

# Estudio exploratorio del comportamiento de los óxidos de nitrógeno y el ozono en dos estaciones de calidad del aire en Bogotá e identificación de modelos Arima para su comportamiento temporal<sup>1</sup>

Luis Reinaldo Barreto Pedraza\* / Emel Vega\*\*

Fecha de envío: 14 de septiembre de 2010  
Fecha de aceptación: 18 de octubre de 2010

## RESUMEN

En el caso de la ciudad de Bogotá, con el fin de establecer modelos de pronóstico que permitan prevenir eventos extremos de contaminación, se estudia el comportamiento temporal de la contaminación atmosférica. En primer lugar, se realizó un análisis estadístico exploratorio de las variables de calidad del aire y meteorológicas para identificar el patrón climático de las variables de calidad del aire y su relación con el comportamiento de la atmósfera. En segundo lugar, este trabajo buscó reconocer, en dos estaciones de la red de vigilancia de la calidad del aire de la ciudad de Bogotá, la estructura de las series de tiempo de las concentraciones de dióxido de ni-

trógeno (NO<sub>2</sub>) y ozono (O<sub>3</sub>). Los resultados obtenidos permitieron identificar en primera instancia modelos autorregresivos que describen el comportamiento del O<sub>3</sub> en la estación de la Universidad Nacional: O<sub>3</sub> Arima(0,0,2)(2,0,1) y en la estación Merck: O<sub>3</sub>, Arima(1,0,0)(1,1,0). El análisis de los errores cuadráticos medios demuestra que estos modelos no se ajustan satisfactoriamente; por esto, resulta necesaria la influencia de otras variables.

**Palabras clave:** climatología urbana, series de tiempo, contaminación, pronóstico, ozono, óxidos de nitrógeno.

<sup>1</sup> Trabajo realizado para optar por el título de Maestría en Meteorología, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.

\* Ingeniero químico, MSc en Meteorología. Profesor departamento Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá. Correo electrónico: lubarreto@unisalle.edu.co.

\*\* Ingeniero meteorólogo, MSc en Meteorología, candidato a Doctor en Meteorología. Profesor, Departamento Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Correo electrónico: eevegar@unal.edu.co.

## BEHAVIOR OF THE NITROGEN OXIDES AND OZONE IN TWO DIFFERENT AIR QUALITY MONITORING STATIONS IN BOGOTA CITY

### ABSTRACT

We investigate the spatial - temporal behavior of the atmospheric contamination in the city of Bogotá, with the aim of establishing forecasting models that make it possible to foresee extreme atmospheric contamination events. As a guideline for this work, we base our assessment on the temporal structure of the time series of nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ) and ozone ( $\text{O}_3$ ). The results obtained allowed us to identify autoregressive models that describe the  $\text{O}_3$  behavior at the station of the Universidad Nacional as an

Arima(0,0,2)(2,0,1), and at the Station Merck as an Arima (1,0,0)(1,1,0), also for  $\text{O}_3$ . Nevertheless the results of the analysis of mean square errors show that these models do not adjust to the series in a satisfactory way, which means that the influence of other variables has to be taken into account.

**Keywords:** time series, pollution, forecast models, ozone, nitrogen oxides.

## Introducción

La información de variables fisicoquímicas y meteorológicas registradas en la red de estaciones de calidad del aire, presenta un comportamiento recurrente influenciado por el ciclo diurno de la radiación solar. La interacción de procesos químicos, fotoquímicos y físicos de los contaminantes presentes en la atmósfera introduce variabilidad adicional en las series de tiempo. En cada dato registrado en la red se suman los efectos de estas interacciones haciendo su análisis más complejo.

Como parte del desarrollo de modelos predictivos se aplicó el análisis de estadísticos exploratorios con el fin de determinar las variables de mayor contribución para la modelación mediante un análisis de series de tiempo. En calidad de primer paso se empleó el análisis univariado de las concentraciones de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y ozono ( $\text{O}_3$ ) con el objeto de establecer su estructura temporal.

El trabajo de Castro (1998) planteó conocer la distribución de probabilidad de los niveles altos de ozono con datos de una estación seleccionada, en la ciudad de México, con dos variables de influencia: la altura geopotencial y la velocidad del viento, mediante técnicas de valores extremos. Correa et ál. (2001) abordan el análisis de  $\text{O}_3$  y  $\text{NO}_x$  mediante técnicas de series de tiempo y regresión lineal, a partir de los datos observados de  $\text{O}_3$  en periodos anteriores, parámetros de estado del tiempo y contaminantes precursores del día anterior, con énfasis en los máximos diarios de  $\text{O}_3$ , en México. Las variables meteorológicas consideradas son: temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Las variables fisicoquímicas fueron  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}_x$ . Los resultados para los máximos de  $\text{O}_3$  no presentan un comportamiento estacional pero sí muestran una influencia de las emisiones. Sin embargo, existen diferencias entre los resultados de

las regresiones y el modelo Arima, concluyendo que este modelo subestima en la mayoría de casos los valores observados.

Guldmann y Kim (2001) presentaron un resumen de la utilización de modelos estadísticos de series de tiempo aplicados a la contaminación atmosférica. Estos investigadores plantean que los modelos de series de tiempo han sido desarrollados para tener ventajas en la capacidad de relacionar en el tiempo (de manera horaria, diaria o mensual), datos de concentración de sitios específicos. La concentración en un tiempo  $t$  está relacionada con otras concentraciones en el pasado para el mismo sitio, con las condiciones meteorológicas y con las fuentes en el presente y en el pasado. De acuerdo con estos autores, modelos de tipo autorregresivos y de media móvil, AR y Arima, han sido desarrollados por Chock (1975), Roy y Pellerin (1982), Milionis y Davis (1994), Shi y Harrison (1997), Wolff y Lioy (1978), quienes usaron regresiones para el análisis de las concentraciones máximas de  $\text{O}_3$  para las horas de la mañana en Nueva Jersey relacionadas con temperatura, velocidad del viento, humedad absoluta, emisiones de HC,  $\text{NO}_x$  y concentraciones de  $\text{O}_3$ , tanto del día anterior como del día de análisis, para la trayectoria de unas parcelas durante 24 horas.

Sobre otras aplicaciones del análisis de series de tiempo, Graf-Jaccottet (1993) aplicaron modelos Arima para el estudio de las concentraciones medias diarias de  $\text{O}_3$ , considerando la covariación con el número de horas entre el amanecer y el atardecer. Este modelo fue construido como un AR(1) de los errores. Guttorp (1994) aplicó un modelo AR(2) a una serie preblanqueada de concentración de  $\text{O}_3$ , de la cual se había filtrado el efecto diario, con el fin de establecer una correlación espacio-temporal para información de varias estaciones. Tiao et ál. (1980) plantean el uso de modelos autorregresivos que puedan tener en

cuenta una estructura de variación temporal diurna, lo que puede explicar mejor el ciclo diurno de la producción, acumulación y agotamiento del  $O_3$ . Además, plantean que los modelos Arima estacionales presentan una mejor aproximación para retardos de 24 horas. La extensión de modelos Arima como filtro estacional es mucho más compleja.

En las investigaciones sobre las relaciones entre eventos de contaminación ambiental y condiciones meteorológicas, se encuentra gran cantidad de investigaciones, en las cuales se presentan varios métodos estadísticos de análisis. Prior, McKendry y Stey (1995) presentan un estudio sobre las relaciones entre episodios de altas concentraciones de  $O_3$  y la frecuencia de asociación con condiciones meteorológicas de escala sinóptica. Estos investigadores aplicaron un análisis por componentes principales, el cual aporta información para la predicción de eventos de alta concentración de  $O_3$ , en el periodo de verano. Otro ejemplo corresponde al trabajo de Aneja y Das (1995), quienes investigaron la relación entre  $O_3$  y peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) asociado a las condiciones meteorológicas. El estudio se centra en un grupo de episodios que abordan mediante la aplicación de métodos estadísticos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos utilizados para la realización de este trabajo fueron suministrados por el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), información obtenida a través de la red de vigilancia de la calidad del aire de la ciudad de Bogotá en las estaciones: Sony, Universidad Nacional y Merck.

El desarrollo estadístico se adelantó mediante el análisis de series de tiempo, análisis descriptivo y modelación Arima, como desarrollo del análisis exploratorio univariado. El paquete estadístico usado como soporte fue SPSS versión 10.1, además del desarrollo de aplicaciones para ajustar modelos y resultados.

De la información suministrada se seleccionaron dos estaciones de acuerdo con los criterios de calidad y cantidad de información disponible. Las variables seleccionadas para el tratamiento estadístico fueron: NO,  $O_3$  y  $NO_2$ .

El análisis se basó en la suposición que de las concentraciones horarias de NO,  $O_3$  y  $NO_2$  se pueden expresar con modelos lineales autorregresivos integrados de media móvil, Arima. Las series de tiempo se pueden representar mediante varios modelos (Castro, 2002):

**Modelo autorregresivo:** modelo de regresión en el cual la variable dependiente está en función de valores de la misma variable, pero observados en periodos anteriores (Castro, 2002). La ecuación corresponde:

$$X_t = f_1 X_{t-1} + f_2 X_{t-2} + \dots + f_p X_{t-p} + a_t$$

Donde los parámetros  $f$  ponderan la influencia de observaciones de la variable en estudio  $X$ ,  $p$  periodos anteriores a  $t$ , y se le conoce como el orden del modelo, y  $a_t$  representa un término de error, cuya media se supone igual a cero y su varianza finita con una distribución normal aproximadamente (Castro, 2002). Un modelo autorregresivo de orden  $p$  se escribe AR( $p$ ).

**Modelo de promedios móviles** (Castro, 2002): este tipo explica el comportamiento de la variable en función de una suma ponderada de los choques aleatorios  $a_t$ :

$$X_t = a_t - q_1 a_{t-1} - q_2 a_{t-2} - \dots - q_q a_{t-q}$$

Donde los parámetros  $q$  son las ponderaciones asociadas a los choques aleatorios  $a_t$  en  $q$  periodos anteriores a  $t$ . Así, de manera análoga al modelo

autorregresivo, un modelo de promedios móviles de orden q se denota por MA(q).

**Modelos ARMA:** La generalización de los modelos AR(p) y MA(q) se conoce como modelos autorregresivos y de promedios móviles ARMA(p,q). Sirven para representar series que presentan características tanto de procesos autorregresivos como de promedios móviles (Castro, 2002). La ecuación del modelo es la siguiente:

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + a_t - q_1 a_{t-1} - q_2 a_{t-2} - \dots - q_q a_{t-q}$$

**Modelos Arima:** incluyen el operador diferencia ( $\nabla^d$ ), el cual se emplea para remover tendencias presentes en las series. Si la variable de interés  $X_t$  presenta cambios en su nivel medio a lo largo del tiempo, será necesario aplicar este operador para obtener relaciones de la forma  $Y_t = X_t - X_{t-1}$ . Donde  $Y_t$  puede escribirse como  $\nabla^d X_t$  y  $d$  denota el número de veces que se aplica el operador diferencia (Castro, 2002). El modelo se representa mediante:

$$\nabla^d X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q}$$

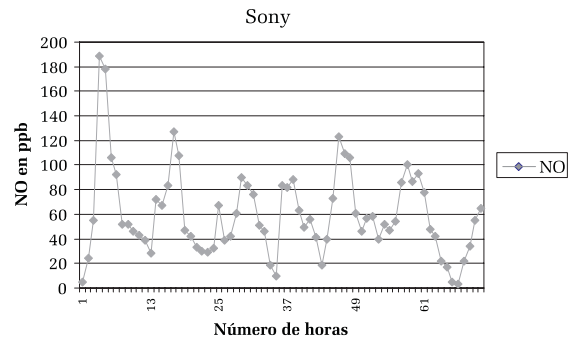
Esta clase de modelo, en los casos de series de tiempo con un componente estacional, Box & Jenkins (1976) proponen modelos Arima estacionales de la forma Arima (p d q)(P D Q), en los que P, D, y Q son análogos a los parámetros  $p$ ,  $d$ ,  $q$ , pero desde luego para su componente estacional. Esta última clase de modelos fue la empleada en el presente trabajo.

La *función de autocorrelación* (ACF) y la *función de autocorrelación parcial* (PACF). ACF es una medida de la correlación entre dos variables que forman el proceso estocástico, con retrasos temporales de valor k; PACF mide la correlación neta entre dos variables, con retrasos temporales de distancia k (Andreoni, 2006).

La identificación se basa en la determinación de los coeficientes de autocorrelación (ACF) y de autocorrelación parcial (PACF) (Andreoni, 2006):

- Si ACF ( $\rho_k$ ) es el cero para  $k > q$  y PACF está decreciendo, entonces el proceso que es la base de la serie es una MA(q).
- Si PACF ( $\pi_k$ ) es el cero para  $k > p$  y ACF disminuye, entonces el proceso que es la base de la serie es un AR (p).
- Si no hay ningunas pruebas para una MA o un AR, entonces puede ser adecuado un modelo de ARMA.

Con base en la premisa de la existencia de estructuras autorregresivas en los datos de contaminación, se trabajó en la identificación de estas estructuras mediante el análisis de series de tiempo.



**Figura 1. Datos de la concentración NO en la estación SONY entre 1 de agosto de 1997 al 4 de agosto de 1997**

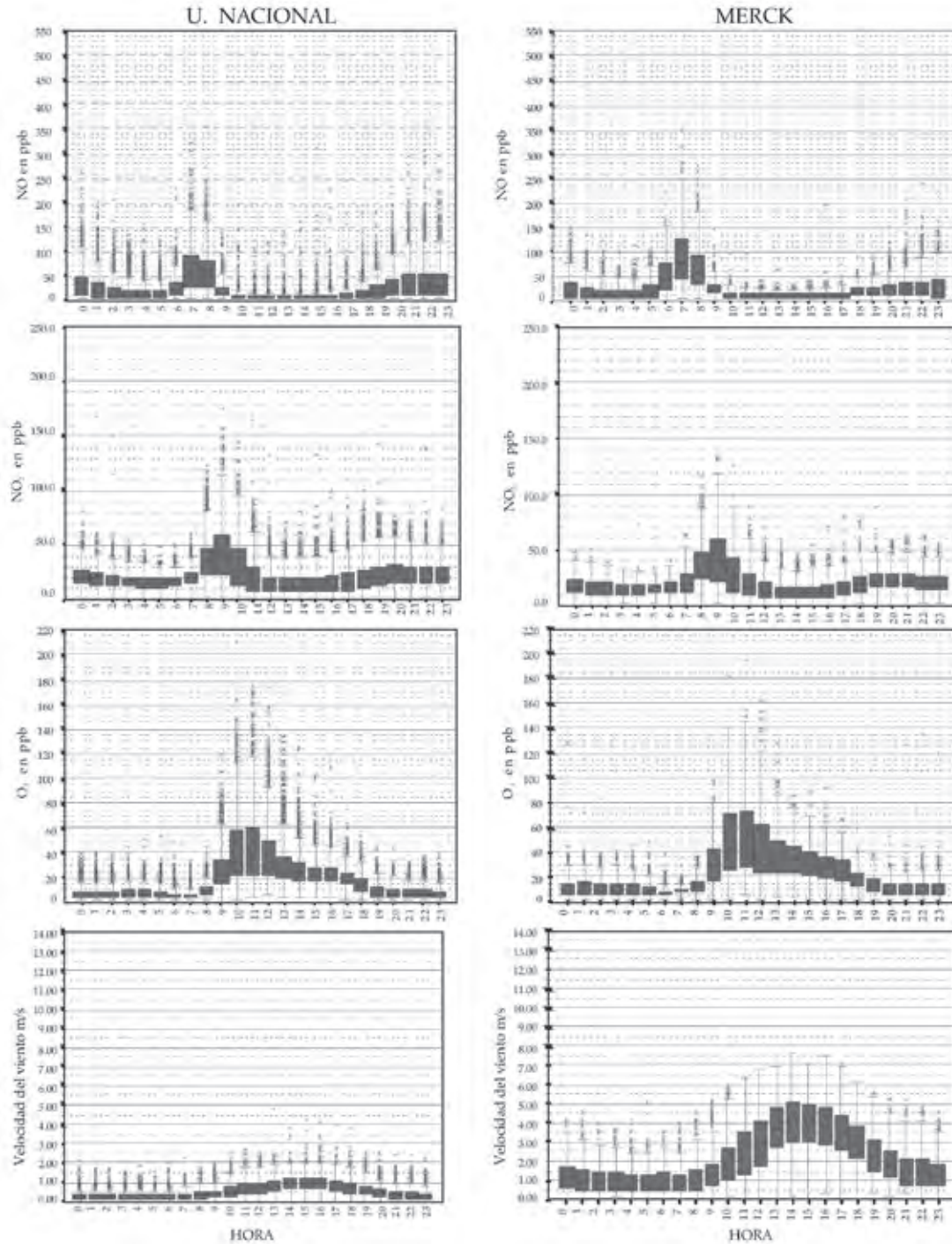
Fuente: elaboración propia.

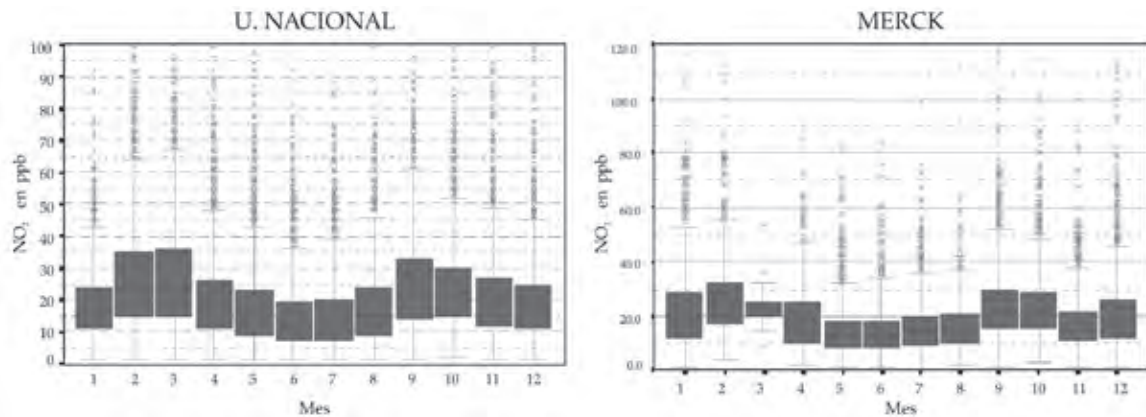
## Análisis y resultados

La identificación permite establecer la estructura básica para poder obtener valores futuros y dar las bases para modelos multivariados temporales. Los contaminantes atmosféricos están autocorrelacionados y la estructura es de carácter estacional. De acuerdo con Guttorp, et ál. (1994), los datos de las series de contaminación fotoquímica se ajustan a series autorregresivas de orden 1. Observando las series temporales de contaminantes para la ciudad de Bogotá, se puede apreciar un pico fuerte en horas de la mañana y un pico débil en horas de la tarde; los da-

tos para las mismas horas mantienen un patrón similar de comportamiento que se repite con alguna periodicidad, modulada por el ciclo diario de radiación (figura 2). En el caso de los contaminantes primarios, como NO y CH<sub>4</sub>, el reiterado surgimiento de los picos

son resultado del comportamiento rutinario de los agentes emisores, los cuales presentan variaciones de acuerdo con los días de la semana y épocas del año, donde los máximos se atenúan un poco durante los meses con mayor intensidad de vientos.





**Figura 2. Gráficos de cajas para las concentraciones de NO<sub>2</sub> en las estaciones de la red de calidad del aire, para el periodo de estudio**

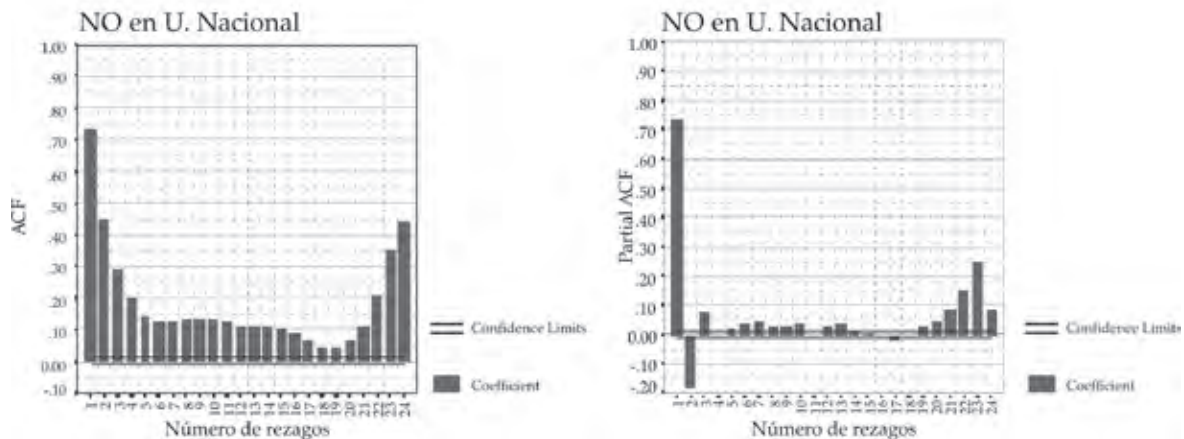
Fuente: elaboración propia.

### COMPORTAMIENTO HORARIO DE PARÁMETROS DE LA CALIDAD DEL AIRE Y VELOCIDAD DEL VIENTO

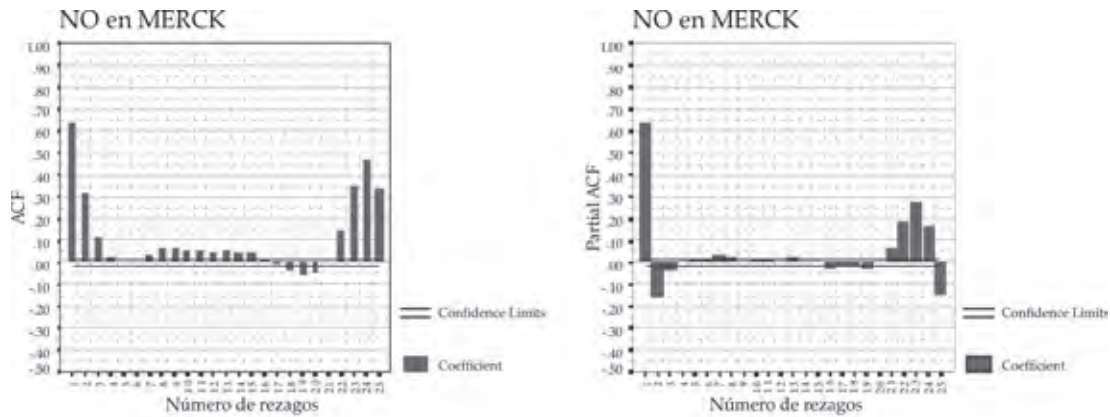
La identificación preliminar se basa en el gráfico de autocorrelograma de la *función de autocorrelación simple* (AFC), y del gráfico de autocorrelograma de función de autocorrelación parcial (PAFC). AFC muestra valores de los coeficientes de autocorrelación para el NO en un patrón de declive periódico regular cada 24 horas, relacionado con una función cíclica sinusoidal que refleja la atenuación en la con-

centración de las descargas iniciales; resultado del calentamiento diurno e intensificación de la circulación local.

El autocorrelograma PACF muestra que los coeficientes primero y segundo de rezagos son significativos con valores de 0,806 y -0,171 para la estación Sony; 0,733 y -0,186 para la estación U. Nacional; con 0,64 y -0,154 para la estación Merck. Para el caso del NO se plantea de manera inicial que corresponde a una serie de tipo *autorregresivo* de orden uno (AR1), y *autorregresivo estacional* de orden uno (SAR1), con periodicidad de 24 horas (figura 3).



Continúa

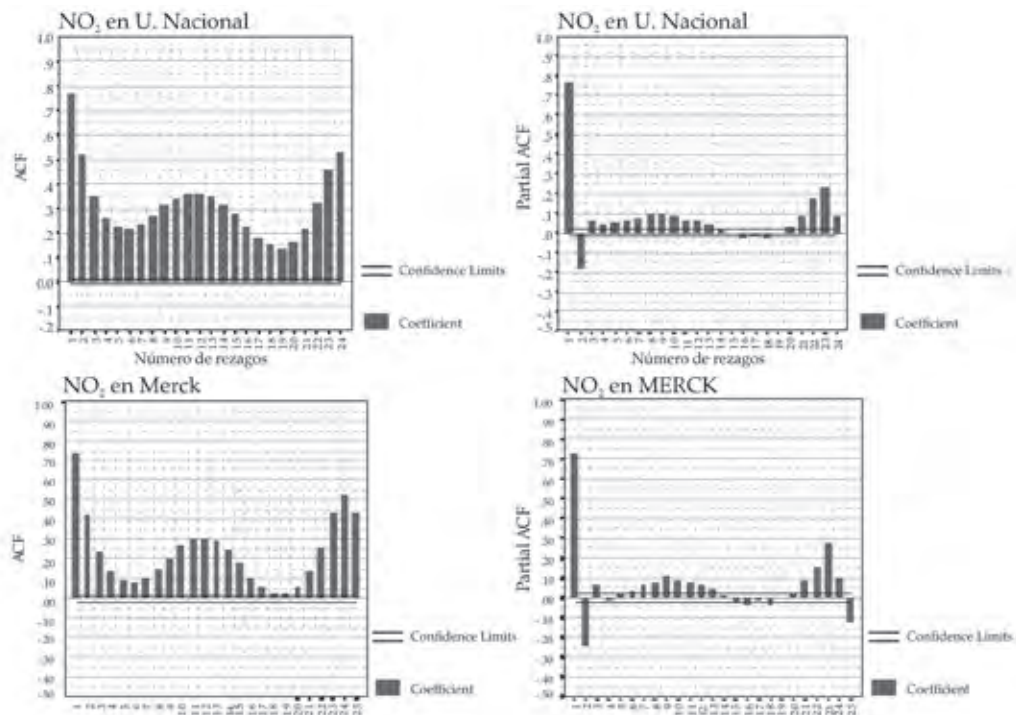


**Figura 3. Funciones de autocorrelación simple y de autocorrelación parcial para las concentraciones de NO**

Fuente: elaboración propia.

Las estructuras de las series de datos para  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$  son muy similares a las del NO, lo cual refleja la fuerte interrelación existente entre estos parámetros. Los resultados de los coeficientes de autocorrelación simple y de autocorrelación parcial se presentan en las figura 4 y 5. El  $\text{O}_3$  y  $\text{NO}_2$  explican su estructura estacional debido a la incidencia de radiación solar

en la reacción fotoquímica de transformación del  $\text{NO}_2$  a NO. En segundo lugar, la participación de los hidrocarburos en el cambio de la cinética fotoquímica contribuye a la formación de radicales libres, que afectan las reacciones de transformación del  $\text{NO}_2$  a NO y el surgimiento del  $\text{O}_3$ .



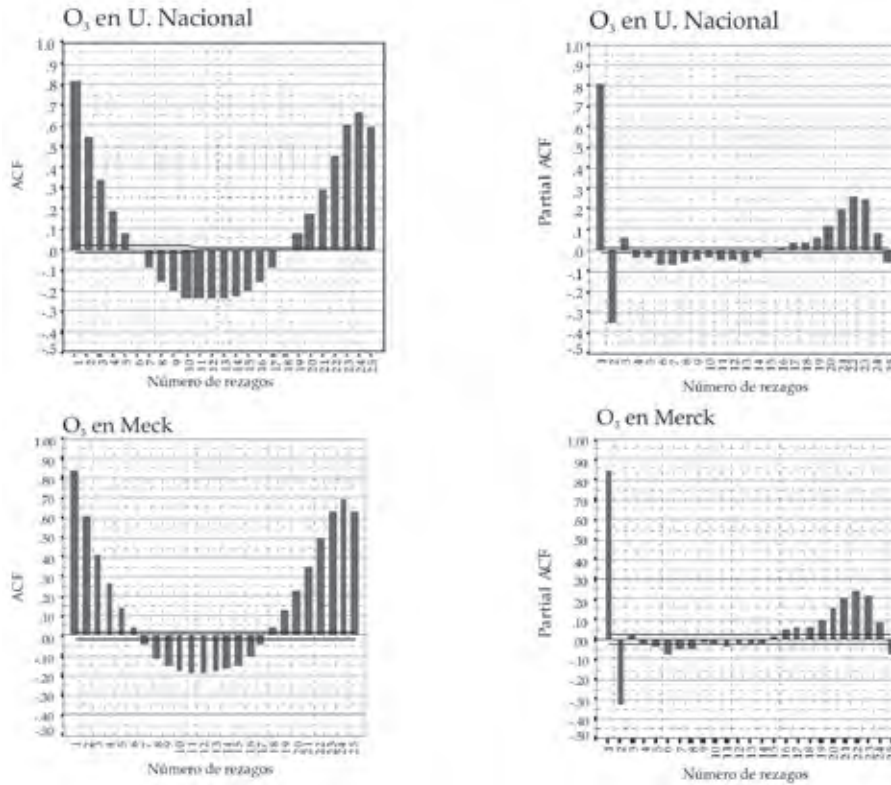
**Figura 4. Gráficos de las funciones de autocorrelación simple y de autocorrelación parcial para las concentraciones de  $\text{NO}_2$  en la estación Sony, U. Nacional y Merck**

Fuente: elaboración propia.



Al examinar las gráficas a continuación (figura 4), se observa que las funciones de autocorrelación simple del  $O_3$  se diferencian de las del  $NO_2$  al presentar una estructura más homogénea en las diferentes estaciones. Esto se debe a que la variabilidad del  $O_3$  depende más del comportamiento de la radiación solar que

la del  $NO_2$ , en tanto que el  $NO_2$  se encuentra estrechamente relacionado con las concentraciones de  $NO$  y de los hidrocarburos metánicos, como también de los hidrocarburos diferentes al metano presentes en la atmósfera.



**Figura 5. Gráficos de las funciones de autocorrelación simple y de autocorrelación parcial para los valores de concentraciones de  $O_3$  en la estación Sony**

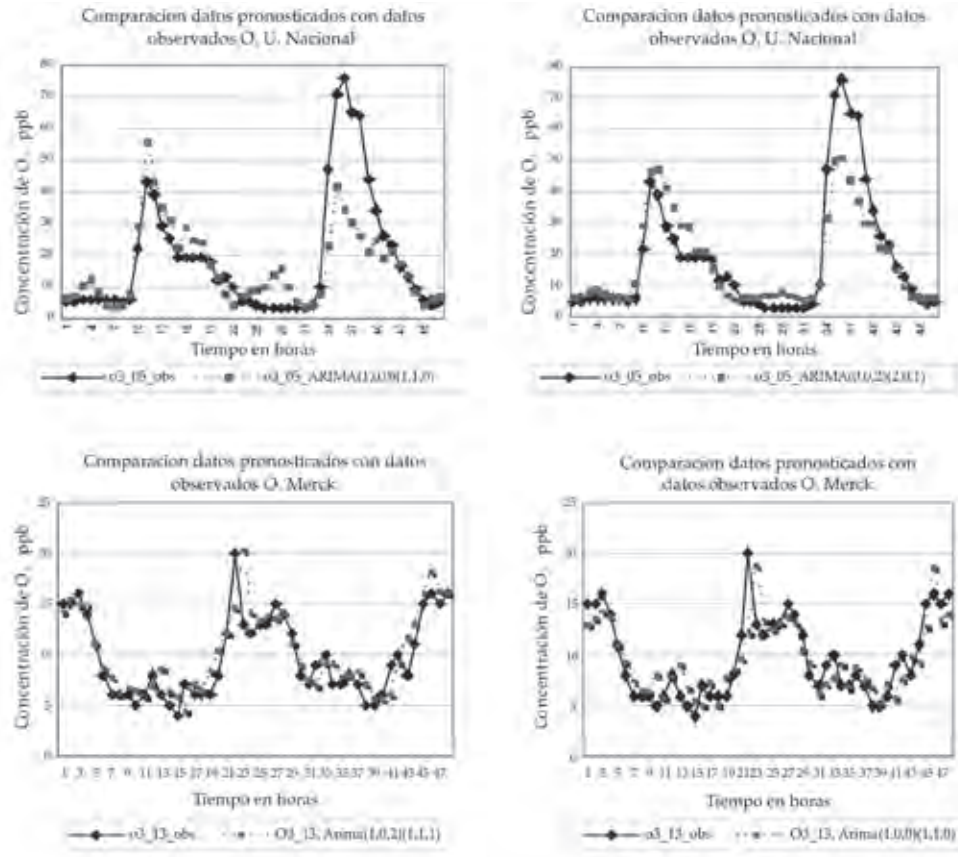
Fuente: elaboración propia.

Para la estación de la Universidad Nacional se realiza el mismo análisis del modelo Arima de  $O_3$ , y se compara con los valores observados. En la figura 5 se presentan las series de tiempo observadas y pronosticadas para un periodo de 48 horas. El modelo del  $O_3$  Arima(0,0,2)(2,0,1), tiene un mejor ajuste que el modelo  $O_3$  Arima(1,0,0)(1,1,0) de acuerdo con lo observado en la figura. Al comparar los valores del error cuadrático medio ECM y su raíz, se corrobora esta afirmación, tal como se muestra a continuación en la tabla 1.

En el caso de la estación Merck se encuentra que los modelos son más ajustados que para el caso de la Universidad Nacional. El modelo del  $O_3$  Arima(1,0,0)(1,1,0), tiene un mejor ajuste al modelo  $O_3$  Arima(1,0,2)(1,1,1) de acuerdo con lo observado en la figura 6. Sin embargo, es claro el desfase entre los datos observados y los modelados, mostrando un rezago de una hora en el pronóstico.

A pesar de las grandes limitaciones presentadas por los modelos ARIMA, los cuales no son los más indicados para la valoración y seguimiento de este tipo de procesos (según sólidos argumentos expuestos

por múltiples autores), es una herramienta útil para identificar los patrones futuros del comportamiento de ciertas variables que no presenten dependencia de múltiples parámetros.



**Figura 6. Comparación de los modelos ARIMA para la concentración de O<sub>3</sub> en la estación Universidad Nacional y Merck, periodo agosto de 1997 a diciembre de 1998**

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 1. Valores del error cuadrático medio y de la raíz del error cuadrático medio, para valores futuros en un periodo de 48 horas, comparados con los valores observados para el mismo periodo**

Estación Nacional	Error cuadrático medio	Raíz del ECM
O <sub>3</sub> Arima(0,0,2)(2,0,1)	74.476	8.630
O <sub>3</sub> Arima(1,0,0)(1,1,0)	157.030	12.531
Estación Merck	Error cuadrático medio	Raíz del ECM
O <sub>3_13</sub> , Arima(1,0,2)(1,1,1)	3,8	1,90
O <sub>3_13</sub> , Arima(1,0,0)(1,1,0)	4,45	2,11

Fuente: elaboración propia.

Tal como se aprecia en la figura 5 y en la tabla 1, los modelos Arima fueron capaces de representar con un alto grado de aproximación el pronóstico de la variable ozono  $O_3$  en las dos estaciones de muestreo, lo cual se debe básicamente a la alta dependencia de la radiación solar para que se produzca la disociación fotoquímica del  $NO_2$  (molécula relativamente inestable) y la posterior asociación del radical libre de  $O\cdot$  con un  $O_2$  para formar el  $O_3$ . En tanto que para el pronóstico de la variable  $NO_2$ , los resultados arrojados por los modelos Arima no fueron suficientemente satisfactorios.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con la premisa de los modelos de series de tiempo y de los modelos de intervención, se obtuvo como resultado la identificación de modelos Arima que permiten modelar de manera aproximada

el comportamiento de una variable objetiva, en este caso del ozono.

La identificación mediante las correlaciones cruzadas de las asociaciones temporales, reflejan por un lado relaciones de carácter causal como la cinética fotoquímica (determinista) y las influencias de factores meteorológicos que inducen una variabilidad en el comportamiento de las concentraciones y disociación fotoquímica en los gases tratados.

Los PACF arroja otros coeficientes significativos que lamentablemente no se consideran para la formulación de los modelos, ya que se aplica el criterio de mayor simplificación posible; sin embargo, estos coeficientes merecen ser tenidos en cuenta en el análisis de residuales, con el ánimo de determinar las relaciones causa-efecto entre los diferentes parámetros.

## Referencias bibliográficas

- Andreoni, A. & Postorino, M.N. (2006). A multivariate arima model to forecast air transport demand. Association for European Transport and Contributors. [www.etcproceedings.org/paper/download/1399](http://www.etcproceedings.org/paper/download/1399).
- Aneja, V.P. & Das, M. (1995). Correlation of ozone meteorology with hydrogen peroxide in urban and rural regions of North Carolina. En: *Journal of Applied Meteorology*. 34, August, 1890-1898.
- Castro, J.I. (s. f.) Distribución conjunta de valores extremos de ozono y de algunas variables meteorológicas. Centros de Investigaciones en Matemáticas A.C. Mimeo.
- Clement Bellido, M.S. (1995). *Aspectos químicos de la contaminación atmosférica*. Universidad de Córdoba, Córdoba.
- Cocchi, D. & Trivisano, C. (2000). Ozone. [www.wiley.co.uk/wileychi/eoenv/pdf/Vao022.pdf](http://www.wiley.co.uk/wileychi/eoenv/pdf/Vao022.pdf).
- Correa G., A.; Muñoz C., R. y García C., G. (2002). Análisis del ozono y de los óxidos de nitrógeno mediante técnicas de series de tiempo y regresión lineal. Secretaría del Medio Ambiente, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. México D.F. Mimeo. [www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/caliaire/mexicon/R-0188.pdf](http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/caliaire/mexicon/R-0188.pdf).

- Graf-Jaccottet, M. (1993). A flexible model for ground ozone concentration. En: *Environmetrics*, (4), 23-37.
- Guldman, J. & Kim, H. (2001). Modeling air quality in urban areas: a cell-based statistical approach. Seoul Development Institute and Department of City and Regional Planning, the Ohio State University. Columbus. Urban Affairs and Urban Assistance Program, Ohio Board of Regents.
- Guttorp, P.; Meiring, W. & Sampson, P.D. (1994). A space-time analysis of ground-level ozone". En: *Environmetrics*, (5), 241-254.
- Guttorp, P.; Meiring, W. & Sampson, P.D. (1994). Space-time estimation of grid-cell hourly ozone level for assessment of a deterministic model. [www.stat.washington.edu/peter/ozone/ees.ps](http://www.stat.washington.edu/peter/ozone/ees.ps).
- Landsberg, H.E. (1961). Solar radiation at the Earth's surface. *Solar Energy* 5, (3), 95-98.
- Peña, D. (1993). *Estadística, modelos y métodos*. Vol. 2: Modelos Lineales y Series Temporales. Madrid: Alianza.
- Prior, S.C; McKendry, I.C. & Stey, D.G. (1995). Synoptic-scale Meteorological variability and surface concentrations in Vancouver, British Columbia. En: *Journal of Applied Meteorology*, 34, August, 1824-1833.
- Seinfeld, J. & Spyros, P. (1997). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Szepesi, D.J. (1987). Application of meteorology to atmospheric pollution problems. World Meteorological Organization. Technical note N.º 188, Genève, pp 1-3.
- Varotsos, C.; Varinou, M. & Kalabokas, P. (1993). Atmospheric ozone concentration in Athens, Greece. Part I: surface and its relationship with meteorological parameters. *Atmospheric Research*, 30, 143-149.