



# Revista de CIENCIAS AMBIENTALES

## Tropical Journal of Environmental Sciences



### Predicción del clima y modelos numéricos

#### *Climate Prediction and Numerical Models*

*Werner Stolz<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> El autor, meteorólogo, es el encargado del Departamento de Análisis y Predicción del Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica.

#### **Director y Editor:**

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

#### **Consejo Editorial:**

Enrique Lahmann, UICN, Suiza

Enrique Leff, UNAM, México

Marielos Alfaro, Universidad Nacional, Costa Rica

Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica



Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica

Gerardo Budowski, Universidad para la Paz, Costa Rica

#### **Asistente:**

Rebeca Bolaños-Cerdas





# Predicción del clima y modelos numéricos

por WERNER STOLZ

## RESUMEN

La modelación numérica del tiempo y del clima ha permitido estimar el comportamiento atmosférico a diversas escalas temporales y espaciales. El avance tecnológico ha contribuido a que los periodos temporales de previsión sean cada vez mayores y las escalas espaciales cada vez menores, aumentando, así, la resolución de ambos. En Costa Rica se inició operativamente la modelación del tiempo en alta resolución en el año 2003, llegando a ser, actualmente, una herramienta fundamental, tanto para el pronóstico del tiempo a niveles local y regional, como para la estimación de los escenarios de cambio climático en el siglo XXI en el país.

*The numerical prediction of weather and climate allows the estimation of the atmospheric scenarios for different time and spatial scales. The technology advances have contributed for temporal previsions periods much longer than some years ago. In Costa Rica, the high resolution numerical weather prediction started in the year 2003, been, actually, the fundamental tool for the weather forecast, both regional and local areas of the country, or for the estimation of the Climate Change scenarios in this century in the country.*

La meteorología dispone de un conjunto de ecuaciones físico-matemáticas que diagnostican y pronostican - entre otras cosas- el comportamiento de las variables atmosféricas. Los modelos numéricos por métodos matemáticos, como el de *diferencias finitas*, resuelven las ecuaciones y arrojan resultados que permiten analizar el comportamiento atmosférico en función tanto del tiempo como del espacio. A medida que ha aumentado la comprensión de las interacciones entre la Tierra y su atmósfera, se han incorporado a la modelación otros factores, como la química atmosférica, la dinámica de los océanos, la criosfera y la hidrosfera, así como el componente antropogénico, que juega un rol cada vez más importante en este conjunto de sistemas naturales. En su conjunto, las ecuaciones matemáticas obedecen a las leyes físicas de conservación del movimiento, de conservación de la masa y de conservación de la energía. Por ende, hay dos tipos de modelos: del tiempo y del clima. Debido a la gran cantidad de datos y a la rapidez que necesita su manejo para producir resultados operativos, o de largo alcance temporal, se requiere de una gran capacidad de cómputo, que puede ser solventada incorporando la tecnología más actualizada.

## Modelación numérica del tiempo y del clima

Los modelos numéricos incorporan en sus procedimientos de cálculo diferentes tipos de variables y de condiciones atmosféricas según lo que -y tomando en consideración el periodo de tiempo- pretendan anticipar. Este periodo puede ser de horas, de décadas o de siglos. Puede tratarse de anticipar interacciones entre la energía solar y la superficie terrestre (balance energético), la orografía del planeta o de una región determinada y sus diversas interacciones dinámicas, los tipos y usos del suelo, la variación de las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, los cambios de las capas de hielo terrestres, la temperatura superficial del mar, la química atmosférica y muchos otros aspectos que muestran las relaciones entre la atmósfera y las partes continentales y oceánicas del planeta.

Una de las diferencias más importantes de los modelos numéricos es el período de tiempo que tienen por objetivo estimar: si es un lapso corto se recurre a modelos numéricos del tiempo; si el período es de años, décadas o siglos, se utiliza los modelos climáticos. De esta forma, se puede prever las condiciones atmosféricas a corto plazo, como la actividad lluviosa en el valle Central, o estimar los escenarios climáticos de lluvia y temperatura de Costa Rica de los próximos 100 años, con las diversas implicaciones y aplicaciones que ello conlleva, tanto para la planificación de mediano y largo plazos de los sectores productivos del país, como para la previsión diaria de los eventos hidrometeorológicos extremos.

## **Ecuaciones físico-matemáticas**

La matemática y la física pretenden representar por medio de ecuaciones el comportamiento que muestran los sistemas tanto artificial como naturalmente. Las fuerzas principales que actúan en la atmósfera son: la de gravedad, la de Coriolis y las de presión que, por medio de sus diferentes valores espaciales, actúan sobre las parcelas de aire causando su movimiento. Sin embargo, la radiación de la energía que proviene del Sol es la razón por la que se produce la dinámica terrestre, ya que causa las diferencias latitudinales de temperatura entre las regiones tropicales y las latitudes medias y altas, provocando que se establezcan flujos de masas de aire de diferentes características termodinámicas para redistribuir la energía entre las regiones mencionadas.

Dado lo anterior, se dispone de un conjunto de ecuaciones físico-matemáticas que representan los procesos dinámicos y las relaciones energéticas del sistema tierra-atmósfera, de tal forma que aglutinan la información que permite diagnosticar y pronosticar el comportamiento de éste. Tres ecuaciones representan el movimiento tridimensional del aire en la atmósfera y dos reúnen los procesos energéticos y termodinámicos, además de otras que modulan otro tipo de relaciones.

## **Fases del modelo numérico**

Un modelo numérico se realiza en cuatro fases: (1) recopilación de datos meteorológicos, (2) asimilación y procesamiento de datos, (3) resolución de ecuaciones físico-matemáticas y procesos termodinámicos y (4) postprocesamiento, que incluye la presentación visual de los resultados.

Primera fase: se reúnen los datos atmosféricos y oceánicos de todo tipo, tanto los que se registran in situ como los que se obtienen por tecnología satelital. Actualmente, 10.000 estaciones meteorológicas hacen mediciones terrestres, de las que 4.000 comparten sus datos en tiempo real. Se llevan a cabo 900 radiosondeos a nivel mundial, al mismo tiempo que 3.000 aviones reportan, diariamente, 150.000 datos de presión, temperatura y viento de diferentes niveles atmosféricos. La constelación satelital está constituida por 16 satélites operativos, ambientales e investigativos. Una cantidad total de 4.000 barcos, de los que 800 registran datos diariamente, además de 1.250 boyas marinas a la deriva y 200 marinas fijas adquieren datos de los océanos.

A lo anterior se añade los datos generados por los radares meteorológicos localizados en diversas partes del mundo. Toda la información recopilada se distribuye de manera que el modelo numérico pueda utilizarla recurriendo, generalmente, a una disposición espacial de los datos en mallas o rejillas, de forma que la información se distribuye puntualmente sobre el área de estudio, sea regional o global.

Segunda fase: después de que las observaciones han sido procesadas y el control de calidad ha sido ejecutado, éstas se asimilan al modelo numérico. Posteriormente, ya con los datos procesados, se obtiene una representación del estado real de la atmósfera llamada análisis para hacer un ajuste previo de las condiciones atmosféricas, a partir de la cual se estima el comportamiento futuro de la atmósfera.

Tercera fase: se resuelve las ecuaciones físico-matemáticas involucradas en el modelo. Si los procesos dinámicos y termodinámicos no se pueden determinar por medio de ecuaciones, se recurre al método de las parametrizaciones, de forma que puedan ser dilucidados indirectamente por otro tipo de supuestos.

Cuarta fase: realiza los procesos de postprocesamiento; se contempla el despliegue gráfico de los resultados.

## **Resolución de los modelos numéricos**

Las escalas espaciales de los fenómenos atmosféricos abarcan un rango muy amplio: un pequeño remolino que abarca algunos metros de longitud, una nube de tormenta que cubre varios kilómetros al igual que la brisa de mar y la brisa de montaña, la tormenta tropical, los sistemas anticiclónicos semipermanentes del Pacífico y el Atlántico y el fenómeno *El Niño-Oscilación del Sur*, de escalas espaciales del orden de miles de kilómetros.

Dado lo anterior, los modelos numéricos deben ajustarse de forma que puedan contemplar esa gama de escalas espaciales que presentan los eventos atmosféricos. La resolución espacial implementada en los modelos es la que determina qué tipos de fenómenos pueden resolver o determinar. La resolución señala la distancia que separa los puntos que tienen información en el modelo: un valor de 15 km informa que cada 15 km hay datos disponibles para su proceso.

La alta resolución dispone de la información suficiente para estimar, entre otras cosas, los sistemas atmosféricos de escala pequeña y de mesoescala, tales como aguaceros y circulaciones de viento local, los valores de temperatura de forma diferenciada en función de la altitud de un lugar, la forma en que circula el viento en relación con las horas del día, localizar los lugares donde se podrían presentar condiciones de lluvia intensa.



Comisión Nacional de Emergencias

## Modelos numéricos del tiempo

### *Modelo numérico global del tiempo*

El sistema de pronóstico global es un modelo numérico de predicción del tiempo que abarca el globo terráqueo y es ampliamente utilizado en el ámbito meteorológico internacional. Se lleva a cabo cuatro veces diarias y genera pronósticos a 16 días de diversas variables atmosféricas, diferenciando la resolución espacial en función del periodo de tiempo previsto: a mayor tiempo pronosticado menor resolución espacial. Se realiza en dos etapas: la primera, de alta resolución, estima siete días; y la segunda, de baja resolución, prevé de 8 a 16 días. La resolución espacial del sistema de pronóstico global varía de 35 a 70 kilómetros y, eventualmente, irá aumentando en función de la capacidad computacional disponible. Simultáneamente, considera la atmósfera como un fluido discreto, dividido en 64 capas.

Debido a que los servicios meteorológicos necesitan resultados para ser aplicados en regiones o en áreas específicas, dentro del sistema de pronóstico global -o de cualquier otro modelo del tiempo de escala global-, se inserta o se anida un modelo numérico de mayor resolución pero de menor cobertura espacial, de manera que éste se alimente de aquél a través de sus fronteras comunes. El modelo Work Station Eta (WS-Eta) y el Weather Research and Forecasting System (WRF) son ejemplos de este procedimiento. Por ser modelos restringidos a un área específica se llaman modelos de área limitada, contrario a los otros que son modelos globales. Generalmente la relación entre las resoluciones de los modelos anidados es de 3 a 1.

### *Modelo Work Station Eta*

El WS-Eta se implementó en el Science and Training Resource Center en el año 2002 y, al año siguiente, se instaló en el Instituto Meteorológico Nacional, siendo el primer modelo numérico operativo y de uso diario con el objetivo de llevar a cabo la previsión del tiempo para la atención de las emergencias hidrometeorológicas de Costa Rica. Tal modelo, predictivo del tiempo, tiene una alta resolución que reproduce, entre otras cosas, las características de las escalas local y regional de Costa Rica, a saber: brisas de mar y montaña, ondas de montaña,

aceleración del viento en los pasos de las cordilleras, ciclo diurno de las temperaturas ambientales, precipitaciones severas y sistemas atmosféricos sobre regiones específicas. Por ser un modelo anidado, o de área limitada, el WS-Eta adquiere la información del sistema de pronóstico global para determinar las condiciones iniciales de la atmósfera y el océano. Ya que los datos del sistema de pronóstico global están disponibles cuatro veces diarias, el WS-Eta arroja resultados con la misma periodicidad.

El WS-Eta tiene dos tipos de coordenadas geométricas para resolver las ecuaciones físico-matemáticas: eta y sigma, ambas interrelacionadas entre sí pero con importantes diferencias en lo que a algunos aspectos dinámicos se refiere, particularmente los relacionados con las estimaciones de los gradientes de presión atmosférica y con la representación de la superficie terrestre. Tiene dos opciones de parametrización de los procesos convectivos: Betts-Miller-Jánjic y Kain-Fritsch. El primero resuelve los eventos severos. La resolución del modelo puede ser modificada en función de los objetivos así como todos los parámetros básicos previamente configurados.

El WS-Eta tiene una correlación, en el nivel atmosférico de 700 hPa, entre sus vientos y los vientos reales sobre el país de 0,7; tiende a sobreestimar la actividad lluviosa sobre la Región Caribe y anticipa, acertadamente, las lluvias intensas. Presenta el cambio diurno y nocturno del viento en el valle Central y captura su aceleración en los pasos de la cordillera Volcánica Central, de manera que se puede prever la turbulencia en los niveles bajos de la atmósfera para efectos de la aviación.

#### *El Weather Research and Forecasting Model*

El WRF se aplica tanto para la predicción numérica del tiempo de diversas escalas como para la investigación del comportamiento atmosférico. Es el sucesor del modelo Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model, ampliamente utilizado y documentado por la comunidad científica internacional en los últimos años.

El WRF, desarrollado conjuntamente por el National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), el National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el Forecast Systems Laboratory, la Air Force Weather Agency, la Naval Research Laboratory, Oklahoma University y la Federal Aviation Administration, es un modelo muy versátil y su eficiencia computacional se ha maximizado. Dispone de una gran variedad de opciones, que son implementadas dependiendo del acierto de sus resultados: (1) posee varias parametrizaciones para cobertura nubosa y precipitación, (2) permite elegir varias capas límite planetarias, (3) permite anidar varias regiones con diferentes resoluciones espaciales y (4) puede retroalimentarse las regiones anidadas de forma que se modulan entre ellas.

Actualmente, existen varios modelos numéricos en el ámbito meteorológico internacional, de los que se cita los siguientes: (1) Modelos de escala global: Global Forecast System (NOAA); NOGAPS, Fuerza Naval, Estados Unidos; Global Environmental Multiscale Model, Canadá; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Europa; Arpege, Francia; Intermediate General Circulation Model, Universidad de Reading, Inglaterra. (2) Modelos de escala regional: Weather Research and Forecasting Model, NCEP y comunidad meteorológica; North America Mesoscale, NCEP; Eta model, NCEP; Regional Atmospheric Modeling System, Colorado State University; Mesoscale Model (MM5) Penn State/NCAR; High Resolution Limited Area Model; Global Environmental Multiscale Limited Area Model, Canadá; The High-Resolution Limited-Area Hydrostatic and Non-Hydrostatic Model (Aladin), Cosmo Model, Alemania, Suiza, Italia, Polonia y Grecia.

#### *Modelos climáticos globales*

Los modelos climáticos globales, también llamados modelos de circulación general, incluyen en sus procesos varios componentes del sistema climático que no están contemplados en los modelos de predicción del tiempo. Generalmente, están abocados a la predicción del clima en periodos de largo plazo, desde décadas hasta centurias. Ellos coinciden con los modelos de predicción del tiempo en varios de sus procesos; sin embargo, acusan diferencias, entre ellas: (1) el primero predice el clima, el segundo predice el tiempo, de manera que el alcance de previsión es muy diferente entre ambos; (2) la cobertura geográfica del primero es global, la del segundo local, regional o global; (3) las condiciones iniciales son de mayor relevancia para el primero que para el segundo; (4) para el primero es relevante el comportamiento dinámico del océano, para el segundo no, y (5) la resolución espacial es mucho mayor en el segundo que en el primero. Las similitudes entre ambos están relacionadas con la utilización de los mismos métodos para resolver las ecuaciones matemáticas que determinarán las características futuras de la atmósfera.

El modelo climático global, al igual que el modelo numérico del tiempo, hace uso de ecuaciones físico-matemáticas para determinar los factores que modulan el clima, lo cual involucra las diversas interacciones entre la atmósfera, la geosfera, la hidrosfera y la criosfera. Los científicos del clima usan este tipo de modelo para comprender los efectos -entre otros- en el sistema tierra-atmósfera de las crecientes concentraciones de gases de

efecto invernadero y su relación con el cambio climático y, por ende, con los cambios de la temperatura terrestre y, entre otras cosas, la disminución de la cantidad de hielo polar.

También se usan para prever a largo plazo la distribución de la lluvia y la temperatura, a diversas escalas: desde la global hasta la local.

Debido a las consideraciones anteriores, este tipo de modelos requiere de plataformas computacionales de gran capacidad, y el avance de ellos va de la mano del mejoramiento técnico de este aspecto. Por ejemplo, el Community Climate System Model lleva a cabo tres trillones de cálculos para simular un día del clima global

La resolución espacial del modelo climático global varía entre 250 km y 600 km horizontal y de 10 a 20 capas atmosféricas, así como alrededor de 30 capas oceánicas. Estas resoluciones son comparativamente menores que las que tienen los modelos numéricos del tiempo.

#### *Modelo de circulación atmosférica*

Éste consiste en una representación tridimensional de la atmósfera acoplada a la superficie terrestre y a la criosfera. Es similar al modelo usado para la predicción del tiempo, pero debido a que sus estimaciones temporales son de largo plazo utiliza un menor detalle en ciertos aspectos físicos. El modelo de circulación atmosférica se alimenta con datos de la temperatura superficial del mar y de la cobertura de hielo. Es muy útil para estudiar los procesos atmosféricos, la variabilidad del clima y sus respuestas al cambio de las temperaturas del mar.

#### *Modelo de circulación atmosférica acoplado a un océano con condiciones predeterminadas*

Éste prevé cambios en las temperaturas superficiales del mar y supone que el océano es una capa de agua con una profundidad constante de 50 metros. Este modelo se utiliza para estimar qué tipo de clima se tendría ante un nivel fijo de dióxido de carbono, pero no puede ser utilizado para prever la razón de cambio del clima debido a que esto está modulado por procesos en el interior del océano, los cuales en este caso se consideran invariantes.

#### *Modelo oceánico de circulación general*

Un modelo oceánico de circulación general es la contraparte oceánica de un modelo de circulación atmosférica. Es una representación tridimensional del océano y del hielo marino. Es utilizado para el estudio de las circulaciones oceánicas, sus procesos y variabilidad interiores. Depende, a su vez, de los diversos datos que procedan de la atmósfera, como la temperatura superficial del aire.

#### *Modelos de ciclos de carbono*

El ciclo del carbono terrestre se modela dentro del esquema de superficie terrestre de un modelo de circulación atmosférica y el ciclo del carbono marino en el que corresponde al modelo oceánico de circulación general. El ciclo del carbono se necesita para capturar las importantes retroalimentaciones de las concentraciones de carbono al clima.

#### *Modelos químicos atmosféricos*

Este tipo de modelo representa una visión tridimensional de la química atmosférica terrestre. El esquema químico está diseñado para incluir las principales componentes responsables de la producción y destrucción del ozono y el metano en los niveles atmosféricos más bajos. El modelo Stochem del Met Office Hadley Centre es un ejemplo de ello.

#### *Modelos acoplados atmósfera-océano de circulación general*

Este tipo de modelo es lo más complejo que hay en el estado del arte actual, ya que acoplan el modelo de circulación atmosférica con el modelo oceánico de circulación general. Recientemente se han incorporado, para mayor comprensión, la biosfera, el ciclo del carbono y la química de la atmósfera. Se utilizan para estudiar la variabilidad y los procesos físicos del sistema climático acoplado. Tienen una resolución de algunos cientos de kilómetros. Algunos ejemplos de este tipo de modelos son: HadCM2 y HadCM3, desarrollados en el Hadley Centre (Inglaterra) en la década de los noventa. Este tipo de modelos puede prever los cambios en las concentraciones de dióxido de carbono, así como los cambios de otros componentes atmosféricos. En años recientes se han incorporado algunos aspectos de la circulación oceánica, como la circulación termohalina.

#### *Modelos regionales del clima*

Los modelos regionales del clima tienen el objetivo de hacer predicciones climáticas de resoluciones mayores que las de los modelos de circulación global, lo que permite realizar investigaciones en diferentes regiones específicas del mundo. Estos modelos describen la circulación del viento y otras variables atmosféricas a escala

pequeña, del orden de algunos kilómetros. Determinan con mayor detalle la distribución espacial y temporal, por ejemplo de la temperatura ambiental y de la actividad lluviosa estimada para un periodo de tiempo suficientemente prolongado.

#### *Sistema de modelación regional del clima*

El sistema de modelación regional del clima es derivado de un modelo climático global producido por el Hadley Centre. Puede ser configurado para correr sobre cualquier área del globo sin requerimientos computacionales excesivos. Sus condiciones de fronteras se las suministra el modelo climático global del Hadley Centre, que ya tiene incorporados los escenarios climáticos a futuro. Este sistema de modelación regional tiene la capacidad de generar escenarios climáticos que representan la distribución espacial y temporal de la lluvia y la precipitación en un período de 30 años, de 2070 a 2100, el último tercio del siglo XXI. Debido a su alta resolución se puede recrear escenarios de cambio climático a nivel regional, delimitando el comportamiento de las vertientes del Pacífico y del Caribe.

### Climatologías de precipitación mensual generadas por modelos de circulación general en Centroamérica

Con el objetivo de analizar la distribución mensual de precipitación de los modelos de circulación general se analizó dos puntos centroamericanos en ambas vertientes, la caribeña y la pacífica. Se analizó las climatologías de lluvia mensual de cinco modelos, mostrándose las siguientes características de éstos (ver tabla siguiente): país que corre el modelo, resolución horizontal en grados (1° geográfico = 110 km) y resolución de la atmósfera (a mayor cantidad de capas en la vertical, mayor resolución).

Modelo climático global	País	Resolución espacial (°)	Capas verticales en las que divide la atmósfera
<b>Echam4</b>	Alemania	2,8 x 2,8	19
<b>GFDL</b>	EU	2,8 x 3,8	14
<b>Hadley</b>	Reino Unido	2,5 x 3,8	19
<b>PCM</b>	EU	2,8 x 2,8	18
<b>CCC</b>	Canadá	3,8 x 3,8	10

#### **Análisis en el Pacífico Oriental**

Se muestra las climatologías mensuales de lluvia en mm/día de cinco modelos de circulación global: Echam98, GFDL90, Hadley300, CCC199, PCM00, en dos puntos específicos de la región centroamericana: en el océano Pacífico Oriental en 12.5°N, 87.5°O (figura 1) y en el mar Caribe, 12.5°N, 82.5°O (figura 2).

La climatología de la estación en Estelí muestra una distribución binomial en el período de estación lluviosa (mayo-noviembre) con dos máximos relativos, mayo y septiembre, y un mínimo relativo en julio, reflejo del veranillo o periodo canicular. La estación seca abarca de diciembre a marzo, con noviembre y abril como meses de transición entre ambas estaciones.

Los modelos de circulación general sobreestiman la cantidad de precipitación mensual a lo largo del año, tanto en el período lluvioso como en el seco. El GFDL90 y el PCM00 no muestran una distribución binomial, sino un aumento mensual de precipitación hasta alcanzar un valor máximo en septiembre, para luego descender. El CCC199 y el Hadley300 muestran una distribución bimodal más acorde con la distribución mensual real (la de la estación en Estelí). El Echam498, si bien no muestra una distribución bimodal, sí refleja el primer máximo relativo en mayo para luego descender en los meses subsecuentes. La mayoría de los modelos muestran condiciones lluviosas en el período seco, de diciembre a marzo. Los modelos CCC199 y Hadley300 reproducen el veranillo, es decir, una reducción relativa de las cantidades de precipitación en el mes de julio. El modelo más lluvioso, en todo el año, con valores entre 270 y 390 mm/mes es el Echam498. El modelo más seco (valor máximo absoluto, 210 mm), entre enero y julio, es el PCM00. De julio a noviembre, el modelo más seco (valor máximo de 120 mm) es el Hadley300.

Las diferencias entre las climatologías de los modelos en relación a la climatología real reflejan, precisamente, el hecho de que los modelos no representan totalmente las interacciones de la atmósfera y el océano, de tal forma que no reflejan a cabalidad las cantidades y las distribuciones de la precipitación, entre otras cosas.

El hecho de que un modelo no represente la bimodalidad de la climatología podría deberse a que no está modulando, desde el punto de vista dinámico, las características propias de la región, las cuales dan lugar a un fenómeno como el veranillo, de tanta importancia en el clima centroamericano. Las diferencias entre ambos perfiles climáticos pueden estar siendo ocasionadas por un mal posicionamiento de la zona de convergencia

intertropical, una sobreestimación de la velocidad de los vientos alisios, las parametrizaciones de diversos procesos y los esquemas radiativos utilizados.

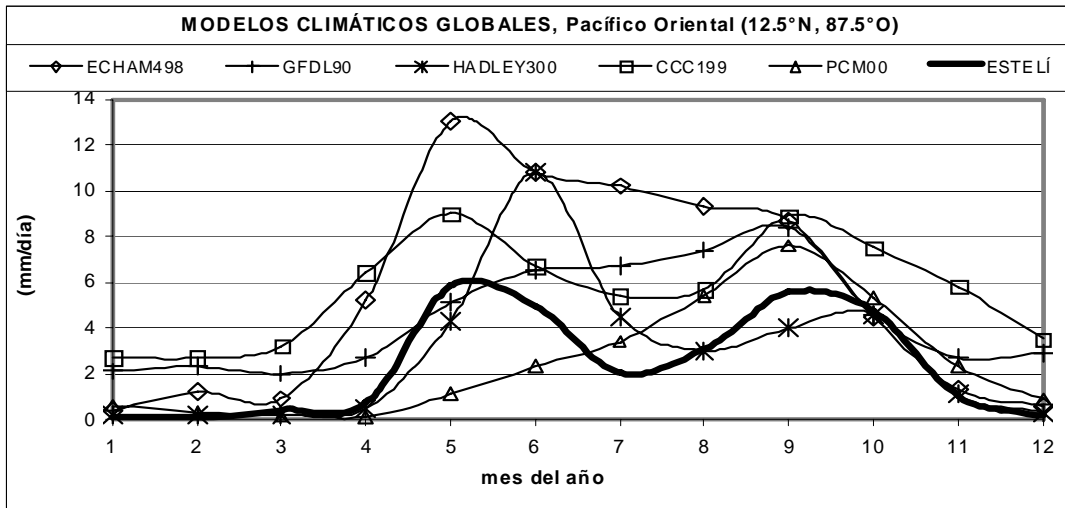


Figura 1. Climatologías de precipitación diaria de cinco modelos de circulación global y de una estación meteorológica en Estelí, Nicaragua. Ésta muestra la climatología real, las otras resultan de modelaciones numéricas. Las comparaciones se hacen respecto de aquélla.

### Análisis en el Caribe Occidental

La climatología real muestra un período lluvioso de mayo a diciembre y enero, con dos valores máximos relativos en julio y octubre. El trimestre febrero-abril muestra valores comparativamente menores que el resto de los meses del año. En general, al contrario del comportamiento mostrado en la vertiente pacífica, los modelos tienden a mostrar escenarios menos lluviosos que lo real. El Echam498 es el que mejor refleja la distribución del punto en estudio, tanto en las cantidades mostradas como en la distribución temporal. El PCM00 no refleja ninguna característica del Caribe, ya que se mantiene muy seco y constante en sus valores a lo largo del año. Los otros modelos, más que mostrar una distribución semejante a la real, reflejan un cambio en la cantidad de precipitación entre los meses de mayo a octubre, siendo el resto de los meses secos y alejados del comportamiento real.

El Echam498 es el que mejor reflejó el comportamiento de las precipitaciones tanto en cantidades como temporalmente. Es importante recalcar el hecho de que los modelos tienden a mostrar escenarios muy secos en el Caribe, subestimando casi en un 50 por ciento el valor real de la precipitación. Las diferencias entre las climatologías modeladas y la real, al igual que en el caso anteriormente analizado, reflejan las deficiencias de los modelos climáticos en relación con la comprensión de la totalidad de los procesos que se llevan a cabo tanto en la atmósfera como en el océano. Gran parte de la investigación meteorológica está encaminada a disminuir, mejorando los procesos del modelo, las diferencias entre ambos resultados.

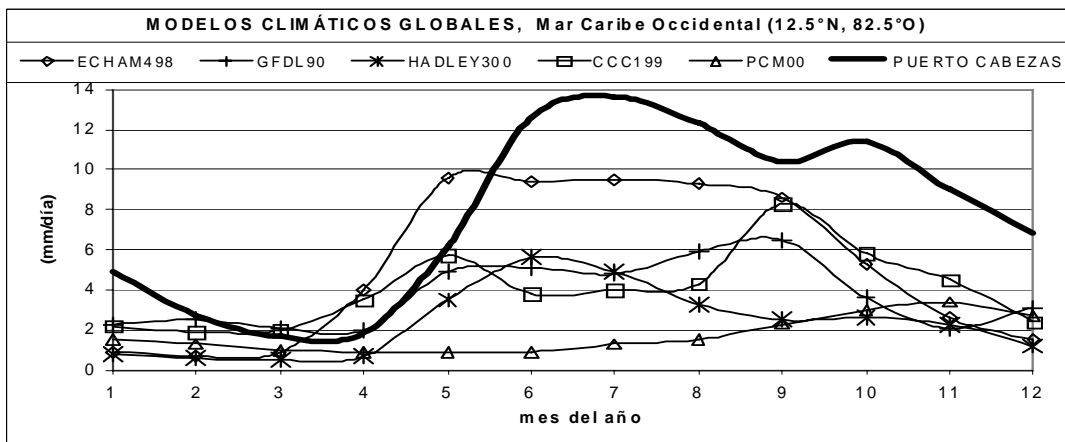


Figura 2. Climatologías de precipitación diaria de cinco modelos de circulación global y de una estación meteorológica en Puerto Cabezas, Nicaragua. Ésta muestra la climatología real, las otras resultan de modelaciones numéricas. Las comparaciones se hacen respecto de aquélla.





Gustavo Jiménez

## Historia de la modelación numérica

La primera predicción numérica del tiempo la hizo L. F. Richardson en 1922. Mostró que las ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento de las variables atmosféricas (viento, presión atmosférica y demás) podían resolverse por métodos matemáticos y computacionales partiendo de los valores iniciales de las mismas variables, de tal manera que se pudiera estimar su comportamiento futuro. Los primeros resultados no fueron satisfactorios debido a la escasez de datos meteorológicos y a la técnica empleada para resolver los cálculos matemáticos.

A partir de los años cincuenta, el crecimiento sustancial de la cantidad de observaciones meteorológicas alrededor del mundo, y el desarrollo de la tecnología, particularmente la computacional, contribuyeron a la creación del primer modelo numérico meteorológico del tiempo que tuvo éxito: el modelo barotrópico, que fue hecho por Charney, Thompson, Gates, Fjörtoft y von Neumann utilizando la computadora Eniac para implementarlo. Más simple que el de Richardson, formulado 30 años antes, las ecuaciones matemáticas se analizaban bajo supuestos que facilitaban su resolución, tal como el análisis de la vorticidad y la divergencia en el nivel de divergencia nula. En 1955, se inició la predicción operacional numérica del tiempo en el Servicio Meteorológico de Estados Unidos de América.

El modelo barotrópico suministraba predicciones de la altura geopotencial en el nivel atmosférico de 500 hPa. Posteriormente, se implementó el modelo barotrópico modificado. Luego aparecieron los modelos baroclínicos que se aplicaban a dos capas de la atmósfera. En 1962, 32 años después de la primera formulación de Richardson, se desarrolló un modelo de predicción del tiempo de aplicación práctica: el geostrófico, aplicado a varios niveles atmosféricos y no, como anteriormente se hacía, a un solo nivel.

Las limitaciones de aplicación de las ecuaciones matemáticas de la atmósfera hizo que la evolución de la modelación numérica del tiempo expresara las ecuaciones matemáticas de la atmósfera en coordenadas de presión, de tal forma que la atmósfera fuera representada por un sistema de ecuaciones no lineales con ecuaciones de pronóstico (la ecuación de movimiento y la ecuación de la energía termodinámica) y ecuaciones de diagnóstico (la ecuación de continuidad, la aproximación hidrostática y la ecuación de estado termodinámico). Las ecuaciones primitivas brindan la información de la evolución de las variables que caracterizan la atmósfera.



Comisión Nacional de Emergencias

Posteriormente, se implementaron los modelos numéricos a nivel hemisférico aplicando las ecuaciones matemáticas primitivas resueltas por distintas técnicas numéricas y aplicadas a diferentes niveles atmosféricos. El primero de este tipo se aplicó a seis niveles atmosféricos y fue implementado por Estados Unidos en 1966. Debido al estado del arte de la disposición de datos meteorológicos y de la disponibilidad de recursos computacionales a partir del modelo hemisférico, en 1971 se creó el primer modelo de área limitada de escala regional, el cual reflejaría los procesos dinámicos y energéticos de la atmósfera aplicados a una menor escala. Este modelo permitía obtener resultados más precisos sobre áreas de interés de tamaño regional.

A partir del modelo de área limitada se desarrolló el modelo de alta resolución, que permitía enfocar el área de interés predictivo de forma que el usuario podía analizar con una alta resolución su área de interés, por ejemplo, sobre un huracán. Paralelamente a este proceso surgieron los primeros modelos de escala regional o de mesoescala. El modelo de escala regional, en 1980, sufrió mejoras consecutivas hasta que fue sustituido por un modelo de escala global aplicado a 12 niveles atmosféricos, con el que se podía analizar fenómenos de gran escala como la evolución de las ondas atmosféricas planetarias para períodos de 5 a 10 días.

A partir de los años ochenta, y concomitantemente al avance tecnológico, comenzaron a implementarse varios modelos numéricos de escala regional, con diferentes características según el tipo de variable atmosférica a simular. Desde este momento, no hace más de 30 años, se inició una nueva era en la ciencia meteorológica, ya que los modelos numéricos de la atmósfera modificaron la percepción de ella, ayudando a la capacidad predictiva de su evolución, tanto a corto y mediano plazos como a largo plazo.

