

NUEVOS MODELOS LAGRANGEANOS PARA EL TRANSPORTE DE CONSTITUYENTES EN LA ATMÓSFERA

Pablo M. Factorovich^a, Pablo M. Jacovkis^a y Pablo O. Canziani^b

^a*Departamento de Computación, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Pabellón I - Ciudad Universitaria, 1428 Buenos Aires, Argentina, compuba@dc.uba.ar,*

<http://www.dc.uba.ar>

^b*Programa de Estudios de Procesos Atmosféricos en el Cambio Global, Universidad Católica Argentina, Cap. Gral Ramón Freire 183, Buenos Aires, Argentina, pepacg@uca.edu.ar, [http:](http://www2.uca.edu.ar/esp/sec-investigacion/esp/page.php?subsec=pepac)*

[//www2.uca.edu.ar/esp/sec-investigacion/esp/page.php?subsec=pepac](http://www2.uca.edu.ar/esp/sec-investigacion/esp/page.php?subsec=pepac)

Palabras clave: Trayectorias atmosféricas, dinámica de fluidos, algoritmos paralelos, modelos isentrópicos

Resumen. En el presente trabajo desarrollamos modelos computacionales bidimensionales y tridimensionales para el problema de transporte de trazadores en la atmósfera. Éstos son modelos de trayectorias lagrangianas y hemos programado versiones paralelas y seriales de los mismos. A fin de estimar valores intermedios para una grilla de la atmósfera hemos utilizado diversos métodos de interpolación, y para calcular las trayectorias empleamos variados métodos de resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias. Además se presenta una aplicación práctica del modelo en un problema real.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte de constituyentes o trazadores en la atmósfera es un problema muy importante en las Ciencias de la Atmósfera, debido a sus múltiples aplicaciones, que van desde el estudio de la evolución del agujero de ozono hasta el análisis del impacto de la contaminación producida por la acción del hombre.

El estudio del transporte de trazadores consiste en analizar el desplazamiento en la atmósfera de distintos elementos, tales como los gases CFC (un conocido contaminante), el ozono (O_3), partículas finas denominadas aerosoles, etc. De acuerdo a su naturaleza los constituyentes se dividen en dos grupos: dinámicos y químicos. Los primeros son aquéllos cuyo tiempo de vida, antes de que una reacción fotoquímica los modifique, es mucho mayor al tiempo que les lleva recorrer una gran distancia, como por ejemplo la distancia del Ecuador a los polos. Por oposición, los segundos son aquéllos con un tiempo de vida corto en términos relativos. Ejemplos de los primeros pueden ser el metano (CH_4) y de los segundos el O_3 [Holton \(1998\)](#).

Para estudiar la circulación de los constituyentes suelen utilizarse modelos computacionales atmosféricos. Los de trayectorias lagrangianas que trataremos aquí suponen que el aire se compone de parcelas infinitesimales que no interactúan entre sí y se desplazan a través de la atmósfera por acción de los vientos. Utilizando estos supuestos, los modelos realizan simulaciones del desplazamiento de estas parcelas a lo largo del tiempo conformando trayectorias.

Dentro de los modelos de trayectorias lagrangianas los más importantes son el modelo isentrópico o bidimensional y el modelo tridimensional, que desarrollaremos luego de explicar brevemente algunos conceptos atmosféricos básicos.

1.1. Conceptos atmosféricos básicos

La atmósfera se divide convencionalmente en capas de acuerdo a la estructura vertical del campo de temperaturas y de los distintos procesos físico-químicos que ocurren en ella. Estas capas son la troposfera, la estratosfera, la mesosfera y la termosfera, separadas entre sí por la tropopausa, la estratopausa y la mesopausa, respectivamente ¹.

La troposfera se extiende desde la superficie de la tierra hasta alrededor de 12 km de altura. En esta capa la temperatura se caracteriza por disminuir en relación con la altura, siendo por lo tanto inestable, y dando lugar a procesos dinámicos de intercambio *convectivo* entre la superficie y la parte superior de la troposfera: el aire caliente en la superficie se vuelve menos denso que el aire frío sobre él, generando un movimiento vertical (convección) que induce la formación de nubes y otros fenómenos climáticos. Por consiguiente, los gases de traza de vida media larga tienden a estar bien mezclados en la troposfera.

La estratosfera se halla más allá de la troposfera, separada por la tropopausa; se extiende aproximadamente entre los 12 y los 50 km de altura. Aquí la temperatura crece con la altitud, debido a la absorción de radiación solar ultravioleta (UV) por parte de la capa de ozono (con un máximo de concentración en torno a la región media de la estratosfera, a unos 30 km de altura, que varía según la definición de concentración que se utilice), dando lugar entonces a condiciones atmosféricas estables *estratificadas*. Se utiliza este adjetivo para indicar que los movimientos verticales son muy lentos, y los procesos meteorológicos sinópticos diarios (de 1000 a 5000 km y de 3 a 8 días de duración) sólo inciden de forma evanescente en la estratosfera hasta unos 20 a 25 km por encima de la superficie [Canziani y Legnani \(2003\)](#).

Un problema de transporte de gran complejidad es el que se da a través de los llamados

¹Las pausas (tropopausa, estratopausa y mesopausa) son regiones de la atmósfera que se caracterizan porque en ellas se producen cambios en el signo del gradiente de temperatura con la altura.

“filamentos”. Éstos son zonas delgadas de alta vorticidad potencial² que, extendidas en el eje vertical, atraviesan la tropopausa y sirven como vía para el intercambio entre la troposfera y la estratosfera.

1.1.1. Temperatura Potencial

Una variable comúnmente utilizada en meteorología es la *temperatura potencial*. Ésta representa la temperatura que tendría una parcela de aire al ser desplazada hasta alcanzar una presión de referencia, habitualmente los 1000 mb que se registran al nivel del mar. Más formalmente, la temperatura potencial θ se define como

$$\theta = T \left(\frac{p_s}{p} \right)^\kappa, \quad (1)$$

donde T y p son la temperatura y presión que presenta la partícula antes de comenzar a ser desplazada, p_s la presión de referencia ya mencionada y κ una constante. La temperatura potencial es una cantidad conservada para desplazamientos adiabáticos en la atmósfera. Como en la atmósfera –particularmente en la estratosfera– los movimientos de gran escala no convectivos son aproximadamente adiabáticos, las parcelas de aire se mueven, en primera aproximación, sobre superficies de temperatura potencial constante.

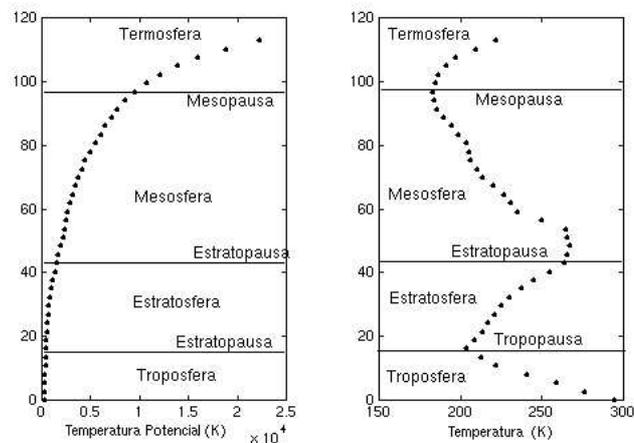


Figura 1: Perfiles de temperatura y temperatura potencial

Si la temperatura potencial crece con la altura, una celda que sufre un desplazamiento vertical es forzada a volver a su anterior posición. Esto produce oscilaciones alrededor de su nivel de equilibrio, y por eso este tipo de atmósfera se llama establemente estratificada. En una atmósfera establemente estratificada la temperatura potencial puede usarse como coordenada vertical, dado que es una función monótona creciente de la altura cómo se puede ver en la Figura 1 [Andrews et al. \(1987\)](#).

²La vorticidad potencial es una medida de la velocidad de rotación de un fluido sobre sí mismo. Las zonas de alta vorticidad suelen establecer barreras para el intercambio.

1.1.2. Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, inodoro, insípido y no irritante, pero es interesante desde varias perspectivas: es un indicador de la calidad del aire, es un sumidero de radicales libre hidroxilo (OH) y es un trazador atmosférico con una vida relativamente larga, que actúa como un indicador del transporte de contaminación a escala global Galanter et al. (2000). Aunque en altas concentraciones (desde 100 ppm) afecta la vida humana Raub (1999), éstas no se alcanzan en la atmósfera. En el hemisferio sur la quema de biomasa³ es la fuente más importante de CO . En Sudamérica, la quema de combustibles fósiles puede además llevar la concentración de CO a altos niveles en y alrededor de las ciudades más importantes. Otras fuentes, como la oxidación de hidrocarburos biogénicos, la oxidación del CH_4 y las emisiones oceánicas son de menor importancia y sobre todo más difusas. El efecto invernadero que produce el CO por sí mismo es despreciable. Pero a través de sus relaciones químicas con el OH y el CH_4 , y debido a la producción de O_3 troposférico en presencia de altas concentraciones de diversos óxidos de nitrógeno, puede ser a largo plazo un forzante importante del clima Daniel y Solomon (1998).

2. MODELOS ATMOSFÉRICOS

Los modelos de trayectorias consideran a la atmósfera como un conjunto de partículas infinitesimales que se desplazan por acción de las distintas fuerzas físicas y que, por no tener masa, pueden superponerse y no colisionan.

Esencialmente los modelos lagrangianos resuelven la siguiente ecuación diferencial ordinaria, donde V es el vector velocidad y X el vector posición:

$$\frac{dX}{dt} = V(X(t), t). \quad (2)$$

Los modelos corren sobre una región cubierta por una malla de datos meteorológicos que se encuentre delimitada por un par de latitudes, un par de longitudes, una presión mínima y una presión máxima, y la simulación se lleva a cabo entre un instante inicial y un tiempo final. No todos estos valores constituyen verdaderos límites: por ejemplo, si la malla esta depositada sobre todo el mundo (latitudes entre $90^\circ S$ y $90^\circ N$ y longitudes entre 0° y 360°) sólo la altura⁴ sigue conformando verdaderos límites. La ecuación 2 debe resolverse numéricamente, a lo largo de sucesivos tiempos de cálculo, para cada partícula que en el instante inicial se encuentra en un punto de la malla. Es decir, cada partícula es advectada numéricamente en cada tiempo de cálculo.

En el modelo, cada partícula es representativa de una celda (a la cual pertenece la correspondiente partícula) y usaremos ambos términos indistintamente. Cuando una celda alcanza el borde de la malla no se puede continuar advectándola, aunque no se haya llegado al tiempo final de cálculo.

Presentamos ahora los modelos lagrangianos más comúnmente utilizados.

- El modelo tridimensional supone que las celdas de la atmósfera se desplazan por la acción de los vientos, que se expresan en tres campos: meridional, zonal y vertical. El primero

³La quema de biomasa implica la quema de vegetación viva o muerta por medio de incendios, incluyendo pastizales, bosques y residuos agrícolas.

⁴Usaremos de aquí en más "altura" como sinónimo de "presión" y viceversa, ya que la primera crece monótonamente con respecto a la segunda para cualquier par latitud-longitud.

representa el desplazamiento a través de un mismo meridiano, el segundo a lo largo de una única latitud y el tercero con respecto a una perpendicular a una tangente de la superficie terrestre.

- El modelo de superficies isentrópicas supone que todas las celdas conservan su temperatura potencial constante al moverse y por lo tanto se desplazan por la acción de los vientos en latitud y longitud, pero siempre manteniéndose en una misma superficie isentrópica. Esta es una aproximación particularmente utilizada en troposfera superior y estratosfera ya que la temperatura potencial suele ser conservada gracias a que, por lo general, los procesos que allí ocurren son adiabáticos.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Desarrollamos un programa que permite la simulación de acuerdo a ambos modelos de trayectorias mencionados: el bidimensional y el tridimensional, y también de acuerdo a un modelo mixto. Los objetivos eran tanto poder compararlos como brindar tres herramientas para ser utilizadas por un grupo de cambio climático del Conicet dirigido por el Dr. Pablo O. Canziani. Este programa debía recibir como datos de entrada distintos campos atmosféricos y posiciones iniciales para diversas celdas y calcular las trayectorias seguidas por ellas durante un intervalo de tiempo, hacia el futuro o hacia el pasado. El cálculo hacia el futuro permite predecir situaciones que se presentarán; el cálculo hacia el pasado permite detectar las causas de situaciones existentes. A continuación enumeramos los problemas de implementación que hemos precisado abordar y la forma en que los resolvimos.

- Dados los campos atmosféricos, para un determinado período de tiempo, poder predecir el movimiento de una celda en un intervalo de tiempo incluido en dicho período. Esencialmente la solución a este problema consistirá en la resolución de la ecuación diferencial 2, ya que tenemos la derivada del movimiento (representada por los campos de vientos) y lo que buscamos es obtener las posiciones por las que pasó una celda a raíz de dicho movimiento. En este caso la condición inicial estará dada por la posición original de la celda en el período a evaluar. Nótese que, dependiendo del modelo, este desplazamiento puede ser en dos o tres dimensiones. Los métodos implementados fueron: método de Runge-Kutta de cuarto orden; método de Petterssen fijo y método de Petterssen variable. El primero de estos es un método muy conocido, mientras que los otros dos son variantes del método iterativo presentado en [Petterssen \(1940\)](#).
- Dada una malla discreta con datos sobre campos atmosféricos, obtener una buena aproximación de los mismos para las coordenadas intermedias a los puntos de la malla provista. En efecto, las partículas que en el instante inicial estaban en un punto de la malla no tienen por qué estar en otro punto de la malla en los instantes de cálculo siguientes, y por consiguiente es necesario aproximar sus valores sobre la malla. Implementamos cinco tipos de interpolación que pueden ser aplicados en cada una de las cuatro posibles coordenadas en que se disponen los datos (latitud, longitud, presión y tiempo): lineal, cúbica con 4 y 8 puntos e interpolación por Fourier con 4 y 8 puntos.
- Desarrollar, para el modelo bidimensional, un método que permita desplazar parcelas sobre una superficie isentrópica eficientemente. La solución implementada consistió en desplazar a la parcela en intervalos temporales cortos, manteniendo su valor de presión y buscando al final de cada intervalo a qué nivel de presión se encontraba “su” superficie

isentrópica para el nuevo par latitud-longitud hallado. Esto último lo realizamos mediante la aplicación del método de la secante a la función (cuyo cero queremos obtener)

$$f(p) = T(\lambda, \phi, p) \left(\frac{p_s}{p} \right)^\kappa - \theta$$

que se basa en la ecuación 1.

- Implementar métodos automáticos de estimar numéricamente la estabilidad del modelo. Más precisamente, queríamos contar con herramientas para evaluar la propagación de incertezas ante pequeños errores producidos en la posición de una celda, originados a su vez por cálculos previos imprecisos. Para ello, cerca de cada celda a evaluar colocamos partículas a una pequeña distancia de dicha celda. La idea es suponer que estos “satélites” son en realidad la partícula principal, sólo que ubicada en forma inexacta debido a errores previos de cálculo. La estabilidad del sistema estará dada por el crecimiento de la distancia entre la celda y sus satélites a lo largo del tiempo de advección: a mayor distancia, mayor inestabilidad del modelo.
- Realizar una implementación paralela eficiente, tanto en términos de precisión de la salida otorgada por el programa como de tiempo y espacio necesarios para ejecutar el mismo. Desarrollaremos este punto a continuación.

3.1. Implementación paralela

Para reducir el tiempo de ejecución del modelo realizamos una implementación paralela que precisaba distribuir los datos a procesar, las posiciones de las partículas a lo largo del tiempo y su temperatura potencial (incluyendo aquéllas destinadas a medir el error) y, además, el cómputo entre todos los procesadores para resolver los problemas comentados en esta sección.

Consideramos entonces distintas formas de distribuir los datos y la carga de procesamiento con el objetivo de maximizar el tiempo de cómputo y minimizar los mensajes entre los procesadores sin agotar la memoria requerida por los mismos. Las opciones consideradas fueron las siguientes:

1. Separación temporal de datos.

En este esquema se divide el tiempo de advección en períodos de igual longitud entre los procesadores y, por consiguiente, los datos atmosféricos correspondientes a dichos intervalos. El procesador “encargado” del primer período de tiempo comienza tomando una celda y la advecta hasta el momento en que finaliza su intervalo asignado, la envía al siguiente procesador y toma otra celda. El siguiente procesador toma la partícula y la advecta hasta el momento en que finaliza su intervalo asignado, se la pasa al siguiente procesador y recibe la segunda celda procesada por el primero. De esta forma, se forma una tubería (o *pipeline*) entre los procesadores trabajando en forma similar a la producción en serie.

Es importante notar que en la memoria de cada nodo del *cluster* debe existir cierta redundancia en los datos atmosféricos, de modo que para aquellos momentos cercanos a los extremos del intervalo que administra dicho procesador, éste tenga suficientes puntos en su malla que le permitan realizar dicha interpolación.

El desperdicio de tiempo de procesador usando esta opción es muy bajo si se advectan muchas celdas en relación con la cantidad de procesadores. Está acotado, en el primer

paso de la tubería, a $(p - 1) * t$ donde p es la cantidad de procesadores y t el tiempo que le demora la advección de un celda, ya que sólo se usa un procesador. Generalizando y tomando en cuenta que sobre el final de la ejecución del programa no quedan celdas por procesar para los primeros procesadores y la tubería se vacía paulatinamente en forma inversa a como fue llenada, tenemos que el costo está acotado por

$$\sum_{i=1}^p (p - i)t + \sum_{i=1}^p (p - i)t = tp(p - 1).$$

Si, como es de esperar, p es mucho menor a la cantidad de partículas, este costo es despreciable.

Por otra parte, la cantidad de mensajes necesaria para enviar los datos de las celdas es $(p - 1)c$ donde c es el espacio ocupado por todas las partículas; y para la transmisión de las partículas distribuidas a un mismo procesador para realizar las estadísticas, $p - 1$ mensajes de longitud $\frac{c}{p}$. En total, $(p - 1)c\frac{(p+1)}{p}$.

2. Separación espacial por altura de los datos.

Aquí la idea es distribuir el espacio (separando por altura) en forma equitativa entre los distintos procesadores. Luego cada partícula comenzará a ser adveccionada, de acuerdo a su altura inicial, por el procesador que contiene los respectivos datos atmosféricos.

En caso de no haber muchos movimientos convectivos, esta estrategia debería generar relativamente pocos mensajes ya que sólo unas pocas partículas pasarían de una zona de altura a otra. En caso contrario se estaría produciendo un gran número de mensajes. La cantidad mínima de mensajes está dada por la transmisión de las partículas distribuidas a un mismo procesador para realizar las estadísticas, es decir, $p - 1$ mensajes de longitud $\frac{c}{p}$.

También en este caso es necesaria cierta redundancia en los datos, primero para poder interpolar como en el caso del tiempo, pero además para poder tener un cierto resguardo (o *buffer*), que le permita a una partícula que oscila en la frontera entre los espacios administrados por dos procesadores no estar viajando permanentemente entre las dos máquinas. De esta forma, no sólo se solaparían los datos atmosféricos de dos procesadores (como en el caso del tiempo), sino también los espacios donde estos adveccionan partículas.

El desperdicio de tiempo de cómputo depende de cuán distribuidas estén las celdas en la altura del espacio de datos atmosféricos, tanto al comienzo como durante todo el tiempo de advección. Nótese que esto puede originar un importante desperdicio de cómputo ya que, aún sabiendo a priori en que espacio se desplazarán las partículas, éstas pueden concentrarse y/o dispersarse durante el tiempo de advección sobrecargando algunos procesadores y dejando tiempo latente en otros.

3. Separación espacial por latitud y/o longitud.

Este caso es similar al anterior pero se depende aún más de la estabilidad de las partículas en sus posiciones de latitud (suele suceder) y longitud (difícilmente ocurre).

4. Distribución de las celdas.

En este caso duplicamos los datos atmosféricos en todos los procesadores, distribuimos las partículas equitativamente entre todos ellos y las advectamos por separado para finalmente reunir las en un mismo procesador con el objetivo de realizar las estadísticas correspondientes al conjunto de celdas. Por lo tanto, la cantidad de mensajes es igual a $p - 1$ mensajes de longitud $\frac{\varepsilon}{p}$ (nótese que se trata de la cota mínima para el segundo caso). Ya que en este caso todos los procesadores advectan la misma cantidad de partículas (salvo redondeo) y durante el mismo tiempo, no debería haber prácticamente desperdicio de tiempo de cómputo.

La memoria necesaria para almacenar 10 días de datos atmosféricos (no se suelen hacer ejecuciones por más de ese tiempo ya que se pierde demasiada precisión) es de aproximadamente 890 MB y por lo tanto cabe en una memoria de 1 GB, suficiente para las computadoras con que se contó para realizar las ejecuciones. Este cálculo se apoya en las siguientes consideraciones:

- cada dato se almacena como un punto flotante de simple precisión (*float* de C++), es decir ocupa 4 bytes;
- los campos atmosféricos necesarios para ejecutar el modelo son la temperatura, el calor diabático y los vientos meridionales, zonales y verticales;
- los datos para cada campo se distribuyen en una malla con puntos separados en un grado de latitud y uno de longitud, dando 65160 puntos por nivel de presión en todo el globo;
- los niveles de presión disponibles son 18;
- las muestras de datos se toman cada 6 horas.

Dado que contamos con procesadores de 2 GB, se satisfacen los requerimientos de memoria.

Podemos suponer además que, aunque aumente el volumen de datos atmosféricos, el programa seguirá siendo útil ya que se espera que aumente con aún mayor velocidad la capacidad de almacenamiento. Como ejemplo de esto, digamos que hace 15 años una malla estándar para 10 días ocupaba aproximadamente 20 MB, es decir que la disponibilidad de datos creció 45 veces aproximadamente. Por otra parte, la capacidad de almacenamiento, según la ley de Moore aplicada a la memoria, se duplica cada dos años, de modo que crece más de 128 veces en 15 años. A menos que el crecimiento de la densidad de las mallas de datos siga una función superexponencial o que la ley de Moore no se cumpla de aquí en más, los recursos de memoria deberían ser suficientes para contener los campos atmosféricos en el futuro.

Optamos por esta última opción ya que prácticamente no desperdicia tiempo de ejecución, realiza pocos mensajes y no agota los recursos de memoria.

El lenguaje de programación elegido para el desarrollo fue el C++ por la eficiencia en la ejecución de su código y por respetar a grandes rasgos el paradigma de programación orientada a objetos, con las ventajas que esto provee. Para realizar la implementación en paralelo se utilizó el método MPI (*Message Passing Interface*) por ser un estándar.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

El programa desarrollado ya fue utilizado con el modelo tridimensional para el estudio de la quema de biomasa. Durante el año 2004, nuestro programa fue utilizado por el grupo de Atmósfera Media del CONICET –dirigido por el Dr. Pablo Canziani– y en particular por Diana Mielnicki, quien desarrolló su tesis de licenciatura en el transporte de contaminantes producto de quema de biomasa [Mielnicki \(2005\)](#). El objetivo de su trabajo era poder determinar el origen de altas concentraciones de contaminantes detectados en la Argentina en distintos momentos de los últimos años.

Para realizar dicho trabajo se utilizaron datos satelitales de distintas fuentes. Debido a que se depende de la cobertura del satélite (que a su vez depende de la órbita del satélite y de la forma de medición del instrumento), la hora de paso, la nubosidad, la hora local (diurna o nocturna), no siempre están disponibles las mediciones de todos los instrumentos, y es necesario hacer una combinación de los distintos datos. Por lo tanto estas observaciones representan un piso de lo que realmente ocurrió. El CO se mide desde marzo de 2000 con el MOPITT (*Measurements Of Pollution In The Troposphere*) a bordo del satélite Terra de la NASA. Aquí se utilizan las concentraciones en 850 mb, por ser las más representativas del transporte de los productos de la quema de biomasa en Sudamérica. Como fuente de focos de incendios se utilizaron los datos del ATSR (*Along-Track Scanning Radiometer*) a bordo del satélite ERS-2 de la Agencia Espacial Europea, aunque debido a que se cubre la superficie cada 3 días –y a la detección nocturna– subestiman ampliamente la cantidad de incendios. Los datos de detección de incendios del MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*) tiene una mejor cobertura; este instrumento se encuentra a bordo de dos satélites, el Terra y el Aqua. También se utilizaron los datos del AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo del NOAA-12 de la NASA. En todos los casos la resolución es de 1 km^2 , aunque el tamaño mínimo de los incendios detectados es de 50 a 100 m^2 , según las condiciones. Los aerosoles finos, con radios menores a $0,5 \mu\text{m}$, se forman directa o indirectamente por procesos de combustión, tanto de combustibles fósiles como de biomasa, mientras que las partículas gruesas, con radios de 1 a $10 \mu\text{m}$, son comúnmente polvo o aerosoles marinos, de origen natural [Kaufman et al. \(2002\)](#). Actualmente es posible diferenciar satelitalmente los aerosoles finos de los gruesos. Aquí se utilizan las mediciones de espesor óptico de aerosoles totales del MODIS, que en esta región de Sudamérica están casi completamente determinadas por los aerosoles finos [Mielnicki et al. \(2005\)](#). También se utiliza el índice de aerosoles del TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) de la NASA. Para el cálculo de trayectorias se utilizó el modelo de advección tridimensional, utilizando los productos ERA 40 de $2,5^\circ$ de resolución del ECMWF (*European Center for Medium-range Weather Forecasting*), interpolación cúbica en tiempo y espacio e integración por el método de Petterssen fijo. Esto último se debió a que según varias observaciones realizadas todos los métodos mostraron ser igualmente estables (al menos para intervalos muy cortos de separación como los usados) y el método de Petterssen fijo se perfiló como el más eficiente en cuanto a tiempo de ejecución. Sin embargo, queda como trabajo pendiente comprobar que estas afirmaciones son válidas en general y sobre todo cómo impacta en el tamaño de los intervalos usados.

El siguiente fue uno de los cuatro casos estudiados en [Mielnicki \(2005\)](#). El 29 de setiembre de 2000, en base a mediciones satelitales, se registraron altas concentraciones de CO en el noreste argentino: al sur de 28° S hubo más de 500 mediciones individuales del MOPITT superiores a 150 ppbv (partes por millardo), con un máximo de 320 ppbv (Fig. 2). Aunque se produjeron numerosos incendios en la zona central de Argentina los días anteriores (el NOAA-12 detectó,

utilizando imágenes satelitales, 367 focos de incendios el 27/9 y 258 el 28/9), el día 29 la cantidad de incendios disminuyó (105 focos) y éstos se produjeron al oeste de la zona afectada por el CO. Por lo tanto, la alta concentración de CO debía estar originada por un fenómeno de transporte.

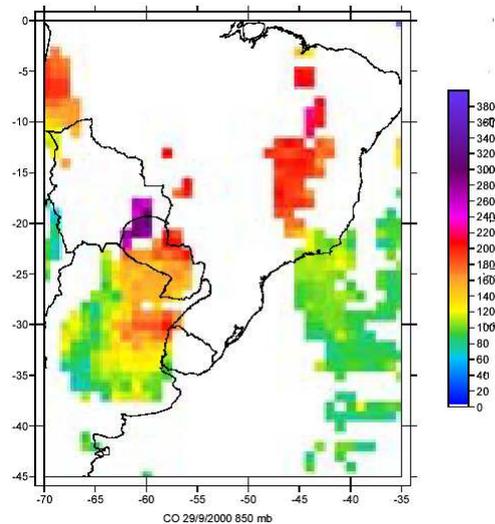


Figura 2: Concentraciones de CO (ppbv) en 850 mb el 29/9/2000. Datos MOPITT.

Utilizando nuestro programa bajo el modelo tridimensional, se realizó el cálculo de las trayectorias hacia atrás para determinar el origen de la masa de aire contaminada. Para niveles de presión finales mayores a 850 mb, se encontró que el aire provino del este de Brasil desde baja altura (Fig. 3 a). Para niveles finales de 850 mb, se produjo una convergencia sobre la frontera de Brasil y Paraguay de aire proveniente de zonas con alto número de incendios en Brasil y Bolivia el 26/9/2000, y luego una corriente en chorro hacia el sur (Fig. 3 b).

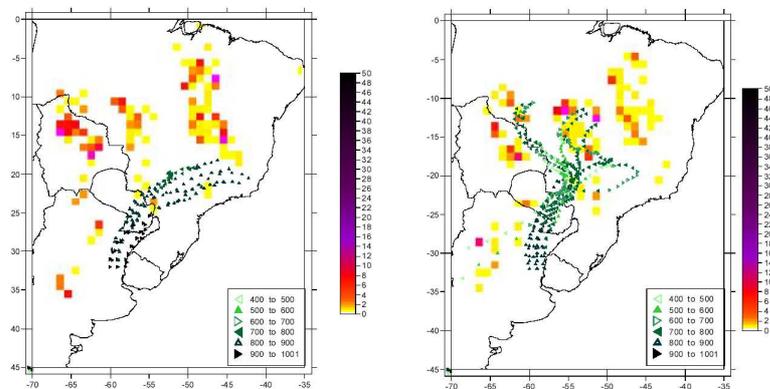


Figura 3: Trayectorias hacia atrás del 29/9/2000 15 UTC, desde la zona 31 a 32 S, 58 a 60 W; a) 3 días desde 900-950 mb, cantidad de incendios ATSR desde el 26 al 28/9/2000; b) 6 días desde 850 mb, cantidad de incendios ATSR desde el 22 al 24/9/2000.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un programa que permite utilizar múltiples modelos de transporte de trazadores en la atmósfera, métodos de interpolación y métodos de resolución de una ecuación diferencial ordinaria. En particular, la implementación del procesamiento paralelo en un cluster ha resultado muy eficiente, reduciendo drásticamente su tiempo de ejecución. El programa se usó exitosamente, además, para atacar problemas reales.

REFERENCIAS

- D. Andrews, J. Holton, y C. Leovy. *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press, 1987.
- P.O. Canziani y W.E. Legnani. Tropospheric-stratospheric coupling: Extratropical synoptic systems in the lower stratosphere. *Quart. J. Roy Meteorol. Soc.*, 129:2315–2329, 2003.
- J.S. Daniel y S. Solomon. On the climate forcing of carbon monoxide. *Journal of Geophysical Research*, 103:13249–13260, 1998.
- M. Galanter, H. Levy II, y G.R. Carmichael. Impacts of biomass burning on tropospheric CO, NO_x and O₃. *Journal of Geophysical Research*, 105:6633–6654, 2000.
- J. Holton. *Introduction to Middle Atmosphere*. Instituto Nacional de Educación Técnica, 1998.
- Y.J. Kaufman, D. Tanré, y O. Boucher. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419:215–223, 2002.
- D.M. Mielnicki. Quema de Biomasa y transporte de contaminantes en la cuenca del Paraná y alrededores. Tesis de licenciatura, Dpto. Cs. de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA, Argentina, 2005.
- D.M. Mielnicki, P.O. Canziani, J. Drummond, y J.P. Skalany. La quema de biomasa en sudamérica vista desde el espacio. *CONGREGMETIX 2005b*, 2005.
- S. Petterssen. *Weather Analysis and Forecasting*. McGraw-Hill Book Company, 1940.
- J.A. Raub. Health effects of exposure to ambient carbon monoxide. *Chemosphere: Global Change Science*, 1:331–351, 1999.