

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL OZONO TROPOSFÉRICO Y SU
RELACIÓN CON LA RADIACIÓN SOLAR EN LAS CIUDADES DE LIMA, ICA Y
AREQUIPA, 2004**

**BEHAVIOR ANÁLISIS OF TROPOSPHERIC OZONE AND ITS RELATION WITH
THE TOTAL SOLAR RADIATION IN LIMA, ICA AND AREQUIPA PERUVIAN
CITIES, 2004**

José Silva Cotrina¹
Zarela Montoya Cabrera²

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - **SENAMHI**

Resumen: Usando el método automático basado en el principio de Fotometría UV y el sensor de radiación solar de estaciones meteorológicas automáticas Davis, datos de concentraciones horarias de ozono troposférico y promedios horarios de radiación solar fueron respectivamente colectados durante el año 2004 en períodos de 768 horas continuas en cada una de las ciudades peruanas de Lima, Ica y Arequipa; luego, al correlacionar ambos grupos de datos, entre las 07:00 y las 18:00 horas en estas ciudades, los respectivos coeficientes de correlación de Pearson encontrados fueron 0,758; 0,752; y 0,66 para Lima, Ica y Arequipa; lo cual, demuestra la estrecha relación directa existente entre el comportamiento de la radiación solar total horaria y la generación del ozono troposférico durante el ciclo diario. Por otro lado, al comparar los valores máximos de 16,5; 29,3; y 43,4 ppb para Lima, Ica y Arequipa del promedio móvil de 8 horas de las concentraciones máximas horarias del ozono durante el ciclo diario, con el estándar nacional de calidad del aire de 60 ppb, se demostró que eran menores que éste. Asimismo, al comparar las concentraciones horarias máximas de 28,2; 40,7; y 50,2 ppb para Lima, Ica y Arequipa durante el ciclo diario, con el estándar horario de 90 ppb de la ciudad de California, EUA, igualmente se demostró que éstas siempre fueron menores que dicho estándar.

Abstract: By using the automatic method based on Photometry principle, and sensor of total solar radiation of automatic meteorological station, hourly tropospheric ozone concentrations and total solar radiation data were respectively collected in periods of 768 hours in each Lima, Ica and Arequipa peruvian cities of the year 2004; then, correlating both group of data hourly ozone concentrations and total solar radiation, from 07:00 to 18:00 local hours in such cities, the respective Pearson correlation coefficients of 0,758; 0,752; and 0,66 for Lima, Ica and Arequipa were found, which show the close direct relation between the hourly behavior of solar radiation and the tropospheric ozone formation in the daily cycle.

On the other hand, by comparing the average 16,5; 29,3; y 43,4 ppb maximum each 8 hours average of maximum hourly ozone concentration values for Lima, Ica and Arequipa, with the respective 60 ppb national standard value, was showed that these average values were lesser than it. In like manner, by comparing the 28,2; 40,7; y 50,2 ppb maximum hourly ozone concentration values for Lima, Ica and Arequipa in the daily cycle, with the respective 90 ppb standard hourly value for California USA state, so too, was showed that these values were lesser than it .

(*) *Ingeniero Meteorólogo. Director de Proyectos de Desarrollo y Medio Ambiente de la DGIA, SENAMHI.*

(**) *Bach. en Ingeniería Ambiental. Profesional de la DGIA, SENAMHI.*

I. INTRODUCCIÓN

Probablemente no todos, pero la mayoría de nosotros, sabemos que la capa de ozono protege la vida sobre la tierra de los efectos destructivos de la radiación ultravioleta que viene del sol. Por la acción protectora de esta capa, al gas ozono que lo conforma se le conoce como “ozono bueno”, el mismo que alcanza su mayor concentración entre los 20 y 50 km arriba de la superficie terrestre **(1)**.

Sin embargo, de acuerdo a los correspondientes Programas para mejorar la calidad del aire de las ciudades mexicanas (Tijuana–Rosarito 2000-2005; ciudad Juárez 1998-2002; zona metropolitana del valle de México 2002-2010; y Mexicali 2000-2005); Plan de Prevención y Descontaminación atmosférica de la región metropolitana de Chile - Trayectoria y perspectivas 1998-2003; Plan de Saneamiento Atmosférico de la Z.M. de Lima-Callao 2005-2010, este mismo gas ozono, generado en las ciudades y a nivel del suelo, es uno de los contaminantes más peligrosos que pone en riesgo la salud de la población de los medios urbanos; razón por la cual se le denomina “ozono malo” Así:

-En Tijuana Rosarito, el comportamiento estacional del ozono durante el período enero 97' y diciembre 98' muestra que los más altos promedios horarios de 4 estaciones se registraron en el período de marzo a mayo (primavera) y setiembre-octubre (otoño) entre 25 y 35 ppb; mientras que en el ciclo diario correspondiente al mismo período se encontró que a las 0 y 8 horas la concentraciones promedio horarias se mantuvieron por debajo de los 30 ppb, en tanto que a partir de la 9:00 horas las concentraciones tienden a incrementarse hasta alcanzar sus valores máximos entre las 11 y 16 horas, es decir, en las horas del día de mayor radiación solar y temperaturas más altas, condiciones indispensables para la formación de este contaminante. A partir de las 16 horas, las concentraciones promedio horarias tienden a disminuir significativamente hasta alcanzar concentraciones similares a las registradas por la mañana. **(2)**

-En ciudad de Juárez, el comportamiento horario del ozono durante el año 1997 para tres estaciones muestra que en el ciclo diario tiene una evolución muy similar a la radiación solar con concentraciones mínimas (10 IMECA) durante la noche entre las 19:00 y 7:00 horas a partir del cual se incrementa en el día hasta alcanzar su máximo entre las 12:00 y 14:00 horas (40 IMECA). Así mismo, durante el ciclo estacional se observa que los menores valores (10 – 40 IMECA) se dan en el invierno (diciembre- mayo) y los mayores valores en el verano (mayo –agosto) entre 10 a 50 IMECA. **(3)**

-En Mexicali, durante el período comprendido enero 1997-diciembre 1998 el comportamiento estacional del ozono troposférico muestra que trabajando con cuatro estaciones de monitoreo, se encontró que los valores medios mensuales más elevados en las 4 estaciones mostraron la tendencia a presentarse en los meses de primavera y verano entre 25 a 48 ppb; mientras que en el ciclo diario durante el período de invierno (diciembre 1997-febrero 1998), se observa que las concentraciones horarias de ozono de las 0:00 a las 6:00 horas son bajas (6 a 20 ppb) y a partir de esta hora se incrementan hasta alcanzar el máximo valor a las

13:00 horas (40-45 ppb) para posteriormente disminuir hasta las 18:00 horas, en tanto que en el período de verano (abril-julio) las concentraciones entre las 0:00 a 6:00 horas son bajas con valores de 10 a 30 ppb y a partir de esta hora se incrementan hasta alcanzar sus máximos valores entre las 11:00 y 15:00 horas de 55 a 65 ppb, a partir de cuyos valores decrecen más lentamente hasta las 18:00 horas, debiendo notarse que los mayores valores corresponden al verano, período en el cual, la radiación solar es mayor. **(4)**

-En la zona metropolitana del valle de México., al referirse a indicadores de calidad del aire, trabajando con 5 estaciones de monitoreo se reporta que gracias a las medidas de mitigación que van desde la modernización y ordenamiento del parque automotor e industrial, mejoramiento de combustibles, establecimiento de verificentros, etc, se observa una tendencia decreciente estadísticamente significativa en las concentraciones de ozono en el período 1990-2000. Específicamente en el período 1995-2000 se registra una disminución en las 5 estaciones de 12 a 26% en las concentraciones de ozono troposférico. Así mismo, la evolución del comportamiento diario de las concentraciones de ozono muestra, una disminución paulatina a lo largo de la década, tanto en la magnitud de los promedios horarios máximos como en la amplitud del período de ascenso de sus valores; así, mientras en 1990 las concentraciones medias horarias oscilaban entre 20 ppb a las 8:00 horas a 118 ppb a las 12:00 horas; en el 2000 éstas variaban entre 8 ppb a las 8:00 horas a 98ppb a las 11:00 horas. **(5)**

De acuerdo a Allende, F. (2003), en la región metropolitana de Santiago de Chile, las concentraciones del ozono superaban a la norma en 270% durante 1995. Asimismo, informa que, después que en el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica-PPDA-de la región metropolitana de Santiago de Chile 1997/2000 se habían propuesto como metas globales, reducir hacia el año 2000 en 7.5 % las concentraciones de cada uno de los contaminantes criterio; sin embargo, en 1999 llegaron a la conclusión que solo el material particulado y los óxidos de azufre estaban bajo control; no así el ozono, dado que sus altas concentraciones, especialmente en el verano, habían tendido a permanecer constantes, superando las concentraciones máximas a la norma en todas las estaciones de observación con 140 días durante el año 1999 superior a la norma en la estación Las Condes. Lo que planteó la urgencia de actualizar el PPDA-2001/2002 y luego 2003/2005. **(6)**

Teniendo en cuenta, el papel del ozono como contaminante del aire que afecta a la salud de la población de las zonas urbanas, el presente trabajo muestra el comportamiento de las primeras mediciones realizadas del Ozono Troposférico, en algunas ciudades del Perú.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales: Se utilizó el equipo analizador automático de ozono troposférico M400A, Serie N° 722, marca Teledyne y accesorios para la recopilación de los datos de ozono troposférico y una estación meteorológica automática DAVIS en cada una de las ciudades para la recolección de los datos de radiación solar.

2.2 Métodos: Para las mediciones del ozono troposférico, se ha utilizado el método automático del equipo analizador, basado en el principio de Fotometría UV (D.S. N°074-PCM 2001). Para la recopilación de los datos de radiación solar se utilizó el sensor de radiación solar basado en la respuesta de un fotodiodo de silicón.

Se seleccionaron los siguientes períodos de 32 días de 0 a 23 horas (768 datos) en cada localidad: Lima (17/04/04-18/05/04); Ica (12/08/04-12/09/04); y Arequipa (23/09/04-24/10/04).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estadística descriptiva de las concentraciones horarias de ozono troposférico:

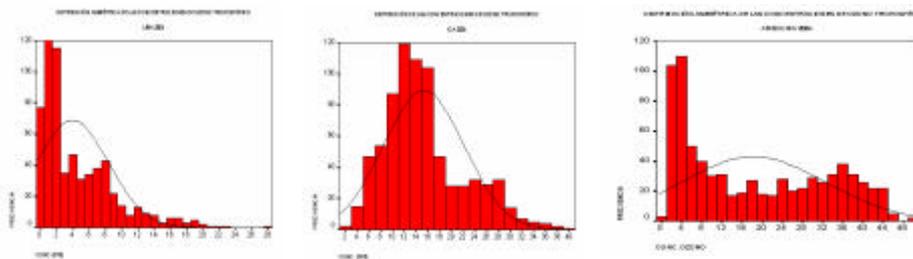


Fig. 3.1
DISTRIBUCIÓN DE
FRECUENCIAS
HORARIAS DE
OZONO
TROPOSFÉRICO

En la **Fig. 3.1**, se muestra las respectivas distribuciones de frecuencias de las concentraciones horarias de ozono troposférico registradas en cada una de las tres localidades con coeficientes de variabilidad de 88,2; 45,3; y 79,8 %, respectivamente. Respecto a la curva normal estándar, se observa que Lima y Arequipa presentan asimetría positiva, es decir, la mayor frecuencia de concentraciones son menores que sus respectivas medias de 3,4 y 17,8 partes por billón (ppb); mientras que en Ica están mejor distribuidas alrededor de su media de 15,0 ppb (**Cuadro N° 3.1**).

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	LUGARES DE MEDICIÓN						
	LIMA		ICA		AREQUIPA		
	Statistic	Std. Error	Statistic	Std. Error	Statistic	Std. Error	
Mean	3.9	0.2	15.3	0.2	18.3	0.5	
95% CI	Lower Bound	3.5		14.8		17.3	
	Upper Bound	4.3		15.8		19.3	
5% Trimmed Mean	3.4		15.0		17.8		
Median	1.9		14.2		14.9		
Variance	8.8		46.7		202.7		
Std. Deviation	3.0		6.8		14.2		
Coef. Variabilidad (%)	88.2		45.3		79.8		
Minimum	0.1		2.2		0.0		
Maximum	28.2		40.7		50.2		
Range	28.1		38.5		50.2		
Interquartile Range	5.3		7.5		27.3		
Skewness	1.7	0.1	0.9	0.1	0.4	0.1	
Kurtosis	3.2	0.2	0.4	0.2	-1.3	0.2	

CUADRO N° 3.1 ANÁLISIS
ESTADÍSTICO DE LAS
CONCENTRACIONES DE OZONO
TROPOSFÉRICO DE LAS TRES
LOCALIDADES

3.2 Comportamiento temporal de las concentraciones horarias de ozono troposférico y radiación solar en el ciclo diario:

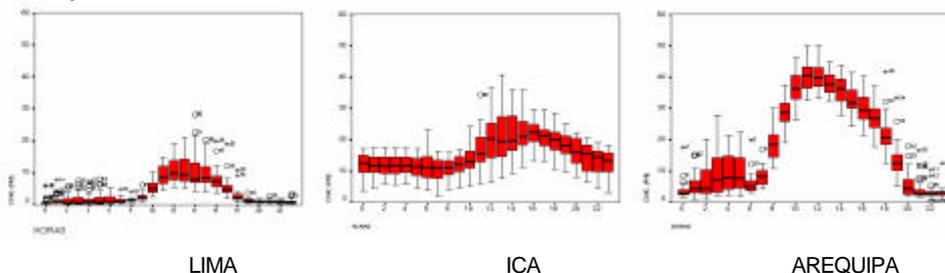


FIG. 3.2a: GRÁFICO DE CAJAS
DE LAS CONCENTRACIONES
HORARIAS DEL OZONO
TROPOSFÉRICO

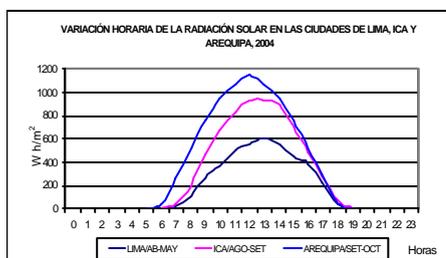


FIG. 3.2b: COMPORTAMIENTO DE LA
RADIACIÓN SOLAR DURANTE EL CICLO
DIARIO

Al analizar las concentraciones horarias del ozono troposférico durante el ciclo diario (Ver **fig. 3.2a**) se observa que las mayores concentraciones se presentaron en horas alrededor del medio día, alcanzando los máximos de 28,2 ppb a las 14:00; 40,7 ppb a las 13:00 horas; y 50,2 ppb a las 12:00 horas en Lima, Ica y Arequipa. Así mismo, en la **figura 3.2 b**, se observa el comportamiento de los promedios horarios de la radiación solar registrada en los períodos de evaluación en cada una de las tres localidades con máximos de 605 W h/m² a las 13:00 horas, 938 W h/m² a las 13:00 horas y 1153 W h/m² a las 12:00 horas en Lima, Ica y Arequipa. Teniendo en cuenta que el mayor de los precursores para la formación del ozono troposférico es la radiación solar (**1**), y al observar las figuras **3.2 a** y **b**, es claro referir que existe una relación directa entre ambas variables.

3.3 Correlación de Pearson entre las máximas concentraciones horarias de ozono troposférico y máximos promedios horarios de radiación solar total

La relación cualitativa señalada en el acápite anterior, se confirma cuantitativamente al realizar la correlación de Pearson entre los máximos promedios horarios de radiación solar total y máximos horarios de ozono troposférico entre las 7:00 y 18 horas. En el **Cuadro N° 3.3** se pueden observar los coeficientes de correlación los cuales demuestran la estrecha relación entre ambas variables para cada una de las tres localidades.

Localidades	Conc. Total O3 troposférico (ppb)	Acumulado Rad. Solar W h / m ²	Coefficiente correlación Pearson r ²
Lima	99 801	3 029,4	0,758
Ica	167 535	11 722,0	0,752
Arequipa	242 248	14 043,5	0,66

CUADRO N° 3.3 CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE OZONO TROPOSFÉRICO Y RADIACIÓN SOLAR EN LIMA, ICA Y AREQUIPA

3.4 Comparación de la información recopilada con los Estándares de calidad del aire respecto al ozono troposférico.

3.4.1 Comparación con el estándar nacional para 8 horas: En primer lugar se obtuvieron los máximos de los promedios móviles de 8 horas de las concentraciones de ozono troposférico para las tres localidades encontrándose los máximos valores de 17; 29; y 43 partes por billón ocurridos a las 17:00 y 18:00; 18:00 y 19:00; y 16:00 y 17:00 horas en Lima, Ica y Arequipa, respectivamente, y al compararlos con el estándar nacional de 60 partes por billón establecido por el Decreto Supremo N° 074 – PCM – 2001 “ Reglamento Nacional de Estándares Nacionales de la Calidad Ambiental del Aire”, se encontró que durante el ciclo diario, siempre fueron menores que éste. (**Fig. 3.4 a**)

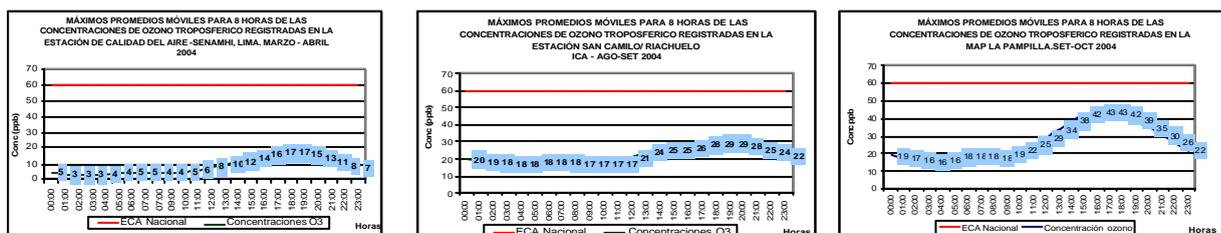


FIG. 3.4 a: COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS (PROMEDIO MÓVIL) DE OZONO TROPOSFÉRICO CON EL ESTÁNDAR NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE

5.4.2 Comparación con el estándar de una hora para la ciudad de California: En este caso, se compararon las concentraciones horarias máximas registradas durante el ciclo diario en las tres localidades, cuyos valores máximos absolutos fueron de 28; 41; y 50 partes por billón, ocurridos a las 14:00; 13:00; y 11:00 y 12:00 horas en Lima, Ica y Arequipa, respectivamente, y al compararlos con el respectivo estándar para una hora establecido en la Sección 70200 del Título 17 del Código de Regulaciones del Estado de California, se encontró que durante el ciclo diario, siempre fueron menores que éste.



FIG. 3.4 b: COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS (PROMEDIO MÓVIL) DE OZONO TROPOSFÉRICO CON EL ESTÁNDAR DE CALIDAD DEL AIRE DE CALIFORNIA

Se concluye que el comportamiento de las concentraciones de ozono troposférico durante el ciclo diario muestra una estrecha relación directa con el comportamiento horario de la radiación solar total. Así mismo, en las tres localidades los registros de concentraciones horarias de ozono troposférico no superaron tanto al estándares nacional para 8 horas como al estándar horario del Estado de California, durante los períodos de evaluación.

IV. BIBLIOGRAFÍA

- ARYA, S. 1999. Air Pollution, Meteorology and dispersion. Oxford University. New York, USA. 310 pp.
- SEMARNAP.2000. Programa para mejorar la calidad del aire en Tijuana Rosarito: 2000-2005. México. 245pp.
- SEMARNAP.1998. Programa de gestión de la calidad del aire de ciudad Juárez: 1998-2002. México. 272pp.
- SEMARNAP.1999. Programa para mejorar la calidad del aire de Mexicali: 2000-2005. México. 245pp.
- Comisión Ambiental Metropolitana - CAM.2003. Programa para mejorar la calidad del aire de la Z.M.V.M.: 2002-2010. México. 386 pp.
- Allende, F. 2003. El plan de prevención y descontaminación atmosférica de la región metropolitana de Chile. Trayectoria y perspectivas. Santiago de Chile. 118pp.

DIRECCIÓN DE LOS AUTORES:

jsilva@senamhi.gob.pe
zmontova@senamhi.gob.pe