

Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección General de Investigación
Programa Universitario de Investigación en Ciencias Básicas

Informe final

Análisis de la precipitación sobre el territorio guatemalteco utilizando un modelo climático regional

Equipo de investigación

Enrique Pazos Avalos

Guatemala, 2018

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

Dr. Erwin Humberto Calgua Guerra
Director General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador del Programa de Investigación

Dr. Enrique Pazos Avalos
Coordinador del proyecto

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación, 2018. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada por la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la Partida Presupuestaria 4.8.63.4.12. durante el año 2018 en el Programa Universitario de Investigación de Ciencias Básicas.

Financiamiento aprobado por Digi: Q.59,200.00 Financiamiento ejecutado: Q.47,478.09

Índice

| | |
|---|----------------------|
| 1. Resumen..... | 66 |
| 2. Palabras clave..... | 66 |
| 3. Abstract and keyword | 66 |
| 4. Introducción | 77 |
| 5. Planteamiento del problema | 88 |
| 6. Preguntas de investigación | 99 |
| 7. Delimitación en tiempo y espacio..... | 1010 |
| 8. Marco Teórico | 1010 |
| 9. Estado del Arte..... | 1212 |
| 10. Objetivo general | 1313 |
| 11. Objetivos específicos | 1313 |
| 12. Hipótesis..... | 1313 |
| 13. Materiales y métodos | 1414 |
| 14. Vinculación, difusión y divulgación..... | 1717 |
| 15. Productos, hallazgos, conocimientos o resultados..... | 1818 |
| 16. Análisis y discusión de resultados..... | 2222 |
| 17. Conclusiones | 2424 |
| 18. Impacto esperado | 2525 |
| 19. Referencias..... | 2626 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Operacionalización de las variables..... | 14 |
|---|----|

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Precipitación promedio anual para diferentes resoluciones..... | 18 |
| Figura 2: Distribución de frecuencias de precipitación para distintas resoluciones..... | 19 |
| Figura 3: Prueba de Kolmogorov-Smirnov para las tres resoluciones..... | 20 |
| Figura 4: Bias de precipitación para tres diferentes esquemas convectivos..... | 21 |
| Figura 5: Precipitación promedio para un período de once años..... | 22 |

Análisis de la precipitación sobre el territorio guatemalteco utilizando un modelo climático regional

1. Resumen

En la presente investigación se utilizó un modelo climático regional para simular y analizar la precipitación sobre el territorio guatemalteco durante un período de diez años. El objetivo es obtener un modelo climático óptimo para el territorio nacional. Para esto se llevan a cabo comparaciones de los resultados de precipitación para distintas resoluciones y esquemas de precipitación. Tales datos se contrastan con mediciones realizadas por satélites. El análisis de los patrones de precipitación es necesario para realizar evaluaciones de vulnerabilidad e impacto al cambio climático global. La ventaja de utilizar un modelo climático regional estriba en su habilidad para tomar en cuenta la topografía del terreno en la circulación atmosférica, proveyendo una herramienta robusta para evaluaciones de adaptación y mitigación ante el cambio climático. Entre los resultados relevantes se ha encontrado que la cantidad de precipitación no depende de la resolución utilizada en las simulaciones numéricas. La resolución tiene una influencia en la distribución de frecuencias de los eventos de precipitación, dando como resultado un mayor número de eventos extremos a resoluciones más altas. La distribución temporal de los patrones de precipitación se ve afectada sobre los continentes mucho más que en los océanos. Se observa que las regiones con una cantidad mayor de precipitación sobre el territorio guatemalteco son aquellas donde existen cadenas montañosas.

2. Palabras clave

Cambio climático, clima, topografía, eventos extremos, vulnerabilidad.

3. Abstract and keyword

In this research project we used a regional climate model to simulate and analyze the precipitation over the Guatemalan territory during a period of ten years. The objective is to obtain an optimal climate model that is useful in the national territory. To achieve this goal, we carried out comparisons of precipitation results for different resolutions and precipitation schemes. Such data are compared with satellite measurements. The analysis of precipitation patterns is necessary to carry out vulnerability and impact evaluations due to global climate change. The advantage in using a regional climate model resides in its ability to take into account the terrain topographical details in the atmospheric circulation, thus providing a robust tool for adaptation and mitigation evaluations in the face of climate change. Among the relevant results we have found that the amount of precipitation is independent of the resolution used in the numerical simulations. Resolution has a noticeable effect in the frequency distributions of precipitation events, giving as a result a greater number of extreme events at high resolutions. The temporal distribution of the

precipitation patterns has much more influence over the continent than the ocean. We observe that the regions with higher precipitation over the Guatemalan territory are those where mountain ranges are located.

Keywords:

Climate change, climate, topography, extreme events, vulnerability

4. Introducción

El presente proyecto se desarrolló dentro del área de investigación priorizada de la Digi perteneciente al campo de las ciencias de la tierra y cambio global; específicamente en cambio climático, sistemas atmosféricos, impacto, adaptación y modelos del clima.

El proyecto consistió en el análisis de la variable de precipitación sobre el territorio nacional, lo cual se llevó a cabo con el modelo climático regional RegCM (Giorgi et al., 2012). Este un paquete de software desarrollado en el International Centre for Theoretical Physics de Italia, y está destinado a la modelación climática de un área limitada de la superficie de la Tierra. Dicho modelo toma en cuenta la interacción dinámica del aire y la humedad de la atmósfera, junto con la radiación solar, gases de invernadero, mecanismos de precipitación, diferentes tipos de uso de suelo y la topografía del terreno, para dar como resultado una estimación certera del clima predominante en la región de interés (Jones, Murphy, & Noguera, 1995).

Una de las componentes de RegCM es la formulación matemática de distintos esquemas de precipitación, los cuales poseen diferentes parámetros que rigen su funcionamiento. Es sabido que el desempeño de los esquemas de precipitación depende en gran medida de la topografía del terreno y de la resolución numérica que se utiliza para realizar los cálculos (Salathé et al., 2010). Por esta razón, se hace necesario calibrar y combinar los esquemas de precipitación, para que los resultados sean lo más parecido posible a los datos medidos por estaciones meteorológicas (Gbobaniyi et al., 2014). Esta calibración es uno de los objetivos que se persiguen en esta propuesta. En una segunda fase (no contemplada en el presente proyecto), se pretende utilizar el modelo calibrado para hacer predicciones a futuro del impacto del cambio climático para el territorio guatemalteco.

El valor que tienen los modelos climáticos regionales, es que permiten analizar en detalle la influencia fundamental de la orografía en la dinámica local del clima (Leung & Qian, 2003), proporcionando así una herramienta para el estudio de eventos extremos, tales como fuertes lluvias y períodos prolongados de sequía. Por tal motivo, se trabajó el análisis de la variable de

precipitación; la cual, junto con la temperatura, proporcionan la información de las condiciones climáticas que afectan directamente a las personas (Giorgi et al., 2014) y los distintos tipos de actividades económicas dependientes del clima (la agricultura, por ejemplo).

Este tipo de análisis es de vital importancia para Guatemala, que ha sido catalogada como uno de los países más vulnerables al cambio climático global. Este proyecto es un planteamiento de los primeros pasos hacia la estimación cuantitativa y detallada del impacto y la vulnerabilidad ante el cambio climático, información fundamental para la toma de medidas de adaptación y mitigación (Rauscher et al., 2016).

5. Planteamiento del problema

El trabajo de investigación consistió en utilizar el modelo climático regional RegCM, para realizar simulaciones numéricas detalladas del clima en el territorio de Guatemala durante los últimos 10 años. Estas simulaciones utilizaron datos de reanálisis (Courtier et al., 1998) para recrear las condiciones climáticas de años anteriores, lo cual se hace con el objeto de obtener un modelo climático óptimo para el territorio nacional.

Los resultados de los patrones y distribuciones de precipitación obtenidos con base a los cálculos, fueron comparados con datos disponibles de satélites. Uno de los objetivos es poder encontrar la configuración óptima de resolución y esquemas de precipitación, los cuales están codificados en el modelo climático regional RegCM. Mientras más fiel a la realidad sean los resultados del modelo, más confiables serán las predicciones a futuro que se puedan realizar con el mismo.

El cambio climático global debido a la emisión antropogénica de gases de invernadero es un hecho respaldado por distintos tipos y cantidades de evidencia. El incremento global en la temperatura del planeta acarrea una serie de consecuencias que serán observables en los patrones de lluvias y temperaturas. Se espera un incremento en la cantidad de eventos climáticos extremos, tales como lluvias fuertes, ondas de calor, noches cálidas y sequías (Salathé et al., 2010). Tales fenómenos naturales tendrán un impacto sobre la economía y la salud de diferentes regiones del mundo.

Guatemala es un país altamente vulnerable al cambio climático, debido a su marcada orografía y su fuerte dependencia económica de la agricultura. Por tal motivo, es de vital importancia poseer los medios y los métodos para evaluar y analizar el impacto del cambio climático sobre el territorio nacional. Este proyecto es un primer paso en esa dirección.

Con la ayuda de la alta resolución que los modelos climáticos regionales permiten, es posible obtener conocimiento de las estadísticas hidroclimáticas extremas (Giorgi et al., 2014) las cuales

son esenciales en el estudio de impacto y vulnerabilidad debidas al cambio climático. Existen diferentes áreas en las cuales los resultados de un modelo climático regional son necesarios, tales como: desbordamiento de ríos, agricultura, salud y calidad de aire (García-Bustamante et al., 2013). Un modelo climático regional es una de las mejores herramientas con las que se puede contar para tomar las medidas de adaptación pertinentes en un corto, mediano y largo plazo. En este sentido, este tipo de investigación tiene el potencial de impactar en la formulación de políticas públicas para nuestro país, ya que podría generar información pertinente para prevenir desastres, misma que podría ser utilizada por entidades como Conred y la red hospitalaria.

Los modelos climáticos computacionales están basados en las ecuaciones de los fluidos y las leyes físicas de conservación de la materia y la energía. Asimismo, utilizan algoritmos matemáticos para resolver dichas ecuaciones, todo esto con el fin de proveer de una representación realista y confiable de las variables climáticas.

El uso de conceptos físicos, matemáticos y computacionales hace de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas la unidad académica ideal para proponer y desarrollar proyectos de investigación en este campo de la ciencia aplicada.

6. Preguntas de investigación

Pregunta general:

¿Es posible establecer un modelo climático computacional que pueda predecir la precipitación en el territorio guatemalteco?

Preguntas específicas:

1. ¿Cuál es el efecto que tiene la resolución espacial de la grilla en los datos de precipitación obtenidos por medio de un modelo numérico?
2. ¿Los modelos obtenidos por simulaciones numéricas estiman con precisión y exactitud los datos de precipitación medidos por satélites?
3. ¿Es necesario modificar los valores estándar de los parámetros que controlan el cálculo de precipitación a fin de lograr concordancia con los datos medidos por estaciones meteorológicas?
4. ¿Cuáles son las zonas más propensas a eventos de precipitación extrema en el territorio de Guatemala?

7. Delimitación en tiempo y espacio

En cuanto al tema y objeto de la investigación, la misma está limitada a un período de diez años comprendido entre 2005 a 2015. Este fue el intervalo de tiempo para analizar datos climáticos históricos. El espacio geográfico se centra en el territorio guatemalteco y el área alrededor del mismo, comprendida en un radio de aproximadamente 500 km.

8. Marco Teórico

Modelos climáticos

Un modelo climático computacional o simplemente, modelo climático, es una representación matemática de las variables climáticas y de las relaciones entre las mismas. Tales relaciones se expresan como ecuaciones diferenciales parciales. El sistema básico de ecuaciones contiene cinco variables: presión, temperatura y las tres componentes del vector de velocidad del viento. Cada ecuación representa una ley física aplicada a un sistema continuo, es decir, a un fluido. La dinámica de un fluido está afectada por diferencias de presión que se originan por gradientes de temperatura, los cuales a su vez son producidos por intercambio de calor. El sol es la fuente de energía que mueve la atmósfera. En la representación matemática del sistema climático se incluye al sol como fuente de energía, así como la interacción de la radiación solar con el planeta. Dichas interacciones son: absorción de radiación por gases de invernadero, calentamiento y evaporación de agua en la tierra, reflexión parcial (albedo) de la radiación según el tipo de superficie donde incide.

Un modelo climático que toma como sistema toda la atmósfera del planeta se le llama Modelo de Circulación Global (MCG). Estos modelos tienen dos fronteras: la superficie del planeta y la parte superior de la atmósfera. Un MCG puede hacer proyecciones a futuro de los patrones de precipitación y temperatura de todo el planeta, propiciando así una manera de cuantificar el efecto del calentamiento global. Sin embargo, muchos de los detalles que conciernen a una región en particular quedan subestimados. Esto se debe a que la representación matemática de las variables se hace por medio de una grilla o red de coordenadas, que normalmente son latitud y longitud. Con la capacidad de las computadoras modernas, esta grilla puede llegar a tener un espaciamiento mínimo o resolución de 1 grado de latitud, lo cual equivale a una distancia de aproximadamente 100 km en el ecuador (Salathé et al., 2010). Guatemala tiene una extensión territorial de aproximadamente 109,000 km cuadrados; con una resolución de 100 km tendríamos solamente 10 puntos para cubrir el territorio nacional. Esto es insuficiente para cualquier estudio de impacto y vulnerabilidad, donde es necesario el detalle de los accidentes geográficos locales, como montañas o lagos. Por tal razón, para aumentar la resolución y el nivel de detalle sobre una región, se utilizan los Modelos Climáticos Regionales (MCR), los cuales funcionan exactamente como los MCG, pero son aplicados a una región limitada sobre la superficie de la Tierra. Esta característica permite

enfocar los recursos computacionales y lograr resoluciones de 1 a 50 km en la grilla de un MCR (Salathé et al., 2010).

A diferencia de un MCG, debido a que un MCR cubre solo una porción de superficie, éste posee fronteras laterales. Las condiciones de frontera lateral pueden ser impuestas por interpolación, ya sea de los resultados de un MCG o de datos de reanálisis. La tarea de reanalizar datos consiste en la asimilación sistemática de datos históricos de distintos tipos de estaciones meteorológicas, para recrear las condiciones climáticas del planeta sobre una grilla uniforme (Courtier et al., 1998; Rabier et al., 1998; Uppala et al., 2005).

En síntesis, los MCG son eficaces para calcular comportamientos promedios, pero no toman en cuenta la interacción de la topografía local de mesoescala (decenas de kilómetros), la cual es importante en procesos como precipitación orográfica, zonas de convergencia y drenado de aire frío. Los procesos de mesoescala no están presentes en un MCG (Arriaga-Ramirez & Cavazos, 2010; Salathé et al., 2010).

Valor agregado de un Modelo Climático Regional

La ventaja esencial que ofrece un MCR es la habilidad de resolver o magnificar los detalles que un MCG no puede ver. Esto trae consigo una mejora significativa del nivel de detalle con el que se calcula la circulación local y su interacción con la topografía. Por ejemplo, al tener una mejor representación de las laderas de las montañas, el movimiento vertical de aire presenta un incremento adicional que no se observa en un MCG. A mayor movimiento vertical, mayor es la precipitación dinámica (Wallace & Hobbs, 2006); que a su vez resulta en una atmósfera más seca y cálida (Caldwell, 2010; Jones, Murphy, & Noguera, 1995).

Una característica esencial de un MCR es la habilidad de simular de forma precisa las distribuciones de temperatura del aire en la superficie y la precipitación sobre la tierra (Jones, Murphy, & Noguera, 1995). La contribución principal de un MCR no se encuentra en los promedios climatológicos, sino más bien en las estadísticas de orden superior (como se puede apreciar muy bien en las distribuciones de frecuencias de lluvias intensas) y en los patrones particulares de circulación, (Giorgi et al., 2014) los cuales propician eventos extremos que son representados muy bien por un MCR (Nobre et al., 2013).

Estudios hechos con Modelos Climáticos Regionales

Los MCR se han utilizado para estudiar la sensibilidad de los modelos a la resolución del mismo. Se ha encontrado que con una alta resolución en el MCR se obtiene menos precipitación ligera y más del tipo fuerte sobre regiones montañosas, como en los Alpes en Europa (Giorgi & Marinucci, 1996), las cordilleras del estado de California (Leung & Qian, 2003) y las montañas del estado de Washington (Salathé et al., 2010).

Algunos otros estudios han tratado de encontrar mecanismos o explicaciones a fenómenos locales, tales como la canícula o veranillo en la región mesoamericana (Magaña, Amador, & Medina, 1999; Small, Szoeké, & Xie, 2007). También se han utilizado en estudios de evaluación de energía eólica y variabilidad del viento (García-Bustamante et al., 2013).

Características de RegCM

El MCR que se planea utilizar en este proyecto es el REGional Climate Model (RegCM) versión 4.5 (Giorgi et al., 2012), desarrollado en el International Centre for Theoretical Physics (ICTP) de Italia, durante los últimos 20 años. Dicho MCR incorpora en sus cálculos factores como: circulación en tres dimensiones del aire en la atmósfera, absorción y emisión de radiación solar por gases de invernadero, topografía de la superficie, distintos tipos de uso de suelo, dinámica en la capa de frontera planetaria, distintos esquemas de precipitación y tratamiento de aerosoles. Todos estos elementos son tomados en cuenta para el cálculo de las variables climáticas en función del tiempo y del espacio.

Las condiciones iniciales y de frontera que utiliza RegCM son dadas a través de la interpolación de datos de reanálisis, los cuales son conjuntos de datos observacionales históricos disponibles a través de internet. Algunos de estos conjuntos proveen datos climáticos desde 1957, como el caso de ERA40 (Uppala et al., 2005).

9. Estado del Arte

Es bien sabido que el mismo modelo puede presentar una variabilidad distinta (Gbobaniyi et al., 2014) en diferentes regiones del planeta. Esto se debe a que la topografía influye dramáticamente en la circulación de los vientos y la distribución de precipitación; y subsecuentemente, en la dinámica local del clima. Diferentes configuraciones son necesarias para diferentes dominios a fin de optimizar el desempeño. La configuración por default puede no ser la adecuada, es necesario validar y adaptar el modelo. Por ejemplo, los esquemas de precipitación Grell (Grell, 1993) y Emanuel (Emanuel, 1991; Emanuel & Živković-Rothman, 1999) pueden presentar excesos o disminuciones dependiendo si los cálculos son sobre la tierra o el océano. Por tal razón es necesario explorar si un esquema mixto, en función del tipo de superficie (océano o tierra), puede mejorar los resultados. De igual forma, los MCR suelen manifestar sesgos o errores sistemáticos en los resultados, los cuales dependen de los parámetros físicos del modelo. Esto se ha observado especialmente en territorios tropicales (Karmalkar, Bradley, & Diaz, 2011; Giorgi et al., 2014).

Existen diferentes MCR y se han llevado a cabo comparaciones entre ellos. Los resultados no siempre coinciden. Particularmente, se ha notado la falta de eventos de alta intensidad en la precipitación; lo cual se atribuye a la falta de resolución del modelo. La falta de resolución causa

que la intensidad de la lluvia sea débil y que la distribución se suavice en el tiempo (Rauscher et al., 2016).

Posiblemente la contribución más importante que un MCR puede hacer, es el cálculo de los índices de temperatura y precipitación para estimar el impacto futuro del cambio climático. Algunos de estos índices son: la duración de una onda calurosa, el número máximo de días secos consecutivos, el porcentaje de precipitación por arriba del percentil 95% y la intensidad hidroclimática (Coppola et al., 2014). El conocimiento de las estadísticas hidroclimáticas extremas es esencial para la evaluación del impacto y la vulnerabilidad debidas al cambio climático global. Los resultados generales de distintos MCR sugieren una mayor ocurrencia de sequías, inundaciones y ondas de calor con un marcado incremento en su duración e intensidad (Beniston et al., 2007; Giorgi & Lionello, 2008; Giorgi et al., 2014).

10. Objetivo general

Establecer un modelo climático computacional que pueda predecir la precipitación en el territorio guatemalteco.

11. Objetivos específicos

1. Determinar la relación entre la resolución espacial de la grilla y la cantidad de precipitación que pronostica el modelo climático computacional.
2. Determinar si los datos de precipitación obtenidos por medio de una simulación numérica estiman con precisión y exactitud aquellos medidos por estaciones meteorológicas.
3. Analizar la influencia de los parámetros que controlan la precipitación en los resultados generados por el modelo climático computacional.
4. Determinar las zonas más propensas a eventos de precipitación extrema en el territorio de Guatemala.

12. Hipótesis

El desarrollo de un modelo climático computacional permitirá la predicción de la precipitación sobre el territorio de Guatemala.

13. Materiales y métodos

13.1 Enfoque y tipo de la investigación

Este proyecto tuvo un enfoque cuantitativo. La recolección y producción de datos se hizo por medio de los cálculos que resultaron del modelo climático regional RegCM. La variable principal a estudiar fue la precipitación como una función de las coordenadas latitud, longitud y tiempo. Este nivel primario de datos (o datos crudos) se organiza en archivos que pueden llegar a ocupar varios gigabytes en un disco duro. El segundo nivel de datos lo constituye la reducción de los datos primarios por medio de promedios en espacio y tiempo. Estos promedios proveen la línea base de comparación con la cual se puede cuantificar la sensibilidad del modelo numérico a la resolución y los parámetros del mismo.

13.2 Recolección de información

En este proyecto los datos no se recolectaron como una muestra tomada de un conjunto universo, como suele suceder en un muestreo estadístico. En este caso los datos son la solución numérica del conjunto de ecuaciones que rige la dinámica de las variables climáticas. La variable de interés es la precipitación, la cual es función del tiempo y de las coordenadas espaciales sobre la superficie terrestre. Su magnitud numérica mide la cantidad de agua que cae al suelo por unidad de área y unidad de tiempo.

La solución numérica de las ecuaciones climáticas se hace por el método de volúmenes finitos, en el cual el dominio computacional se divide en partes más pequeñas y de aplica un balance de flujo determinado por las ecuaciones que se quieren resolver. Mientras más pequeñas las subdivisiones del dominio, más alta es la resolución con la que el modelo climático calcula la solución numérica. La resolución es el espaciamiento entre los puntos de la cuadrícula computacional que cubre la superficie de la tierra.

Para llevar a cabo el análisis se realizaron varias corridas. Cada corrida proporciona una solución numérica. A fin de determinar el efecto de la resolución en el cálculo de la precipitación se hicieron corridas con tres resoluciones y tres dominios. También se quiere cuantificar la dependencia de la precipitación para tres esquemas diferentes que controlan el cálculo de la misma, por lo que se hará una corrida con cada esquema.

13.3 Técnicas e instrumentos

El método que utiliza el modelo regional RegCM está compuesto por varios algoritmos para resolver ecuaciones diferenciales parciales. Asimismo, los diferentes esquemas de precipitación están formulados con ecuaciones que expresan las leyes de la física aplicadas a los procesos termodinámicos y de transporte de materia en la atmósfera. Con

esto se generan los resultados crudos de diferentes variables climáticas como la precipitación, temperatura y campo de velocidades del viento.

El análisis del nivel primario de datos se hizo a través del cálculo de promedios aritméticos. Esto genera el nivel secundario de datos. Los promedios se calculan con el conjunto de operadores llamados netCDF Operatos (NCO) (Zender, 2008). Según las cantidades a comparar, es necesario calcular promedios en el tiempo (anuales, mensuales o semanales) y en espacio (sobre tierra, océano o área de interés).

La comparación de diferentes variables se hace siempre en una gráfica, la cuál puede ser una serie de tiempo, un mapa bidimensional con código de colores o una animación que unifique tanto la dependencia espacial como temporal de las variables de interés.

El instrumento esencial fue la computadora y distintos programas de software. Se utilizó el modelo climático regional RegCM, el cual es un programa de código abierto, escrito en Fortran, que necesita ser compilado en la computadora donde va a utilizarse. Los datos generados por RegCM se organizan en archivos que utilizan el formato binario estandarizado llamado Network Common Data Form (NetCDF) (Brown, Folk, Goucher, Rew, & Dubois, 1993; Rew & Davis, 1990).

Los operadores NCO son un conjunto de programas auxiliares que procesan los archivos en formato NetCDF para realizar todo tipo de operaciones aritméticas entre los datos; por ejemplo, promedios aritméticos.

El uso de scripts de consola de linux, también conocidos como shell scripts, facilita la integración de los diferentes operadores NCO en cálculos más complejos. Esto es muy útil cuando se debe aplicar la misma serie de operaciones a distintos conjuntos de datos.

Finalmente, las gráficas se hacen con el paquete de software libre Gnuplot (Janert, 2010), el cual provee una gran flexibilidad y versatilidad para la elaboración de gráficos científicos.

13.4 Operacionalización de las variables

| Objetivo específicos | Variables | Técnicas | Instrumentos | Medición o cualificación |
|---|---|---|---|--|
| Determinar la relación entre la resolución espacial de la grilla y la cantidad de precipitación que pronostica el modelo climático computacional. | Precipitación | Cálculo de promedios semanales, mensuales y trimestrales | Modelo RegCM, operadores NCO, Shell scripts y Gnuplot | Diferencia entre los promedios calculados con datos del modelo y los calculados con datos de satélite |
| Comparar los datos de precipitación obtenidos por medio de una simulación numérica con aquellos medidos por satélite | Frecuencia de eventos extremos de precipitación | Construcción de un histograma de frecuencias para ver la cantidad de eventos de precipitación | Modelo RegCM, operadores NCO, Shell scripts y Gnuplot | Frecuencia de eventos y evaluación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para las diferentes resoluciones |
| Examinar la influencia de los parámetros que controlan la precipitación en los resultados generados por el modelo climático computacional. | Precipitación | Comparación de resultados al variar los parámetros que controlan el cálculo de precipitación | Modelo RegCM, operadores NCO, Shell scripts y Gnuplot | Diferencia entre los promedios calculados al variar los esquemas de precipitación. |
| Determinar las zonas más propensas a eventos de precipitación extrema en el territorio de Guatemala | Precipitación | Cálculo de la cantidad de precipitación anual en un intervalo de diez años | Modelo RegCM, operadores NCO, Shell scripts y Gnuplot | Distribución de valores máximos de precipitación en función de la ubicación geográfica en el territorio nacional |

Tabla 1: Operacionalización de las variables

13.5 Procesamiento y análisis de la información

El modelo climático computacional genera la solución numérica a las ecuaciones diferenciales parciales que dictan el comportamiento de las variables climáticas, esto provee los datos crudos o primarios que sirvieron para posterior análisis.

La variable que fue objeto de estudio es la precipitación, la cual es función del tiempo y de las coordenadas espaciales sobre la superficie terrestre. Estos datos se utilizaron para calcular promedios aritméticos, los cuales constituyen el nivel secundario de datos. Los promedios fueron calculados a lo largo de un intervalo temporal ya sea anual, mensual o semanal. Al hacer esto los datos muestran la tendencia en el intervalo de tiempo especificado como función de las coordenadas espaciales. El otro tipo de promedio aritmético se hace sobre la superficie terrestre. En este caso se puede tomar todo el dominio computacional o bien un área de interés de menor tamaño. Cuando se promedia sobre las coordenadas espaciales se obtiene una serie de tiempo que muestra la variabilidad de la precipitación de una región a lo largo del intervalo en el que se ha calculado la solución numérica.

Los promedios sobre una región son posteriormente comparados con los datos que han sido medidos por satélite. La similitud se estima mediante la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov con dos muestras y un nivel de significancia de 5%.

Con base en los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov se pudo responder qué tanto afecta la resolución en el cálculo de la precipitación, pues la prueba estadística mide la similitud entre las distribuciones empíricas de los datos.

14. Vinculación, difusión y divulgación

Durante los meses que duró este proyecto se lograron crear vínculos con el Centro Internacional de Física Teórica (ICTP) en Italia; el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y el Instituto Privado de Investigación en Cambio Climático (ICC). En cada una de estas instituciones se encuentran profesionales con los que se ha planificado una futura colaboración para continuar el presente proyecto.

Durante la realización del proyecto se hizo una presentación durante el Noveno Taller ICTP sobre la Teoría y Uso de Modelos Climáticos Regionales. La presentación está disponible en:

<https://ecfm.usac.edu.gt/epazos/precipitacion.pdf>

15. Productos, hallazgos, conocimientos o resultados

15.1 Resolución espacial y cantidad de precipitación

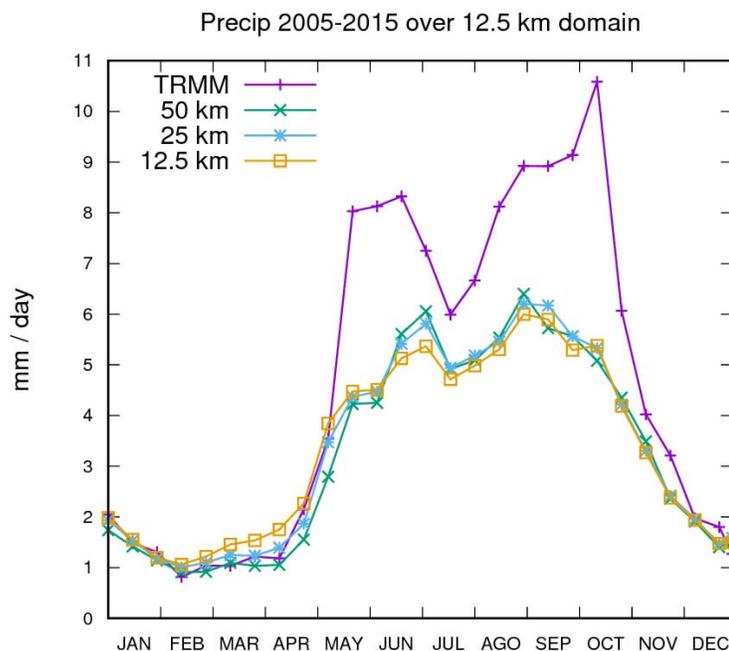


Fig. 1: Precipitación promedio anual para diferentes resoluciones.

En la Figura 1 se muestra la precipitación anual del ensemble para los años comprendidos desde 2005 a 2015. Se utilizaron tres resoluciones espaciales: 50, 25 y 12.5 km. Se puede observar que la diferencia entre cada resolución es pequeña. Cada curva tiende a valores menores cuando se aumenta la resolución. En la gráfica se muestra también el promedio, para el mismo período, de los datos de la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (Huffman et al., 2007). Estos datos se toman como mediciones empíricas contra las cuales se comparan los datos de las simulaciones. Se puede observar que mientras los resultados de la simulación son parecidos entre sí, los valores son menores que la precipitación registrada por TRMM, haciendo que esta cantidad sea subestimada por el modelo numérico en la región de interés.

15.2 Comparación entre simulaciones y mediciones

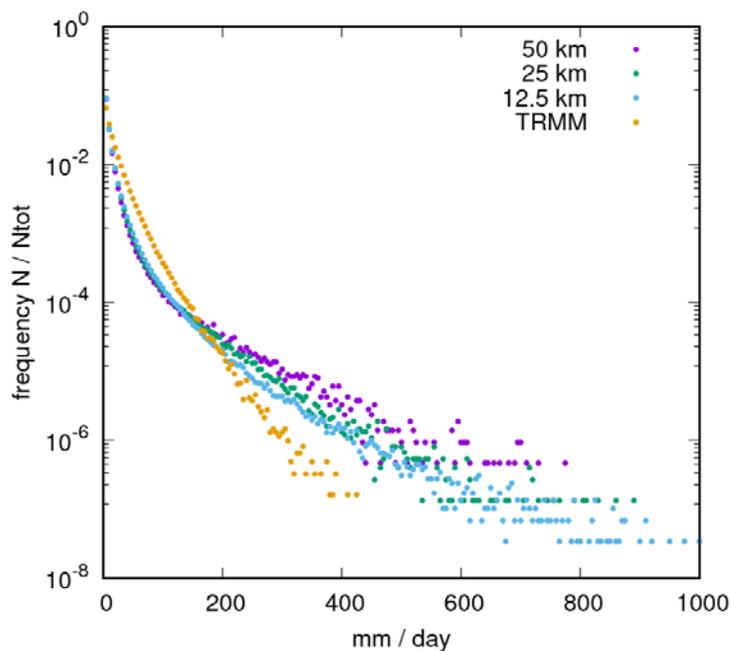


Fig 2: Distribución de frecuencias de precipitación para distintas resoluciones.

En la Figura 2 se muestra la distribución de frecuencias, también llamada distribución de probabilidad empírica. Para este gráfico se tomó en consideración el área cubierta por el dominio perteneciente a la resolución de 12.5 km. Se tomó la precipitación diaria para cada celda de la grilla en el período de 2005 a 2015. Se puede observar que las distribuciones de las simulaciones numéricas tienen bastante concordancia entre sí. Sin embargo, la distribución calculada con los datos de TRMM no sigue el mismo patrón que las simulaciones.

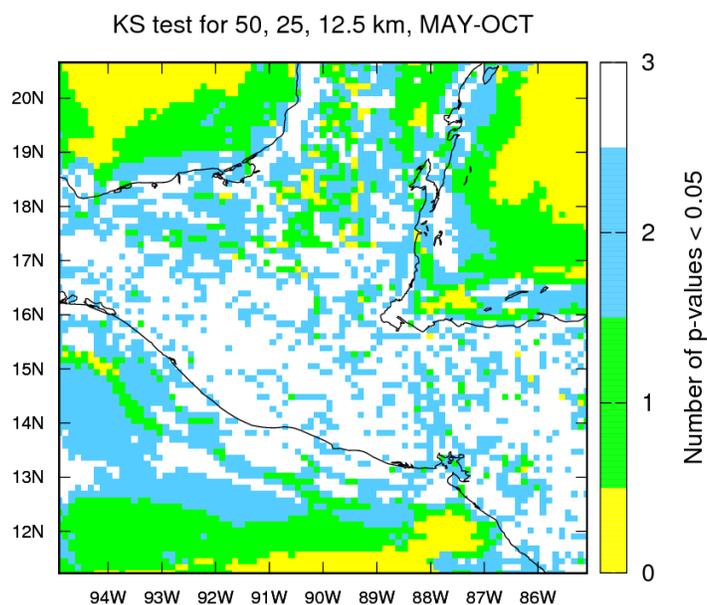


Fig. 3: Prueba de Kolmogorov-Smirnov para las tres resoluciones.

En la Figura 3 se muestra el resultado de la prueba Kolmogorov-Smirnov (KS) para comparar el patrón en las distribuciones de precipitación en cada punto de la grilla. Se utilizó la prueba KS de dos muestras, donde cada muestra corresponde a los resultados de cada corrida. De esta forma la prueba se aplica a pares de simulaciones, ofreciendo una forma de comparar el cambio en el patrón de precipitación al cambiar la resolución de la grilla. Si el valor p es mayor que 0.05 se considera que ambas muestras pertenecen a la misma distribución, mientras que si p es menor que 0.05 las muestras pertenecen a diferentes distribuciones. Se puede observar que las distribuciones difieren más en las partes montañosas, mientras que en el océano los valores de precipitación siguen el patrón de una misma distribución sin importar la resolución.

15.3 Parametrizaciones de precipitación

En la Figura 4 se analiza la influencia en la distribución y cantidad de precipitación dependiendo del esquema de convección que se utilice. Se utilizaron los esquemas de Emanuel (EM), Tiedtke (TK) y Kain-Fritsch (KF). La simulación utilizó una resolución de 50 km en el período de junio a octubre del año 2005. En este caso se compara el resultado directo con los datos de TRMM. A grandes rasgos, se observa que tanto EM como TK subestiman la cantidad de precipitación, mientras que KF hace un buen trabajo sobre el continente y sobreestima la lluvia sobre el océano en la región sur de Mesoamérica.

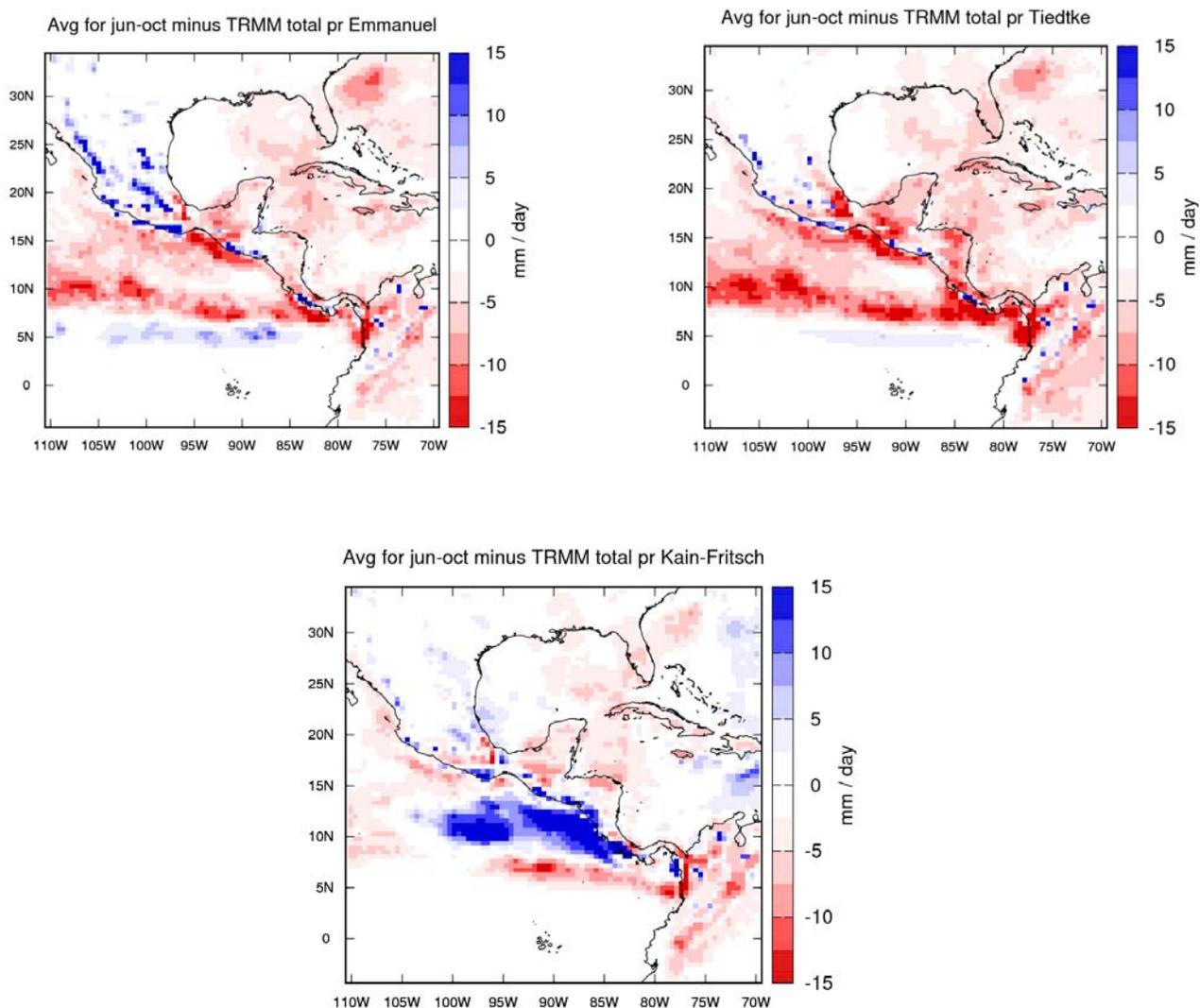


Fig. 4: Bias de precipitación para tres diferentes esquemas convectivos.

15.4 Zonas de precipitación extrema

En la Figura 5 se muestra el promedio anual de precipitación considerando el intervalo de 2005 a 2015. Se ha utilizado la resolución de 12.5 km y el dominio mesoamericano centrado alrededor del territorio guatemalteco. Se ve un alto contraste entre las regiones de alta y escasa precipitación.

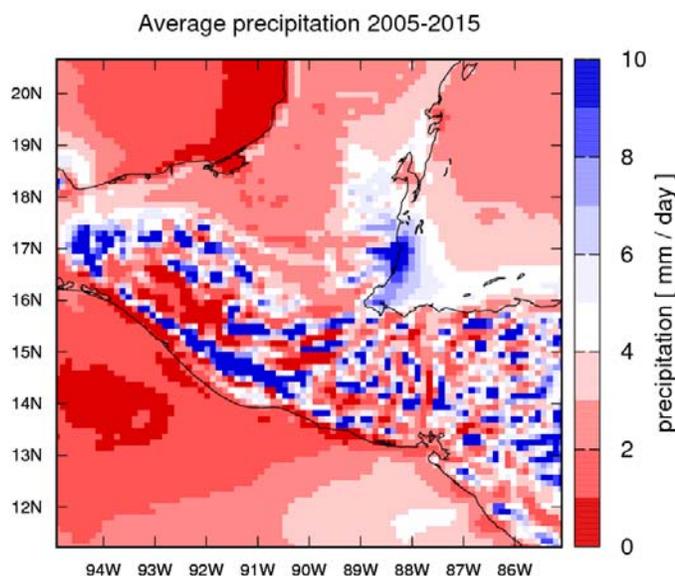


Fig. 5: Precipitación promedio para un período de once años.

16. Análisis y discusión de resultados

Una de las características que se aprecian en la Figura 1 es la presencia de la sequía de medio verano, mejor conocida como canícula. Este fenómeno consiste en la reducción de la cantidad de precipitación alrededor de los meses de julio y agosto. El efecto se ve fuertemente marcado en los datos satelitales y con menos fuerza en las simulaciones numéricas.

La cantidad promedio de precipitación no varía significativamente con el aumento de resolución, sino que se mantiene casi constante para un mismo instante. El aumento en resolución tiene un efecto notorio cuando se analizan las distribuciones empíricas de probabilidad, lo cual se observa en la Figura 2. El efecto del aumento de resolución es notable en la aparición de eventos extremos de precipitación. Los valores máximos alcanzados son aproximadamente de 800, 900 y 1000 mm por día para las resoluciones de 50, 25 y 12.5 km, respectivamente. La característica de las distribuciones de probabilidad es que son monótonicamente decrecientes, lo que implica que en un día determinado es más probable que se dé un evento ligero de precipitación que uno extremo. El hecho de que los eventos extremos de precipitación estén ausentes en las corridas con baja resolución confirma el hecho de que el aumento de resolución brinda un valor agregado (Nobre et al., 2013). En este caso, el valor agregado consiste en la información adicional de eventos extremos que aparece cuando se aumenta la resolución. Esto es importante debido a que una de las tendencias del cambio climático es que se produzcan episodios extremos ya sea en aumento de temperatura o de precipitación. El poder caracterizar una climatología de eventos extremos ofrece

una forma de comparar los datos históricos de clima con simulaciones de escenarios futuros de cambio climático.

En las simulaciones realizadas se utilizó la parametrización de cúmulos y convección EM. En la Figura 4 se observa que este esquema subestima la cantidad de precipitación. De la misma manera, esto es evidente en la Figura 1, donde el promedio anual está por debajo de los datos registrados por satélite.

La cantidad promedio de precipitación se mantiene prácticamente constante al variar la resolución. Esto confirma que los procesos atmosféricos de condensación no dependen de la resolución. Por otra parte, el efecto que tiene la resolución se ve únicamente en la cola de la distribución de frecuencias. Estos eventos marcan una alta cantidad de lluvia, sin embargo, al ser muy escasos contribuyen muy poco a la cantidad total de lluvia. Dado que las distribuciones de frecuencia coinciden para valores pequeños de precipitación (que ocurren con más probabilidad) la cantidad total de lluvia no se ve afectada por los valores extremos de baja ocurrencia que se logran resolver con una grilla más fina.

De lo anterior, resulta interesante investigar cómo difiere la distribución temporal de lluvias en una ubicación dada. Si el aumento de resolución hace que se observen eventos más extremos esto puede indicar que el modelo logra incorporar elementos que antes no estaban presentes, tales como los detalles topográficos y las corrientes de viento producidas por los mismos. Para comparar las distribuciones se utiliza la prueba de Kolmogorv-Smirnov de dos muestras. En la Figura 3 se muestra el resultado de la prueba cuando se toman los resultados de las tres resoluciones por pares. El resultado de la prueba se determina por el valor p . Si p es mayor a 0.05 se dice que ambas muestras pertenecen a la misma distribución y que el patrón temporal en la distribución de lluvias es el mismo. Si p es menor a 0.05 se da por verdadera la hipótesis de que las muestras pertenecen a distribuciones diferentes y este caso, la resolución modifica el patrón temporal de distribución de lluvia. Como se hace un total de tres comparaciones, cada punto en el mapa puede tener un valor de 0, 1, 2 ó 3 el cual representa la cantidad de pruebas KS con p menor a 0.05. De la Figura 3, es evidente que la región en donde $p < 0.05$ para las tres comparaciones es en la franja continental. Por el contrario, en la región oceánica las tres pruebas KS tienen un $p > 0.05$. Este resultado pone en evidencia que la presencia de montañas modifica el patrón de lluvias cuando el modelo tiene la resolución necesaria incorporar la topografía en los cálculos (Giorgi et al., 2014).

Las características de elevación del terreno juegan un papel importante en los procesos de convección. Una cadena de montañas funciona como un obstáculo para el flujo de viento y humedad, haciendo que el aire ascienda y la humedad se condense e incluso se precipite. Este tipo de procesos se acentúan cuando la resolución se incrementa, como ya se vio anteriormente. Algo que también escapa a las simulaciones de baja resolución es el detalle de los procesos convectivos,

los cuales ocurren en escalas de cientos de metros hasta varios kilómetros. La escala a la que ocurre la convección queda subrepresentada en las corridas de baja resolución. Es por esto que se necesita de un modelo aproximado o parametrización para representar la convección con conduce a la formación de cúmulos y cumulonimbos, causantes principales de condensación y precipitación.

Existen varios esquemas de precipitación. En este trabajo se han considerado tres de ellos para su comparación. En la Figura 4 se puede observar el efecto que cada uno de ellos tiene en la cantidad de precipitación calculada. Se observa que los esquemas EM y TD subestiman la cantidad de lluvia en la franja alrededor de los 10 grados de latitud norte. De los tres esquemas, TK es el que mejor representa la precipitación en el dominio considerado. Se puede observar también que existe una influencia notoria en el caso que la superficie esté cubierta por tierra o por océano. En un trabajo futuro se puede considerar la combinación de esquemas de precipitación en donde se asigna uno para el área terrestre y otro para el área oceánica, con el objetivo de disminuir la diferencia entre los resultados de la simulación y los datos observados.

Finalmente, en la Figura 5 se grafica el promedio de todo el período desde 2005 a 2015 utilizando la resolución más alta disponible, que es de 12.5 km. En esta gráfica se ve claramente el efecto de la orografía en el patrón de precipitación. Las zonas con mayor cantidad promedio de lluvia son aquellas en donde hay una cadena montañosa. En Guatemala esto ocurre en las regiones de la Sierra Madre, los Cuchumatanes y la Sierra de las Minas. Otra región de precipitación intensa es la costa de Belice en el mar Caribe. Estos resultados comprueban lo que se ha observado en otras regiones en donde la presencia de montañas actúa como un agente de condensación y precipitación (Leung & Qian, 2003).

17. Conclusiones

1. La cantidad de precipitación no varía al cambiar la resolución de la grilla. Sin embargo, se observa que mientras más alta es la resolución, las distribuciones de frecuencias tienen eventos de precipitación extrema. Esto se debe a una mejor representación de la topografía del terreno lo que a su vez influye en los procesos de convección que ocurren a escalas menores que la de la grilla. Las corridas de alta resolución proveen el valor agregado característico de un modelo climático regional.
2. Los resultados de precipitación obtenidos por simulaciones numéricas se compararon con datos de satélite. Este ofrece una gran ventaja sobre los datos de estaciones meteorológicas ya que éstas se encuentran dispersas de manera no uniforme sobre la superficie, mientras que los datos de satélite están procesados e interpolados sobre una grilla uniforme que incluye también la superficie del océano. En este sentido se ha verificado que la exactitud

de la predicción depende en gran medida del tipo de terreno en cuestión. Se ha encontrado que la mayor variabilidad en los resultados ocurre en regiones montañosas, mientras que en regiones terrestres planas (tierra y océano) las variaciones son menores.

3. Se utilizaron tres parametrizaciones diferentes para la representación de los procesos convectivos que originan la precipitación. Se observa que no hay conjunto de parámetros óptimo para minimizar la diferencia entre los cálculos y los datos observacionales. El ajuste de los esquemas de precipitación depende de la región de interés. En las corridas realizadas en este trabajo no se encontró un único parámetro que tuviera una influencia notoria en la precipitación. Esto se debe al terreno altamente accidentado de la región que se analiza.
4. Se desprende de las simulaciones que se han realizado en el presente trabajo que las regiones de mayor precipitación en el territorio nacional son las que presentan cadenas montañosas, siendo estas la Sierra Madre, los Cuchumatanes y la Sierra de las Minas.

Con base en las conclusiones anteriores se confirma la hipótesis postulada, i.e. el desarrollo de un modelo climático computacional permite la predicción de la precipitación sobre el territorio de Guatemala.

18. Impacto esperado

El impacto directo de este proyecto es la evaluación cuantitativa de la interacción entre la atmósfera y el territorio local, que da como resultado los patrones de temperatura y precipitación que son observados. Tal evaluación es de crucial importancia para poder calcular los índices de eventos extremos, que permiten la estimación del impacto y vulnerabilidad del territorio nacional ante el cambio climático. Por tal motivo, el beneficio es para toda la población que habita en el territorio guatemalteco.

Por otra parte, este tipo de investigación contribuye a la rama de la física atmosférica en la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas de la USAC. Esta es un área de la física y la matemática aplicada que, junto con la parte computacional, tienen el potencial de dirigir a los estudiantes en líneas de investigación aplicada que benefician a la sociedad guatemalteca en un mediano plazo.

La producción científica de la Universidad de San Carlos en las áreas de física y matemática es relativamente baja. Otro factor de impacto positivo que tendría este proyecto para la comunidad académica local es posicionar a dicha casa de estudios en el área mencionada de la investigación científica.

19. Referencias

- Arriaga-Ramirez, S., & Cavazos, T. (2010). Regional trends of daily precipitation indices in northwest Mexico and southwest United States. *Wiley Online Library*, 115(D14). doi:10.1029/2009JD013248
- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A., Frei, C., Goyette, S., . . . Koffi, B. (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic change*, 81, 71-95. doi:10.1007/s10584-006-9226-z
- Brown, S. A., Folk, M., Goucher, G., Rew, R., & Dubois, P. F. (1993). Software for portable scientific data management. *Computers in Physics*, 7, 304-308. doi:10.1063/1.4823180
- Caldwell, P. (2010). California wintertime precipitation bias in regional and global climate models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 2147-2158. doi:10.1175/2010JAMC2388.1
- Coppola, E., Giorgi, F., Raffaele, F., Fuentes-Franco, R., Giuliani, G., Llopert-Pereira, M., . . . Torma, C. (2014). Present and future climatologies in the phase I CREMA experiment. *Climatic change*, 125, 23-38. doi:10.1007/s10584-014-1137-9
- Courtier, P., Andersson, E., Heckley, W., Vasiljevic, D., Hamrud, M., Hollingsworth, A., . . . Pailleux, J. (1998). The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). I: Formulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124, 1783-1807. doi:10.1002/qj.49712455002
- Emanuel, K. A. (1991). A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48, 2313-2329. doi:10.1175/1520-0469(1991)048<2313:ASFRCC>2.0.CO;2
- Emanuel, K. A., & Živković-Rothman, M. (1999). Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56, 1766-1782. doi:10.1175/1520-0469(1999)056<1766:DAEOAC>2.0.CO;2
- García-Bustamante, E., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Xoplaki, E., Luterbacher, J., Jiménez, P. A., . . . Lucio-Eceiza, E. E. (2013). Relationship between wind power production and North Atlantic atmospheric circulation over the northeastern Iberian Peninsula. *Climate dynamics*, 40, 935-949. doi:10.1007/s00382-012-1451-8
- Gbobaniyi, E., Sarr, A., Sylla, M. B., Diallo, I., Lennard, C., Dosio, A., . . . Hewitson, B. (2014). Climatology, annual cycle and interannual variability of precipitation and temperature in CORDEX simulations over West Africa. *International journal of climatology*, 34, 2241-2257. doi:10.1002/joc.3834
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and planetary change*, 63, 90-104. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005
- Giorgi, F., & Marinucci, M. R. (1996). A investigation of the sensitivity of simulated precipitation to model resolution and its implications for climate studies. *Monthly*

- Weather Review*, 124, 148-166. doi:10.1175/1520-0493(1996)124<0148:AIOTSO>2.0.CO;2
- Giorgi, F., Coppola, E., Raffaele, F., Diro, G. T., Fuentes-Franco, R., Giuliani, G., . . . Torma, C. (2014). Changes in extremes and hydroclimatic regimes in the CREMA ensemble projections. *Climatic change*, 125, 39-51. doi:10.1007/s10584-014-1117-0
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., . . . Giuliani, G. (2012). RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52, 7-29. doi:10.3354/cr01018
- Grell, G. A. (1993). Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*, 121, 764-787. doi:10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., ... & Stocker, E. F. (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of hydrometeorology*, 8(1), 38-55. doi:10.1175/JHM560.1
- Janert, P. K. (2010). *Gnuplot in action: understanding data with graphs*. New York: Manning.
- Jones, R. G., Murphy, J. M., & Noguer, M. (1995). Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Quarterly journal of the Royal meteorological society*, 121, 1413-1449. doi:10.1002/qj.49712152610
- Karmalkar, A. V., Bradley, R. S., & Diaz, H. F. (2011). Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections. *Climate dynamics*, 37(3-4), 605. doi:10.1007/s00382-011-1099-9
- Leung, L. R., & Qian, Y. (2003). The sensitivity of precipitation and snowpack simulations to model resolution via nesting in regions of complex terrain. *Journal of Hydrometeorology*, 4, 1025-1043. doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1025:TSOPAS>2.0.CO;2
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12, 1577-1588. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2
- Nobre, P., Siqueira, L. S., de Almeida, R. A., Malagutti, M., Giarolla, E., Castelao, G. P., . . . Costa, M. C. (2013). Climate simulation and change in the Brazilian Climate Model. *Journal of Climate*, 26(17), 6716-6732. doi:10.1175/JCLI-D-12-00580.1
- Rabier, F., McNally, A., Andersson, E., Courtier, P., Uden, P., Eyre, J., . . . Bouttier, F. (1998). The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). II: Structure functions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124, 1809-1829. doi:10.1002/qj.49712455003
- Rauscher, S. A., O'Brien, T. A., Piani, C., Coppola, E., Giorgi, F., Collins, W. D., & Lawston, P. M. (2016). A multimodel intercomparison of resolution effects on precipitation: simulations and theory. *Climate Dynamics*, 47, 2205-2218. doi:10.1007/s00382-015-2959-5

- Rew, R., & Davis, G. (1990). NetCDF: an interface for scientific data access. *IEEE computer graphics and applications*, *10*, 76-82. doi:10.1109/38.56302
- Salathé, E. P., Leung, L. R., Qian, Y., & Zhang, Y. (2010). Regional climate model projections for the State of Washington. *Climatic Change*, *102*, 51-75. doi:10.1007/s10584-010-9849-y
- Small, R. J., Szoeke, D. a., & Xie, S.-P. (2007). The Central American midsummer drought: regional aspects and large-scale forcing. *Journal of Climate*, *20*, 4853-4873. doi:10.1175/JCLI4261.1
- Uppala, S. M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D., Fiorino, M., . . . Kelly, G. A. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *131*, 2961-3012. doi:10.1256/qj.04.176
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (Vol. 92). Academic press.
- Zender, C. S. (2008). Analysis of self-describing gridded geoscience data with netCDF Operators (NCO). *Environmental Modelling & Software*, *23*, 1338-1342. doi:10.1016/j.envsoft.2008.03.004

Listado de los integrantes del equipo de investigación

Mi persona (Enrique Pazos Avalos) es el único miembro de este proyecto de investigación.

Guatemala, 24 de septiembre de 2018

Dr. Enrique Pazos Avalos
Coordinador del proyecto

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador del Programa de Ciencias Básicas

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas