

MODELADO Y SIMULACIÓN de sistemas naturales

Favio Cala Vitery
Editor académico

Autores

Carlos Ricardo Bojacá Aldana
Diana Cristina Díaz Guevara
Favio Cala Vitery
Francisco de Paula Gutiérrez Bonilla
Gabriel Villalobos Camargo
Javier Riascos Ochoa
Juanita Burgos Bedout
Rodrigo Gil Castañeda

MODELADO Y SIMULACIÓN

de sistemas naturales



UTADEO

UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Modelado y simulación de sistemas naturales / Favio Cala Vitery editor académico ; autores Carlos Ricardo Bojaca Aldana ... [et al.]. – Bogotá : Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería. Departamento de Ciencias Básicas, 2017.
222 p. : il., mapas, gráficas ; 24 cm.

ISBN: 978-958-725-202-6

1. MODELOS MATEMÁTICOS. 2. MÉTODOS DE SIMULACIÓN. 3. SIMULACIÓN POR COMPUTADOR. 4. CIENCIAS NATURALES - MÉTODOS DE SIMULACIÓN.

I. Cala Vitery, Favio, ed. ; Bojacá Aldana, Carlos Ricardo.

CDD511.8

© Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Carrera 4 No 22-61 –PBX: 2427030 –www.utadeo.edu.co

Modelado y simulación de sistemas naturales

ISBN: 978-958-725-202-6

Primera edición: 2017

Rectora: Cecilia María Vélez White

Vicerrectora Académica: Margarita María Peña Borrero

Decano de la facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería: Isaac Dyner Rezonzew

Director de Investigación, Creación y Extensión: Leonardo Pineda Serna

Director del Departamento de Ciencias Básicas: Favio Ernesto Cala Vitery

Jefe de Publicaciones: Daniel Mauricio Blanco Betancourt

Coordinador editorial: Jaime Melo Castiblanco

Corrección de estilo: Hernando García Bustos

Coordinación gráfica y diseño: Luis Carlos Celis Calderón

Diseño y diagramación: Francisco Jiménez Montero

Diseño carátula: Claudia Rodríguez

Revisión editorial: Mary Lidia Molina

Impresión Digital: Xpress Estudio Gráfico y Digital

El presente libro es resultado investigación.

Hace parte de la línea de investigación Modelado y simulación de sistemas,
del Departamento de Ciencias Básicas de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin
autorización escrita de la Universidad.

IMPRESO EN COLOMBIA - PRINTED IN COLOMBIA

MODELADO Y SIMULACIÓN de sistemas naturales

Favio Cala Vitery
Editor académico

Autores

Carlos Ricardo Bojacá Aldana
Diana Cristina Díaz Guevara
Favio Cala Vitery
Francisco de Paula Gutiérrez Bonilla
Gabriel Villalobos Camargo
Javier Riascos Ochoa
Juanita Burgos Bedout
Rodrigo Gil Castañeda



UTADEO

UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Contenido

Prefacio	7
1. Modelado y simulación de sistemas climáticos: desde la escala global hasta los microclimas	11
Diana Cristina Díaz Guevara	
2. Modelos espaciales en cultivos	41
Rodrigo Gil Castañeda y Carlos Ricardo Bojacá Aldana	
3. Modelado del crecimiento de cultivos: experiencias locales para el tomate bajo invernadero	73
Carlos Ricardo Bojacá Aldana y Rodrigo Gil Castañeda	
4. Aspectos merísticos, biométricos y tróficos como indicadores del establecimiento poblacional de <i>Oreochromis niloticus</i>, L. 1758 (<i>Pisces: Cichlidae</i>) en la cuenca hidrográfica del río Sinú, Colombia	101
Francisco de Paula Gutiérrez Bonilla y Juanita Burgos Bedout	
5. Modelos estocásticos en dinámica de poblaciones: introducción y comparación con los modelos determinísticos	137
Javier Riascos Ochoa	
6. Introducción a los modelos mesoscópicos: los modelos estadísticos de fractura y los métodos de agregación en materia suave	165
Gabriel Villalobos Camargo	
7. El modelo de Bohm de la mecánica cuántica	199
Favio Cala Vitery	

Prefacio

El modelado y simulación (M&S) es una disciplina científica transversal que permite obtener un nivel de comprensión difícilmente alcanzable utilizando otro enfoque disciplinar. Al integrar técnicas matemáticas, formales, conceptuales y computacionales, el M&S permite el estudio e investigación en casi cualquier campo del conocimiento. Este libro compendia algunos trabajos y resultados de investigación especialmente orientados hacia el estudio de sistemas naturales. Estos han sido realizados por el grupo de investigación de Modelado y Simulación de Sistemas, de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Un modelo puede entenderse como una representación, bien sea abstracta, análoga, fenomenológica o idealizada, de un objeto o sistema. Mediante el modelado se busca mejorar el conocimiento y la comprensión de un fenómeno o proceso y ello involucra el estudio de la interacción entre las partes de un sistema y el sistema como un todo. La simulación, por su parte, debe permitir la operación o manipulación matemática y/o computacional del modelo con el fin de representar la sucesión temporal de su comportamiento. El M&S ha revolucionado la ciencia ya que los modelos no son propiamente teorías científicas y las simulaciones no son tampoco propiamente experimentos científicos; pero permiten pulir, calibrar o mejorar las teorías y, si se quiere, mejorar el diseño de experimentos y en muchos casos anticipar los resultados de estos.

Las teorías, en general, están integradas por dos grandes elementos conceptuales no del todo separables: a) un formalismo, es decir,

un aparato matemático con unas reglas operativas para calcular, y b) una interpretación, es decir, una ontología que cuenta, en correspondencia con el formalismo, cuál es la imagen de los fenómenos, de los procesos y del mundo que la teoría pretende describir o explicar conforme al registro experimental. El modelado permite, al nivel de la teoría, acercar el formalismo científico a su interpretación con el fin de lograr una mejor comprensión, explicación y descripción de los sistemas estudiados. La simulación (por computador), con ciertas restricciones, permite representar la evolución del sistema modelado, y en este sentido se ha convertido en una especie de enlace con la experiencia; de experimentación en un laboratorio artificial.

Ejemplos de lo anterior se presentan en los capítulos de este libro. En el primero, se describe el proceso general para modelar sistemas climáticos y se refieren las características de algunos modelos atmosféricos, oceánicos y de microclima. Al final del capítulo se presenta también un ejemplo de modelado y predicción climática usando técnicas estadísticas. En el segundo capítulo se integran dos tipos de modelos aparentemente no relacionados, la geoestadística y el modelado de cultivos, para llevar a cabo un ejercicio de simulación que permite cuantificar el efecto de la variación espacial de la temperatura dentro de invernaderos en el crecimiento de cultivos de tomate. El capítulo tercero recopila los resultados de investigaciones propias en las que se ha utilizado un modelo de simulación del tomate cultivado bajo condiciones de invernadero y calibrado para las condiciones locales con el fin de evaluar diferentes alternativas de climatización en la Sabana de Bogotá. De igual manera se presenta el impacto ambiental que ocasionarían dichas alternativas técnicas en caso de llegar a establecerse en la realidad. En el cuarto, se utilizaron técnicas de modelado matemático con el fin de determinar cuáles de las variables morfológicas, tróficas y reproductivas propias de *O. niloticus* (tilapia) –especie alóctona, procedente de África, e introducida en Colombia con fines de piscicultura comercial en 1977– son las que mayor peso tienen en el comportamiento de la especie, su establecimiento poblacional en la cuenca del río Sinú y las consecuencias biológicas de este. El quinto capítulo introduce al lector en la teoría de los procesos estocásticos,

con énfasis en los procesos conocidos como Cadenas de Markov de Tiempo Continuo (CMTC) e ilustra su aplicación a problemas de dinámica de poblaciones. Allí se muestra que el formalismo por CMTC permite modelar la naturaleza discreta de las variables de estado, es decir, del número de individuos, y la aleatoriedad inherente al fenómeno. En el sexto capítulo se presentan modelos que buscan establecer relaciones cuantitativas entre parámetros a escala nanoscópica y escala mesoscópica mediante el uso de elementos discretos individuales; contrastándolos con métodos como el de los elementos finitos, que usualmente toman promedios macroscópicos de los materiales. Para ello se resaltan las similitudes entre dos aplicaciones específicas: los métodos de agregación para materia suave y los modelos estadísticos de fractura. Estos modelos se han utilizado en campos tan diversos como los medios granulares, el fluido de los líquidos complejos, y la aparición y propagación de fracturas. Finalmente, en el último capítulo se contrastan dos versiones, o modelos, de la mecánica cuántica: el modelo estándar Copenhague, incluido en prácticamente todos los libros de texto, y el modelo de Bohm. Allí se argumenta que el modelo de Bohm, al implicar una representación inteligible del micromundo cuántico, debería considerarse como aquel que permite una ontología, una interpretación, más adecuada de los fenómenos cuánticos no relativistas.

1 ● **Modelado y simulación de sistemas climáticos: desde la escala global hasta los microclimas**

Diana Cristina Díaz Guevara

1.1 Introducción

La obra *Meteorológica*, de Aristóteles, así como *Les meteoros* de Descartes, los escritos de Lavoisier, los experimentos de Benjamín Franklin y más recientemente los estudios de Edward Lorenz son algunas de las evidencias que muestran la pretensión del hombre por comprender el clima y el estado del tiempo. Desde la antigüedad el ser humano ha planteado hipótesis para explicar la dinámica atmosférica debido al papel determinante que tiene para la continuidad de la vida en el planeta. La observación constante y el registro de datos meteorológicos fueron el punto de partida para erigir el conocimiento empírico sobre el comportamiento de la atmósfera que hoy día continúa siendo difundido. Sin embargo, con el avance de la Teoría General de Sistemas (TGS), ciencias como la climatología y la meteorología han adoptado el enfoque sistémico para abordar sus objetos de estudio, que van desde el clima y el tiempo del planeta Tierra hasta el microclima en un invernadero (Pasini, 2009).

En particular, el modelado y simulación del sistema climático de la Tierra es un problema de interés actual, dada la necesidad de predecir su posible comportamiento en las décadas siguientes. Teniendo en cuenta la TGS el sistema climático de la Tierra se define como el

conjunto conformado por cinco componentes principales: la atmósfera, la hidrosfera, la criósfera, la superficie terrestre y la biósfera, los cuales interactúan entre sí a través de procesos físicos, químicos, biológicos y geológicos (IPCC, 2001). El vocabulario aportado por la TGS facilitó e incentivó la formulación de modelos matemáticos para representar y simular la dinámica del clima terrestre considerándolo como un sistema en el cual las relaciones existentes entre todas sus partes se basan en el intercambio de momentum, masa y energía (McGuffie, 2005).

En la actualidad existe gran variedad de modelos del sistema climático de la Tierra, desde lo más sencillos que se centran en el comportamiento de la atmósfera y el océano considerándolos como fluidos ideales, hasta los más complejos que demandan mayor capacidad de cómputo porque incorporan procesos como la turbulencia, la interacción Tierra-atmósfera en la capa límite planetaria, la formación de las capas de hielo, la microfísica de nubes, el uso del suelo, y el ciclo del carbono, entre otros. Los modelos pueden utilizarse para la predicción climática y meteorológica y abarcan desde la escala planetaria hasta la microescala (OMM, 2008; 2011).

Por otra parte, los sistemas climáticos de menor dimensión espacial que son objeto de modelado son aquellos que ocupan un área local caracterizada porque su clima difiere del medio que lo rodea. Las islas de calor que se crean en las ciudades, una vivienda o los invernaderos utilizados para la producción de cultivos son ejemplos canónicos de este tipo de sistemas. Independientemente de la escala espacio-temporal, los modelos dinámicos de sistemas climáticos comparten en general la misma estructura básica; las variables por considerar son las mismas y al igual que cualquier sistema natural, se rigen por los mismos principios físicos de conservación de la masa, la energía y el momentum. En este capítulo se describe en forma sucinta el proceso general para modelar sistemas climáticos. A manera de ejemplo, se mencionan las características de algunos modelos matemáticos determinísticos utilizados para hacer simulaciones computacionales de la atmósfera, el océano o un microclima, y también de modelos matemáticos probabilísticos cuyo objetivo es predecir con cierto grado de confiabilidad las relaciones entre las variables de un sistema climático.

1.2 Modelado de sistemas climáticos

El modelo tiene como objetivo describir el comportamiento temporal y/o espacial de las variables de estado de los elementos que conforman el sistema que se desea representar. El proceso general sugerido para modelar y simular un Sistema Climático (SC) se presenta en la figura 1.

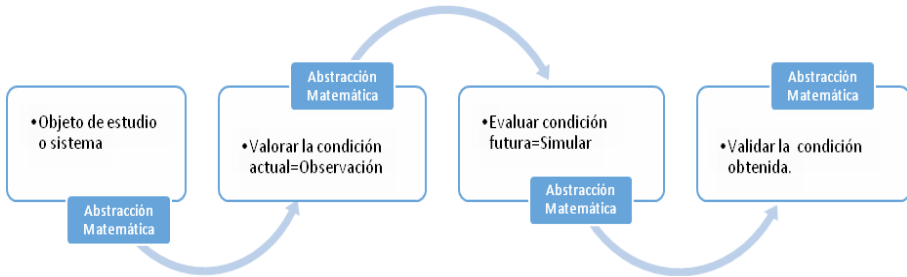


Figura 1. Proceso general para modelar un sistema climático. Los dos primeros cuadros corresponden a la modelación, la cual se representa con funciones matemáticas; el tercer cuadro se refiere a la simulación, y el cuarto a la contrastación teórica o experimental que reporta la literatura.

El objeto de estudio puede ser la atmósfera, el océano o el microclima de un invernadero. El punto de partida para la abstracción matemática son los procesos físicos relacionados con la transferencia de momentum, energía y masa. Estos intercambios suceden entre las partes del sistema y de ellos con el medio externo (McGuffie, 2005; Pasini, 2009).

Valorar la condición actual significa reunir la información disponible de las variables asociadas al sistema, como lo son la radiación solar, temperatura, presión, viento, humedad y precipitación, radiación ultravioleta, dirección de los vientos, pluviometría. El ejercicio se realiza mediante la observación y la medición con estaciones meteorológicas; pueden incluirse tantas variables como el investigador considere apropiado o como la capacidad de cómputo y la disponibilidad de datos lo permitan (Stocker, 2011). Estos registros son la primera aproximación al SC; con ellos se conocen los rangos entre los cuales oscilan

las variables y se identifican los parámetros, condiciones iniciales y de frontera que serán necesarios para plantear el modelo.

Posteriormente se plantea el conjunto de ecuaciones que permiten describir la evolución del sistema en el tiempo y/o en el espacio. Las expresiones matemáticas pueden ser funciones integrables y logarítmicas, de probabilidad, o ecuaciones diferenciales (Pasini, 2009). En esta etapa también se estudia el método para resolver las ecuaciones, que puede ser analítico, estadístico o numérico, y dependiendo del caso se eligen además las coordenadas y el tipo de grilla por utilizar.

En la siguiente etapa el objetivo es evaluar la condición futura y es cuando inicia el proceso de simulación del comportamiento del sistema. Los resultados obtenidos se someten luego a un proceso de validación que al ser superado convierten el modelo en una representación confiable para simular la evolución del sistema y así pronosticar su estado en un tiempo dado (Laurence, 1988; McGuffie, 2005). Al concluir el proceso general para modelar y simular un sistema climático el resultado será un modelo cuya estructura básica pueda resumirse como lo indica la figura 2.

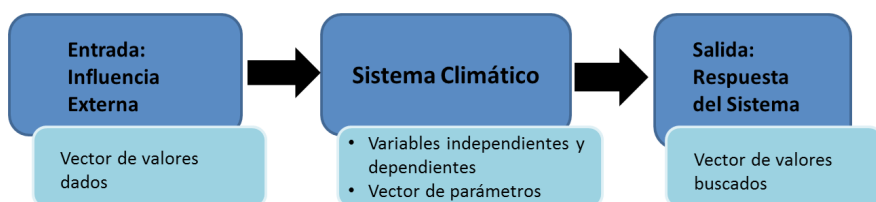


Figura 2. Estructura básica de un modelo para simular la dinámica de un sistema climático.

En las siguientes secciones se exponen diferentes tipos de modelos que han sido planteados de acuerdo con el proceso y estructura de las figuras 1 y 2. Para empezar, se presenta una descripción de los modelos del sistema climático terrestre indicando cuáles son las características generales, las aproximaciones utilizadas, las ecuaciones,

entradas, salidas y métodos numéricos que utilizan. Se completa la sección con ejemplos de modelos atmosféricos y oceánicos. Posteriormente se muestra un modelo que simula un microclima para observar que el procedimiento continúa siendo similar, y finalmente se relata otro tipo de modelado utilizado en climatología que se fundamenta en técnicas estadísticas de correlación.

1.2.1 Modelos del Sistema Climático Terrestre

Los Modelos del Sistema Climático Terrestre (MSCT) tienen como objetivo pronosticar el tiempo, predecir el clima o generar escenarios de cambio climático. El objeto de estudio es el sistema conformado por la atmósfera, los océanos, la superficie de la Tierra, los seres vivos y el hielo marino (Stocker, 2011).

Los MSCT contemplan una escala espacial tan grande como las mismas dimensiones del globo terráqueo y deben, por ello, ser capaces de simular fenómenos como los mostrados en la figura 3, pertenecientes a la escala espacial planetaria y a la de predicción para un período amplio. Otros MSCT se especializan en representar los fenómenos que están entre la gran escala, la mesoescala y la topoescala. En la gran escala se encuentran, por ejemplo, las fluctuaciones en la circulación asociadas a grandes sistemas de baja presión, con longitudes de onda de miles de kilómetros y períodos de días (figura 3). En la mesoescala se ubican, por ejemplo, sistemas convectivos del orden de kilómetros o cientos de kilómetros y con duraciones de horas a días; también se hallan las oscilaciones locales en la circulación producto de la interacción entre calentamientos diferenciales provocados por el ciclo diurno y cambios en la topografía de la superficie. En la figura 3 se presentan más ejemplos de algunos de los fenómenos físicos que los MSCT ayudan a analizar en las diferentes escalas espacial y temporal. Los nombres y límites de cada escala varían según el autor, en este caso se muestran en la figura 3 las escalas más difundidas, que son las de Orlanski (1975) y de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2008, 2011).

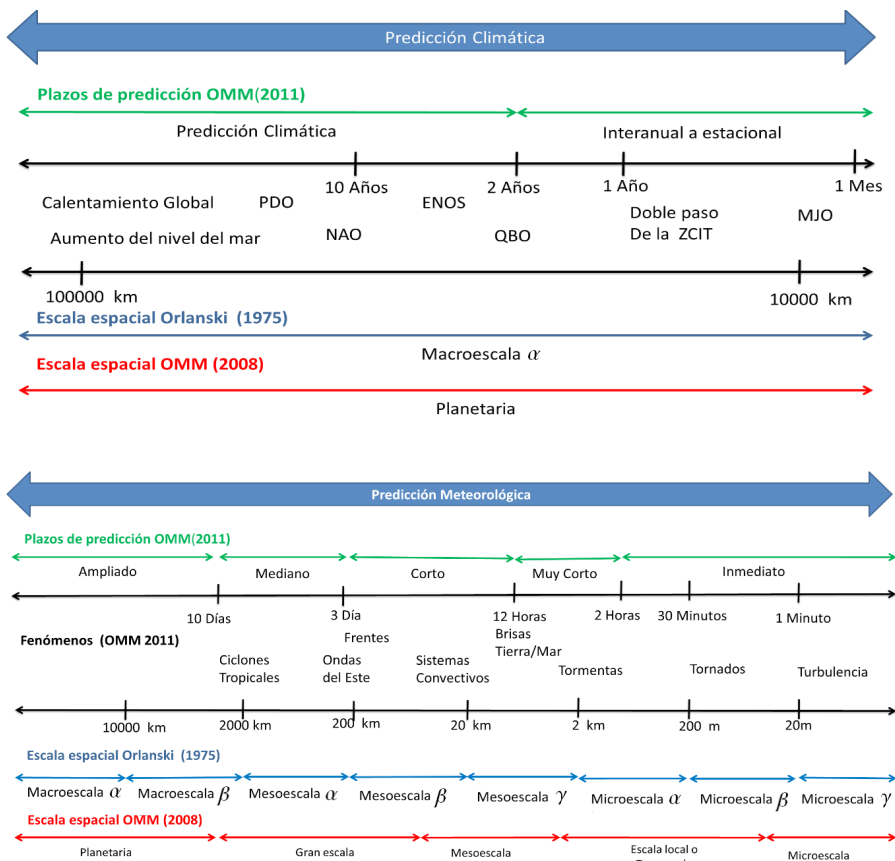


Figura 3. Escalas de predicción climática (arriba) y meteorológica (abajo) a las cuales pertenecen algunos fenómenos de relevancia para Colombia.

Fuente: Diagrama elaborado con base en la información de los documentos OMM (2008, 2011). PDO: Pacific Decadal Oscillation, NAO: North Atlantic Oscillation, ENOS: El Niño Oscilación Sur, QBO: Quasi-biennial oscillation, ZCIT: Zona de Convergencia Intertropical, MJO: Madden-Julian Oscillation.

Los MSCT consideran la Tierra como una esfera en rotación rodeada por una capa de agua que representa el océano, o por un fluido compuesto de gases y agua en sus tres fases que representa la atmósfera. Estos fluidos están bajo la influencia del campo gravitacional de la Tierra y sus movimientos se describen mediante la ecuación de estado de los gases, la ecuación hidrostática y las ecuaciones primitivas que son las que representan los principios de conservación del momentum, la energía y la masa. En coordenadas rectangulares las ecuaciones primitivas son:

Conservación del momentum:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho \vec{f}_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho \vec{f}_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho \vec{f}_z \quad (3)$$

El primer término corresponde a la derivada temporal del flujo; ρu ; u , v , w son las componentes del vector velocidad $\vec{V}$ y ρ es la densidad del fluido. El segundo término representa la advección, el tercero el gradiente de presión p ; los tres siguientes corresponden a la difusión, con τ_{ij} el tensor de esfuerzo superficial y el último término a otras fuerzas presentes según la dirección, como, por ejemplo, la gravedad y la fuerza aparente de Coriolis. Este conjunto de ecuaciones, más conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes, describen el movimiento de cualquier fluido newtoniano en un punto y un tiempo específico, en este caso el de la atmósfera. Estas ecuaciones describen el flujo sobre la esfera asumiendo que el movimiento vertical es mucho menor que el horizontal y que el espesor de la capa o fluido es pequeño en comparación con el radio de la esfera.

Conservación de la energía:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \vec{V} \right] = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \\ \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \\ \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \end{aligned} \quad (4)$$

Donde e es la energía interna por unidad de masa para el fluido y $\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right)$ es la energía total por unidad de volumen. La forma de la ecuación es similar a la del momentum, aunque en este caso describe una cantidad escalar. La ecuación relaciona los gradientes de temperatura global con la existencia de fuentes o sumideros de energía $\dot{q}$.

Conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (5)$$

Es la ecuación de continuidad en representación de la conservación de la masa. Dependiendo del sistema de coordenadas verticales, las ecuaciones primitivas pueden variar su forma. Además las componentes de la velocidad, la temperatura y variables geopotenciales suelen expresarse como su valor promedio más una perturbación, siguiendo el método de descomposición de Reynolds (Pasini, 2009).

Los MSCT comprenden, además de las ecuaciones mencionadas, esquemas de parametrización de los procesos físicos que no pueden ser resueltos de manera explícita en la misma escala que se utiliza en los modelos, por ejemplo, que ocurren en la capa límite planetaria como radiación, turbulencia, y flujos de calor latente. Aunque estos procesos no están contemplados dentro del compendio de ecuaciones base, los esquemas de parametrización permiten incluirlos ya que se vuelven relevantes en escalas espacialmente por debajo de las decenas de kilómetros.

Los MSCT planteados en coordenadas rectangulares acuden a técnicas de elementos finitos. Por el contrario, los que usan coordenadas esféricas optan por técnicas espectrales que consisten en la proposición de un número finito de armónicos esféricos como solución de las ecuaciones. Los MSCT que se resuelven por métodos numéricos utilizan una malla de 4 dimensiones, tres espaciales y una temporal. Por otra parte, para resolver el conjunto de ecuaciones no lineales se requiere efectuar aproximaciones para simplificar la solución y evitar inestabilidades numéricas; la más común es considerar la atmósfera en equilibrio hidrostático, es decir, que las fuerzas del gradiente vertical de presión y la gravedad están en equilibrio y, por tanto, no hay aceleración vertical neta.

Los MSCT se pueden clasificar en modelos globales o de circulación general, modelos regionales y modelos de mesoescala. Los globales en general utilizan coordenadas esféricas y el número de modos esféricos considerados determina la resolución horizontal y vertical. Los regionales son MSCT que simulan las condiciones atmosféricas de zonas geográficas limitadas y requieren, por tanto, condiciones iniciales y de contorno bien definidas en las fronteras del dominio. Finalmente, los mesoescalares son aquellos de mayor resolución especializados en simular fenómenos de escala local como tormentas; suelen utilizar coordenadas rectangulares y como representan procesos que ocurren en escalas menores de 10 kilómetros no utilizan la aproximación hidrostática por carecer de validez en esas dimensiones.

Los MSCT más complejos son aquellos que acoplan varios modelos, donde cada uno representa una de las partes del sistema; por ejemplo, la atmósfera, el océano y la litosfera. Estos modelos son los más completos y con mayor requerimiento de máquina, razón por la cual son compilados en supercomputadores. Esto no significa que no sea posible hacer modelado y simulación del sistema climático terrestre en un computador estándar; por el contrario, cualquier investigador en esta área puede implementar modelos atmosféricos u oceánicos en su computador personal y analizar cuáles son las aproximaciones y esquemas de parametrización de los procesos físicos que mejor representarían el clima en su región de estudio. Los resultados obtenidos se convierten

así en insumos para la optimización de los modelos acoplados y globales. La ventaja actual es que muchos MSCT están disponibles en internet y, por ser de código abierto, la comunidad científica está llamada a hacer uso de estos modelos, mejorar su configuración y publicar sus resultados. A continuación se mencionan algunos de los modelos de acceso libre para realizar simulaciones del tiempo y el clima en nuestras latitudes.

1.2.2 Modelos atmosféricos

En la categoría de modelos atmosféricos se encuentran todos los modelos que representan procesos físicos que tienen lugar en la atmósfera. Pertenecen a este grupo desde los modelos de calidad del aire, hasta los exclusivamente climáticos. Algunos modelos atmosféricos globales que se han utilizado en Colombia para hacer estudios y pronóstico del clima son el Global Forecast System (GFS) desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), el ECHAM del Instituto Max Planck de Meteorología, el Community Climate Model (CCM3) del National Center of Atmospheric Research, entre otros. En cuanto a modelos atmosféricos regionales, se han implementado el Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) desarrollado por la Universidad de Colorado, el Providing Regional Climates for Impacts Studies (PRECIS) de la Met Office Hadley Centre de Reino Unido y el Weather Research and Forecasting Model (WRF) del National Centers for Environmental Prediction. Este último es el modelo que utiliza el Instituto de Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) para realizar el pronóstico del estado del tiempo. En la figura 4 se presenta, por ejemplo, la predicción de lluvia para el 31 de octubre de 2014. Hasta el momento los resultados obtenidos son satisfactorios pero se requieren más estudios que conduzcan hacia una mejor parametrización de los procesos atmosféricos que ocurren en la región. El WRF es una opción viable para trabajar en el campo del modelado y la simulación del clima y el tiempo en Colombia, por esta razón se presentan a continuación las características principales del WRF.

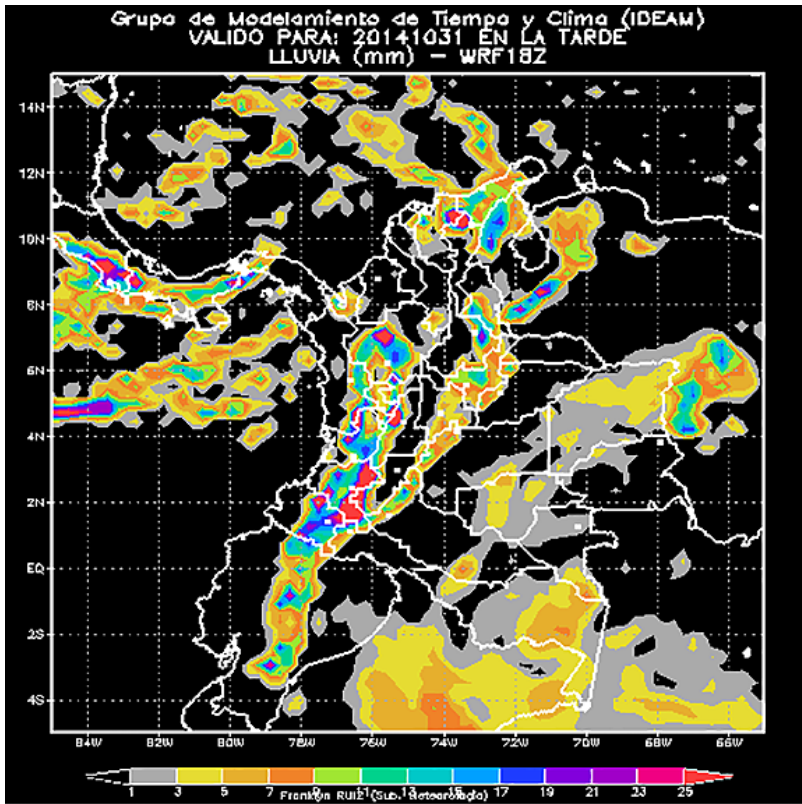


Figura 4. Pronóstico de lluvia para el 31 de octubre de 2014 realizado con el WRF. Los tonos indican la cantidad de lluvia en milímetros, en este caso la escala de color inicia en 1 mm (gris) hasta 25 mm (rojo).

Fuente: IDEAM. <http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/wrf/semanal18/h07.html>.

Ejemplo: WRF

El WRF es un modelo de mesoescala cuyo objeto de estudio es la atmósfera, la cual se considera un fluido compresible no viscoso. Las variables meteorológicas de entrada que requiere WRF son las componentes de velocidad del viento, la temperatura, humedad relativa y la altura geopotencial en los niveles de presión: 1000, 850, 500, 400, 300, 250, 200, 150, y 100 mb. También necesita información sobre la topografía, humedad, temperatura y uso del suelo. Puede incluir opcionalmente la temperatura superficial del mar, el espesor de la nieve, las categorías

de uso del suelo, entre muchas otras variables, pero esto depende de la disponibilidad de los datos y el propósito de la simulación.

Las condiciones iniciales y de frontera son tomadas del Climate Forecast System Reanalysis 2 con una resolución espacial horizontal de $0,5^\circ$ en 38 niveles de resolución vertical y una separación espacial de 6 horas por archivo de entrada. Los datos de uso del suelo son adquiridos de las imágenes de los satélites Terra y Aqua, que usan el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), o pueden ser datos medidos específicamente para el territorio nacional por las autoridades ambientales correspondientes.

Las principales variables de salida son las componentes del viento, la velocidad vertical, la perturbación en la temperatura potencial, la perturbación en el geopotencial y la perturbación en la presión de aire seco en superficie. Aunque son más de 90 variables las que pueden estimarse con el WRF.

WRF usa las ecuaciones de Euler que se obtienen al despreciar los términos disipativos en las ecuaciones de Navier-Stokes. Puede emplearse con la aproximación hidrostática o la no hidrostática. Las ecuaciones son planteadas en coordenadas verticales de presión, las cuales tienen la ventaja de seguir la forma del terreno. El método numérico que utiliza WRF para solucionar el conjunto de ecuaciones es el de Runge-Kutta de segundo y tercer orden. El tipo de grilla que usa se denomina Arakawa C y usa pasos de tiempo cortos, de modo que puedan resolverse las ondas de gravedad y ondas acústicas (Wang, 2014).

Los esquemas de parametrización que contienen el WRF son la radiación de onda corta y larga, la formación de cúmulos, la difusión, la advección, la capa límite planetaria, y los procesos de formación de hielo y nieve. El esquema usual para representar la radiación de onda larga se denomina modelo de transferencia rápida radiativa (RRTM por sus siglas en inglés). El RRTM de onda larga en condiciones de cielo despejado incluye los efectos radiativos del ozono (O_3), del dióxido de carbono (CO_2), del vapor de agua (H_2O), del freón (los CFC), del formaldehído (CCl_4), del metano (CH_4) y del óxido nitroso (N_2O). Además del RRTM hay más opciones como el Eta Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Longwave (GFDL) o el CAM Longwave. En cuanto