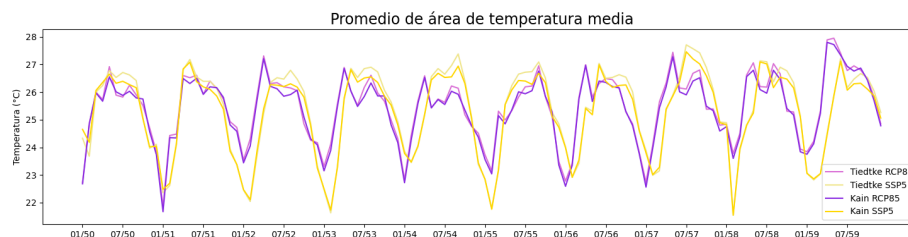


Figura 7.7. Promedio de área temperatura media

En la figura 7.9 se presentan las temperaturas máximas promediadas mensualmente y por área. En algunos años se puede apreciar un comportamiento bi-modal, como en 2052, 2053 y 2054. Sin embargo, hay varios años como el 2050, 2051 y 2058 donde el comportamiento intra-anual tiene mucho picos.

De forma similar que la temperatura media, el comportamiento inter-anual contiene una disminución significativa en cada año. El comportamiento de la temperatura máxima es bastante irregular para ambos esquemas de precipitación y ambos escenarios.

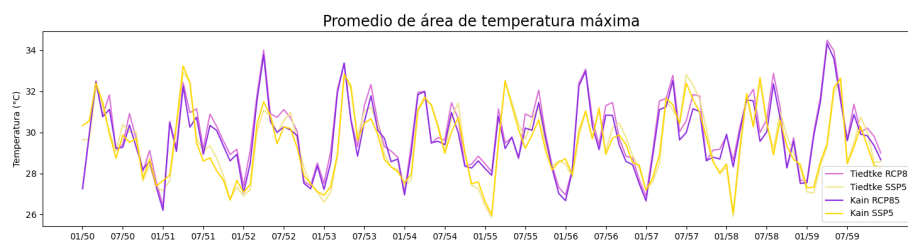


Figura 7.8. Promedio de área temperatura máxima

En la figura 7.8 se presenta la temperatura mínima promediada mensualmente y por área. Aquí se puede observar un comportamiento más regular, cada año se caracteriza con un comportamiento bi-modal, es decir con una pequeña disminución en la temperatura a la mitad del año. Se alcanzan las temperaturas más bajas en

forma de picos los primeros meses del año.

Para esta variable los esquemas de precipitación son bastante similares para cada escenario, Tiedtke no se despega mucho de Kain-Fritsch y siguen la misma tendencia, Sin embargo se puede apreciar que los esquemas del escenario SSP5 muestran un rango de valores más amplio.

Es decir que presentan valores de temperatura mínima más extremos, los más bajos para los meses fríos y los más altos para los meses más cálidos. El escenario RCP 8.5 no presenta valores tan bajos pero tu temperatura mínima tampoco sube tanto como lo hace SSP5.

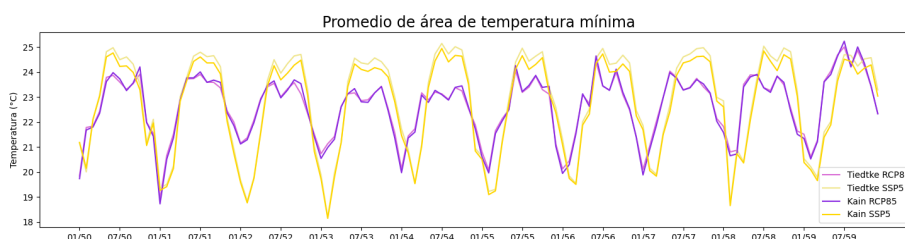


Figura 7.9. Promedio de área temperatura mínima

A continuación, en la figura 7.10 se muestra la comparación entre la simulación de años históricos del 2000 al 2010 para ambos esquemas de precipitación en la primera fila. En la segunda fila se muestra el mismo histórico de datos tomado de estaciones reales pertenecientes a INSIVUMEH.

Lo primero que se observa es que el rango de valores que se midieron es mucho más pequeño que el rango de valores de la simulación. Por lo que la simulación sobrestimó para ese periodo de años la precipitación.

En cuanto a la distribución de la precipitación podemos observar que el esquema de Tiedtke presenta los valores más altos en el norte de Petén y valores entre 40 mm y 60 mm en el resto del país.

Los datos de ENACTS están entre abajo de 3 mm y arriba de 12 mm. Por lo que Tiedtke se acerca más a los valores reales de ese periodo de años.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que, las estaciones de INSIVUMEH no

cubren toda la región, esto produce una interpolación donde se observan polos marcados en algunas zonas, mientras que si se tuvieran más estaciones se apreciaría de mejor manera la precipitación. Además, este mapa es de un promedio de precipitación diaria en 10 años, aquí no se pueden observar valores máximos y mínimos.

También la calidad de los resultados dependerá de los datos iniciales, los modelos cuentan con una resolución inicial alrededor de los 200 km. Luego de hacer la regionalización los resultados son de 20 km. Esto es un factor importante en la sobre-estimación de la precipitación. Si se entrenara el modelo con datos de mayor resolución los resultados serían más acertados.

A pesar de esta sobre-estimación, se puede observar que la distribución espacial de la precipitación coincide con la observada en Guatemala hasta el momento para la precipitación, que no se distribuye de forma tan uniforme como la temperatura.

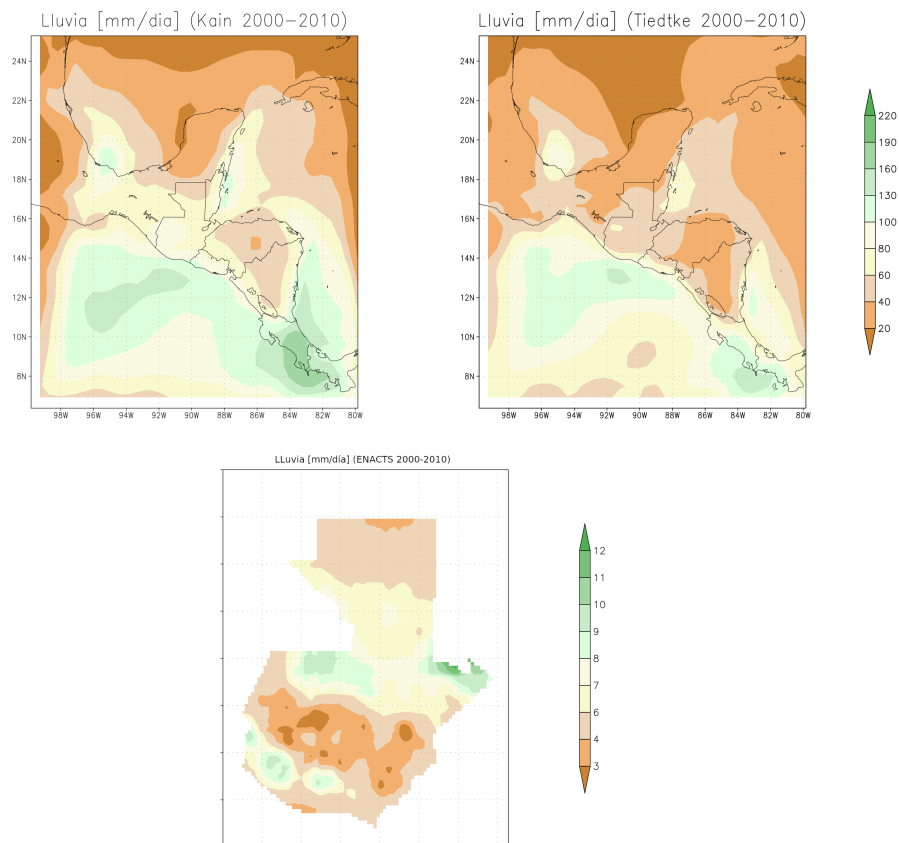


Figura 7.10. Precipitación - Kain-Fritsch vs Tiedtke vs ENACTS - histórico

CONCLUSIONES

1. El análisis comparativo entre los esquemas de parametrización de convección Kain-Fritsch y Tiedtke revela diferencias notables en las proyecciones de precipitación para Guatemala, dependiendo tanto del escenario de emisiones como del período de análisis. En el escenario de emisiones RCP 8.5, que representa un futuro de altas emisiones de gases de efecto invernadero, cuando se utiliza la parametrización Kain-Fritsch proyecta mayores precipitaciones en comparación con Tiedtke. Esto puede estar relacionado con las diferencias en la forma en que ambos esquemas simulan la convección y la formación de nubes. Kain-Fritsch, al ser un esquema más dinámico y sensible a las condiciones locales, tiende a generar lluvias más intensas y distribuidas, lo que podría reflejar un comportamiento más acorde con las condiciones climáticas de Guatemala, caracterizadas por fenómenos convectivos intensos y regulares.
2. En el escenario SSP5, que se basa en un camino socioeconómico de altas emisiones acompañado de un rápido crecimiento económico y tecnológico, el esquema Tiedtke proyecta mayores precipitaciones que Kain-Fritsch, para el período promedio de 10 años entre 2050 y 2060. Este cambio en la dinámica (En la conclusión anterior es al revés) podría explicarse por las diferencias en los enfoques de parametrización de ambos modelos. Tiedtke tiende a generar una distribución más homogénea de la precipitación en áreas más grandes, lo que podría implicar una mayor ocurrencia de lluvias en regiones más amplias bajo condiciones de mayor forzamiento climático, como las previstas en el escenario SSP5. En este contexto, la interacción entre la atmósfera y la radiación y la determinación de la nubosidad en Tiedtke, podrían favorecer un aumento en la precipitación en comparación con Kain-Fritsch, el cual, al ser más sensible a las variaciones locales, podría no capturar de la misma forma las condiciones globales del escenario SSP5.
3. La variabilidad en los resultados entre ambos esquemas de parametrización en diferentes escenarios subraya la importancia de considerar múltiples enfoques

para la modelización de fenómenos climáticos complejos como la precipitación, ya que cada esquema tiene sus propias fortalezas y limitaciones dependiendo del contexto climático y geográfico específico. En este caso, con Kain-Fritsch el modelo parece ser más sensible a las condiciones locales de convección en un escenario de altas emisiones (RCP 8.5).

4. El escenario RCP 8.5 presenta valores de temperatura media más altos en el océano Pacífico pero el escenario SSP5 presenta valores más altos en el océano Atlántico y en algunas zonas de Petén. Los valores mínimos alcanzados son en la región centro-este de Guatemala para ambos escenarios y ambos esquemas.
5. El escenario RCP 8.5 presenta valores de temperatura máxima más altos que en el escenario SSP5, para ambos esquemas, en la región del océano Pacífico, costa Pacífico y Petén. Tiedtke para RCP 8.5 muestra zonas más calientes en el norte del país y el área de temperaturas máximas más bajas se ve reducida en comparación al esquema de Kain-Fritsch.
6. Las temperaturas mínimas más altas se alcanzan en el escenario RCP 8.5, sobre todo en la región del océano Pacífico, mientras que las más altas en el océano Atlántico se encuentran en el escenario SSP5. La distribución de la temperatura mínima en la región de Guatemala es similar en ambos escenarios y ambos esquemas.
7. La precipitación, temperatura media y temperatura mínima reflejan un comportamiento bi-modal a lo largo de cada año para ambos esquemas y ambos escenarios de cambio climático, es decir se alcanzan 2 puntos máximos cada año, una ligera caída entre picos a medio año y un pico de mínimo al comienzo de cada año aproximadamente. Por lo que el modelo representa acertadamente el comportamiento de las estaciones seca y lluviosa para la región tropical de Guatemala.
8. La temperatura máxima tiene un comportamiento irregular con respecto a las demás variables, no se ve claramente un comportamiento bi-modal y se presentan muchos picos.
9. La temperatura mínima tiene un comportamiento bastante uniforme a lo largo de los 10 años, para cada escenario ambos esquemas se comportan muy similar. El escenario SSP5 tiene un rango de valores más amplio que el escenario RCP 8.5 para la mayoría de los años.

10. No se muestran corrimientos temporales entre escenarios ni entre esquemas para ninguna de las variables.
11. La simulación histórica sobrestima los valores reales de precipitación para el periodo 2000-2010. El esquema de Tiedtke es el más cercano a estos valores. Sin embargo, la distribución espacial de la precipitación es acertada.
12. Los valores máximos tanto para temperatura media, máxima y mínima se alcanzan en el último año de la serie, el 2059.
13. La comparación entre el modelo de CMIP5 y CMIP6 muestra avances en la capacidad de predicción ya que existe una mejora en la resolución espacial y temporal lo que permite una representación más precisa y detallada de los fenómenos climáticos que antes era difícil modelar con tal precisión. También se incorpora una mayor cantidad de variables que interactúan en el sistema climático, ofreciendo una mejor representación de procesos complejos como la formación de nubes, precipitaciones extremas, etc. Lo cual es muy importante al trabajar a una escala regional, ofreciendo una mayor fiabilidad en las proyecciones.
14. En CMIP6 se incrementa la capacidad computacional e inclusión de nuevos forzamientos climáticos junto con la incorporación de nuevos escenarios socio-económicos ofreciendo una ampliación en las posibilidades para la toma de decisiones en políticas de mitigación y adaptación al cambio climático.
15. La evaluación histórica realizada con el modelo CMIP5, utilizando el conjunto de datos ERA-INTERIM como referencia, presenta algunas limitaciones debido a la baja resolución espacial de este último. ERA-INTERIM, aunque es un reanálisis global muy valioso, tiene una resolución relativamente baja en comparación con otros conjuntos de datos más recientes y detallados, lo que puede afectar la precisión en la representación de fenómenos locales, especialmente aquellos de alta variabilidad como la precipitación. Al comparar las salidas del modelo CMIP5 con un conjunto de datos de mayor resolución, como ENACTS, que incluye datos interpolados de estaciones meteorológicas junto con observaciones satelitales, se observa una diferencia considerable en la estimación de la precipitación. Este contraste es esperable, ya que ENACTS proporciona una resolución espacial más fina y una mayor cobertura temporal y geográfica, lo que permite capturar detalles más específicos de los patrones

de precipitación, particularmente en regiones con alta variabilidad climática como Guatemala.

16. Aunque la discrepancia en las estimaciones de precipitación entre ambos conjuntos de datos es notable, esta comparación no debe interpretarse como una falla del modelo CMIP5 para representar el clima de Guatemala de manera general. Las diferencias observadas pueden deberse, en parte, a las características inherentes de los propios modelos climáticos, que a menudo no logran capturar con precisión la escala local de fenómenos atmosféricos complejos como las lluvias intensas o las variaciones microclimáticas que influyen en la precipitación. Además, la variable de precipitación, debido a su alta variabilidad espacial y temporal, es más difícil de modelar con la misma precisión que otras variables climáticas, como la temperatura, que tienden a ser más estables y homogéneas a nivel regional.
17. No se puede concluir que el modelo CMIP5 no sea adecuado para Guatemala de manera categórica. En lugar de eso, los resultados deben ser interpretados con cuidado, reconociendo las limitaciones tanto de los datos de entrada como de los propios modelos. Esta comparación hace notar la importancia de utilizar un enfoque que combine diferentes fuentes de datos de alta resolución y mejores técnicas de interpolación para lograr una representación más precisa de los fenómenos climáticos a nivel local. Además, hace notar la necesidad de continuar mejorando los modelos climáticos y las técnicas de validación para optimizar su aplicación en regiones específicas con condiciones climáticas complejas, como la región de Guatemala.
18. La falta de efectos del borde tan marcados en la temperatura refleja su comportamiento relativamente uniforme a nivel global y regional, especialmente en las regiones tropicales. Este comportamiento facilita la generación de condiciones de contorno más estables y menos sensibles a variaciones espaciales, lo que contribuye a una mayor consistencia en los resultados del modelo para esta variable, en comparación con otras como la precipitación, donde las diferencias pueden ser mucho más pronunciadas.
19. Mejoras en la resolución y la inclusión de procesos más detallados en el modelo CMIP6 permiten simular vientos de mayor intensidad en comparación con CMIP5, lo que muestra una mayor fidelidad en la representación de fenómenos meteorológicos extremos. Sin embargo, este aumento en la velocidad del viento

también implica un desafío en términos de estabilidad numérica, lo que obliga a reducir el tamaño de paso temporal en las simulaciones para cumplir con la condición de estabilidad CFL la cual establece que el paso de tiempo debe ser lo suficientemente pequeño para que las soluciones numéricas sean estables, especialmente cuando se simulan flujos de alta velocidad como los vientos fuertes y así se pueda garantizar la precisión de los resultados, pero aumenta costo computacional. Este aspecto resalta la necesidad de un mayor poder computacional para realizar simulaciones de alta calidad y a alta resolución en modelos climáticos avanzados.

RECOMENDACIONES

1. Antes de cualquier simulación, siempre verificar los archivos de salida del programa Terrain, para asegurar que la región que se va a simular es la deseada.
2. Descargar la última versión del modelo desde GitHub y de las librerías desde el manejador de paquetes del sistema operativo.
3. Cuando hayan errores de lectura, primero verificar que los archivos no estén corruptos para cada variable.
4. Comprobar disponibilidad de almacenamiento antes de comenzar la descarga de los datos.
5. Utilizar operadores de NCO para el procesamiento de los archivos de salida del modelo en lugar de CDO.
6. Hay muchos archivos de entrada y de salida, así que lo mejor es trabajar ordenado, poner nombres clave a los archivos para que no generen confusión y organizar todo en carpetas.
7. Para los modelos de CMIP6, debido a que tienen mayor resolución, se debe crear un dominio más grande, de esta forma se evita que se vean afectados los resultados de interés por efectos del borde. A la hora de graficar los resultados, recortar la zona de los bordes para no generar confusión.
8. Hacer una comparación de simulación histórica con datos reales para las variables de temperatura media, mínima y máxima. Ya que es una variable que se distribuye de forma más uniforme y constante en el mapa, por ende, puede proporcionar información valiosa sobre el funcionamiento del modelo.
9. Utilizar el modelo con datos de mayor resolución para que la simulación pueda tener más información al momento de interpolar y así generar resultados más precisos. De igual forma utilizar los datos que se encuentran activos.

10. Existen más de 140 modelos para cada generación de proyectos, con múltiples variantes físicas cada uno, se deben hacer más simulaciones con los modelos que mejor representen la región tropical, de esta forma se pueden obtener múltiples proyecciones y notar la tendencia general que tienen todas. Ya que por ser proyecciones de cambio climático no importan tanto los valores exactos sino las tendencias a la hora de toma de decisiones y generación de políticas de mitigación y adaptación al cambio climático.
11. Hacer proyecciones de por lo menos 30 años para realizar un análisis de tendencias y así poder determinar cómo aumentará la temperatura, cuál es la pendiente, etc. Puede ser de utilidad para futuros estudios de correlaciones con otros sectores como el de salud, economía, etc.
12. Para mejorar la precisión y la interpretación del análisis histórico de la precipitación en Guatemala, se recomienda reducir el área geográfica de estudio, enfocándose en una región más pequeña y representativa dentro del territorio nacional. La actual extensión de la región de análisis puede diluir patrones climáticos locales a la hora de graficar al rango a mostrar, como los microclimas o las influencias orográficas, que son particularmente relevantes en países como Guatemala, con una topografía compleja que afecta de manera significativa los patrones de precipitación. Al reducir el área de estudio, es posible capturar con mayor detalle los fenómenos climáticos que ocurren a escala regional y local, los cuales pueden ser pasados por alto en un análisis más amplio.
13. En el análisis histórico, ajustar el rango de valores utilizado en el análisis de precipitación para enfocarse en intervalos más específicos que permitan detectar variaciones más sutiles en los patrones de lluvia. Muchas veces, el rango de valores utilizado para representar la precipitación en estudios a gran escala puede ser demasiado amplio o general, lo que dificulta la identificación de eventos climáticos extremos o patrones regionales específicos. Al reducir el rango de valores, se puede obtener una visión más clara de las variaciones locales, como las zonas de alta precipitación asociadas a fenómenos convectivos, tormentas tropicales, o las zonas secas en las que la variabilidad climática es menor.
14. Para el análisis histórico, considerar el uso de conjuntos de datos más detallados o de mayor resolución para la región seleccionada. Datos provenientes de estaciones meteorológicas locales, reanálisis de alta resolución, o incluso datos

satelitales específicos para la región, podrían aportar información adicional sobre los patrones de precipitación en el contexto geográfico de Guatemala, lo cual permitiría una comparación más precisa y una validación más robusta de los resultados obtenidos a través de los modelos climáticos.

15. Para mejorar la evaluación y la precisión de las simulaciones climáticas, se recomienda realizar un estudio exhaustivo que compare los resultados del modelo con datos históricos reales, utilizando modelos más avanzados y actualizados, como los del CMIP6. El uso de múltiples modelos de CMIP6 permitirá obtener una perspectiva más amplia y robusta sobre el comportamiento climático en la región de estudio, ya que cada modelo tiene sus propias representaciones y parametrizaciones de los procesos climáticos, lo que puede generar un rango de resultados. Al evaluar varios modelos, se pueden identificar patrones consistentes y generar conclusiones con mayor fiabilidad.
16. Emplear los modelos utilizando un conjunto de datos de alta resolución que incluya tanto observaciones de estaciones meteorológicas como datos satelitales, preferiblemente en una escala temporal y espacial adecuada para captar las variaciones locales en las variables climáticas, especialmente las de precipitación y temperatura. Estos datos de alta resolución proporcionarán una referencia más precisa para comparar las simulaciones del modelo, permitiendo detectar discrepancias más sutiles y mejorando la capacidad de ajuste de los modelos a la realidad climática observada.
17. Realizar un promedio de los resultados obtenidos de varios modelos del CMIP6. Este enfoque, conocido como “ensemble modeling”, permite mitigar la incertidumbre individual de cada modelo, ya que al combinar múltiples simulaciones se pueden identificar tendencias más robustas y reducir los efectos de los sesgos específicos de cada modelo. Un promedio de modelos también ofrece una estimación más precisa y representativa de las posibles respuestas climáticas, lo que es especialmente útil cuando se enfrentan a escenarios de cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Filippo Giorgi et al. Regional Climate Model RegCM Reference Manual Version 4.7. Trieste, Italy. ICTP. 2017.
- [2] Filippo Giorgi et al. Regional Climatic Model RegCM User's Guide Version 4.6. Trieste, Italy. ICTP. 2022.
- [3] Consejo Centroamericano de Procuradores de Derechos Humanos. Políticas públicas regionales sobre la reducción de la pobreza en Centroamérica y su incidencia en el pleno disfrute de los derechos humanos. Informe Nacional Guatemala. 2008.
- [4] Wikipedia. Trayectorias de concentración representativas - Wikipedia, The Free Encyclopedia. <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Trayectorias%20de%20concentraci%C3%B3n%20representativas&oldid=155926494>. [Online; accessed 29-January-2024]. 2024.
- [5] Wikipedia. Trayectorias socioeconómicas compartidas - Wikipedia, The Free Encyclopedia. <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Trayectorias%20socioecon%C3%B3micas%20compartidas&oldid=152000730>. [Online; accessed 29-January-2024]. 2024.
- [6] Working Group I Contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. CLIMATE CHANGE 2013, The physical Science Basis. Cambridge University Press. 2013.
- [7] Müller, W. A., Jungclaus, J. H., Mauritsen, T., Baehr, J., Bittner, M., Budich, R., et al. (2018). A higher-resolution version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2-HR). Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 10, 1383–1413. <https://doi.org/10.1029/2017MS001217>

- [8] Tiedtke, M. (1989). A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 38(1-4), 280-299. <https://doi.org/10.1007/BF01030424>
- [9] Kain, J. S., And Fritsch, J. M. (1990). A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(2), 278-304. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<0278>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<0278>2.0.CO;2)
- [10] In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. Cambridge University Press.
- [11] What is a GCM? (n.d.). Data Distribution Centre. Panel Intergubernamental de cambio climático IPCC. <https://www.ipcc-data.org/guidelines/pagesgcmguide.html>