

# MODELOS NUMÉRICO-COMPUTACIONALES: SU APLICACIÓN ATMOSFÉRICA Y SÍSMICA

Sheila Serrano, Sebastián Araujo, Enrique Palacios, Patricio Núñez\*

## Introducción

El impresionante aumento del poder de cálculo de los computadores, desde los años sesenta, ha revolucionado todos los ámbitos de nuestro vivir. La investigación científica ha sido una de las principales beneficiadas logrando, a través del modelamiento numérico, estudios que antes parecían tareas interminablemente largas o caras; imposibles para países en vías de desarrollo como el nuestro. Es claro que la investigación científica desarrollada antes del apareamiento de los ordenadores fue un privilegio de los países llamados “del primer mundo” claro, con contadas excepciones, que aunque pocas, sí sentaron un precedente de la capacidad científica de nuestros pueblos.

Ahora que disponemos de supercomputadores, redes avanzadas, sistemas operativos libres y una predisposición mundial que apoya incondicionalmente al quehacer científico, la perspectiva de la investigación en

Ecuador se expande enormemente. Los recursos computacionales de investigación, sumados a los datos y a los científicos conocedores de las ecuaciones que gobiernan los fenómenos naturales, son los ingredientes muchas veces suficientes para iniciar un proyecto de investigación en modelamiento científico.

La aplicación del modelamiento científico consiste en el reemplazo del fenómeno estudiado en la naturaleza por su imagen matemática (modelo matemático, conceptual o científico) en casos en que este objeto cognitivo sea inviable, costoso o demasiado riesgoso. A este modelo matemático se lo implementa con algoritmos lógicos y numéricos en un ordenador, lo que permite estudiar las cualidades del proceso original estudiado. Esta forma de conocer la naturaleza conjuga varias ventajas: al trabajar con el modelo matemático y no con el fenómeno natural, el estudio se realiza en forma relativamente rápida y a bajos costos; así-

---

\* Docentes e investigadores de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

mismo se pueden estudiar, caracterizar y pronosticar sus propiedades de estado, a este punto se lo conoce como ventaja teórica y al mismo tiempo los algoritmos numéricos permiten, apoyándose en la potencia de cálculo de los ordenadores, verificar y contrastar las cualidades del fenómeno estudiado con datos reales, medidos directamente; esto se conoce como ventaja del experimento (Domínguez, 2005).

También conocido como simulación numérica, todo proceso de modelado científico suele seguir la siguiente secuencia: primero, escoger el conjunto de observaciones del que el modelo deberá dar cuenta; segundo, se deberá encontrar un modelo físico-matemático, es decir, un conjunto de ecuaciones que represente el modelo conceptual. Una vez logrado esto, es necesario encontrar un método de resolución numérica de dichas ecuaciones y las correspondientes condiciones (región del espacio o tiempo donde se aplican los parámetros del modelo) en las cuales la resolución del modelo matemático es capaz de explicar las observaciones. Finalmente, se deberá interpretar los resultados.

El siguiente artículo, presenta dos de los tres proyectos de investigación aprobados en la Segunda Convocatoria a Proyectos de Investigación de

la Universidad Politécnica Salesiana, que han dedicado sus esfuerzos al modelamiento científico. Se abarcan dos temas caracterizados por su impredecibilidad: la localización de sismos en agregados sísmicos (*clusters*) en la Sierra central del país, específicamente, en la región de Pisayambo; y el modelamiento atmosférico para la caracterización de la tropósfera ecuatoriana y la predicción del tiempo. Los resultados de ambas investigaciones se presentan en la revista del Área de Ciencias de la Vida y Agropecuarias de la Universidad Politécnica Salesiana, La Granja, volumen 10, número 2 del año 2009.

## **1. Localización de sismos por modelamiento numérico de dobles diferencias**

Todo problema de modelación puede separarse en dos partes. Un problema directo que consiste en obtener datos a partir de unas ecuaciones que asumimos verdaderas y un problema inverso que consiste en obtener las ecuaciones, conocidos muchos datos experimentales.

La resolución del problema inverso plantea toda una serie de retos a nivel teórico, numérico y experimental. De hecho, si bien la teoría del

problema inverso empezó a estudiarse desde la geofísica, en la actualidad presenta aplicaciones que van mucho más allá de las ciencias de la tierra, con implicaciones que alcanzan hasta los mismos fundamentos del método científico (Tarantola, 2006).

La teoría del problema inverso es la rama de las matemáticas aplicadas que trata de responder al problema general planteado por las ciencias exactas: ¿cómo obtener teorías matematizables a partir de datos experimentales?, es decir, buscamos una relación matemática entre los parámetros de la teoría y los datos proporcionados por un experimento.

Tanto los datos, los parámetros y la función que los relaciona pueden ser escritos como matrices. Por eso en primer término el resolver el problema significa encontrar una matriz inversa, de ahí el nombre de problema inverso. Por desgracia esta simplificación es posible solamente si estamos suponiendo que nuestro fenómeno físico es lineal. Por lineal entenderemos que si probamos nuestro modelo en dos condiciones distintas y luego sumamos sus soluciones, la misma respuesta la debemos obtener si aplicamos el modelo a la suma de las dos condiciones iniciales (Mannville, 2004: 30).

Pero por desgracia en la naturaleza son raros los fenómenos que cum-

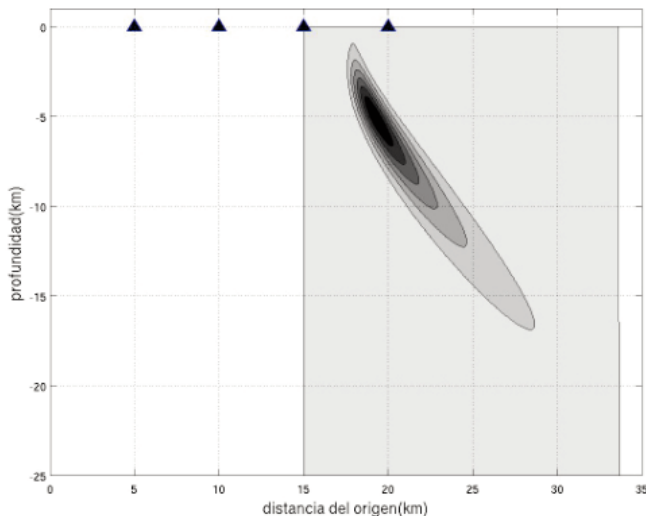
plen la condición de linealidad. Por ejemplo, en nuestro problema de estudiar una onda sísmica que se propaga por un medio con distintas capas de velocidades diferentes no podemos esperar que si calculamos la propagación del temblor por cada capa, el resultado final sea la simple suma de estas propagaciones por separado.

Para tratar con las no linealidades en el caso del problema inverso, un aporte trascendental se realizó al inicio de los años ochenta por parte de dos geofísicos investigadores en el Instituto de Física del Globo de París: Albert Tarantola y Bernard Valette. Su idea fue plantear primero que la búsqueda de la solución de un problema inverso se relaciona con la búsqueda de información (Tarantola and Valette, 1982a), esto permite abordar el problema desde la teoría de las probabilidades, o hablando con mayor propiedad matemática, desde la teoría de la medida que es la rama de las matemáticas que formaliza el cálculo de probabilidades y la estadística. Así podemos llegar a la generalización de un método muy conocido para encontrar ecuaciones partiendo de datos experimentales: los mínimos cuadrados, con la diferencia que ahora podemos hacerlo para fenómenos no lineales (Tarantola and Valette, 1982b).

Por desgracia cuando esta solución fue planteada la cantidad de cálculos necesarios para poder resolver el problema excedía en mucho la capacidad de los computadores de esa época. Actualmente, sin embargo, una simple computadora de escritorio es capaz de resolver problemas desde la teoría Tarantola-Valette. Por ejemplo, en la Figura 1 se muestra la posición en profundidad de un sismo localizado usando cuatro estaciones. Lo interesante es que ya no solamente decimos que el sismo está en una cierta posición más menos

cierto error, sino que vemos toda la función de distribución de probabilidad del sismo. Esto significa que no podemos afirmar con absoluta certeza cuál es la posición donde se originó el terremoto. Lo único que podemos decir es que la región más probable donde puede haberse originado está aproximadamente a 5 km de profundidad y a 19 km de nuestro punto de referencia. Esta es una prueba de humildad de la ciencia, nuestros conocimientos nunca podrán ser absolutamente exactos.

Figura 1  
Función de distribución de probabilidad de un terremoto localizado usando cuatro estaciones, son los triángulos en la superficie del terreno. La probabilidad de la posición del sismo es máxima en el color oscuro. La probabilidad de encontrar el sismo en la zona más clara es nula.



Estos resultados que empezaban a vislumbrarse desde la mecánica cuántica, el mundo ya no será jamás un reloj que marcha con un determinismo causal en que las mismas causas generan unívocamente los mismos efectos (Bunge, 1997: 37.), se extiende a todo modelo que hagamos de la naturaleza en forma de un “determinismo estadístico” (Bunge, 1997: 38).

Esta última interpretación de los resultados de la teoría Tarantola-Valette del problema inverso es personal y nace en contraposición a la postura que defiende Tarantola: la visión popperiana que afirma categóricamente que la solución del problema inverso no crea ningún modelo, únicamente sirve para la falsación de los modelos erróneos (Tarantola, 2006). Esta posición “pesimista” de Popper se rebate, pues la verdadera aceptación de la ciencia, y de los modelos que plantea, se ha logrado por la belleza de sus aciertos y no por la grosería de sus errores (Sokal and Bricmont, 1999: 75).

## **2. Modelo atmosférico de la tropósfera ecuatoriana**

Hoy más que nunca, el clima es un factor decisivo en el quehacer social, científico y económico de un

país, actividades como la agricultura, el turismo, el transporte, la construcción, por mencionar algunos son elementos sensiblemente afectados por variaciones en la precipitación, temperatura, humedad, vientos, entre otros; sin mencionar las consecuencias que producen los desastres climáticos, que casi siempre paralizan las actividades de regiones completas, teniendo que lamentar muchas veces pérdidas de vidas humanas.

La valorización de modelos climáticos que nos permitan conocer nuestra atmósfera y predecir su comportamiento es un tema que se ha dejado muy de lado en nuestro país, mientras que en otros, es clave en la realización de toda actividad económica (Katz y Murphy, 1997). Debido a su importancia, se han asignado trabajo y recursos, que hoy por hoy, ha llevado al problema de la caracterización del clima y la predicción del tiempo a niveles muy altos que son trabajados con supercomputadores, redes avanzadas y modelos numéricos (Garreaud, 2008).

Bajo este contexto, se vislumbra la necesidad de implementar un modelo atmosférico sobre el país, sobre todo, de parámetros tan importantes como la precipitación, la velocidad del viento, la radiación solar y la temperatura, entre otros. El comportamiento de estos parámetros que en

total suman 98, deberá determinarse para todos y cada uno de los días del año, diferenciando incluso las horas del día y barriendo todas las alturas de la tropósfera, con una resolución o apreciación de al menos 1 km, a este proceso se le conoce como Reconstrucción de la Atmósfera.

Este arduo trabajo, que implica meses de cálculos en el análisis de más de 30 años de datos climatológicos ecuatorianos, ha sido asumido por dos prestigiosas universidades: la Universidad Politécnica Salesiana y la Escuela Politécnica Nacional, trabajando conjuntamente con la

Fuerza Aérea Ecuatoriana y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, dentro del marco del proyecto Plataforma de Gran Altitud (PGA) auspiciado por la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología. El fin de este proyecto es colocar una Plataforma de Gran Altitud sobre la ciudad de Ambato, que sirva para el monitoreo militar, control de desastres y brinde servicios de internet y telecomunicaciones inalámbricas sobre zonas rurales y ha sido catalogado como el proyecto de investigación aeroespacial más importante del país (ver Figura 2).

Figura 2

Prototipo de la Plataforma de Gran Altitud PGA, que será ubicado sobre la ciudad de Ambato. El Modelo Atmosférico determinará la localización más segura para este dirigible.



Fuente: Sonia Guaño.

De esta manera, se propone la reconstrucción de la atmósfera utilizando el Modelo Atmosférico de Mesoescala (Weather Research Forecast, WRF), llamado de mesoescala debido a que se trabaja con una apreciación horizontal intermedia, que permite apreciar fenómenos que varían entre los cientos de metros hasta cientos de kilómetros, en lo que se refiere a ubicación geográfica<sup>1</sup>.

### *2.1 Descripción del modelo atmosférico*

Un modelo atmosférico es una descripción matemática construida sobre la base del conjunto de ecuaciones diferenciales que gobiernan los movimientos en la atmósfera. Estas ecuaciones son no lineales y, por lo tanto, imposibles de resolver exactamente, así que se recurre a métodos numéricos que brindan soluciones bastante aproximadas. Además, debido a la complejidad y al exceso de eventos a tomar en cuenta como turbulencias, difusión, radia-

ción, intercambio de calor, tipo de suelo, orografía, entre otros (ver Figura 3); los modelos suelen recurrir a parametrizaciones que simplifican los cálculos. Estas parametrizaciones incluyen parámetros numéricos para representar fenómenos que no se pueden modelar explícitamente debido a que todavía no se entienden lo suficientemente bien como para representarlos en formato de ecuación, o bien porque no se cuenta con los datos apropiados.

Es necesario mencionar que un modelo atmosférico para la zona ecuatorial es un proyecto poco explorado, no sólo porque no ha sido de interés para países localizados en zonas más septentrionales; sino porque la atmósfera ecuatorial es más gruesa, además que existen fenómenos, como la fuerza de Coriolis<sup>2</sup>, que se comportan de manera diferente.

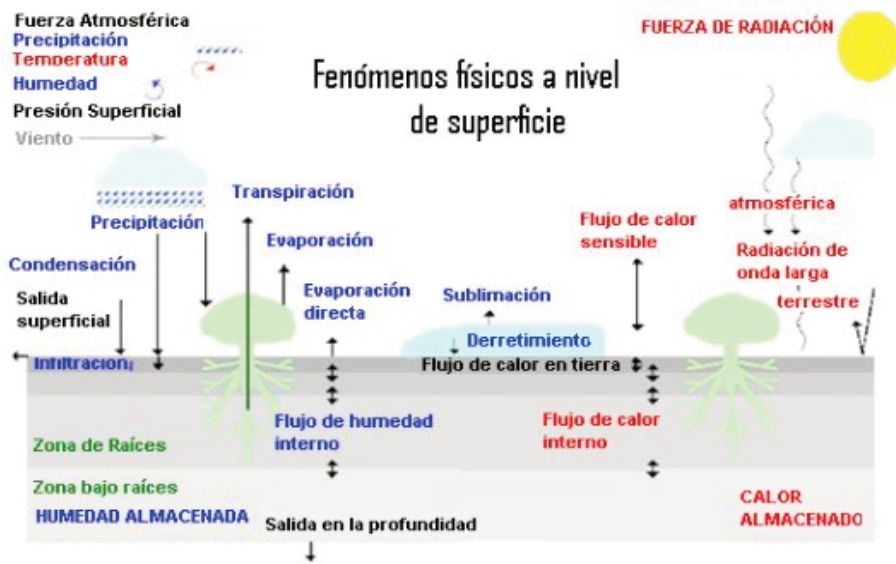
De esta manera, y a pesar de las herramientas numéricas y el asombroso poder de cálculo de los supercomputadores, la naturaleza de la atmósfera se escapa de todas las

---

1 Los modelos atmosféricos se clasifican por su escala espacial en Globales, Regionales y de Mesoescala, los primeros involucran al globo terráqueo, con una precisión de aproximadamente 100 km, los Regionales cubren por lo general de 1/4 a 1/8 de Hemisferio terrestre con una resolución de 100 a 20 km, mientras que los modelos de mesoescala trabajan con una apreciación de menos de 45 km.

2 Fuerza ficticia que genera la forma espiralada de huracanes y tormentas, que en las latitudes ecuatoriales no tiene este comportamiento.

Figura 3  
Modelo atmosférico a nivel de superficie, se especifican algunos, de los muchos fenómenos a tomar en cuenta



Fuente: Traducción del original COMET

ecuaciones y métodos numéricos inventados debido a su comportamiento caótico<sup>3</sup>, que ponen límite a la capacidad de realizar pronósticos a mediano y largo plazo (ver Figura 4)

y que en su mayoría, después de los tres días (en el mejor de los casos siete días), adoptan un comportamiento inestable que no refleja la realidad de la atmósfera.

3 Según Edwar Lorenz, el clima atmosférico se describe por ecuaciones no lineales aunque bien definidas, conociendo sus condiciones iniciales se podría conocer la predicción del clima en un futuro cercano. Sin embargo, al ser la atmósfera un sistema caótico, la más mínima diferencia en estas condiciones iniciales hace que el sistema evolucione de manera totalmente distinta. A este fenómeno se le conoce también como "efecto mariposa", en donde se hace alusión al proverbio en el que "el aleteo de una mariposa puede crear delicados cambios en las condiciones iniciales, los cuales durante el curso del tiempo podrían modificarse hasta hacer que ocurra algo tan dramático como un tornado".



Figura 4

Conducta de los pronósticos que intentan describir la atmósfera, se aprecia que pasados los tres días, todo pronóstico se desvía del valor verdadero de los parámetros atmosféricos.



Fuente: COMET

El proceso de caracterizar o "reconstruir" la atmósfera ecuatorial es bastante arduo, debido al comportamiento inestable del sistema estudiado. Para ello se analizan los datos históricos, mes a mes, desde hace 30 años, reconstruyendo los diferentes niveles troposféricos, es decir de la atmósfera baja, con el programa WRF (Weather Research Forecast Model).

WRF ha sido desarrollado tanto para la investigación atmosférica como para la predicción del tiempo. Es el resultado de la colaboración del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA- NCEP) y la Comunidad de Investigación Meteorológica de los EE.UU. Es un modelo no hidrostático, que a diferencia de

muchos, sí toma en cuenta los movimientos verticales que se dan en la atmósfera y permite una asimilación cuatridimensional de los datos (las tres dimensiones del espacio más el tiempo).

Además, trabaja sobre un sistema operativo basado en Unix, Linux Fedora y compiladores de C++ y Fortran de Intel o Portland Group (Intel: ifort, icc);

lo que permite que cualquier comunidad científica se integre al trabajo de manera libre, y con lenguaje que permite la asimilación de las ecuaciones físicas de manera casi directa sobre los procesadores.

Este modelo se alimenta tanto de datos satelitales, que se ponen a disposición por la NOAA en la red,

como de estaciones meteorológicas o de radiosondeos<sup>4</sup>, que nos permitan verificar la validez de los modelos adoptados.

La verificación del modelo atmosférico reconstruido con WRF se realizará gracias a los datos entregados por los radiosondeos efectuados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI y la FAE, bajo la coordinación del equipo de trabajo de la EPN y la UPS. Estos radiosondeos consisten en el lanzamiento de globos meteorológicos llenos de helio con sensores que al ir ascendiendo entregan información de la magnitud y dirección del viento, así como datos de temperatura.

Desde la integración al Grupo Modelo Atmosférico, de la Universidad Politécnica Salesiana, sólo han transcurrido tres meses hasta la fecha tiempo que, a pesar de su brevedad, ha arrojado resultados que resaltan la validez del modelo y la metodología escogida. Sin embargo, hay que resaltar que para entregar resultados definitivos, es necesario el análisis de al menos 10 años de datos climáticos ecuatoriales para lograr índices de confiabilidad aceptables.

## Bibliografía

- BUNGE, M.  
1997 *La causalidad*, Editorial Sudamericana.
- DOMÍNGUEZ, E.  
2009 *Modelación matemática: Una introducción al método*. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. Disponible en línea: <<http://mathmodelling.googlepages.com/>>
- GARREAU, R.  
2008 *Valor económico del pronóstico del tiempo y la predicción del clima*. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- KATZ, R. y A. Murphy  
1997 *Economic Value of Weather and Climate Forecast*. Cambridge: University Press, ISBN-13: 978-0521434201
- MANNEVILLE, P.  
2004 *Instabilités, Chaos et Turbulence*, Editions de l'Ecole polytechnique.
- SOKAL, A., y J. Bricmont  
1999 *Imposturas intelectuales*. Madrid: Paidós.
- TARANTOLA, A.  
2006 *Popper, Bayes and the inverse problem*, Nature, Physics, Vol. 2, August 2006.

---

4 Estos radiosondeos son efectuados por el INAMHI, con sondas acopladas a globos aerostáticos, que al ir ascendiendo entregan los datos requeridos con señales telemétricas. Al lograr su altura máxima y cumplir su objetivo la sonda finalmente se destruye.

Modelos numérico-computacionales

TARANTOLA A. y B. Valette

1982a *Inverse Problems=Quest for Information*. J. Geophysics, 50, 159170.

TARANTOLA A. y B. Valette

1982b *Generalized non linear inverse problems solved using the least-squares criterion*. Rev. Geophysics, 20, 219232.