



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

**USO DE RUTAS DE CONCENTRACIÓN  
REPRESENTATIVAS EN UN MODELO CLIMÁTICO  
REGIONAL PARA ANÁLISIS DE CALENTAMIENTO  
GLOBAL**

**Willson Wyller García Morales**

Asesorado por Dr. Enrique Pazos

Guatemala, mayo de 2019



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

**USO DE RUTAS DE CONCENTRACIÓN  
REPRESENTATIVAS EN UN MODELO  
CLIMÁTICO REGIONAL PARA ANÁLISIS DE  
CALENTAMIENTO GLOBAL**

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

**WILLSON WYLLER GARCÍA MORALES**  
ASESORADO POR DR. ENRIQUE PAZOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA**

GUATEMALA, MAYO DE 2019



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



**CONSEJO DIRECTIVO**

DIRECTOR M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera  
SECRETARIO ACADÉMICO M.Sc. Edgar Anibal Cifuentes Anléu

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

EXAMINADOR Lic. Héctor Eduardo Pérez Figueroa  
EXAMINADOR Lic. Gustavo Adolfo Santos Orozco  
EXAMINADOR Lic. Freddy Estuardo Rodríguez Quezada





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



Ref. D.DTG. 004-2019  
Guatemala 20 de mayo de 2019

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: **USO DE RUTAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS EN UN MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PARA ANÁLISIS DE CALENTAMIENTO GLOBAL** presentado por el estudiante universitario **Willson Wyller García Morales**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRIMASE.

MSc. Marcelo Ixquiac  
Director



Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas



# AGRADECIMIENTOS

## **A mis familiares**

A todos los que creyeron en mi por sus palabras de aliento y su apoyo en los momentos más difíciles, en especial a mi prima July que de forma inesperada fue quien me brindó el apoyo más grande en todas las formas que pudiera haberlas necesitado, y a todos los que no creyeron en mi por darme un empuje extra de contradecirlos.

## **A mi madre**

Un hecho que jamás podré negar, a pesar de todo lo bueno y malo, fue ella la persona que más influyó en mi auto confianza al decirme que podía lograr lo que me propusiera.

## **A los científicos de todos los tiempos**

Por su inspiración, ejemplo y todo el conocimiento que han aportado a generaciones de personas pensantes.

## **A mis compañeros**

Por su apoyo y colaboración en toda la carrera, sobre todo por todas esas horas de trabajo en equipo en los laboratorios.

## **A mis auxiliares**

Por el apoyo y el conocimiento compartido, en especial al ahora Lic. Rodrigo de León Ardón de quien aprendí mucho y siempre tuvo tiempo para ayudarme.

## **A mis profesores**

De la Universidad por todo el conocimiento compartido, en especial a todos los profesores de la Carrera de Física ya que además de conocimiento pudieron transmitir la pasión por la ciencia con la que tanto nos identificamos.

## **A mi asesor**

Por su paciencia, esmero, capacidad y profesionalismo que tanto lo caracteriza; aun cuando admiro a muchos de mis profesores, su didáctica y dedicación a la ciencia no me dejó otra alternativa que solicitar su asesoría.

## DEDICATORIA

A la Física y todas aquellas ciencias que nos hacen cuestionar paradigmas, refutar teorías y creencias, crear lo que la imaginación limite y descubrir lo que nadie más ve.



# ÍNDICE GENERAL

|  |            |
|--|------------|
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>                                       | <b>IV</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>  | <b>V</b>   |
| <b>OBJETIVOS</b>   | <b>VII</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>  | <b>IX</b>  |
| <b>1. CONCEPTOS DE FÍSICA ATMOSFÉRICA</b>                      | <b>1</b>   |
| 1.1. Equilibrio térmico . . . . .                              | 2          |
| 1.2. Composición química de la atmósfera . . . . .             | 3          |
| 1.3. Gas ideal . . . . .                                       | 4          |
| 1.4. Equilibrio hidrostático . . . . .                         | 5          |
| 1.5. Ecuaciones de movimiento de la atmósfera . . . . .        | 6          |
| 1.6. Gases de invernadero . . . . .                            | 9          |
| <b>2. MODELO CLIMÁTICO REGIONAL</b>                            | <b>11</b>  |
| 2.1. Componentes . . . . .                                     | 12         |
| 2.2. Radiación . . . . .                                       | 12         |
| 2.3. Superficie terrestre . . . . .                            | 13         |
| 2.4. Esquema de precipitación a gran escala . . . . .          | 14         |
| 2.5. Datos históricos EIN15 . . . . .                          | 15         |
| 2.6. Ruta de concentración representativa 8.5 . . . . .        | 15         |
| <b>3. SIMULACIONES</b>   | <b>17</b>  |
| 3.1. Dinámica del clima con datos EIN15 y RCP8.5 . . . . .     | 17         |
| 3.1.1. Mapeo de la velocidad del viento Norte - Sur . . . . .  | 18         |
| 3.1.2. Mapeo de la velocidad del viento Este - Oeste . . . . . | 20         |
| 3.1.3. Mapeo de la temperatura del aire . . . . .              | 22         |
| 3.1.4. Mapeo de la humedad relativa . . . . .                  | 24         |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.1.5. Mapeo de la humedad del suelo . . . . .                            | 26        |
| 3.1.6. Mapeo del flujo de la precipitación . . . . .                      | 28        |
| 3.2. Análisis de la dinámica del clima por año con datos EIN15 y RCP8.5 . | 30        |
| 3.3. Discusión . . . . .  | 33        |
| <b>CONCLUSIONES</b>   | <b>35</b> |
| <b>RECOMENDACIONES</b>  | <b>37</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   | <b>39</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Atmósfera del planeta . . . . .                          | 1  |
| 1.2. Equilibrio hidrostático . . . . .                        | 5  |
| 1.3. Parcela de un fluido . . . . .                           | 7  |
| 1.4. Experimento de fluidos . . . . .                         | 8  |
| 2.1. Rutas de concentración representativas . . . . .         | 16 |
| 3.1. Velocidad del viento meridional EIN15 . . . . .          | 18 |
| 3.2. Velocidad del viento meridional RCP8.5 . . . . .         | 19 |
| 3.3. Anomalía de la velocidad del viento meridional . . . . . | 19 |
| 3.4. Velocidad del viento zonal EIN15 . . . . .               | 20 |
| 3.5. Velocidad del viento zonal RCP8.5 . . . . .              | 21 |
| 3.6. Anomalía de la velocidad del viento zonal . . . . .      | 21 |
| 3.7. Temperatura del aire EIN15 . . . . .                     | 22 |
| 3.8. Temperatura del aire RCP8.5 . . . . .                    | 23 |
| 3.9. Anomalía de la temperatura del aire . . . . .            | 23 |
| 3.10. Humedad relativa EIN15 . . . . .                        | 24 |
| 3.11. Humedad relativa RCP8.5 . . . . .                       | 25 |
| 3.12. Anomalía de la humedad relativa . . . . .               | 25 |
| 3.13. Humedad del suelo EIN15 . . . . .                       | 26 |
| 3.14. Humedad del suelo RCP8.5 . . . . .                      | 27 |
| 3.15. Anomalía de la humedad del suelo . . . . .              | 27 |
| 3.16. Flujo de la precipitación EIN15 . . . . .               | 28 |
| 3.17. Flujo de la precipitación RCP8.5 . . . . .              | 29 |
| 3.18. Anomalía del flujo de la precipitación . . . . .        | 29 |
| 3.19. Comparativo velocidad del viento del Sur . . . . .      | 30 |
| 3.20. Comparativo velocidad del viento del Oeste . . . . .    | 31 |
| 3.21. Comparativo temperatura del aire . . . . .              | 31 |
| 3.22. Comparativo humedad relativa . . . . .                  | 32 |

|   |    |
|---|----|
| 3.23. Comparativo humedad del suelo . . . . .                   | 32 |
| 3.24. Comparativo del flujo de la precipitación total . . . . . | 33 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Constituyentes de la atmósfera . . . . . | 3  |
| 1.2. Albedo por tipo de superficie . . . . .  | 10 |



# OBJETIVOS

## General

Obtener un análisis comparativo entre dos simulaciones dinámicas del clima, una con datos históricos y otra con un escenario futuro de incremento de gases de invernadero, que es la llamada ruta de concentración representativa RCP8.5.

## Específicos

1. Simular 10 años de 01/01/2006 a 31/12/2015 utilizando el modelo climático regional RegCM con datos históricos proporcionados por ERA Interim, en la región de Guatemala.
2. Simular 10 años de 01/01/2016 a 31/12/2025 utilizando el modelo climático regional RegCM con radiación aumentada en  $8.5 \text{ W/m}^2$  estipulado en la ruta de concentración representativa RCP8.5 utilizando las simulaciones climáticas HadGEM2.
3. Calcular la media por década cerca de la superficie de las variables: viento del Sur, viento del Oeste, temperatura, humedad, humedad relativa y precipitación, tanto de datos históricos comprendidos del año 2006 al año 2015 como de RCP8.5 comprendido del año 2016 al año 2025 en la región de Guatemala.
4. Calcular la media anual y promedio espacial en la superficie de viento del Sur, viento del Oeste, temperatura, humedad, humedad relativa y precipitación de ambos escenarios.



# INTRODUCCIÓN

El Modelo Climático Regional RegCM es un modelo matemático diseñado para simular y predecir la dinámica del clima. Por más de 15 años el RegCM ha utilizado datos de todo el globo recopilada por diferentes organizaciones, lo cual hace de él un modelo eficiente, utilizado tanto para pronósticos futuros como para simular las condiciones de eras pasadas.

Nos interesa simular para dos escenarios, el análisis del clima durante 10 años, de 01/01/2006 a 31/12/2015 con datos históricos y así determinar el comportamiento de la temperatura, precipitación y viento en la región de Guatemala y parte de sus alrededores. Y el análisis del clima durante 10 años de 01/01/2016 a 31/12/2025, con condiciones de aumento de gases de invernadero, utilizando la ruta de concentración representativa 8.5 (RCP8.5), las cuales aumentan la radiación en  $8.5 \text{ W/m}^2$  en un escenario ficticio pero posible.

Con el RegCM utilizamos datos históricos y datos de RCP8.5 para obtener el promedio anual y así comparar los distintos resultados, también promediamos por década y a su vez realizamos un promedio espacial que nos devuelve un valor único por tiempo y región.

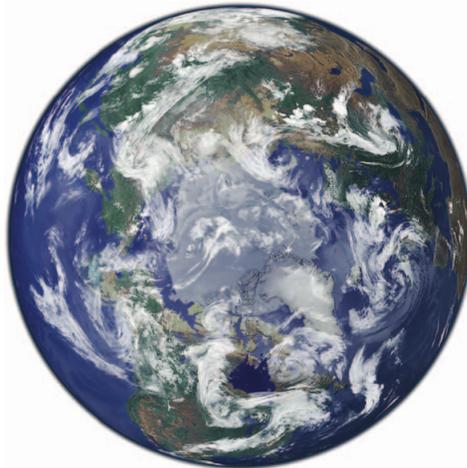
Los resultados de temperatura son más altos en el escenario RCP8.5 que en el escenario histórico, a diferencia de la precipitación y el viento que tienen magnitudes más bajas, cambiando significativamente el clima en un escenario con condiciones de radiación aumentadas, dando como conclusión la relación directa entre el aumento de gases de invernadero y el calentamiento global.



# 1. CONCEPTOS DE FÍSICA ATMOSFÉRICA

La circulación de la atmósfera es por sí compleja, por la composición química, la gran cantidad de factores que la afectan, así como por las escalas espaciales o de tiempo que se pueden usar para el estudio donde a veces es importante y hasta necesario considerar grandes períodos de siglos o milenios y en otras ocasiones en períodos de días u horas. Sin embargo para poder comprender este comportamiento es necesario tener un amplio conocimiento de conceptos básicos de la física que dan explicación a ciertos fenómenos de forma individual y específica y dan lugar a los pilares que explican la dinámica de la atmósfera.

Para realizar un estudio de la atmósfera es necesario recurrir a mecánica de fluidos, de sólidos, electrodinámica y principalmente termodinámica, ya que se deben tomar en cuenta todos los factores que influyen en su comportamiento.



**Figura 1.1.** Una vista del planeta desde el espacio tomada por la NASA. Fuente: Imagen tomada de [12]

## 1.1. Equilibrio térmico

Primero definiremos la temperatura como una magnitud escalar que se relaciona con la energía interna de un objeto o sistema, específicamente es la energía cinética de todas las partículas del sistema. Un sistema como el agua tiene partículas microscópicas que están en movimiento, si comparamos el agua líquida con el agua sólida es decir hielo, las partículas del líquido tendrán más movimiento que las partículas del sólido. Con esto concluimos que conforme las partículas tienen mayor movimiento tendrán mayor energía cinética y a su vez mayor temperatura.

Consideremos qué sucede cuando un cuerpo caliente y un cuerpo frío o con menos temperatura que el anterior se colocan en contacto térmico, éstos intercambian energía, debido a que el calor transferido es tránsito de energía, el cual siempre fluirá del cuerpo más caliente al cuerpo más frío o con menos temperatura. Al cabo de un tiempo los dos cuerpos llegan a tener la misma temperatura, en ese momento ya no hay intercambio de energía.

Este concepto está bien definido en la ley cero de la termodinámica que dice que si un objeto A está en equilibrio térmico con un objeto C y un objeto B también está en equilibrio térmico con el mismo objeto C, el objeto A y el objeto B están también en equilibrio térmico. Esto nos dice que sin importar la cantidad de cuerpos que hayan involucrados en el intercambio de energía, ésta quedará distribuida de forma homogénea entre todos los cuerpos que estén en contacto térmico.

Una experiencia que obtenemos de la vida real es cuando nos quemamos con algo caliente, esto se debe a que el objeto caliente al entrar en contacto con nosotros nos transfiere su energía la cual si es muy elevada tiende a dolernos. Si es moderada simplemente nos brinda un calor templado, como es el objetivo de la calefacción que nos transfiere calor por medio del aire que al entrar en contacto con nuestro cuerpo entramos en equilibrio térmico con todas las moléculas de aire que nos rodean. De igual manera nos sucede cuando entramos en contacto con algo muy frío como el hielo, nos provoca un dolor semejante al anterior pero esta vez es por pérdida de energía, puesto que el objeto con menos temperatura absorbe más calor de nosotros, por esto deducimos que mientras el objeto tenga menos temperatura o esté más frío más energía absorberá [2].

## 1.2. Composición química de la atmósfera

El aire es una mezcla de gases permanentes ( $N_2$ ,  $O_2$ ) ambos en constante proporción con menores constituyentes como se muestra en la tabla 1.1. El peso molecular de la mezcla que compone el aire es de 28.97, por lo que 22.4 litros de aire a temperatura y presión estándar, es decir  $T = 273$  K,  $p = 1013$  hPa, pesa 28.97 g.

La composición del aire está suministrada directamente de elementos desde el interior de la Tierra y de la presencia de vida en la superficie, tanto animales como plantas. La fotosíntesis por las plantas crea  $O_2$ , los compuestos nitrogenados de los organismos vivos se devuelven a la atmósfera como  $N_2$ . Dos de los constituyentes menores más importantes son  $H_2O$  y  $CO_2$ , el papel que desempeñan es central en el control de la temperatura de la superficie de la Tierra.

El vapor de agua atmosférico está presente en un 5 % por volumen, es principalmente el resultado de la evaporación de la superficie del océano. El vapor de agua es de gran importancia en la transferencia de radiación porque absorbe y emite fuertemente en la región del espectro infrarrojo que es donde más radiación térmica o calor hay, de esta manera la Tierra irradia energía de regreso al espacio.

El  $CO_2$  se regula en la atmósfera por medio de la fotosíntesis y la respiración, sin embargo en el mundo actual el desarrollo industrial crea un aumento de este constituyente, se necesita un aumento en áreas verdes para que la fotosíntesis contrarreste este efecto.

**Tabla 1.1.** Los más importantes constituyentes de la atmósfera (ppm, ppb, ppt) = partes por (millón, billón, trillón). Fuente: tomada de [12].

| Especies Químicas | Peso Molecular ( $g\ mol^{-1}$ ) | Proporción por Volumen | Especies Químicas | Peso Molecular ( $g\ mol^{-1}$ ) | Proporción por Volumen |
|-------------------|----------------------------------|------------------------|-------------------|----------------------------------|------------------------|
| $N_2$             | 28.01                            | 78 %                   | $O_3$             | 48.00                            | ~500 ppb               |
| $O_2$             | 32.00                            | 21 %                   | $N_2O$            | 44.01                            | 310 ppb                |
| Ar                | 39.95                            | 0.93 %                 | CO                | 28.01                            | 120 ppb                |
| $H_2O$ (vapor)    | 18.02                            | ~0.5 %                 | $NH_3$            | 17.03                            | ~100 ppb               |
| $CO_2$            | 44.01                            | 380 ppm                | $NO_2$            | 46.00                            | ~1 ppb                 |
| Ne                | 20.18                            | 19 ppm                 | $CCl_2F_2$        | 120.91                           | 480 ppt                |
| He                | 4.00                             | 5.2 ppm                | $CCl_3F$          | 137.37                           | 280 ppt                |
| $CH_4$            | 16.04                            | 1.7 ppm                | $SO_2$            | 64.06                            | ~200 ppt               |
| Kr                | 83.8                             | 1.1 ppm                | $H_2S$            | 34.08                            | ~200 ppt               |
| $H_2$             | 2.02                             | ~500 ppb               | AIR               | 28.97                            |                        |

### 1.3. Gas ideal

La ley del gas ideal fue encontrada a partir de la experimentación, los experimentos con gases muestran que la presión  $p$  de un volumen  $V$  de gas depende de su temperatura  $T$ . Una cantidad fija de gas con temperatura constante obedece a

$$p \propto \frac{1}{V}. \quad (1.1)$$

Esta ley es más conocida como la ley de Boyle. Ahora dicha cantidad de gas con presión constante

$$V \propto T. \quad (1.2)$$

El resultado es conocido como la ley de Charles con la temperatura medida en Kelvin. Luego si mantenemos el volumen constante

$$p \propto T. \quad (1.3)$$

Esta última parte es conocida como la ley de Gay-Lussac. Ahora estas tres leyes pueden combinarse para formar

$$pV \propto T. \quad (1.4)$$

Lo que falta es tomar en cuenta la cantidad de moléculas  $N$  que conforman la muestra de gas

$$pV = Nk_B T. \quad (1.5)$$

Donde la constante necesaria para formar la ecuación se llama constante de Boltzmann [2].

Otra forma de expresar el comportamiento de un gas ideal es por medio de la ecuación de estado.

La ecuación de estado de un sistema compuesto de una cierta cantidad de gas ocupando un volumen  $V$  a una temperatura  $T$  y presión  $p$  puede ser expresado aproximadamente por una simple ley analítica.

El que un gas real pueda ser considerado como ideal depende del error admisible en un cálculo determinado. A presiones inferiores a dos veces la presión atmosférica normal un gas real puede considerarse como un gas ideal sin introducir un error superior a algunos puntos porcentuales. Incluso en el caso de un vapor saturado en

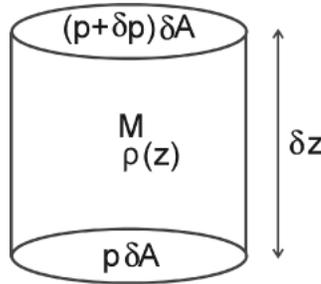
equilibrio con su líquido, si la presión de vapor es baja, puede utilizarse con poco error la ecuación de estado del gas ideal [15]

$$p = \rho RT, \quad (1.6)$$

donde  $R$  es la constante universal de los gases ideales.

## 1.4. Equilibrio hidrostático

Si la atmósfera está en equilibrio, entonces la presión a cualquier nivel depende del peso del fluido sobre ese nivel. Este balance es llamado equilibrio hidrostático.



**Figura 1.2.** Una columna vertical de aire de densidad  $\rho$ , área  $\delta A$ , altura  $\delta z$  y masa  $M = \rho \delta A \delta z$ . La presión en la superficie inferior es  $p$ , la presión en la superficie superior es  $p + \delta p$ . Fuente: Imagen tomada de [12]

Considere la figura 1.2 la cual representa una columna vertical de aire donde tenemos un área de sección transversal  $\delta A$  y una altura  $\delta z$ . La presión y la densidad dependerán de la altura  $z$ , es decir  $p(z)$  y  $\rho(z)$ , generalmente estas funciones pueden depender también de  $x$ ,  $y$ ,  $t$ , para simplificar solamente utilizaremos  $z$ . Si en la superficie inferior del cilindro la presión es  $p_i = p(z)$  entonces la presión en la superficie superior del cilindro es

$$P_s = p(z + \delta z), \quad (1.7)$$

$$P_s = p(z) + \delta p. \quad (1.8)$$

Donde  $\delta p$  es el cambio de la presión desde  $z$  a  $z + \delta z$ . Asumiendo  $\delta z$  muy pequeño

$$\delta p = \frac{\partial p}{\partial z} \delta z. \quad (1.9)$$

Ahora la masa del cilindro es

$$M = \rho \delta A \delta z. \quad (1.10)$$

Si el cilindro de aire no presenta aceleración entonces su sumatoria de fuerzas debe ser cero.

1. Fuerza gravitacional

$$F_g = -gM = -g\rho\delta A\delta z. \quad (1.11)$$

2. Fuerza de presión actuando en la superficie superior

$$F_s = -(p + \delta p)\delta A. \quad (1.12)$$

3. Fuerza de presión actuando en la superficie inferior

$$F_i = -p\delta A. \quad (1.13)$$

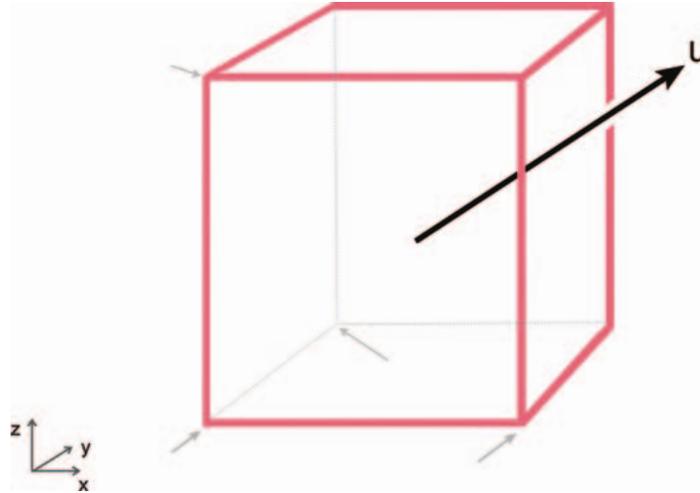
Igualando la fuerza neta  $F_g + F_s + F_i$  a cero resulta  $\delta p + g\rho\delta z = 0$ , y usando la ecuación 1.9 obtenemos

$$\frac{\delta p}{\delta z} + g\rho = 0. \quad (1.14)$$

## 1.5. Ecuaciones de movimiento de la atmósfera

Para poder analizar la dinámica de la atmósfera es necesario contar con una ecuación que tome en consideración todos los parámetros que pueden afectarla, tomaremos conceptos ya mencionados en este capítulo como el equilibrio hidrostático y la ecuación de estado del gas ideal para definir las ecuaciones del movimiento de la atmósfera que simplifica bastante el análisis puesto que en la realidad la atmósfera no se comporta de forma hidrostática; profundizamos en los conceptos físicos dejando al lector la libertad de corroborar los conceptos matemáticos.

Como todo análisis partiremos simplificando el tema, suponiendo el movimiento de una parcela de un fluido, en nuestro caso de aire en forma de un cubo, en un sistema cartesiano y con dimensiones muy pequeñas  $\delta x \delta y \delta z$ , centrado en el origen de  $(x, y, z)$  con una velocidad  $\mathbf{u}$  y con conservación de masa dentro de la parcela como se muestra en la figura 1.3.



**Figura 1.3.** Una parcela de fluido en forma de un cubo con velocidad  $\mathbf{u}$ . Fuente: Imagen tomada de [12]

Primero definiremos el vector velocidad de la parcela de viento como

$$\mathbf{u} = (u, v, w), \quad (1.15)$$

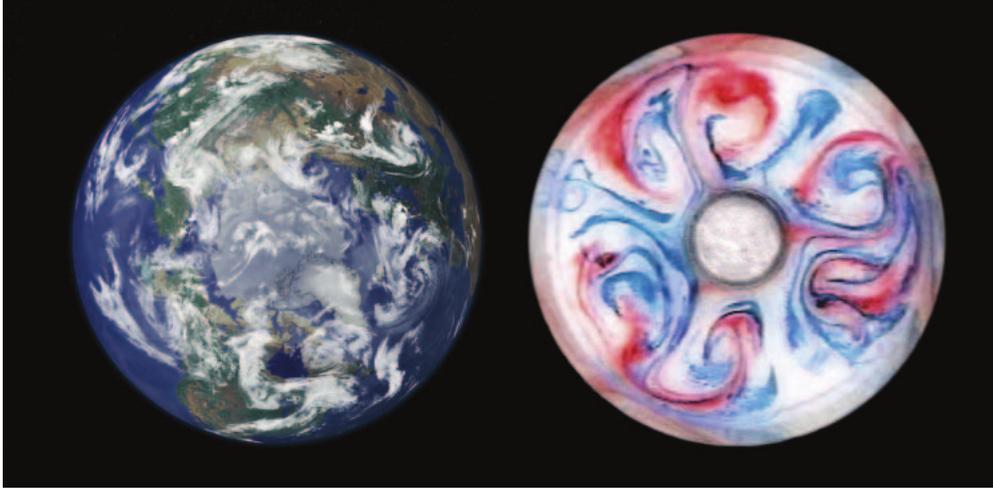
que en física atmosférica son las componentes del viento, donde  $u$  es la velocidad Norte-Sur más conocido como los vientos del Sur,  $v$  la velocidad Oeste-Este comúnmente llamado los vientos del Oeste y  $w$  la velocidad vertical. Su derivada tanto espacial como temporal

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \frac{\delta\mathbf{u}}{\delta t} + u\frac{\delta\mathbf{u}}{\delta x} + v\frac{\delta\mathbf{u}}{\delta y} + w\frac{\delta\mathbf{u}}{\delta z}. \quad (1.16)$$

En el análisis de un sistema tan complejo se realizan experimentos de fluidos en 2D para estudiar la base de fenómenos como el efecto coriolis y la aceleración centrípeta, y así tener una referencia básica del comportamiento de la atmósfera, después se hace una adaptación para un modelo esférico, como se muestra en la figura 1.4.

En el estudio de la atmósfera como de cualquier fenómeno tenemos dos perspectivas, la inercial y la rotacional, el marco inercial es el punto de referencia externo a los sucesos y repercusiones del fenómeno estudiado y el marco rotacional es el punto de referencia interno que se ve afectado de igual medida que el mismo fenómeno, este último es el que nos interesa para un estudio de la atmósfera puesto que nuestro

estudio lo realizamos desde la Tierra.



**Figura 1.4.** Un experimento en 2D de un fluido para el estudio de efectos como coriolis o la aceleración centrípeta. Fuente: Imagen tomada de [12]

Para obtener la ecuación de movimiento debemos incluir todas las fuerzas involucradas, mediante un análisis de las dimensionales es más conveniente expresarlas como aceleraciones de dichas fuerzas. La ecuación de la atmósfera en el marco rotacional es

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} + \frac{1}{\rho}\nabla p + g\hat{\mathbf{z}} - \Omega \times \Omega \times \mathbf{r} + 2\Omega \times \mathbf{u} = F, \quad (1.17)$$

- $\frac{D\mathbf{u}}{Dt}$  es la aceleración debido al movimiento de la parcela de aire.
- $g\hat{\mathbf{z}}$  es la aceleración gravitacional.
- $\frac{1}{\rho}\nabla p$  es el gradiente de presión.
- $-\Omega \times \Omega \times \mathbf{r}$  es la aceleración centrífuga.
- $2\Omega \times \mathbf{u}$  es la aceleración de coriolis.
- $F$  es una fuerza de fricción por unidad de masa.

Ahora podemos expresar el término de la aceleración de coriolis como el gradiente de un potencial, para luego combinarlo con la expresión  $g\hat{\mathbf{z}}$  también como gradiente del potencial gravitacional  $\nabla(gz)$

$$-\Omega \times \Omega \times \mathbf{r} = \nabla\left(\frac{\Omega^2 r^2}{2}\right), \quad (1.18)$$

$$\phi = gz - \frac{\Omega^2 r^2}{2}. \quad (1.19)$$

Esta combinación del potencial gravitacional con la aceleración centrípeta tiene bastante sentido en nuestro marco rotacional debido al movimiento de la Tierra, en términos del potencial la ecuación queda como

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} + \frac{1}{\rho}\nabla p + \nabla\phi + 2\Omega \times \mathbf{u} = F. \quad (1.20)$$

## 1.6. Gases de invernadero

Son todos aquellos gases atmosféricos que absorben y emiten radiación, principalmente infrarroja la cual es emitida por cualquier cuerpo con temperatura mayor al cero absoluto, estos gases se encuentran y conforman la atmósfera terrestre provocando que la temperatura de la superficie terrestre sea más templada, sin embargo el aumento de estos gases de invernadero entre los cuales podemos mencionar el dióxido de carbono, vapor de agua, metano entre otros, causan un aumento en la temperatura terrestre que deriva en otros cambios climáticos.

El efecto invernadero es la repercusión directa del aumento de gases de invernadero, como su nombre lo sugiere este fenómeno provoca una retención de radiación absorbida por la atmósfera.

Funciona de una forma bastante simple, la radiación recibida por el planeta principalmente del sol es absorbida y emitida de nuevo al espacio, cierta parte de esa radiación emitida se absorbe por los gases de invernadero, de esta forma si aumentamos la proporción de dichos gases en la atmósfera obtenemos más radiación absorbida por ellos provocando una temperatura más alta en la superficie.

La emisión o reflexión de radiación hacia el espacio no es la misma en todo el mundo por lo tanto el efecto invernadero tiene diferentes repercusiones según la zona del planeta, esta emisión la podemos medir en porcentaje de la radiación recibida, a esto le llamamos albedo.

**Tabla 1.2.** Albedo de los más importantes tipos de superficie. Fuente: tomada de [12].

| Tipo de superficie             | Albedo (%) |
|--------------------------------|------------|
| Océano                         | 2-10       |
| Bosque                         | 6-18       |
| Ciudades                       | 14-18      |
| Hierba                         | 7-25       |
| Suelo                          | 10-20      |
| Pradera                        | 16-20      |
| Desierto (arena)               | 35-45      |
| Hielo                          | 20-70      |
| Nube (estrato delgado, grueso) | 30,60-70   |
| Nieve (vieja)                  | 40-60      |
| Nieve (fresca)                 | 75-95      |

## 2. MODELO CLIMÁTICO REGIONAL

El Modelo Climático Regional por su acrónimo en inglés RegCM es un modelo de clima regional desarrollado originalmente sobre la cuarta versión del Modelo de Mesoescala (MM4) del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) y la Universidad del Estado de Pensilvania (PSU), a lo largo de muchos años ha ido actualizándose evolucionando en modelos que cada vez son más precisos, se coordina en la sección de Física del Sistema Terrestre (ESP) del Centro Internacional Abdus Salam de Física Teórica (ICTP), que fomenta el crecimiento de estudios e investigaciones avanzados en países en desarrollo. El sistema es un modelo comunitario, en particular está diseñado para ser utilizado por la comunidad científica en países industrializados y en países en desarrollo. Los científicos de esta red (actualmente suscritos por más de 750 participantes) pueden comunicarse a través de una lista de correo electrónico y a través de talleres científicos regulares, y han sido esenciales para la evaluación y las mejoras secuenciales del modelo, cuenta un código público, de código abierto, fácil de usar y portátil que se puede aplicar a cualquier parte del mundo.

La idea de que los Modelos de Área Limitada (LAM) podrían usarse para estudios regionales fue propuesta originalmente por Dickinson y Giorgi. Esta idea se basó en el concepto de anidamiento unidireccional, en el que los campos meteorológicos a gran escala del Modelo de Circulación General (GCM) proporcionan Condiciones de Borde Lateral meteorológicas (LBC) iniciales y dependientes del tiempo para simulaciones de Modelo de Clima Regional (RCM) de alta resolución, sin retroalimentación del RCM al GCM de conducción

La primera versión (RegCM 1) en 1989 ha estado en constante actualización hasta la última versión (RegCM 4.6.1) en la actualidad. El RegCM ha sido el primer modelo de área limitada desarrollado para la simulación del clima a largo plazo, ha sido utilizado en una amplia gama de estudios regionales sobre el clima, desde estudios de procesos hasta paleoclima y proyecciones climáticas futuras [8].

## 2.1. Componentes

El sistema de modelado RegCM tiene cuatro componentes: el programa encargado de localizar el modelo en una región del mundo Terrain, el programa Condición Inicial, Condiciones de Frontera por sus siglas en inglés ICBC, RegCM y el Postprocesador. Terrain e ICBC son los dos componentes del preprocesador RegCM. Las variables terrestres (incluida la elevación, el uso del suelo y la temperatura de la superficie del mar) y los datos meteorológicos isobáricos tridimensionales se interpolan horizontalmente desde una malla latitud-longitud a un dominio de alta resolución en un Mercator girado (y normal), conforme a Lambert o proyección polar estereográfica. También se realiza la interpolación vertical desde niveles de presión al sistema de coordenadas  $\sigma$  de RegCM. Las superficies  $\sigma$  cercanas al suelo siguen de cerca el terreno, y las superficies  $\sigma$  de mayor nivel tienden a aproximarse a las superficies isobáricas. Dado que la resolución vertical y horizontal y el tamaño de dominio pueden variar, los programas de paquete de modelado emplean dimensiones parametrizadas que requieren una cantidad variable de memoria central, y la cantidad requerida de almacenamiento en el disco duro varía en consecuencia.

## 2.2. Radiación

RegCM4 usa el esquema de radiación del NCAR CCM3 [11]. En pocas palabras, el componente solar, que representa el efecto de  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  y  $O_2$ , sigue la aproximación  $\delta$ -Eddington [11]. Incluye 18 intervalos espectrales de 0.2 a 5  $\mu m$ . La dispersión y absorción de nubes sigue la parametrización de Slingo [13], donde las propiedades ópticas de las gotas de nubes (extinción profundidad óptica, albedo de dispersión simple y parámetro de asimetría) se expresan en términos del contenido de agua líquida de la nube y un radio efectivo de gota. Cuando se forman nubes cúmulos, la cobertura de nubes fraccionarias de la malla es tal que la cobertura total para la columna se extiende desde el nivel base de la nube calculado por el modelo hasta el nivel superior de la nube (calculado asumiendo superposición aleatoria) es una función del espaciado horizontal de la malla. El espesor de la nube se supone que la capa es igual a la de la capa del modelo, y se especifica un contenido diferente de agua en la nube para el medio y nubes bajas.

## 2.3. Superficie terrestre

El Esquema de Transferencia Biosfera-Atmósfera por sus siglas en inglés BATS es un paquete de superficie diseñado para describir el papel de la vegetación y la humedad interactiva del suelo al modificar los intercambios superficie-atmósfera de momento, energía y vapor de agua [6]. El modelo tiene una capa de vegetación, una capa de nieve, una capa de suelo superficial, 10 cm de grosor, 1-2 m de espesor y una tercera capa de suelo profunda de 3 m de espesor. Las ecuaciones de pronóstico se resuelven para las temperaturas de la capa de suelo usando una generalización del método de recuperación de fuerza de Deardoff [5]. La temperatura del dosel y el follaje del dosel se calcula diagnósticamente a través de una formulación de equilibrio de energía que incluye flujos sensibles, radiantes y latentes de calor.

Los cálculos de hidrología del suelo incluyen ecuaciones predictivas para el contenido de agua de las capas del suelo. Estas ecuaciones explican la precipitación, el deshielo, el goteo foliar de la copa, la evapotranspiración, la escorrentía superficial, la infiltración debajo de la zona de la raíz, y el intercambio difusivo de agua entre las capas del suelo. La formulación del movimiento del agua del suelo es obtenido de un ajuste a los resultados de un modelo de suelo de alta resolución Dickinson y las tasas de escorrentía superficial se expresan como funciones de las tasas de precipitación y el grado de saturación de agua del suelo. La profundidad de la nieve es calculada de forma pronosticada a partir de nevadas, deshielo y sublimación. Se supone que la precipitación cae en la forma de nieve si la temperatura del nivel más bajo del modelo está por debajo de 271 K.

El Modelo de Tierra Comunitaria por sus siglas en inglés CLM es el modelo de superficie terrestre desarrollado por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) como parte del Modelo del Sistema Climático de la Comunidad (CCSM). La versión 3.5 de CLM se acopló a RegCM para una opción más detallada de descripción de superficie. CLM contiene cinco posibles capas de nieve con una representación adicional de trazas de nieve y diez capas de suelo espaciadas de forma desigual con soluciones explícitas de temperatura, agua líquida y agua helada en cada capa. Para tener en cuenta la complejidad de la superficie terrestre dentro de una celda de grilla de modelo climático, CLM utiliza un enfoque de mosaico para capturar la heterogeneidad de la superficie. Cada cuadrícula CLM contiene hasta cuatro tipos diferentes de cobertura terrestre (glaciar, humedal, lago, y con vegetación), donde la fracción con vegetación se puede dividir en 17 diferentes tipos de plantas funcionales. Las ecuaciones hidrológicas y de balance de energía se resuelven para cada tipo de

cobertura terrestre y se agregan de nuevo a la cuadrícula nivel.

## 2.4. Esquema de precipitación a gran escala

El esquema de humedad explícita de subgrid (SUBEX) se usa para manejar nubes no convectivas y precipitación resuelta por el modelo. Este es uno de los nuevos componentes del modelo. SUBEX explica la variabilidad de subgrid en nubes al vincular la humedad relativa de la celda de grilla promedio con la fracción de nubes y el agua de la nube siguiendo el trabajo de Sundqvist. La fracción de la celda de la red cubierta por nubes,  $FC$ , está determinada por

$$FC = \sqrt{\frac{RH - RH_{min}}{RH_{max} - RH_{min}}}. \quad (2.1)$$

Donde  $RH_{min}$  es el umbral de humedad relativa en el que las nubes comienzan a formarse, y  $RH_{max}$  es la humedad relativa donde  $FC$  alcanza la unidad. Se asume que  $FC$  es cero cuando  $RH$  es menor que  $RH_{min}$  y la unidad cuando  $RH$  es mayor que  $RH_{max}$ .

La precipitación  $P$  se forma cuando el contenido de agua de la nube excede el umbral de autoconversión  $Q_c^{th}$  de acuerdo con la siguiente relación:

$$P = C_{ppt} \left( \frac{Q_c}{FC} - Q_c^{th} \right) FC. \quad (2.2)$$

Donde  $1/C_{ppt}$  puede considerarse el tiempo característico por el cual las gotas de nubes se convierten en gotas de lluvia. El umbral se obtiene al escalar la ecuación de contenido de agua líquida en la nube mediana de acuerdo con lo siguiente:

$$Q_c^{th} = C_{acs} 10^{-0.49+0.013T}, \quad (2.3)$$

donde  $T$  es la temperatura en grados Celsius, y  $C_{acs}$  es el factor de escala de autoconversión. Se supone que la precipitación cae instantáneamente.

SUBEX también incluye formulaciones simples para la acumulación de gotas de lluvia y la evaporación.

$$P_{acc} = C_{acc} Q P_{sum}, \quad (2.4)$$

donde  $P_{acc}$  es la cantidad de agua de la nube acumulada,  $C_{acc}$  es el coeficiente de la tasa de acreción y  $P_{sum}$  es la precipitación acumulada desde arriba que cae a través de la nube.

$$P_{evap} = C_{evap}(1 - RH)P_{sum}^{1/2}, \quad (2.5)$$

donde  $P_{evap}$  es la cantidad de precipitación evaporada, y  $C_{evap}$  es el coeficiente de velocidad.

## 2.5. Datos históricos EIN15

EIN15 es un conjunto de datos para almacenar registros climáticos, en éstos se encuentra los datos regulares que se han recopilado por décadas, con éstos se ha podido reproducir épocas anteriores, como simulaciones de paleoclima sentando las bases para pronósticos de clima actuales haciendo extrapolaciones, tomando en cuenta el comportamiento histórico de la temperatura, precipitación, viento, entre otros bajo condiciones regulares.

El modelo RegCM utiliza este tipo de conjunto de datos para realizar simulaciones en regiones limitadas en cualquier parte del planeta bajo condiciones regulares, en otras palabras es real y basado en registros históricos, obtenido de la medición directa e indirecta de fenómenos climáticos contemporáneos.

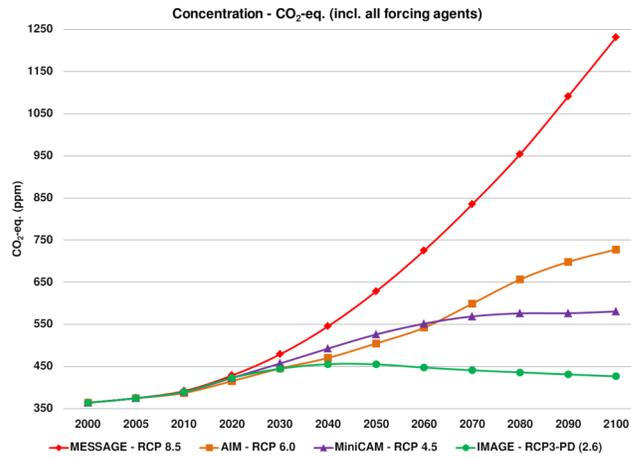
En futuros análisis nos referiremos a este tipo de datos como simulaciones con datos históricos.

## 2.6. Ruta de concentración representativa 8.5

Las Rutas de Concentración Representativas por sus siglas en inglés RCP se denominan rutas de concentración para enfatizar que, si bien se basan en los escenarios existentes en la literatura que tienen supuestos socioeconómicos subyacentes y resultados de emisiones, se seleccionan en función de sus vías de emisión y las concentraciones asociadas de gases radiactivamente activos y aerosoles, y su propósito principal es proporcionar estas vías de concentración a la comunidad de CM para producir nuevas proyecciones de cambio climático.

Existen 4 RCP, los cuales brindan posibles escenarios que se ven afectados por gases de invernadero que causan el fenómeno del calentamiento global, cada uno tiene diferente forzamiento radiativo +2.6 +4.5 +6.0 +8.5 W/m<sup>2</sup>, lo cual les da su nombre a cada ruta, en nuestro caso nos centraremos en la Ruta de Concentración Representativa 8.5 por sus siglas en inglés RCP8.5.

Mientras las otras tres rutas disminuyen en un punto de su trayectoria, RCP8.5 aumenta durante todo el siglo XXI.



**Figura 2.1.** Rutas de concentración representativas: 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente: Imagen tomada de [14]

El escenario RCP8.5 tiene el mayor aumento de radiación ( $+8.5 \text{ W/m}^2$ ) que brinda un posible futuro del clima según el aumento desmesurado de los gases de invernadero emitidos en los próximos años en este escenario que tiene como finalidad representar una producción máxima a nivel industrial y poblacional, aunque se cree que este escenario puede verse con menos probabilidad de ocurrir debido a la cantidad de combustible fósil en la Tierra, así como otros recursos que de igual manera existen en el planeta de forma limitada.

### 3. SIMULACIONES

En las siguientes simulaciones se utilizan parámetros iguales en ambos escenarios, lo cual es necesario sean idénticos para obtener una comparativa más clara.

- La resolución es 25 km por cada punto en la grilla.
- La latitud central es en  $15.25^\circ$ .
- La longitud central es en  $-90.00^\circ$ .
- El número de puntos N/S es 36.
- El número de puntos O/E es 48.
- El número de niveles de elevación es 23.
- El tamaño de paso de simulación es de cada 75 s.
- El núcleo dinámico es no-hidrostático.
- El esquema de precipitación es Emanuel.

Nuestro interés son los archivos SRF.nc que nos dan datos relevantes de la superficie a diferencia de los archivos ATM.nc que brindan datos de todo el volumen de la atmósfera. Estos archivos no son prioridad a analizar debido a que los fenómenos climáticos que más nos interesan son los que podemos percibir en la superficie.

#### 3.1. Dinámica del clima con datos EIN15 y RCP8.5

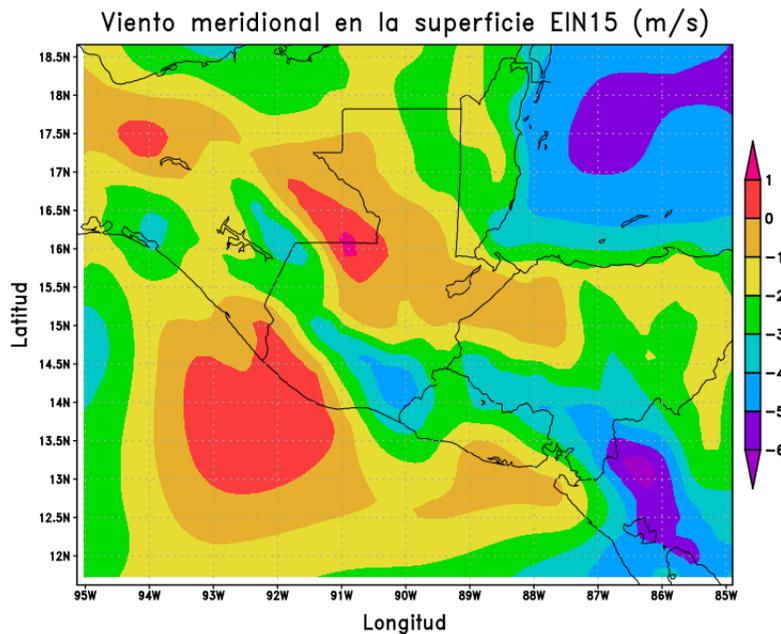
Primero simularemos un periodo de 10 años con datos históricos EIN15 para tener una referencia del comportamiento climático con la concentración real histórica de gases de invernadero. El intervalo de tiempo inicia en 01/01/2006 y termina en 31/12/2015. Luego simularemos durante 10 años para poder apreciar variaciones en el clima con una proyección en un escenario con un aumento de gases de invernadero,

según el escenario RCP8.5. El intervalo de tiempo inicia en 01/01/2016 y termina en 31/12/2025

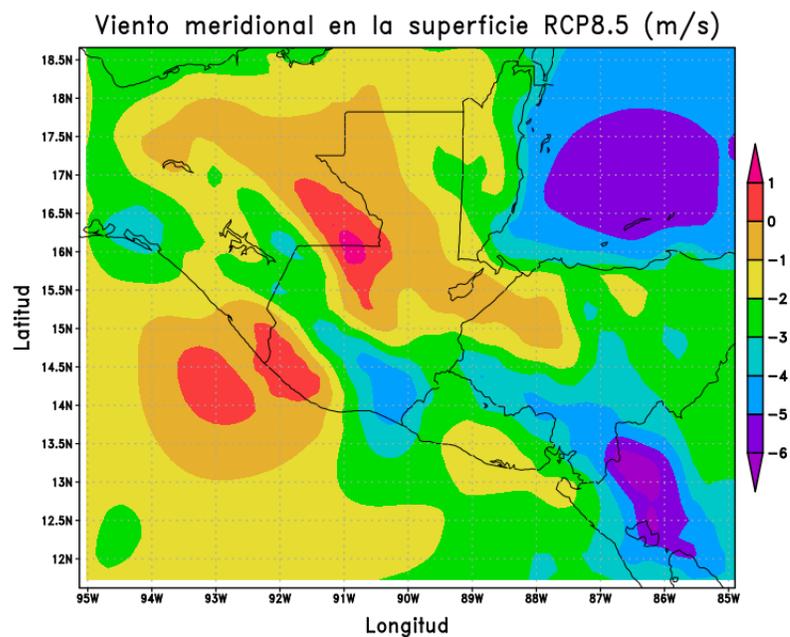
Se analizará los cambios promedios en esos 20 años de las variables más significativas: viento meridional, viento zonal, temperatura del aire cerca del suelo, humedad del suelo, humedad relativa y precipitación. Cada gráfica representa el promedio en el tiempo de la variable, una con datos históricos (EIN15), otra con datos de proyección (RCP8.5) y una última como una anomalía entre ambos datos (RCP8.5 menos EIN15).

### 3.1.1. Mapeo de la velocidad del viento Norte - Sur

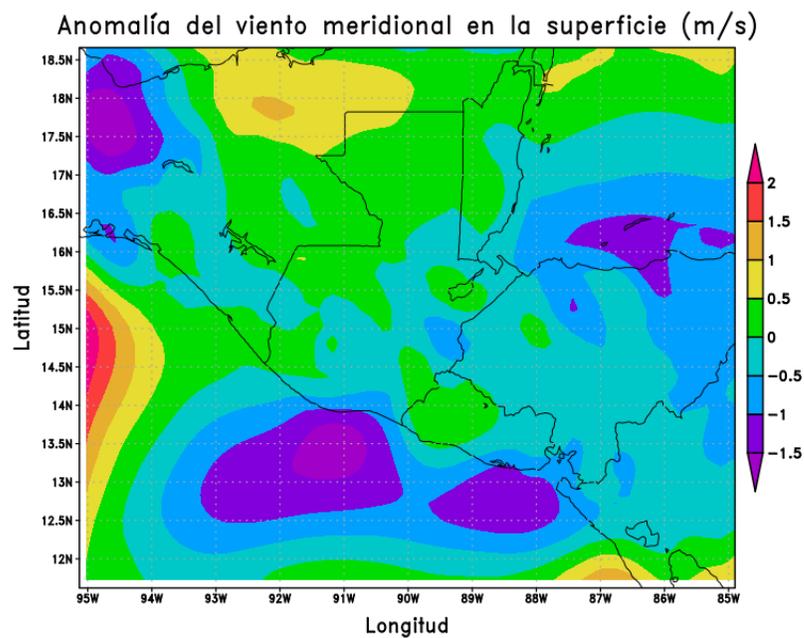
En la figura 3.1 se puede apreciar en el Sur y Oeste de Guatemala vientos de entre 2 y 5 m/s en dirección Sur, mientras en el Norte, centro y Este del país vientos de entre 0 y 2 m/s predominantemente en la misma dirección. La figura 3.2 refleja una tendencia similar en cada región, no obstante debemos recordar que son datos de proyección en el escenario RCP8.5, además de ser de una década más tarde, por tal motivo es necesario la figura 3.3 la cual representa la variación del viento entre ambas simulaciones, se puede observar que es mínima la variación con tan solo 0.5 m/s.



**Figura 3.1.** Velocidad del viento meridional cerca de la superficie del año 2006 al año 2015 con datos EIN15. Fuente: Elaboración propia



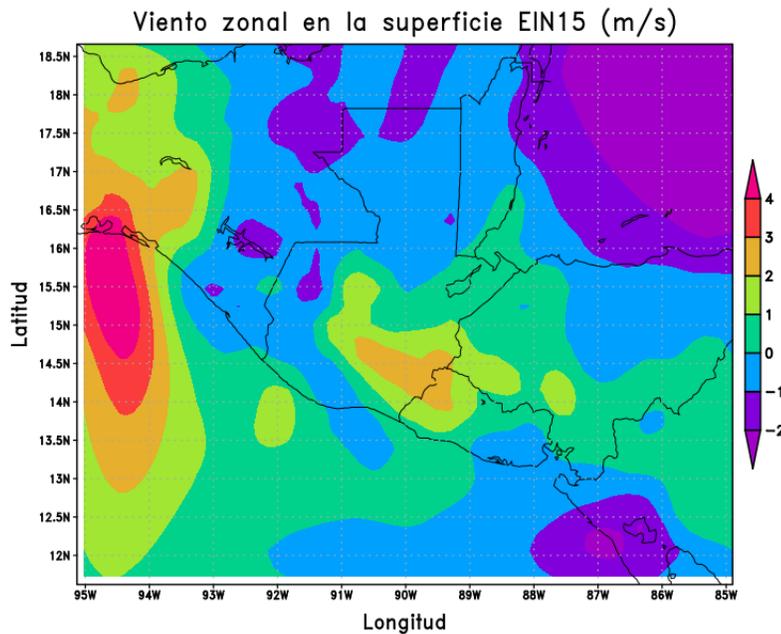
**Figura 3.2.** Velocidad del viento meridional cerca de la superficie del año 2016 al año 2025 con datos RCP8.5. Fuente: Elaboración propia



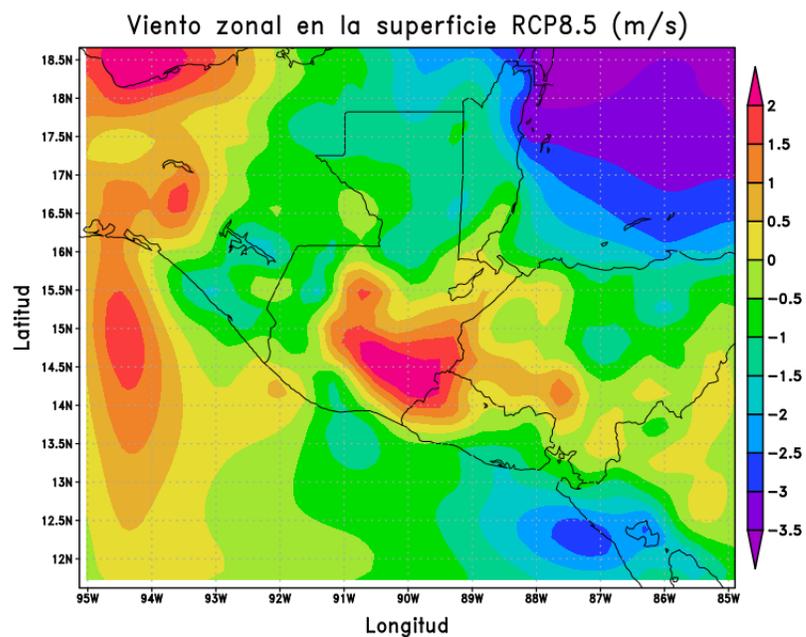
**Figura 3.3.** Anomalía de la velocidad del viento meridional cerca de la superficie. RCP8.5 menos EIN15. Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2. Mapeo de la velocidad del viento Este - Oeste

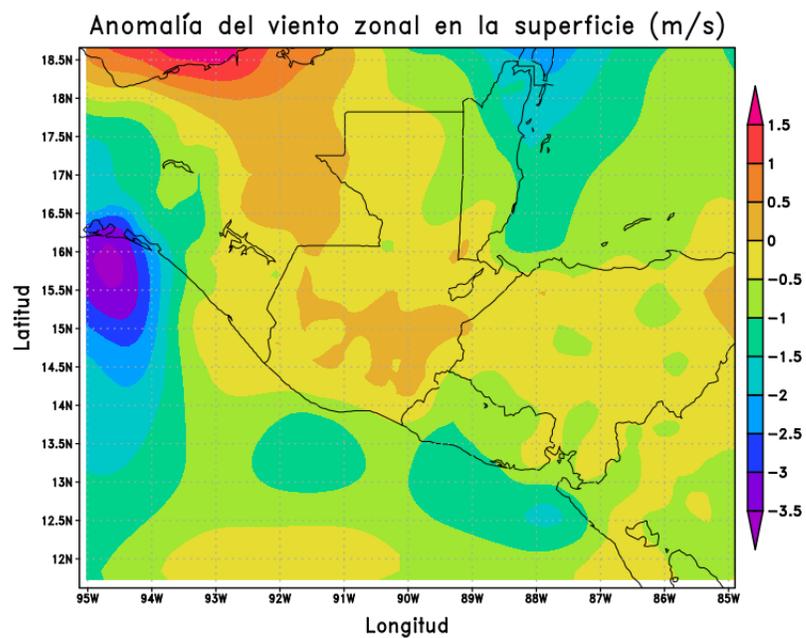
Los vientos del Oeste tienen magnitudes diferentes y de hecho menores a los vientos del Sur, en la figura 3.4 el Oeste, Norte y Sur-Este tienen vientos entre 0 y 2 m/s en dirección Oeste, mientras en el centro, Este, y Sur-Este del país vientos de entre 0 y 3 m/s en la dirección Este. La figura 3.5 también refleja una tendencia similar en cada región, sin embargo son menores, con un rango de 0 a 1 y de 0 a 2 m/s respectivamente, la variación de estas dos décadas representada en la figura 3.6 es mínima con tan solo 0.5 m/s en su mayoría, siendo consistente con los vientos del Sur.



**Figura 3.4.** Velocidad del viento zonal cerca de la superficie del año 2006 al año 2015 con datos EIN15. Fuente: Elaboración propia



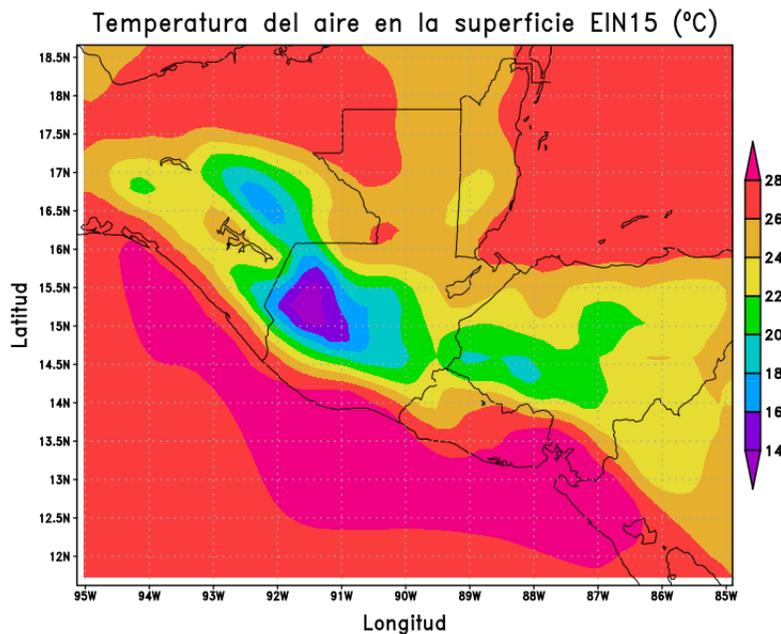
**Figura 3.5.** Velocidad del viento zonal cerca de la superficie del año 2016 al año 2025 con datos RCP8.5. Fuente: Elaboración propia



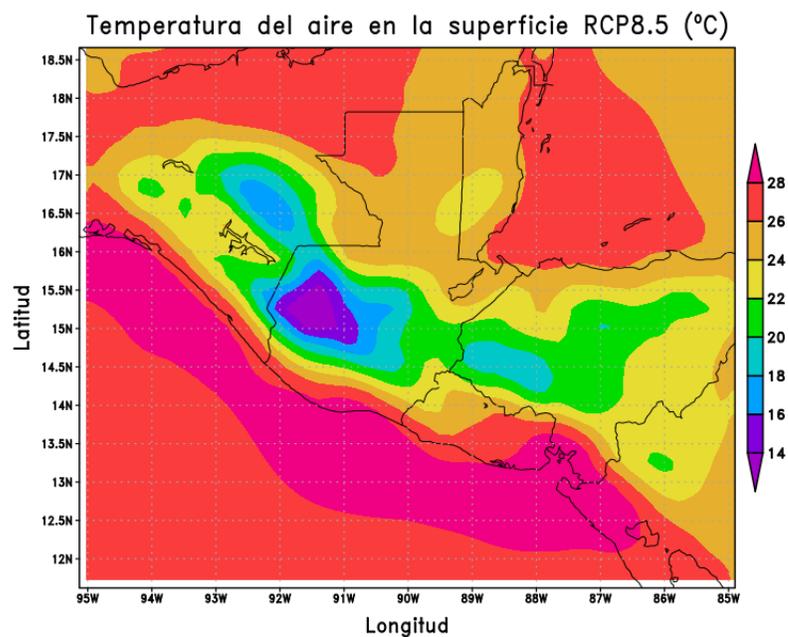
**Figura 3.6.** Anomalia de la velocidad del viento zonal cerca de la superficie. RCP8.5 menos EIN15. Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3. Mapeo de la temperatura del aire

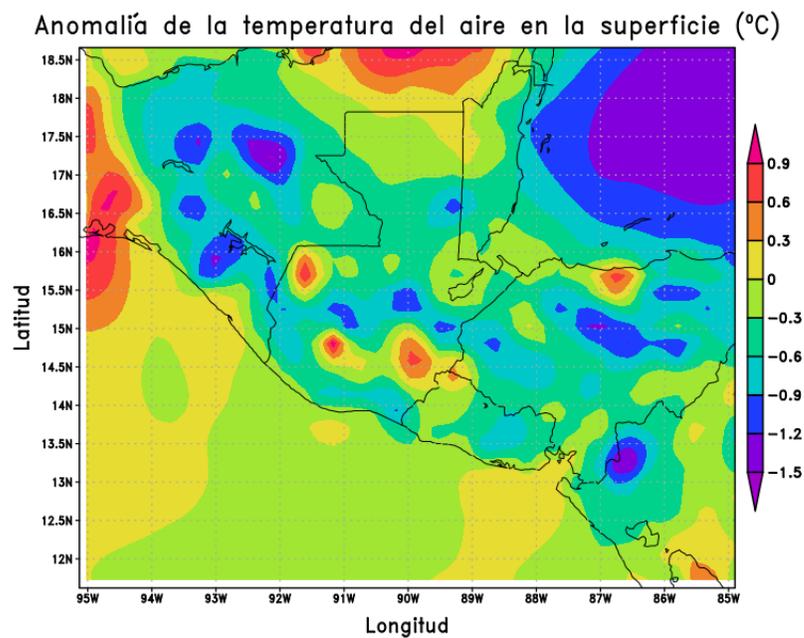
La variable más relacionada al cambio climático es la temperatura, en la figura 3.7 tenemos todo el Norte a una temperatura elevada de 298 a 300 °C, consecuentemente disminuye en trayectoria hacia el Oeste, mientras en la costa Sur del país la temperatura es de 300 a 302 °C. La figura 3.8 posee una tendencia similar con pequeños cambios que son más notorios en la figura 3.9 en las regiones donde las observamos representadas por el color verde hacia colores más fríos nos indica una variación negativa. Es decir que la variación de temperatura en la década del escenario RCP8.5 tuvo una disminución sobre todo en la región conocida como la zona árida, que forma parte del corredor seco centroamericano que llega a ser de hasta 1 °C; en regiones como Nor-Oeste, centro-Sur y Sur-Este tienen un aumento de hasta 1 °C, en otras palabras la zona árida del corredor seco podría estar corriéndose hacia el sur.



**Figura 3.7.** Temperatura del aire cerca de la superficie del año 2006 al año 2015 con datos EIN15. Fuente: Elaboración propia



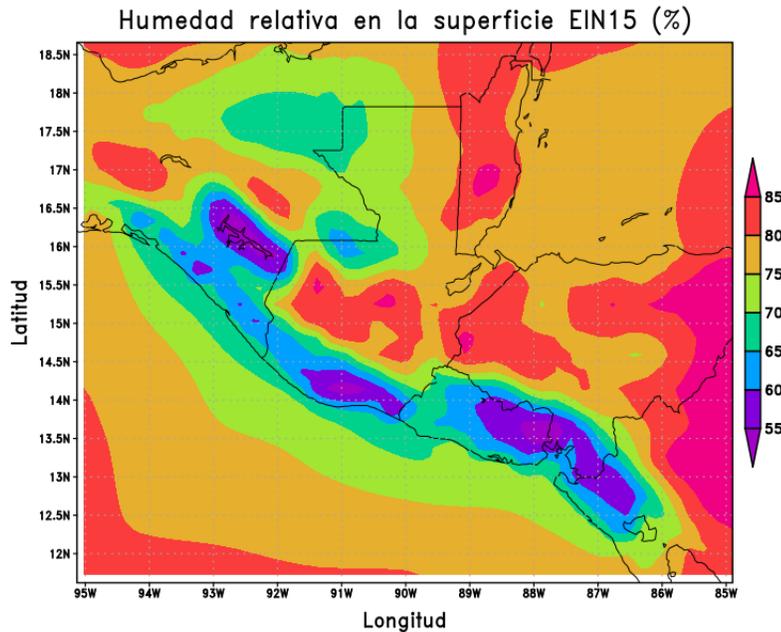
**Figura 3.8.** Temperatura del aire cerca de la superficie del año 2016 al año 2025 con datos RCP8.5. Fuente: Elaboración propia



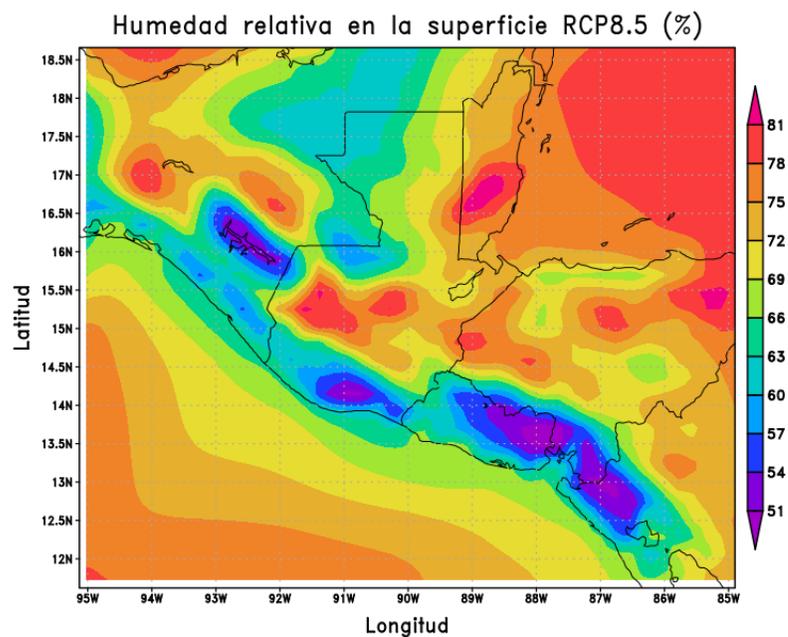
**Figura 3.9.** Anomalía de la temperatura del aire cerca de la superficie. RCP8.5 menos EIN15. Fuente: Elaboración propia

### 3.1.4. Mapeo de la humedad relativa

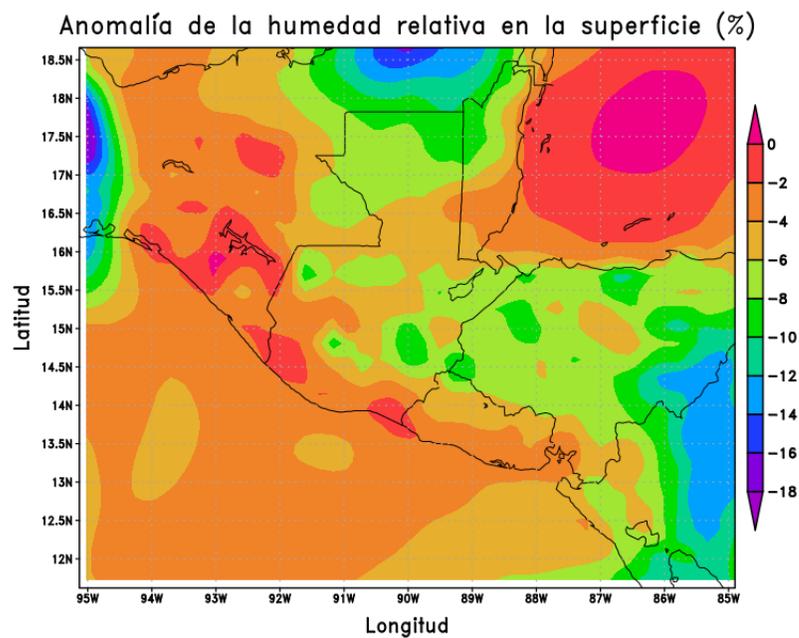
En la figura 3.10 se puede apreciar altos niveles de 75 a 85 % en el centro, Oeste y Este del país, en el norte hay niveles de 70 a 80 %, en el sur de 55 a 65 % siendo estos los niveles más bajos, la figura 3.11 cambia significativamente tomando en cuenta que las variables anteriores mantenían cierta tendencia, la humedad relativa por su parte muestra en el centro, oeste y este de 60 a 81 %, en el norte de 60 a 75 %, en el sur de 51 a 63 % y con la figura 3.12 podemos notar que la variación en general es de 2 a 8 %.



**Figura 3.10.** Humedad relativa cerca de la superficie del año 2006 al año 2015 con datos EIN15. Fuente: Elaboración propia



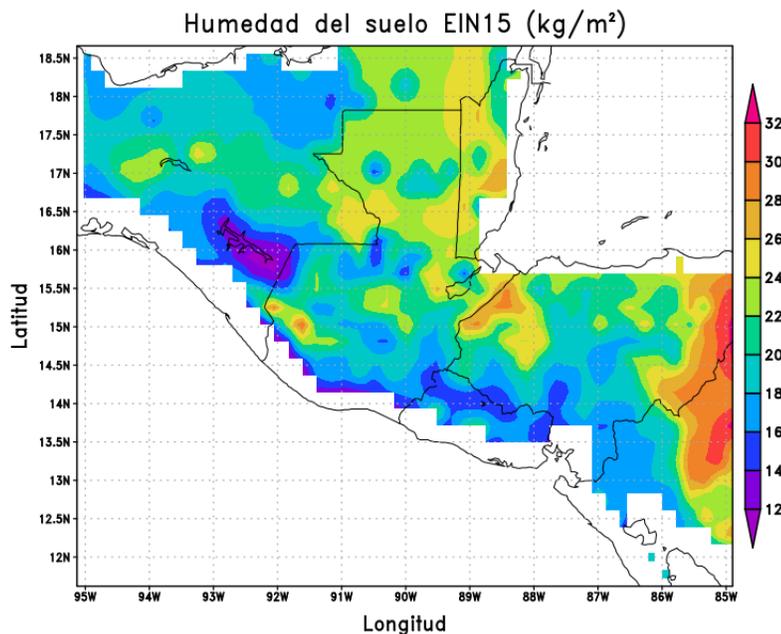
**Figura 3.11.** Humedad relativa cerca de la superficie del año 2016 al año 2025 con datos RCP8.5. Fuente: Elaboración propia



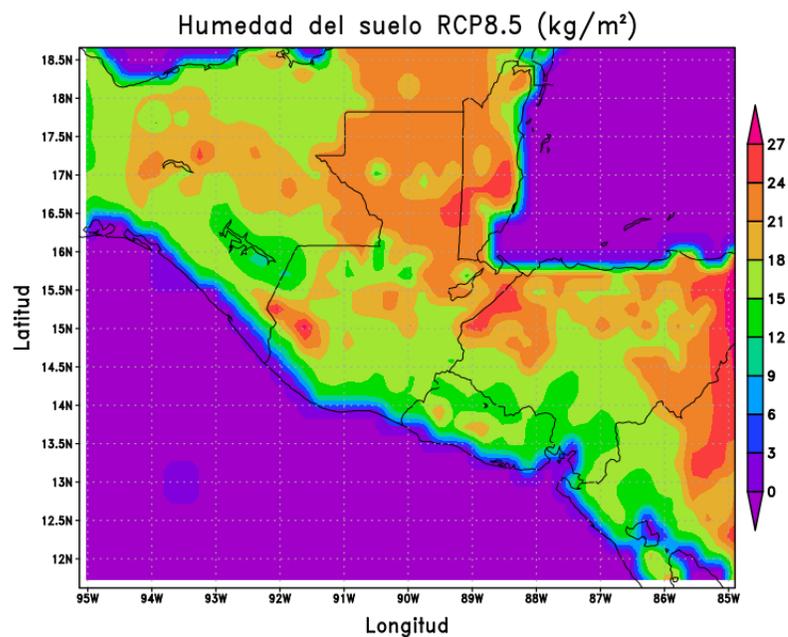
**Figura 3.12.** Anomalía de la humedad relativa cerca de la superficie. RCP8.5 menos EIN15. Fuente: Elaboración propia

### 3.1.5. Mapeo de la humedad del suelo

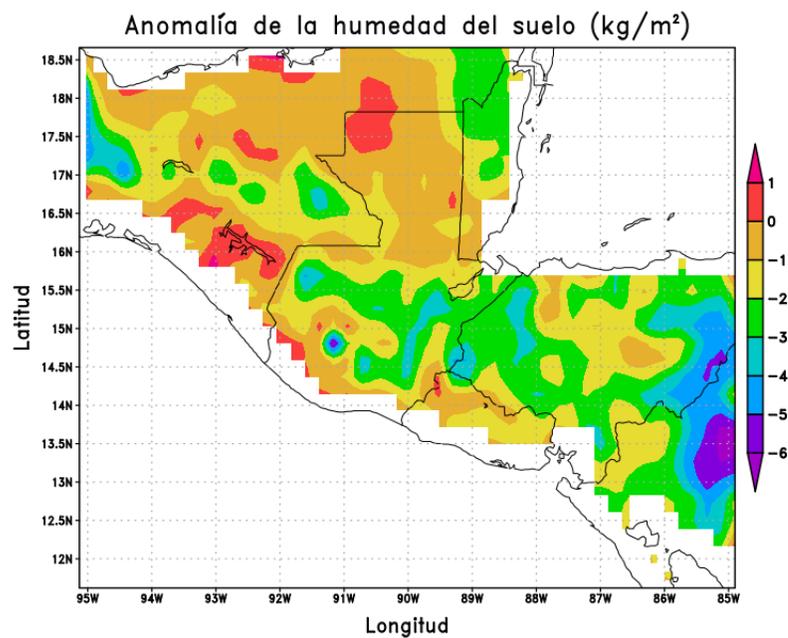
Cuando hablamos de la humedad del suelo, nos referimos a la humedad contenida en la superficie terrestre, la figura 3.13 muestra que en el Sur, Este y parte del Nor-Oeste la humedad esta entre 16 y 20 kg/m<sup>2</sup>, en el norte entre 22 y 26 kg/m<sup>2</sup>, en el centro de 20 a 24 kg/m<sup>2</sup>. La figura 3.14 tiene una reducción en la humedad, de 18 a 24 kg/m<sup>2</sup> en el norte, de 12 a 18 kg/m<sup>2</sup> en el sur, este y parte del nor-oeste, de 15 a 24 kg/m<sup>2</sup> en el centro, la figura 3.15 tiene una variación de 0 a 2 kg/m<sup>2</sup> en la mayoría del país, a excepción del centro y parte del este de 2 a 4 kg/m<sup>2</sup>, justo en la región del corredor seco, esto nos dice que en la década del escenario RCP8.5 esperamos menos humedad en la región.



**Figura 3.13.** Humedad del suelo del año 2006 al año 2015 con datos EIN15. Fuente: Elaboración propia



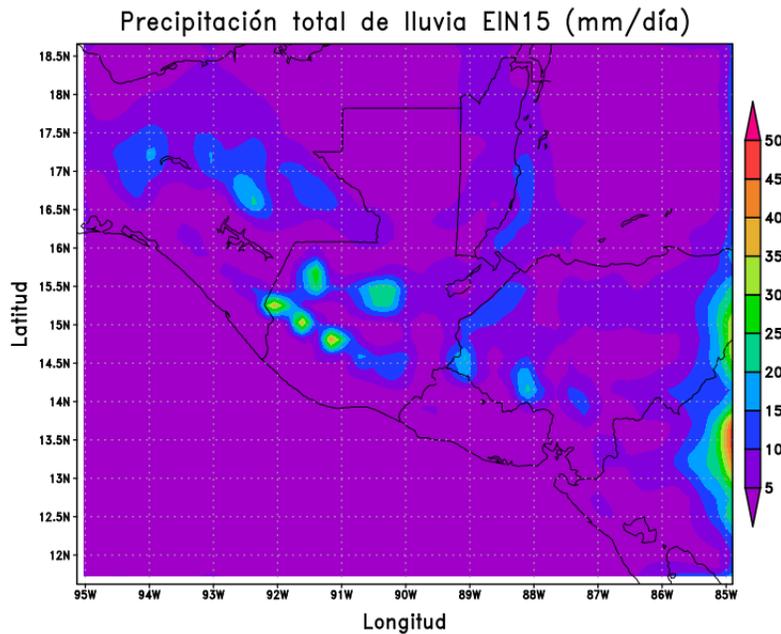
**Figura 3.14.** Humedad del suelo del año 2016 al año 2025 con datos RCP8.5. Fuente: Elaboración propia



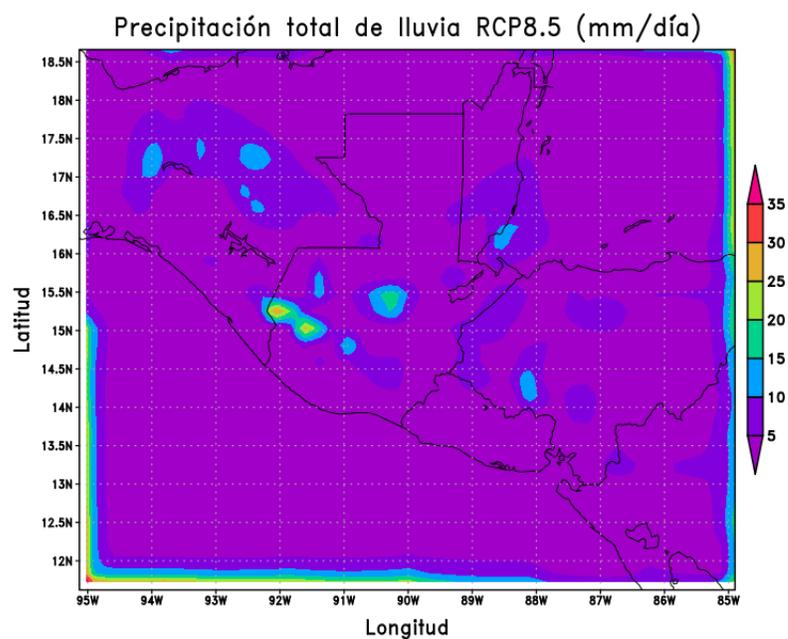
**Figura 3.15.** Anomalía de la humedad del suelo. RCP8.5 menos EIN15. Fuente: Elaboración propia

### 3.1.6. Mapeo del flujo de la precipitación

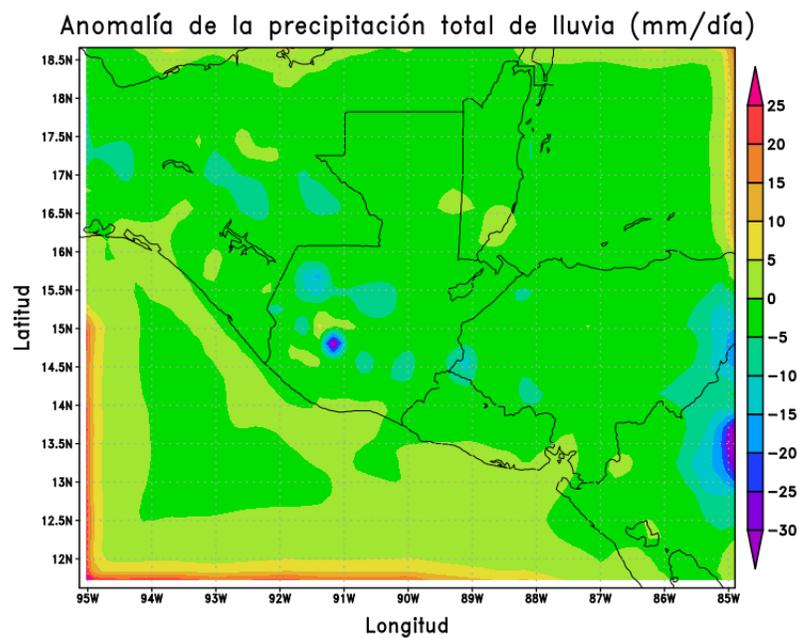
La última variable pero no menos importante es la lluvia o precipitación, específicamente hablaremos del flujo de la precipitación, en la figura 3.16 se puede apreciar que en la mayoría de la región el flujo es bajo de aproximadamente 5 mm/día, en algunas partes del centro, Sur y Oeste aumenta entre 10 y 30 mm/día, en la figura 3.17 existe una tendencia similar en cada región, sin embargo notamos una reducción considerable, en las regiones Norte del centro, Sur y Oeste es de 25 mm/día como máximos valores predominantemente, la figura 3.18 vemos una región casi homogénea, con una variación de  $-5$  mm/día, esto nos dice que en la década del escenario RCP8.5 habrá menos flujo de la precipitación, en otras palabras menos lluvia.



**Figura 3.16.** Flujo de la precipitación de la lluvia del año 2006 al año 2015 con datos EIN15. Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.17.** Flujo de la precipitación de la lluvia del año 2016 al año 2025 con datos RCP8.5. Fuente: Elaboración propia



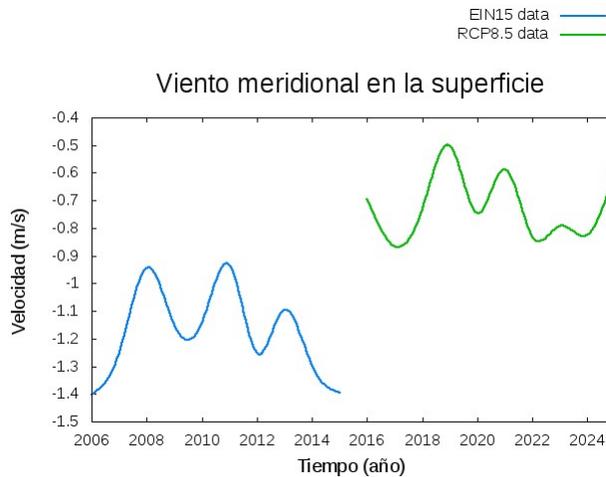
**Figura 3.18.** Anomalía del flujo de la precipitación de la lluvia. RCP8.5 menos EIN15. Fuente: Elaboración propia

## 3.2. Análisis de la dinámica del clima por año con datos EIN15 y RCP8.5

Un análisis comparativo por año entre los dos escenarios puede arrojarnos una visión más detallada de la repercusión del aumento de los gases de invernadero; el intervalo de tiempo va desde 01/01/2006 hasta 31/12/2015 para los datos históricos y de 01/01/2016 a 31/12/2025 para los datos RCP8.5 con gases de invernadero aumentados.

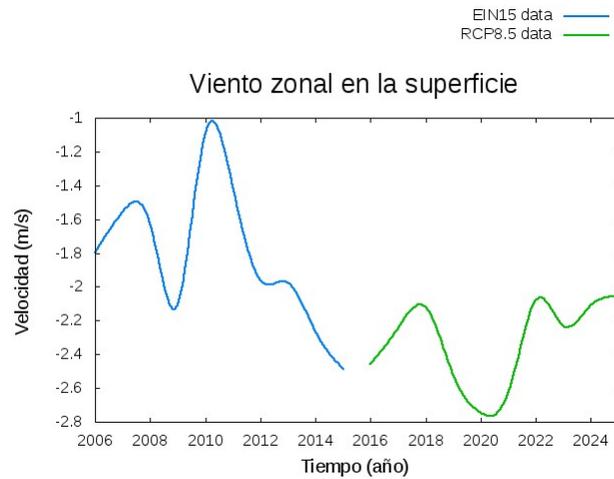
En las gráficas de las componentes del viento analizaremos la velocidad y su dirección, por tal motivo tendremos velocidades positivas y negativas las cuales denota hacia qué dirección se dirigen.

Los vientos del Sur en la figura 3.19 se comportan de una forma muy similar entre los datos RCP8.5 y EIN15 pero con una velocidad mucho más reducida en RCP8.5 que en EIN15.



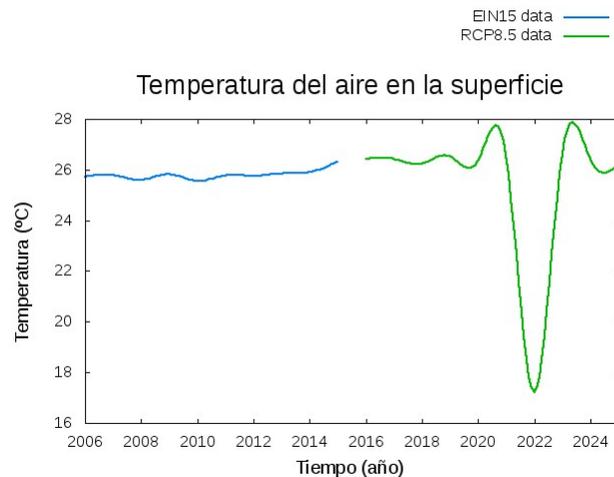
**Figura 3.19.** Comparativo de la velocidad del viento del Sur cerca de la superficie con datos históricos EIN15 y proyección RCP8.5. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.20 los vientos del Oeste muestran una disminución en su velocidad.



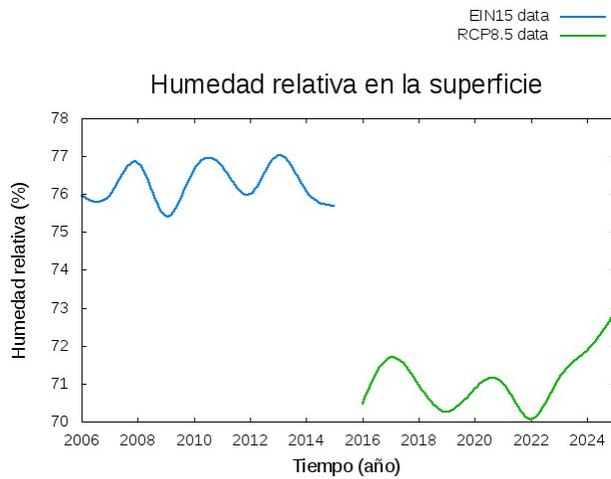
**Figura 3.20.** Comparativo de la velocidad del viento del Oeste cerca de la superficie con datos históricos EIN15 y proyección RCP8.5. Fuente: Elaboración propia

La repercusión más evidente por el aumento de gases de invernadero es la temperatura, en la figura 3.21 podemos notar que la temperatura del aire en el escenario RCP8.5 es generalmente mayor al escenario EIN15, con una excepción en el año 2022 donde se reduce hasta 8 °C.



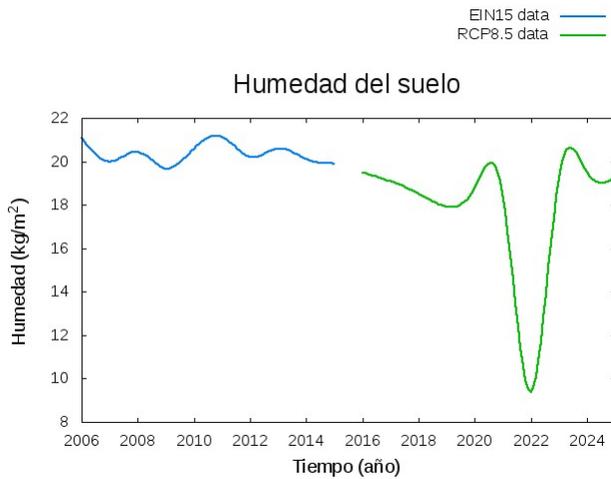
**Figura 3.21.** Comparativo de la temperatura del aire cerca de la superficie con datos históricos EIN15 y proyección RCP8.5. Fuente: Elaboración propia

La humedad relativa del aire en la figura 3.22 se ve reducida hasta un 7% en el escenario RCP8.5 en comparación con los datos históricos EIN15, esto representa una menor concentración de agua en el aire, provocando un clima árido en la región.



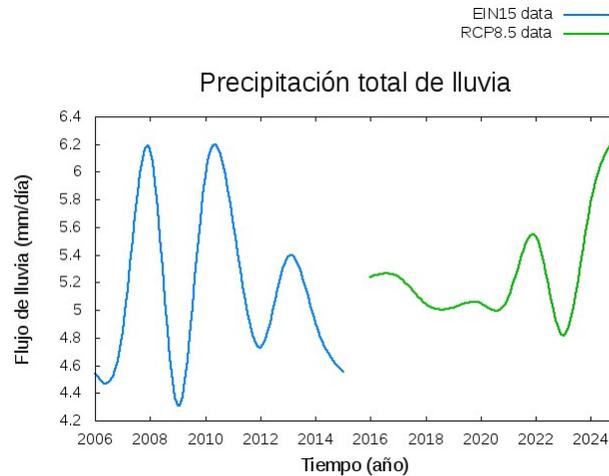
**Figura 3.22.** Comparativo de la humedad relativa cerca de la superficie con datos históricos EIN15 y proyección RCP8.5. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.23 la humedad del aire presenta una leve reducción de alrededor  $2 \text{ kg/m}^2$  en el escenario RCP8.5, en el año 2022 con una reducción de hasta  $10 \text{ kg/m}^2$ , esto es consistente con la variable anterior.



**Figura 3.23.** Comparativo de la humedad del suelo con datos históricos EIN15 y proyección RCP8.5. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.24 el flujo de la precipitación de lluvia tiene una reducción en el escenario RCP8.5, así como en las variables anteriores tenemos una disminución considerable en el año 2022, en promedio habrá menos precipitación.



**Figura 3.24.** Comparativo del flujo de la precipitación total con datos históricos EIN15 y proyección RCP8.5. Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Discusión

En México, una región cercana a la nuestra, se realizó un estudio del año 2015 al 2039 donde obtuvieron un aumento de la temperatura de hasta 1K, tomando en cuenta que tuvieron un período cercano al nuestro pero más extenso es comprensible que tengan un aumento de la temperatura mayor al nuestro, la precipitación al igual que nosotros se ve disminuida en gran medida, sin embargo en las regiones costeras la disminución no es demasiada, esto concuerda con nuestros datos debido a que Guatemala es mucho más pequeño que México y además se encuentra en medio del océano Pacífico y Atlántico [3].

En un estudio realizado en China del año 2011 al 2100 se obtuvo un aumento en la media de la temperatura de ese período de 0.63K, de la misma manera el promedio general de precipitación aumentó pero esto gracias a un gran aumento en la región Norte, recordemos que China tiene un territorio mucho más amplio que Guatemala, sin embargo al verificarlo por regiones, la parte Sur de China tiene una reducción de la precipitación, esto es importante considerando que dicha parte está en dirección al ecuador, casi al mismo paralelo donde se encuentra Guatemala, esto concuerda con nuestros resultados [4].



## CONCLUSIONES

1. La temperatura del aire en la superficie aumentará hasta 1 °C en el Nor-Oeste, Centro-Sur y Sur-Este de Guatemala, sin embargo el área que este aumento comprende, es bastante menor al resto del país, el cual disminuye 1 °C. En otras palabras en el escenario RCP8.5 hay una reducción general de temperatura, que a su vez afecta de manera directa al viento, provocando que este último disminuya en intensidad. Esto podría parecer contrario al concepto de calentamiento global, pero es un concepto global macro que repercute en el cambio climático debido a la dinámica de la atmósfera.
2. En términos de humedad y precipitación habrá una disminución significativa provocando así sequías más fuertes y prolongadas, la humedad relativa sufre una reducción de entre 4 y 10% haciendo más difícil la saturación del aire, por tanto baja la probabilidad de que se presente el fenómeno del rocío. La lluvia es más homogénea en su reducción, alrededor de 5 mm/día en la mayor parte del territorio, sin embargo en una pequeña región al Sur-Oeste es de 25 mm/día.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar una comparación entre dos simulaciones en períodos de un siglo en el territorio de Guatemala por año, por década y por cada 3 décadas.
2. Utilizar los otros RCP's (2.6, 4.5 y 6.0) para compararlo en los siguientes años con los datos históricos.
3. Aumentar la resolución hasta 10 km, por región y en períodos máximos de 3 décadas.
4. Realizar comparaciones con otros territorios del planeta, podría resultar interesante una región con la misma latitud y otra con la misma longitud.
5. Incluir un análisis por regiones de Guatemala que puedan ayudar de forma específica a las aplicaciones y desarrollo del país.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. A. Anthes *A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model* Mon. Wea. Rev., 105: 270–286, 1977.
- [2] Stephen J. Blundell and Katherine M. Blundell *Concepts in Thermal Physics* Department of Physics, University of Oxford, UK, 2006.
- [3] Tereza Cavazos, José Antonio Salinas, Benjamín Martínez, Gabriela Colorado, Pamela de Grau, Ricardo Prieto González, Ana Cecilia Conde Álvarez, Arturo Quintanar Isaías, Julio Sergio Santana Sepúlveda, Rosario Romero Centeno, María Eugenia Maya Magaña, José Guadalupe Rosario de La Cruz, Ma. del Rosario Ayala Enríquez, Heriberto Carrillo Tlazazanatza, Oscar Santiesteban y María Elena Bravo *Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional* Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM, México, 2013.
- [4] Xu Chong-Hai and Xu Ying. The Projection of Temperature and Precipitation over China under RCP Scenarios using a CMIP5 Multi-Model Ensemble, Atmospheric and Oceanic Science Letters. Consultado en noviembre de 2018 en <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/16742834.2012.11447042>.
- [5] J. W. Deardoff *Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation* J. Geophys. Res., 83:1889–1903, 1978.
- [6] R. E. Dickinson, A. Henderson-Sellers, and P. J. Kennedy *Biosphere-atmosphere transfer scheme (bats) version 1e as coupled to the near community climate model* Technical report, National Center for Atmospheric Research, 1993.
- [7] K. A. Emanuel *A scheme for representing cumulus convection in large-scale models* J. Atmos. Sci., 48(21): 2313–2335, 1991.

- [8] Nellie Elguindi, Xunqiang Bi, Filippo Giorgi, Badrinath Nagarajan, Jeremy Pal, Fabien Solmon, Sara Rauscher, Ashraf Zakey, Travis O'Brien, Rita Nogherotto and Graziano Giuliani *Regional Climate Model RegCM Reference Manual Version 4.5* International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy, 2014.
- [9] Filippo Giorgi, Fabien Solmon, Graziano Giuliani *Regional Climate Model RegCM User's Guide Version 4.5* International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy, 2014.
- [10] G. Grell *Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations* Mon. Wea. Rev., 121:764–787, 1993.
- [11] J. T. Kiehl, J. J. Hack, G. B. Bonan, B. A. Boville, B. P. Breigleb, D. Williamson, and P. Rasch *Description of the ncar community climate model (ccm3)* Technical Report NCAR/TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research, 1996.
- [12] John Marshall and R. Alan Plumb *Atmosphere, ocean and climate dynamics: An introductory text*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2008.
- [13] J. M. Slingo *A gcm parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds* J. Atmos. Sci., 46: 1419–1427, 1989.
- [14] Rutas de Concentración Representativas. Consultado en octubre de 2013 en [https://en.wikipedia.org/wiki/Representative\\_Concentration\\_Pathways](https://en.wikipedia.org/wiki/Representative_Concentration_Pathways).
- [15] Mark W. Zemansky y Richard H. Dittman *Calor y Termodinámica* McGraw-Hill, U. S. A., 1981.

## APÉNDICE A

Script Grads para generar mapas.

```
'set grads off'  
'set font 4'  
'set gxout shaded'  
'set mpdset hires'  
'd la variablequesedese'  
'draw title el títuloquesedese (dimensionales)'  
'draw xlab Longitud'  
'draw ylab Latitud'  
'cbarn 1 1 10'  
'printim /donde/quiera/guardar/nombreadarchivo.png png white'  
'reset'
```



## APÉNDICE B

Script Gnuplot para generar gráficas.

```
set termopt enhanced
set title "eltítuloquedese" font ",20"
set xlabel "Tiempo (año)" font ",14"
set xrange [2006:2025]
set ylabel "variablequedese (dimensionales)" font ",14"
set key tmargin
set term jpeg
set output "nombreachivo.jpeg"
plot "nombreachivoein15.txt" using 1:#columnavariabile title "EIN15
data" with linespoints pt 1 ps 1 lw 2 lt 3 smooth csplines,
"nombreachivorcp.txt" using 1:#columnavariabile title "RCP8.5 data"
with linespoints pt 1 ps 1 lw 2 lt 2 smooth csplines
```

