

# ANÁLISIS MEDIANTE REDES NEURONALES DEL EFECTO PINATUBO SOBRE EL OZONO A ALTAS LATITUDES DEL HEMISFERIO SUR

M. A. Parodi<sup>(1,2)\*</sup>, H. A. Ceccatto<sup>(1,2)</sup> y R. D. Piacentini<sup>(1,2)</sup>

1 - Instituto de Física Rosario (IFIR) - CONICET- UNRosario  
27 de Febrero 210 bis - (2000) Rosario - Argentina

2 - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario  
Av. Pellegrini 250 - (2000) Rosario - Argentina  
e-mail: parodi@ifir.edu.ar

En el presente trabajo se presentan resultados de la pérdida de ozono en la banda de alta latitud del Hemisferio Sur 55°-60° S después de la erupción del Monte Pinatubo en Filipinas en Junio de 1991. Se entrenaron redes neuronales artificiales para predecir el comportamiento normal esperado del ozono en el período Junio 1991 - Abril 1993, usando datos del equipo satelital TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)/NASA. Las predicciones de la red óptima se comparan con las observaciones para determinar el efecto Pinatubo *neto*.

Los resultados obtenidos están en buen acuerdo con las predicciones del modelo 2-D dinámico-químico-radiativo de Rosenfield *et al.*, con un máximo deterioro de alrededor de -12% y similares perfiles de pérdida en el período del Agujero de Ozono de 1992. También se comprueba razonable concordancia con la reducción porcentual estimada en -9% a partir del modelo 2-D de Garcia-Solomon.

La anomalía en ozono caracterizada parece estar evidentemente producida por los aerosoles sulfatados generados por la erupción del Pinatubo, según se desprende de los datos de densidad de área superficial de aerosoles obtenidos por el satélite SAGE II en el período y latitud estudiados en este trabajo.

Los resultados de este análisis demuestran la capacidad de las redes neuronales para detectar y caracterizar anomalías en series de tiempo cuando ocurren eventos singulares.

In the present work results are presented of the ozone loss in the high Southern Hemisphere latitudinal band 55°-60° S after Pinatubo eruption in Philippines in June 1991. Artificial neural networks have been trained in order to predict the expected ozone behavior in the June 1991 - April 1993 period, using TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)/NASA data. The predictions made by the optimal network, are compared with observations in order to determine the *net* Pinatubo effect.

The results are in good agreement with predictions of the 2-D dynamic-chemistry-radiative model of Rosenfield *et al.*, with a maximum depletion of around -12% and similar loss variations in the 1992 ozone hole period. A rather good agreement was also obtained with the ozone depletion of -9% predicted by the 2-D Garcia-Solomon model. The characterized anomaly seems to be produced by the sulfate aerosol generated by the Pinatubo eruption, as it appears from the aerosol surface area density measured by the SAGE II satellite in the latitude and period studied in the present work.

The results of this analysis demonstrate the neural network ability to detect and characterize anomalies in time series with singular events.

## I. INTRODUCCIÓN

A fin de comprender la evolución espacio-temporal del ozono y otros gases traza se han desarrollado diversos modelos químicos, dinámicos y radiativos tales como el modelos bidimensional (2-D) de García y Solomon<sup>(1)</sup> y el tridimensional (3-D) de Douglass *et al.*<sup>(2)</sup>.

La potente erupción del Monte Pinatubo en Junio de 1991 en las Filipinas (latitud 15° N) produjo tal vez la mayor perturbación del siglo pasado en la química y dinámica estratosféricas<sup>(3)</sup>. Importantes anomalías negativas en niveles de ozono total fueron observadas a escala global en el período posterior a la erupción. Los modelos señalan su correlación con la química heterogénea en la superficie de los aerosoles sulfatados generados por el dióxido de azufre inyectado en la estratósfera por el volcán<sup>(3)</sup>. Entre los modelos utilizados se encuentran el modelo unidimensional de transferencia radiativa de Kinne *et al.*<sup>(4)</sup> y el modelo bidimensional dinámico-químico-radiativo de Brasseur y Granier<sup>(5)</sup>.

En el presente trabajo y a modo de comparación de los resultados obtenidos en el período posterior a la erupción, se utilizan los cálculos de las pérdidas globales de ozono total realizados con los modelos 2-D (latitud-altura) químico-dinámico-radiativos de Pitari y Rizzi<sup>(6)</sup> y de Rosenfield *et al.*<sup>(7)</sup>.

## II. DISTRIBUCIÓN ESPACIO - TEMPORAL DE AEROSOLES GENERADOS POR EL PINATUBO

La figura 1 muestra la distribución global de la densidad de área superficial de aerosoles medida por el satélite SAGE II, (Thomason *et al.*<sup>(8)</sup>, en WMO<sup>(3)</sup>, 1999). Puede verse claramente el notable aumento en la densidad de aerosoles en el período analizado en este trabajo (1991-1993), a alturas donde se encuentra aproximadamente la máxima concentración de ozono (entre 20 y 25 km) y afectando hasta latitudes muy altas en ambos hemisferios. Resulta evidente que la contribución de aerosoles del Pinatubo en la estratósfera es ampliamente superior a la de los otros volcanes

señalados en la gráfica. Incluso el volcán Hudson que hizo erupción en la latitud más próxima a la banda latitudinal estudiada y con una diferencia de pocos meses respecto al Pinatubo, no parece haber contribuido

significativamente con aerosoles sulfatados en niveles por encima de los 15 km de altura en el periodo estudiado, según concluyeron Pitts y Thomason<sup>(9)</sup>.

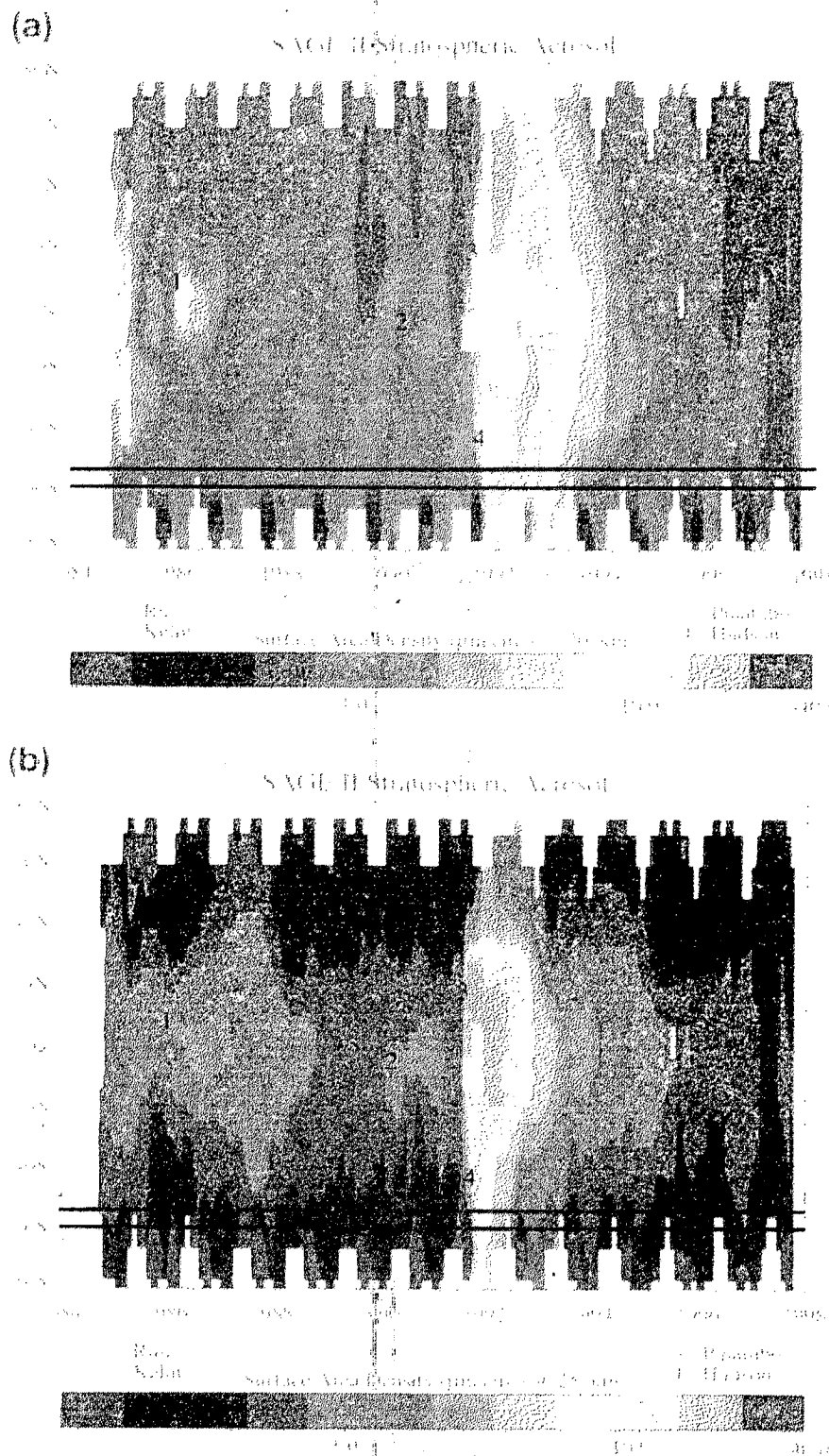


Figura 1. Densidad de área superficial de aerosoles medida por el satélite SAGE II, en función del tiempo y de la latitud, a alturas de 20 km (a) y de 25 km (b). Las zonas blancas indican falta de datos. La latitud y el tiempo de eventos volcánicos significativos están indicadas con los números en negro. Se ha indicado la banda 55°-60° S (Thomason et al.<sup>(8)</sup>, en WMO<sup>(3)</sup>).

### III. MODELOS PREDICTIVOS CON REDES NEURONALES

Los modelos químicos, dinámicos y radiativos mencionados más arriba pretenden la resolución del problema de la distribución en el espacio y en el tiempo de gases traza, basados en "primeros principios" que incluyen complejas relaciones entre variables dinámicas, transferencia radiativa y reacciones químicas, principalmente a nivel estratosférico.

Un enfoque alternativo del problema es el análisis estadístico de datos disponibles, ejemplificado por el modelo estadístico lineal de Randel y Cobb<sup>(10)</sup>.

Como otra opción frente a los modelos químico-dinámico-radiativos, las redes neuronales artificiales (RNA) ofrecen la posibilidad de un modelo no lineal que ha demostrado su eficacia predictiva de variables de interés geofísico.

Algunos ejemplos de su aplicación pueden encontrarse en el trabajo pionero sobre actividad solar de Weigend, Huberman y Rumelhart<sup>(11)</sup> y las posteriores actualizaciones de Calvo *et al.*<sup>(12)</sup> y Verdes *et al.*<sup>(13)</sup>; en la predicción de tormentas geomagnéticas (Lundstedt<sup>(14)</sup>, Lundstedt y Wintoff<sup>(15)</sup>) y en el pronóstico de la intensidad de monzones (Navone y Ceccatto<sup>(16)</sup>).

En particular, entre los diversos conceptos de redes neuronales existentes, se eligen habitualmente las redes multicapas de tipo *feed forward* para el análisis de series temporales cuya dinámica intrínseca es desconocida pero capaz de ser aprendida por el sistema a través de patrones de entrada-salida en el período de *entrenamiento*. Si el aprendizaje es exitoso la red podrá reproducir en su salida la dinámica de la serie ante la presentación de patrones de entrada que no pertenecen al intervalo de aprendizaje. Esta propiedad se conoce como *capacidad de generalización* de la red<sup>(17)</sup>.

### IV. PREDICCIÓN DE LA CAPA DE OZONO CON REDES NEURONALES

En este trabajo se implementó una red neuronal en capas con algoritmo *back-propagation* como regla de aprendizaje para la predicción del promedio longitudinal mensual del espesor de la columna total de ozono desde Junio de 1991 hasta Marzo de 1993 en la banda 55°S-60° S.

Para el aprendizaje de la red se emplearon las medias mensuales de los datos diarios en píxeles de 1° x 1.25° tomados por el equipo TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) a bordo del satélite Nimbus 7 de la NASA (datos TOMS/NIMBUS 7, versión 7, Goddard Space Flight Center, NASA) y promediadas longitudinalmente en la banda antedicha.

Se ensayaron diversas arquitecturas de redes, comparando su capacidad de generalización sobre un conjunto de datos no utilizados en el aprendizaje (intervalo de *validación*). El parámetro elegido para medir cada performance es la raíz cuadrada de la *variancia relativa media* (VRM). Su valor resulta ser la relación del error cuadrático medio (diferencia cuadrática promedio entre los valores predichos por cada red y los

datos correspondientes) respecto al desvío estandar de los datos. De esta manera,  $\sqrt{VRM}$  mide el ajuste de las predicciones a los datos, relativo a la dispersión de dichos datos.

Entre los conjuntos de redes entrenadas para cada una de las diversas arquitecturas probadas, se eligió como "mejor" red la que presentó el *mínimo minimorum* VRM. Con esta red se realizaron predicciones a múltiple paso (realimentando la entrada de la red con la salida en cada paso mensual) a partir del último mes del intervalo de entrenamiento.

Para el entrenamiento y validación se subdividió la serie temporal de los datos TOMS en dos intervalos consecutivos:

a) Intervalo de entrenamiento: Noviembre de 1978 a Mayo de 1990.

b) Intervalo de validación: Junio de 1990 a Mayo de 1991.

Las predicciones a múltiple paso de la red se realizaron sobre el período restante de datos TOMS, desde Junio de 1991 hasta Abril de 1993.

### V. RESULTADOS

La mejor red fue obtenida con arquitectura 8 : 3 : 1 (8 neuronas en la primera capa, 3 unidades en la segunda y una neurona en la capa de salida). El valor de  $\sqrt{VRM}$  alcanzado por esta red en el intervalo de validación fue de 0.30.

A fines comparativos se construyó un modelo lineal predictivo simple calculando la onda media anual de los valores de ozono en el intervalo de entrenamiento sumada a la tendencia antropogénica en este período. Este modelo se denominará *onda anual con tendencia*, OAT.

La figura 2 muestra las predicciones de la red desde Junio de 1991 hasta Abril de 1993 contrastadas con los valores de la OAT y los datos TOMS correspondientes a este lapso.

Dado que el intervalo de entrenamiento de la red es *anterior* a la erupción del Pinatubo, los valores predichos por la red corresponderían a la situación *ideal* en la cual no estuviese presente efecto alguno de la erupción en la banda latitudinal analizada. Es evidente que las erupciones anteriores a la del Pinatubo (volcanes Ruiz y Kelut en la figura 1) *tampoco afectaron el aprendizaje de la red en su intervalo de entrenamiento* pues su efecto en alturas donde la concentración de ozono es máxima ha sido irrelevante en la banda latitudinal sur investigada, según se puede observar en los mapas de densidad de aerosoles en la figura 2. Este hecho convierte al conjunto de valores predichos por la red neuronal (modelo RNA) en un *referente* factible de caracterizar la anomalía presentada por los datos y posiblemente debida al fenómeno estudiado.

Con el propósito de medir esta anomalía, en la figura 3 se representa la variación relativa de los promedios longitudinales de ozono determinada como  $100 * (TOMS - RNA) / RNA$  calculada en el período

posterior a la erupción, desde Junio de 1991 hasta el final de la serie de los datos disponibles en Marzo de 1993.

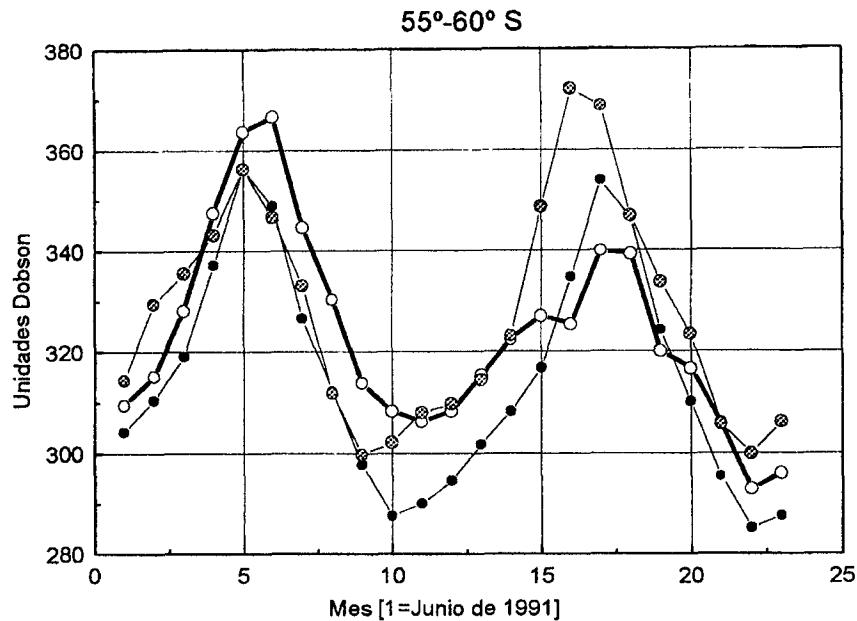


Figura 2. Promedio longitudinal de ozono en la banda 55°-60° S durante el período que contiene la erupción del Monte Pinatubo (de datos TOMS/NASA, círculos abiertos), climatología del ozono según la Onda Media Anual con Tendencia (OAT, círculos pequeños llenos) y predicción de ozono de la mejor red neuronal (círculos grandes punteados).

Para separar las fluctuaciones estadísticas de efectos naturales se calculó el desvío estándar (1.5%) y el promedio (0.2 %) de las diferencias porcentuales entre las salidas de la red y los datos TOMS en el período de validación. De esta forma la anomalía estará representada en la figura 3 por los valores de variación relativa que queden fuera de la banda centrada aproximadamente en cero y de extremos  $\pm 2\sigma$ .

Para comparar las variaciones porcentuales respecto a los datos TOMS predichas por el modelo RNA se han agregado en la figura 3 los resultados de anomalía en ozono predicha por los modelos 2-D de Pitari y Rizi<sup>(6)</sup> y de Rosenfield *et al.*<sup>(7)</sup> para el valor latitudinal medio de la banda analizada en el presente trabajo (57.5° S) y durante el mismo período.

El análisis de la figura 3 muestra una concordancia del modelo RNA con el modelo de Rosenfield *et al.* (modelo R) durante el verano en el hemisferio Sur, mostrando ambos una anomalía positiva, del 5% en el primer caso y del 2% en el segundo. Hasta donde se dispone de los resultados del modelo de Pitari y Rizi, éstos muestran un total desacuerdo con los modelos mencionados, con un *plateau* alrededor de -5% en el mismo lapso. Durante el otoño en el Hemisferio Sur el modelo RNA no indica anomalía, mientras perdura la variación positiva en el modelo R hasta el comienzo del invierno. A partir de esta época y durante todo el invierno austral los modelos R y RNA presentan un muy buen ajuste en sus predicciones de ozono señalando una rápida anomalía negativa de intensidad creciente. El

modelo R señala una anomalía mínima de -12% en Setiembre de 1992 y el modelo R de -14% un mes después. Durante la primavera en el Hemisferio Sur el modelo RNA muestra una sostenida recuperación de las variaciones relativas que desaparecen al comenzar el verano. La recuperación hacia niveles normales de ozono es más lenta en el caso del modelo R que predice la desaparición de la anomalía hacia el comienzo del otoño austral.

El comportamiento descrito por los modelos RNA y R no puede ser reproducido por las predicciones del modelo OAT, como fácilmente puede ser observado en la figura 3.

En la figura 4 se presentan resultados del modelo 2-D actualizado de Garcia-Solomon<sup>(18)</sup> (modelo GS-2001) de la columna total de ozono a 59° S, entre 16 y 60 km de altura, lo que implica esencialmente el ozono estratosférico. Dado que la contribución de la tropósfera al contenido total es del orden o menor al 10% y relativamente estable, los valores del modelo pueden considerarse representativos del comportamiento del ozono total y comparables con los resultados de la figura 3.

De la observación de la figura 4 se deduce que la anomalía predicha por el modelo GS-2001 es prácticamente inexistente en 1991, muestra una fuerte variación negativa hacia mediados de 1992 con un mínimo hacia mediados de octubre que significa una reducción relativa de alrededor del -9% respecto al valor esperado para este mes, de acuerdo a la tendencia

obtenida por el modelo. A finales de 1992 se observa una rápida recuperación (con un déficit respecto al valor de la tendencia cercano a -3%).

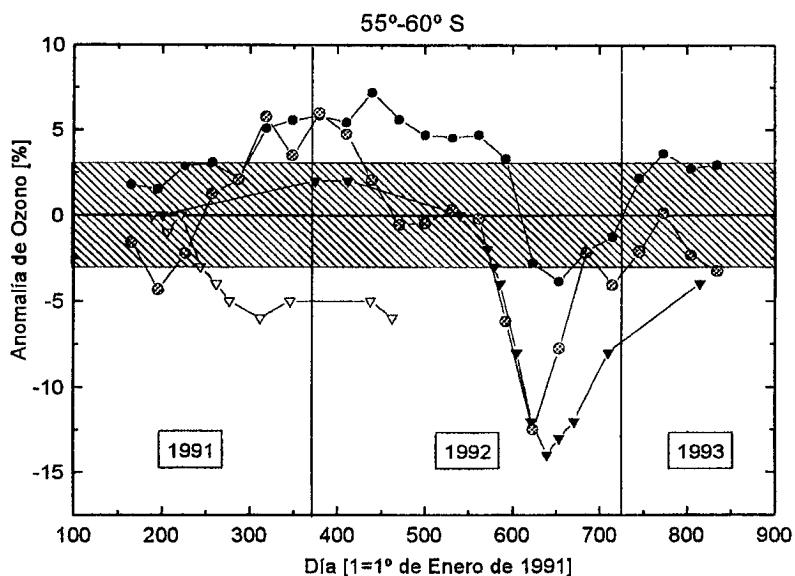


Figura 3. Anomalia en los promedios longitudinales de ozono en la banda 55°-60° S a consecuencia de la erupción del Monte Pinatubo, determinada con diferentes métodos: el modelo dinámico-químico-radiativo de Rosenfield et al. (triángulos llenos), el modelo fotoquímico de Pitari y Rizi (triángulos abiertos), la Onda Media Anual con Tendencia (OAT, círculos pequeños llenos) y la mejor red neuronal (círculos grandes punteados). La banda rayada señala el intervalo centrado en 0.16% y de semiamplitud  $2\sigma = 3\%$  obtenido para las diferencias relativas porcentuales entre las salidas de la mejor red y los promedios longitudinales de los datos TOMS en el intervalo de validación (Junio de 1990 a Mayo de 1991). En la gráfica correspondiente a la red neuronal, se consideran anómalos los valores porcentuales que exceden los límites de esta banda.

Como consecuencia del análisis anterior puede afirmarse que el comportamiento descrito por el modelo GS-2001 coincide cualitativa y cuantitativamente con las predicciones del modelo RNA comparado con los datos TOMS, y con la evolución prevista por el modelo de Rosenfield et al<sup>(7)</sup>.

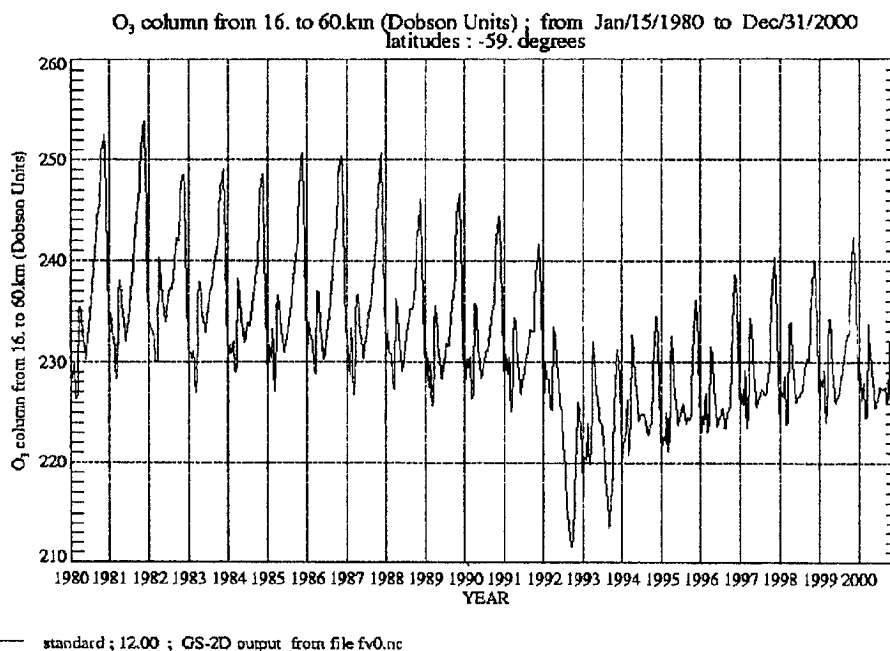


Figura 4. Serie de valores de la columna de ozono desde los 16 a 60 Km de altitud, calculados con el modelo 2-D de Garcia-Solomon (2001) para la latitud de 59° S.

## VI. CONCLUSIONES

Se detectó una importante anomalía negativa en los niveles de columna total de ozono a altas latitudes del Hemisferio Sur en la banda 55°-60° S, a partir de las diferencias relativas entre los valores predichos por una red neuronal artificial (RNA) y los datos satelitales medidos por el equipo TOMS/NASA, en el período inmediatamente posterior a la erupción del Monte Pinatubo en Junio de 1991. La máxima deficiencia de ozono medida fue de -12% durante Setiembre de 1992, en los comienzos del fenómeno de Agujero de Ozono de dicho año.

Los valores de la anomalía que resultan de la diferencia relativa entre las predicciones de la RNA y los datos TOMS están en buen acuerdo con los valores de déficit relativo calculados por el modelo 2-D dinámico-químico-radiativo de Rosenfield *et al*<sup>(7)</sup> y en razonable concordancia espacio-temporal con la reducción porcentual estimada a partir de los niveles aproximados de ozono total derivados del modelo 2-D de Garcia-Solomon<sup>(18)</sup>.

La adjudicación de la anomalía analizada en este trabajo al efecto destructor de ozono producido por los aerosoles sulfatados generados por la erupción del Pinatubo, tiene una importante justificación a través de los datos de la densidad de área superficial de aerosoles medida por el satélite SAGE II mostrados en la figura 1<sup>(3,9)</sup>. Puede verse claramente el notable aumento en la densidad de aerosoles en el período analizado en este trabajo, a alturas de 20 y 25 km, intervalo en el que se encuentra usualmente el máximo en los perfiles verticales de ozono, afectando al ozono en latitudes muy altas de ambos hemisferios. Eventualmente y dado que el volcán Hudson (en figura 1, indicado con el número 4) entre Argentina y Chile hizo erupción en el período considerado con potencia muy inferior al Pinatubo<sup>(9)</sup>, una pequeña fracción de la anomalía podría deberse a dicho evento. Las otras dos erupciones indicadas en figura 1, correspondientes a los volcanes Ruiz y Kelut y ocurridas durante el período de entrenamiento de la RNA, no afectaron prácticamente la banda latitudinal en estudio, como se comprueba en la misma figura.

Los resultados presentados señalan que las RNA pueden ser una poderosa herramienta para probar la fiabilidad de elaborados modelos dinámico-químico-radiativos cuando se emplean en el análisis de perturbaciones en series temporales de ozono y demuestran su capacidad para detectar y caracterizar anomalías cuando ocurren eventos singulares.

### Agradecimientos

Al Dr. Rolando García/NCAR por su generosa contribución a este trabajo con la serie de ozono procesada en el National Center for Atmospheric Research, Estados Unidos, utilizando el modelo 2-D del cual es autor junto con la Dra Susan Solomon.

Al Lic. Eduardo Luccini por la claridad de sus comentarios en la revisión final de este trabajo.

Al Tco. Pablo García del Observatorio Astronómico y Planetario Municipal de Rosario, Argentina, por su invalorable asistencia computacional.

A la Agencia Nacional de Promoción de la Ciencia y la Tecnología (ANPCyT) por el aporte al presente proyecto, a través del subsidio PICT 6760.

El Lic. Miguel A. Parodi agradece a FOMEC/Ministerio de Educación por la beca otorgada durante parte del presente trabajo.

### Referencias

- 1 - Solomon, S., R.W. Portmann, R.R. Garcia, L.W. Thomason, L.R. Poole, y M.P. McCormick J. Geophys. Res., **101**, 6713-6727 (1996).
- 2 - Douglass, A.R., C.J. Weaver, R.B. Rood y L. Coy, J. Geophys. Res., **101**, 1463-1474 (1996).
- 3 - World Meteorological Organization (WMO), *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998*, WMO Rep. 44, Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva (1999).
- 4 - Kinne, S., O.B. Toon y M.J. Prather Geophys. Res. Lett., **19**, 1927-1930 (1992).
- 5 - Brasseur, G.P. y C. Granier Science, **257**, 1239-1242 (1992).
- 6 - Pitari, G. y V. Rizi J. Atmospheric Sciences, **50**, 3260-3276 (1993).
- 7 - Rosenfield, J.E., D.B. Cosidine, P.E. Meade, J.T. Bacmeister J.T., C.H. Jackman y M.R. Schoeberl J. Geophys. Res., **102**, 3649-3670 (1997).
- 8 - Thomason, L.W., L.R. Poole y T. Deshler J. Geophys. Res., **102**, 8967- 8976 (1997).
- 9 - Pitts, M.C. y L.W. Thomason Geophys. Res. Lett., **20**, 2451-2454 (1993).
- 10 - Randel, W.J. y J.B. Cobb J. Geophys. Res., **99**, 5433-5447 (1995).
- 11 - Weigend, A.S., B.A. Huberman y D.E. Rumelhart Int. J. Neural Syst., **1**, 193 (1990).
- 12 - Calvo, R., H.A. Ceccatto y R.D. Piacentini Astrophysical Journal, **444**, 916-921 (1995).
- 13 - Verdes, P.F., M.A. Parodi, P.M. Granitto, H.D. Navone, R.D. Piacentini y H.A. Ceccatto Solar Physics, **191**, N°2, 419-425 (2000).
- 14 - Lundstedt, H. Planet. Space Sci., **40**, 457 (1992).
- 15 - Lundstedt, H. y P. Wintoff Comunicación privada (1993).
- 16 - Navone, H.D. y H.A. Ceccatto Climate Dynamics, **10**, 305 (1994).
- 17 - Bishop, C. en *Neural Networks for Pattern Recognition*, Clarendon Press, Oxford (1997).
- 18 - Garcia, R. NCAR Comunicación privada (2001).