

**DESARROLLO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN  
METEOROLÓGICO BASADO EN SISTEMAS DINAMICOS  
NO LINEALES PARA LA CUENCA DEL RÍO  
PAMPLONITA-NORTE DE SANTANDER**

**JORDI RAFAEL PALACIOS GONZALEZ**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, QUÍMICA Y  
AMBIENTAL  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**PAMPLONA, 13 de junio de 2017**

**DESARROLLO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN  
METEOROLÓGICO BASADO EN SISTEMAS DINAMICOS NO  
LINEALES PARA LA CUENCA DEL RÍO PAMPLONITA-NORTE  
DE SANTANDER**

**JORDI RAFAEL PALACIOS GONZALEZ**

**Trabajo de grado en investigación presentada para optar al título de  
INGENIERO AMBIENTAL**

**Director: JACIPT ALEXANDER RAMON VALENCIA**  
Docente titular Programa de Ingeniería Ambiental

**Co-Director: FRANCISCO HENRY CABRERA ZAMBRANO**  
Docente titular Programa de Geología

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, QUÍMICA Y  
AMBIENTAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS**

Pamplona, 13 de junio de 2017

Dedicado a:

A DIOS

A MI MADRE

A MI PADRE 

A ROSITA

A MIS HERMANOS

**GRACIAS POR CREER EN MÍ!!!!**

“Nunca consideres la educación como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el maravilloso mundo del saber”.

Albert Einstein

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre, a rosita y a mi familia por estar siempre conmigo y a pesar de las millones de dificultades siempre creer en mí.

A mis tutores el Profe Jacipt Ramón por ser la persona que vio en mi las habilidades que ni yo mismo creí tenerlas y del cual he aprendido tanto que siempre estaré agradecido y al Profe Francisco Cabrera por guiarme siempre en esta locura y nunca dejar de pensar que si se podía. Grandes.

Al Doctor Mikel Leazun por su acompañamiento en la solución del modelo matemático y Al Doctor Jorge Zavala por su acompañamiento en el desarrollo del modelo.

Por último a cada uno de los maestros, amigos y demás personas que han aportado un grano de arena.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	8
1. ELEMENTOS Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	9
1.1 LA ATMÓSFERA .....	9
1.1.1 Estructura de la Atmósfera.....	10
1.1.1.1 Troposfera. ....	11
1.1.1.2 Estratosfera. ....	11
1.1.1.3 Mesosfera.....	11
1.1.1.4 Termosfera o ionosfera.....	12
1.1.1.5 Exosfera.....	12
1.2 CIRCULACIÓN ATMÓSFERICA .....	12
1.3 TIEMPO ATMOSFÉRICO Y CLIMA .....	14
1.4 VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	16
1.4.1 Temperatura.....	16
1.4.2 Presión Atmosférica. ....	16
1.4.3 Vientos. ....	17
1.4.4 Radiación Solar.....	17
1.4.5 Humedad.....	17
1.4.5.1 Humedad absoluta.....	17
1.4.5.2 Humedad específica. ....	18
1.4.5.3 Razón de mezcla. ....	18
1.4.6 Precipitación.....	18
1.5 SISTEMAS DINÁMICOS .....	19
1.6 Sistemas No Lineales. ....	19
1.7 LA PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO. ....	20
1.8 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES.....	21
1.9 MODELOS ACTUALES DE PREDICCIÓN.....	22
1.10 LAS ECUACIONES METEOROLÓGICAS DEL MOVIMIENTO .....	25
1.11 ECUACIONES EN COORDENADAS ISOBÁRICAS.....	27
1.12 RESOLUCIÓN NUMÉRICA.....	28
1.13 NOCIÓN DE MEDIO CONTINUO .....	29
1.14 DISCRETIZACIÓN DEL ESPACIO .....	30

1.15	ASIMILACIÓN DE DATOS .....	30
1.16	CONDICIONES DE CONTORNO .....	31
1.17	PARAMETRIZACIONES FÍSICAS .....	31
1.18	MÉTODOS DE DISCRETIZACIÓN DE ECUACIONES DIFERENCIALES EN DERIVADAS PARCIALES.....	32
1.19	TEORIA DEL CAOS EDWARD NORTON LORENZ .....	34
1.20	ARCGIS.....	36
1.21	MATLAB .....	37
2.	MARCO CONTEXTUAL .....	38
2.1	METEOROLOGÍA DE LA CUENCA .....	39
2.1.1	Precipitación Media.....	39
2.1.2	Temperatura.....	40
3.	MARCO LEGAL .....	41
	OBJETIVOS.....	45
3.1	Objetivo general.....	45
3.2	Objetivos específicos .....	45
4.	METODOLOGÍA.....	46
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	72
5.1	SOLUCIÓN PARTICULAR A LAS ECUACIONES DE LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA.....	72
5.2	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES DEL MODELO DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICO PARA LA CUENCA DEL RÍO PAMPLONITA. ....	79
5.3	VALIDACIÓN DEL MODELO METEOROLÓGICO DE PREDICCIÓN PARA LA CUENCA DEL RÍO PAMPLONITA .....	93
5.4	PROCESO PARA UTILIZAR EL MODELO DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICO.....	108
	CONCLUSIONES .....	109
	LIMITACIONES Y ALCANCES .....	110
	RECOMENDACIONES.....	111
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112
7.	Anexos .....	117
7.1.1	Temperaturas a 2 metros predicción a 4 días .....	117
7.1.2	Temperaturas a 1829 metros predicción a 4 días .....	118

7.1.3	Temperaturas a 2743 metros predicción a 4 días .....	119
7.1.4	Temperaturas a 3658 metros predicción a 4 días .....	121
7.1.5	Temperaturas a 4572 metros predicción a 4 días .....	122
7.1.6	Temperaturas a 2 metros predicción a 10 días .....	123
7.1.7	Temperaturas a 1829 metros predicción a 10 días .....	124
7.1.8	Temperaturas a 2743 metros predicción a 10 días .....	125
7.1.9	Temperaturas a 3658 metros predicción a 10 días .....	126
7.1.10	Temperaturas a 4572 metros predicción a 10 días .....	127

## INTRODUCCION

El estudio de la circulación atmosférica a través del tiempo es un tema que ha venido teniendo más cabida en investigadores de todas las áreas de la ciencia, al ser la atmosfera un sistema dinámico no lineal, su predicción representa un problema complejo, por eso se dice que tener una predicción con efectividad total de las variables meteorológicas es algo casi imposible, en 1960 el meteorólogo Edward Lorenz realizó un análisis a una serie de sistemas representativos de la meteorología basado en tres ecuaciones no lineales, observando en sus resultados que si daba una pequeña modificación numérica a las condiciones iniciales de una variable, el resultado de su simulación sería totalmente diferente al anterior, de aquí nace la teoría del caos de Lorenz.

La predicción meteorológica es de un nivel bastante complejo, ya que para poder obtener una solución a su representación numérica, se necesita un ordenador computacional con capacidad de resolver las interacciones entre las variables en un tiempo que sea menor al que se desea predecir, porque si el tiempo de predicción fuese mayor no tendría sentido su predicción, en este momentos a nivel global existen diferentes modelos de predicción meteorológica bastante robustos desarrollados por expertos en los diferente ámbitos que toca las ciencias de la atmósfera, con resultados de alta calidad pero aun con inconvenientes como lo son el área que el modelo desea predecir, en el estudio de dichas variables entre mayor sea el área menor será la efectividad del modelo, así como también la cantidad y la calidad de los datos que representan las condiciones iniciales.

Desde la academia y con un estudio previo que complementan los conocimientos en meteorología, se quiso desarrollar un modelo de predicción propio para nuestra zona, puesto que en nuestro país no contamos con modelos propios de este tipo, trabajamos adaptando modelos de otros lugares a los cuales se les asignan unas condiciones iniciales propias del lugar mas no se resuelve su caja negra, este es el punto en el que se trabajó con una dedicación intensiva y aplicación de los conocimientos en diferentes áreas, para desarrollar un modelo y generar predicciones de algunas variables meteorológicas, viendo esto como un gran avance en el ámbito de la modelación atmosférica, ya que nuestro trabajo se puede ver como un punto de partida significativo debido a que se obtuvieron resultados bastante satisfactorios.

# 1. ELEMENTOS Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

## 1.1 LA ATMÓSFERA

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea el globo terráqueo, está formada por aire y partículas en suspensión, este aire es una mezcla de diferentes gases en concentraciones diferentes.

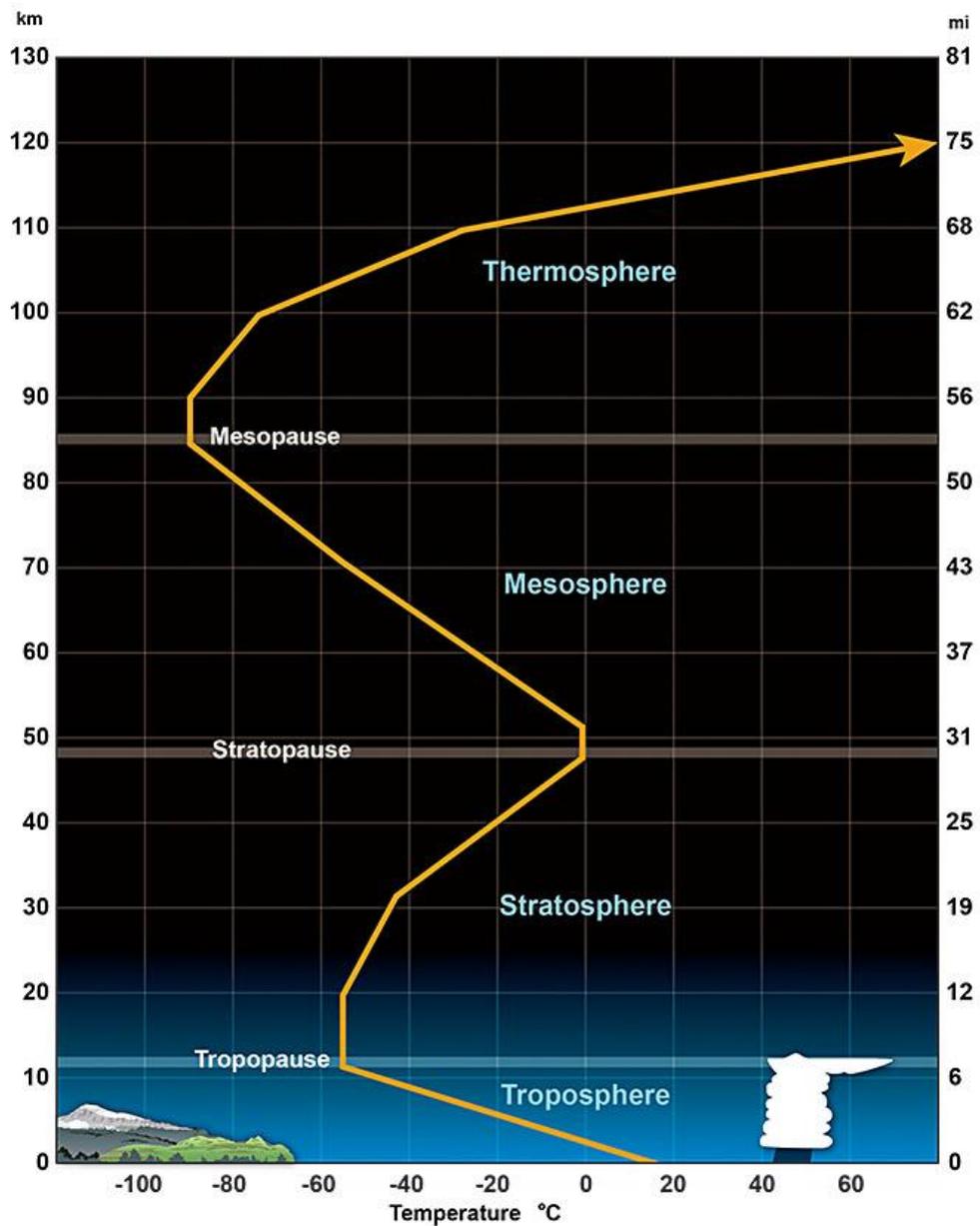
Como consecuencia de la compresibilidad de los gases y de la atracción gravitatoria terrestre, la mayor parte de la masa de la atmósfera se encuentra comprimida cerca de la superficie del planeta, de tal manera que en los primeros 15 Kilómetros se encuentra el 95% del total de su masa. Sin embargo, las proporciones de los diferentes gases, el aire, se mantienen casi inalterables hasta los 80-100 Kilómetros de altitud (homosfera), el resto tienen una composición más variable (heterosfera). El límite superior de la atmósfera se estima alrededor de los 10.000 Kilómetros de altura donde la concentración de gases es tan baja (prácticamente despreciable) que se asemeja a la del espacio exterior (Murcia, 2002).

Además de los gases, en la composición de la atmósfera también aparecen líquidos (agua líquida en las nubes) y sólidos como polen, esporas, polvo, microorganismos, sales, cenizas y agua sólida en las nubes formando minúsculos cristales de hielo (Murcia, 2002).

### 1.1.1 Estructura de la Atmósfera.

La atmósfera está distribuida por capas, las cuales dependen de la variación de la temperatura, entre cada capa existe sub capas, llamadas pausas, en la cual la temperatura permanece constante, las capas que constituyen la atmósfera se muestran en la figura 1.

Figura 1. Perfil de temperatura promedio para las capas de la atmósfera



Fuente: NOAA, 2014.

#### 1.1.1.1 Troposfera.

Su espesor varía entre los 8 kilómetros en el polo norte y sur, a medida que se aleja de los polos su espesor aumenta llegando a 18 kilómetros sobre la línea del ecuador, siendo su altura media 12 kilómetros, conteniendo la mayoría de los gases de la atmósfera. A los 500 metros iniciales se concentra el polvo en suspensión procedente de los desiertos, los volcanes y los contaminantes de alta densidad. Este polvo actúa como núcleos de condensación que facilitan el paso del vapor de agua atmosférico a agua líquida, la troposfera contiene prácticamente todo el vapor de agua atmosférica. Hay importantes flujos convectivos de aire, verticales y horizontales, producidos por las diferencias de presión y temperatura que dan lugar a los fenómenos meteorológicos. El aire de la troposfera se calienta a partir del calor emitido por la superficie terrestre. La temperatura de la troposfera es máxima en su parte inferior, alrededor de 15 °C de media, y a partir de ahí comienza a descender con la altura según un Gradiente Térmico Vertical (GTV) de 6,5 °C de descenso cada Kilómetro que se asciende en altura (la temperatura baja 0,65 °C cada 100m de altura) hasta llegar a -70 °C en el límite superior de la troposfera: la tropopausa (Murcia, 2002).

#### 1.1.1.2 Estratosfera.

Se extiende desde la tropopausa hasta los 50 Kilómetros de altura, límite de la estratosfera llamado estratopausa. En esta capa se genera la mayor parte del ozono atmosférico que se concentra entre los 15 y 30 Kilómetros de altura llamándose a esta zona capa de ozono u ozonósfera. La temperatura asciende con la altura hasta llegar próximo a los 0 °C en la estratopausa. Este incremento de temperatura está relacionado con la absorción por el ozono de la radiación solar ultravioleta, por lo que esta capa actúa como pantalla protectora frente a los perjudiciales rayos ultravioleta. Dentro de esta capa hay movimientos horizontales de aire, pero no verticales como sucede en la troposfera (Murcia, 2002).

#### 1.1.1.3 Mesosfera.

Se extiende hasta los 80 Kilómetros de altura. La temperatura disminuye hasta alcanzar los -140 °C en su límite superior llamado mesopausa. Algunos Palacioses dicen que en esta capa se desintegran los meteoritos por el rozamiento con las partículas de la mesosfera produciéndose las llamadas estrellas fugaces, pero otros Palacioses responsabilizan de este fenómeno a la termosfera donde se alcanzan temperaturas muy altas (Murcia, 2002).

#### 1.1.1.4 Termosfera o ionosfera.

Se denomina así porque gran parte de las moléculas presentes están ionizadas por la absorción de las radiaciones solares de alta energía (rayos gamma, rayos X y parte de la radiación ultravioleta), provocando que el nitrógeno y el oxígeno pierdan electrones quedando ionizados con carga +, los electrones desprendidos originan campos eléctricos por toda la capa. La interacción de las partículas subatómicas procedentes del Sol con los átomos ionizados da lugar a fenómenos luminosos llamados auroras polares (aurora boreal en polo norte y aurora austral en polo sur) que suceden cerca de los polos magnéticos. En la ionosfera rebotan las ondas de radio y televisión usadas en las telecomunicaciones. La temperatura de la termosfera va ascendiendo en altura al absorber las radiaciones de alta energía, pudiendo alcanzar más de 1000 °C. Su límite superior se denomina termopausa, entre los 600 – 800 Kilómetros de altura (Murcia, 2002).

#### 1.1.1.5 Exosfera.

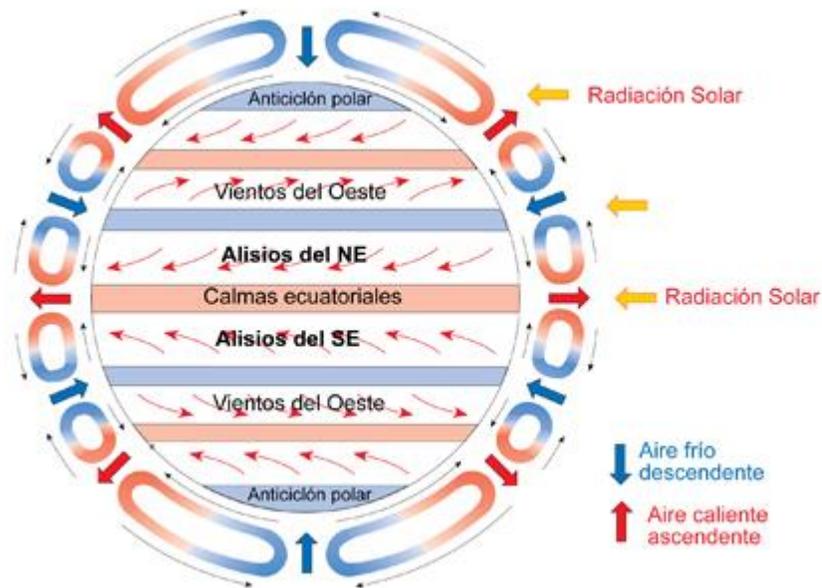
Desde los 600 – 800 Kilómetros de altura hasta unos 10.000 Kilómetros según Palacioses. Tiene una bajísima densidad de gases hasta llegar a ser similar a la del espacio exterior (casi vacío) con 4 lo que el cielo se oscurece (no hay prácticamente materia que absorba la luz) (Murcia, 2002).

## 1.2 CIRCULACIÓN ATMÓSFERICA

El movimiento del aire en la atmósfera se ve representado por la variación de temperatura que hay entre unos lugares y otros, esto debido a la diferente de radiación solar. Los rayos solares inciden de forma directa en la zona ecuatorial, por lo cual el aire que hay entre los trópicos es muy cálido. Los rayos solares llegan más sesgados en las zonas polares y no llevan tanto calor siendo el aire en los casquetes polares muy frío. Esto hace que en la zona ecuatorial, el aire tienda a subir, ya que es caliente y lo por tanto menos denso. Al tener una mayor densidad el aire frío hace que en las zonas polares haya una tendencia a descender. El aire sube al ecuador y baja a los 30 grados de latitud de los dos hemisferios, volviendo a haber ascenso del aire a los 60 grados de latitud norte y sur. y descenso sobre los polos. Cuando el aire sube, se enfría; el vapor de agua se condensa y se generan precipitaciones. Las zonas en que el aire sube van ligadas a depresiones. Por el contrario, en aquellos lugares donde el aire baja van

ligados a anticiclones que se sitúan en los 30 grados de latitud, como es el caso del Anticiclón de Santa Helena. A los 60 grados, volvemos a encontrar depresiones, es lo que sucede en la corriente circumpolar antártica. Sobre los polos hay descenso del aire y por tanto anticiclones. En Figura 2. Se puede observar la circulación y los tipos de interacciones que se generan (La Regata-Educación, 2014).

Figura 2. Circulación general atmosférica



Fuente: La Regata-Educación, 2014.

Según puede juzgarse por los ligeros extractos que anteceden, y esta dificultad parece que tiende á aumentarse, pues no hay día que no aparezca una nueva explicación; muchas pretenden apoyarse en el análisis matemático; pero se apartan tanto del buen sentido y de la observación de los fenómenos, que, más que hipótesis, son puras especulaciones. Sin embargo, se admite actualmente de un modo casi universal, y puede considerarse como doctrina científica lo siguiente (Arcimis, 1895):

Todas las corrientes aéreas del globo están producidas por el desigual caldeamiento de su superficie, que depende de la oblicuidad con que reciben los rayos solares (Arcimis, 1895).

El movimiento de rotación de la Tierra alrededor de su eje, causa perturbaciones que modifican la dirección de las corrientes. En el ecuador, ó próximo a él, hay en la superficie una zona de calmas, donde ascienden las componentes meridionales de los vientos alisios del Nordeste y del Sudeste. Esta zona de calmas tiene poca altura, y encima de ella sopla constantemente viento del Este, tanto más violento, cuanto mayor sea el nivel de las calmas (Arcimis, 1895).

Al llegar á cierta elevación, el aire que asciende en el ecuador se dirige hacia los polos; pero la rotación terrestre lo hace desviar hacia el Este y forma los vientos contraalisios superiores, del Oes-Sudoeste en el hemisferio boreal y del Oes-Noroeste en el austral. A los 35° de latitud, en ambos hemisferios, también hay calmas en la superficie del suelo, producidas por el descenso de una parte de las masas de aire que ascendieron en el ecuador. Otra parte continúa su camino en dirección á los polos (Arcimis, 1895)

El aire que desciende en las zonas de calmas de los 35° se encamina por la superficie hacia el ecuador; pero la rotación terrestre lo desvía hacia el Oeste y forma los alisios del Nordeste en el hemisferio boreal y del Sudeste en el austral. Desde los 35° de latitud hacia los polos soplan vientos del Sudoeste en nuestro hemisferio, y del Noroeste en el opuesto, en la superficie del suelo. Encima de estos hay una corriente que procede de los polos y va á la latitud de 35°, y sobre esta corriente y en las capas superiores continúa solando como Oeste la masa de aire procedente del ecuador, que no descendió en la latitud de 35° y que va á descender en las regiones polares, produciendo un casquete de calmas (Arcimis, 1895)

### **1.3 TIEMPO ATMOSFÉRICO Y CLIMA**

El clima es el resultado del funcionamiento de un sistema dinámico y abierto, alimentado por una energía procedente del sol y constituido por cinco elementos relacionados e interdependientes, como son: la atmósfera, los océanos, la criosfera o superficie cubierta por los hielos, la superficie terrestre y la biosfera o conjunto de seres vivos entre los que se incluye el hombre. El conocimiento y comprensión del clima exige tener muy claras, cuatro ideas fundamentales: la diferenciación entre tiempo y clima, los factores condicionantes, los elementos y la escala (García, 2012).

Con frecuencia se confunde el tiempo atmosférico y el clima de un lugar. El tiempo atmosférico a una hora determinada, por ejemplo a las doce del mediodía, viene determinado por la temperatura, presión atmosférica, dirección y fuerza del viento, cantidad de nubes, humedad etc., registrados en el instante que se considera. Se comprende que el tiempo atmosférico cambia rápidamente debido a la variación de la temperatura, la presión atmosférica etc. Por otro lado, también puede decirse que Madrid, París y Caracas tienen el mismo tiempo en un momento dado, por ejemplo, un día con lluvia en las tres capitales da lugar a un mismo tiempo lluvioso, sin embargo, es evidente que estas tres ciudades no tienen el mismo clima, ni siquiera parecido. Prueba de ello es la diferente vegetación que rodea a cada una de ellas: exuberantemente tropical en Caracas, abundante en bosques y praderas en París y más bien escasa en Madrid. Así pues, el tiempo traduce algo que es instantáneo, cambiante y en cierto modo irreplicable; el clima, en cambio, aunque se refiere a los mismos fenómenos, los traduce a una dimensión más permanente duradera y estable. De esta manera podemos definir el tiempo como "el estado de la en un lugar y un momento determinados"; y el clima, "como la sucesión periódica de tipos de tiempo" (Fonseca, 2000).

Por tanto, la mejor forma de abordar el análisis del clima sería a través del estudio de los tipos de tiempo, estableciendo sus características, sucesión y articulación habitual a través de las estaciones. En efecto, los seres vivos no perciben aisladamente las interacciones meteorológicas, según sople el viento o esté en calma, llueva o no, el sol brille o esté nublado, una misma temperatura ambiente será percibida de forma diferente por los organismos y producirá una vegetación también distinta. Sin embargo para poder tener una visión completa de los climas a nivel del globo, no queda otra solución que analizar separadamente los elementos del tiempo. Estableciéndose así los distintos climas a partir de los valores medios de la temperatura, presión atmosférica, dirección y fuerza del viento, cantidad de nubes, humedad, cantidad de lluvia etc., registrados durante un período de tiempo muy largo, generalmente de treinta años. La utilidad del concepto de clima se debe a que, por ejemplo, la temperatura media de un lugar durante un período de treinta años es prácticamente la misma que durante otros treinta años distintos sino se tuviera en cuenta la influencia de factores tales como el llamado cambio climático. Esto nos permite decidir si el clima de un lugar es frío o cálido. El registro continuo de los datos meteorológicos permite igualmente apreciar las posibles variaciones o cambios que se pudieran producir en la meteorología y climatología, estos datos se procesan según las Directrices sobre la gestión de datos climáticos establecidas en 2007 establecidas por la Organización meteorológica mundial. (CI de A, 2011).

La predicción de las condiciones del tiempo ha sido un desafío para el hombre desde tiempos remotos, sin embargo no se lograron grandes avances en este campo hasta el siglo XIX, cuando se desarrollaron los campos de la termodinámica y la aerodinámica; los cuales aportaron bases teóricas a la meteorología. El meteorólogo Cleveland Abbe concluyó en 1890 que la meteorología es una aplicación de la termodinámica y la hidrodinámica a la atmósfera, además en su trabajo titulado "The physical basis of long-range weather forecasting" propuso una aproximación matemática para el pronóstico del clima y expresó su deseo de que los investigadores de la comenzaran a buscar herramientas para resolver las ecuaciones que rigen los fenómenos atmosféricos (P. Lynch, 2008).

## **1.4 VARIABLES METEOROLÓGICAS**

### **1.4.1 Temperatura.**

Es una magnitud relacionada con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia. Cuanta mayor agitación presenten éstas, mayor será la temperatura. Utilizada muy comúnmente para relacionarla con el estado de la, El instrumento que se utiliza para medir la temperatura se llama termómetro y fue inventado por Galileo en 1593, esta magnitud al ser física presenta asociación con unidades de medición que se representan en función a la escala de medición las cuales son: Grados Celsius (°C), Grados Fahrenheit (°F), Grados Kelvin (K) (Zavala, 2006).

### **1.4.2 Presión Atmosférica.**

La presión atmosférica es la fuerza que ejerce el aire atmosférico sobre todos los cuerpos debida a la acción de la gravedad. Esta fuerza por unidad de superficie es la denominada presión atmosférica, cuya unidad de medida en el Sistema Internacional es el Pascal (1 Pascal = 1N/m<sup>2</sup>). Se utiliza para medir la presión atmosférica un instrumento llamado Barómetro, que fue inventado por el físico Italiano llamado Evangelista Torricelli en el año 1643 (Zavala, 2006).

### 1.4.3 Vientos.

El viento es el movimiento de masas de aire desde un lugar a otro lugar. Existen diversas causas que pueden provocar la existencia del viento, pero normalmente se origina cuando entre dos puntos se establece una cierta diferencia de presión o de temperatura. Si en un punto la presión atmosférica es más baja que en otro punto referenciado, los vientos se moverán con sentido al punto de menor presión. Para poder disponer de medidas directas de velocidad y dirección del viento, se utilizan principalmente dos medidas velocidad de los vientos horizontalmente en la cual el instrumento más utilizado es el anemómetro de cazoletas, en el que el giro de las mismas es proporcional a la velocidad del viento. La unidad de medida son kilómetros/hora (K/m) o en metros/segundos (m/s) y la segunda medida que es la dirección de los vientos para ello se utilizan las veletas, que indican la procedencia geográfica del viento (Norte, Sur, Este, Oeste), siempre relacionados con “de donde vienen y no para donde van” (Zavala, 2006).

### 1.4.4 Radiación Solar.

Es la energía transferida por el Sol a la Tierra, viajando a través del espacio por ondas electromagnéticas. La cantidad de radiación solar recibida en un punto se mide mediante un instrumento llamado piranómetro. Consiste en un sensor encerrado en un hemisferio transparente que transmite toda la radiación de longitud de onda inferior a  $3 \times 10^{-6}$  metros, el contraste de temperatura entre esos segmentos se calibra en función del flujo de radiación, las unidades de medida son Watts/metro cuadrado (W/m<sup>2</sup>) (Zavala, 2006).

### 1.4.5 Humedad.

La humedad es la cantidad de vapor de agua que contiene una masa de aire, existen tres tipos de humedad que se ven representadas en diferentes unidades las cuales son

#### 1.4.5.1 Humedad absoluta.

Es la cantidad de vapor de agua que se encuentra por unidad de volumen en el aire de un ambiente. Normalmente, el vapor es medido en gramos y el volumen de aire se mide en metros cúbicos. Unidad de medida metros cúbicos (m<sup>3</sup>) (Zavala, 2006).

#### 1.4.5.2 Humedad específica.

Es la cantidad de masa de vapor de agua que se haya contenido en el aire, se mide en kilogramo (Kg) (Zavala, 2006).

#### 1.4.5.3 Razón de mezcla.

Es la cantidad de masa de vapor de agua en gramos (gr) que hay en 1 kg de aire seco (Zavala, 2006).

La humedad se mide mediante un instrumento denominado psicrómetro que consiste en dos termómetros de igual forma, uno de los cuales, llamado "termómetro seco", se utiliza para obtener la temperatura del aire y otro llamado termómetro húmedo tiene el depósito recubierto con una telilla humedecida por medio de una mecha que la pone en contacto con un depósito de agua. En función de estos dos valores de temperatura se calcula la humedad relativa mediante una fórmula matemática que las relaciona. Para mayor comodidad, con el termómetro se suministran unas tablas de doble entrada que dan directamente el valor de la humedad relativa a partir de las temperaturas de los dos termómetros, sin tener que realizar ningún cálculo (Zavala, 2006).

#### 1.4.6 Precipitación.

Es la caída de agua en estado sólido o líquido, producto de la condensación del vapor sobre la superficie terrestre. Existen diferentes tipos de precipitación las cuales son Lluvia, Llovizna, Granizo, Nieve y Neviscas. La precipitación se genera cuando en las nubes se presenta el punto de saturación, las gotas de agua aumentan de tamaño hasta que su densidad se vuelve más grande que la de la nube y cae sobre la superficie como consecuencia de la gravedad. El instrumento que se suele utilizar para medir la precipitación caída en un lugar y durante un tiempo determinado se denomina pluviómetro, está formado por una especie de vaso en forma de embudo profundo que envía el agua recogida a un recipiente graduado donde se va acumulando el total de la lluvia caída. El volumen de lluvia recogida se mide en litros por metro cuadrado (l/m<sup>2</sup>) o lo que es lo mismo, en milímetros (mm.). Esta medida representa la altura, en milímetros, que alcanzaría una capa de agua que cubriese una superficie horizontal de un metro cuadrado (Zavala, 2006).

## **1.5 SISTEMAS DINÁMICOS**

Son aquellos sistemas que representan algún fenómeno natural, cuyo comportamiento cambia con el tiempo, los cuales pueden ser representados por medio de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales; o bien, pueden ser representados como trayectorias en los espacios de fases, caracterizados por su capacidad de percibir la evolución del sistema en el tiempo. La teoría del caos (es la denominación popular de la rama de las matemáticas, la física y otras ciencias (biología, meteorología, economía, entre otras) que trata ciertos tipos de sistemas dinámicos complejos, muy sensibles a las variaciones en las condiciones iniciales), forma parte del estudio general de los sistemas dinámicos, interesada fundamentalmente en el comportamiento de sistemas no lineales o de los sistemas disipativos, los cuales exhiben atractores, y sensibilidad a las condiciones iniciales (Smith, 1998).

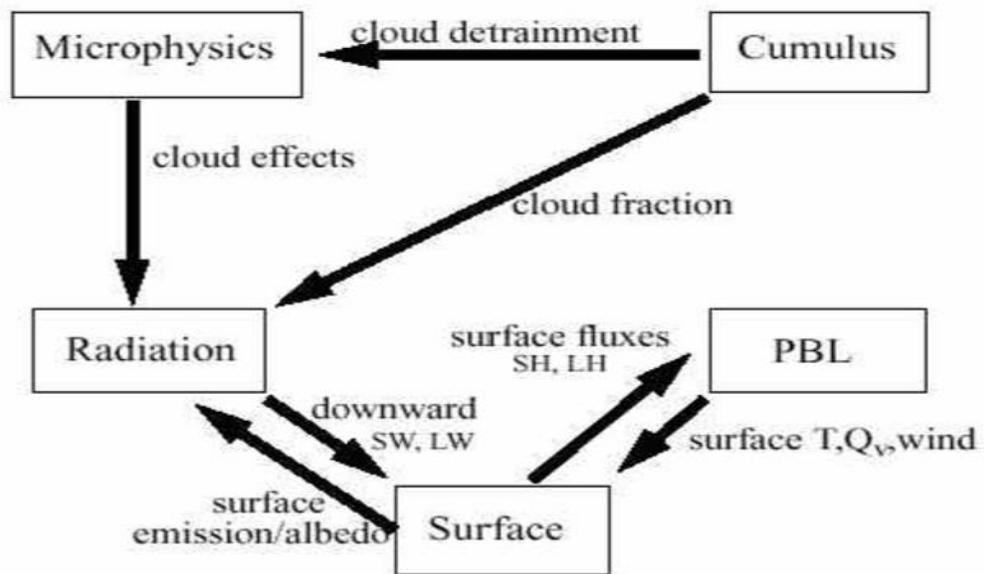
## **1.6 SISTEMAS NO LINEALES.**

Un sistema dinámico es lineal cuando su dinámica es conocida, de tal forma que el conocimiento del estado actual del mismo hace que se pueda conocer el estado en cualquier otro instante futuro o pasado. Dicho sistema se puede formular mediante una ecuación diferencial ordinaria o en derivadas parciales, ecuación en diferencias finitas, ecuación integral o sistemas de ecuaciones combinación de las anteriores, pero siempre lineales. Esto significa desde un punto de vista físico, que la respuesta a una suma de efectos, es la suma de las respuestas a cada uno de ellos. Los sistemas no lineales son aquellos que no presentan tal comportamiento, pero si se conoce el estado actual del sistema y una ecuación (de cualquiera de los tipos señalados anteriormente) no lineal que lo modeliza, también se podrá conocer el estado que el sistema alcanzará en el futuro. Tanto para sistemas lineales como no lineales, si el sistema está modelado por una ecuación diferencial o en diferencias finitas, se denomina sistema determinístico, es decir, existe una forma de determinar su comportamiento futuro dadas unas determinadas condiciones iniciales. En tales circunstancias se puede esperar un comportamiento regular y predecible del sistema. Pero esto no resulta ser exactamente así y ya Poincaré en 1892 descubrió que algunos sistemas derivados de la Mecánica, cuya evolución en el tiempo está gobernada por las ecuaciones de Hamilton, no siguen el comportamiento regular anteriormente considerado, sino que por el contrario el comportamiento futuro es completamente impredecible. En esencia esto significa que si el estado de un punto evoluciona de una forma

regular con el tiempo, es de esperar que un punto próximo al anterior lo haga de una forma parecida. Lo que posteriormente se llamó comportamiento irregular o caótico es precisamente el que puntos próximos en el instante actual, puedan tener comportamientos muy dispares en instantes futuros (Balibrea, 1998).

El conjunto de leyes que describen los procesos físicos y dinámicos de la atmósfera presentan una naturaleza altamente no lineal. Refiriéndose a que hay interacciones entre los distintos procesos haciendo que la evolución de la sea sensitiva a las condiciones iniciales, tratándose de un sistema energético disipativo como se puede observar en la figura 3.

Figura 3. Interacción entre procesos atmosféricos



Fuente: National Center for Atmospheric Research, 2001.

### 1.7 LA PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO.

La predicción numérica del tiempo se lleva a cabo a partir de modelos matemáticos implementados por ecuaciones en derivadas parciales, las cuales traducen las leyes físicas que rigen la atmósfera terrestre. La atmósfera es un fluido, por lo que las ecuaciones que se implementan son ecuaciones generales

de la mecánica de fluidos, para un caso particular de una capa aislada de vapor de agua o aire seco cuyo movimiento se observa desde un sistema no inercial, como lo son todos los que giran con la Tierra. Un análisis del orden de magnitud de los distintos términos de esas primeras ecuaciones permite simplificarlas según sean las escalas de espacio y tiempo de los fenómenos meteorológicos que se consideren. En lo que respecta a la predicción meteorológica clásica, las escalas espaciales horizontales van de 10.000 Kilómetros a 10 kilómetros (escalas planetaria, sinóptica y de mesoescala) y las temporales de varios días a algunas horas. Las ecuaciones matemáticas obtenidas son no lineales y, en general, sus soluciones no se pueden obtener de forma analítica. Para resolverlas hay que apelar al cálculo numérico, que proporciona una solución aproximada. La “numerización” básicamente consiste en reemplazar las ecuaciones en variables continuas por ecuaciones en las que las variables son discretas, cuyas soluciones se obtienen mediante un algoritmo apropiado. Existe una gran variedad de modelos, cada uno con sus ventajas e inconvenientes. Como norma general, cuanto más preciso sea el método más cálculos habrá que hacer y, por tanto, más tiempo se tardará en ejecutarlos. (Lezun, 2003).

## **1.8 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES**

Son la mejor herramienta de que se dispone para el estudio de este complejo sistema son los modelos climáticos. Hay diversos tipos de modelos, desde los más sencillos que permiten comprender el efecto global de diversos forzamientos individuales, hasta los más complejos que son capaces de reproducir aceptablemente los principales procesos que tienen lugar en el sistema y que, a la postre, determinan el clima terrestre (McGuffie & Henderson, 2005).

Los modelos de este último tipo se basan en la resolución numérica del conjunto de ecuaciones que expresan las leyes y principios físicos que rigen la dinámica tridimensional de los procesos fundamentales que tienen lugar en cada componente del sistema climático, así como los intercambios de energía y masa entre ellos. Por esta razón, a los modelos que pueden simular las interacciones entre los cinco componentes del sistema climático global de forma acoplada se les da el nombre de Modelos del Clima Global con Acoplamiento (De castro, 2005).

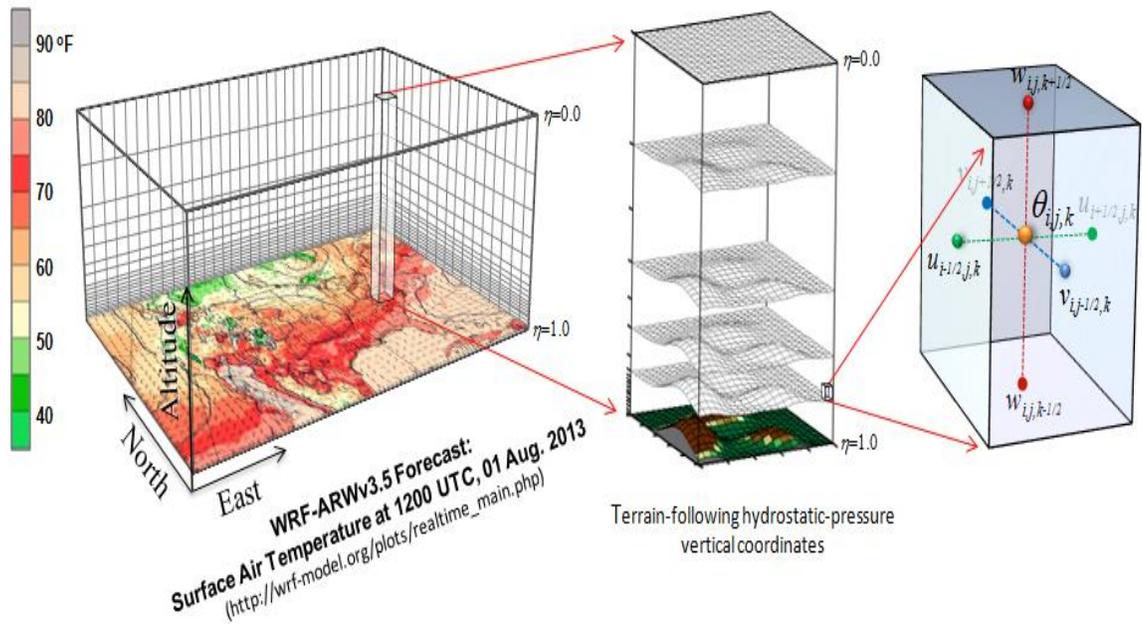
En sus inicios los hombres pudieron considerar los modelos numéricos de predicción meteorológica como algo anecdótico capaz de reproducir con mayor o menor fidelidad las características de la circulación atmosférica. Sin embargo, gracias a su constante mejora, actualmente son una herramienta imprescindible para la predicción. Hoy en día nadie duda de que los modelos numéricos realizan mucho mejor que el hombre las síntesis de todos los procesos de interacción física, que antes solo eran parcialmente comprendidos. Ahora bien, aunque estos modelos suelen dar previsiones realistas, no siempre dan una predicción exacta y a veces aparecen importantes errores, incluso para predicciones a muy corto plazo. Esto significa que los resultados de los modelos numéricos deben ser continuamente confrontados con la realidad: a posteriori para intentar corregir sus defectos sistemáticos, y en tiempo real para detectar a tiempo divergencias en las simulaciones que sean susceptibles de conducir a una estimación errónea de los fenómenos meteorológicos implicados (Lezaun, 2003).

## **1.9 MODELOS ACTUALES DE PREDICCIÓN**

El principal modelo de predicción meteorológico utilizado en la actualidad es el modelo Weather Research and Forecasting model (WRF) que es un novedoso modelo meteorológico no-hidrostático desarrollado a partir de la colaboración de prestigiosos centros de investigación internacionales (NCAR, NOAA, etc; Michalakes, 2002). El modelo resuelve en una escala regional las ecuaciones dinámicas primitivas considerando la conservación de los flujos escalares y de masa a partir de condiciones iniciales y de contorno obtenidas de modelos de circulación global. Para ello cuenta con varias estructuras dinámicas y numerosas parametrizaciones físicas que permiten representar distintos procesos, permitiendo aplicarlo en diferentes escalas que van desde las decenas hasta los miles de kilómetros. El modelo WRF puede generar simulaciones atmosféricas utilizando datos reales (observaciones, análisis) o condiciones idealizadas, realizando predicciones operativas de una plataforma flexible y computacionalmente eficiente, al tiempo que proporciona los últimos avances de la física, los dígitos, la asimilación de datos aportados por los desarrolladores a través de la comunidad de investigación muy amplio (The Wather Reasch & Forecasting Model. 2006).

En la figura 4. Se puede observar la representación del grillaje del modelo WRF con predicciones para temperaturas en grados Fahrenheit, donde la atmosfera se presenta como un cubo donde tiene componente en 3 dimensiones espaciales en (x, y,z) donde z es la altitud que se representa en componentes sigma.

Figura 4. Grillaje WRF para temperaturas



Fuente: Washington State University, 2007.

Algunos de los modelos de predicción meteorológica más robustos y reconocidos son: el HadCM3 que es un modelo climático acoplado que se ha utilizado ampliamente para la predicción del clima, detección y atribución, y otros estudios de sensibilidad climática. Fue desarrollado en 1999, siendo la primera configuración climática de tipo unificado que no requería ajustes de flujo (ajustes artificiales aplicadas a simulaciones de modelos climáticos para evitar que la deriva en estados de clima poco realistas). Su buena simulación del clima actual sin necesidad de utilizar los ajustes de flujo fue un avance importante en el momento de su elaboración y que todavía ocupa un lugar destacado en comparación con otros modelos en este sentido (Reichler & Kim, 2008). También tiene la capacidad de capturar la huella dactilar dependiente del tiempo del cambio

climático histórica en respuesta a los forzamientos naturales y antropogénicos (Stott et al. 2000), que ha hecho que sea una herramienta especialmente útil en los estudios relativos a la detección y atribución de los cambios climáticos del pasado. El componente atmosférico tiene 19 niveles con una resolución horizontal de 2,5 grados de latitud por 3.75 grados de longitud, lo que produce una cuadrícula mundial de 96 x 73 celdas de la cuadrícula. Esto es equivalente a una resolución de superficie de aproximadamente 417 kilómetros x 278 kilómetros en el ecuador, lo que reduce a 295 kilómetros x 278 kilómetros a 45 grados de latitud. El componente oceánico tiene 20 niveles con una resolución horizontal de 1,25 x 1,25 grados. En esta resolución es posible representar los detalles importantes en las actuales estructuras oceánicas (Mett Office, 2016).

El Centro Meteorológico Canadiense (CMC) ha adoptado para las operaciones un modelo único, a saber, el modelo GEM de observación del medio ambiente mundial en varias escalas. Este modelo se utiliza para establecer pronósticos de PNT en todas las escalas espaciales y temporales. Las predicciones a plazo medio (hasta 15 días) se obtienen a partir de la configuración global del modelo y las predicciones a corto plazo (48 horas) a partir de la configuración regional de resolución variable. También se establece una predicción de 24 horas utilizando una retícula de resolución incluso mayor. Se prevé reemplazar los modelos de predicción estacional y mensual por el GEM en el futuro próximo. Los modelos se ejecutan actualmente con un ordenador NEC SX-4. El Centro dispone de un superordenador NEC SX-4 con tres nodos y también de un SX-5 (Simard, 2000).

El modelo de mesoescala PSU / NCAR es un área limitada, no hidrostático o hidrostática, el modelo MM5 es de seguimiento del terreno diseñado para simular o predecir la circulación atmosférica de mesoescala y regional a gran escala. El NCAR / Penn State (modelo de mesoescala quinta generación) MM5, es el último de una serie que se desarrolló a partir de un modelo de mesoescala desarrollado en la Pennsylvania State University y documentado por Anthes y Warner en 1978. Desde entonces, ha sufrido muchos cambios diseñados para ampliar su uso. Estos incluyen: una capacidad de varios nodos, la dinámica no hidrostática la cual permite que el modelo se pueda utilizar en una escala pocos kilómetros, la capacidad de multitarea compartidas en máquinas de memoria distribuida, más opciones de física dimensional y la capacidad de asimilación de datos, se proporciona un esquema para facilitar la discusión del sistema de modelado completa. Los datos meteorológicos terrestres e isobáricos son interpolados horizontalmente a partir de una malla de latitud y longitud a un dominio variable de alta resolución cada una conformada por la proyección estereográfica polar. Dado

que la interpolación no proporciona detalles de mesoescala, el programa INTERPF realiza la interpolación vertical desde los niveles de presión en el sistema de Sigma MM5 de coordenadas. Las superficies sigma cerca de la planta siguen de cerca el terreno, y las superficies sigma de niveles superiores tienden a aproximarse a superficies isobáricas. Dado que la resolución y el tamaño de dominio vertical y horizontal son variables, los programas paquete de modelado emplean dimensiones parametrizadas que requieren una cantidad variable de memoria de núcleo. También se utilizan algunos dispositivos de almacenamiento periféricos. El modelo MM5 es regional, se requiere una condición inicial, así como condición de borde lateral para la ejecución del modelo, se necesita datos malla para cubrir todo el período de tiempo que el modelo se integra (MM5 Community model, 2015).

El Acople Océano / Atmósfera de mesoescala Sistema de Predicción (COAMPS®), es desarrollado y gestionado por el Laboratorio de Investigación Naval en Monterey, CA, es un modelo numérico utilizado para predicciones inmediatas de viento y pronósticos. La implementación del modelo utilizado tiene una resolución espacial de 4 Kilómetros y cubre el océano costero de Oregon a México. El modelo atmosférico COAMPS está diseñado para ser utilizado en simulaciones idealizadas y de datos reales. Idealizado las condiciones iniciales se establecen normalmente a través de una subrutina que especifica todos los campos iniciales mediante funciones analíticas y/o datos empíricos. Por simulaciones de datos reales, COAMPS utiliza un sistema de asimilación de datos atmosféricos, de control de calidad de datos, análisis, inicialización, y los componentes del modelo de pronóstico (Hodur, 1996) En 1998, cuando la tendencia de la computación de alto rendimiento se estaba moviendo hacia la memoria distribuida paralela masiva los científicos de la NRL MMD colaboraron con científicos de la National Lawrence Livermore National Laboratorio (LLNL) para comenzar el desarrollo de una versión escalable de COAMPS. Esta versión de COAMPS utiliza la interfaz de paso de mensajes (MPI) y una descomposición de dominio horizontal técnica para lograr el paralelismo. La FNMOC comenzó a funcionar plenamente en los sistemas SGI O3K el invierno de 2001. Esta versión de COAMPS incluye un sistema de asimilación de datos atmosféricos basado en un método de interpolación óptima multivariable tridimensional (MVOI) y un método no hidrostático, multinested modelo de pronóstico atmosférico (Naval Research Laboratory, 2003).

## **1.10 LAS ECUACIONES METEOROLÓGICAS DEL MOVIMIENTO**

En meteorología se utilizan como referencia sistemas ligados a la superficie de la tierra. Esto supone dos alteraciones en las ecuaciones, las debidas a la rotación terrestre (fuerza de coriolis) y las debidas a la forma esférica de la tierra. Se tiene por tanto que modificar esas ecuaciones para escribirlas en las nuevas coordenadas. Sea (x, y, z) un sistema de coordenadas cartesianas que está fijado a la superficie terrestre. La coordenada x es la distancia sobre el paralelo terrestre (hacia el este x es positiva), la coordenada y es la distancia sobre el meridiano (hacia el norte y es positiva) y la coordenada z es la altura sobre la superficie terrestre (Leazun, 2003).

Escribiendo las ecuaciones en estas nuevas variables y haciendo un análisis del orden de magnitud de los distintos términos de las ecuaciones de forma que se eliminen los términos de menor influencia atendiendo a la escala de los fenómenos meteorológicos que se quieran tratar; para las latitudes medias del hemisferio norte y escala sinóptica se obtiene así el sistema simplificado caracterizado por las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + fu + fry \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} + u \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - fu + fry \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{\partial w}{\partial z} = -g\rho \quad (3)$$

$$P = \rho RT \quad (4)$$

$$\left( \frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + w \frac{\partial P}{\partial z} \right) = -\rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{RT}{P} \left( \frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + w \frac{\partial P}{\partial z} \right) = Q \quad (6)$$

$$\left( \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} \right) = Q' \quad (7)$$

Fuente: (Leazun, 2003).

### 1.11 ECUACIONES EN COORDENADAS ISOBÁRICAS

Las ecuaciones de la dinámica y la termodinámica de la atmósfera escrita en el sistema  $x, y, z$  usando  $z$  como coordenada vertical no son muy útiles para aplicaciones meteorológicas, en los modelos meteorológicos se emplean otras variables en calidad de tercera coordenada: Presión, Presión normalizada, entre otros. Alternativamente a la altura  $z$ , como coordenada vertical, se puede usar una función la presión por ejemplo, siempre y cuando exista una relación simple que ligue estas dos variables  $z$  y  $p$ . En este caso, para relacionarlas se utiliza la ecuación de estática. A este nuevo sistema de coordenadas que está representado por las ecuaciones 8, 9, 10, 11, 12,  $(x, y, P, t)$  se le llama sistema de coordenadas isobáricas. En el sistema de coordenadas cartesianas las variables independientes eran  $(x, y, z, t)$  y las variables dependientes eran  $(u, w, \rho, T$  y  $P)$ . En el nuevo sistema la presión  $P$  ya no es función sino que se convierte en una variable independiente. Además, en el nuevo sistema,  $z$  es una función más exactamente una variable estrechamente relacionada con ella, el geopotencial  $\phi$ , (Montoya, 2008).

$$\frac{du}{dt} = -\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_p + fv \quad (8)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)_p - fv \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)_P + \frac{\partial w}{\partial P} = -g\rho \quad (10)$$

$$\frac{dT}{dt} - \left(\frac{1}{c_p\rho}\right)\omega = \frac{1}{\rho} \frac{dQ}{dt} \quad (11)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \quad (12)$$

Fuente: Montoya, 2008.

Donde las variables independientes son:

$t$  = tiempo,

$x$  = Espacio Longitudinal,

$y$  = Espacio en Profundidad,

$P$  = Presión como coordenada vertical.

Donde las variables dependientes:  $u$  = Componente en  $x$  de los vientos,

$v$  = Componente en  $y$  de los vientos,

$T$  = Temperatura,

$\omega$  = Velocidad vertical,

$\phi$  = Geopotencial.

Donde  $d$  representa la derivada total y  $\partial$  la derivada parcial

## 1.12 RESOLUCIÓN NUMÉRICA

Una vez construido el modelo matemático hay que resolverlo, hay que diseñar un algoritmo que, a partir de los valores de las funciones incógnitas en un instante inicial, proporcione los valores de esas variables en instantes posteriores. Ahora bien, debido fundamentalmente al carácter no lineal de las ecuaciones, el sistema

y sus variantes, con las correspondientes condiciones iniciales y de contorno, no se puede resolver obteniendo unas expresiones matemáticas explícitas que den los valores de las variables en instantes posteriores. Su resolución sólo se puede abordar con métodos numéricos, convirtiendo el problema continuo en uno discreto, para luego resolverlo en un ordenador y obtener así valores aproximados de las variables meteorológicas. La rama de las matemáticas que estudia este tipo de resoluciones se denomina Análisis Numérico, que desde la llegada de los ordenadores ha sufrido un desarrollo espectacular. Veamos las ideas directrices de la resolución numérica de esas ecuaciones (Lezaun, 2006).

### **1.13 NOCIÓN DE MEDIO CONTINUO**

Un medio físico está formado por corpúsculos materiales: como átomos y moléculas. El tamaño medio de una molécula varía con el medio considerado, pero se puede decir que es del orden de  $10^{-10}$  metros. Un cubo de gas de lado una centésima de milímetro contiene más o menos 27 mil millones de moléculas del gas en condiciones normales de temperatura y de presión. Así, el espacio vital de cada molécula es del orden de  $3.7 \times 10^{-26}$  m<sup>3</sup>. De forma muy esquemática se puede considerar que las moléculas son esféricas y que para un mismo cuerpo todas son idénticas. Las fuerzas inter-moleculares son un fenómeno muy complejo. También de forma muy esquemática se puede afirmar que dos moléculas se atraen, salvo si la distancia que separa los centros de las moléculas es del orden de magnitud de sus diámetros. Entonces, en un comprensible “reflejo de defensa de su integridad”, las moléculas desarrollan una fuerza repulsiva. Así pues, las propiedades de un medio material no están uniformemente distribuidas por todo el espacio ocupado por el medio material. La distribución es menos uniforme cuanto menor es la escala de observación. La “mecánica de los medios continuos” se interesa por el comportamiento de la materia a una escala grande con respecto a las distancias inter-moleculares, sin tener en cuenta de forma explícita las estructuras moleculares. Su dominio es el de la escala humana. “La hipótesis del medio continuo afirma que un medio continuo es un medio en el que el comportamiento macroscópico puede ser esquematizado suponiendo que la materia está repartida en todo el dominio de ocupación, y no concentrada, como realmente está, en una parte muy pequeña de volumen”. De la misma forma, las magnitudes asociadas a la materia introducidas en la esquematización, por ejemplo la densidad y la velocidad, también se consideran que están extendidas por todo el dominio ocupado por el medio. Se las representan pues por funciones continuas (Lezaun, 2006).

## **1.14 DISCRETIZACIÓN DEL ESPACIO**

Se divide la atmósfera en cajas y se considera que en cada una de las cajas las variables meteorológicas son homogéneas, que valen lo mismo. Según los modelos y los plazos de las predicciones, las dimensiones horizontales de estas cajas pueden ir desde diez a unas pocas centenas de kilómetros y el número de niveles de altura desde unos veinte hasta sesenta (Lezaun, 2006).

## **1.15 ASIMILACIÓN DE DATOS**

Para arrancar el proceso de resolución se necesita conocer el estado de la atmósfera en un instante inicial de partida, más exactamente el valor de las magnitudes meteorológicas en todas las cajas en  $t$ . Para determinar esos valores se parte de los datos proporcionados por una extensa red de recogida de datos meteorológicos “in situ” sobre la superficie terrestre y en capas altas de la atmósfera (observatorios, estaciones automáticas en tierra, boyas marinas, barcos mercantes, globos sonda, aviones comerciales...) y por aparatos de teledetección, como son los satélites meteorológicos geoestacionarios, los polares y los radares meteorológicos. Las estaciones meteorológicas no están igualmente distribuidas por toda la superficie terrestre ni por toda la atmósfera, de unas zonas geográficas se tienen muchos más datos que de otras y hay pocos datos en altura. En lo que respecta a los satélites polares, barren continuamente la tierra y sus medidas no se obtienen simultáneamente en todos los puntos. Con toda esta gran cantidad de datos, mal distribuidos, hay que construir el estado inicial de las variables meteorológicas en todas las cajas atmosféricas. Además, todas las variables meteorológicas tienen que estar relacionadas entre sí, ya que conforman un estado instantáneo de la atmósfera. El proceso de pasar de los datos observados a las condiciones iniciales se denomina asimilación de datos. Actualmente los modelos meteorológicos operativos más avanzados lo hacen resolviendo un problema matemático de optimización dinámica denominado Asimilación Variacional 4D-VAR. La idea subyacente de este método consiste en fijar un intervalo temporal precedente, por ejemplo doce horas, y hallar las condiciones iniciales en todas las cajas atmosféricas de forma que en ese intervalo la distancia que separa esas condiciones y la de los valores obtenidos de la resolución del modelo con los valores recogidos por la red de observación sea mínima (Lezaun, 2006).

## **1.16 CONDICIONES DE CONTORNO**

Si no se fijan condiciones de contorno, es decir, valores de las variables meteorológicas en la frontera del dominio de resolución, el problema sigue sin ser resoluble. En los modelos globales para toda la atmósfera la frontera del dominio de integración está formado por las superficies inferior y superior de la atmósfera. En esos casos, hay algoritmos que resuelven las distintas ecuaciones de forma sucesiva y las condiciones de contorno no presentan especiales dificultades. En los modelos regionales, en los que el dominio de integración está limitado lateralmente, una opción ampliamente utilizada consiste en tomar como condiciones de contorno los valores obtenidos de la resolución de un modelo global. Se dice entonces que el modelo regional está anidado en el global (Lezaun, 2006).

## **1.17 PARAMETRIZACIONES FÍSICAS**

Toda discretización, sea del tipo que sea y por muy alta que sea su resolución espacial, por muy pequeñas que sean las cajas atmosféricas, tiene una limitación derivada de la existencia de fenómenos atmosféricos de “pequeña” escala que no pueden ser resueltos explícitamente por el modelo discreto. Se incluyen aquí desde movimientos turbulentos con escalas que varían entre unos pocos centímetros y las dimensiones horizontales de las cajas atmosféricas, hasta procesos que ocurren a escala molecular, como son la condensación, la evaporación, el rozamiento y la radiación. Todos estos procesos que no pueden ser resueltos explícitamente por el modelo numérico, que no son recogidos por el modelo, los denominaremos procesos de escala subcaja, en contraposición con los fenómenos de escala resoluble por el modelo. Por ejemplo, durante el día el calentamiento solar de la superficie terrestre no sólo calienta el suelo sino que también hace que las plantas transpiren y que la humedad del suelo se evapore, teniéndose así un transporte de vapor de agua a la atmósfera. También, este calentamiento de la superficie de la tierra da lugar a un movimiento atmosférico turbulento sobre todo en sentido vertical, que tiene una escala horizontal comprendida entre unos centímetros y unos pocos cientos de metros. Cuando el tamaño horizontal de las cajas está entre diez y cien kilómetros, los modelos discretos no pueden resolver estos movimientos (Lezaun, 2006).

Los procesos que tienen escalas pequeñas dependen y afectan a los procesos de escala más grande y a los procesos que son resueltos explícitamente por los modelos numéricos. Por ejemplo, la condensación de vapor de agua, de escala subcaja, ocurre cuando la humedad de la escala del modelo es suficientemente grande y, en sentido inverso, la condensación libera calor latente que eleva la temperatura de la escala resoluble del modelo. Por todo esto, si se ignora el efecto de los procesos subcaja en los campos de escala resoluble, el modelo deja de ser realista en un plazo de tiempo muy corto y se produce una degradación de la calidad de la predicción. Para recoger la interacción entre los fenómenos de escala subcaja y los de escala resoluble, los de escala subcaja se tienen que parametrizar, es decir, sus efectos se tienen que formular en términos de las escalas resolubles, lo que constituye la denominada parte física de los modelos. Los diferentes modos de parametrizar los fenómenos de escala subcaja tienen un profundo efecto sobre los modelos de predicción del tiempo y sobre los modelos climáticos, y son objeto de investigaciones muy intensas (Lezaun, 2006).

### **1.18 MÉTODOS DE DISCRETIZACIÓN DE ECUACIONES DIFERENCIALES EN DERIVADAS PARCIALES**

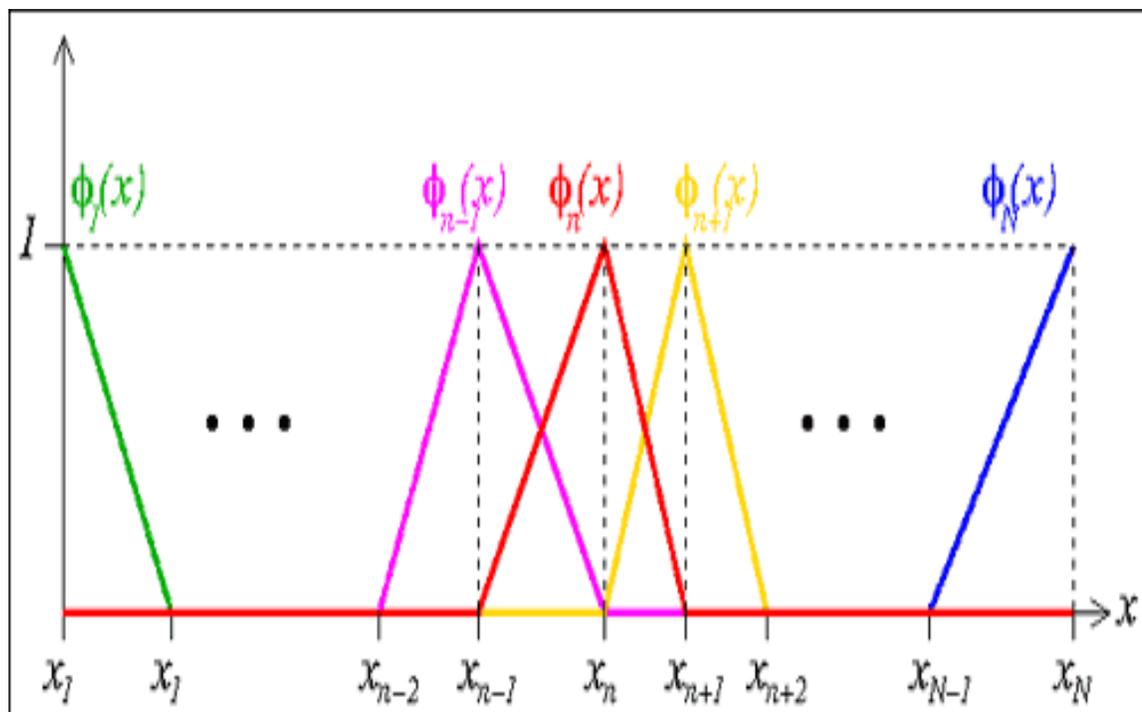
Los esquemas en diferencias finitas son los más usados en los modelos numéricos modernos y se basan en la aproximación de las derivadas parciales (tanto espaciales como temporales) por diferencias entre los valores de la variable en cuestión en dos nodos de la rejilla próximos entre sí. Según que estos nodos sean el presente y el siguiente (adelantadas), el presente y el anterior (atrasadas), o el anterior y el posterior (centradas) tenemos diferentes variedades del esquema. Cada una tiene diferentes propiedades de exactitud y estabilidad aunque el más usado en los modelos numéricos es el esquema de diferencias finitas centradas, ya que es más exacto y más estable que los otros dos. Otro tipo de esquema es el método espectral el cual se trata de un método alternativo que aprovecha las propiedades de las EDP's de los modelos numéricos. Las soluciones pueden obtenerse como serie de funciones ortogonales que pueden ser series de Fourier pero que en la esfera son armónicos esféricos, por ser éstos más adecuados a la geometría del problema. Por tanto en este caso las variables dependientes no se representan sobre los puntos de una rejilla sino en términos de series de armónicos esféricos, aunque dichas series debieran ser infinitas esto no es posible y se establece la representación en series finitas. (García, 2016).

La principal ventaja de los armónicos esféricos como funciones base es que son

ortogonales, continuos y diferenciables en los polos. Además el laplaciano de un armónico esférico es proporcional a él mismo, con lo que algunos términos de las EDP's se simplifican mucho. La desventaja es que los modelos deben cambiar entre el espacio espectral y el de rejilla en cada paso de tiempo lo que hace que consuman mucho más tiempo de ordenador que las diferencias finitas. Se trata igualmente de representar las variables dependientes del modelo en una serie de funciones base que sean ortogonales. En este caso las funciones base son polinomios de primer orden que son distintos de cero en los alrededores del nodo de la rejilla considerado y son cero en el resto del dominio (García, 2016).

En la figura 5. Se puede ver la representación de una base de elementos finitos en un dominio de una dimensión. Tienen la ventaja de mejorar la representación de la función cuando la rejilla no es regular (rejillas de resolución variable).

Figura 5. Representación de elementos finitos



Fuente: García, 2016.

## 1.19 TEORIA DEL CAOS EDWARD NORTON LORENZ

En el año de 1963, un joven meteorólogo del MIT, Edward Lorenz, antiguo alumno de Birkhoff en Harvard, planteó un modelo formado por tres ecuaciones diferenciales ordinarias para describir el movimiento de un fluido bajo la acción de un gradiente térmico. Mientras buscaba soluciones numéricas con ayuda de una computadora, la Royal McBee LGP-30, el primer ordenador personal (Merrill, 2009), encontró al volver de tomar una taza de café con que se manifestaba un dramático comportamiento inestable, caótico. Lorenz se había encontrado por casualidad con el fenómeno de la sensibilidad a las condiciones iniciales, que hacía de su sistema algo en la práctica impredecible. Una pequeña variación en las condiciones iniciales ocasionaba estados finales completamente diferentes. Dos estados iniciales muy similares podían evolucionar de modo radicalmente distinto. Tomando prestada la imagen que luego forjaría, Lorenz había descubierto el efecto mariposa el aleteo de una mariposa en Brasil puede ocasionar un tornado en Texas. Supongamos que una pequeña mariposa está posada en un árbol en una remota región del Amazonas. Mientras permanece posada, abre y cierra ocasionalmente sus alas por dos ocasiones. Como el sistema atmosférico es un sistema caótico, que exhibe dependencia sensible a las condiciones iniciales, la diminuta variación en los remolinos de aire contiguos a la mariposa puede acabar influyendo en que haya o no haya un huracán sobre Texas varios meses después. Lorenz publicó su hallazgo en una revista de Meteorología, en un artículo titulado *Deterministic Nonperiodic Flow* que pasó prácticamente desapercibido. Sólo el profesor James Yorke de la Universidad de Maryland reconoció las repercusiones científicas y filosóficas de la investigación de Lorenz, pues en Lorenz (1963) converge, la tradición matemática soviética, tal y como ésta quedaba plasmada en el libro *Qualitative theory of differential equations* de Nemytskii y Stepanov, publicado en 1949 en Moscú y traducido al inglés en 1960. (Madrid, 2010).

Los modelos de circulación atmosférica contienen términos no lineales, por lo que la teoría del caos ha tenido notable repercusión en este campo en las tres últimas décadas. La sensibilidad de los sistemas caóticos a pequeñas perturbaciones hace que sólo puedan ser predichos hasta un cierto horizonte, ya que cualquier modelo aproximado conllevaría un error que se propagaría exponencialmente hasta que la dinámica del sistema aproximado difiera de la dinámica real. Este hecho supone una limitación teórica al alcance de predicción de los modelos numéricos de predicción del tiempo. Dependiendo del tipo de aproximaciones

físicas y escalas que se consideren en el modelo numérico, la no linealidad del modelo resultante impondrá un umbral menor o mayor en el alcance de la predicción. El caos fue analizado por primera vez en las ecuaciones 13, 14, 15, de un modelo atmosférico simplificado llamado las ecuaciones de Lorenz,

$$\dot{x} = \sigma (y - x) \quad (13)$$

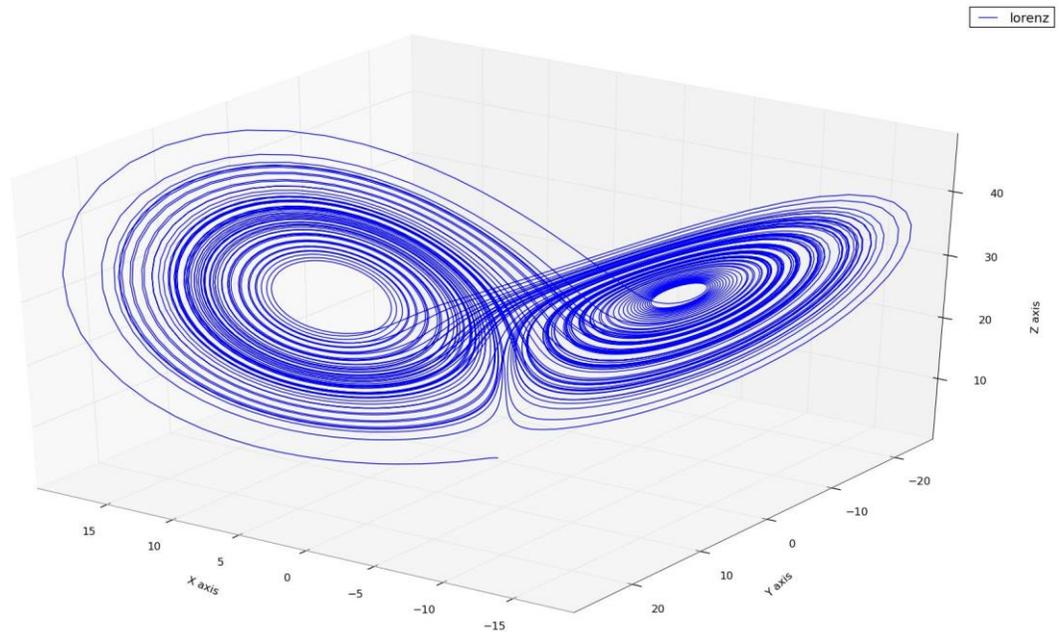
$$\dot{z} = x y - b z \quad (14)$$

$$\dot{y} = r x - y - x z \quad (15)$$

Fuente: Lorenz, 1963.

Lorenz dedujo estas ecuaciones cuando estudiaba la posibilidad de predecir estructuras convectivas, tan frecuentes en la naturaleza y en tan diversas escalas. Para ello tomó como punto de partida las formaciones convectivas hidrodinámicas de Rayleigh-Bénard, por ser fáciles de generar y reproducir en el laboratorio. Basta con calentar por debajo una capa muy fina de un fluido viscoso, como la glicerina. El fluido caliente formado en la parte baja tiende a elevarse creando corrientes convectivas. Este proceso es muy parecido a lo que sucede en la atmósfera terrestre. Para un calentamiento suficientemente intenso la evolución temporal de estas corrientes convectivas tiene un comportamiento caótico; es decir, pequeñas perturbaciones en el sistema producen cambios impredecibles en su dinámica tras un tiempo suficiente. Las ecuaciones que describen este experimento tienen en cuenta los tres efectos más importantes que aparecen: La fuerza debida al gradiente térmico, la viscosidad y la difusión térmica. Lorenz observó que estas ecuaciones eran intratables numéricamente, pues no podía saber si el comportamiento errático era debido a una inestabilidad numérica o existía verdaderamente en el modelo. Propuso entonces una ecuación más simple, suponiendo que el campo de velocidades era el gradiente de una función  $\Psi$  y que existían simetrías espaciales. En la figura 6. Se puede observar el modelo resultante, presenta dinámicas caóticas para ciertos valores de los parámetros (Gutiérrez et al, 2004).

**Figura 6. Atractor de Lorenz**



**Fuente:** Lorenz, 1963.

## **1.20 ARCGIS**

ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios. ArcGIS permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario. El sistema está disponible en cualquier lugar a través de navegadores Web, dispositivos móviles como smartphones y equipos de escritorio. Se puede pensar en el sistema ArcGIS como en una infraestructura para elaborar mapas y poner la información geográfica a disposición de los usuarios dentro de un departamento, por toda una organización, entre varias organizaciones y comunidades de usuarios o en Internet, para cualquier usuario interesado en acceder a ella (esri, 2012).

## 1.21 MATLAB

MATLAB es un lenguaje de programación donde los problemas y las soluciones son expresados como se escriben matemáticamente, sin la programación tradicional. El nombre MATLAB proviene de "MATrix LABoratory" (Laboratorio de Matrices). MATLAB fue escrito originalmente para proporcionar un acceso sencillo al software matricial desarrollado por los proyectos LINPACK y EISPACK, que juntos representan lo más avanzado en programas de cálculo matricial. MATLAB es un sistema interactivo cuyo elemento básico de datos es una matriz que no requiere dimensionamiento. Esto permite resolver muchos problemas numéricos en una fracción del tiempo que llevaría hacerlo en lenguajes como C, BASIC o FORTRAN. MATLAB ha evolucionado en los últimos años a partir de la colaboración de muchos usuarios. En entornos universitarios se ha convertido en la herramienta de enseñanza estándar para cursos de introducción en álgebra lineal aplicada, así como cursos avanzados en otras áreas. En la industria, MATLAB se utiliza para investigación y para resolver problemas prácticos de ingeniería y matemáticas, con un gran énfasis en aplicaciones de control y procesamiento de señales. MATLAB también proporciona una serie de soluciones específicas denominadas TOOLBOXES (Sánchez, 2000).

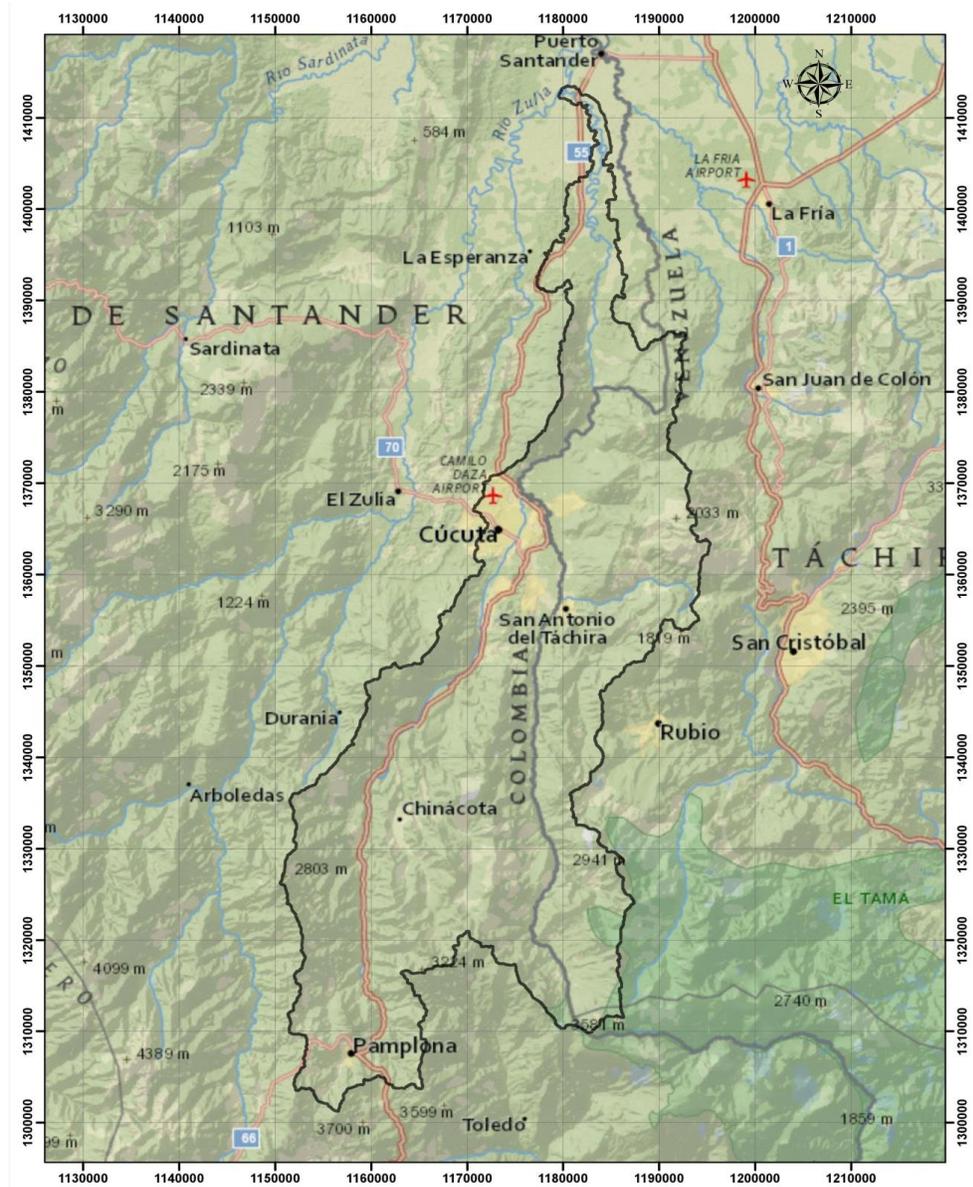
## 2. MARCO CONTEXTUAL

La cuenca del río Pamplonita presenta un área de 1345.3497 m<sup>2</sup>, se encuentra ubicada geográficamente en la vertiente oriental de la Cordillera Oriental de Colombia, al sureste del departamento de Norte de Santander. Está comprendida entre las coordenadas geográficas 7° 18' 43" a 8° 20' 44" de Latitud Norte y 72° 2' 6" a 72° 43' 29" de Longitud Oeste. La cual limita al Norte y Occidente con la cuenca del Río Zulia a la cual pertenecen los municipios de Municipios de Mutiscua, Pamplona, Cucutilla, Bochalema, Arboledas, Durania, San Cayetano y Cúcuta. Al sur con la cuenca del río Chitagá a la cual pertenecen los municipios de Pamplona, Toledo, Cácuta y Labateca. Al Oriente con Territorio Venezolano a lo cual pertenecen los municipios de Rafael Urdaneta, Bolívar, Pedro María Ureña y Ayacucho (Alzate, 2015).

La cuenca del río Pamplonita está conformada por un total de 10 municipios que en su orden ascendente tomada con la altitud sobre el nivel del mar son Herrán (2800 m.s.n.m), Pamplona (234 m.s.n.m), Pamplonita (1886 m.s.n.m), Bochalema (1051 m.s.n.m), Ragonvalia (1550 m.s.n.m), Chinácota (1175 m.s.n.m), Los Patios (410 m.s.n.m), Villa del Rosario (410 m.s.n.m), Cúcuta (320 m.s.n.m) y Puerto Santander (60 m.s.n.m). Presentando sus mayores afluentes las quebradas El Volcán, Monteadentro, Bataga, Agua Blanca, Chiracoca, Iscala, La Honda, Tascalera, Faustineria y Río Táchira, para conformar el cauce principal del río pamplonita con una longitud total de 300.64 m (Alzate, 2015).

En la figura 7. Se puede observar la ubicación geográfica de la cuenca del río pamplonita la cual se delimita con color negro, como también se puede observar las cuencas aledañas que son las cuencas del río Zulia y Chitagá. Con color gris se puede observar la frontera terrestre que divide Colombia y Venezuela por lo cual se obtiene que la cuenca del río Pamplonita pertenece a los 2 países.

Figura 7. Zona de estudio Cuenca del Río Pamplonita



Fuente: Palacios, 2017.

## 2.1 METEOROLOGÍA DE LA CUENCA

### 2.1.1 Precipitación Media.

Los datos obtenidos para calcular la precipitación media en la cuenca tienen un periodo de 18 años comprendido entre los años de 1986 y 2004, de las 28

estaciones pero solo 14 estaciones tienen una influencia directa y significativa dentro de la cuenca para lo cual se implementó el mapa de polígonos de Thiessen para precipitaciones. Al calcular el promedio o media aritmética de los datos de precipitación el valor resultante es de 1.551,53 mm, la mediana 1.459,46 mm y la media armónica es 1297.22 mm. (Alzate, 2015).

### 2.1.2 Temperatura.

Según el estudio realizado por Alzate: Las temperaturas medias mensuales de cada estación presentes muestran en general que en los dos primeros meses del año se presentan los valores más bajos de temperatura, además de distinguirse dos comportamientos en la cuenca durante el resto del año a mencionar: Meses más calurosos en el primer semestre: Se presenta entre los meses de abril a junio las mayores temperaturas pero como regla general se presenta el mes mayo como el mes con mayor temperatura, este comportamiento se presenta en los municipios de Herrán, Ragonvalia, Pamplona, Pamplonita, Chinácota, Bochalema, Los Patios y Villa del Rosario. Meses más calurosos en el segundo semestre: Se presenta entre los meses de agosto y septiembre, este comportamiento se presenta en el municipio de Cúcuta. Mes más caluroso por semestre en un año: Se presenta en los meses de mayo y agosto, este comportamiento se presenta en el municipio de Villa del Rosario. De acuerdo a la distribución de temperaturas en la cuenca, predominan las temperaturas bajas y medias en la mayoría del territorio superando el 60% de este, mientras que las temperaturas altas solo se presentan en un 20% del territorio aproximadamente y las temperaturas muy altas en un 15%, esto se ajusta y concuerda con las características paisajísticas de la cuenca (Alzate, 2015).

### 3. MARCO LEGAL

- En el año 2000, Colombia ratificó el Protocolo de Kyoto mediante la LEY 629 DE 2000 (diciembre 27) Diario Oficial No. 44.272, de 27 de diciembre de 2000 por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997. El principal objetivo del Protocolo fue la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero para las principales economías mundiales que lo aceptaron. Estos objetivos iban desde -8% hasta +10% del nivel de emisión de los países pertenecientes en 1999 "con miras a reducir el total de sus emisiones de esos gases a un nivel inferior del 5% al de 1990 en el período de compromiso comprendido entre el año 2008 y el 2012". En casi todos los casos, incluso en los que se fijó un objetivo de +10% de los niveles de 1990.
- En el año 2006, se organizó la tercera conferencia internacional sobre Alerta Temprana Titulada "del concepto a la acción", está brindando la oportunidad de presentar nuevos e innovadores proyectos de alertas tempranas y discutir las diferentes amenazas de todo el mundo, así como la forma de reducir al mínimo sus impactos mediante la aplicación de alertas tempranas centradas en la población.
- En el año 2010, es implantado en Colombia la Guía Plan para La Gestión del Riesgo, que tiene como propósito orientar a la comunidad educativa en la formulación e implantación de planes para la gestión del riesgo.
- En el año 2011 el Ministerio de educación de Panamá, UNESCO, Comisión Europea, publicaron un manual llamado "MANUAL SOBRE SISTEMAS DE ALERTAS TEMPRANAS 10 Preguntas- 10 Respuestas" el cual brinda información que ayuda a resolver algunas de las preguntas más frecuentes que surgen con el tema.
- En el año 2010 el Decreto 2780 establece el Comité Interinstitucional de Alertas Tempranas, CIAT, como un grupo de trabajo interinstitucional encargado de coordinar una respuesta ordenada y oportuna frente a los Informes de Riesgo (Focalizados y de Alcance Intermedio) y las Notas de Seguimiento provenientes del Sistema de Alertas Tempranas, SAT de la Defensoría del Pueblo (Ministerio Del Interior Y De Justicia, Colombia).

- En el 2011 y según la ley 1450 inicio del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático que está enmarcado por el Plan Nacional de Desarrollo “Prosperidad para Todos” 2010-2014, y el Conpes 3700 de 2011. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible junto con instituciones como el Instituto de Hidrología , Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM y LA Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo UNGRD apoyan la construcción del PNACC, iniciativa liderada por el Departamento Nacional de Planeación , DNP con la participación activa de los sectores productivos, los territorios y la población el cual nace de la alta vulnerabilidad de Colombia y la ausencia de estrategias de adaptación como respuesta al cambio del clima y eventos climáticos extremos.

- En el año 2012, la comisión del Banco mundial Colombia publico el “Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia, un aporte para la construcción de políticas públicas”, el cual muestra cuatro factores por los cuales el riesgo está aumentando, destacando que esto se debe más a la inadecuada gestión territorial, sectorial y privada, que por factores externos como el cambio climático.

La Ley 1523 de 2012 en la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones en el Artículo 4. Parágrafo 1 indica que Adaptación es la necesidad de comprender el ajuste de los sistemas naturales o humanos a los estímulos climáticos actuales o esperados o a sus efectos, con el fin de moderar perjuicios o explotar oportunidades beneficiosas, En el caso de los eventos hidrometeorológicos la Adaptación al Cambio Climático corresponde a la gestión del riesgo de desastres en la medida en que está encaminada a la reducción de la vulnerabilidad o al mejoramiento de la resiliencia en respuesta a los cambios observados o esperados del clima y su variabilidad.

- En el 2013, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres Sistema Nacional de Gestión del Riesgo público la Guía Metodológica para la Elaboración de la Estrategia de Respuesta Municipal “Preparación para el Manejo de Emergencias y Desastres”, la cual es una herramienta primordial y muy útil a la hora de generar un plan de gestión del riesgo, debido a que brinda una guía y ayuda para su elaboración.

- En el 2016, El ministerio de Medio Ambiente de Colombia presento el decreto 298 en el cual se adopta la "Estrategia Institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia", en el cual se establece

que la adaptación y mitigación al cambio climático requieren del desarrollo de estrategias de articulación tanto a nivel sectorial como en los ámbitos nacional y territorial, con el fin de generar una gestión compartida y coordinada, y una información pertinente y oportuna, que permita una adecuada toma de decisiones para contrarrestar de manera efectiva y oportuna los efectos de este fenómeno en el territorio nacional.

- En diciembre de 2015, se llevó a cabo la vigésima primera reunión de la Conferencia de las Partes (COP 21) de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). En el marco de este encuentro, se propuso llegar a un acuerdo internacional sobre cambio climático con miras a evitar un aumento de la temperatura global promedio por encima de los 2°C. Para alcanzar este objetivo, todos y cada uno de los países parte de la CMNUCC manifestaron cuáles serán sus aportes en términos del nivel de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el período post-2020. Dichos aportes, conocidos como las Contribuciones Determinadas y Previstas a Nivel Nacional, fueron decididos por cada país de manera autónoma. Respecto a la posición de Colombia, busca establecer compromisos nacionales ambiciosos y equitativos y para ello se ha propuesto, a través de su INDC, abordar la problemática del cambio climático de la forma más balanceada posible, incluyendo la mitigación, la adaptación y los medios de implementación. Este enfoque se ve particularmente importante para el país, dada su alta vulnerabilidad por impactos socio-económicos asociados a la variabilidad y el cambio climáticos.

- En el 2016, El decreto 298 presenta el Artículo 1 y 2 los cuales infieren que:

*Artículo 1°.* Objeto. Establecer el Sistema Nacional de Cambio Climático (Sisclima), con el fin de coordinar, articular, formular, hacer seguimiento y evaluar las políticas, normas, estrategias, planes, programas, proyectos, acciones y medidas en materia de adaptación al cambio climático y de mitigación de gases efecto invernadero, cuyo carácter intersectorial y transversal implica la necesaria participación y corresponsabilidad de las entidades públicas del orden nacional, departamental, municipal o distrital, así como de las entidades privadas y entidades sin ánimo de lucro.

*Parágrafo.* Como marco de actuación del Sisclima, se tomarán: El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC), la Estrategia Nacional para la Reducción de las Emisiones debidas a la Deforestación y la Degradación Forestal de Colombia

(Enredd+), la Estrategia de Protección Financiera ante Desastres y demás estrategias que en el marco del Sisclima se consideren necesarias para el logro de sus objetivos.

*Artículo 2°.* Sistema Nacional de Cambio Climático. El Sistema Nacional de Cambio Climático, en adelante Sisclima, es el conjunto de entidades estatales, privadas y entidades sin ánimo de lucro, de políticas, normas, procesos, recursos, planes, estrategias, instrumentos, mecanismos, así como la información atinente al cambio climático, que se aplica de manera organizada para gestionar la mitigación de gases efecto invernadero y la adaptación al cambio climático en el país.

## OBJETIVOS

### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de predicción meteorológico basado en sistemas dinámicos no lineales para la cuenca del río Pamplonita-Norte de Santander.

### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

*Los objetivos específicos fueron modificados en pro de mejorar y alcanzar un nivel satisfactorio de avance en investigación en el ámbito de las ciencias de la atmósfera, se pudo observar que a medida que se avanzo en la investigación nos encontramos con que las ideas planteadas en el anteproyecto para el desarrollo del modelo podían ser modificadas para obtener un mejor y más centrado resultado en el proyecto.*

Obtener las series temporales que representen la dinámica atmosférica en la cuenca del río Pamplonita e identificar las variables que ingresarán al modelo de predicción meteorológico.

Establecer las hipótesis del modelo que se aplicaran para la cuenca del río Pamplonita.

Resolver el sistema de ecuaciones no lineal que representa el modelo de predicción utilizando técnicas numéricas de ecuaciones diferenciales ordinarias y/o parciales.

Realizar la solución del modelo computacionalmente en MatLab para predecir el comportamiento de las variables meteorológicas seleccionadas en la cuenca del río Pamplonita.

Validar el modelo de predicción meteorológico, mediante la comparación de los datos obtenidos del modelo y los datos reales.

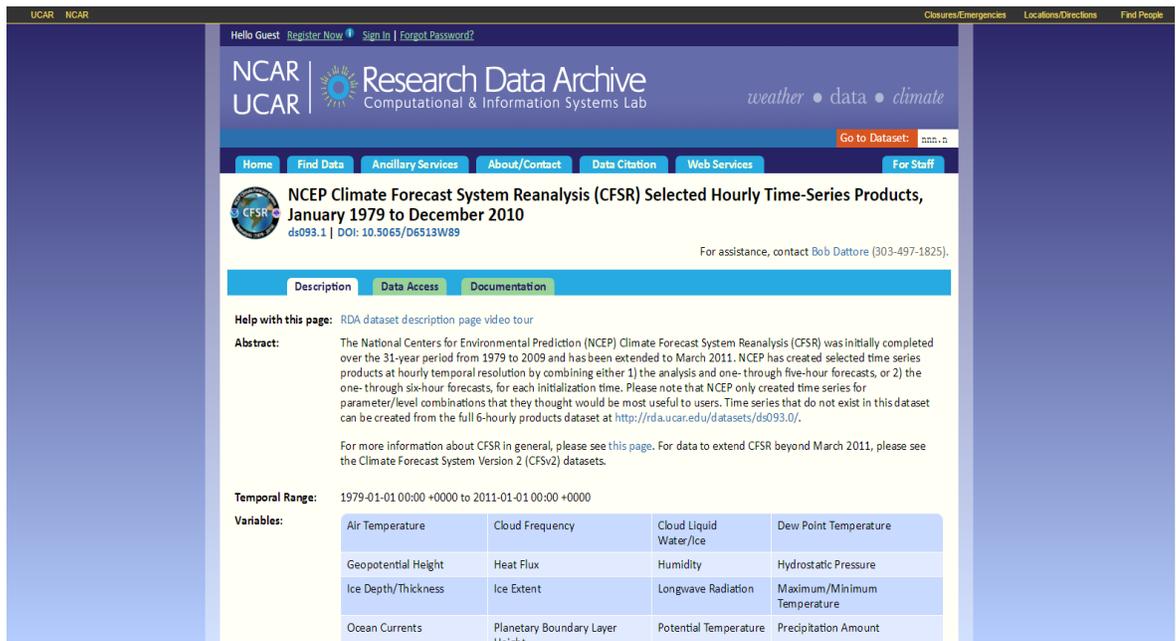
## 4. METODOLOGÍA

Con la siguiente metodología se desarrollo el modelo de predicción meteorológico para la cuenca del río Pamplonita.

**Obtener las series temporales que representen la dinámica atmosférica en la cuenca del río Pamplonita e identificar las variables que ingresaran al modelo de predicción meteorológico.**

- Los criterios de selección de variables se establecieron a partir de las ecuaciones diferencial que representan el modelo, los datos se obtuvieron del Reasearch Data Archive Computational & Information System Lab como se puede observa en la figura 8. En el cual se extrajo la base de datos NCEP Global Forecast System (GFS) Analyzes and Forecastsd of National Environmental Prediction Centers / National Weather Service / NOAA / US Department of Commerce esta base nos entrega series temporales de los años 2001 a 2012 con una validación completa de las 34 variables que se muestran en la Tabla 1.

Figura 8. Reasearch Data Archive



The screenshot displays the Research Data Archive (RDA) website interface. At the top, there are navigation links for 'UCAR', 'NCAR', and 'Hello Guest'. The main header features the 'Research Data Archive' logo and the tagline 'weather • data • climate'. Below the header is a search bar and a navigation menu with options like 'Home', 'Find Data', and 'Data Citation'. The main content area is titled 'NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010'. It includes an abstract, a temporal range, and a table of variables.

**Temporal Range:** 1979-01-01 00:00 +0000 to 2011-01-01 00:00 +0000

**Variables:**

Air Temperature	Cloud Frequency	Cloud Liquid Water/Ice	Dew Point Temperature
Geopotential Height	Heat Flux	Humidity	Hydrostatic Pressure
Ice Depth/Thickness	Ice Extent	Longwave Radiation	Maximum/Minimum Temperature
Ocean Currents	Planetary Boundary Layer Height	Potential Temperature	Precipitation Amount

Fuente: Research Data Archive, 2012.

**Tabla 1. Variables de la base de datos**

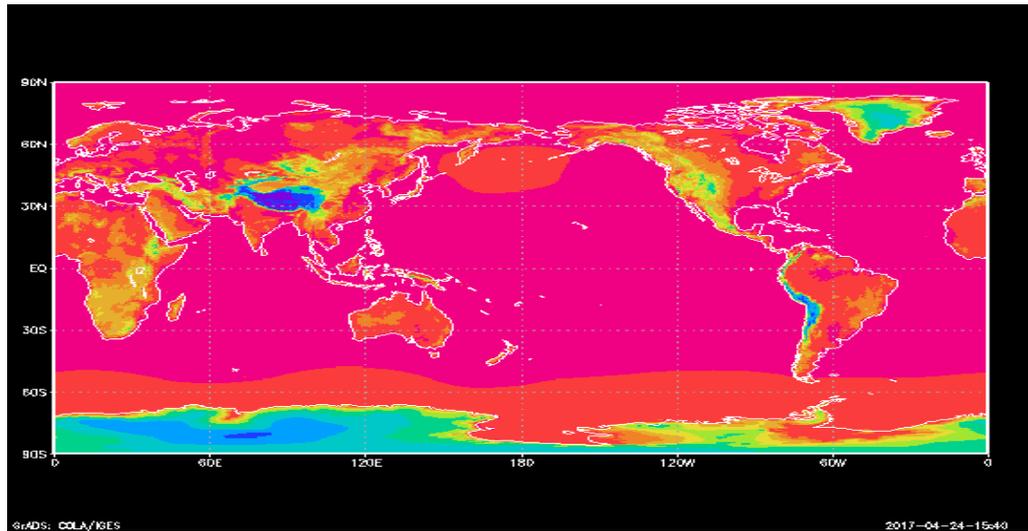
<b>Temperatura del aire</b>	nube de frecuencia	Nube líquido del agua / hielo	Temperatura de derretimiento
<b>Altura geopotencial</b>	Flujo de calor	Humedad	<b>Presión hidrostática</b>
Profundidad de hielo / Espesor	La extensión del hielo	La radiación de onda larga	Máxima / Temperatura Mínima
Corrientes oceánicas	Altura de capa límite planetaria	Temperatura potencial	cantidad de precipitación
Tasa de precipitación	Escapada	Salinidad	Presión a nivel del mar
La superficie del mar	Temperatura superficial del mar	radiación de onda corta	Temperatura de la piel
Nieve equivalente en agua	La humedad del suelo / contenido de agua	Temperatura del suelo	Streamfunctions
Los vientos superficiales	El agua precipitable total	<b>Temperatura de aire superior</b>	Los vientos de nivel superior
<b>Vertical Velocidad del viento / velocidad</b>	Vorticidad		

Fuente: Research Data Archive, 2012.

- Se obtuvieron las series temporales de las variables Altura Geopotencial ( $\phi$ ), Temperatura del aire (T), Presión ( $\omega$  & P), P representa la variación espacial y  $\omega$  la variación temporal, verticalidad del viento/velocidad componente (u y v), mediante la importación de los metadatos y posterior tratamiento para generarlos en formato .GRIB como se muestra en las figuras (9-22).

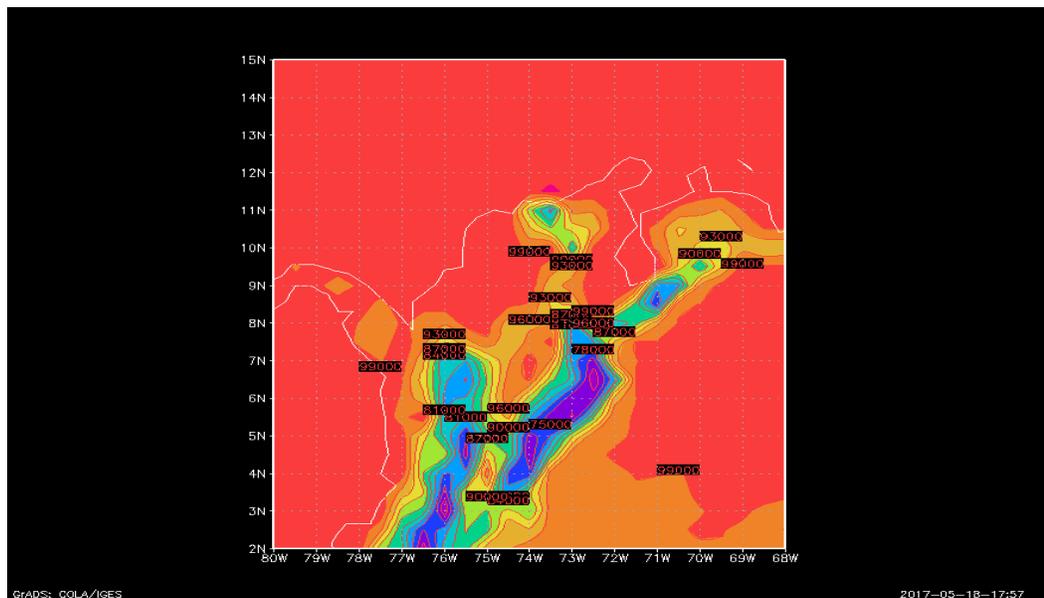
En la figura 9. Se puede apreciar los valores de la variable presión de forma espectral alrededor del globo terráqueo y en la figura 10 se pueden observar más detalladamente alrededor de la zona de estudio con su respectiva valoración numérica, donde nos muestra los datos a un grilla meso-escalar.

Figura 9. Datos Presión



Fuente: National Centers for Environmental Prediction et al, 2017.

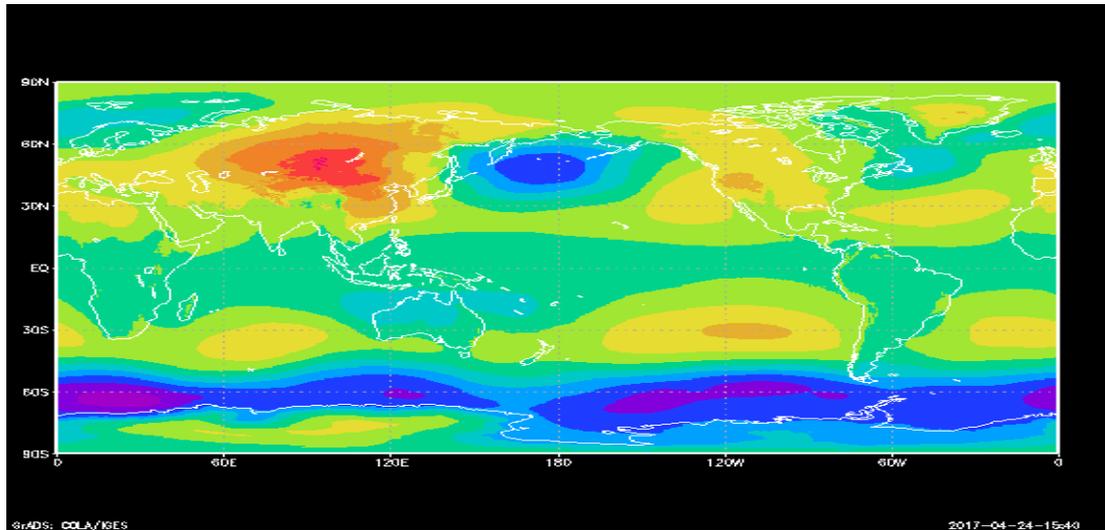
Figura 10. Datos Presión en zona de estudio



Fuente: National Centers for Environmental Prediction et al, 2017.

En la figura 10. Se puede apreciar los valores de la variable geopotencial de forma espectral alrededor del globo terráqueo, donde se presentan también una grilla a gran escala.

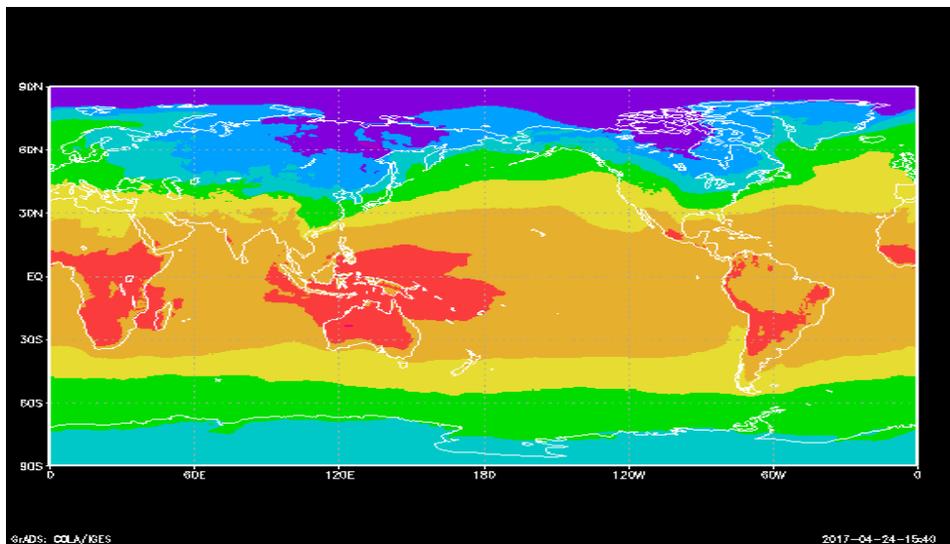
**Figura 10. Datos Geopotencial ( $\phi$ )**



Fuente: National Centers for Environmental Prediction et al, 2017.

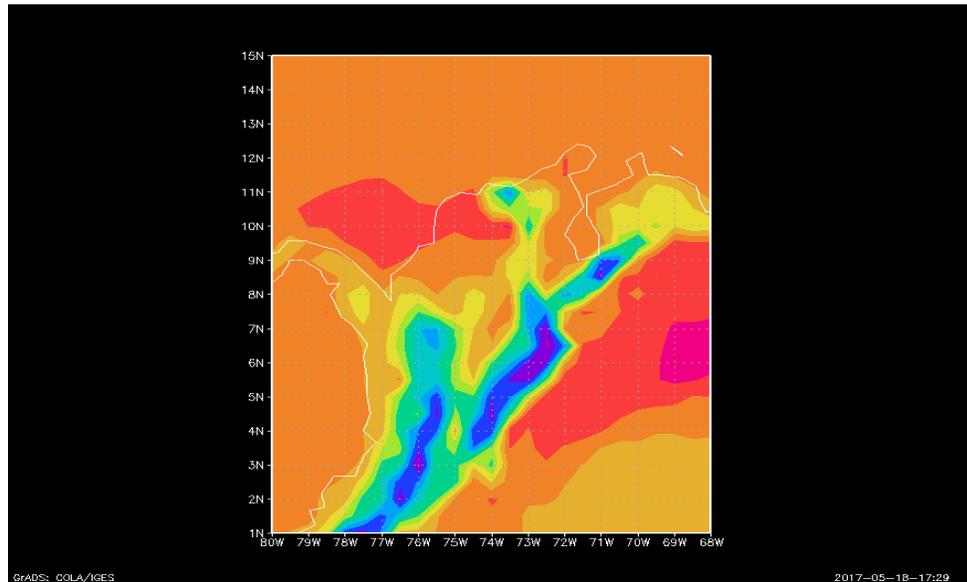
En la figura 11. Se puede apreciar los valores de la variable temperatura a 2 m, de forma espectral alrededor del globo terráqueo y en la figura 12 se pueden observar más detalladamente alrededor de la zona de estudio con su respectiva zona multispectral, donde nos muestra los datos a un grilla meso-escalar.

**Figura 11. Datos Temperatura 2 metros (T)**



Fuente: National Centers for Environmental Prediction et al, 2017.

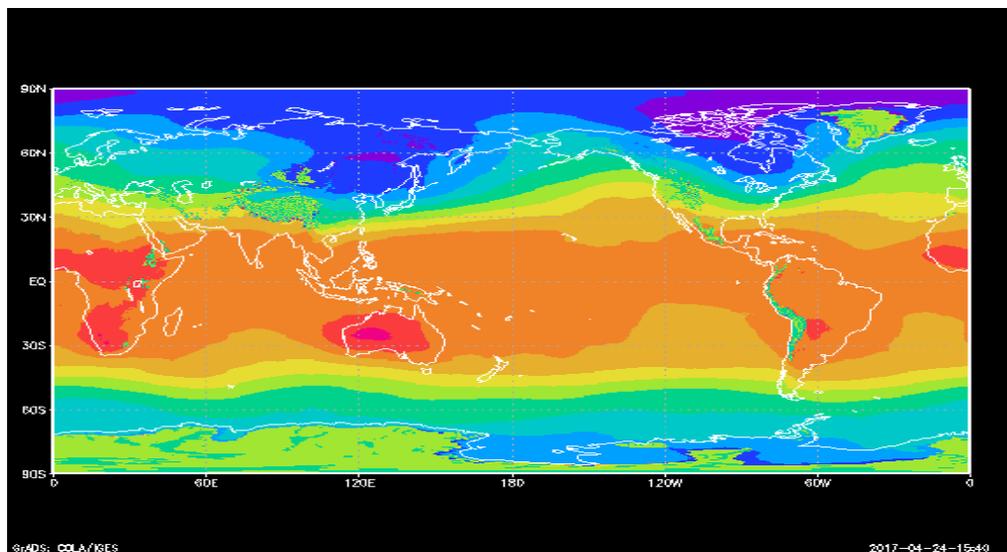
**Figura 12. Datos Temperatura (T) 2 metros en zona de estudio**



Fuente: National Centers for Environmental Prediction et al, 2017.

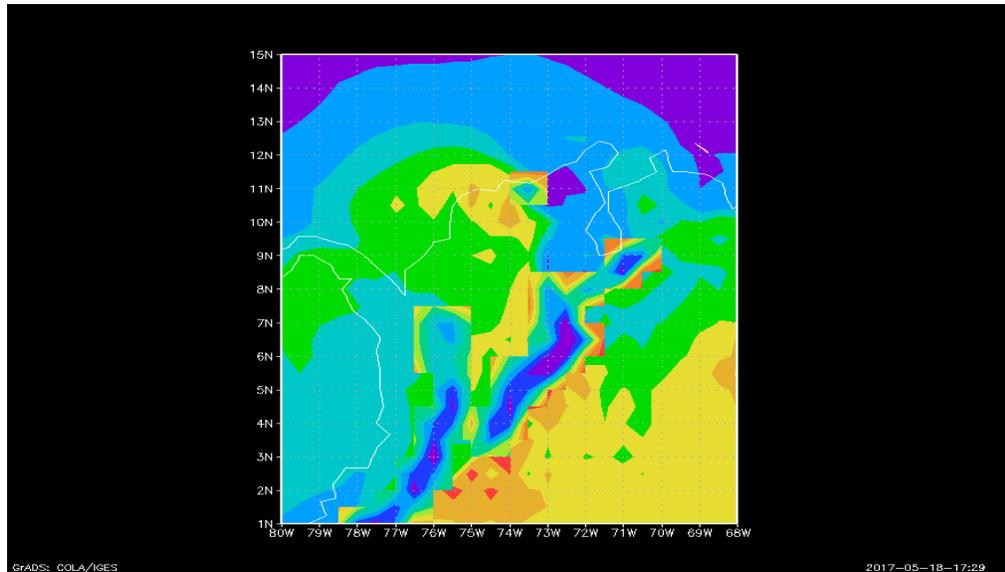
En la figura 13. Se puede apreciar los valores de la variable temperatura a 1829 m, de forma espectral alrededor del globo terráqueo y en la figura 14 se pueden observar más detalladamente alrededor de la zona de estudio con su respectiva zona multispectral, donde nos muestra los datos a un grilla meso-escalar.

**Figura 13. Datos Temperatura (T) 1829 metros**



Fuente: National Centers for Environmental Prediction et al, 2017.

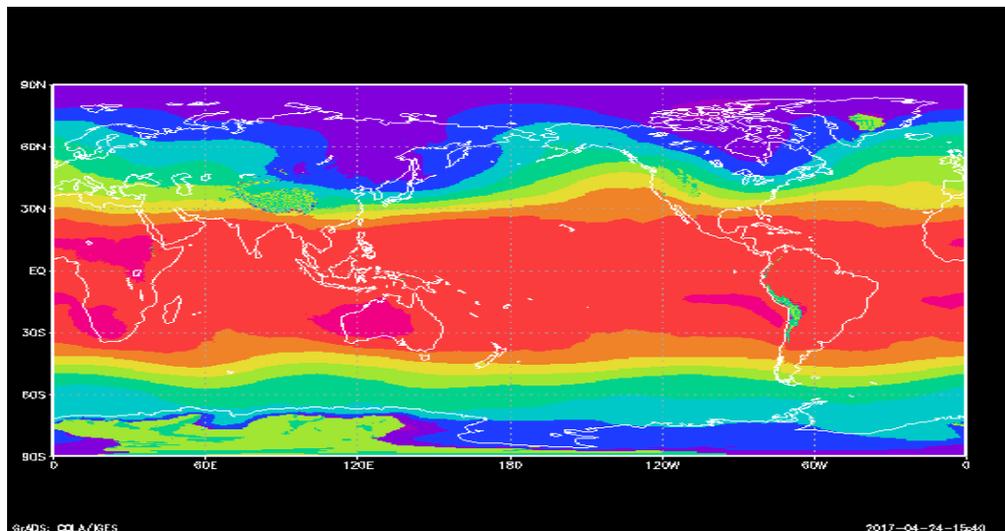
**Figura 14. Datos Temperatura (T) 1829 metros en zona de estudio**



**Fuente:** National Centers for Environmental Prediction et al, 2017.

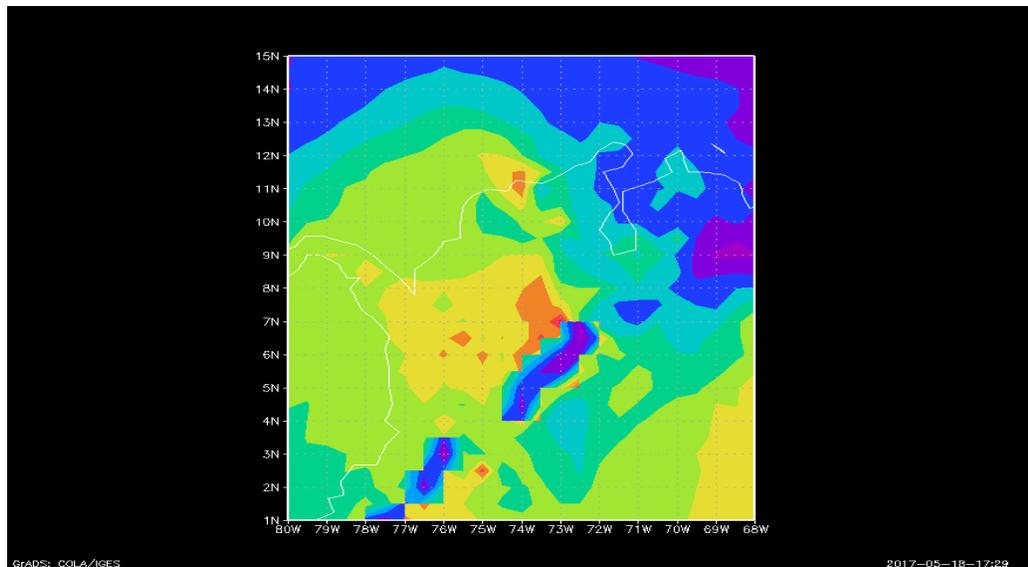
En la figura 15. Se puede apreciar los valores de la variable temperatura a 2743 m, de forma espectral alrededor del globo terráqueo y en la figura 16 se pueden observar más detalladamente alrededor de la zona de estudio con su respectiva zona multiespectral, donde nos muestra los datos a un grilla meso-escalar.

**Figura 15. Datos Temperatura (T) 2743 metros**



**Fuente:** National Centers for Environmental Prediction et al, 2007.

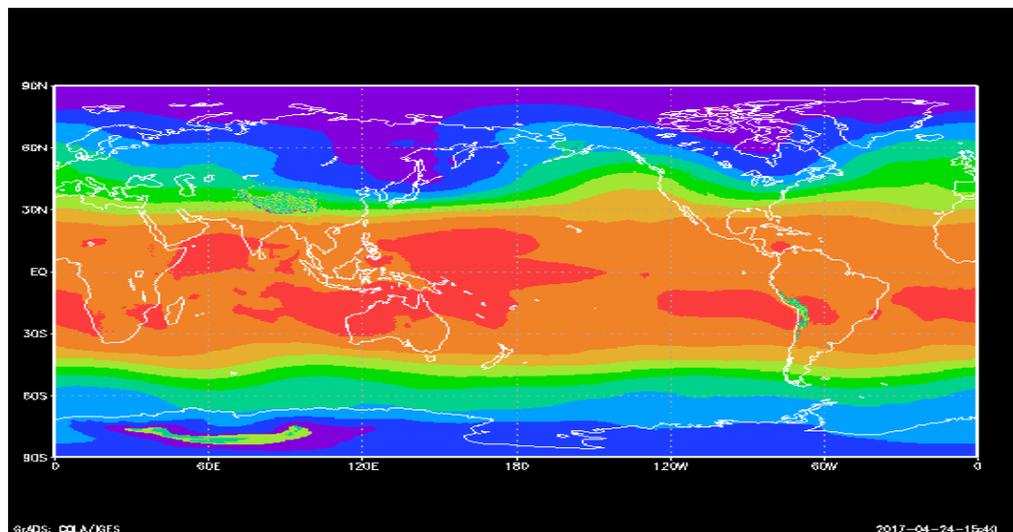
**Figura 16. Datos Temperatura (T) 2743 metros en zona de estudio**



Fuente: National Centers for Environmental Prediction et al, 2007.

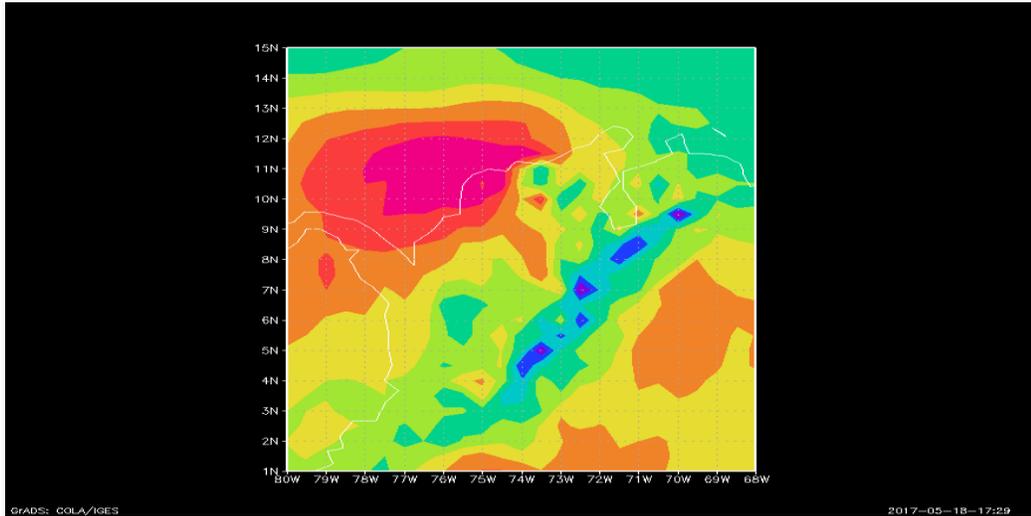
En la figura 17. Se puede apreciar los valores de la variable temperatura a 3658 m, de forma espectral alrededor del globo terráqueo y en la figura 18 se pueden observar más detalladamente alrededor de la zona de estudio con su respectiva zona multispectral, donde nos muestra los datos a un grilla meso-escalar.

**Figura 17. Datos Temperatura 3658 metros (T)**



Fuente: National Centers for Environmental Prediction et al, 2007.

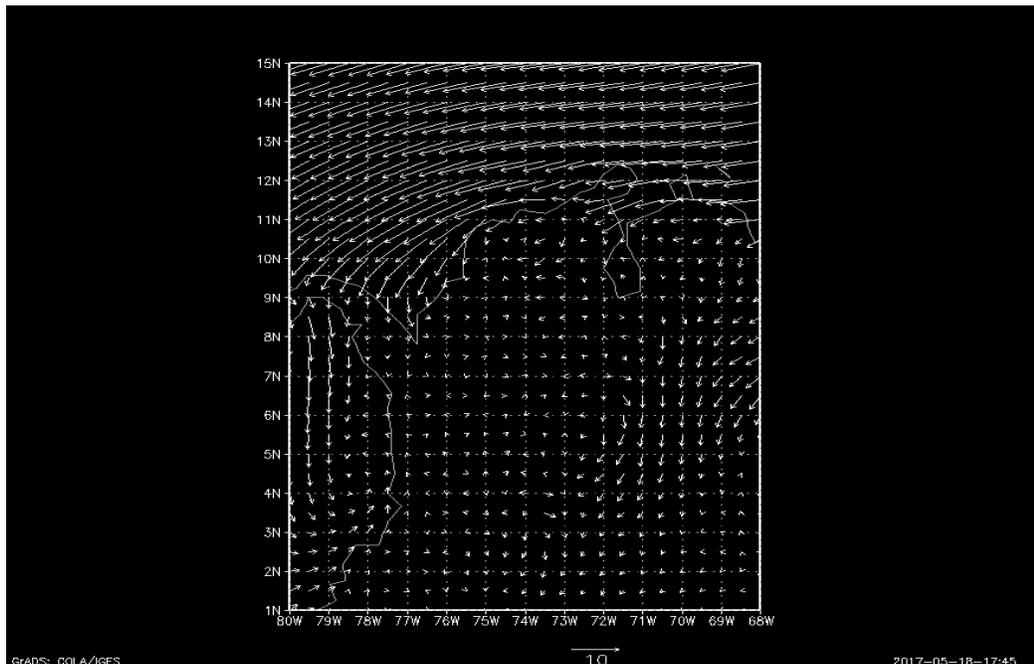
**Figura 18. Datos Temperatura (T) 3658 metros en la zona de estudio**



Fuente: National Centers for Environmental Prediction et al, 2007.

En la figura 19 se pueden observar el vector dirección y magnitud de las componentes U y V de los vientos en la zona de estudio, donde nos muestra los datos con un grillaje respectivo meso-escalar a una altura de 1829 metros.

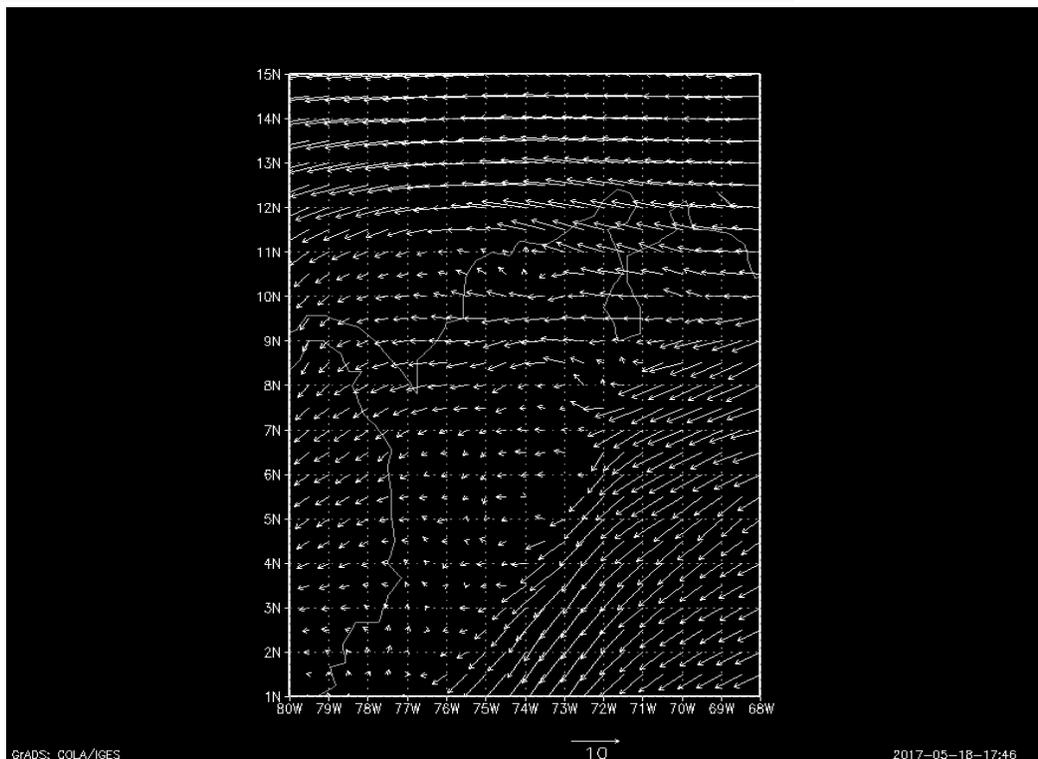
**Figura 19. Datos Componente U y V de los vientos a 1829 metros en zona de estudio**



Fuente: National Centers for Environmental Prediction et al, 2007.

En la figura 20 se pueden observar el vector dirección y magnitud de las componentes U y V de los vientos en la zona de estudio, donde nos muestra los datos con un grillaje respectivo meso-escalar a una altura de 2743 metros.

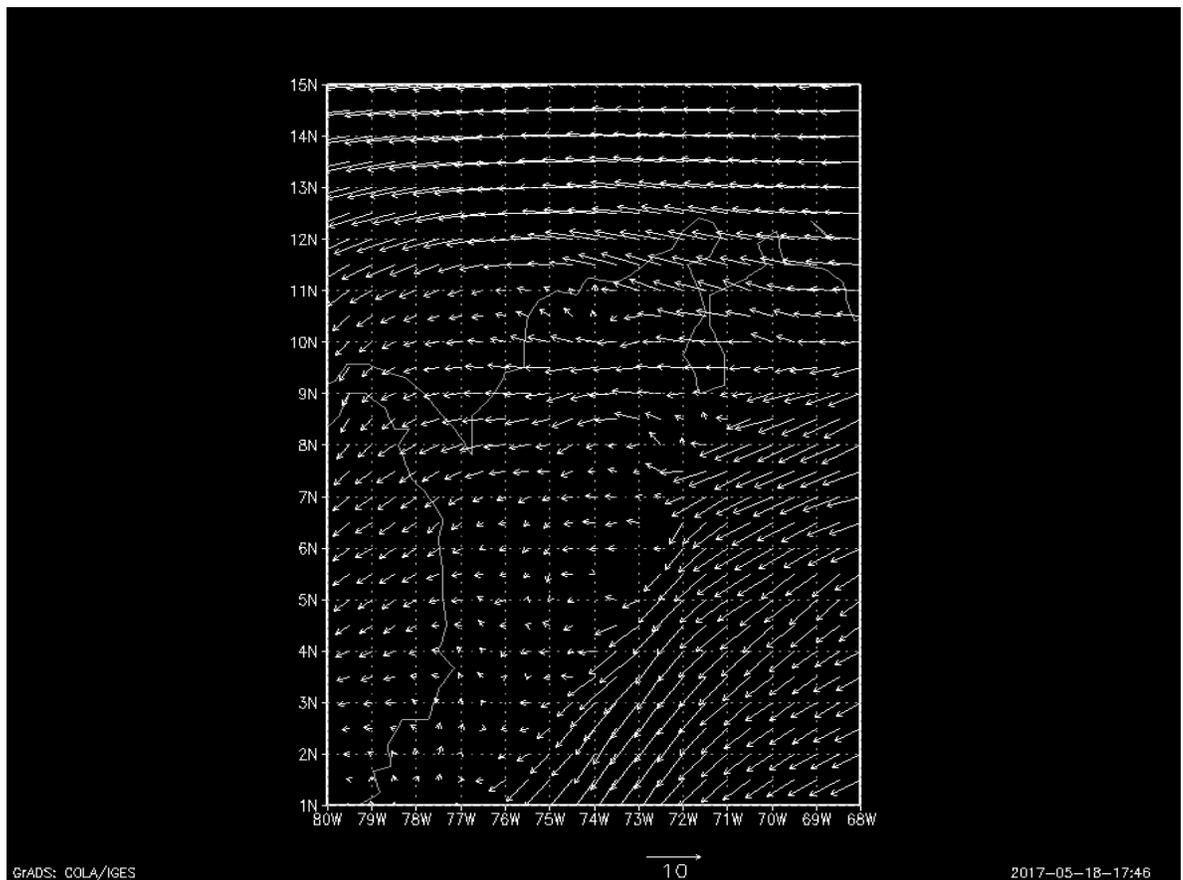
**Figura 20. Datos Componente U y V de los vientos a 2743 metros en zona de estudio**



**Fuente:** National Centers for Environmental Prediction et al, 2007.

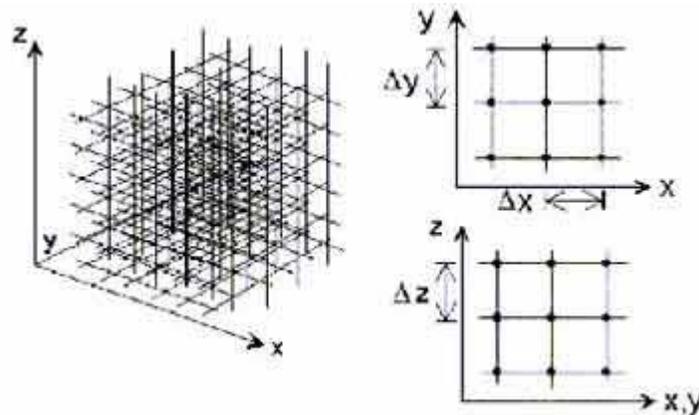
En la figura 21 se pueden observar el vector dirección y magnitud de las componentes U y V de los vientos en la zona de estudio, donde nos muestra los datos con un grillaje respectivo meso-escalar a una altura de 3658 metros.

Figura 21. Datos Componente U y V de los vientos a 3658 metros en zona de estudio



- Se seleccionaron Las condiciones iniciales del modelo las cuales sus variables dependientes son:  $(u, v, T, \omega, \phi)$  y las variables independientes son  $(t, x, y, P)$  en un grillaje de  $(10*8*5)$  con 5 capas sigmas a 2 m.s.n.m, 1829 m.s.n.m, 2743 m.s.n.m, 3658 m.s.n.m y 4572 m.s.n.m, que representan un modelo cubico para la cuenca del río Pamplonita, en la figura 22. Se observa un ejemplo de grillaje.

Figura 22. Ejemplo del grillaje del modelo



Fuente: Gaztelumendi, 2003.

### Establecer las hipótesis del modelo que se aplicaran para la cuenca del río Pamplonita

- Se plantearon Las hipótesis que fueron representativas para la cuenca del río Pamplonita las cuales se describen a continuación:

#### *PARA ECUACIONES EN COORDENADAS CARTESIANAS*

*Hipótesis 1:* La representación del modelo se planteó en 2 dimensiones espaciales ( $x, z$ ) y una dimensión temporal ( $t$ ), esto debido a que al momento de describir el vector de los vientos en 3 dimensiones genera inestabilidad, y se generaría un costo computacional al cual no se puede acceder.

*Hipótesis 2:* Nuestra Área de estudio la representamos como un triangulo rectángulo en el cual su punto más bajo es la ciudad de Cúcuta y el más alto es la ciudad de Pamplona.

*Hipótesis 3:* Se considero un sistema cerrado, el cual se comporta como adiabático (no hay transferencia de calor). La atmósfera se representa linealmente llamando a  $\Delta z$  la diferencia entre altura desde la parte más baja de la cuenca hasta la parte más alta, y  $\Delta x$  va a ser la distancia lineal.

*Hipótesis 4:* Se considero que al ser un triangulo donde se va a representar nuestro modelo la densidad espacialmente va a ser constante, pero varia con respecto al tiempo (Las derivadas parciales de la densidad con respecto al espacio van a ser 0).

*Hipótesis 5:* En la solución de las ecuaciones no lineales, se planteó realizar la solución con el método de diferencias finitas, en el cual se despejaron las variables dependientes (u,v,  $\rho$ , ) en términos del tiempo futuro  $k + 1$ .

#### *PARA ECUACIONES EN COORDENADAS ISOBÁRICAS.*

*Hipótesis 1:* La representación del modelo se planteo en 3 dimensiones espaciales (x, y, P) de la cual la componente z es reemplazada por la componente de la Presión de tipo espacial y una dimensión temporal (t).

*Hipótesis 2:* Nuestra área de estudio la representamos como un cubo en el cual su grillaje representa la cuenca del río Pamplonita.

*Hipótesis 3:* Considerando un sistema cerrado, el cual se comporta como adiabático (no hay transferencia de calor).

*Hipótesis 4:* En la solución de las ecuaciones no lineales, se planteó realizar la solución con el método de diferencias finitas, en el cual se despejaron las variables dependientes (u,v,T, $\omega$ , $\phi$ ) en términos del tiempo futuro  $k + 1$ .

- En el sistema de ecuaciones de la dinámica atmosférica se implementaron las hipótesis en coordenadas cartesianas en dos dimensiones espaciales y en coordenadas isobáricas, para que el sistema de ecuaciones presentara una característica única de la cuenca del río Pamplonita de la siguiente forma:

**ECUACIONES DE LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA EN  
COORDENADAS CARTESIANAS DE DOS DIMENSIONES  
ESPACIALES**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + A \quad (16)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} + u \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + B \quad (17)$$

*Ecuaciones del movimiento 16 y 17 a partir de la segunda ley de Newton y considerando el efecto de rotación de la Tierra, se obtiene que en el lado izquierdo de las ecuaciones representa la tasa de cambio de la velocidad absoluta o aceleración vista desde un referente inercial y la parte derecha la sumatoria de las fuerzas fundamentales en este caso la presión.*

*Donde las variables dependientes son:*

*u = Componente en X de los vientos.*

*w = Componente en Z de los vientos.*

*$\rho$  = Densidad.*

*Donde las variables independientes son:*

*t = tiempo.*

*x = Espacio Longitudinal.*

*z = espacio latitudinal.*

*Donde A y B son las fuerza de Coriolis y fuerza de rozamiento.*

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

*Ecuación de conservación de la masa 18 el flujo neto de masa por la superficie de un volumen fijo en el espacio durante un intervalo de tiempo dado es igual cambio de masa dentro del volumen en el mismo intervalo de tiempo y en la cual existe un*

*balance entre el cambio local de la densidad y la divergencia del flujo de masa sobre un volumen elemental.*

*Donde las variables dependientes son:*

*u = Componente en X de los vientos.*

*w = Componente en Z de los vientos.*

*$\rho$  =Densidad.*

*Donde las variables independientes son:*

*t = tiempo.*

*x= Espacio Longitudinal.*

*z = espacio latitudinal.*

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{C_p} \left( \frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + w \frac{\partial P}{\partial z} \right) & \quad (19) \\ = \frac{1}{C_p} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} + w \frac{\partial Q}{\partial z} \right) & \end{aligned}$$

*Ecuación de balance de energía 19 la cual describe el primer principio de la entropía, y la manera como cambia la temperatura en una parcela de aire, al aplicar se debe tener en cuenta que la mezcla de gases que comprende el aire se comporta como un gas ideal.*

*Donde las variables dependientes son:*

*u = Componente en X de los vientos.*

*w = Componente en Z de los vientos.*

*T = Temperatura.*

*P = Presión.*

*Q = Incremento del calor en el sistema.*

*Donde las variables independientes son:*

*t = tiempo.*

*x= Espacio Longitudinal.*

$z$  = espacio latitudinal.

Donde las constantes son:

$c_p$  = Calor específico.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = R \frac{\partial(T\rho)}{\partial x} = R \left( \frac{\partial T}{\partial x} + T \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = R \frac{\partial(T\rho)}{\partial z} = R \left( \frac{\partial T}{\partial z} + T \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (21)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = R \frac{\partial(T\rho)}{\partial t} = R \left( \frac{\partial T}{\partial t} + T \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \quad (22)$$

*Ley de los gases ideales variación de la Presión con respecto a las variables independientes 20, 21 y 22*

Donde las variables dependientes son:

$T$  = Temperatura.

$P$  = Presión.

Donde las variables independientes son:

$t$  = tiempo.

$x$  = Espacio Longitudinal.

$z$  = espacio latitudinal.

Donde las constantes son:

$R$  = Constante de los gases ideales.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -R \frac{\partial T}{\partial x} + A \quad (23)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -R \frac{\partial T}{\partial z} + B \quad (24)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{R}{C_p} \left( \rho \frac{\partial T}{\partial t} + T \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \rho \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (26)$$

Reemplazando y ajustando las ecuaciones a las hipótesis establecidas se obtiene 23, 24, 25 y 26, que representa el sistema completo de las ecuaciones en coordenadas cartesianas.

### **ECUACIONES DE LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA EN COORDENADAS ISOBARICAS**

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - \omega \frac{\partial u}{\partial P} - \frac{\partial \phi}{\partial x} + fv \quad (27)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - \omega \frac{\partial v}{\partial P} - \frac{\partial \phi}{\partial y} - fu \quad (28)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - \omega \frac{\partial T}{\partial P} + \frac{1}{C_p \rho} - \omega \quad (29)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial P} = -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (30)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial P} = -\frac{1}{\rho} \quad (31)$$

*Basados en los principios físicos, químicos y termodinámicos establecidos en ecuaciones en coordenadas cartesianas se obtienen las ecuaciones 27, 28, 29, 30 y 31 de la dinámica atmosférica en coordenadas isobáricas donde se pueden implementar debido a que el geopotencial se define como un trabajo necesario para levantar la unidad de masa desde el suelo hasta un punto  $z$  y suponiendo que la gravedad es constante  $\phi = gz$ .*

Donde las variables dependientes son:

$u$  = Componente en X de los vientos.

$v$  = Componente en Y de los vientos.

$\omega$  = Variación temporal de la presión.

$T$  = Temperatura.

$\phi$  = Geopotencial.

Donde las variables independientes son:

$t$  = tiempo.

$x$  = Espacio Longitudinal.

$y$  = Espacio en Profundidad.

$P$  = Presión como coordenada vertical.

Donde  $f^v$  es la fuerza de coriolis en dirección  $y$  y  $f^u$  es la fuerza de coriolis en dirección  $x$ .

**Resolver el sistema de ecuaciones no lineal que representa el modelo de predicción utilizando técnicas numéricas de ecuaciones diferenciales ordinarias y/o parciales.**

- Se estableció la solución general del sistema de ecuaciones utilizando diferencias finitas de segundo orden en las cuales la solución general de la derivada parcial de las variables para las coordenadas cartesianas en dos dimensiones espaciales son de la siguiente forma:

Con respecto a la componente  $u$  del viento ( $u$ ) se realizó la desratización en las ecuaciones 32a, 32b, 32c

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{u_{i,j}^{k+1} - u_{i,j}^{k-1}}{2\Delta t} \quad (32a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^k - u_{i-1,j}^k}{2\Delta x} \quad (32b)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} \approx \frac{u_{i,+1j}^k - u_{i,j-1}^k}{2\Delta z} \quad (32c)$$

Donde las componentes independientes:

$k$  = variación temporal.

$i$  = variación espacial en el eje x.

$j$  = variación espacial en el eje Z.

Donde las variables dependientes:

$u$  = Componente en X de los vientos.

Con respecto a la componente v del viento ( $v$ ) se realizó la desratización en las ecuaciones 32a, 32b, 32c

$$\frac{\partial w}{\partial t} \approx \frac{w_{i,j}^{k+1} - w_{i,j}^{k-1}}{2\Delta t} \quad (33a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} \approx \frac{w_{i+1,j}^k - w_{i-1,j}^k}{2\Delta x} \quad (33b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} \approx \frac{w_{i,+1j}^k - w_{i,j-1}^k}{2\Delta z} \quad (33c)$$

Donde las componentes independientes:

$k$  = variación temporal.

$i$  = variación espacial en el eje x.

$j$  = variación espacial en el eje Z.

Donde las variables dependientes:

$w$  = Componente en Z de los vientos.

Con respecto a la Temperatura (T), se realizó la desratización en las ecuaciones 34a, 34b, 34c:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k-1}}{2\Delta t} \quad (34a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{T_{i+1,j}^k - T_{i-1,j}^k}{2\Delta x} \quad (34b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \approx \frac{T_{i,j+1}^k - T_{i,j-1}^k}{2\Delta z} \quad (34c)$$

Donde las componentes independientes:

$k$  = variación temporal.

$i$  = variación espacial en el eje x.

$j$  = variación espacial en el eje Z.

Donde las variables dependientes:

$T$  = Temperatura

Con respecto a la densidad ( $\rho$ ), se realizó la desratización en la ecuación 35

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \approx \frac{\rho_{i,j}^{k+1} - \rho_{i,j}^{k-1}}{2\Delta t} \quad (35)$$

Donde las variables independientes:

$k$  = variación temporal.

$i$  = variación espacial en el eje x.

$j$  = variación espacial en el eje Z.

Donde las variables dependientes:

$\rho$  = Densidad.

- Se estableció la solución general del sistema de ecuaciones utilizando diferencias finitas de segundo orden en las cuales la solución general de la derivada parcial de las variables para las coordenadas isobáricas son de la siguiente forma:

Con respecto a la componente u del viento (u), se realizó la desratización en las ecuaciones 36a, 36b, 36c y 36d

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{u_{i,j,l}^{k+1} - u_{i,j,l}^{k-1}}{2\Delta t} \quad (36a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,l}^k - u_{i-1,j,l}^k}{2\Delta x} \quad (36b)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} \approx \frac{u_{i,+1,j,l}^k - u_{i,j-1,l}^k}{2\Delta z} \quad (36c)$$

$$\frac{\partial u}{\partial P} \approx \frac{u_{i,,j,l+1}^k - u_{i,j,l-1}^k}{2\Delta P} \quad (36d)$$

Donde las componentes independientes:

$k$  = variación temporal.

$i$  = variación espacial en el eje x.

$j$  = variación espacial en el eje y.

$l$  = variación espacial en la vertical de la presión.

Donde las variables dependientes:

$u$  = Componente en X de los vientos.

Con respecto a la componente  $v$  del viento ( $v$ ), se realizó la desratización en las ecuaciones 37a, 37b, 37c y 37d

$$\frac{\partial v}{\partial t} \approx \frac{v_{i,j,l}^{k+1} - v_{i,j,l}^{k-1}}{2\Delta t} \quad (37a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} \approx \frac{v_{i+1,j,l}^k - v_{i-1,j,l}^k}{2\Delta x} \quad (37b)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} \approx \frac{v_{i,+1j,l}^k - v_{i,j-1,l}^k}{2\Delta z} \quad (37c)$$

$$\frac{\partial v}{\partial P} \approx \frac{v_{i,j,l+1}^k - v_{i,j,l-1}^k}{2\Delta P} \quad (37d)$$

Donde las componentes independientes:

$k$  = variación temporal.

$i$  = variación espacial en el eje x.

$j$  = variación espacial en el eje y.

$l$  = variación espacial en la vertical de la presión.

Donde las variables dependientes:

$v$  = Componente en Y de los vientos.

Con respecto a la Temperatura ( $T$ ), se realizó la desratización en las ecuaciones 38a, 38b, 38c y 38d:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{i,j,l}^{k+1} - T_{i,j,l}^{k-1}}{2\Delta t} \quad (38a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{T_{i+1,j,l}^k - T_{i-1,j,l}^k}{2\Delta x} \quad (38b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \approx \frac{T_{i,j+1,l}^k - T_{i,j-1,l}^k}{2\Delta z} \quad (38c)$$

$$\frac{\partial T}{\partial P} \approx \frac{T_{i,j,l+1}^k - T_{i,j,l-1}^k}{2\Delta P} \quad (38d)$$

Donde las componentes independientes:

$k$  = variación temporal.

$i$  = variación espacial en el eje x.

$j$  = variación espacial en el eje y.

$l$  = variación espacial en la vertical de la presión.

Donde las variables dependientes:.

$T$  = Temperatura.

Con respecto a la Velocidad vertical ( $\omega$ ), se realizó la desratización en la ecuación 39:

$$\frac{\partial \omega}{\partial P} \approx \frac{\omega_{i,j,l+1}^k - \omega_{i,j,l-1}^k}{2\Delta P} \quad (39)$$

Donde las componentes independientes:

$k$  = variación temporal.

$i$  = variación espacial en el eje x.

$j$  = variación espacial en el eje y.

$l$  = variación espacial en la vertical de la presión.

Donde las variables dependientes:

$\omega$  = Velocidad vertical.

Con respecto al geopotencial ( $\phi$ ), se realizó la desratización en la ecuación 40:

$$\frac{\partial \phi}{\partial P} \approx \frac{\phi_{i,j,l+1}^k - \phi_{i,j,l-1}^k}{2\Delta P} \quad (40)$$

Donde las variables independientes:

$k$  = variación temporal.

$i$  = variación espacial en el eje x.

$j$  = variación espacial en el eje y.

$l$  = variación espacial en la vertical de la presión.

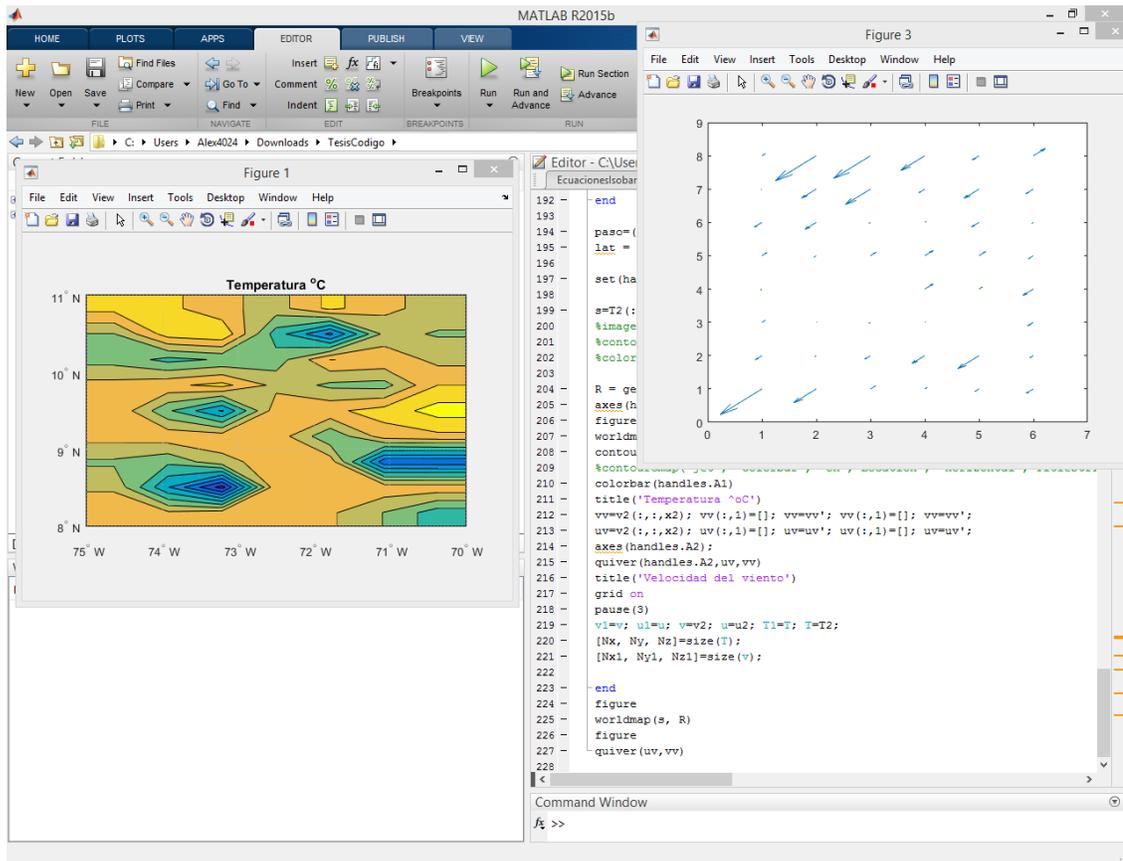
Donde las variables dependientes:

$\phi$  = Geopotencial.

**Realizar la solución del modelo computacionalmente en MatLab para predecir el comportamiento de las variables meteorológicas seleccionadas en la cuenca del río Pamplonita**

- Se desarrollo un código de programación propio del modelo de predicción meteorológico para la cuenca del Río Pamplonita basado en las hipótesis establecidas y en la solución particular de las ecuaciones representativas por medio de diferencias finitas que se puede observar en la figura 23.

**Figura 23. Código Computacional del modelo**

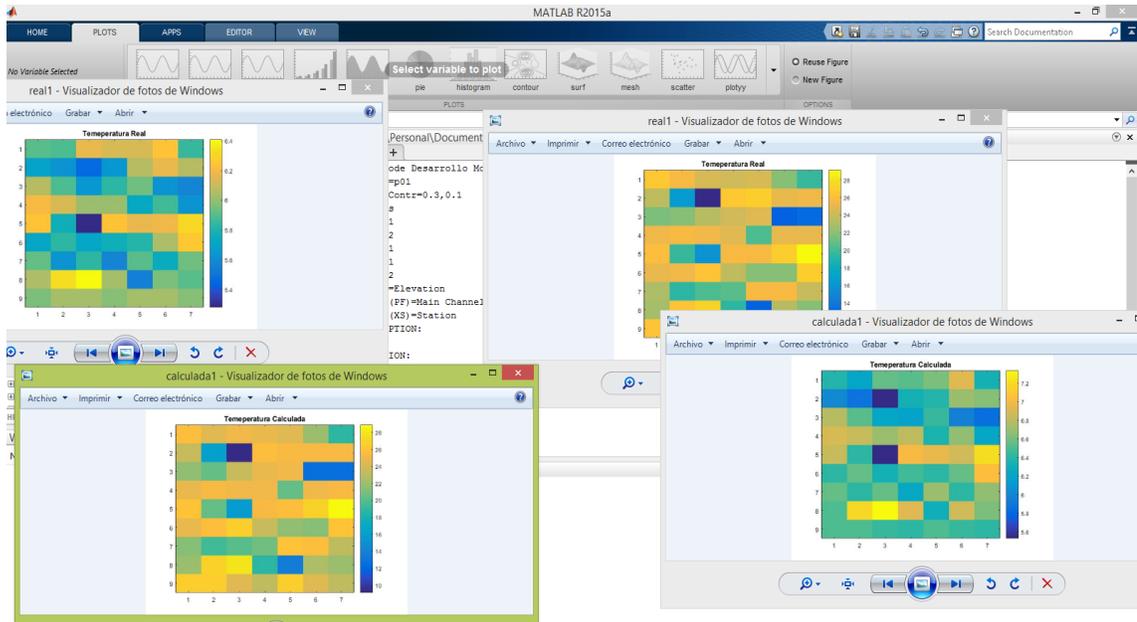


Fuente: Palacios, 2017.

- Las condiciones iniciales del modelo fueron implementadas en el grillaje establecido y las propiedades con las que el modelo computacional realiza la solución, fundamentado en los datos reales obtenidos de la base de NCEP Global Forecast System (GFS) Analyses and Forecastsdss de los Centros Nacionales de Predicción del Medio Ambiente / Servicio Meteorológico Nacional / NOAA / Departamento de Comercio de EE.UU., para la cuenca del Río Pamplonita.
- Las variables meteorológicas dependientes ( $u$ ,  $v$ ,  $T$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ) fueron predichas como se observa en la figura 24 y 25. Después de la solución del algoritmo basado en el sistema de ecuaciones

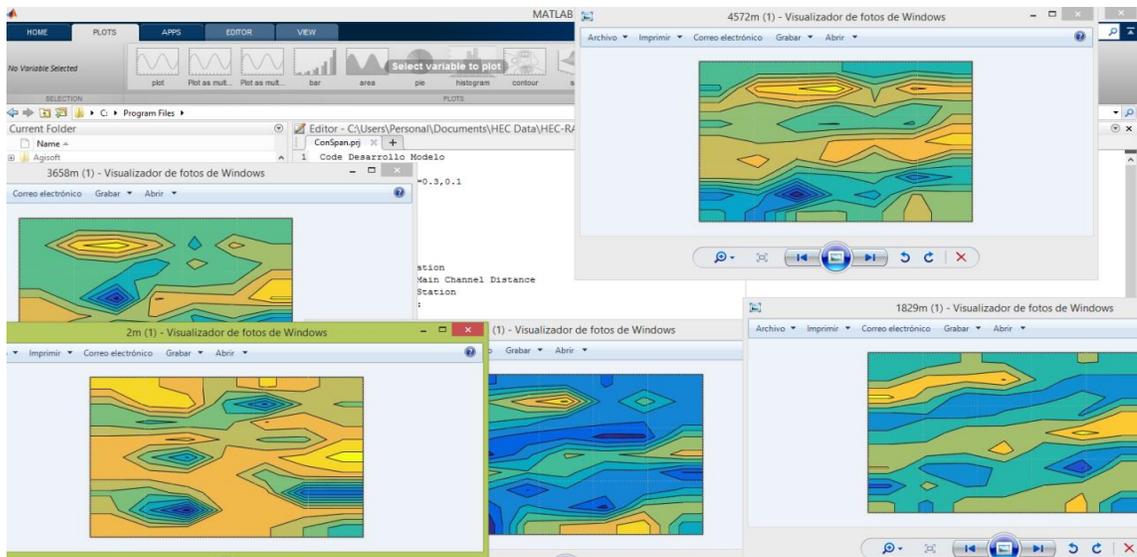
diferenciales representativo del modelo, utilizando MatLab para un instante de tiempo  $K+1$ .

Figura 24. Predicciones del modelo computacional en grilla



Fuente: Palacios, 2017

Figura 25. Predicciones del modelo computacional espectral



Fuente: Palacios, 2017.

**Validar el modelo de predicción meteorológico, mediante la comparación de los datos obtenidos del modelo y los datos satelitales.**

Se seleccionaron las series temporales de enero de 2011 de la base de datos NCEP Global Forecast System (GFS) Analyzes and Forecastsd of National Environmental Prediction Centers / National Weather Service / NOAA / US Department of Commerce, debido a la confiabilidad en estas series y se realizaron corridas a 1 día, 4 días y 10 días, después se obtuvo la efectividad del modelo, mediante la comparación de los datos reales con los resultados de los pronósticos del modelo de predicción meteorológico y por último se obtuvo la cantidad de error en porcentaje de los datos pronosticados para cada altura sigma y el promedio de error diario.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 SOLUCIÓN PARTICULAR A LAS ECUACIONES DE LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA

Se soluciono particularmente las ecuaciones de la circulación atmosférica en coordenadas cartesianas en dos dimensiones las cuales representan el modelo de predicción meteorológico para la cuenca del río Pamplonita, discretizandolas con el método de diferencias finitas de segundo orden, el cual se planteó con las hipótesis propias de la cuenca del río Pamplonita previamente establecidas y dejando las ecuaciones en función de cada variable dependiente en  $k+1$ , por consiguiente el sistema quedo de la siguiente forma:

*En la ecuación 36 se presenta la solución partícula para la variable (36) dependiente  $u$  en función de un tiempo futuro  $k+1$ .*

$$u_{i,j}^{k+1} = u_{i,j}^{k-1} - (2\Delta t) u_{i,j}^k \left( \frac{u_{i+1,j}^k - u_{i-1,j}^k}{2\Delta x} \right) - (2\Delta t) w_{i,j}^k \left( \frac{u_{i,j+1}^k - u_{i,j-1}^k}{2\Delta z} \right) - (2\Delta t) \frac{R}{\rho_{i,j}^k} \left( \rho_{i,j}^k \frac{T_{i+1,j}^k - T_{i-1,j}^k}{2\Delta x} \right) + (2\Delta t) A$$

Donde las variables independientes son:

$t$  = tiempo.

$x$  = Espacio Longitudinal.

$z$  = Espacio en Altura.

Donde las variables dependientes son:

$u$  = Componente en X de los vientos.

$w$  = Componente en Z de los vientos.

$\rho$  = Densidad.

Donde A es la fuerza de Coriolis y fuerza de rozamiento.

En la ecuación 37 se presenta la solución partícula para la variable dependiente  $w$  en función de un tiempo futuro  $k+1$ .

$$w_{i,j}^{k+1} = w_{i,j}^{k-1} - (2\Delta t) u_{i,j}^k \left( \frac{w_{i+1,j}^k - w_{i-1,j}^k}{2\Delta x} \right) - (2\Delta t) w_{i,j}^k \left( \frac{w_{i,j+1}^k - w_{i,j-1}^k}{2\Delta z} \right) - (2\Delta t) \frac{R}{\rho_{i,j}^k} \left( \rho_{i,j}^k \frac{T_{i,j+1}^k - T_{i,j-1}^k}{2\Delta z} \right) + (2\Delta t) B \quad (37)$$

Donde las variables independientes son:

$t$  = tiempo.

$x$  = Espacio Longitudinal.

$z$  = Espacio en Altura.

Donde las variables dependientes son:

$u$  = Componente en X de los vientos.

$w$  = Componente en Z de los vientos.

$\rho$  = Densidad.

Donde  $B$  es la fuerza de Coriolis y fuerza de rozamiento.

En la ecuación 38 se presenta la solución partícula para la variable dependiente  $\rho$  en función de un tiempo futuro  $k+1$ .

$$\rho_{i,j}^{k+1} = \rho_{i,j}^{k-1} - (2\Delta t) \rho_{i,j}^k \left( \frac{u_{i+1,j}^k - u_{i-1,j}^k}{2\Delta x} \right) - (2\Delta t) \rho_{i,j}^k \left( \frac{w_{i,j+1}^k - w_{i,j-1}^k}{2\Delta z} \right) \quad (38)$$

Donde las variables independientes son:

$t$  = tiempo.

$x$  = Espacio Longitudinal.

$z$  = Espacio en Altura.

Donde las variables dependientes son:

$u$  = Componente en X de los vientos.

$w$  = Componente en Z de los vientos.

$\rho$  = Densidad.

En la ecuación 39 se presenta la solución partícula para la variable dependiente  $T$  en función de un tiempo futuro  $k+1$ .

$$\begin{aligned}
 T_{i,j}^{k+1} = & T_{i,j}^{k-1} - \\
 (2\Delta t)u_{i,j}^k & \left( \frac{T_{i+1,j}^k - T_{i-1,j}^k}{2\Delta x F} \right) (2\Delta t)w_{i,j}^k \left( \frac{T_{i,j+1}^k - T_{i,j-1}^k}{2\Delta z F} \right) - \frac{R}{C_p} \rho_{i,j}^k \left( \frac{T_{i,j+1}^k}{F} \right) \\
 & + \frac{R}{C_p} T_{i,j}^k \left( \frac{\rho_{i,j}^{k+1} - \rho_{i,j}^k}{F} \right) + \\
 (2\Delta t) \frac{R}{C_p} u_{i,j}^k \rho_{i,j}^k & \left( \frac{T_{i+1,j}^k - T_{i-1,j}^k}{2\Delta x F} \right) + (2\Delta t) \frac{R}{C_p} w_{i,j}^k \rho_{i,j}^k \left( \frac{T_{i,j+1}^k - T_{i,j-1}^k}{2\Delta z F} \right)
 \end{aligned} \tag{39}$$

$$\text{Donde } F = \left( 1 - \frac{R}{C_p} \rho_{i,j}^k \right)$$

Donde las variables independientes son:

$t$  = tiempo.

$x$  = Espacio Longitudinal.

$z$  = Espacio en Profundidad.

Donde las variables dependientes:

$u$  = Componente en X de los vientos.

$w$  = Componente en Z de los vientos.

$T$  = Temperatura.

$\rho$  = Densidad.

Donde:

$R$  = Constante de los gases ideales.

$C_p$  = Calor específico del aire húmedo.

Se soluciono particularmente las ecuaciones de la circulación atmosférica en coordenadas isobáricas en tres dimensiones las cuales representan el modelo de predicción meteorológico para la cuenca del río Pamplonita, discretizandolas con el método de diferencias finitas de segundo orden el cual se planteó con las hipótesis propias de la cuenca del río Pamplonita previamente establecidas y

dejando las ecuaciones en función de cada variable dependiente en  $k+1$ , por consiguiente el sistema quedo de la siguiente forma:

*En la ecuación 40 se presenta la solución partícula para la variable dependiente  $u$  en función de un tiempo futuro  $k+1$ .*

$$\begin{aligned}
 u_{i,j,l}^{k+1} = & u_{i,j,l}^{k-1} - (2\Delta t) u_{i,j}^k \left( \frac{u_{i+1,j,l}^k - u_{i-1,j,l}^k}{2\Delta x} \right) \\
 & - (2\Delta t) v_{i,j}^k \left( \frac{u_{i,j+1,l}^k - u_{i,j-1,l}^k}{2\Delta y} \right) \\
 & - (2\Delta t) \omega_{i,j}^k \left( \frac{u_{i,j,l+1}^k - u_{i,j,l-1}^k}{2\Delta P} \right) - \frac{\Phi_{i+1,j,l}^k - \Phi_{i-1,j,l}^k}{2\Delta x} \\
 & + fv
 \end{aligned} \tag{40}$$

Donde las variables independientes son:

$t$  = tiempo

$x$  = Espacio Longitudinal.

$y$  = Espacio en Profundidad.

$P$  = Presión como coordenada vertical.

Donde las variables dependientes:

$u$  = Componente en X de los vientos.

$v$  = Componente en y de los vientos.

$\omega$  = Velocidad vertical.

$\phi$  = Geopotencial.

Donde:  $fv$  = fuerza de coriolis en el eje y.

*En la ecuación 41 se presenta la solución partícula para la variable dependiente  $v$  en función de un tiempo futuro  $k+1$ .*

(41)

$$\begin{aligned}
v_{i,j,l}^{k+1} &= v_{i,j,l}^{k-1} - (2\Delta t) u_{i,j}^k \left( \frac{v_{i+1,j,l}^k - v_{i-1,j,l}^k}{2\Delta x} \right) \\
&\quad - (2\Delta t) v_{i,j}^k \left( \frac{v_{i,j+1,l}^k - v_{i,j-1,l}^k}{2\Delta y} \right) \\
&\quad - (2\Delta t) \omega_{i,j}^k \left( \frac{v_{i,j,l+1}^k - v_{i,j,l-1}^k}{2\Delta P} \right) - \frac{\phi_{i,j+1,l}^k - \phi_{i,j-1,l}^k}{2\Delta y} \\
&\quad + fu
\end{aligned}$$

Donde las variables independientes son:

$t$  = tiempo

$x$  = Espacio Longitudinal.

$y$  = Espacio en Profundidad.

$P$  = Presión como coordenada vertical.

Donde las variables dependientes:

$u$  = Componente en X de los vientos.

$v$  = Componente en y de los vientos.

$\omega$  = Velocidad vertical.

$\phi$  = Geopotencial.

Donde las constantes son:

$fu$  = fuerza de coriolis en el eje x.

*En la ecuación 42 se presenta la solución partícula para la variable dependiente  $T$  en función de un tiempo futuro  $k+1$ .*

$$\begin{aligned}
T_{i,j}^{k+1} &= T_{i,j}^{k-1} - (2\Delta t) u_{i,j}^k \left( \frac{T_{i+1,j,l}^k - T_{i-1,j,l}^k}{2\Delta x} \right) \\
&\quad - (2\Delta t) v_{i,j}^k \left( \frac{T_{i,j+1,l}^k - T_{i,j-1,l}^k}{2\Delta y} \right) \\
&\quad - (2\Delta t) \omega_{i,j}^k \left( \frac{T_{i,j,l+1}^k - T_{i,j,l-1}^k}{2\Delta P} \right) + \frac{1}{Cp\rho} - \omega_{i,j}^k
\end{aligned} \tag{42}$$

Donde las variables independientes son:

$t$  = tiempo

$x$  = Espacio Longitudinal.  
 $y$  = Espacio en Profundidad.  
 $P$  = Presión como coordenada vertical.

Donde las variables dependientes:  
 $u$  = Componente en X de los vientos.  
 $v$  = Componente en y de los vientos.  
 $\omega$  = Velocidad vertical.  
 $\phi$  = Geopotencial.

Donde las constantes son:  
 $C_p$  = Calor específico del aire húmedo.  
 $f_u$  = fuerza de coriolis en el eje x.

*En la ecuación 43 se presenta la solución partícula para la variable dependiente  $\omega$  en función de un tiempo futuro  $l + 1$ .*

$$\begin{aligned}
 \omega_{i,j,l+1}^k = & \omega_{i,j,l+1}^k - (2\Delta P) u_{i,j}^k \left( \frac{u_{i+1,j,l}^k - u_{i-1,j,l}^k}{2\Delta x} \right) \\
 & - (2\Delta P) v_{i,j}^k \left( \frac{v_{i,j+1,l}^k - v_{i,j-1,l}^k}{2\Delta y} \right)
 \end{aligned} \tag{43}$$

Donde las variables independientes son:  
 $t$  = tiempo  
 $x$  = Espacio Longitudinal.  
 $y$  = Espacio en Profundidad.  
 $P$  = Presión como coordenada vertical.

Donde las variables dependientes:  
 $u$  = Componente en X de los vientos.  
 $v$  = Componente en y de los vientos.  
 $\omega$  = Velocidad vertical.  
 $\phi$  = Geopotencial.

*En la ecuación 44 se presenta la solución partícula para la variable dependiente  $\phi$  en función de un tiempo futuro  $l + 1$ .*

$$\Phi_{i,j,l+1}^k = \Phi_{i,j,l+1}^k - (2\Delta P) - \frac{1}{\rho} \quad (44)$$

Donde las variables independientes son:

$t$  = tiempo  $x$ = Espacio Longitudinal.

$y$ = Espacio en Profundidad.

$P$  = Presión como coordenada vertical.

Donde las variables dependientes:

$\phi$ = Geopotencial.

$\rho$ = Densidad.

Después de planteada la solución particular de las ecuaciones diferentes se calcularon los valores de las constantes del modelo que en nuestro sistema son  $f_u$ ,  $f_v$  y  $C_p$  como se muestra en las ecuaciones 45, 46, 47, 48 y 49.

$f_u$ = fuerza de coriolis en el eje x

$$f_u = 2\Omega \text{ sen } \sigma x \quad (45)$$

$$f_u = 1.3870e - 04 \quad (46)$$

$f_v$ = fuerza de coriolis en el eje y

$$f_v = 2\Omega \text{ sen } \sigma y \quad (47)$$

$$f_v = 2.0297 * 10^{-5} \quad (48)$$

Donde  $\Omega$  ,  $\sigma x$ = Longitud y  $\sigma y$  = Latitud

Calor específico del aire húmedo ( $C_p$ )

$$C_p = 1.86 \frac{KJ}{Kg \times ^\circ C} \times \frac{1^\circ C}{273.15^\circ F} = 0.006809445 \quad (49)$$

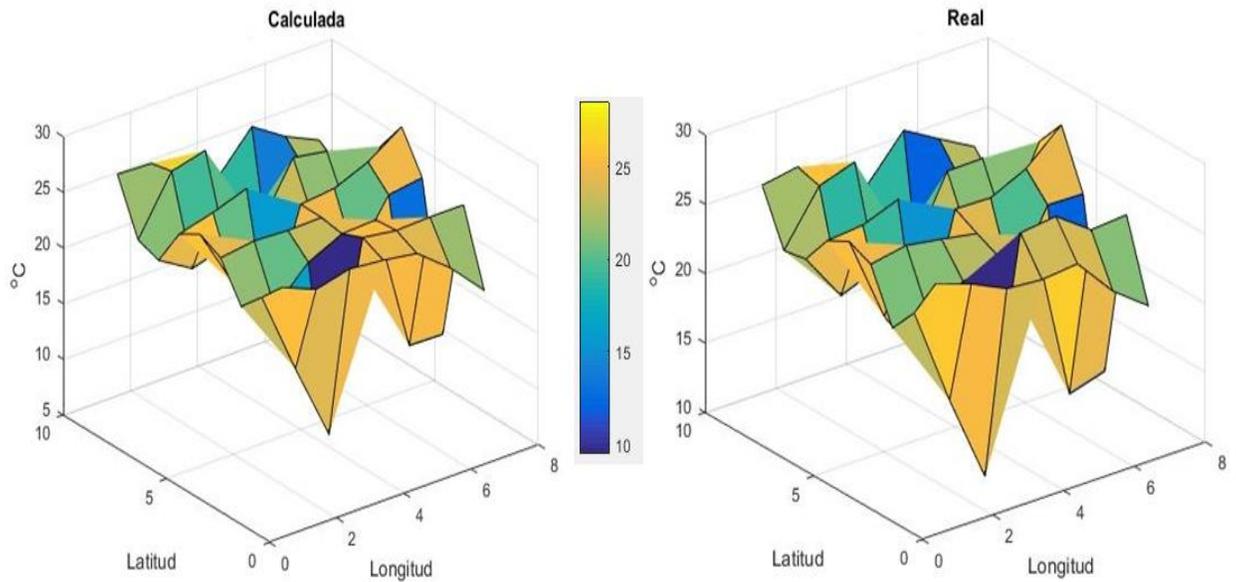
## 5.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES DEL MODELO DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICO PARA LA CUENCA DEL RÍO PAMPLONITA.

A partir de la solución particular propia desarrollada para las ecuaciones en coordenadas isobáricas implementadas en la predicción meteorológico para la cuenca del río Pamplonita, se hizo la representación del modelo de predicción meteorológico en el software Matlab para el cual se plantearon los sistemas de ecuaciones diferencial, primero solucionando las ecuaciones que sus derivadas parciales están en función de la presión 43 y 44, para el cual se derivada con respecto a una presión futura ( $l + 1$ ), y su resultado son las variables ( $\omega, \phi$ ), estos resultados  $l + 1$  ingresan al tercer conjunto de ecuaciones 40, 41 y 42 que su resultado son las variables ( $u, v, T$ ) en un tiempo futuro ( $k + 1$ ), generando una predicción a tiempo futuro de 1 día, 4 días y 10 días.

El grillaje del modelo, se realizó con una grilla de ( $8 \times 10 \times 5$ ) que representan la zona de la cuenca del río Pamplonita, en la cual la longitud que lo representa esta dada 8 niveles y la latitud por 10 niveles, que aproximadamente cubren el área de 1345 kilómetros<sup>2</sup> y una altura sigma de 5 niveles que va desde los 2 m.s.s hasta los 4.572 Km Donde sus condiciones iniciales están dadas por las variables dependientes ( $u, v, T, \omega, \phi$ ) obtenidas a partir de los datos satelitales y la obtención de las constantes.

En la figura 26 se puede observar la comparación de los datos reales y los datos calculados de temperaturas para un día a 1829 metros de altura sobre la superficie, donde su eje vertical representa las temperaturas reales en grados centígrados para un día, el valor máximo para los datos calculados fue de 25.6 °C y el mínimo fue de 9 °C y para los calculados el valor máximo para los datos reales fue de 27 °C y el mínimo fue de 10 °C.

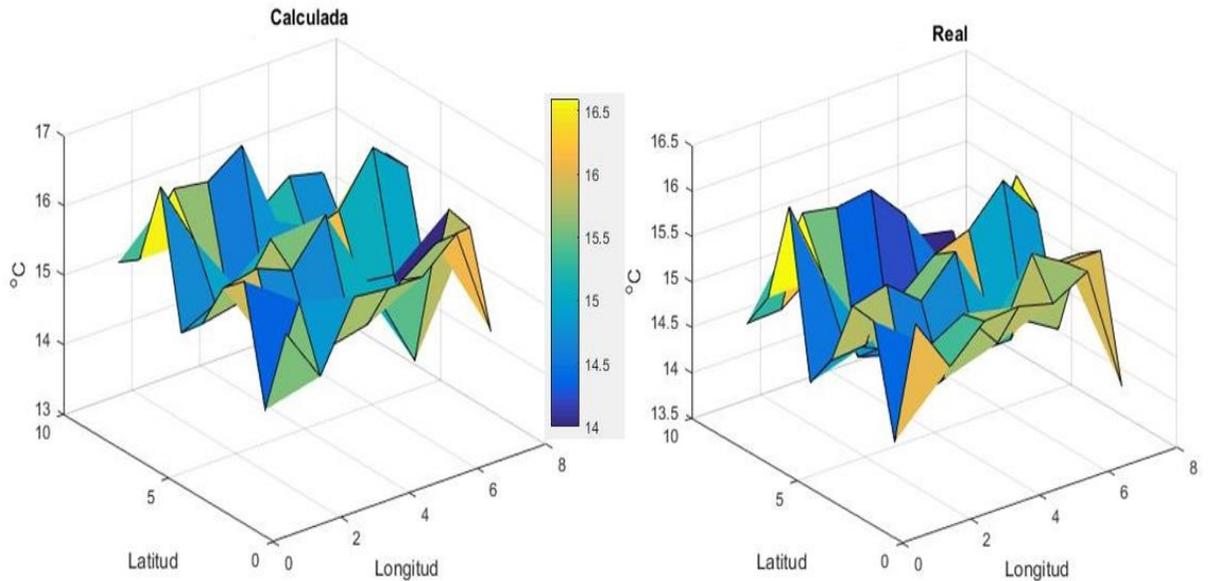
**Figura 26. Temperaturas Calculadas a partir de la simulación realizada por el modelo para predecir a un día a 2m versus temperaturas reales a un día a 2m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 27 se puede observar la comparación de los datos reales y los datos calculados de temperaturas para un día a 1829 metros de altura sobre la superficie, donde su eje vertical representa las temperaturas reales en grados centígrados para un día, el valor máximo para los datos calculados fue de 15.7 °C y el mínimo fue de 14.96 °C y para los calculados el valor máximo para los datos reales fue de 15.7 °C y el mínimo fue de 14.9 °C.

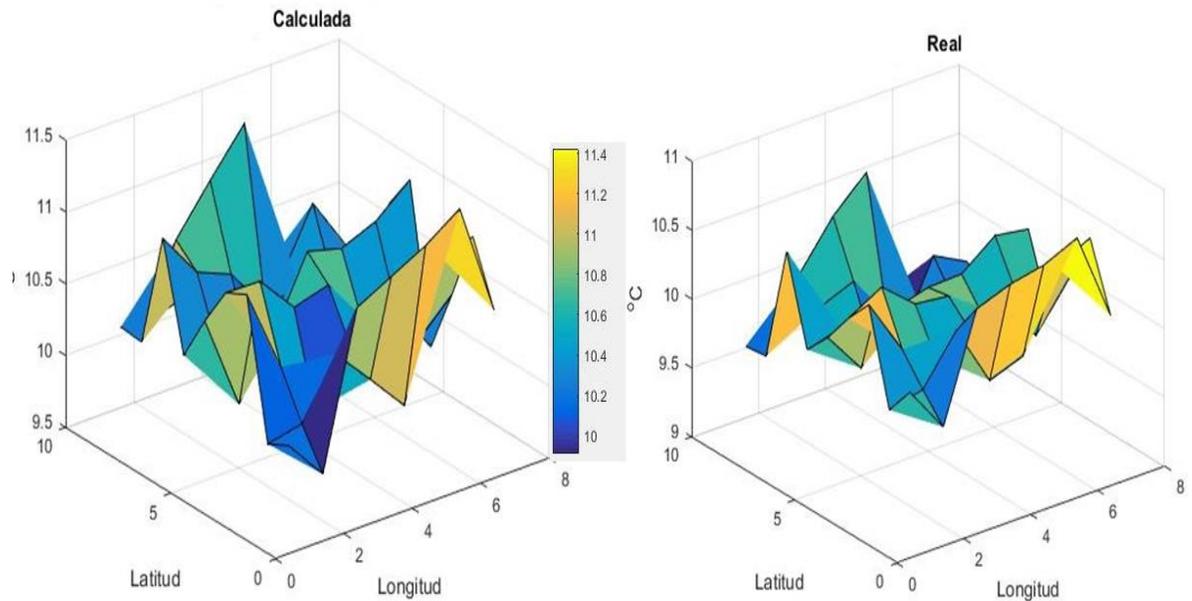
**Figura 27. Temperaturas Calculadas a partir de la simulación realizada por el modelo para predecir a un día a 1829m versus temperaturas reales a un día a 1829m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 28 se puede observar la comparación de los datos reales y los datos calculados de temperaturas para un día a 2743 metros de altura sobre la superficie, donde su eje vertical representa las temperaturas reales en grados centígrados para un día, el valor máximo para los datos calculados fue de 10.96 °C y el mínimo fue de 9.98 °C y para los reales el valor máximo para los datos reales fue de 10.2 °C y el mínimo fue de 9.8 °C.

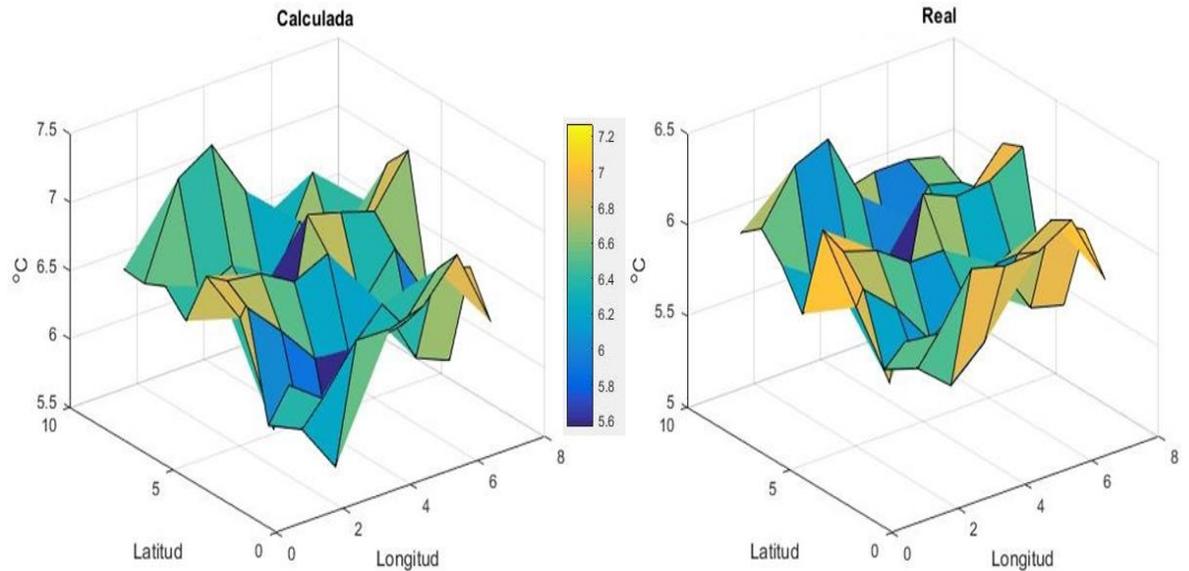
**Figura 28. Temperaturas Calculadas a partir de la simulación realizada por el modelo para predecir a un día a 2743m versus temperaturas reales a un día a 2743m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 29 se puede observar la comparación de los datos reales y los datos calculados de temperaturas para un día a 3658 metros de altura sobre la superficie, donde su eje vertical representa las temperaturas reales en grados centígrados para un día, el valor máximo para los datos calculados fue de 6.7 °C y el mínimo fue de 5.54 °C y para los reales el valor máximo para los datos reales fue de 5.98 °C y el mínimo fue de 5.5 °C.

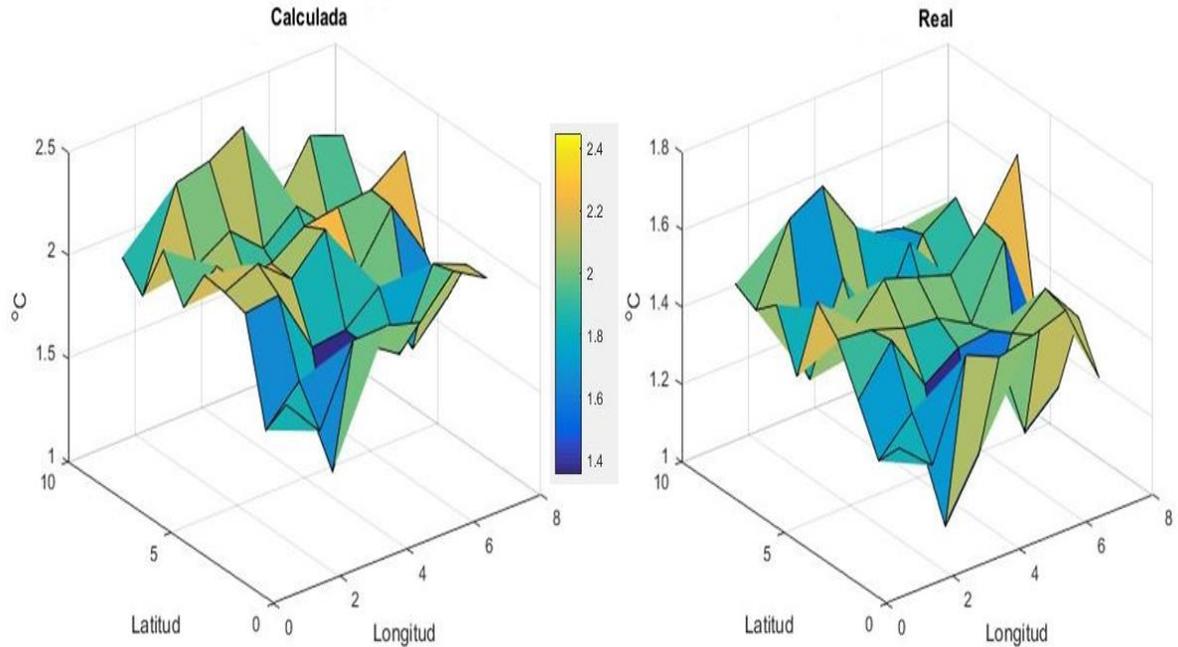
**Figura 29. Temperaturas Calculadas a partir de la simulación realizada por el modelo para predecir a un día a 3658m versus temperaturas reales a un día a 3658m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 30 se puede observar la comparación de los datos reales y los datos calculados de temperaturas para un día a 4572 metros de altura sobre la superficie, donde su eje vertical representa las temperaturas reales en grados centígrados para un día, el valor máximo para los datos calculados fue de 2.1 °C y el mínimo fue de 1.39 °C y para los reales el valor máximo para los datos reales fue de 1.51 °C y el mínimo fue de 1.1 °C.

**Figura 30. Temperaturas Calculadas a partir de la simulación realizada por el modelo para predecir a un día a 3658m versus temperaturas reales a un día a 4572m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

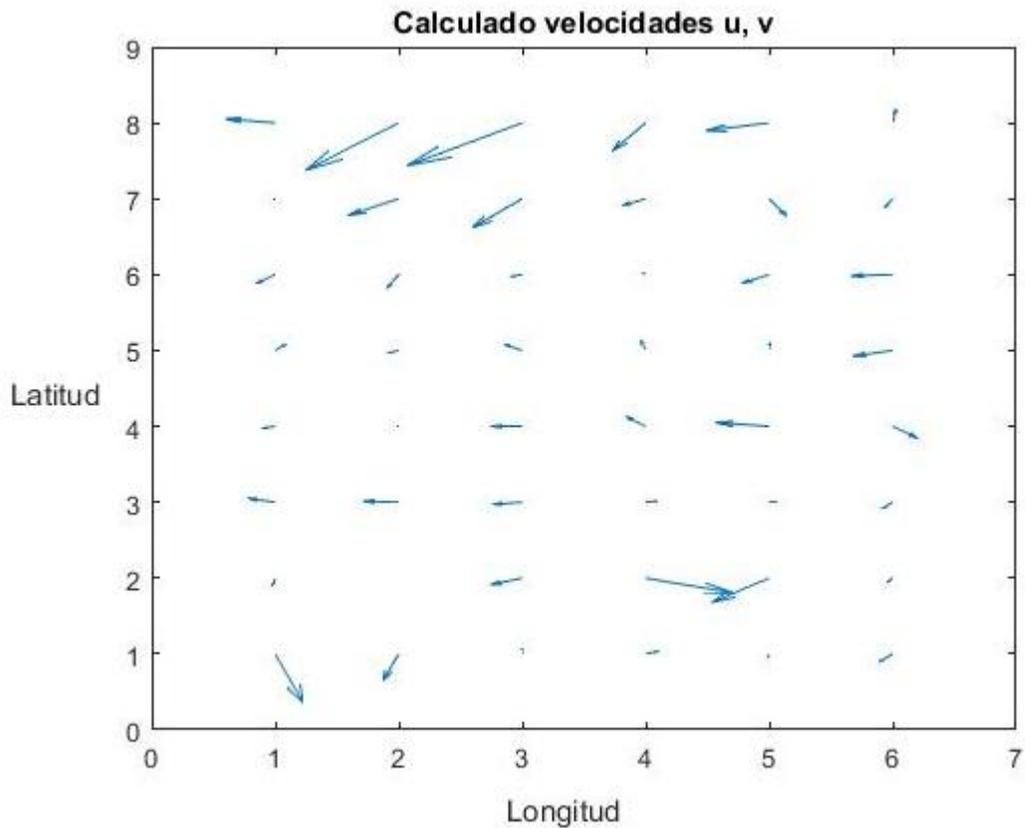
De igual manera como se muestra en el anexo 2. Se trabajó la predicción a partir del modelo meteorológico para predecir a 4 días y a 10 días, partiendo de las mismas condiciones iniciales, para las cuales cada predicción se iba avanzando día a día en el tiempo con igual grillaje y componentes sigma, cada día que el modelo iba avanzando se tomaba como su nueva condición inicial, al final el resultado de la simulación se comparo con los datos reales a 4 días y 10 días.

En las figuras 31, 33, 35 y 37 se presentan las velocidades y direcciones de los vientos calculadas en un vector unitario con las componentes u y v a 2 m.

En las figuras 32, 34, 36 y 48 se presentan las velocidades y direcciones de los vientos reales en un vector unitario con las componentes u y v a 2 m.

En la figura 31. Se pueden observar los resultados de las predicciones del vector calculado para los vientos con su magnitud y dirección a 2 metros de altura sobre la superficie.

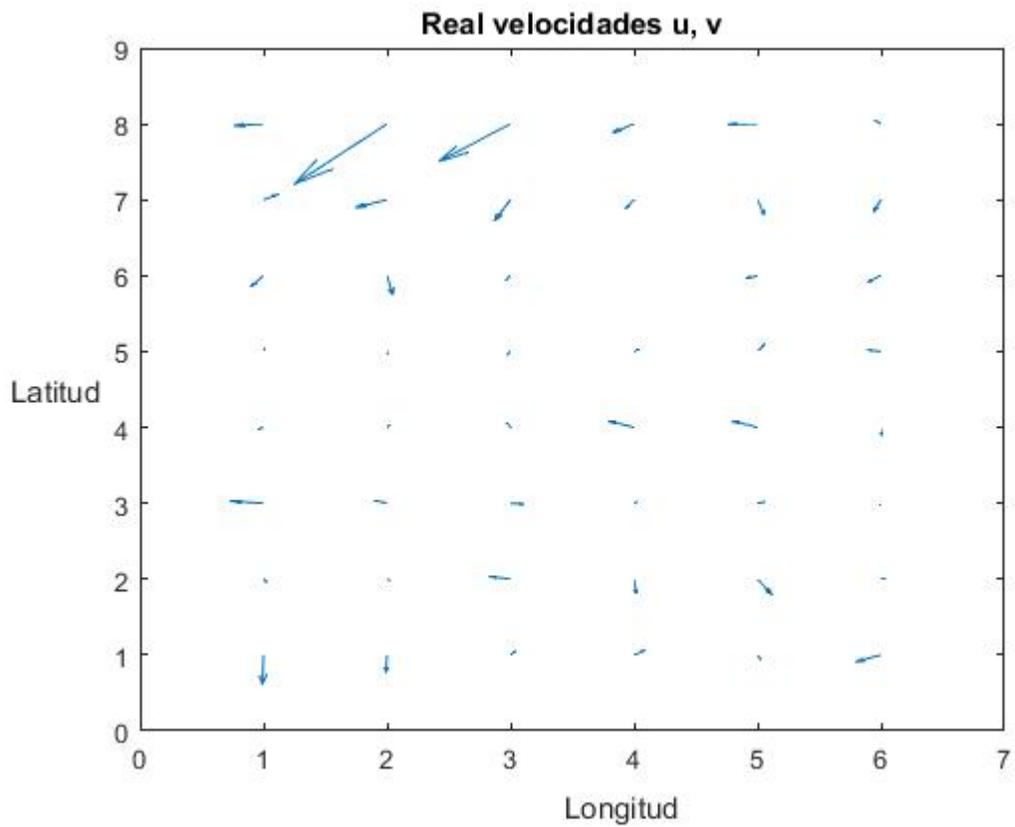
**Figura 31. Vientos Calculados a partir de la simulación realizada por el modelo para predecir a un día a 2 m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 32. Se puede observar los datos reales del vector para la simulado a un día a 2 metros de altura sobre la superficie, obtenidos de la base de datos NCEP Global Forecast System (GFS) Analyzes and Forecastds of National Environmental Prediction Centers / National Weather Service / NOAA / US Department of Commerce.

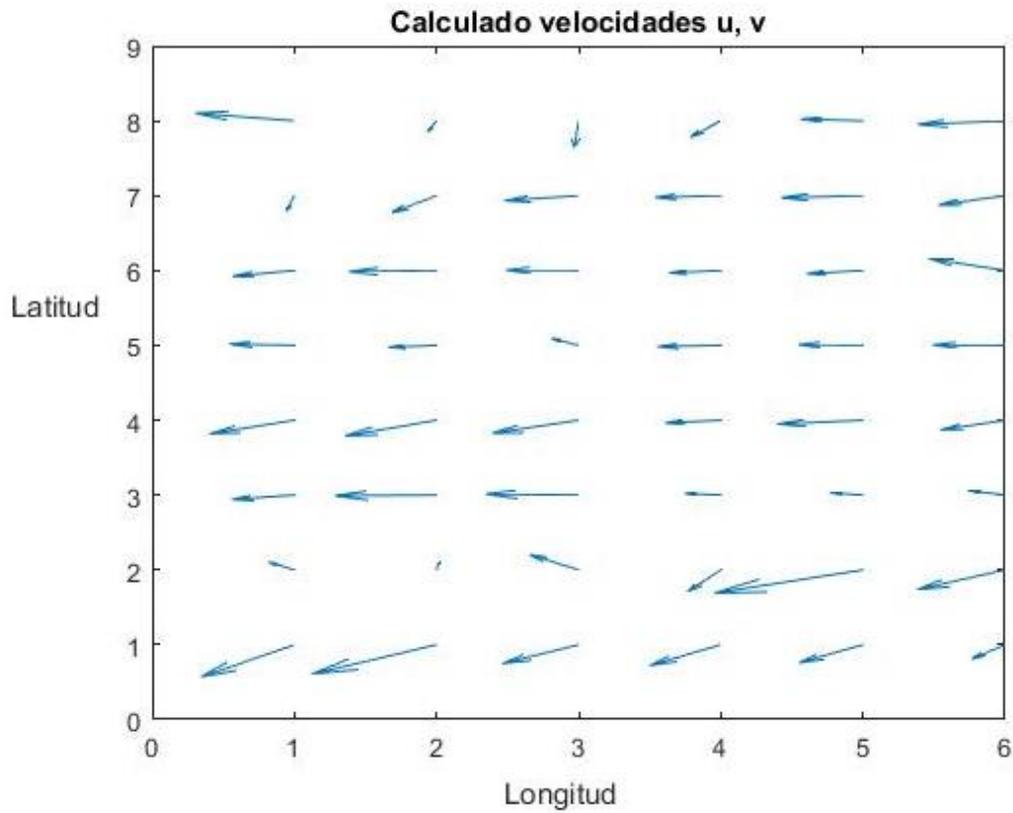
Figura 32. Vientos reales (simulación a un día) a 2 m.



Fuente: Palacios, 2017.

En la figura 33. Se pueden observar los resultados de las predicciones del vector calculado para los vientos con su magnitud y dirección a 1829 metros de altura sobre la superficie.

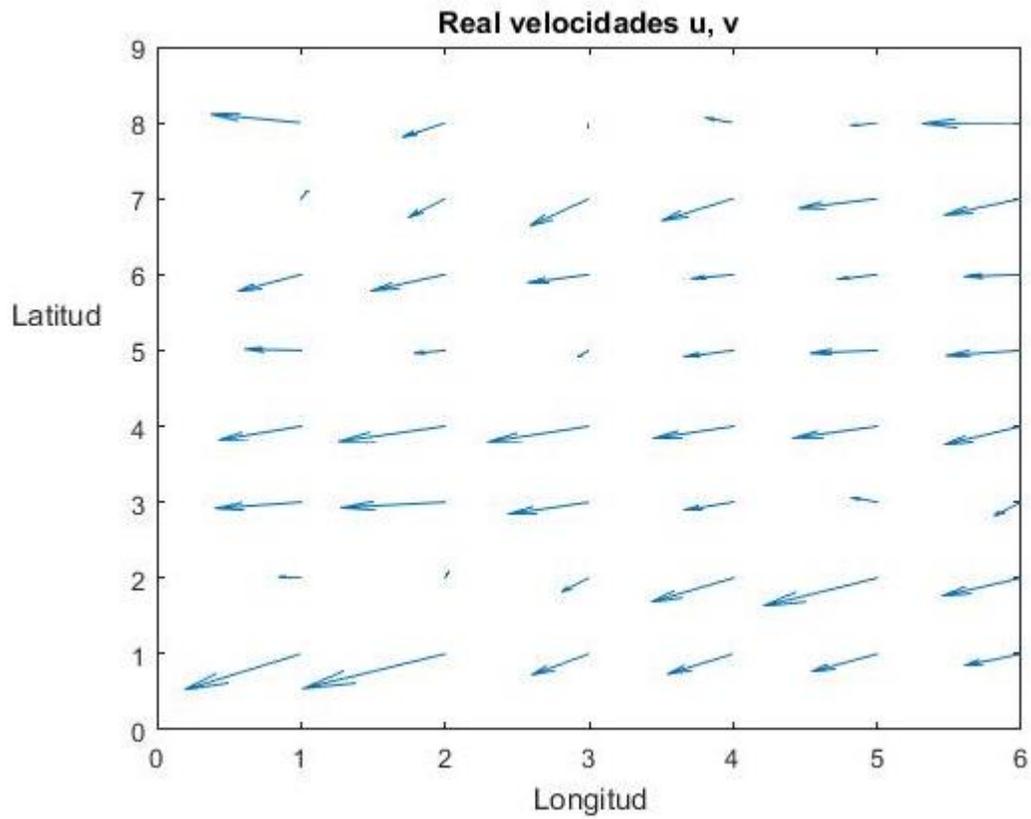
Figura 33. Vientos Calculados a partir de la simulación realizada por el modelo para predecir a un día a 1829 m.



Fuente: Palacios, 2017.

En la figura 34. Se puede observar los datos reales del vector para la simulado a un día a 1829 metros de altura sobre la superficie, obtenidos de la base de datos NCEP Global Forecast System (GFS) Analyzes and Forecastds of National Environmental Prediction Centers / National Weather Service / NOAA / US Department of Commerce.

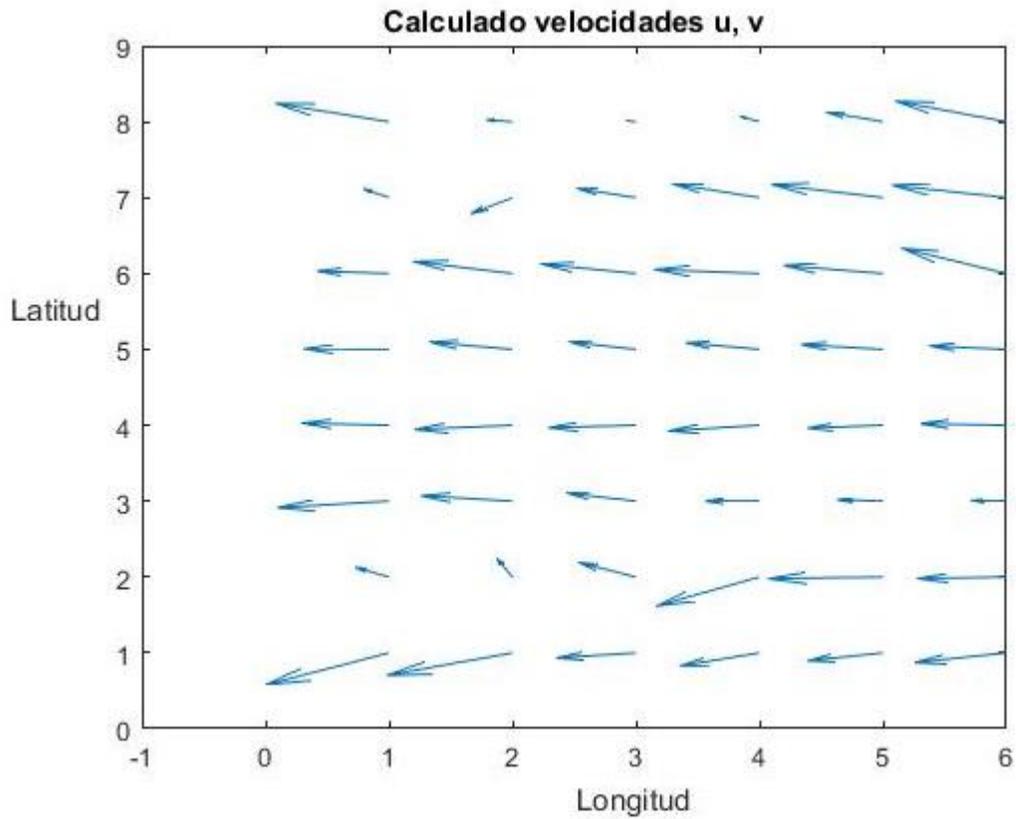
Figura 34. Vientos reales (simulación a un día) a 1829 m.



Fuente: Palacios, 2017.

En la figura 35. Se pueden observar los resultados de las predicciones del vector calculado para los vientos con su magnitud y dirección a 2743 metros de altura sobre la superficie.

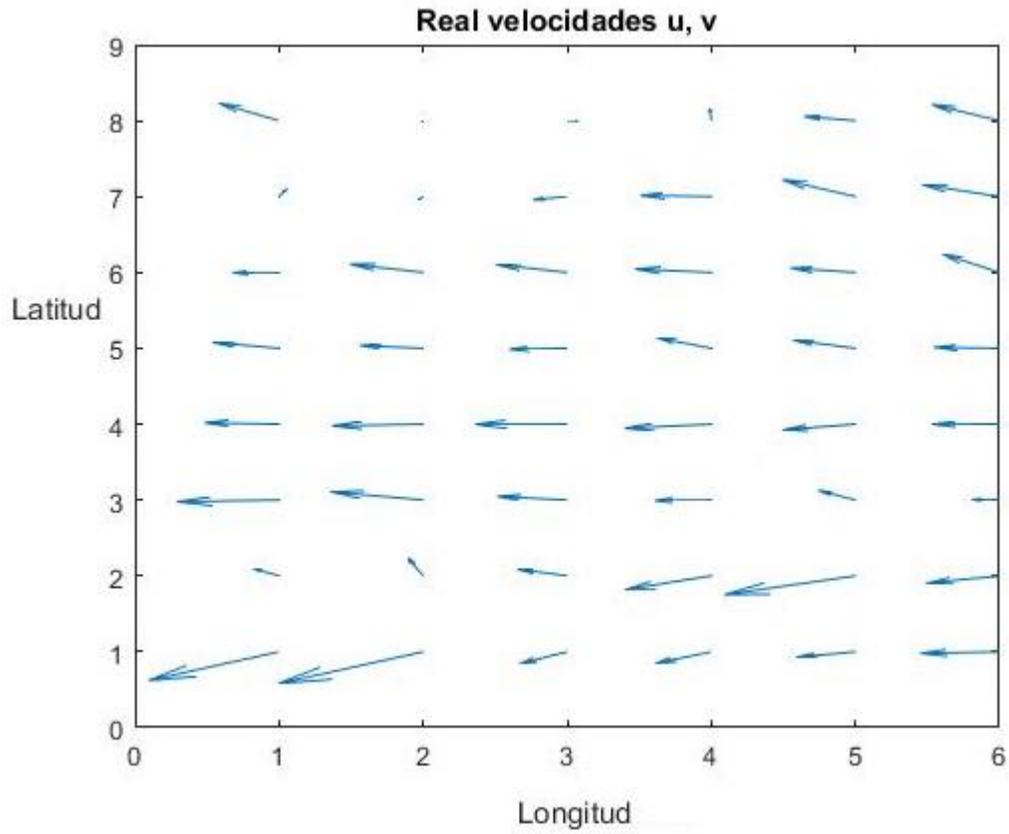
Figura 35. Vientos Calculados a partir de la simulación realizada por el modelo para predecir a un día a 2743 m.



Fuente: Palacios, 2017.

En la figura 36. Se puede observar los datos reales del vector para la simulado a un día a 2743 metros de altura sobre la superficie, obtenidos de la base de datos NCEP Global Forecast System (GFS) Analyzes and Forecastds of National Environmental Prediction Centers / National Weather Service / NOAA / US Department of Commerce.

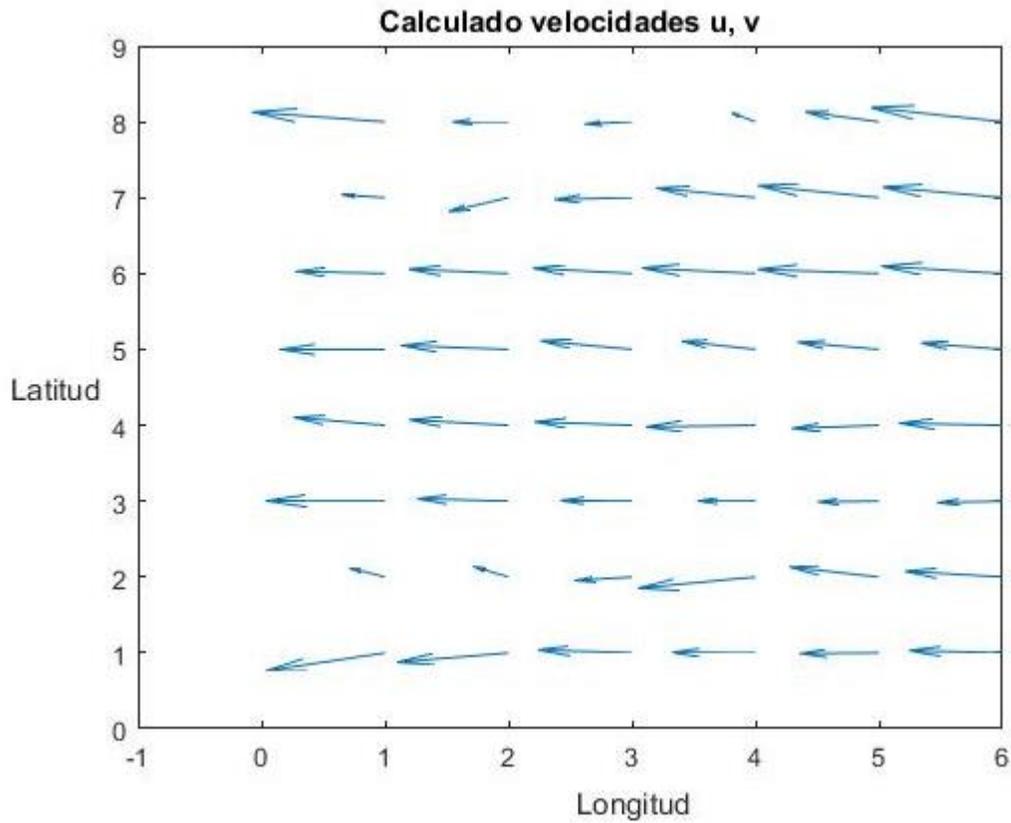
Figura 36. Vientos reales (simulación a un día) a 2743 m.



Fuente: Palacios, 2017.

En la figura 37. Se pueden observar los resultados de las predicciones del vector calculado para los vientos con su magnitud y dirección a 3658 metros de altura sobre la superficie.

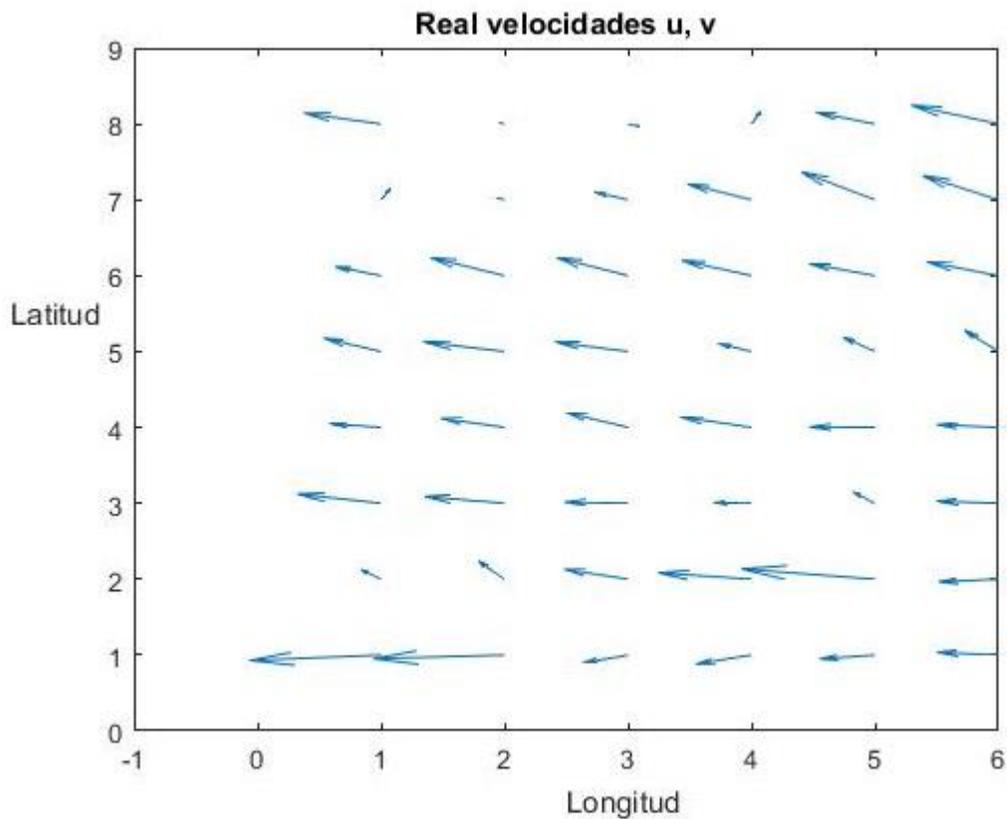
Figura 37. Vientos Calculados a partir de la simulación realizada por el modelo para predecir a un día a 3658 m.



Fuente: Palacios, 2017.

En la figura 38. Se puede observar los datos reales del vector para la simulado a un día a 3658 metros de altura sobre la superficie, obtenidos de la base de datos NCEP Global Forecast System (GFS) Analyzes and Forecastds of National Environmental Prediction Centers / National Weather Service / NOAA / US Department of Commerce.

Figura 38. Vientos reales (simulación a un día) a 3658 m.



Fuente: Palacios, 2017.

La no linealidad generada por los vientos es muy difícil de predecir pero como se puede observar en las graficas 31 y 32 es donde los vientos generan mayor turbulencia debido a su interacción con la geografía, cuando los vientos comienzan a subir como se ve en las graficas 38-43 su dirección se va tornando en un solo sentido y se denota su directa proporcionalidad de la tendencia que a mayor altura, mas lineal.

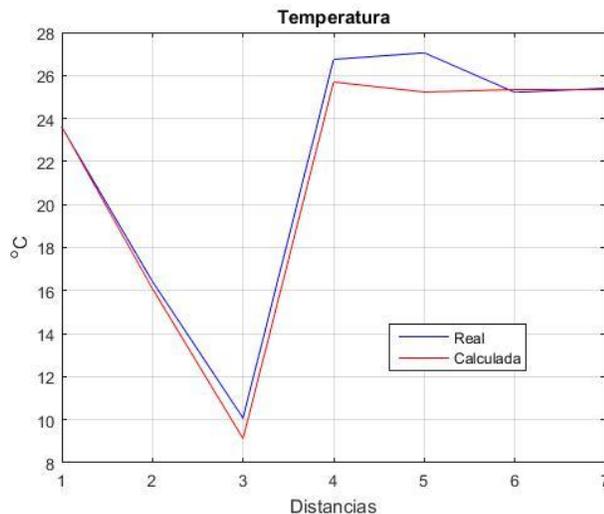
Analizando las graficas de velocidad y dirección del viento, se observa que de lo calculado y lo real la efectividad del modelo de predicción meteorológico tiene una tendencia bastante favorable, ya que poder predecir el vector que representa los vientos es complicado, debido a su comportamiento caótico, por ende se tomo la decisión de no realizar graficas de curva de comparación.

### 5.3 VALIDACIÓN DEL MODELO METEOROLÓGICO DE PREDICCIÓN PARA LA CUENCA DEL RÍO PAMPLONITA

En las figuras 39, 40, 41, 42 y 43 se realizó la comparación de la temperatura real y la temperatura calculada para 4 días en donde el eje y representa el valor en grado centígrados y el eje x representa los valores de la transversal unidimensional del grillaje.

En la figura 39. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 1 día a 2 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 0.7545% lo cual indica que la efectividad del modelo a 2 metros de altura y con predicción a 1 día es elevada.

Figura 39. Temperatura (1 día) Real y Calculado a 2 m.

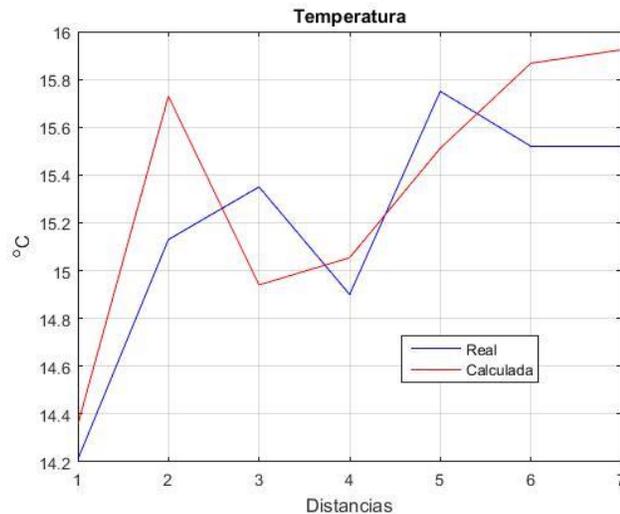


Fuente: Palacios, 2017.

En la figura 40. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 1 día a 1289 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su

porcentaje de error se obtuvo que era de 3.4319% lo cual indica que la efectividad del modelo a 1829 metros de altura y con predicción a 1 día es elevada.

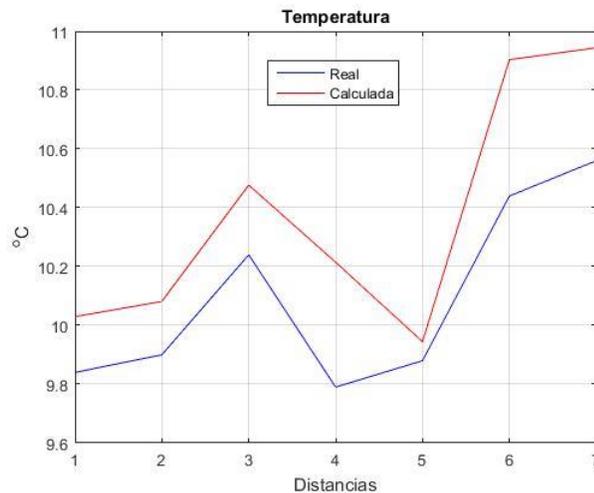
**Figura 40. Temperatura (1 día) Real y Calculado a 1829 m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 41. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 1 día a 2743 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 3.4319% lo cual indica que la efectividad del modelo a 2743 metros de altura y con predicción a 1 día es elevada, las variaciones generadas en las predicciones contra lo real entre las distancias 5 y 7, se deben principalmente a la turbulencia generada por la no linealidad del modelo de predicción meteorológico, se aprecia que son variaciones máximo de 0.3 °C.

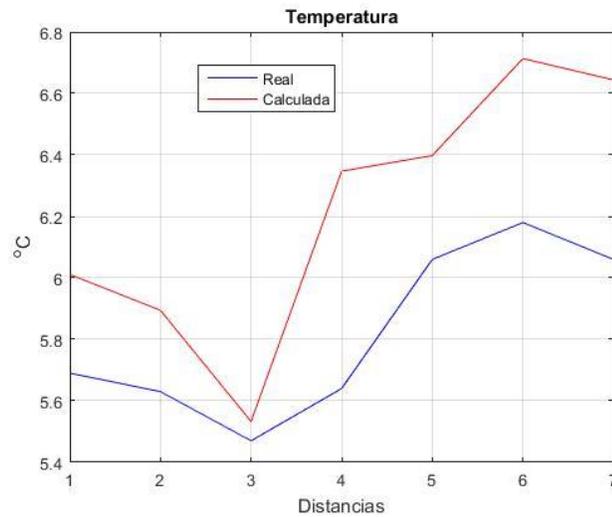
**Figura 41. Temperatura (1 día) Real y Calculado a 2743 m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 42. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 1 día a 3658 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 9.938% lo cual indica que la efectividad del modelo a 3658 metros de altura y con predicción a 1 día es moderado, las variaciones generadas en las predicciones contra lo real entre las distancias 3 y 7, se deben principalmente a la turbulencia generada por la no linealidad del modelo de predicción meteorológico, se aprecia que son variaciones máximo de 0.6 °C.

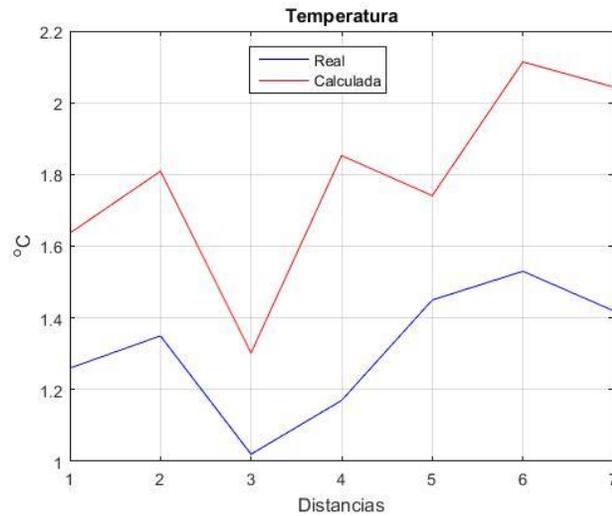
**Figura 42. Temperatura (1 día) Real y Calculado a 3658 m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 43. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 1 día a 4572 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 38.5214% lo cual indica que la efectividad del modelo a 4572 metros de altura y con predicción a 1 día está por debajo del error máximo absoluto, al momento de solucionar las ecuaciones del modelo la turbulencia generada a esta altura es bastante compleja por ende se obtiene este porcentaje de error .

Figura 43. Temperatura (1 día) Real y Calculado a 4572 m.



Fuente: Palacios, 2017.

En la Tabla 2. Se observa el error del modelo de predicción a 1 día, la cual dio un resultado elevado para 2m, 1829m, 2743m, 4572m, como una predicción moderada a 4572m, debido a la turbulencia generada por la no linealidad y el valor de las temperaturas tiene una oscilación muy baja y varían en cuestión de menos de un grado.

Tabla 2. Porcentaje de error del modelo de predicción para 1 día.

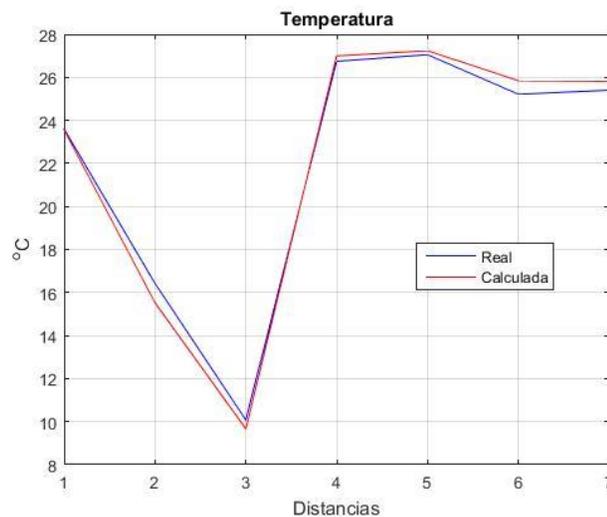
<b>%Error</b>	<b>Altura (m)</b>
<b>0,7545</b>	<b>2</b>
<b>3,4319</b>	<b>1829</b>
<b>2,8065</b>	<b>2743</b>
<b>9,3968</b>	<b>3658</b>
<b>38,5214</b>	<b>4572</b>

Fuente: Palacios, 2017.

En las figuras 46, 47, 48, 49 y 50 se realizó la comparación de la temperatura real y la temperatura calculada para 4 días en donde el eje y representa el valor en grado centígrados y el eje x representa los valores de la transversal unidimensional del grillaje.

En la figura 49. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 1 día a 2 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 0.165% lo cual indica que la efectividad del modelo a 2 metros de altura y con predicción a 4 días es elevada y fue la más elevada presentada por el modelo.

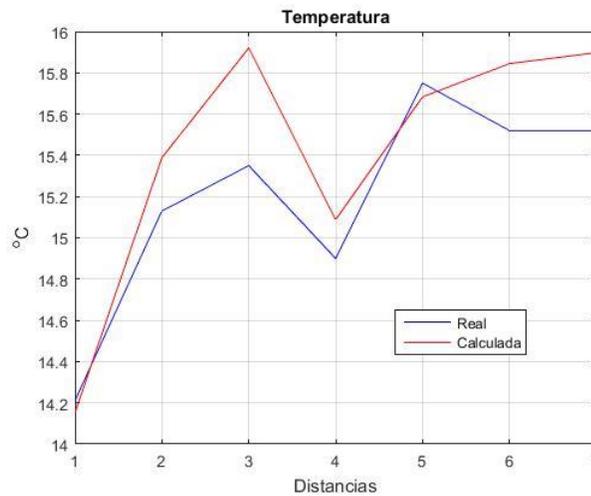
**Figura 44. Temperatura (a 4 días) Real y Calculado a 2 m.**



Fuente: Palacios, 2017.

En la figura 45. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 4 días a 1829 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 2.0987% lo cual indica que la efectividad del modelo a 1829 metros de altura y con predicción a 4 días es elevada, las variaciones generadas en las predicciones contra lo real entre las distancias 2 y 4, se deben principalmente a la turbulencia generada por la no linealidad del modelo de predicción meteorológico, se aprecia que son variaciones máximo de 0.6 °C.

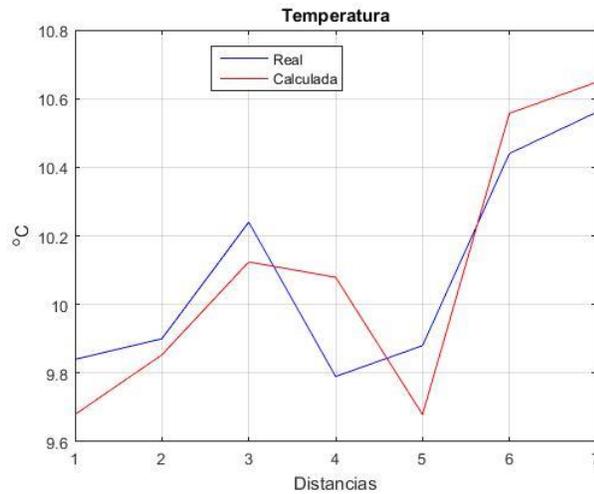
**Figura 45. Temperatura (a 4 días) Real y Calculado a 1829 m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 46. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 4 días a 2743 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 0.1911% lo cual indica que la efectividad del modelo a 2743 metros de altura y con predicción a 4 días es elevada, las variaciones generadas en las predicciones contra lo real entre las distancias 5 y 7, se deben principalmente a la turbulencia generada por la no linealidad del modelo de predicción meteorológico, se aprecia que son variaciones máximo de 0.1 °C, con fluctuaciones en los puntos 3 y 5 que son cambios en la tendencia significativos que de igual forma el modelo logro predecirlas.

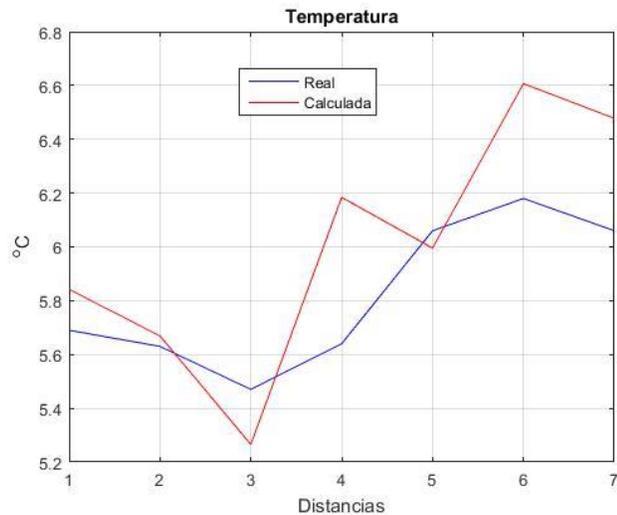
Figura 46. Temperatura (a 4 días) Real y Calculado a 2743 m.



Fuente: Palacios, 2017.

En la figura 47. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 4 días a 3658 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 4.6523% lo cual indica que la efectividad del modelo a 3658 metros de altura y con predicción a 4 días es elevada, las variaciones generadas en las predicciones contra lo real entre las distancias 5 y 7, se deben principalmente a la turbulencia generada por la no linealidad del modelo de predicción meteorológico, se aprecia que son variaciones máximo de 0.1 °C, con fluctuaciones en los puntos 3 y 5 que son cambios en la tendencia significativos que de igual forma el modelo logro predecirlas.

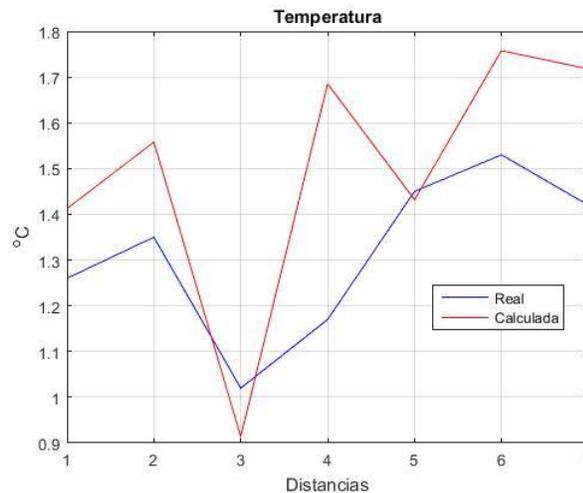
**Figura 47. Temperatura (a 4 días) Real y Calculado a 3658 m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 48. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 4 días a 4572 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 12.0983%. Lo cual indica que la efectividad del modelo a 2743 metros de altura y con predicción a 4 días es moderada las variaciones generadas en las predicciones contra lo real entre las distancias 1 y 3 y 4 y 7, se deben principalmente a la turbulencia generada por la no linealidad del modelo de predicción meteorológico, se aprecia que son variaciones máximo de 0.2 °C entre 1 y 3 y de 0.5 entre 3 y 7, con fluctuaciones en los puntos 3 y 5 que son cambios en la tendencia significativos que de igual forma el modelo logro predecirlas.

**Figura 48. Temperatura (a 4 días) Real y Calculado a 4572 m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la Tabla 3. Se observa el error del modelo de predicción para 4 días la cual dio un resultado elevado de efectividad para las predicciones a 2m, 1829m, 2743m, 3658m, pero para la predicción a 4572 fue moderado con poca turbulencia principalmente a debido a la estabilidad presentada por el modelo a 4 días.

**Tabla 3. Porcentaje de error del modelo de predicción para 4 días.**

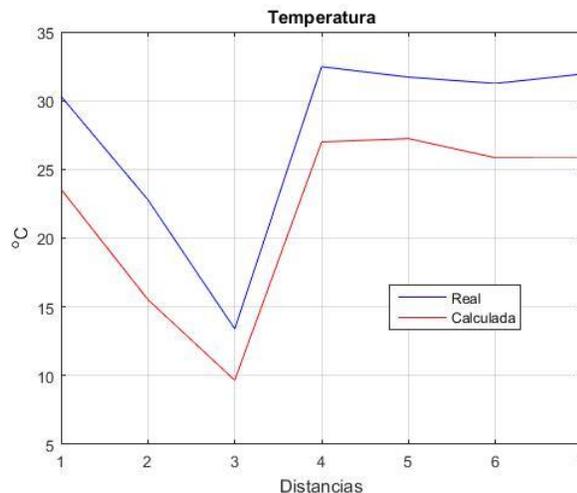
<b>%Error</b>	<b>Altura (m)</b>
<b>0,165</b>	<b>2</b>
<b>2,0987</b>	<b>1829</b>
<b>0,191</b>	<b>2743</b>
<b>4,6523</b>	<b>3658</b>
<b>12,0983</b>	<b>4572</b>

**Fuente:** (Palacios, 2017)

En las figuras 49, 50, 51, 52 y 53 se realizó la comparación de la temperatura real y la temperatura calculada para 10 días en donde el eje y representa el valor en grado centígrados y el eje x representa los valores de la transversal unidimensional del grillaje.

En la figura 49. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 10 días a 2 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 18.2697%. Lo cual indica que la efectividad del modelo a 2 metros de altura y con predicción a 10 días está por debajo del error máximo absoluto, las variaciones generadas en las predicciones contra lo real, se deben principalmente a la turbulencia generada por la no linealidad del modelo de predicción meteorológico.

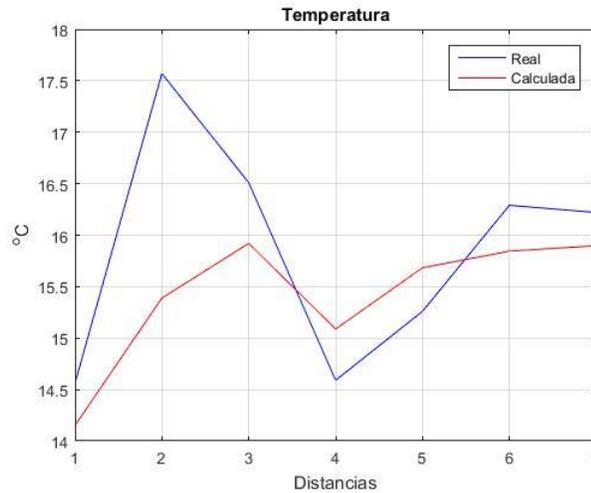
**Figura 49. Temperatura (a 10 días) Real y Calculado a 2 m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 50. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 10 días a 1829 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 1.9168% lo cual indica que la efectividad del modelo a 1829 metros de altura y con predicción a 10 días es elevada, las variaciones generadas en las predicciones contra lo real entre las distancias 1 y 3 y 4 y 7, se deben principalmente a la turbulencia generada por la no linealidad del modelo de predicción meteorológico, se aprecia que son variaciones máximo de 1.5 °C entre 1 y 3 y de 0.1 entre 4 y 7, con fluctuaciones en los puntos 3 y 4 que son cambios en la tendencia significativos que de igual forma el modelo logro predecirlas.

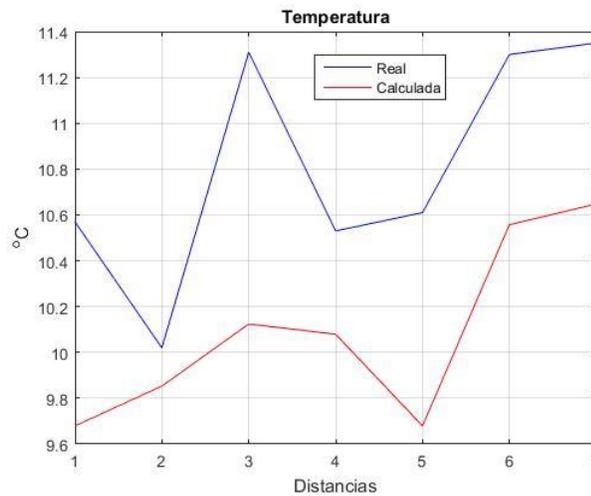
**Figura 50. Temperatura (a 10 días) Real y Calculado a 1829 m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 51. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 10 días a 2743 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 5.9771% lo cual indica que la efectividad del modelo a 2743 metros de altura y con predicción a 10 días es moderada, las variaciones generadas en las predicciones contra lo real entre las distancias 1 y 7, se deben principalmente a la turbulencia generada por la no linealidad del modelo de predicción meteorológico, se aprecia que son variaciones máximo de 1 °C, con fluctuaciones en los puntos 3 y 4 que son cambios en la tendencia significativos que de igual forma el modelo logro predecirlas.

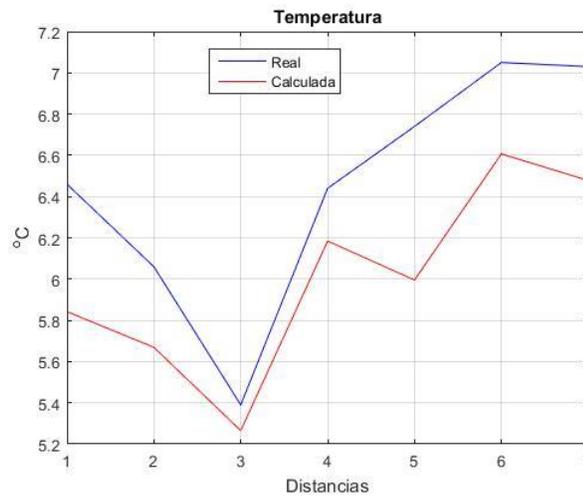
**Figura 51. Temperatura (a 10 días) Real y Calculado a 2743 m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 52. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 10 días a 3658 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 7.3576% lo cual indica que la efectividad del modelo a 3658 metros de altura y con predicción a 10 días es moderada, las variaciones generadas en las predicciones contra lo real entre las distancias 1 y 3 y 3 y 7, se deben principalmente a la turbulencia generada por la no linealidad del modelo de predicción meteorológico, se aprecia que son variaciones máximo de 0.6 °C entre 1 y 3 y de 0.4 °C entre 3 y 7, con fluctuaciones en el punto 3 que son cambios en la tendencia significativos que de igual forma el modelo logro predecirlas.

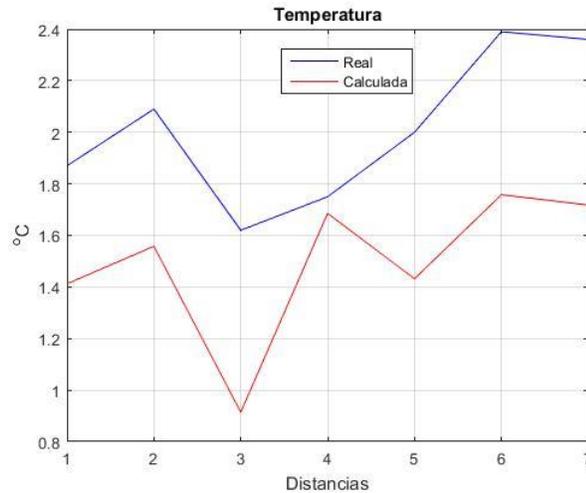
**Figura 52. Temperatura (a 10 días) Real y Calculado a 3658 m.**



**Fuente:** Palacios, 2017.

En la figura 53. Se puede observar la comparación de los datos obtenidos del modelo de predicción meteorológico y los datos reales obtenidos de la base de datos para 10 días a 3658 metros sobre la superficie, en el cual al realizar su porcentaje de error se obtuvo que era de 25.0956% lo cual indica que la efectividad del modelo a 4572 metros de altura y con predicción a 10 días está por debajo del error máximo absoluto, las variaciones generadas en las predicciones contra lo real entre las distancias 1 y 7, se deben principalmente a la turbulencia generada por la no linealidad del modelo de predicción meteorológico, se aprecia que son variaciones máximo de 0.4 °C entre 1 y 3, de 0.6 °C entre 3 y 5 y de 0.8 °C entre 5 y 8 , con fluctuaciones en los puntos 2, 3 y 5 que son cambios en la tendencia significativos que de igual forma el modelo logro predecirlas.

**Figura 53. Temperatura (a 10 días) Real y Calculado a 4572 m.**



Fuente: Palacios, 2017.

En la Tabla 4. Se observa el error del modelo de predicción para 10 días la cual dio un resultado moderado de efectividad para las predicciones a 2m, 1829m, 2743m, 3658m, 4572m principalmente a debido al tiempo de predicción, ya que al ser a 10 días la turbulencia generada por la variación temporal aumenta con el paso de los días.

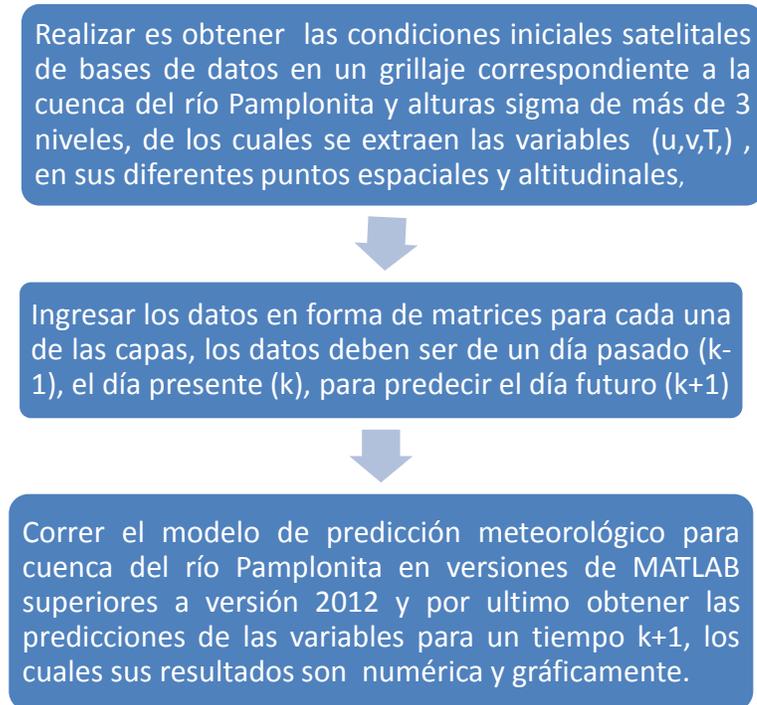
**Tabla 4. Porcentaje de error del modelo de predicción para 10 días.**

<b>%Error</b>	<b>Altura (m)</b>
<b>18,2697</b>	<b>2</b>
<b>1,9168</b>	<b>1829</b>
<b>5,9775</b>	<b>2743</b>
<b>7,357</b>	<b>3658</b>
<b>25,0956</b>	<b>4572</b>

Fuente: Palacios, 2017.

## 5.4 PROCESO PARA UTILIZAR EL MODELO DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICO

Diagrama 1. Proceso para utilizar el modelo



Fuente: Palacios, 2017.

## CONCLUSIONES

De las 5 capas sigma que representaron la atmósfera en este trabajo se pudo observar como en la troposfera las temperaturas son inversamente proporcionales a la altura, y como su valor en grados centígrados en cuestión de pocas distancias desciende muy rápidamente, debido a esto se hace más difícil su predicción debido a que sus valores van oscilando cada vez en valores más pequeños.

La predicción numérica de las variables meteorológicas es cada día aumenta su complejidad, ya que la su interacción con variables como: la contaminación, la geografía y los ecosistemas cada día se hace más intensa y cambiante, por ende es necesario desarrollar modelos de predicción cada vez más robustos donde se planteen sistemas de ecuaciones que integren todas la mayor cantidad de variables posibles aumentando su efectividad.

El desarrollo de este modelo de predicción meteorológico presenta un avance para la universidad de Pamplona, en la aplicación de la física, química, mecánica de los fluidos, matemática aplicada y ciencias computacionales desde un entorno científico, pero es necesario trabajar en la inclusión de muchas variables que puedan llevarlo a ser un modelo robusto.

## LIMITACIONES Y ALCANCES

Debido al área de estudio trabajada la cuenca del río Pamplonita tuvo que ser un sistema cerrado, donde los límites de la interacción entre las variables son específicos para el grillaje establecido.

A partir de los resultados obtenidos por el modelo y los datos reales se observa la gran variabilidad climática presente en la cuenca del río Pamplonita ya que variaban las temperaturas del grillaje a dos metros en más de 10 grados para un área de 1345 kilómetros<sup>2</sup> por lo cual aumenta la complejidad de su moldeamiento y predicción.

Las ecuaciones de la dinámica atmosférica en coordenadas cartesianas al momento de realizar su modelación se pudo comprobar que su turbulencia es elevada y genera inestabilidad en el modelo debido a que los vientos bajo la ley de la conservación del movimiento se descomponen en 3 dimensiones viendo su principal inconveniente en la componente vertical Z , por tal razón se tomo la decisión de modelar en dos dimensiones de lo cual no fue factible su resultado, pero los resultados obtenidos de las ecuaciones en coordenadas isobáricas fueron estables y de buena calidad es así que sistema en coordenadas isobáricas se comprobó que es el indicado para trabajos en modelamiento atmosférico.

## RECOMENDACIONES

En la meteorología siempre habrá algo que se pueda contribuir, es por esto que el modelo de predicción meteorológico para la cuenca del río Pamplonita es necesario hacerlo más robusto para llegar a predecir por medio de un sistema de ecuaciones con mas variables, la precipitación que es la variable principal en los modelos de predicción numérica, pero para esto es necesario trabajar en el conocimiento dinámico de el ciclo del agua, la contaminación atmosférica y la influencia de los seres vivos.

En Colombia no se cuenta con modelos propios de predicción meteorológica por eso debemos comenzar a trabajar en esto desde la academia, como también un sistema de adquisición de datos satelitales que sea fácil y asequible para cualquier persona ya que esto es un paso para generar investigación y ciencia.

Es necesario que los ingenieros, comencemos a profundizar en el modelamiento, las matemáticas, la física, la química, la computación y demás ciencias, ya que los problemas futuros que tendrá la sociedad y el mundo, será indispensable darle solución y la única forma de hacerlo es a partir de la ciencia.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alzate,D, Ramón J. Et Al. 2015 Cambio Climático Y Variabilidad Climática Para El Periodo 1981-2010 En Las Cuencas De Los Ríos Zulia Y Pamplonita, Norte De Santander – Colombia. Revista Luna Azul no.40. SSN 1909-2474. Manizales, Colombia.

Arcimis, A. 1895. La circulación atmosférica. Artículo publicado en el nº 1 (Año XXXIX) de la revista semanal La Ilustración Española y Americana.

Balibrea,F. 2002. Caos y atractores extraños dos problemas no lineales en matemáticas. Departamento de Matemáticas, Universidad de Murcia. La gaceta. España.

Carreño, S. 2013. Aplicaciones en meteorología de modelos funcionales de predicción en componentes principales. Máster en Estadística Aplicada Departamento de Estadística e I.O. Universidad de Granada. Granada, España.

Castro.2005. El Modelado Del Clima Terrestre. Universidad de Castilla-La Mancha Avda. Carlos III, 21. 45071 Toledo-España.

CORPONOR. 2010. Plan De Ordenación Y Manejo De La Cuenca Hidrográfica Del Rio Pamplonita. Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental - CORPONOR-. Cúcuta, Colombia.

Domínguez, E. Lozano, S. 2014. Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 38(148):321-32. Bogotá, Colombia.

Dorado, J. Burbano, J. Et al. 2006. Ajuste de modelos probabilísticos para el estudio de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación: caso de estudio sistema sara-brut. Meteorología Colombiana. N° 10, Pag.60-75. Bogotá, Colombia.

Esri. Citado en Junio de 2017. Introducción a ArcGIS. (En línea). <<http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>>.

García, F. 2012.Meteorología y climatología aspectos generales. Revista Índice tema de portada. Madrid, España.

García, A. 2016. Los modelos numéricos de predicción del tiempo. Servicio de Modelización Numérica del Tiempo. Tethys Revista de Meteorología y Climatología Mediterránea Vol2. Artículo 5. España.

Gaztelumendi, S. 2003. La predicción numérica del tiempo. Euskonews & Media 204. Zbk. San Sebastián España.

Gutierrez, M. Cano, R. Cofiño, A. 2004. Redes probabilísticas y neuronales en las ciencias atmosféricas. Ministerio de medio ambiente de Madrid, series monográficas del instituto Nacional de Meteorología. Madrid, España.

Hodur, R. 1996. The Naval Research Laboratory's Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS). USA.

Ideam. 2008. Protocolo para la emisión de los pronósticos hidrológicos. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Lynch, P. 2008. The origins of computer weather prediction and climate modeling. Journal of Computational Physics. . USA.

Lorenz, E. 1963. Deterministic Nonperiodic Flow. Massachusetts Institute of technology, Journal of the atmospheric sciences, Volume 20. USA.

Madrid, M. 2010. Historia de la teoría del caos contada para escépticos. Departamento de Matemáticas, Instituto Lázaro Cárdenas, Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.

McGuffie, K. Henderson, S. 2005. A Climate Modelling Primer. John Wiley&Sons. pág. 208.

Met Office. Citado en Junio de 2017. Met Office climate prediction model: HadCM3. (En línea). < <http://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadcm3>>.

Michalakes, J. McAtee, M. Wegiel, J. 2002. Software Infrastructure for the Weather Research and Forecast Model, in proceedings of UGC 2002. June. 13pp. Texas, USA.

Lezaun, M. 2003. Predicciones del Tiempo y matemáticas. Bol. Soc. Esp. Mat. Apl. no22. Departamento de Matemática Aplicada, Estadística e I. O. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea.

Lezaun, M. 2006. El clima y el tiempo. Encuentros multidisciplinares, ISSN-e 1139-9325, Vol. 8, Nº 23, (Ejemplar dedicado a: matemáticas interdisciplinares en el siglo XXI), págs. 46-55. País Vasco, España.

MMMD/NCAR. 2001. Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3. USA.

MM5 Community model. MM5 Modeling System Overview. Citado en Junio de 2017. (En línea). < <http://www2.mmm.ucar.edu/mm5/overview.html> >

Montoya, G. 2008. Lecciones de meteorología dinámica y modelamiento atmosférico. Colección de notas. Universidad Nacional de Colombia. ISBN-978-958-701-966-7. Bogotá Colombia.

Murcia, U. 2002. Tema 3. La atmósfera: Estructura, composición química y propiedades físicas. Maestría en Meteorología. España. Mikel Lezaun. 2003. Predicciones del Tiempo y matemáticas. Bol. Soc. Esp. Mat. Apl. no22. Departamento de Matemática Aplicada, Estadística e I. O. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea.

National Weather Service- National Oceanic And Atmospheric Administration (NOAA). Citado en Junio de 2017. (En línea). <<http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/atmos/layers.html>>

Naval Research Laboratory. COAMPAS Version 3 Model Description. California. 2003. NRL Publication: NRL/PU/7500--03-448. Pág. 1-3. California, USA.

Panofsky, H. Dutton, A. 1984. Atmospheric turbulence. Models and methods for engineering applications. Edited by D.L. John Wiley y Sons Inc. USA.

Pelkowski, J. 2000. 50 Años De Predicción Numérica Del Tiempo: Impresiones De Un Simposio Conmemorativo. ISSN-0124-6984. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Plummer, W. Lipa, S. Palmer Et Al. 2007 Directrices sobre la gestión de datos climáticos. WCDMP-Nº 60. Ginebra, Suiza.

Reichler, T. J. Kim, 2008. How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? Bull. Amer. Meteor. Soc., 89, 303-311. USA.

Rodriguez, J. et al. 2016. Predicción de variables meteorológicas por medio de modelos ARIMA. Publicación bimestral Agrocienza, Colpox Vol. 50, Núm. 1. México.

Ruiz, J. F. 2008. Implementación del Modelo WRF en el IDEAM. Nota Técnica IDEAM – METEO/003-2008. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá. D.C., Colombia.

Sánchez, J. MATLAB/Octave. (En línea). < <http://nereida.deioc.ull.es/~pcgull/ihiu01/cdrom/matlab/contenido/matlab.html>. >

Sarría, A. 2006. Sistemas de Información Geográfica Cap 6. Interpolación a partir de puntos e isoclinas. Universidad de Murcia. Murcia España.

Simard, A. 2000. Informe Sobre El Sistema Mundial De Proceso De Datos En La Ar Iv Conferencia 6.3. Tercera Reunión Grupo De Trabajo Sobre Planificación Y ejecución DE LA VMM EN LA REGIÓN IV. AR IV/GT-PEV/Doc. 6.3. (1.III.2000). Republica Dominicana.

Stott, P. Tett, G. Jones, M. Allen, J. Mitchell, G. Jenkins, J. 2000. External Control of 20th Century Temperature by Natural and Anthropogenic Forcings. Science, 290, 2133-2137. USA.

Subias, A. Et Al. 2016. Validación De Un Modelo De Análogos Para La Predicción De Precipitación Y Nieve En La Sierra De Guadarrama. 3 Agencia Estatal de Meteorología. Madrid. C/ Leonardo Prieto Castro, 8. 28040, Madrid. Spain. Madrid, España.

Unesco. 2011. Manual Sistemas de Alertas Tempranas. Ministerio de educación Panamá. Oficina de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Oficina Multipaís San José, Costa Rica.

Uribe, A. 2012. Estimación de la capacidad del modelo WRF para pronosticar eventos extremos asociados con altas precipitaciones en la región Andina Colombiana. Facultad de Ciencias. Trabajo de grado Master en Meteorología. Departamento de Geociencias. Bogotá, Colombia.

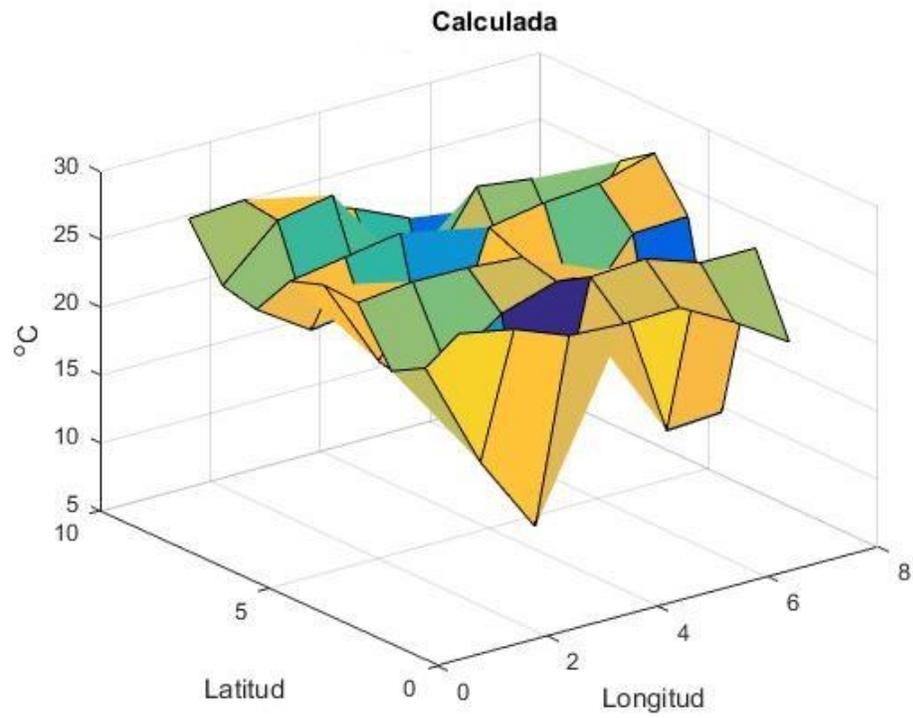
Vogelezang, D. Hloutslag, A. 1996. Evolutions and model impacts of alternative boundary layer height formulations. Boundary Layer Meteorology. USA.

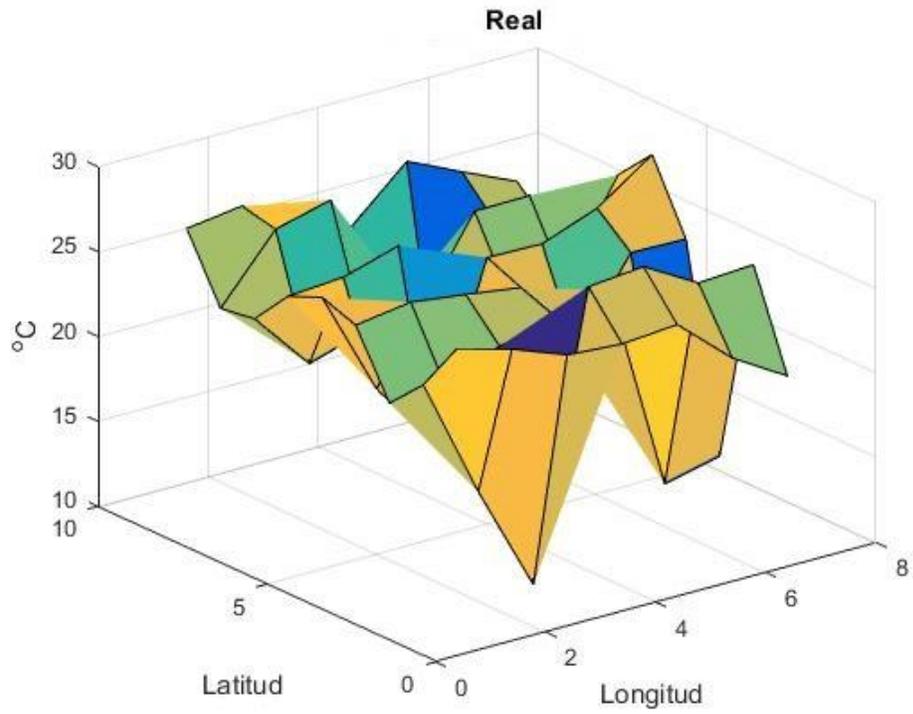
Washington State University-Department of Civil and Environmental Engineering. Citado Junio de 2017. (En línea). < [http://bioearth.wsu.edu/wrf\\_model.html](http://bioearth.wsu.edu/wrf_model.html) >

Zavala, J. 2006. Las Variables Meteorológicas. Meteorología y Clima unidad didáctica. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Pág 12-17. México D.F, México

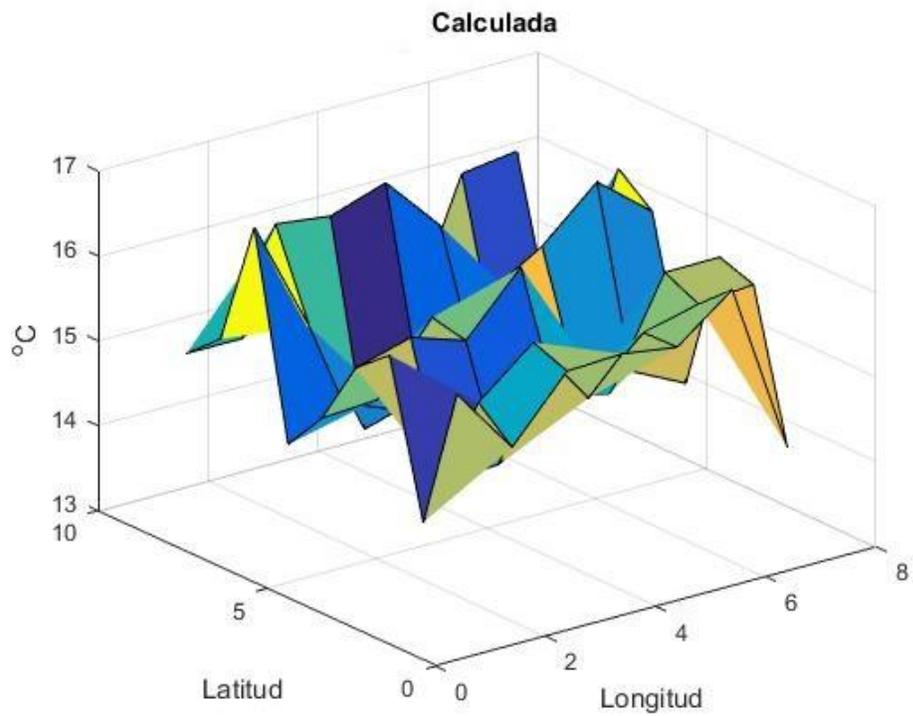
## 7. ANEXOS

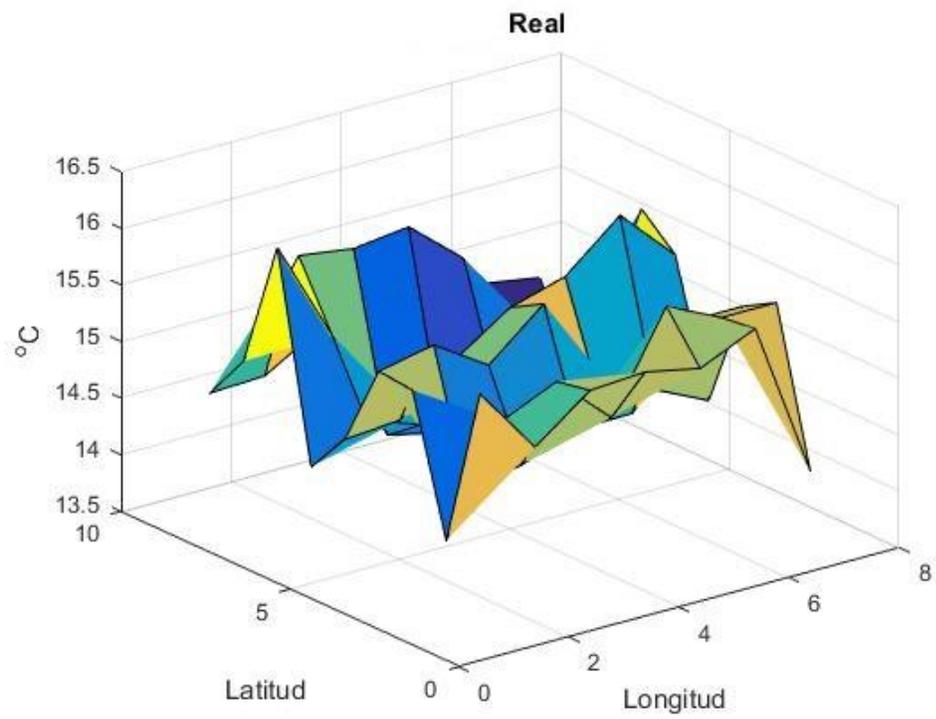
### 7.1.1 Temperaturas a 2 metros predicción a 4 días



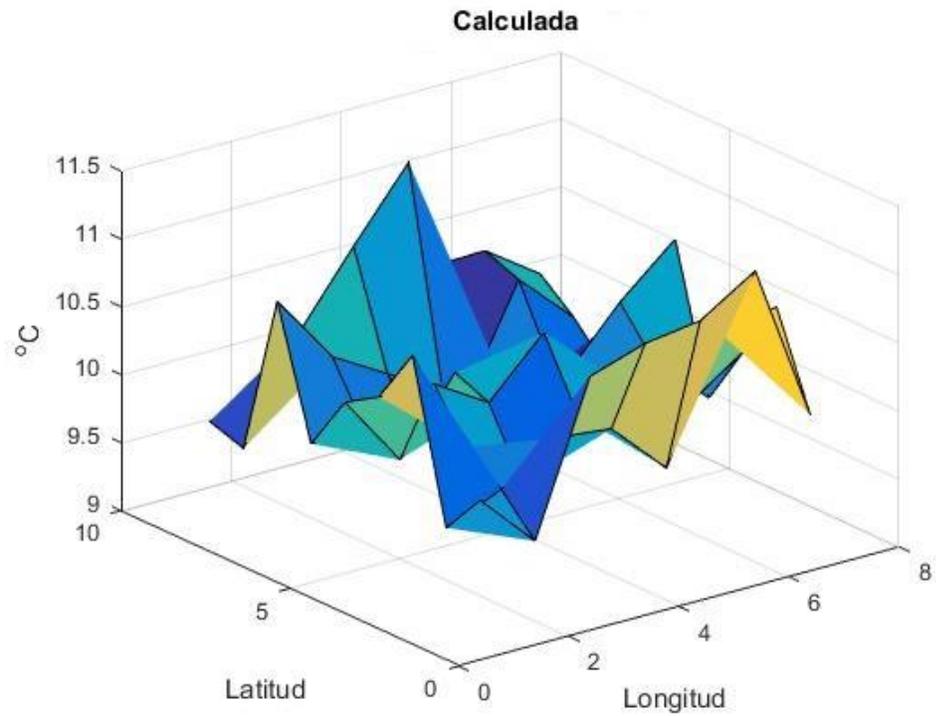


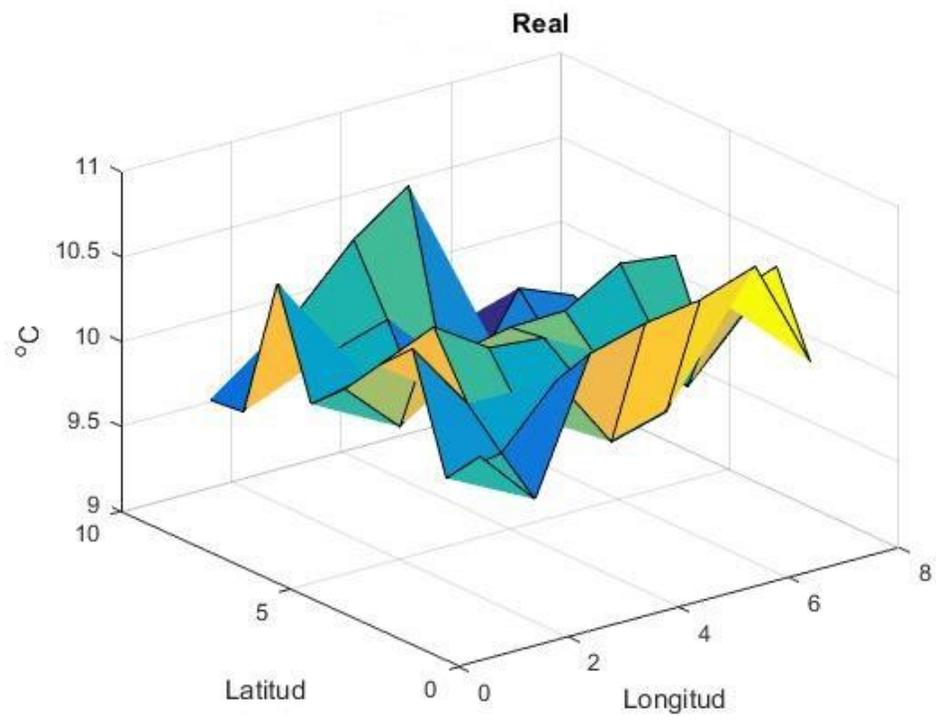
7.1.2 Temperaturas a 1829 metros predicción a 4 días





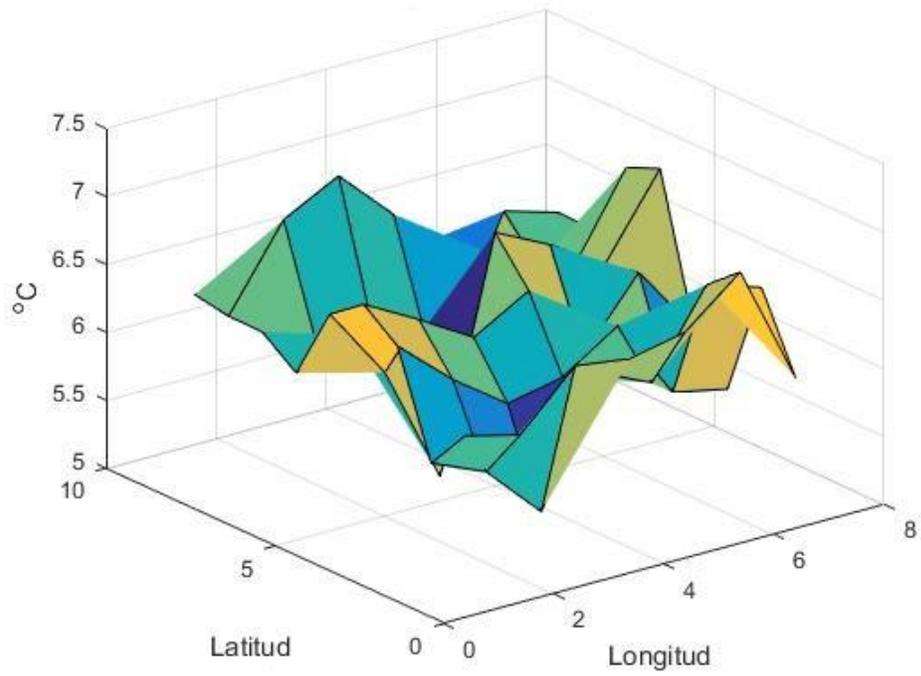
7.1.3 Temperaturas a 2743 metros predicción a 4 días



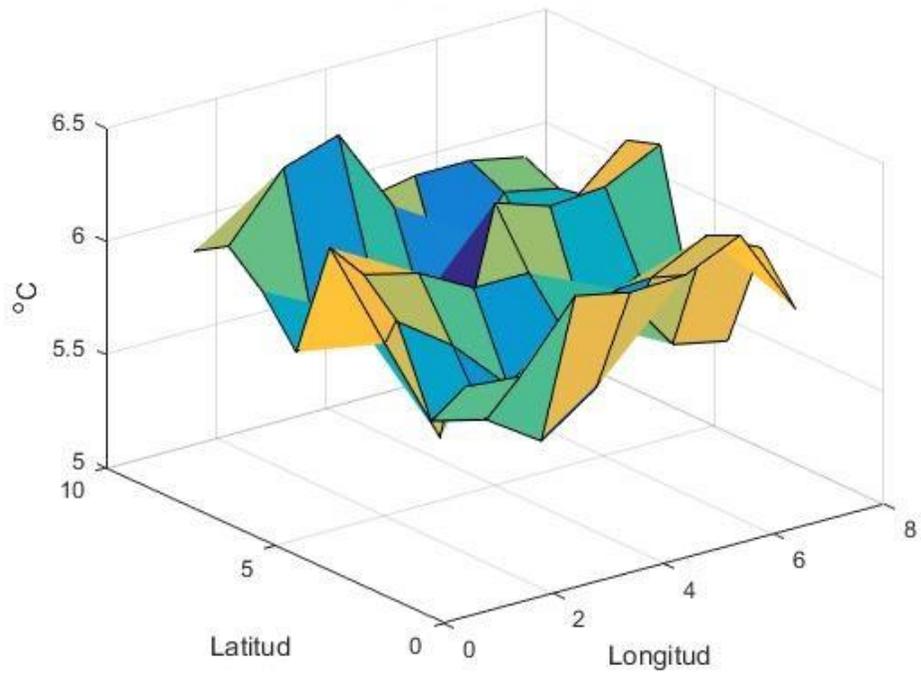


### 7.1.4 Temperaturas a 3658 metros predicción a 4 días

**Calculada**

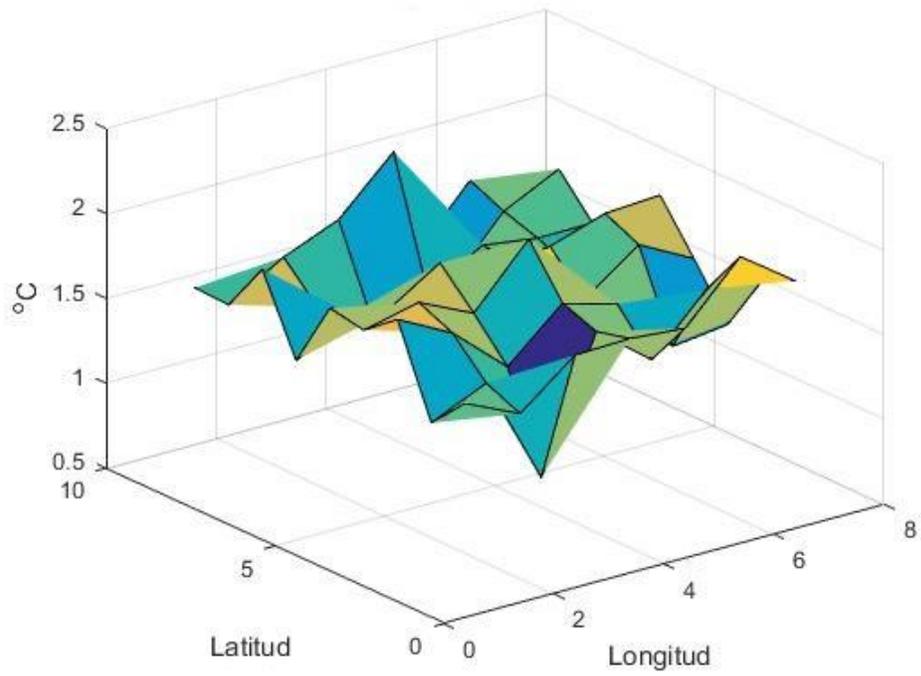


**Real**

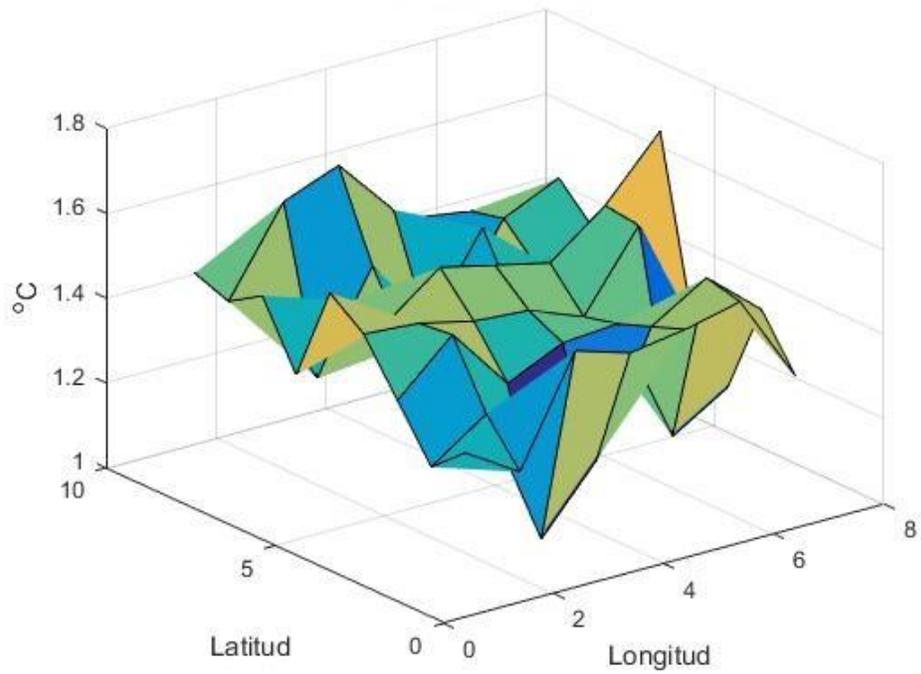


### 7.1.5 Temperaturas a 4572 metros predicción a 4 días

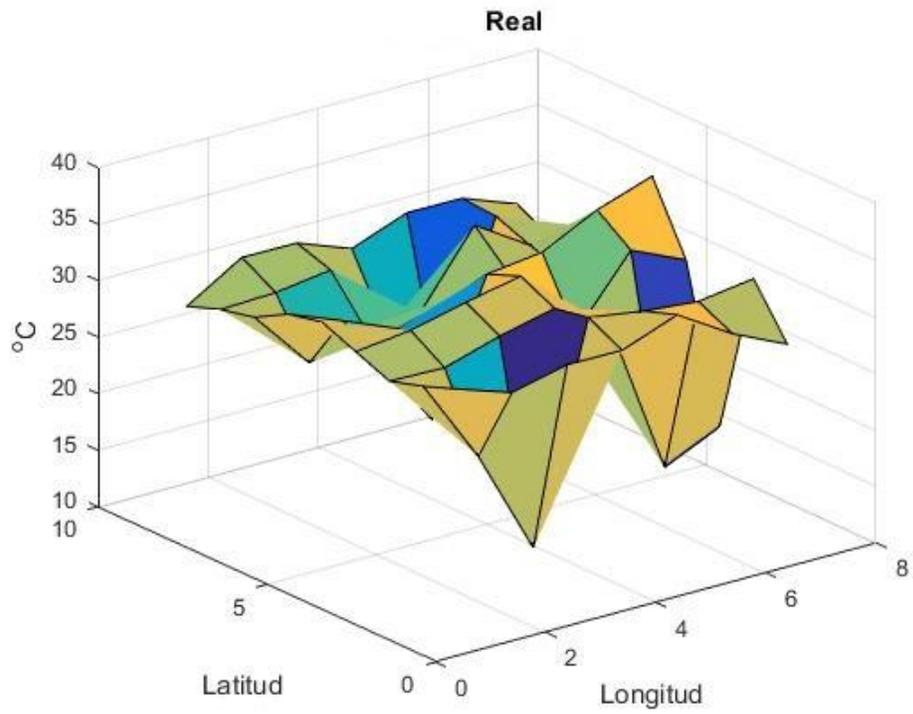
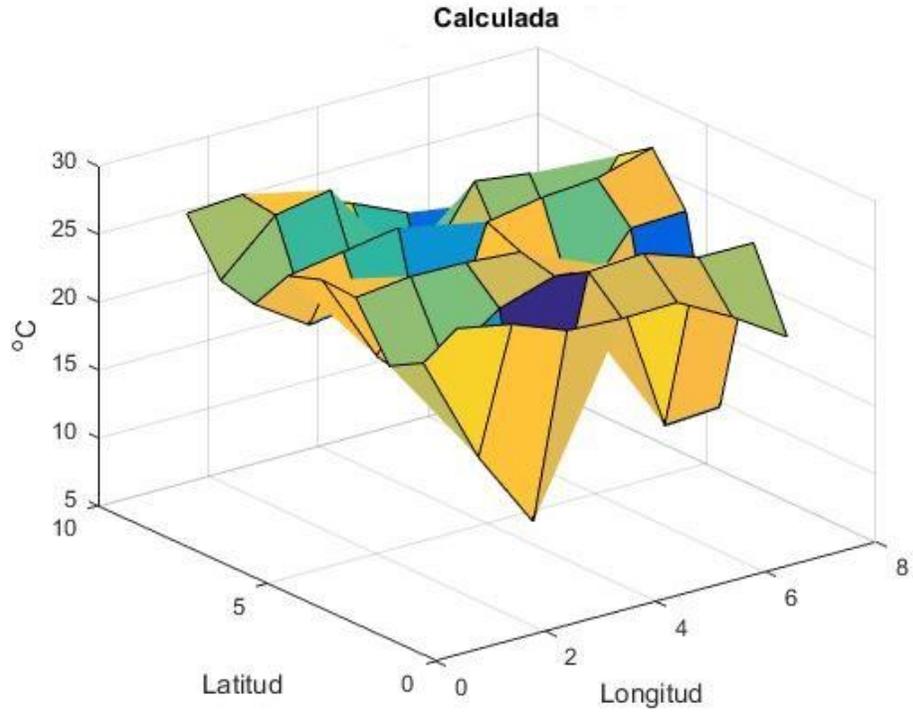
**Calculada**



**Real**

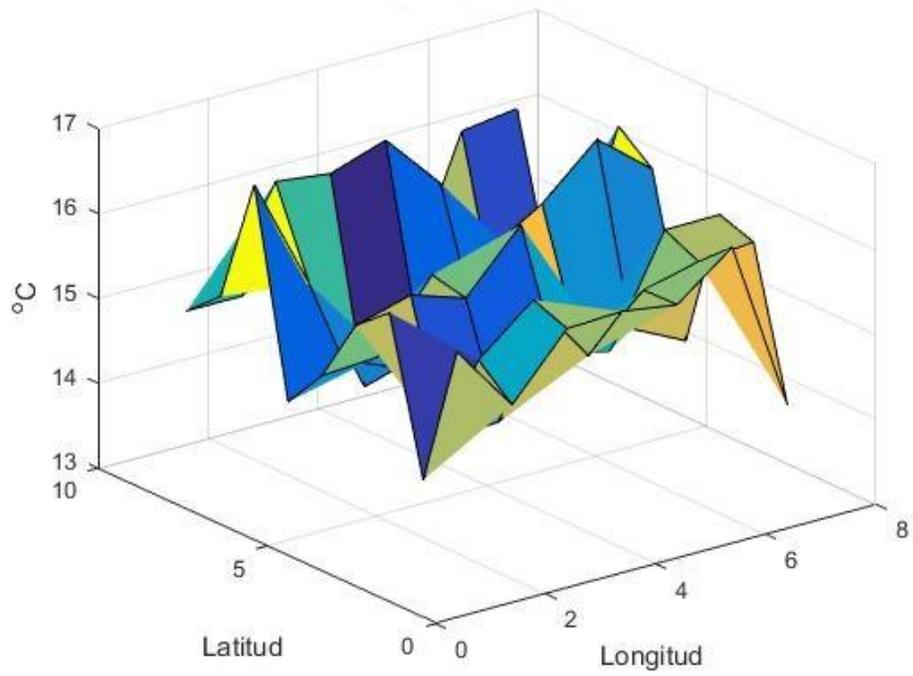


### 7.1.6 Temperaturas a 2 metros predicción a 10 días

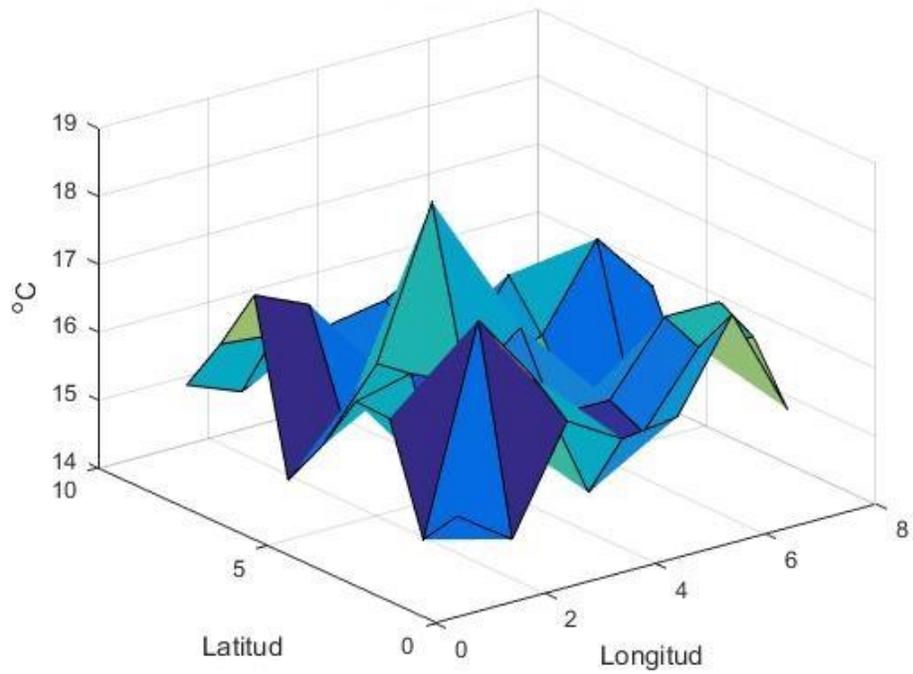


### 7.1.7 Temperaturas a 1829 metros predicción a 10 días

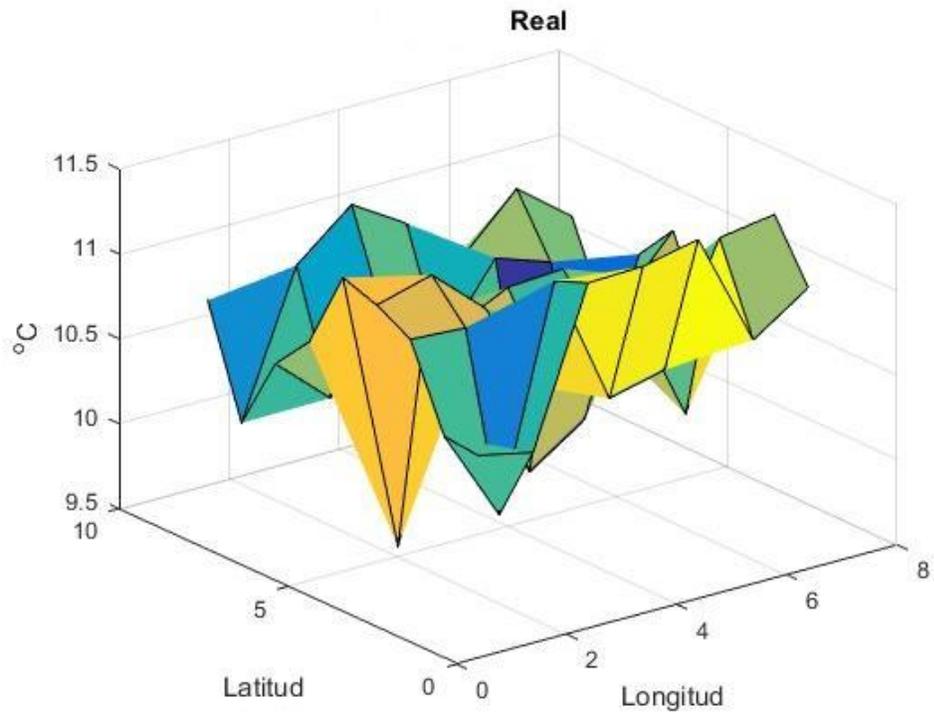
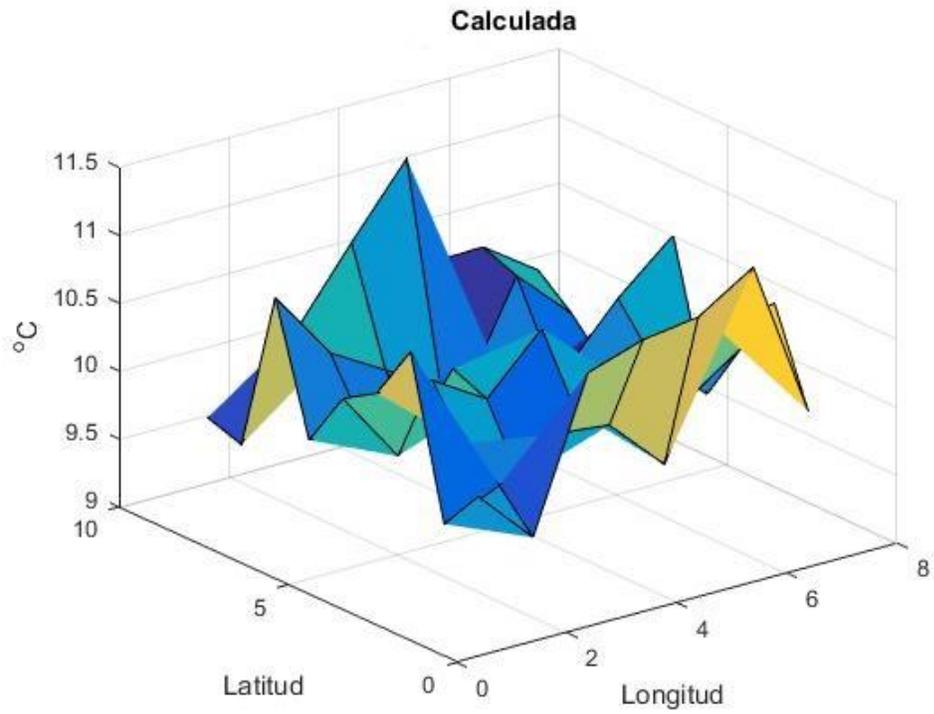
**Calculada**



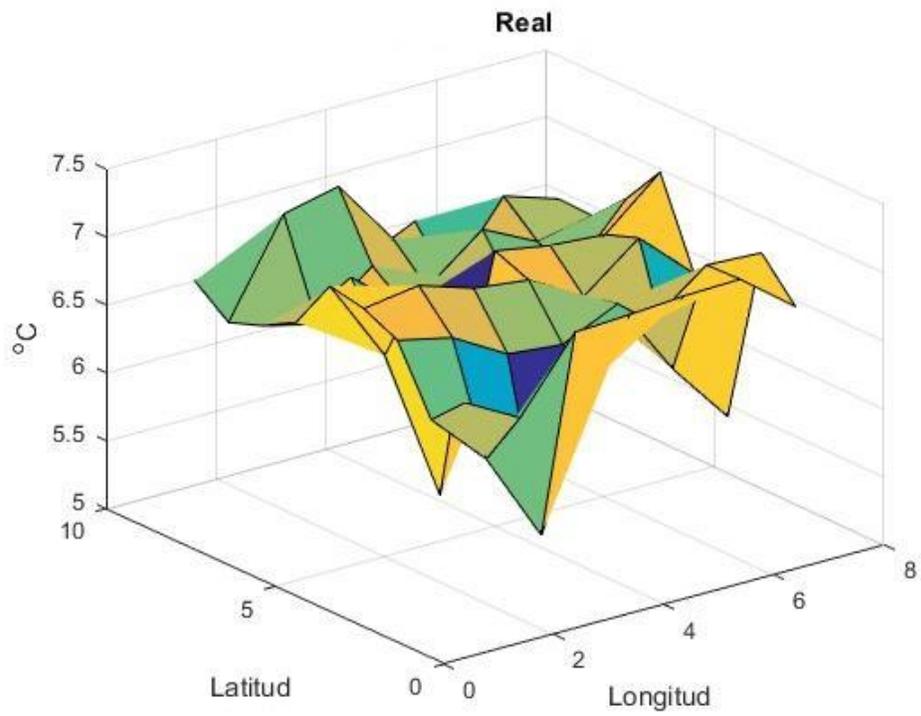
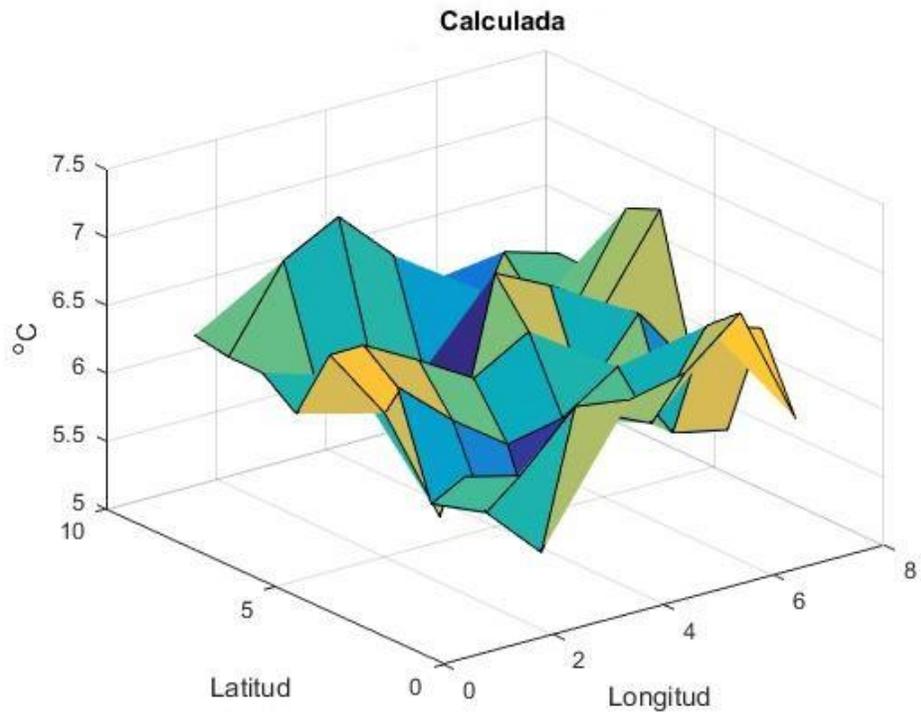
**Real**



### 7.1.8 Temperaturas a 2743 metros predicción a 10 días



### 7.1.9 Temperaturas a 3658 metros predicción a 10 días



### 7.1.10 Temperaturas a 4572 metros predicción a 10 días

