

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE RESPECTO DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES (PST) Y METALES PESADOS (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) EN LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, DURANTE UN PERIODO ANUAL

Martín Eusebio CRUZ CAMPAS^{1,2*}, Agustín GÓMEZ ÁLVAREZ³, Margarito QUINTERO NÚÑEZ¹ y Jaime VARELA SALAZAR³

¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Campus Mexicali, Calle de la Normal s/n y Blvd. Benito Juárez, Col. Insurgentes Este, Mexicali, B.C.

² Ingeniería Ambiental Industrial, Universidad Estatal de Sonora, Av. Ley Federal del Trabajo s/n, Col. Apolo, C.P. 83100, México

³ Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora, Blvd. Rosales y Luis Ensina s/n, Edificio 5B, C.P. 83000, Col. Centro, Hermosillo Sonora

*Autor responsable: martincruzcampas@hotmail.com

(Recibido abril 2012, aceptado julio 2013)

Palabras clave: contaminación atmosférica, material particulado, PST, Hermosillo

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó la calidad del aire para la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002, en los sitios de monitoreo Centro (Mazón), Noreste (CESUES) y Noroeste (CBTIS). Los filtros muestra usados para ese propósito fueron proporcionados por el Programa de Evaluación y Mejoramiento de la Calidad del Aire (PEMCA) del Ayuntamiento de Hermosillo. El muestreo se realizó bajo el método de alto volumen estableciéndose muestreos cada 6 días no simultáneos en los tres sitios. Para la determinación de metales pesados, los filtros fueron solubilizados mediante extracción ácida, analizándose posteriormente por espectroscopia de absorción atómica. Los resultados indican que las concentraciones de PST en las estaciones Centro y Noroeste rebasaron frecuentemente el máximo permisible para 24 h ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que en los tres sitios de monitoreo fue rebasado el máximo permisible anual ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ambos establecidos en la Norma NOM-024-SSA1-1993 (SSA 1994a) vigente al momento del estudio. Por otra parte, considerando la metodología del Índice Uniforme de Calidad del Aire (USEPA 1992a) utilizada en México por el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA), los resultados indican que la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo con respecto de PST se encontraba entre no satisfactoria y mala durante el periodo de estudio. En relación con los metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr), las concentraciones detectadas se encuentran por debajo de los máximos permisibles señalados en la Norma NOM-026-SSA1-1993 (SSA 1994b), en los criterios de la Organización Mundial de la Salud (WHO 2000), de la Comunidad Europea (CEC 2003) y de la Agencia Ambiental Europea (EEA 2004). Por lo tanto, las concentraciones detectadas de metales pesados no representaron peligro o riesgo a la salud; sin embargo la calidad del aire se clasificó como no satisfactoria debido a las altas concentraciones de material particulado. Se recomienda la continuidad en el monitoreo de los parámetros de calidad del aire a fin de contar con información más exhaustiva que permita relacionar la calidad del aire con los riesgos a la salud, la morbilidad y mortalidad, así como con las condiciones

regionales topográficas, meteorológicas y de urbanización, que incidan en el diseño de un programa local de mejoramiento de la calidad del aire.

Key words: air pollution, particulate matter, TSP, Hermosillo

ABSTRACT

In the present study, the air quality of the city of Hermosillo, Sonora, México was assessed considering total suspended particulates (TSP) and heavy metals (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) from June 2001 through May 2002 in three monitoring sites Centro (Mazon), Noreste (CESUES) and Noroeste (CBTIS). The filter-samples used for that purpose were provided by the Air Quality Evaluation and Improvement Program (PEMCA) of the municipality of Hermosillo. The sampling method was based on high volume sampling frequency set every 6 days with non-simultaneous sampling among the three sampling sites. Filters were dissolved for metal determination by acidic-extraction, and then analyzed by flame atomic absorption spectrophotometry. Results indicate that TSP concentrations at Centro and Noroeste sites were frequently higher than the maximum daily permissible level ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$), while in the three sites the annual average was higher than the maximum annual permissible level ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) both established in the Norm NOM-024-SSA1-1993 (SSA 1994a). According to the Air Quality Standard Index (USEPA 1992a), used in México by Air Quality Metropolitan Index (IMECA) the results indicate that the air quality in the city of Hermosillo regarding TSP was placed between no satisfactory and poor. In regard to heavy metals (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr), concentrations detected were below the maximum permissible levels and/or criteria taking into account the Norm NOM-026-SSA1-1993 (SSA 1994b), the WHO criterion (2000), the European Union criterion (CEC 2003), and the European Environmental Agency criteria (EEA 2004). Such findings would mean that airborne metals are of no concern; however, air quality is still classified as no satisfactory due to the high particulate matter concentrations. Keeping air quality parameters monitoring is recommended in order to get extensive data for use in risk studies of air quality and health (morbidity/mortality), as well as topographic conditions, meteorological and urban-related conditions that may exert an influence over an official design of local air quality program.

INTRODUCCIÓN

Los seres humanos requieren de un suplemento regular de aire y éste debe ser de calidad aceptable, lo cual es un derecho humano fundamental (WHO 2003). La presencia de altas concentraciones de partículas en el aire puede causar o agravar enfermedades cardiovasculares y pulmonares, por ejemplo, reduciendo la función pulmonar y ocasionando ataques de asma, bronquitis crónica y susceptibilidad a infecciones respiratorias, también puede causar arritmias y ataques de corazón y afectar, además, los sistemas nervioso central y reproductivo e incluso causar cáncer propiciando muerte prematura (EEA 2011). A lo largo de la historia la humanidad ha estado en contacto con los contaminantes atmosféricos, sin embargo a medida que se desarrollaron las ciudades y se consolidó la revolución industrial la contaminación del aire se ha visto como algo común y cotidiano (Dickson 1996);

hoy en día se ha demostrado de forma contundente e inequívoca la asociación de la contaminación por partículas con el incremento en la mortalidad en las grandes ciudades (Garibay-Chávez 2009). Asimismo, estudios epidemiológicos atribuyen los efectos más severos a la salud a la contaminación por partículas en el aire y al ozono, pero además para estos contaminantes aún no han sido identificados niveles seguros ya que incluso concentraciones por debajo de los criterios de calidad del aire pueden representar riesgos a la salud (WHO 2006).

En la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, la población ha manifestado desde hace años su inquietud respecto de la calidad del aire que se respira, principalmente por la visible capa de polvo que cubre gran parte de la ciudad durante la mañanas y muy marcadamente durante los periodos de otoño e invierno. Existen antecedentes para esta ciudad de medición de PST de 1990 a 1995 (SEMARNAP 1996), reportándose que todos



Fig. 1. Localización del área de estudio y distribución de las estaciones de muestreo de partículas suspendidas totales (PST) en Hermosillo, Sonora, México

esos años se rebasó el máximo permisible anual de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con promedios anuales que fluctuaban de 126 hasta $565 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a metales en aire para esta ciudad, se identificó un estudio en el que se evaluó Pb (SEDESOL 1993) cuyas concentraciones promedio se encontraban entre 0.28 y $0.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Por otra parte, los indicadores de afectación a la salud por este problema ambiental lo representan las infecciones respiratorias agudas (IRAS), las cuales ocuparon el primer lugar de atención en el servicio de urgencias y de hospitalización del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) en Hermosillo. De acuerdo a la Secretaría de Salud Pública (Gobierno del Estado de Sonora 2002), para las enfermedades por grupos de edad se estableció que para el Municipio de Hermosillo durante el año 2001 las IRAS fueron 248 104 casos, representando 3761.9 por cada 10 000 habitantes. El grupo de edad de 1 a 4 años fue el que reportó más eventos con 63 238 seguido del grupo de 25 a 44 años con 44 929; los siguientes dos grupos de edad con mayor índice fueron los de menos de 1 año con 35 701 y el de 5 a 9 años con 34 961 casos. De esta manera, el rango de edad de 0 a 9 años suma 133 900 incidentes que representaron el 54 % de las enfermedades respiratorias agudas para este municipio en ese año.

Debido a la escasa información oficial sobre partículas y metales en el aire ambiente para la ciudad de Hermosillo, se planteó el presente estudio, cuyo objetivo fue evaluar la calidad del aire ambiente respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) para un período anual, a fin de aportar elementos en la consecución

de un programa oficial de gestión de la calidad del aire para esta ciudad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La localización de los sitios de muestreo fue: Centro: $110^{\circ}57'11.1''\text{O}$ y $29^{\circ}04'40.8''\text{N}$, Noreste: $110^{\circ}57'40.3''\text{O}$ y $29^{\circ}07'17''\text{N}$ y Noroeste: $111^{\circ}00'25.4''\text{O}$ y $29^{\circ}07'06.6''\text{N}$, los cuales se localizan en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México (**Fig. 1**). El clima identificado para la ciudad corresponde a los tipos muy seco muy cálido y cálido BW(h') y muy seco semicálido BWh, predominando en el 47.5 y 49.6 % de la superficie municipal respectivamente. La temperatura promedio es de 25.1°C y el mes más frío es diciembre con promedio de 16.8°C ; el mes más caluroso es julio con promedio de 32.6°C . La precipitación promedio es de 393.8 mm y los meses con las mayores precipitaciones pluviales son julio, agosto y septiembre. La vegetación, de acuerdo a la superficie municipal ocupa: agricultura el 14.64 %, bosque el 0.06 %, matorral el 74.75 %, pastizal el 3.03 % y otros el 7.52% (INEGI 2006). Los vientos dominantes se dirigen en sentido suroeste-noreste por la mañana y en sentido contrario por la tarde (Gobierno Municipal de Hermosillo 2003).

Metodología de muestreo y análisis

En este estudio se utilizó la información y filtros de muestreo obtenidos por el Programa de Evaluación

CUADRO I. CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES (PST) EN TRES SITIOS DE MONITOREO EN LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, DURANTE EL PERÍODO JUNIO DE 2001 A MAYO DE 2002

Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Estación Centro (Mazón)	Estación Noreste (CESUES)	Estación Noroeste (CBTIS)
Mínima	58.59	17.98	47.52
Promedio	140.11	110.98	244.32
Máxima	472.87	243.32	610.82
Desviación Estándar	70.49	52.95	119.25

y Mejoramiento de la Calidad del Aire (PEMCA) del H. Ayuntamiento de Hermosillo durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002. El método de muestreo utilizado fue el establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993 (SEMARNAT 1993), el cual coincide con el método establecido en el Apéndice B de la Parte 50 (Método de referencia para la determinación de material particulado suspendido en la atmósfera – método de alto volumen) del título 40 del Código de Regulaciones Federales de los EUA (USEPA 1992b).

En el PEMCA se estableció una frecuencia de muestreo cada 6 días con muestreos no simultáneos en los tres sitios de muestreo. Los filtros, cuyo peso fue determinado antes y después del muestreo para

la obtención de la concentración de PST, fueron utilizados para la determinación de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en aire ambiente, de acuerdo con el procedimiento establecido en el Apéndice G de la Parte 50 (Método de referencia para la determinación de plomo en material particulado suspendido en aire ambiente) del título 40 del Código de Regulaciones Federales de los EUA (USEPA 1992c). Para ello se realizó una extracción ácida de los metales presentes en las muestras contenidas en los filtros, analizándose posteriormente por espectrometría de absorción atómica por flama, utilizándose un equipo de absorción atómica Perkin-Elmer modelo 3110.

Para el control de calidad se consideraron los lineamientos establecidos en el Manual de Asegu-

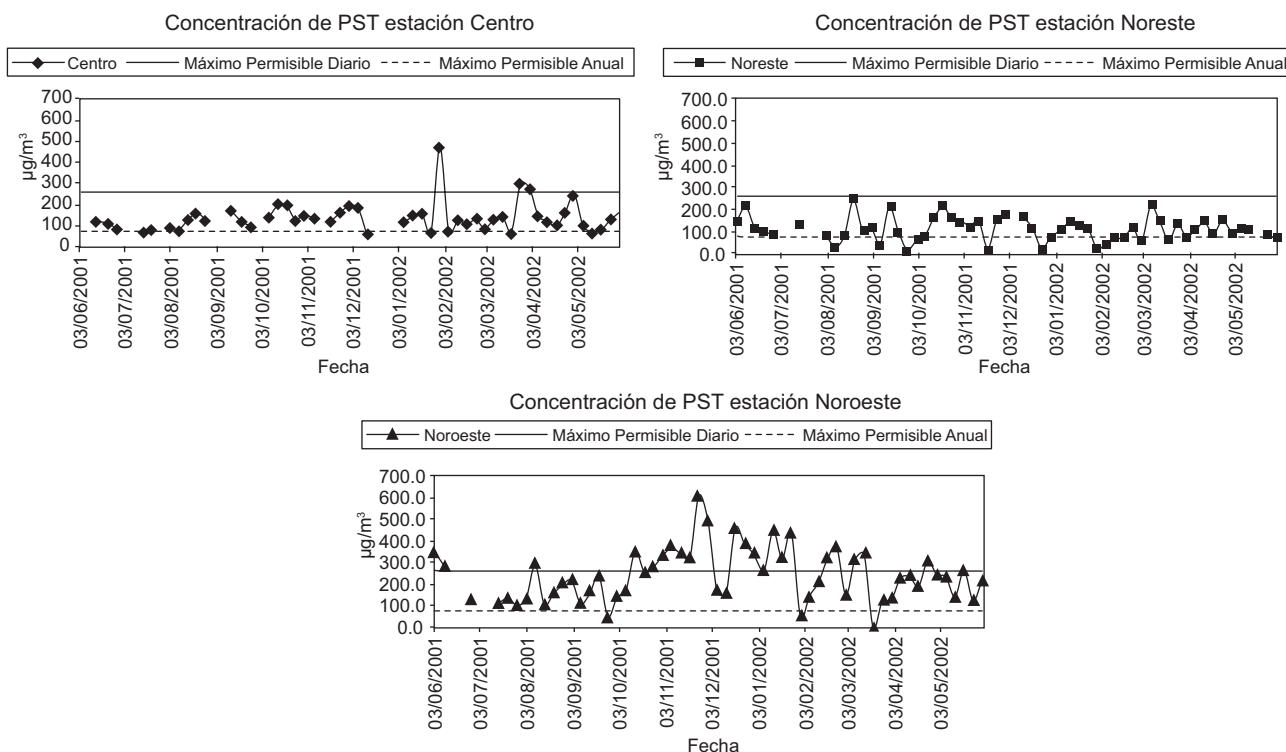


Fig. 2. Distribución y comparación de concentraciones de PST con los máximos permisibles según la NOM-024-SSA1-1993 en tres sitios de monitoreo, durante el período junio de 2001 a mayo de 2002 en Hermosillo, Sonora, México

ramiento de Calidad para Sistemas de Medición de Contaminación del Aire recomendada por la agencia de protección ambiental de los EUA (EPA 1998). La determinación de presencia o ausencia de normalidad en los datos fue obtenida a partir de gráficas de cuantiles, observándose que la distribución de los valores de concentración (espacial y temporal) no siguen una distribución normal, por lo que la herramienta estadística para identificar diferencias espaciales y temporales fue la prueba no paramétrica de Van der Waerden (Conover 1971). Para evaluar la calidad del aire se utilizaron los máximos permisibles o criterios: Norma NOM-024-SSA1-1993 para PST (SSA 1994a), la norma NOM-026-SSA1-1993 para Pb (SSA 1994b), las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (WHO 2000) para Cd, la propuesta de directiva de Comisión de las Comunidades Europeas (CEC 2003) para Ni, y los criterios de la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA 2004) para Cu y Cr.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentraciones de PST

En el **cuadro 1** se presentan los valores mínimo, promedio, máximo y desviación estándar de la concentración de PST para cada sitio de monitoreo, y en la **figura 2** se grafican todos los valores de concentración según sitio de monitoreo y se realiza la comparación con los máximos permisibles establecidos en la norma NOM-024-SSA1-1993 (SSA 1994a) correspondientes a 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 h y 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media aritmética anual. Se observó que para el sitio de muestreo Centro, de los 49 días muestreados, en tres ocasiones (6.2 %) se rebasó el máximo permisible para 24 h mientras que el promedio anual fue de 140.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo superior al máximo permisible anual. Para el sitio de muestreo Noreste en el cual se muestrearon 55 días, se detectó que ningún día se rebasó el máximo permisible de 24 h, sin embargo el promedio anual fue de 110.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual también rebasa el promedio anual máximo permisible. Respecto al sitio Noroeste se identificó que de los 56 días muestreados, 23 veces (41 %) se rebasó el máximo permisible para 24 h, obteniéndose además un promedio anual de 244.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual fue superior en más del 300 % al máximo permisible anual. Es importante señalar que en septiembre de 2005 se modificó la normatividad en México sobre partículas. Según la NOM-025-SSA1-1993 (SSA 2005), para PST se estableció 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como máximo permisible promedio de 24 h, definiéndose que un sitio no cumple con la norma cuando el valor correspondiente al

percentil 98 de los días válidos muestreados esté por arriba de esa concentración. Bajo esa modificación se confirma que los tres sitios de muestreo no cumplen con la normatividad al rebasarse en más de dos veces ese valor. Anterior a este trabajo, se han reportado para Hermosillo promedios anuales de PST desde 126 hasta 565 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (SEMARNAP 1996), por lo que los resultados de este estudio se consideran consistentes para esta ciudad. Como referencias nacionales, se puede señalar que para la Zona Metropolitana del Valle de México entre 1986 y 1998 los porcentajes de días que se rebasó el máximo permisible de PST (24 h) van del 14 a 59%, mientras que para la zona metropolitana del Valle de Toluca de 1996 a 1998 dichos porcentajes van del 19 al 44 % (INE-SEMARNAP 1999), encontrándose este estadístico en rangos parecidos (del 6 al 41 %) para la ciudad de Hermosillo en el período de estudio.

Con la finalidad de clasificar la calidad del aire respecto de PST para la ciudad de Hermosillo a partir de índices comúnmente utilizados, se realizó un ejercicio del cálculo del Índice Uniforme de Calidad del Aire (USEPA 1992a), esta metodología es utilizada por el Índice Estándar de Contaminantes (Pollutants Standards Index ó PSI) en EUA y por el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA) en México. Para ello, se utilizaron los valores de niveles IMECA y el valor promedio de PST de los días que se rebasó el máximo permisible en el sitio de muestreo Noroeste que fue de 357 $\mu\text{g}/\text{m}^3$:

$$\text{IMECA PST} = ((200-100)/(546-260)) \times (357 - 260) + 100 = 133.9$$

Este valor del índice se encuentra en el rango de 101 a 200 el cual, de acuerdo con los puntos de quiebre IMECA (INE-SEMARNAP 1998) se clasifica como una calidad del aire No Satisfactoria.

El origen de las altas concentraciones de partículas detectadas en el aire ambiente en la ciudad de Hermosillo podrían ser resultado de un posible sinergismo dado entre dos factores que se conjugan en la ciudad, primero el aporte de partículas derivado del tráfico vehicular en calles sin pavimentar y de los terrenos baldíos, y segundo, un evento de encapsulamiento de las masas de aire sobre la mancha urbana por motivos topográficos. Respecto al primer factor se tienen los siguientes datos: de las 14 744 hectáreas del área urbana 11 298 hectáreas (76.6 %) corresponden a lotes, el resto corresponde a vías públicas y zonas de cerros; del área de lotes, 3 582 hectáreas (31.7 %) se encuentran baldíos, o sea casi una cuarta parte del total del área ocupada por los lotes de la ciudad son zonas que potencialmente generan polvos

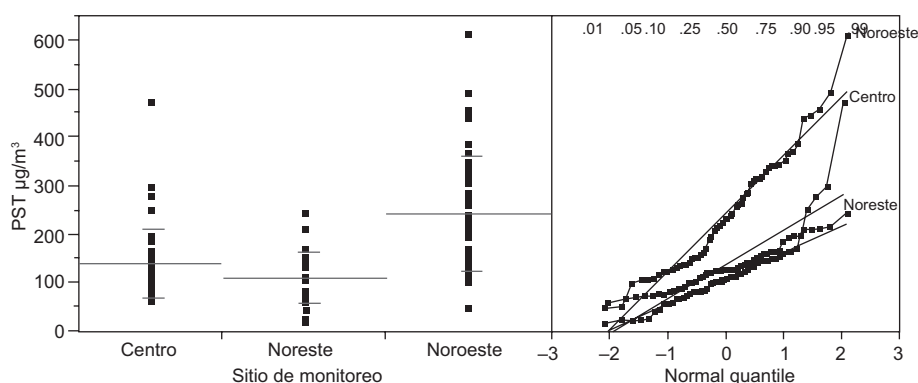


Fig. 3. Distribución de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en tres sitios de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002 en Hermosillo, Sonora, México

al ambiente. Se adiciona la falta de pavimentación en zonas críticas; la cobertura de pavimento en la ciudad fue del 74.76 % de la superficie de rodamiento, lo que significa que de los 17 909 663 m^2 de superficie de rodamiento 4 520 515 m^2 son de terracerías que aportan polvos a la atmósfera. En cuanto al segundo factor, el Programa Municipal de Desarrollo Urbano para Hermosillo 2003 (Gobierno Municipal de Hermosillo 2003), citó que las partículas generadas por el viento, más las generadas por el tráfico vehicular en el norte de la ciudad, son impactadas en la barrera que en forma perpendicular a la dirección del viento presentan las elevaciones cerriles ubicadas al noreste de la ciudad (Sierra del Bachoco), regresando ese aire contaminado y formando una cubierta de polvo. En la **figura 1**, se puede apreciar hacia el noreste esta barrera de cerros, lo que aunado al viento dominante que corre de suroeste a noreste generan el problema de permanencia de polvo en la ciudad.

Comportamiento espacial y temporal de PST

En relación con el comportamiento espacial de PST, la prueba estadística de Van Der Waerden

($\alpha = 0.05$) detectó que existen diferencias significativas en cuanto a la concentraciones de PST (**Fig. 3**) en los sitios de monitoreo. La prueba demostró que la estación Noroeste es diferente a las estaciones Centro y Noreste al rebasarse en más del 300 % la norma en la primera en cuanto a calidad del aire. Esto puede explicarse por el hecho de que la zona Noroeste de la ciudad es la que tiene menos cobertura de pavimentación sobre las vialidades en el período de estudio. Respecto al comportamiento temporal, en la **figura 4** se presenta la distribución de las concentraciones de PST agrupadas por estación del año. La prueba de Van Der Waerden ($\alpha = 0.05$) demostró que no existe diferencia significativa entre las concentraciones detectadas de PST según estación del año, por lo que se puede asumir que la distribución de concentración de partículas es homogénea a lo largo del año en las zonas de estudio. Esta situación es preocupante, ya que si se observó que en dichos sitios de muestreo se rebasa el máximo permisible, entonces es posible suponer que el riesgo de afectación a la salud puede presentarse durante todo el año.

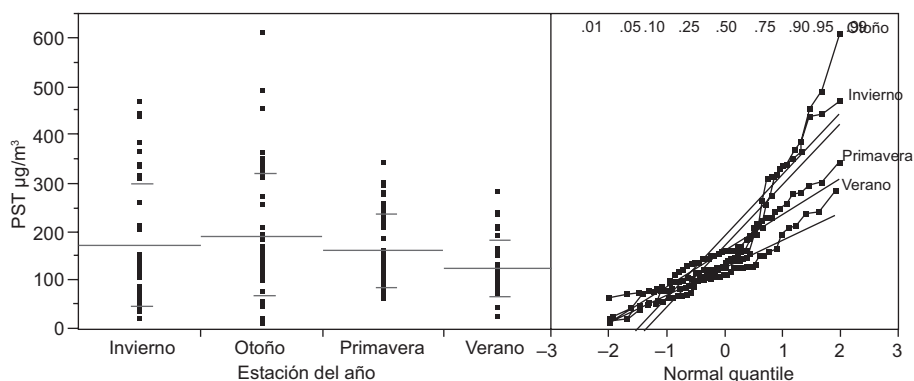


Fig. 4. Distribución de concentraciones de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) según estación del año durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002 en Hermosillo, Sonora, México

CUADRO II. CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN AIRE AMBIENTE EN TRES SITIOS DE MONITOREO EN LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, DURANTE EL PERÍODO JUNIO DE 2001 A MAYO DE 2002 Y SU COMPARACIÓN CON CRITERIOS O MÁXIMOS PERMISIBLES

Metal	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Estación Centro (Mazón)	Estación Noreste (CESUES)	Estación Noroeste (CBTIS)	Criterio / Máximo permisible
Pb	Promedio	0.025	0.021	0.031	1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio aritmético trimestral (DOF, 1994b)
	Máximo	0.080	0.068	0.081	
	D.E.*	0.019	0.017	0.021	
Cd	Promedio	0.00043	0.00013	0.00051	0.005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual (WHO, 2000; CEC 2003)
	Máximo	0.007	0.004	0.009	
	D.E.*	0.00149	0.00068	0.00171	
Ni	Promedio	0.009	0.008	0.012	0.020 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual (CEC, 2003)
	Máximo	0.025	0.021	0.027	
	D.E.*	0.006	0.005	0.007	
Cu	Promedio	0.042	0.043	0.045	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual (EEA, 2004)
	Máximo	0.218	0.119	0.112	
	D.E.*	0.031	0.024	0.019	
Cr	Promedio	0.008	0.007	0.010	1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio diario (EEA, 2004)
	Máximo	0.028	0.019	0.023	
	D.E.*	0.007	0.004	0.006	

D.E.* = Desviación estándar

Concentraciones de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr)

En el **cuadro II** se presentan los valores de concentración promedio, máxima y desviación estándar para cada metal en el periodo de estudio. Es relevante

señalar que los valores promedio más altos de todos los metales se presentaron en el sitio Noroeste. En la **figura 5** se presenta la gráfica de distribución de Pb para los tres sitios de monitoreo. Cabe mencionar que el porcentaje de muestras por sitio que se reportaron

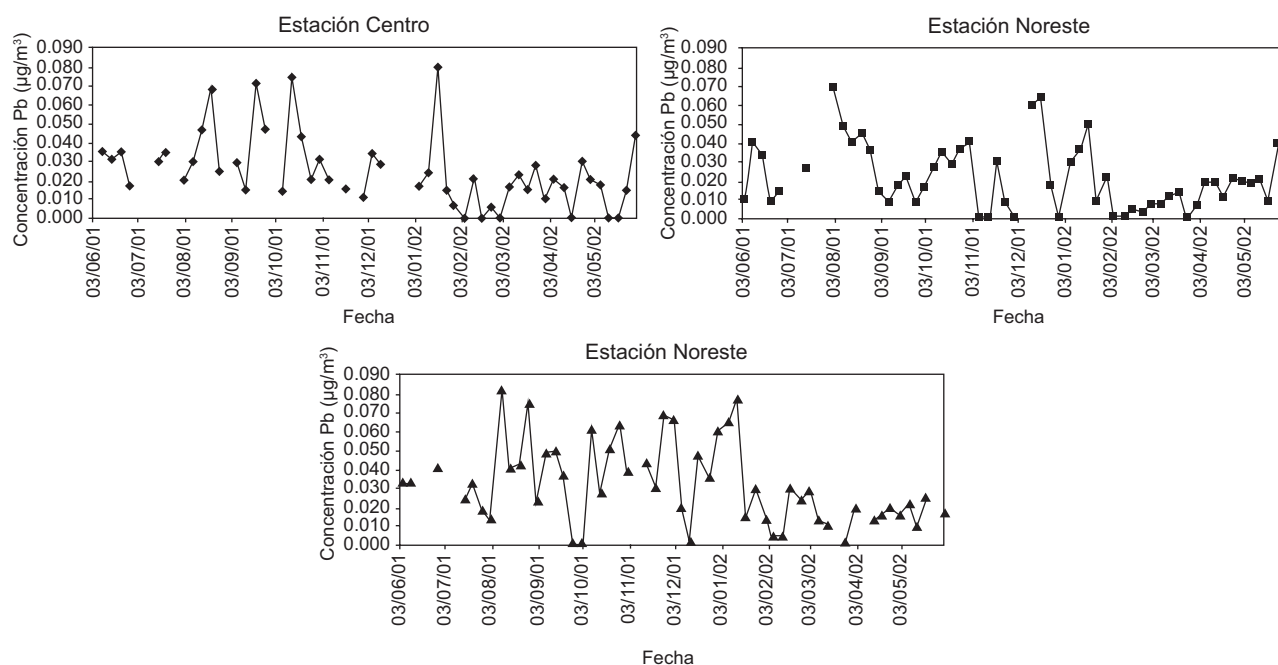


Fig. 5. Concentración detectada de plomo en aire ambiente en tres sitios de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002, en Hermosillo, Sonora, México

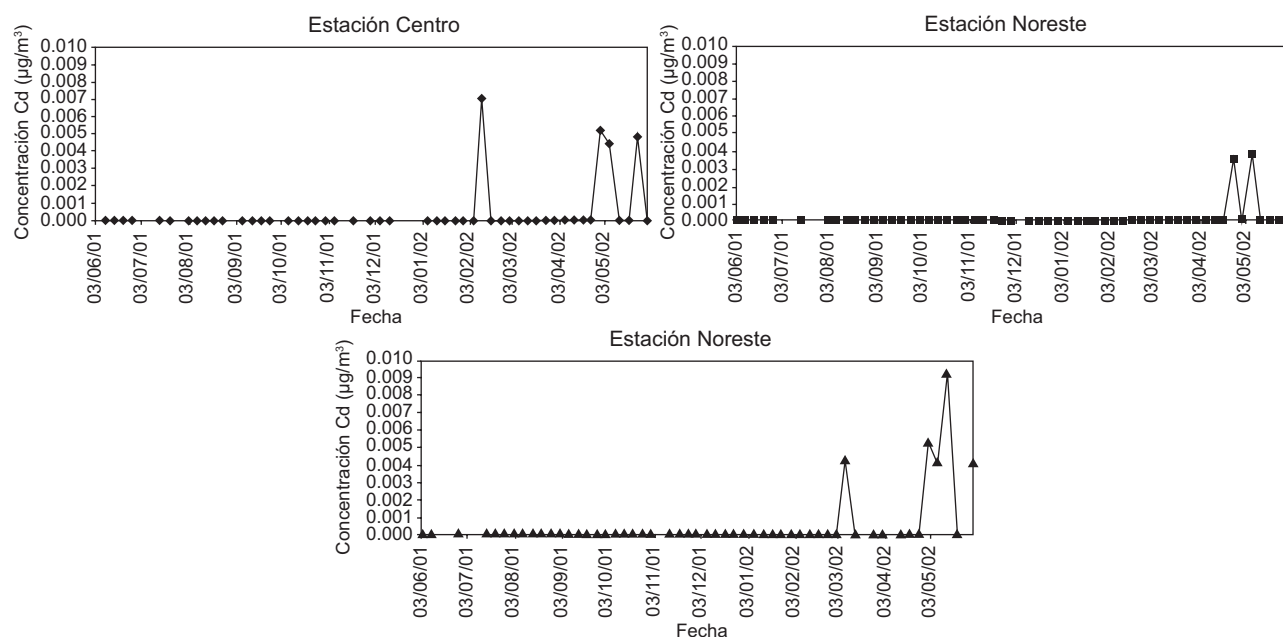


Fig. 6. Concentración detectada de cadmio en aire ambiente en tres sitios de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002, en Hermosillo, Sonora, México

como ND ($<0.034 \mu\text{g}/\text{m}^3$) por sitio de muestreo fueron: Centro el 64 %, Noreste el 62.5 % y Noroeste el 54.7 %. Los valores promedio anual de Pb fueron 0.025, 0.021 y $0.031 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los tres sitios respectivamente. El valor más alto de Pb detectado fue de $0.081 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Noroeste, el cual se ubica por debajo del valor máximo permisible de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la norma NOM-026-SSA1-1993 (SSA 1994b) para un promedio trimestral. Como dato comparativo se puede señalar que la Delegación Estatal de SEDESOL (1993) reportó concentraciones de plomo en aire ambiente para 1992 para los sitios Centro, Noreste y Semeson (Noroeste) con los siguientes valores promedio: 0.373, 0.283 y $0.349 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Comparando esos valores con los obtenidos en el presente estudio se observa una disminución promedio de un 92 % en la concentración de Pb en el aire ambiente. Esta situación ha sido identificada como uno de los mayores logros en la protección de la salud pública y es atribuible a la mejora de la calidad de las gasolinas, ya que en México en 1986 el contenido de tetraetil de plomo en la gasolina era de 3.5 mL/gal, para 1991 la proporción de este químico era de 0.54 mL/gal, en 1994 se redujo a 0.2 mL/gal y en 1996 se inicia la distribución de gasolinas sin plomo (SEMARNAT 2002).

En la **figura 6**, se presenta la gráfica de distribución de Cd, observándose que únicamente se detectaron trazas de este metal en el 7% de los filtros analizados y que ninguno de ellos superó el límite

de detección ($<0.036 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Respecto a los promedios anuales obtenidos en este trabajo (de 0.00013 a $0.0051 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y comparándolos con datos para la Ciudad de Chile (SESMA 2002) en los que se reportan promedios anuales entre 0.0010 y $0.0025 \mu\text{g}/\text{m}^3$, puede considerarse que las concentraciones detectadas para Hermosillo son normales, considerando el tamaño de la ciudad y su bajo grado de industrialización. La presencia de trazas de Cd en los meses de febrero a mayo puede deberse a la resuspensión de polvos por fenómenos de tolvaneras que ocurren en estos meses en la región. Se ha reportado que existe Cd por ejemplo en los sedimentos de la Presa A.L. Rodríguez (actualmente seca) en concentraciones de hasta $7.3 \text{ mg}/\text{kg}$ (Gómez-Álvarez *et al.*, 2011), así como en el polvo acumulado en techos de escuelas en concentración de hasta $5.65 \text{ mg}/\text{kg}$ (Meza-Figueroa *et al.*, 2007). Por otro lado, al comparar con el criterio de calidad del aire establecido por la Organización Mundial de la Salud (WHO 2000) de $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual, es posible asumir que las concentraciones de Cd en el aire ambiente de la ciudad de Hermosillo, no representaron un peligro a la salud para el periodo estudiado.

En la **figura 7** se presenta la gráfica de distribución de Ni. Los porcentajes de muestras por sitio que se reportaron como ND ($<0.015 \mu\text{g}/\text{m}^3$) fueron: Centro el 82 %, Noreste el 83.9 % y Noroeste el 62.2 %. Los valores promedio detectados fueron 0.009, 0.008 y $0.012 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente en cada sitio. Al res-

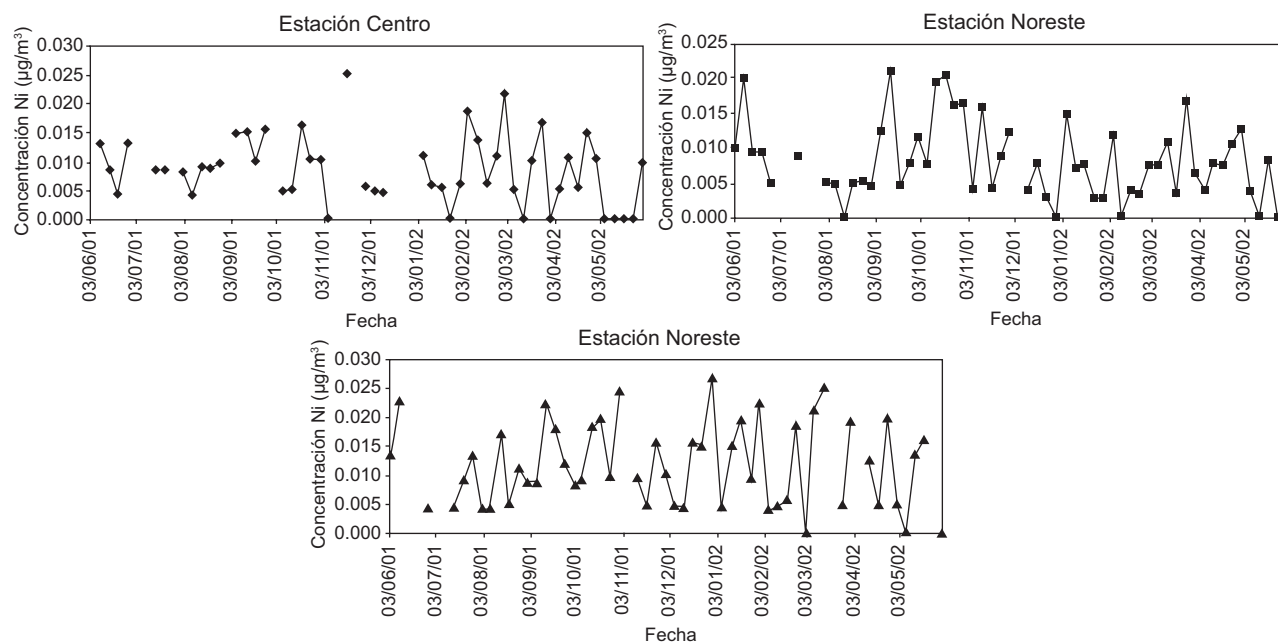


Fig. 7. Concentración detectada de níquel en aire ambiente en tres sitios de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002, en Hermosillo, Sonora, México

pecto, como referencia de comparación se tiene el criterio de calidad del aire establecido por la Comisión de las Comunidades Europeas (CEC 2003) el cual es de $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual, se puede asumir que las concentraciones detectadas en la ciudad de Hermosillo no representaron peligro o riesgo a la salud de la población durante el periodo de estudio.

En la **figura 8** se muestra la gráfica de distribución de concentraciones de Cu para los tres sitios de monitoreo a lo largo del año. El porcentaje de muestras por sitio cuya concentración se reportó como ND ($<0.024 \mu\text{g}/\text{m}^3$) fueron: Centro 14 %, Noreste 16 % y Noroeste 9.4 %. Las concentraciones promedio para el periodo de estudio fueron: 0.042, 0.043 y 0.045

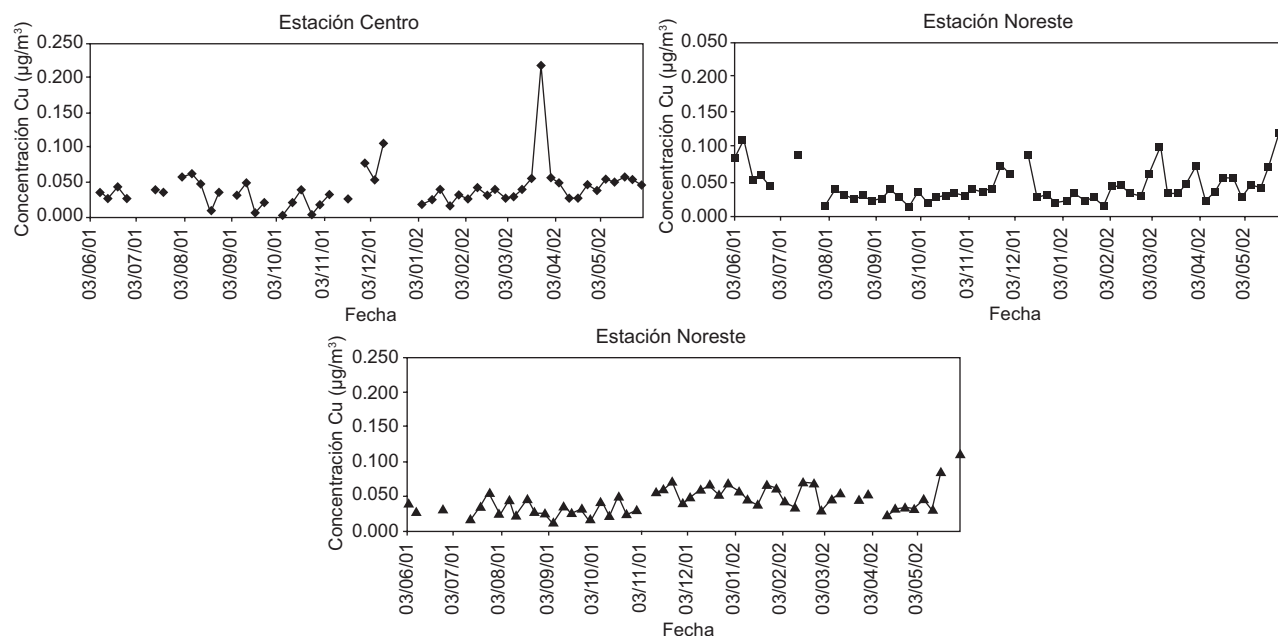


Fig. 8. Concentración detectada de cobre en aire ambiente en tres sitios de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002, en Hermosillo, Sonora, México

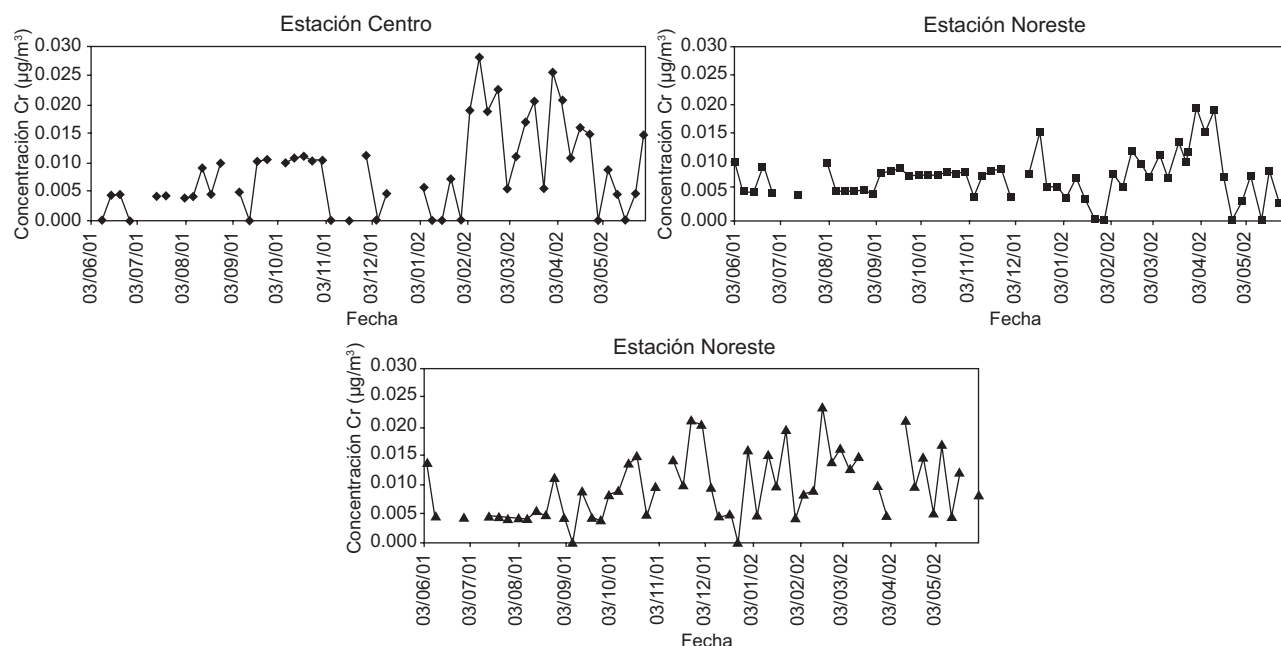


Fig. 9. Concentración detectada de cromo en aire ambiente en tres sitios de monitoreo, durante el periodo de 2001 a mayo de 2002, en Hermosillo, Sonora, México

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Comparando los resultados con el criterio de calidad del aire de la base de datos de la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA 2004) la cual establece un valor de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, es posible establecer que la presencia de Cu en el aire de la ciudad no representó peligro a la salud de la población durante el periodo analizado.

La distribución de concentraciones de Cr detectadas para los tres sitios de monitoreo se presenta en la **figura 9**, identificándose sólo dos valores mayores al límite de detección ($0.024 \mu\text{g}/\text{m}^3$), específicamente en el sitio Centro. Los valores de concentración promedio para el año de estudio fueron de 0.008 en Centro, 0.007

en Noreste y $0.010 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Noroeste. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (WHO 1984) la concentración media en el aire en las ciudades es típicamente de $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que los valores detectados se consideran normales. Comparando los resultados obtenidos con el criterio de la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA 2004) que es de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido para áreas residenciales, es posible definir que las concentraciones detectadas no representaron peligro a la salud a la población.

Es importante establecer que aunque las concentraciones de los metales analizados no rebasaron los máximos permisibles o criterios respectivos, las con-

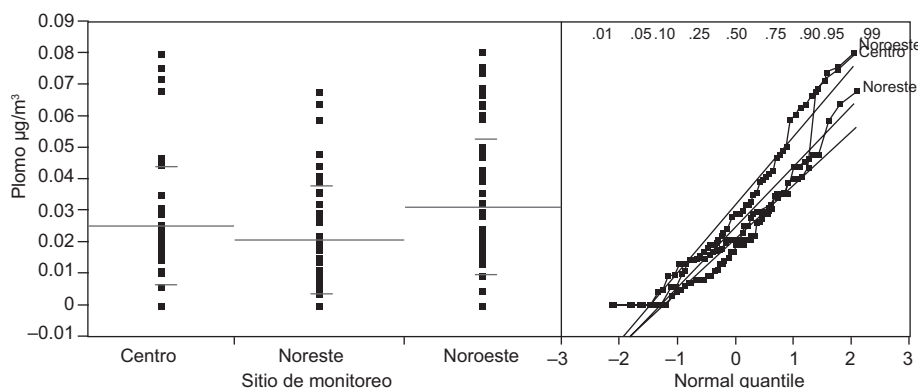


Fig. 10. Distribución de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en tres sitios de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002, en Hermosillo, Sonora, México (continuación)

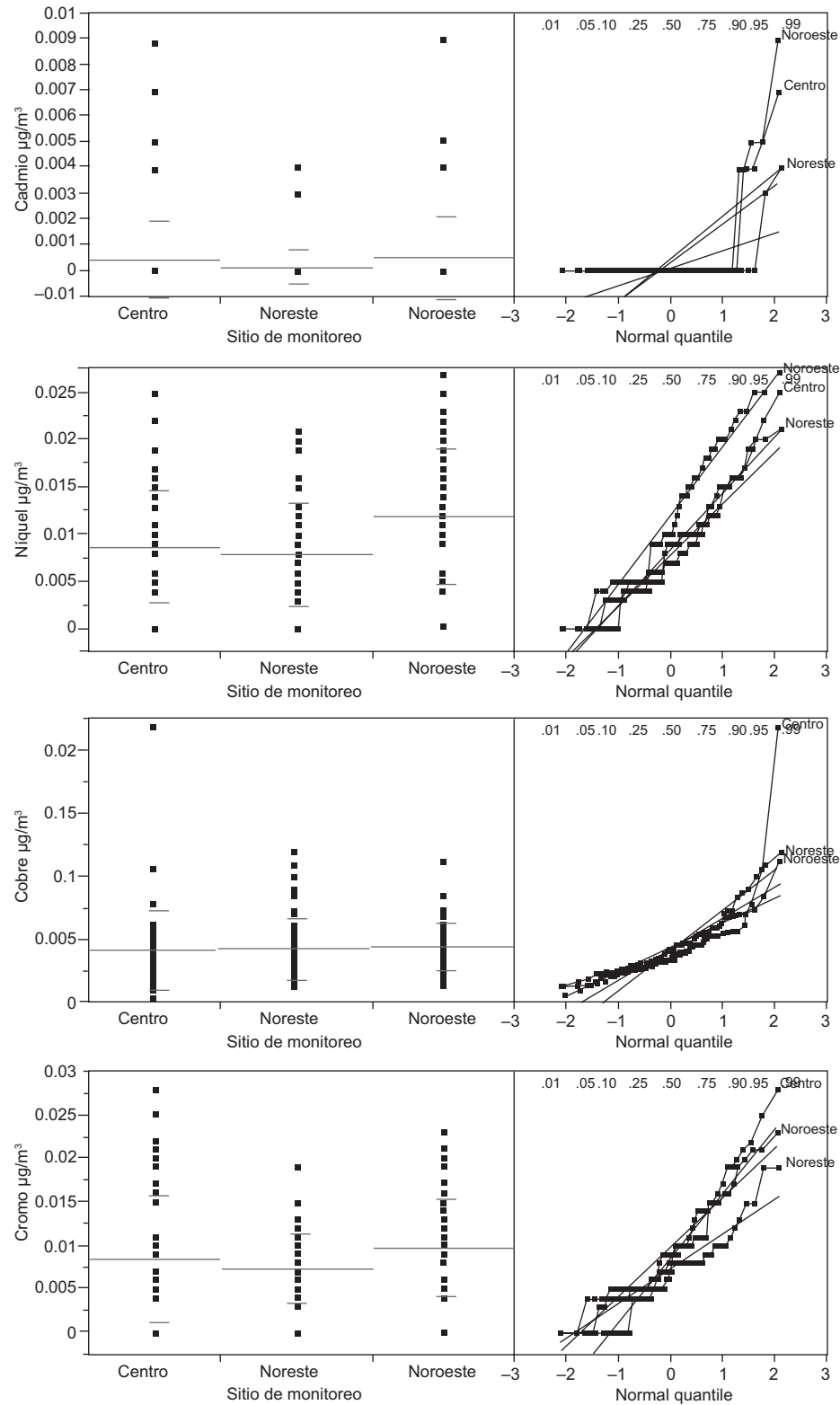


Fig. 10. (Continuación) Distribución de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en tres sitios de monitoreo, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002, en Hermosillo, Sonora, México

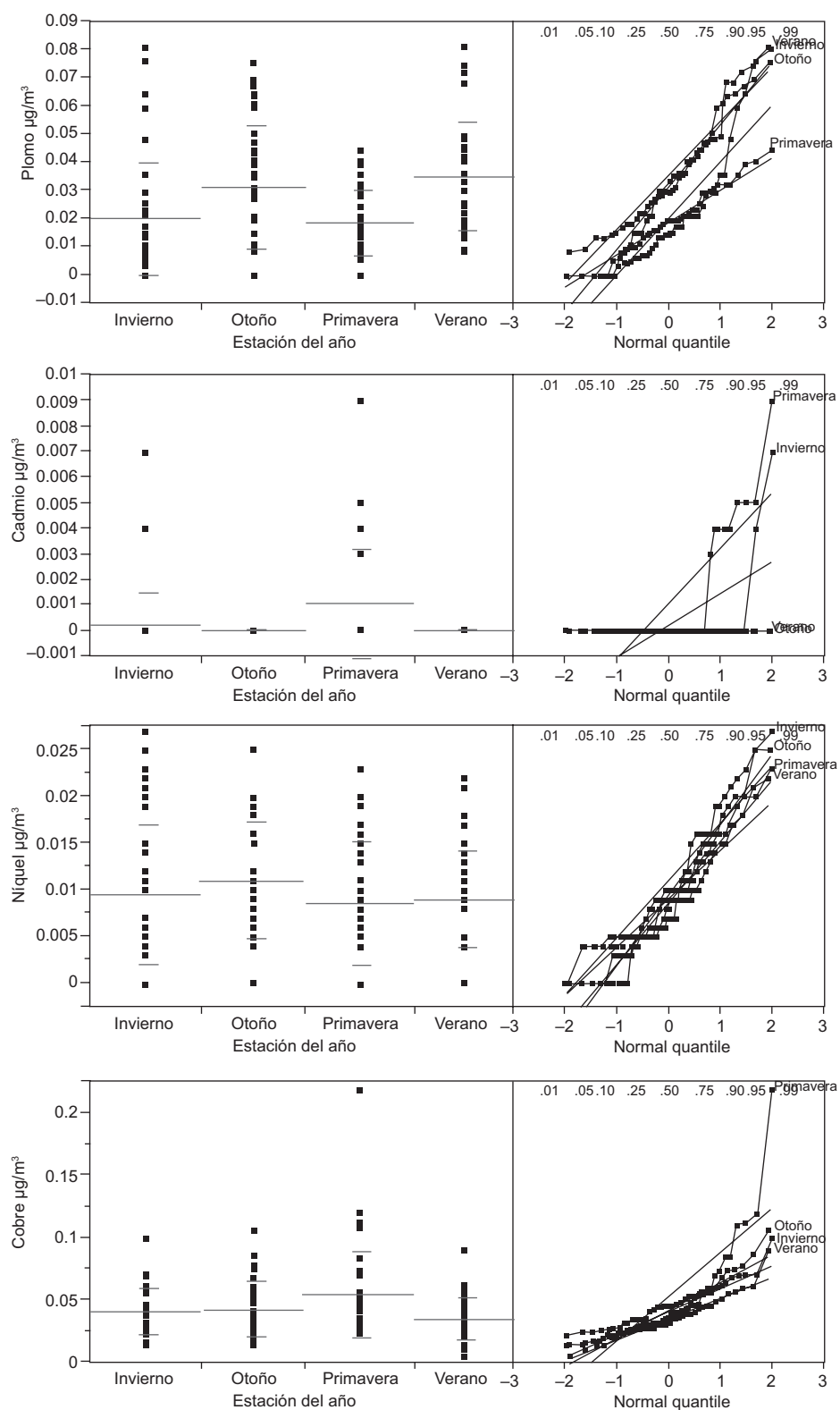


Fig. 11. Distribución de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) según estación del año, durante el periodo junio de 2001 a mayo de 2002 en Hermosillo, Sonora, México (continuación)

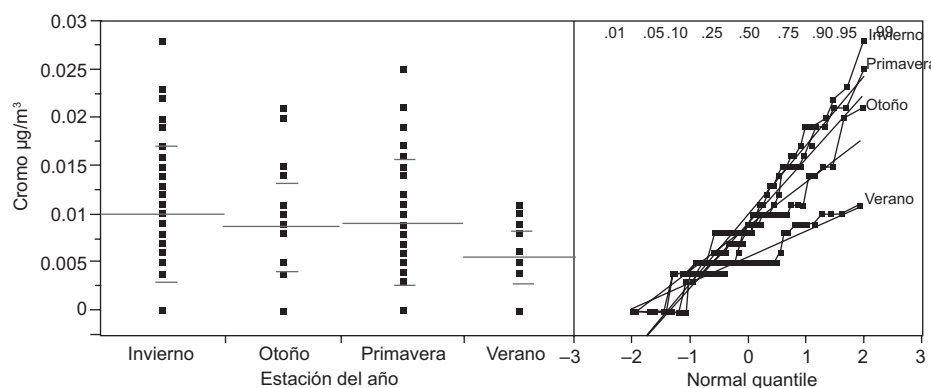


Fig. 11. (Continuación) Distribución de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) según estación del año, durante el periodo: junio de 2001 a mayo de 2002 en Hermosillo, Sonora, México

centraciones detectadas de PST sí rebasaron el valor máximo permisible durante el periodo de estudio, por lo que la calidad del aire permanece clasificada como no satisfactoria.

Comportamiento espacial y temporal de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr)

En la **figura 10** se presenta la gráfica de distribución de concentraciones de cada metal por sitio de monitoreo. Con respecto a la distribución espacial de Pb, Cd, Cu y Cr, la prueba de Van der Waerden ($\alpha = 0.05$) no detectó diferencias significativas de concentración para los tres sitios de monitoreo. En cuanto a la distribución espacial de las concentraciones de Ni, el estadístico de prueba identificó que existen diferencias significativas entre los sitios de monitoreo. La prueba determinó que el sitio Noroeste es diferente a los otros dos siendo éste el que presenta la mayor concentración promedio anual ($0.011 \mu\text{g}/\text{m}^3$) coincidiendo con el sitio de mayor concentración de PST.

En relación con el comportamiento temporal, en la **figura 11** se puede apreciar la distribución de la concentración de cada metal por estación del año (invierno, otoño, primavera y verano). Respecto al comportamiento temporal para Pb la prueba de Van der Waerden demostró que la distribución de concentraciones por estación del año es diferente, identificándose que primavera y otoño son iguales, y verano e invierno son iguales. Es posible que la distribución de Pb pudiera relacionarse con dos escenarios climáticos, el de condiciones templadas y el de condiciones extremas, lo cual pudiera definirse con posteriores investigaciones. En lo que respecta al Cd, se identificó que existe diferencia significativa entre las estaciones del año, determinándose que sólo en invierno y primavera se presentan trazas

de este metal en el aire. Esta situación coincide con las estaciones de mayores concentraciones de PST; por ejemplo en el sitio de muestreo Noroeste, por lo que ello pudiera asociarse a la presencia de Cd.

Respecto a la distribución para Ni, los niveles de concentración según estación del año no son estadísticamente diferentes, lo que significa que su distribución es homogénea en el tiempo. En relación al Cu, la prueba de Van der Waerden demostró que existe diferencias significativas en la distribución de la concentración entre estaciones del año. La prueba detectó que el otoño es diferente a las otras tres estaciones del año, obteniéndose para aquella un promedio de $0.042 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Con respecto al Cr, la prueba de Van der Waerden demostró que existen diferencias significativas entre las estaciones de muestreo. La prueba demostró que la concentración detectada en invierno es diferente con respecto a las demás estaciones del año. Es posible que la mayor concentración promedio de Cr se encuentre asociada al incremento de PST en el aire en esa época del año.

La importancia del análisis realizado sobre el comportamiento espacial y temporal de metales pesados implica definir la existencia o no de diferencias en la distribución de concentraciones según cada parámetro contaminante, primero entre los sitios de monitoreo y segundo entre las estaciones del año, para que en caso de tomarse decisiones de gestión sobre la calidad del aire pudieran considerarse o no todos los sitios de monitoreo o todas las estaciones del año.

CONCLUSIONES

Comparando las concentraciones de PST obtenidas en los días de monitoreo contra el máximo permisible de 24 h vigente al momento del estudio, el valor límite fue rebasado tres veces en el sitio de monitoreo

Centro (Mazón), 23 veces en el sitio de monitoreo Noroeste (CBTIS), y no fue rebasado ningún día en el sitio de monitoreo Noreste (CESUES), por lo que el riesgo a la salud por exposición aguda debe atenderse para los dos primeros sitios de muestreo. En cuanto al máximo permisible anual para PST, éste fue rebasado en un 86 % en el sitio Centro, en un 48 % en el sitio Noreste y en un 326 % en el sitio Noroeste identificándose este sitio como el de peor calidad del aire. De acuerdo con los resultados el riesgo a la salud por exposición crónica debe atenderse en los tres sitios de monitoreo.

Considerando el promedio de las concentraciones de PST que rebasaron el máximo permisible diario en el sitio Noroeste, y con base en el algoritmo del Índice Uniforme de Calidad del Aire, se estableció que la calidad del aire se encontraba entre no satisfactoria y mala para el período de estudio.

Respecto de las concentraciones de Pb, Cd, Ni, Cu y Cr en los tres sitios de monitoreo, fue posible establecer que no existió peligro o riesgo a la salud durante el período analizado por motivo de estos metales, ello debido a que no se rebasaron los valores máximos permisibles establecidos en las normas o criterios nacionales e internacionales. Sin embargo, la clasificación de una calidad no satisfactoria se mantiene para la ciudad de Hermosillo debido a las altas concentraciones de material particulado presente en los sitios de muestreo.

Se recomienda la continuidad en el monitoreo de los parámetros de calidad del aire a fin de contar con información más exhaustiva que permita relacionar la calidad del aire con los riesgos a la salud, la morbilidad y mortalidad, así como con las condiciones regionales topográficas, meteorológicas y de urbanización, que influyan en el diseño de un programa local de mejoramiento de la calidad del aire.

AGRADECIMIENTOS

Universidad de Sonora, División de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia. Programa de Posgrado en Ciencias de la Ingeniería.

H. Ayuntamiento de Hermosillo, Dirección de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, Subdirección de Ecología.

REFERENCIAS

- CEC (2003). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. Commission of the European Communities. Reporte Final, Bruselas Bélgica 39 pp.
- Conover W.J. (1971). Practical nonparametric statistics. John Wiley & Sons, Nueva York, EUA. 439 pp.
- Dickson T.R. (1996). Química. Enfoque ecológico. Limusa, México D.F. 406 pp.
- EEA (2004). Sustainability targets and reference (STAR) database - European Environment Agency. <http://star.eea.eu.int/default.asp> 06/10/2004
- EEA (2011). Air Quality in Europe – 2011 Report. European Environment Agency. EEA Technical Report No. 12/2011. Reporte Técnico, Copenhague, Dinamarca 84 pp.
- EPA (1998). EPA-454/R-98-004 Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1. Environmental Protection Agency. Manual, RTP, NC, EUA. 380 pp.
- Garibay-Chávez M.G. (2009). Aire y salud. Pandora, S.A. de C.V. Guadalajara, Jal., México 159 pp.
- Gobierno Municipal de Hermosillo (2003). Programa Municipal de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Hermosillo, Sonora 2003 (Generación 2025+). Gobierno Municipal de Hermosillo – IMPUH. Propuesta - Consulta Pública, Hermosillo, Son., México 52 pp.
- Gómez-Álvarez A., Valenzuela-García J.L., Villalva-Atondo A.I., Meza-Figueroa D., Almandariz-Tapia F.J., Whitaker-Bojórquez T.O., Martínez-Morales F., Valenzuela-Corral M., y Ochoa-Valenzuela L. (2011). Distribution of heavy metals and their chemical speciation in sediments from the Abelardo L. Rodríguez Dam, Sonora, México. Chem. Spec. Bioavailab. 23, 201-212.
- INEGI (2006). Cuaderno Estadístico Municipal Hermosillo, Sonora. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Cuaderno Estadístico, Hermosillo, Son., México. 197 pp.
- INE-SEMARNAP (1998). Segundo Informe Sobre la Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas 1997. Instituto Nacional de Ecología – Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Informe, México, D.F. 161 pp.
- INE-SEMARNAP (1999). Tercer Informe Sobre la Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas 1998. Instituto Nacional de Ecología - Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Informe, México, D.F. 134 pp.
- Meza-Figueroa D., de la O-Villanueva M. y de la Parra M.L. (2007). Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosillo, Sonora, México. Atmos. Environ. 41, 276-288.

- SEDESOL (1993). Concentración de plomo y PST en aire ambiente de la Ciudad de Hermosillo, Sonora durante 1992. Secretaría de Desarrollo Social Delegación Sonora. Presentación para El Congreso Internacional Ecológico Sonora 93. Hermosillo, Son. México 12 pp.
- SEMARNAP (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993. Que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación. 18 de octubre de 1993.
- SEMARNAP (1996). Concentración de partículas en aire ambiente para la ciudad de Hermosillo, Sonora, México durante el período 1990-1995. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca - Delegación Federal en el Estado de Sonora. Reporte, Hermosillo, Son. México 27 pp.
- SEMARNAT (2002). Programa para mejorar la calidad del aire de la zona metropolitana del Valle de México 2002-2010. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa, México, D.F. 386 pp.
- SEMARNAT (2003). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2002. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Compendio de Estadísticas Ambientales. México, D.F. 272 pp.
- SESMA (2002). Caracterización de elementos inorgánicos presentes en el aire de la región metropolitana 1997-2000. Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente, Ministerio de Salud. Estudio, Santiago de Chile. 42 pp.
- SSA (1994a). Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA1-1993. Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a partículas suspendidas totales (PST). Valor permisible para la concentración de partículas suspendidas totales (PST) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, México. 23 de diciembre de 1994.
- SSA (1994b). Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993. Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, México. 3 de diciembre de 1994.
- SSA (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM_{10} y partículas menores de 2.5 micrómetros $PM_{2.5}$ de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, México. 26 de septiembre de 2005.
- SSP (2002). Anuario Estadístico Edición 2002. Secretaría de Salud Pública - Gobierno del Estado de Sonora. Anuario, Hermosillo, Son, México 199 pp.
- USEPA (1992a). 40 CFR Ch. I Pt. 58, App. G—Uniform Air Quality Index (AQI) and Daily Reporting. United States Environmental Protection Agency - Code of Federal Regulations. Código de Regulaciones, Washington, DC. 305 pp.
- USEPA (1992b). 40 CFR Ch. I Pt. 50, App. B—Reference method for the determination of suspended particulate matter in the atmosphere (high-volume method). United States Environmental Protection Agency - Code of Federal Regulations. Código de Regulaciones, Washington, DC. 45 pp.
- USEPA (1992c). 40 CFR Ch. I Pt. 50, App. G—Reference method for the determination of lead in suspended particulate matter collected from ambient air. United States Environmental Protection Agency - Code of Federal Regulations. Código de Regulaciones, Washington, DC. 70 pp.
- WHO (1984). Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 2. Health Criteria and Other Supporting Information. World Health Organization. Guías, Vienna Austria. 94 pp.
- WHO (2000). Air Quality Guidelines. Second Edition. World Health Organization Regional Office for Europe. Guías, Copenhagen, Dinamarca 273 pp.
- WHO (2003). EUR/03/5042688 Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. World Health Organization. Reporte, Bonn, Alemania 94 pp.
- WHO (2006). Air quality guidelines — global update 2005. World Health Organization Regional Office for Europe. Guías, Copenhagen, Dinamarca. 484 pp.