

ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LA CORRELACIÓN ENTRE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA ZONA NORTE DE CHIAPAS, MÉXICO

Statistical study of the correlation between atmospheric pollutants and meteorological variables in northern Chiapas, Mexico

S Ramos-Herrera ✉, R Bautista-Margulis, A Valdez-Manzanilla

(SRH) División Académica de Ciencias Biológicas. UJAT km. 0.5 Carr. Villahermosa - Cárdenas. Villahermosa 86039 Tabasco, México. sergio.ramos@dacbiol.ujat.mx

Artículo recibido: 27 de septiembre de 2007, **aceptado:** 23 de marzo de 2010

RESUMEN. El análisis de regresión múltiple es un método estadístico empleado en muchas áreas del conocimiento. En este estudio, dicho análisis se aplicó a los datos de concentraciones de cuatro contaminantes atmosféricos (SO_2 , NO_2 , H_2S y PM_{10}), monitoreados en tres estaciones que se ubican en la Zona Norte del estado de Chiapas. El periodo que abarcó el estudio fue de enero 2001 a febrero 2005. El objetivo fue proponer funciones de regresión para describir la concentración en función del tiempo y/o las variables meteorológicas. Se empleó un análisis de regresión lineal múltiple paso a paso en la selección de variables regresoras. Las más importantes fueron la temperatura, la humedad relativa y la dirección del viento. Se obtuvieron funciones de regresión de la concentración anual, mensual y diaria de estos contaminantes. Se obtuvo una regresión lineal simple para explicar la concentración anual de SO_2 , alcanzando un coeficiente de determinación de 0.927. Los modelos de la concentración mensual alcanzaron un coeficiente de determinación entre 0.417 y 0.846; mientras que para los de la concentración diaria, este coeficiente varió de 0.285 a 0.581. De este estudio paramétrico, se concluyó que las variables meteorológicas describieron adecuadamente la concentración anual y mensual, pero no la concentración diaria.

Palabras clave: Correlación estadística, regresión lineal, contaminantes atmosféricos.

ABSTRACT. The multiple regression analysis is a statistical method used in many academic areas. In this study, this analysis was applied to the concentration data of four atmospheric pollutants (SO_2 , NO_2 , H_2S y PM_{10}), monitored in three stations located in northern Chiapas. The study was carried out from January 2001 to February 2005. The purpose of the study was to propose regression functions to describe the concentration as a function of time and/or meteorological variables. A stepwise multiple linear regression analysis was used in the selection of regressive variables, the most important of which included the temperature, relative humidity and wind direction. Regression functions of the annual, monthly and daily concentrations of these pollutants were obtained. A simple linear regression was obtained to explain the annual concentration of SO_2 , with a determination coefficient of 0.927. The models for the monthly concentration obtained determination coefficients of 0.417 to 0.846, whereas the coefficients for the daily concentration model varied from 0.285 to 0.581. This parametric study made it possible to conclude that the meteorological variables described the annual and monthly concentrations adequately, but not the daily concentrations.

Key words: Statistic correlation, linear regression, atmospheric pollutants.

INTRODUCCIÓN

La concentración de los contaminantes en la atmósfera se afecta por variables meteorológicas como, la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar, que controlan a su vez la velocidad con la

que se realizan las reacciones químicas atmosféricas. Por otro lado, la dispersión de estos contaminantes es influenciada por la velocidad y dirección de los vientos, así como la estabilidad que predomina en la atmósfera. A nivel regional se ha puesto atención al problema de la contaminación atmosférica, debi-

do principalmente a las actividades petroleras que se realizan en el suroeste de México. A través de una red de monitoreo automatizada conocida como Sistema Automatizado de la Región Sur (SAMARS) de Petróleos Mexicanos (PEMEX) se monitorean los principales contaminantes atmosféricos (excepto el ozono) y variables meteorológicas. Esta red opera desde 1999 y cuenta con seis estaciones de monitoreo ubicadas en las periferias de las instalaciones petroleras (Baterías y Compresoras). La información recopilada a la fecha se ha empleado principalmente en la evaluación de la calidad del aire en la periferia de estas instalaciones, en la calibración de modelos de dispersión de los contaminantes, y en la distribución espacial de estos. Por ejemplo, Valdés *et al.* (2004) realizaron un análisis de la distribución espacial y estacional del dióxido de azufre. El análisis se llevó a cabo con datos de once meses (Noviembre de 2002 a Septiembre de 2003) en cinco estaciones de monitoreo atmosférico del SAMARS distribuidas en la Zona Norte de Chiapas (ZNC) y centro de Tabasco. De la distribución espacial se concluyó que la máxima concentración de SO₂ se presentó en la ZNC, concretamente en la zona de Reforma Chiapas, y que el máximo estacional ocurrió en el otoño. Sin embargo, se recomendó continuar con este tipo de estudios, abarcando un periodo mayor de análisis que incluyera además, variables meteorológicas como la velocidad, dirección del viento y la estabilidad atmosférica.

Existen estudios que muestran que los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas se correlacionan. En un estudio realizado en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), Bravo *et al.* (2000) mostraron que la radiación solar es más útil en la modelación del máximo diario de ozono que la temperatura. Mediante un análisis descriptivo comprobaron que aunque ambas variables meteorológicas se correlacionan con el máximo diario de ozono, la temperatura máxima se presentó casi dos horas después de la hora del máximo de ozono en el día; mientras que la radiación solar máxima se presentó entre 1.69 y 2.35 h antes de la hora del máximo de ozono. Sin embargo, no propuso un modelo de los niveles diarios de ozono en función de la radiación solar máxima.

También existe correlación entre la humedad relativa (HR), la concentración de partículas suspendidas totales (PST) y las partículas de diámetro aerodinámico menor a 10 μm (PM₁₀), como lo muestran los resultados de una investigación realizada en el suroeste de la Ciudad de México, en una zona de tipo residencial. Ahí se encontró que la correlación es de tipo inversa y que es mayor con las PST ($r = -0.828$) que con las PM₁₀ ($r = -0.749$). También se estableció que existe diferencia significativa entre la concentración en temporada de secas y de lluvias, siendo mayor la concentración en la temporada de secas. Finalmente, se puso de manifiesto la importancia de estudiar el comportamiento anual de la contaminación ya que es importante en las exposiciones por periodos prolongados (Amador-Muñoz *et al.* 2001). La determinación de los patrones de distribución diurna y anual de los contaminantes ha permitido concluir si estos presentan ciclos diarios, tendencias a la disminución a largo plazo y comportamiento estacional. Para ello se ha analizado el comportamiento de estadísticas como la media aritmética, la mediana y el percentil 98 de los valores diarios, mensuales y anuales del contaminante Davydova-Belitskaya *et al.* 1999; Varó & Carratalá 2002).

Debido a la naturaleza aleatoria de los niveles atmosféricos de los contaminantes, se ha intentado explicar su comportamiento temporal y en el proceso se ha recurrido a los modelos de regresión. Por ejemplo, el comportamiento de los máximos y promedios semanales de ozono en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) con base en datos de ocho estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA (en el periodo enero de 1995 a diciembre de 1999) se explicó mediante el siguiente modelo de regresión no lineal:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 \cos\left(\frac{2\pi}{52} x_i + \beta_3\right) + \varepsilon_i$$

Donde x_i , representa el tiempo transcurrido en semanas, y es la única variable regresora.

El modelo integró una componente de tendencia lineal, una componente cíclica y un componente aleatorio, ε_i , con las que se modeló la esta-

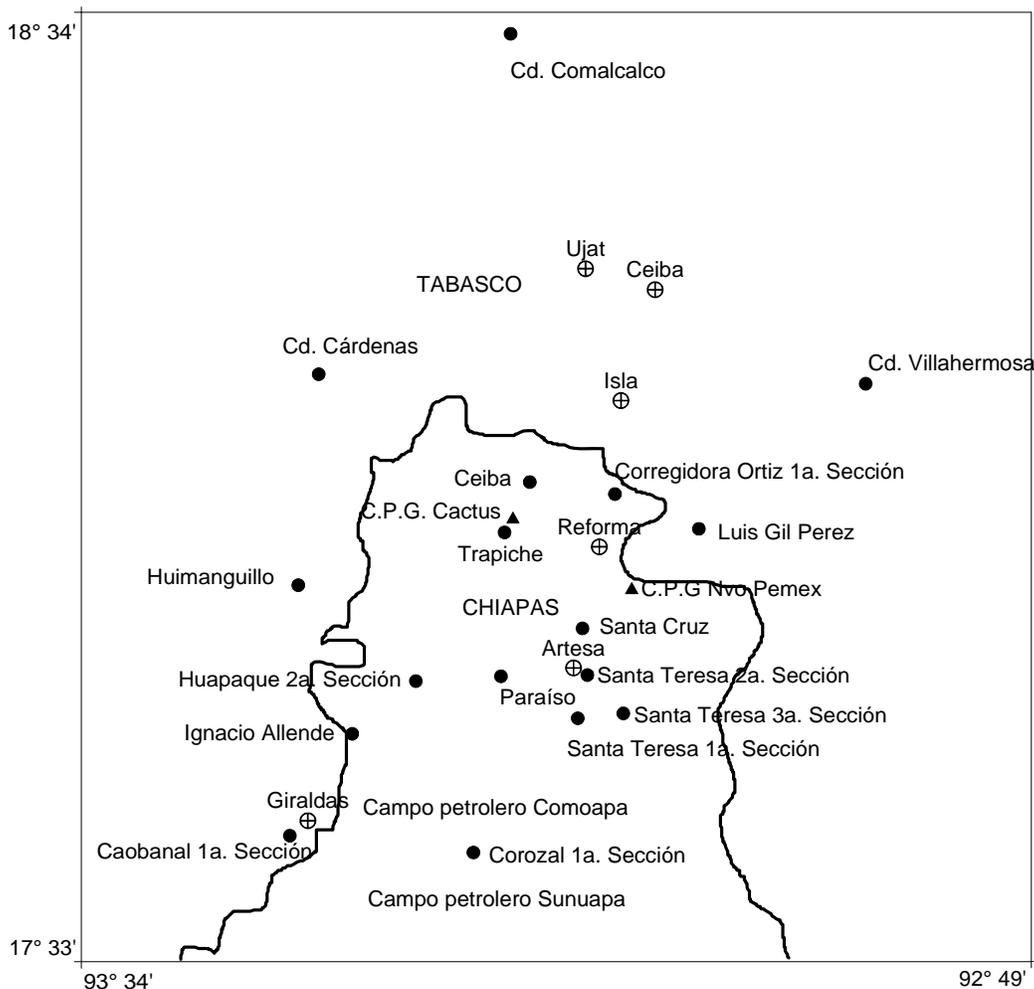


Figura 1. Ubicación de las estaciones de monitoreo de SAMARS (⊕ estaciones de monitoreo, ● poblaciones aledañas, ▲ Complejos Procesadores de Gas).

Figure 1. Location of the SAMARS monitoring stations (⊕ monitoring stations, ● neighbouring populations, ▲ gas processing stations).

cionalidad anual y la tendencia lineal creciente o decreciente del ozono. Aunque el modelo ajustado fue bastante bueno, se sugirió incluir variables meteorológicas en el análisis, con el propósito de eliminar su efecto en la variación del ozono y así evaluar mejor el impacto que las estrategias de control tienen sobre los datos de ozono observados (Jiménez, 2002).

En estudios de corte epidemiológico los niveles diarios de contaminación (por O_3 , PM_{10} , SO_2 , humos negros) se han empleado como variables explicativas de variables de salud (cómo el número de consultas a urgencias por enfermedades respiratorias agudas o del número de defunciones diarias por

todas las causas de muerte o por enfermedades del aparato respiratorio y del aparato circulatorio). Aunque el objetivo principal ha sido estudiar la asociación entre estas variables, en el proceso de análisis, las variables meteorológicas (como la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) se han considerado como variables confusoras cuando se emplean métodos de series temporales en el análisis de la una variación temporal de la variable salud y contaminación diaria (Sáez *et al.* 1999). También han intervenido como variables predictoras en la estimación de los niveles faltantes de los contaminantes mediante la aplicación de técnicas de regresión line-

Tabla 1. Características de las tres estaciones del SAMAR en la zona norte de Chiapas.

Table 1. Characteristics of the three SAMARS stations in northern Chiapas.

| Estación | Longitud | Latitud | Tipo | Zona |
|----------|----------|---------|------------|--------------------|
| Reforma | 93° 09' | 17° 52' | Automática | Industrial (PEMEX) |
| Artesa | 93° 10' | 17° 46' | Automática | Rural |
| Giraldas | 93° 23' | 17° 39' | Automática | Industrial (PEMEX) |

al (Hernández-Cadena *et al.* 2000; Arrivas-Monzón *et al.* 2001).

Contar con bases de datos completas de los contaminantes para estudios de análisis, en un cierto periodo de tiempo, es todo un reto. Los costos de mantenimiento y el bajo presupuesto son factores que afectan la adquisición continua de la información. En estos casos se pueden ajustar modelos que estimen los datos faltantes en función de otras variables, como son las variables meteorológicas de superficie. El objetivo de este estudio, fue adecuar modelos de regresión lineal múltiple al comportamiento en el tiempo de los niveles observados en la ZNC de cuatro contaminantes atmosféricos (SO_2 , NO_2 , H_2S , y PM_{10}). Como variables regresoras además del tiempo, se propusieron las siguientes variables meteorológicas de superficie: temperatura (T), humedad relativa (HR), radiación solar (RS), presión atmosférica (P), velocidad y dirección del viento (VV, DV). Se ajustaron modelos de regresión para describirle comportamiento de las medias anuales, mensuales y diarias.

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis se llevó a cabo en la ZNC (Figura 1) en una región ubicada entre los meridianos 92° 49' y 93° 34' y los paralelos 18° 34' y 17° 33'. Esta zona presenta un clima cálido húmedo con lluvias en verano; la temperatura promedio anual oscila alrededor de los 24 °C y la máxima precipitación anual del estado es de 3 977.5 mm (Anónimo 2003).

La base de datos se obtuvo de tres estaciones (Reforma, Giraldas y Artesa) de monitoreo de la red SAMARS. La distancia entre las estaciones de Reforma y Artesa es de 10.16 km, entre Artesa y Giraldas es de 25.94 km y entre Reforma y

Giraldas es de 33.42 km. La estación Reforma, se ubica en la zona industrial de la ciudad de Reforma, Chiapas; la estación Artesa, se ubica en el poblado de Santa Teresa en un entorno rural; y la estación Giraldas, se ubica en el Campo San Manuel, una zona de tipo industrial, perteneciente al municipio de Huimanguillo, Tabasco (Tabla 1). De las tres estaciones, la primera y la última cuentan además, con una estación meteorológica. El estudio abarcó el periodo de enero 2001 a febrero de 2005. A partir de esta última fecha las estaciones quedaron fuera de operación y así continúan en la actualidad. Para lograr el objetivo de esta investigación, se recopilaban los valores horarios de los siguientes contaminantes y variables meteorológicas: dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), partículas con diámetro aerodinámico menor a 10 micras (PM_{10}), velocidad del viento (VV), dirección del viento (DV), temperatura (T), humedad relativa (HR), presión barométrica (P) y radiación solar (RS). De los resultados del trabajo de Vázquez (2006) se obtuvieron los valores diarios de la altura de la capa de mezclado (L) en la región en el 2003. Las concentraciones se manejaron ppb para los gases y en μgm^{-3} para las partículas. La temperatura en °C, la presión en mb, la radiación solar en Wm^{-2} y la altura de la capa de mezclado en m.

Las medias aritméticas anuales, mensuales y valores diarios de los contaminantes y meteorológicos se calcularon con el 50 % o más de los valores horarios correspondientes. Se tuvieron cuatro medias anuales, 50 medias mensuales y 1 520 valores diarios por variable.

Particularmente los valores diarios de concentración de NO_2 y H_2S se calcularon de la siguiente forma: para el NO_2 el valor diario se tomó como el máximo valor horario del día; mientras que para el

H₂S, el valor diario se tomó como el máximo promedio móvil de ocho horas del día. En los cálculos de la media de velocidad y dirección del viento se usó el enfoque escalar y el enfoque vectorial (Anónimo 2000), generándose medias escalares (VVe, DVe) y medias vectoriales (VVv, DVv) para estos parámetros. Se realizó un análisis de correlación entre los contaminantes y las variables meteorológicas; primero entre los valores anuales, luego entre los valores mensuales y finalmente entre los valores diarios. Dicho análisis dio un indicio de qué variables pudieran servir como variables regresoras de la concentración. El modelo de regresión propuesto fue el siguiente:

$$C_i = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 T + \beta_3 HR + \beta_4 RS + \beta_5 P + \beta_6 VVe + \beta_7 VVv + \sum \alpha_k Z_i + \varepsilon$$

Donde C_i denota la concentración anual, mensual o diaria de los contaminantes, y β_i representa los parámetros a estimar del modelo.

Para ajustar el modelo, se empleó el paquete estadístico SPSS y el método de selección de variables STEPWISE (Ferrán 2001). Se analizaron los residuales para verificar el grado en el que se cumplieron las hipótesis de homogeneidad de varianzas y normalidad de los residuales (Montgomery *et al.* 2006). El modelo incluyó a la dirección del viento como una variable de rango y como una variable categórica, para ver cual funcionaba mejor. Como variable categórica, la dirección del viento incluyó las 16 direcciones siguientes: N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSO, SO, OSO, O, ONO, NO, NNO. Esto se logró definiendo la variable indicadora binaria Z_i , que toma el valor de uno si la dirección del viento es igual a i , y cero si la dirección del viento es diferente a i ; donde i es igual a las direcciones anteriores del viento menos una. También se analizó la correlación entre la concentración y la dirección del viento. Por último, se estudió la correlación diaria entre las tres estaciones y se ajustaron rectas de regresión lineal simple en los casos donde la correlación fue significativa y alta. Para medir las correlaciones, se empleó el coeficiente de correlación de Spearman. El modelo no incluyó términos para el comportamiento estacional de las variables meteorológicas

debido a la necesidad de utilizar mayor información de campo y, por consiguiente, incrementar la complejidad del análisis.

RESULTADOS

Comportamiento anual del SO₂

El SO₂ monitoreado en Reforma fue el único contaminante con suficiente información horaria (mayor al 50 %) para estimar las medias anuales 2001-2004. Los resultados (Figura 2) muestran una tendencia a la disminución de la media anual con el tiempo en años. Dicha tendencia se representó por el modelo de regresión simple: $[SO_2] = 14.10 - 2.362t$, donde t es el tiempo transcurrido en años. De acuerdo a este, para el 2005 ($t = 5$ años) se espera una media anual de 2.29 ppb. No obstante la media observada fue de 5 ppb, quedando dentro de los límites del intervalo de predicción para este año.

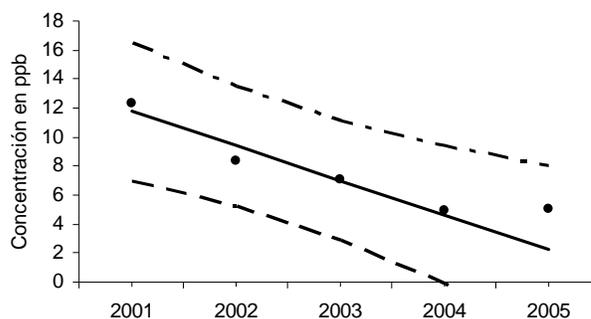


Figura 2. Tendencia de la concentración Media anual (● observado, — regresión, · · · · límite superior de confianza, — límite inferior de confianza).

Figure 2. Trend of annual average concentration (● observed, — regression, · · · · maximum confidence level, — minimum confidence level).

Comportamiento mensual y diario de los contaminantes

El comportamiento de la concentración mensual se muestra en las Figuras 3, 4 y 5 para las estaciones de Reforma, Artesa y Giraldas, respectivamente. Ninguna de las estaciones registró el 100 % de las medias mensuales dentro del periodo de análisis (50 meses). Los casos críticos se dieron en Arte-

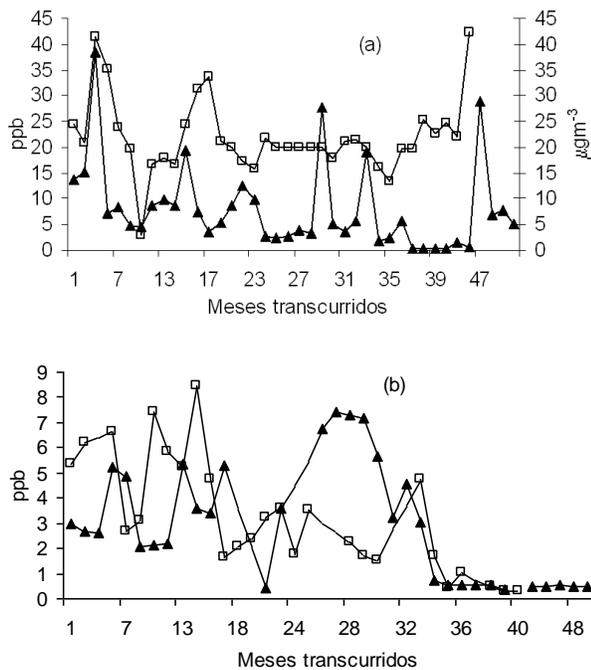


Figura 3. Comportamiento de la concentración mensual en Reforma: a) \square SO_2 , \blacktriangle PM_{10} ; b) \square H_2S , \blacktriangle NO_x .
Figure 3. Monthly concentration behaviour in Reforma: a) \square SO_2 , \blacktriangle PM_{10} ; b) \square H_2S , \blacktriangle NO_x .

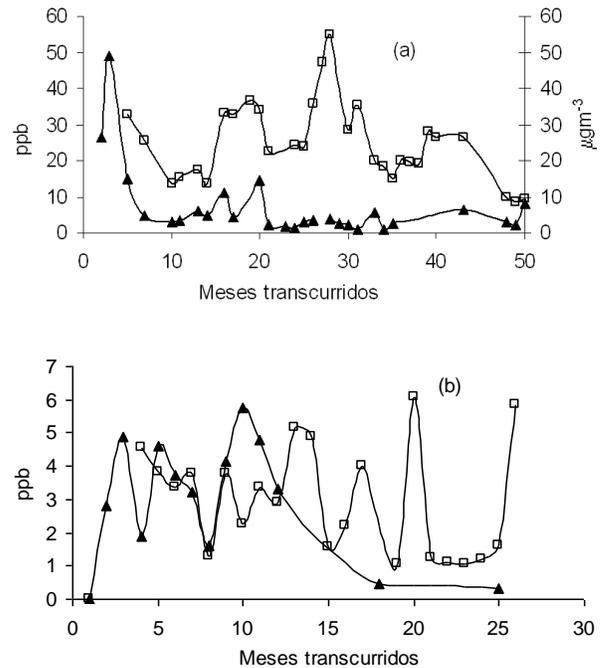


Figura 4. Comportamiento de la concentración mensual en Artesa: a) \square SO_2 , \blacktriangle PM_{10} ; b) \square H_2S , \blacktriangle NO_x .
Figure 4. Monthly concentration behaviour in Artesa: a) \square SO_2 , \blacktriangle PM_{10} ; b) \square H_2S , \blacktriangle NO_x .

Tabla 2. Valores máximos y mínimos para todo el periodo de estudio.
Table 2. Maximum and minimum values for the study period.

| Parámetro | Máximos | | | Mínimos | | |
|--|---------|--------|----------|---------|--------|----------|
| | Reforma | Artesa | Giraldas | Reforma | Artesa | Giraldas |
| SO_2 (ppb) | 425.3 | 254 | 1093 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| NO_2 (ppb) | 496.1 | 177.4 | 301.5 | 0.1 | 0 | 0.2 |
| H_2S (ppb) | 76.7 | 182 | 151.5 | 0 | 0 | 0.3 |
| PM_{10} (μgm^{-3}) | 114.9 | 201.1 | 256.3 | 2.7 | 2.8 | 0 |
| T ($^{\circ}\text{C}$) | 32.9 | | 33.3 | 12.1 | | 11.2 |
| HR (%) | 95.2 | | 96.3 | 22.9 | | 17.8 |
| RS (Wm^{-2}) | 1157.1 | | 666 | 0 | | 0 |
| P (mb) | 1023.9 | | 1024.2 | 997.2 | | 997.9 |
| VV (ms^{-1}) | 5.39 | | 9 | 0.3 | | 0.3 |

sa y Giraldas y para los contaminantes NO_2 y H_2S , donde el porcentaje alcanzado fue menor a 50%.

Los niveles diarios de los contaminantes durante el periodo de estudio presentaron mayor variabilidad que los valores diarios de las variables meteorológicas. Para mejorar la homogeneidad de varianzas y la normalidad de los valores diarios, los niveles diarios se transformaron mediante el logaritmo natural. El comportamiento diario de SO_2 , NO_2 ,

H_2S y PM_{10} (Figuras 6, 7, 8 y 9) para cada estación de monitoreo se representó mediante gráficos del logaritmo natural de la concentración diaria del contaminante en función de los días transcurridos desde enero de 2005.

De acuerdo a la NOM-022-SSA1-1993 (Anónimo 1993a), el límite máximo permisible de SO_2 en un promedio de 24 h es de 0.13 ppm ó 130 ppb; para NO_2 es de 0.21 ppm ó 210 ppb en un promedio

Tabla 3. Coeficientes de correlación mensual.
Table 3. Monthly correlation coefficients.

| Variable | Estación Reforma | | | | Estación Giraldas | | | |
|----------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | SO ₂ | NO ₂ | H ₂ S | PM ₁₀ | SO ₂ | NO ₂ | H ₂ S | PM ₁₀ |
| t | -0.463** | -0.512** | -0.803** | 0.04 | -0.11 | -0.597** | -0.33 | -0.12 |
| T | 0.12 | 0.544** | -0.08 | 0.390* | -0.04 | 0.566** | -0.17 | 0.772** |
| HR | 0.01 | -0.473** | 0.38 | -0.689** | -0.08 | -0.455** | 0.05 | -0.626** |
| RS | 0.11 | 0.373* | -0.07 | 0.570** | -0.08 | 0.624** | -0.28 | 0.511** |
| P | -0.05 | -0.344* | 0.25 | -0.25 | -0.12 | -0.401* | 0.21 | -0.32 |
| VVe | 0.03 | 0.398* | 0.17 | 0.429* | 0.24 | 0.18 | 0.29 | 0.3 |
| DVe | -0.05 | -0.08 | -0.19 | -0.549** | 0.1 | 0 | -0.03 | -0.06 |
| VVv | -0.04 | 0.06 | 0.01 | 0.593** | 0.21 | 0.36 | 0.02 | 0.16 |
| DVv | -0.29 | -0.21 | -0.505** | -0.434* | 0.01 | -0.03 | 0.08 | -0.01 |
| L | 0.07 | -0.891** | -0.65 | -0.11 | 0.01 | -0.77 | | -0.770** |

Tabla 4. Coeficientes de correlación diaria.
Table 4. Daily correlation coefficients.

| Variable | Estación Reforma | | | | Estación Giraldas | | | |
|----------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | SO ₂ | NO ₂ | H ₂ S | PM ₁₀ | SO ₂ | NO ₂ | H ₂ S | PM ₁₀ |
| t | -0.271** | -0.546** | -0.231** | -0.04 | -0.257** | -0.591** | -0.109** | -0.101** |
| T | 0.122** | 0.362** | -0.111** | 0.368** | 0.03 | 0.340** | 0.04 | 0.609** |
| HR | -0.062* | -0.281** | 0.164** | -0.509** | -0.06 | -0.348** | -0.151** | -0.619** |
| RS | 0.134** | 0.274** | -0.02 | 0.407** | 0.07 | 0.332** | 0.188** | 0.495** |
| P | -0.177** | -0.234** | 0.01 | -0.242** | -0.077* | -0.236** | -0.201** | -0.498** |
| VVe | -0.074* | 0.097** | -0.080* | 0.04 | 0.105** | 0.208** | 0.05 | 0.03 |
| DVe | 0.02 | 0.01 | 0.03 | -0.150* | 0 | -0.04 | -0.269** | 0.06 |
| VVv | -0.076* | -0.03 | -0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.01 | 0.1 | -0.071* |
| DVv | 0 | -0.04 | 0.03 | -0.167* | -0.104** | -0.105** | -0.198** | 0.04 |
| L | -0.231** | -0.430** | -0.283** | -0.13 | -0.181** | -0.318** | -0.07 | -0.483** |

Tabla 5. Correlación de la concentración diaria con la dirección del viento.
Table 5. Daily concentration correlation with wind direction.

| Dirección del viento | Estación Reforma | | | | Estación Giraldas | | | |
|----------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | SO ₂ | NO ₂ | H ₂ S | PM ₁₀ | SO ₂ | NO ₂ | H ₂ S | PM ₁₀ |
| N | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.01 | -0.03 | -0.04 | 0 |
| NNE | 0.05 | 0.05 | 0.075* | 0.04 | 0.073* | 0.06 | -0.01 | 0.04 |
| NE | 0.076* | 0.01 | 0.01 | 0.070* | 0.152** | 0.04 | 0.08 | -0.01 |
| ENE | -0.01 | 0.142** | 0.080* | 0.083* | 0.086* | 0.01 | 0.142** | -0.098** |
| E | -0.075* | -0.131** | -0.074* | 0.02 | 0 | -0.02 | 0.087* | -0.04 |
| ESE | -0.05 | -0.05 | -0.092** | 0 | 0.01 | 0.089** | 0.06 | -0.02 |
| SE | -0.01 | -0.05 | -0.086* | 0 | 0.06 | 0.092** | 0.06 | 0.121** |
| SSE | 0.02 | -0.01 | -0.03 | -0.01 | -0.03 | 0.070* | -0.05 | 0.077* |
| S | -0.02 | 0 | 0 | 0.03 | 0.05 | 0.06 | -0.04 | 0.142** |
| SSO | 0.02 | -0.01 | 0.02 | -0.06 | -0.01 | 0.03 | -0.01 | 0.05 |
| SO | 0.01 | 0.01 | -0.01 | -0.02 | -0.083* | -0.02 | -0.093* | -0.01 |
| OSO | 0.03 | 0.094** | 0.05 | -0.170** | -0.04 | -0.06 | -0.142** | -0.02 |
| O | 0 | -0.05 | 0.05 | -0.112** | -0.06 | -0.05 | -0.06 | -0.068* |
| ONO | 0.01 | 0 | 0.122** | -0.01 | 0.03 | -0.075* | -0.07 | -0.094** |
| NO | 0.06 | 0.04 | 0 | 0.084* | 0.06 | 0.01 | -0.04 | 0.076* |

de una hora según lo establecido en la NOM-023-SSA1-1993 (Anónimo 1993b); y para PM₁₀ fue de 150 μgm^{-3} hasta antes de septiembre de 2005 y después de esta fecha se estableció en 120 μgm^{-3} acorde a la NOM-025-SSA1-1993 (Anónimo 1993c).

En cuanto al H₂S, se han recomendado concentraciones máximas de exposición aguda de 42 μgm^{-3} < 1 h y exposición crónica de 10 μgm^{-3} (Anónimo 2008). En base a estos límites, los máximos alcanzados en algún día dentro del periodo de estudio

(Tabla 2) que excedieron la norma fueron el SO_2 en las tres estaciones, el NO_2 en Reforma y Girdaldas y las PM_{10} en Artesa y Girdaldas. Los máximos de H_2S excedieron los valores recomendados por exposición aguda o crónica en todas las estaciones.

Tabla 6. Frecuencia de la dirección del viento en porcentaje.
Table 6. Frequency of wind direction in percentage values.

| Dirección | Reforma | Girdaldas |
|-----------|---------|-----------|
| N | 0.82 | 0.94 |
| NNE | 1.88 | 0.85 |
| NE | 7.04 | 1.83 |
| ENE | 12.12 | 9.14 |
| E | 18.18 | 9.37 |
| ESE | 10.45 | 5.58 |
| SE | 5.87 | 3.88 |
| SSE | 3.81 | 2.84 |
| S | 2.97 | 4.18 |
| SSW | 2.88 | 4.88 |
| SW | 4.09 | 5.52 |
| WSW | 4.76 | 6.06 |
| W | 5.57 | 7.58 |
| WNW | 4.62 | 7.49 |
| NW | 2.4 | 3.15 |
| NNW | 0.55 | 1.17 |

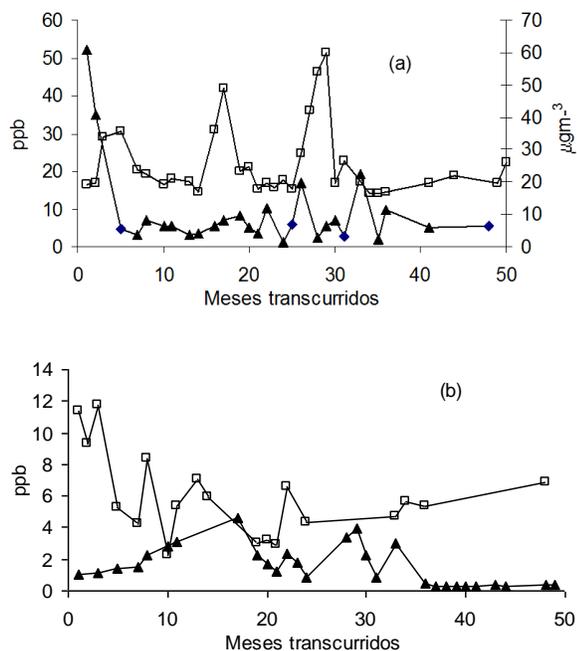


Figura 5. Comportamiento de la concentración mensual en Girdaldas: a) \square SO_2 , \blacktriangle PM_{10} ; b) \square H_2S , \blacktriangle NO_x .

Figure 5. Monthly concentration behavior in Girdaldas: a) \square SO_2 , \blacktriangle PM_{10} ; b) \square H_2S , \blacktriangle NO_x .

El análisis de correlaciones mensuales entre los contaminantes y las variables meteorológicas se hizo solo en los casos de las estaciones de Reforma y Girdaldas, pues Artesa no cuenta con estación meteorológica. La concentración mensual se correlacionó negativamente con el tiempo t , a excepción de las PM_{10} observadas en Reforma cuya correlación fue positiva aunque baja y no significativa. La correlación de NO_2 y PM_{10} con la humedad relativa (HR) fue negativa; y positiva con la temperatura (T) y la radiación solar (RS) en ambas estaciones de monitoreo. La presión (P) se correlacionó negativamente con el NO_2 en las dos estaciones. La velocidad escalar del viento (VVe) se correlacionó positivamente solo con el NO_2 y las PM_{10} en ambas estaciones, mientras que la dirección escalar del viento (DVe) se correlacionó significativamente y de forma negativa con las PM_{10} de Reforma. La altura de la capa de mezcla (L) se correlacionó negativamente con el NO_2 y las PM_{10} (Tabla 3). En todos los resultados obtenidos la correlación significativa al 5% se indicó con un asterisco y al 2.5% se indicó con dos asteriscos como un superíndice en el valor.

Las concentraciones diarias en Reforma y Girdaldas se correlacionaron negativamente con el tiempo (Tabla 4). La humedad relativa se correlacionó negativamente más con las PM_{10} que con el NO_2 . La temperatura se correlacionó positivamente con los cuatro contaminantes en Reforma pero solo con el NO_2 y las PM_{10} en Girdaldas. De modo general, la radiación solar se correlacionó positivamente mientras que la presión lo hizo negativamente con los contaminantes en las dos estaciones. A diferencia de los valores mensuales, los valores diarios de la contaminación se correlacionaron significativamente con la velocidad y dirección escalar del viento, aunque no para todos los contaminantes y ambas estaciones. Algo similar ocurrió con la altura diaria de la capa de mezclado, la correlación fue negativa y significativa en las dos estaciones aunque más baja que la correlación a escala mensual (Tabla 4). Esto tiene sentido ya que al aumentar la altura de la capa de mezcla, aumenta el volumen de aire disponible para dilución lo cual disminuye la concentración de los contaminantes.

Tabla 7. Ecuaciones de regresión de las concentraciones mensuales.
Table 7. Regression equations of the monthly concentrations.

| Estación | Función de regresión | R ² _{ajus.} |
|----------|--|---------------------------------|
| Reforma | [NO ₂] = 25.131 - 0.0886t - 0.260HR - 2.201Z _{NE} | 0.55 |
| | [H ₂ S] = 6.145 - 0.149t + 4.407Z _{WSW} + 2.0535Z _S | 0.7 |
| | [PM ₁₀] = 115.435 - 1.233HR + 13.233Z _N | 0.56 |
| Giraldas | [SO ₂] = -18.379 + 20.665V _{Ve} + 41.851Z _{NNE} | 0.7 |
| | [NO ₂] = -4.774 + 0.250T + 1.156Z _S | 0.53 |
| | [NO ₂]-1 = 4.634 - 0.04872t - 0.146T - 0.00637RS + 1.349Z _N + 1.408Z _E | 0.85 |
| | [PM ₁₀] = 145.77 - 1.574HR | 0.61 |

Tabla 8. Ecuaciones de regresión de las concentraciones diarias.
Table 8. Regression equations of the daily concentrations.

| Estación | Función de regresión | R ² _{ajus.} |
|----------|---|---------------------------------|
| Reforma | Ln[NO ₂] = 5.599 + 0.001722t - 2.66x10 ⁻⁶ t ² - 0.0455HR - 0.249V _{Vv} + 0.711Z _{WSW} + 0.664Z _w + 0.837Z _{WNW} - 0.291Z _{ENE} | 0.47 |
| | Ln[PM ₁₀] = 6.022 - 0.0393HR + 0.494Z _{NW} + 0.512Z _N + 0.303Z _{NNE} + 0.243Z _{WNW} | 0.29 |
| Giraldas | Ln[NO ₂] = -1.031 + 0.003275t - 3.64x10 ⁻⁶ t ² + 0.08915T + 0.211Z _{ESE} | 0.58 |
| | Ln[PM ₁₀] = 7.049 - 0.459HR - 0.196V _{Ve} - 0.217Z _{ENE} - 0.159Z _E + 0.264Z _{NW} - 0.135Z _{ESE} - 0.155Z _{SSW} + 0.129Z _{WNW} | 0.49 |

Tabla 9. Regresión lineal simple de las mediciones en las estaciones de monitoreo.
Table 9. Simple linear regression of measurements at monitoring stations.

| Variable | Recta de regresión | R ² |
|--------------------|----------------------------------|----------------|
| PM _{10,G} | 10.039 + 0.690PM _{10,R} | 0.46 |
| PM _{10,A} | 1.005PM _{10,G} | 0.82 |
| PM _{10,A} | 10.874 + 0.622PM _{10,R} | 0.33 |
| T _G | 6.533 + 0.724 T _R | 0.63 |
| HR _G | 10.906 + 0.888HR _R | 0.73 |
| RS _G | 19.732 + 0.976RS _R | 0.7 |
| P _G | 23.935 + 0.976P _R | 0.97 |

En el análisis del efecto de la dirección categórica del viento en la concentración se observó la existencia de una correlación mediana a escala mensual y baja a escala diaria, que en algunos fue significativa y en otros no. Por ejemplo, a nivel mensual, el SO₂ en Reforma se correlacionó (0.390) positivamente con los vientos del noreste, mientras que las PM₁₀ lo hicieron de modo inverso (-0.377) con los vientos del sureste. En Giraldas el NO₂ se correlacionó positivamente con los vientos del sur. A nivel diario se encontró que la dependencia entre la concentración de los contaminantes y la dirección del viento es variada (Tabla 5). El SO₂, NO₂ y H₂S en Reforma se correlacionaron negativamente con el viento del este, que es el viento local que predomina tanto en Reforma como en Giraldas (Tabla

6). En Giraldas, solo el H₂S se correlacionó con el viento dominante. También se observó correlación significativa con los segundos vientos prevalentes, que resultaron ser en ambos casos los vientos del este noreste.

Correlación entre estaciones

Los gráficos de dispersión de las variables meteorológicas registradas por las estaciones de Reforma y Giraldas indican que los valores diarios de temperatura, humedad relativa, radiación solar y presión en Reforma se correlacionan fuertemente con los de Giraldas (Figura 10). La regresión ajustada explica arriba del 60% de la variabilidad observada en los registros (Tabla 9). Esto significa que las estaciones se ubican en una zona de una atmósfera homogénea y están registrando mediciones muy similares entre ellas, por lo que la falta de información en alguna de estas estaciones puede subsanarse en algunos periodos con la información registrada en la otra. El coeficiente de correlación de la velocidad y dirección diaria del viento fue menor a 0.4.

Los gráficos de dispersión de los valores diarios de SO₂, NO₂ y H₂S no parecen mostrar ningún patrón de asociación (Figuras 11, 12, 13 y 14) entre las estaciones. Sin embargo, el coeficiente de

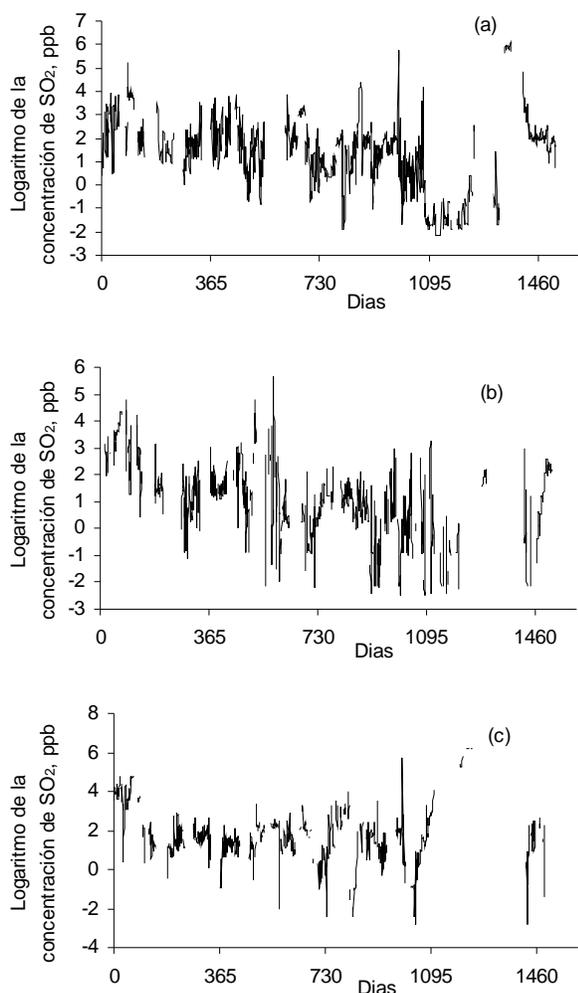


Figura 6. Serie de tiempo de la concentración diaria de SO_2 en (a) Reforma (b) Artesa y (c) Girdaldas.

Figure 6. Time series of the daily concentration of SO_2 in (a) Reforma (b) Artesa and (c) Girdaldas.

correlación fue significativo y varió entre 0.1 y 0.5. La asociación más fuerte se dio para el caso de las PM_{10} (Figura 12) donde el coeficiente de correlación resultó significativo y mayor a 0.6.

Funciones de regresión

La Tabla 7 presenta las ecuaciones de regresión que describen la concentración mensual de los contaminantes para las estaciones de Reforma y Girdaldas. La Tabla 8 presenta las funciones de regre-

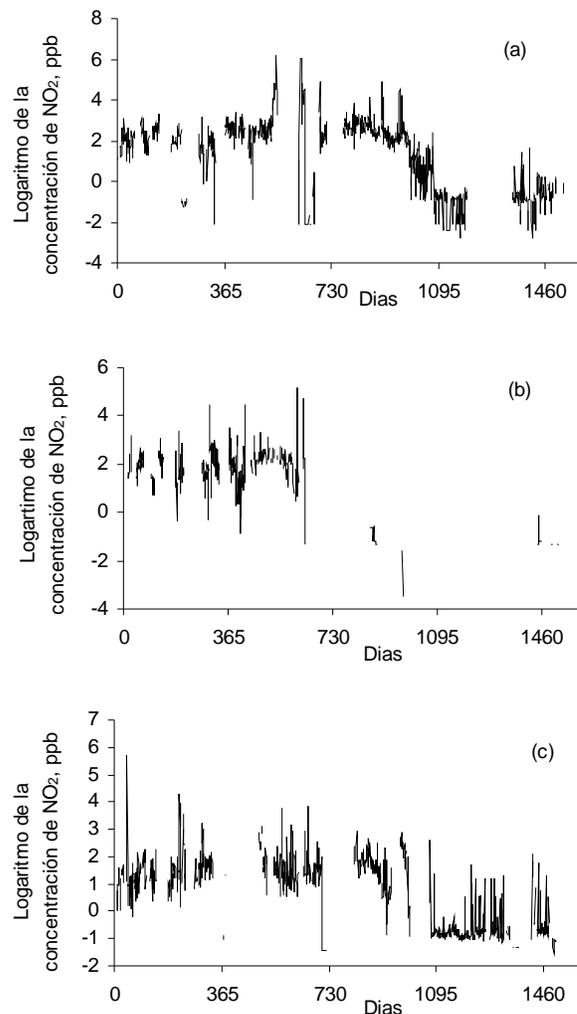


Figura 7. Serie de tiempo de la concentración diaria de NO_2 en (a) Reforma (b) Artesa y (c) Girdaldas.

Figure 7. Time series of the daily concentration of NO_2 in (a) Reforma (b) Artesa and (c) Girdaldas.

sión ajustadas al logaritmo natural de la concentración diaria y en ambos casos R_{ajus}^2 es el coeficiente de determinación ajustado por el número de observaciones y el número de variables independientes. Fue necesario transformar las concentraciones diarias a logaritmo de las concentraciones para cumplir moderadamente con las hipótesis de homogeneidad de varianza y normalidad de los residuales de los modelos.

La Tabla 9 muestra las funciones de regresión

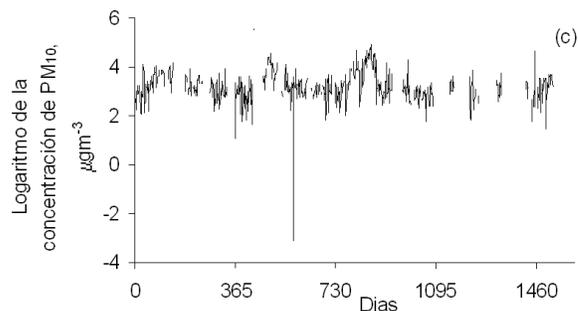
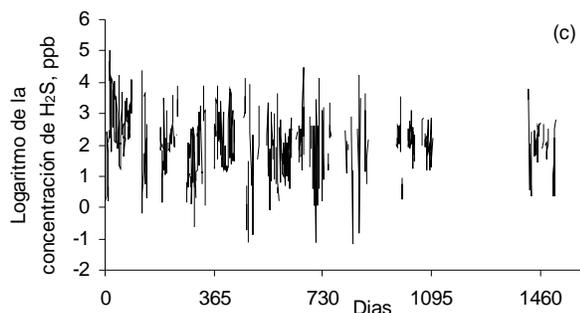
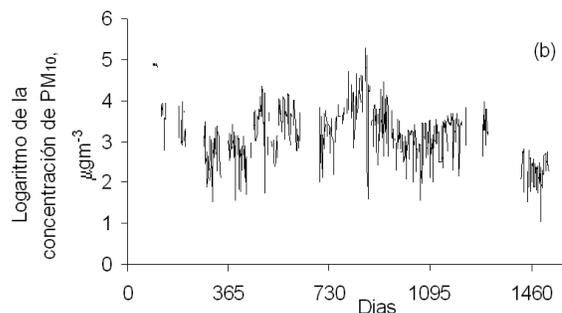
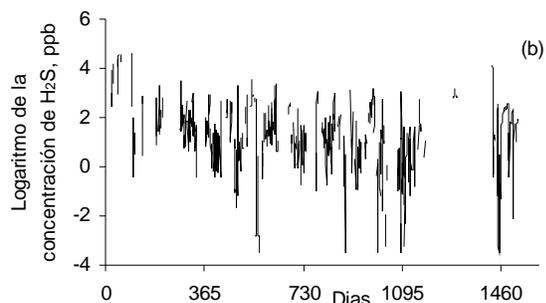
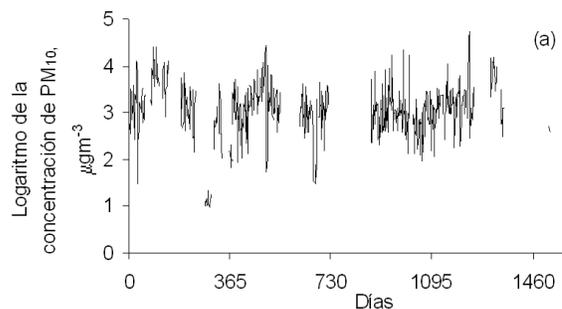
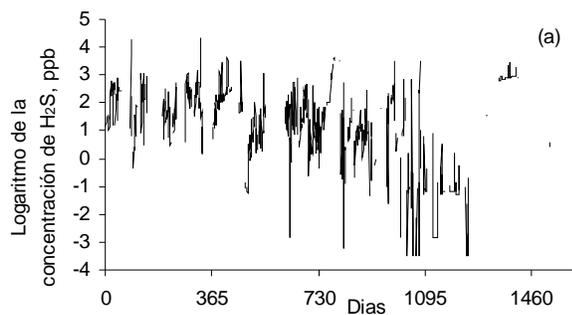


Figura 8. Serie de tiempo de la concentración diaria de H₂S en (a) Reforma (b) Artesa y (c) Girdaldas.

Figure 8. Time series of the daily concentration of H₂S in (a) Reforma (b) Artesa and (c) Girdaldas.

Figura 9. Serie de tiempo de la concentración diaria de PM₁₀ en (a) Reforma (b) Artesa y (c) Girdaldas.

Figure 9. Time series of the daily concentration of PM₁₀ in (a) Reforma (b) Artesa and (c) Girdaldas.

ajustadas en el análisis de correlación entre estaciones, donde R^2 es el coeficiente de determinación simple. Como puede notarse son modelos de regresión simple que explican una buena parte de la variabilidad observada entre variables del mismo tipo.

DISCUSIÓN

En los últimos años se han instalado plantas recuperadoras de azufre y quemadores ecológicos en

las instalaciones petroleras, con el objetivo de reducir las tasas de emisión de contaminantes a la atmósfera, entre ellos el SO₂. Esto pudiera explicar la tendencia en la disminución de la concentración media anual de SO₂. Un resultado semejante encontró Varó & Carratalá (2002) en donde el periodo en el que se dan las disminuciones de humos negros y SO₂ en ALCOY, coinciden con la puesta en funcionamiento de una red de gas natural en las industrias y que reduce las emisiones debido a actividades in-

dustriales.

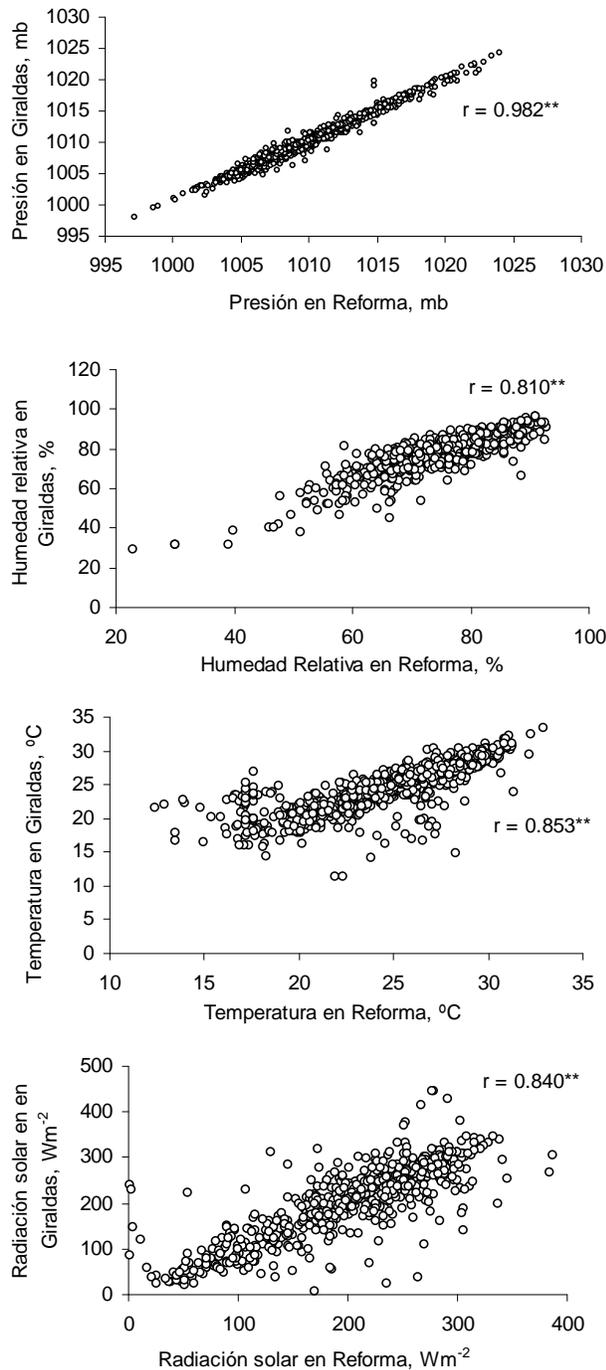


Figura 10. Gráficos de dispersión de las variables meteorológicas en Girdaldas vs Reforma.

Figure 10. Dispersion chart of the meteorological variables in Girdaldas vs Reforma.

No se puede asegurar que la tendencia a la disminución de la media anual de SO_2 persista, de modo que la función de regresión cuando mucho pudiera usarse para estimar la media anual del próximo año. Esto coincide con Correa (2004) quien aplicó la ecuación de regresión simple ajustada con los promedios anuales 1994 al 2000 de diversos contaminantes para predecir la tendencia en el 2001. Ni la humedad relativa, ni la radiación solar, ni el viento anual medio sirvieron como posibles variables descriptivas de la disminución observada en la media anual de SO_2 . En el caso de la humedad relativa, aunque se correlacionó fuertemente con el SO_2 (coeficiente de 0.80), los modelos ajustados de esta variable y el tiempo o usándola como única variable regresora no cumplieron las hipótesis inherentes a estos.

El grado de asociación entre los contaminantes y las variables meteorológicas a escala mensual (que oscila entre 0.373 y 0.772) es significativamente mayor que las que reporta Correa *et al.* (2002) quienes analizaron la relación entre los máximos diarios de ozono y los promedios diarios de las variables meteorológicas (menor de 0.3). Las variables que resultaron mejores descriptoras de la concentración mensual fueron la temperatura, la humedad relativa y la dirección de los vientos. En los modelos ajustados no se incluyeron simultáneamente estas variables, ya que están correlacionadas fuertemente (mayor a 0.6) y dejan modelos con problemas fuertes de multicolinealidad. Aunque la correlación entre la dirección categórica de los vientos y la concentración mensual de los contaminantes es baja (< 0.3), esta variable sí contribuyó a la mejora de los modelos, lo cual se manifestó en un incremento significativo en el coeficiente de correlación múltiple corregido. En Reforma, este coeficiente osciló entre 0.548 y 0.704 y en Girdaldas osciló entre 0.533 y 0.846. Estos valores son aceptables; por ejemplo Correa (2004) ajustó ecuaciones de regresión para explicar la concentración media anual de los contaminantes en la ZMVM en un periodo de seis años con un coeficiente de determinación ajustado que varía entre 0.3 y 0.9 típicamente.

A nivel diario, la humedad relativa y la temperatura resultaron inadecuadas en la descripción del

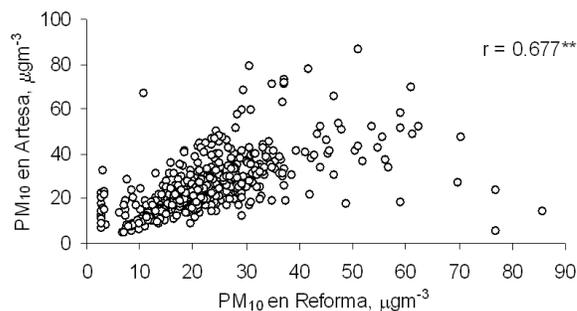
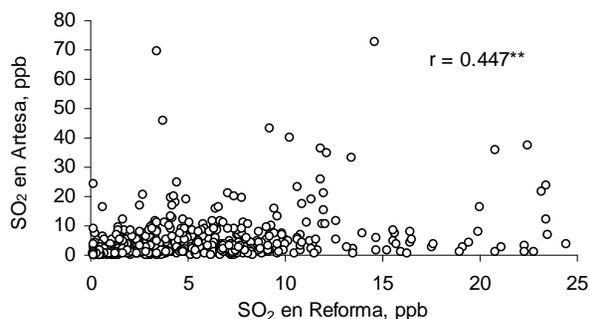
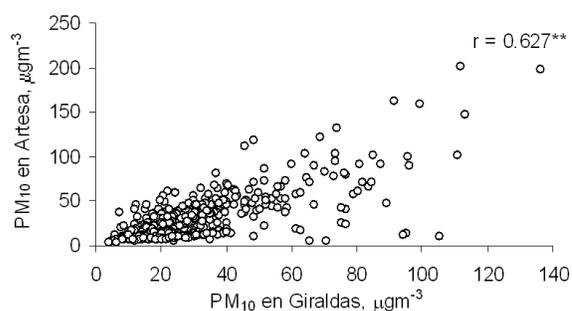
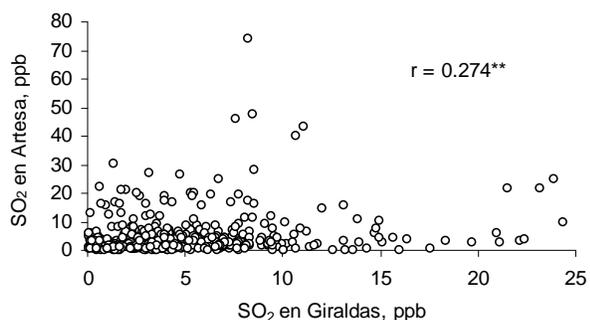
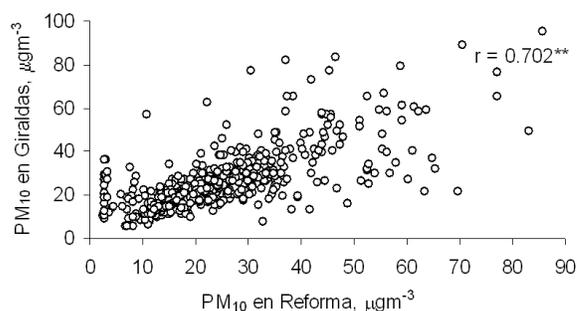
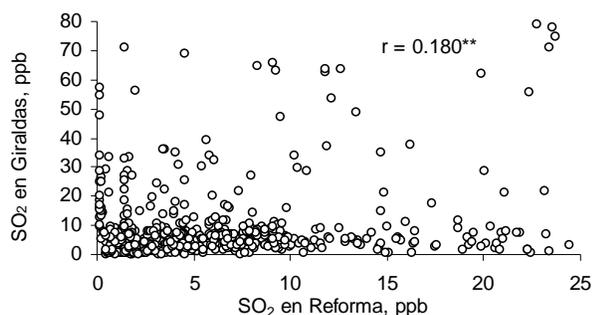


Figura 11. Gráfico de dispersión de SO₂ en las estaciones de monitoreo.

Figure 11. Dispersion chart of SO₂ at the monitoring stations.

Figura 12. Gráfico de dispersión de PM₁₀ en las estaciones de monitoreo.

Figure 12. Dispersion chart of PM₁₀ at the monitoring stations.

comportamiento de los contaminantes SO₂ y H₂S. Para mejorar los modelos, en el caso del SO₂, pudiera incluirse como variable regresora, la tasa de emisión desde las fuentes, que como ya se comentó en los últimos años ha ido disminuyendo paulatinamente. Para mejorar el modelos del H₂S quizás sea necesario incluir al SO₂ como una variable regresora, ya que de los resultados han mostrado una fuerte correlación entre estos contaminante (hasta de 0.5). Estas mismas variables resultaron adecuadas en la descripción de la contaminación diaria por NO₂ y

PM₁₀. Los modelos ajustados alcanzaron coeficientes de determinación múltiple entre 0.2 y 0.6. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que los modelos de regresión se ajustaron al logaritmo de las concentraciones diarias y al retornar a las concentraciones originales, la incertidumbre del modelo cambia.

Otro de los resultados interesantes en este estudio, es la existencia de moderada y fuerte correlación en las mediciones de PM₁₀, temperatura, humedad relativa, radiación solar y presión entre las estaciones de monitoreo. Los coeficientes de corre-

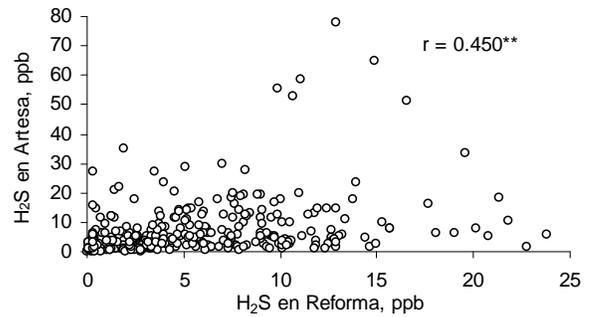
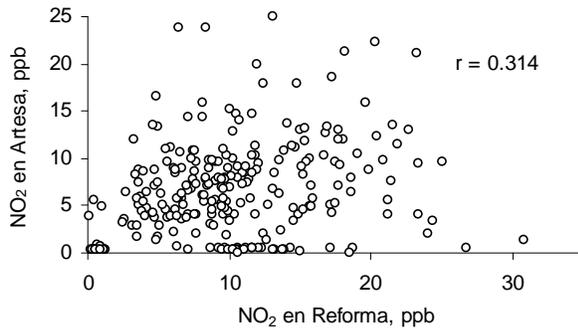
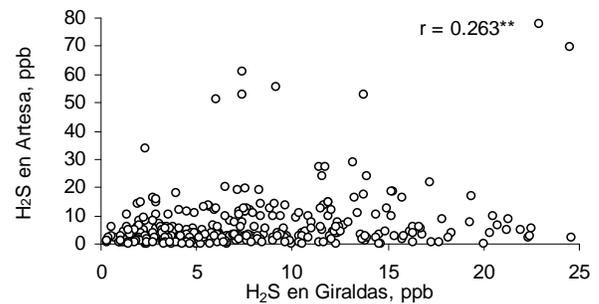
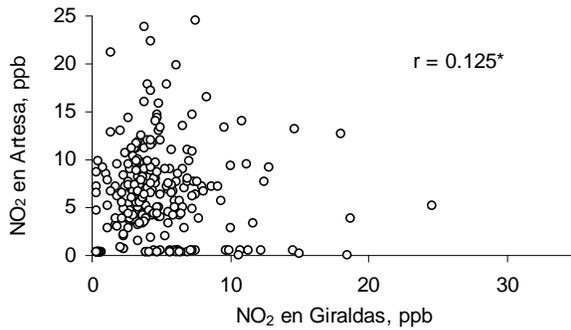
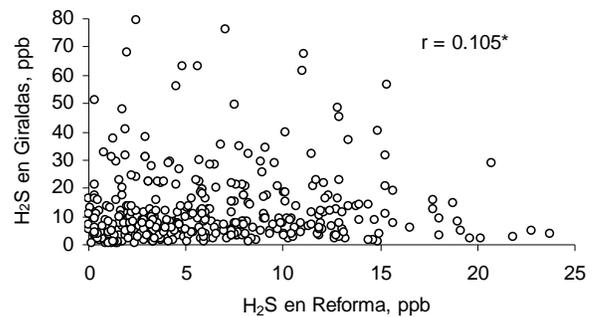
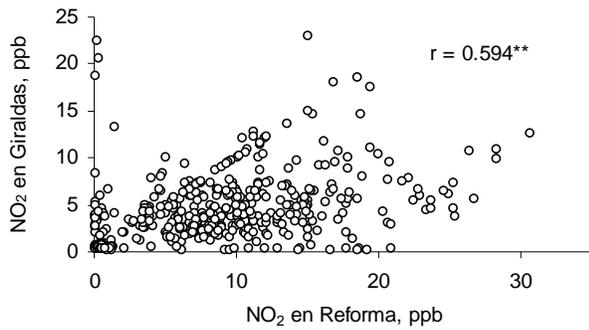


Figura 13. Gráfico de dispersión de NO_2 en las estaciones de monitoreo.

Figure 13. Dispersion chart of NO_2 at the monitoring stations.

Figura 14. Gráfico de dispersión de H_2S en las estaciones de monitoreo.

Figure 14. Dispersion chart of H_2S at the monitoring stations.

lación múltiple de las rectas de regresión ajustadas a estas variables con relación a lo observado en Reforma varían entre 0.631 y 0.974; mientras que para las PM_{10} oscilan entre 0.328 y 0.820. Esta aparente homogeneidad puede deberse a que las condiciones ambientales en esas zonas son aparentemente similares, ya que ambas casetas se ubican dentro de áreas Talleres de PEMEX. Lo mismo puede decirse de la presión y la radiación solar; ya que en el caso de la presión barométrica, se necesitan diferencias significativas en altitud para obtener lecturas que

difieran entre sí. Quizás es menos obvio en el caso de la radiación solar y la temperatura.

De manera genérica se puede decir que la recta de regresión ajustada a la media anual de SO_2 es adecuada. La tendencia fuertemente negativa de la concentración en este contaminante con el tiempo puede deberse a la disminución en las emisiones de éste, presumiblemente debido a la puesta en marcha de plantas recuperadoras de azufre en las instalaciones petroleras.

Las ecuaciones de regresión ajustadas para

explicar las concentraciones mensuales de los contaminantes tienen una bondad de ajuste bastante buena. Puede pensarse, que las variables meteorológicas mensuales como la humedad relativa y la temperatura son adecuadas en la descripción de la tendencia mensual en la contaminación atmosférica de la ZNC. Se recomienda en el futuro simular la distribución espacial y temporal de estos contaminantes usando modelos de dispersión y de pronóstico meteorológico (MM5), que tomen en cuenta la circulación a nivel regional, los vientos dominantes y sus variaciones estacionales. El análisis entre

estaciones meteorológicas, indicó que probablemente están registrando información muy similar por lo que la falta de información en una estación pudiera complementarse por la otra.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Gerencia de Seguridad Industrial y Protección Ambiental de PEMEX Exploración y Producción Región Sur en el estado de Tabasco por la información proporcionada para el desarrollo de este estudio.

LITERATURA CITADA

- Anónimo (1993a) NOM-022-SSA1-1993; Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiental con respecto al bióxido de azufre (SO₂). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. 4pp.
- Anónimo (1993b) NOM-023-SSA1-1993; Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiental con respecto al bióxido de nitrógeno (NO₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. 3pp.
- Anónimo (1993c) NOM-025-SSA1-1993; Salud ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a material particulado. 11p.
- Anónimo (2000) Meteorological monitoring guidance for regulatory modeling applications. Environmental Protection Agency Oficina de Aire y Radiación Oficina de Planeación de Calidad del Aire y Estándares. EPA-454/R-99-005. Cap. 6. 7 pp.
- Anónimo (2003) Anuario estadístico edición 2003 Chiapas. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 606 pp.
- Anónimo (2008).Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA) and the Air Resources Board (ARB) for use 2588 in facility health risk assessments conducted for the AB 2588 Air Toxics Hot Spots Program.
- Arrivas-Monzón F, Rabanaque MJ, Martos MC, Abad JM, Alcalá-Nalvaíz T, Navarro-Elipse M (2001) Efectos de la contaminación atmosférica sobre la mortalidad diaria en la ciudad de Zaragoza, España, 1991-1995. *Salud Pública de México* 43(4) 289-297.
- Amador-Muñoz O, Delgado-Rodríguez A, Villalobos-Pietrini R, Munive-Colín Z, Ortiz-Marttello R, Díaz-González G, Bravo-Cabrera JL, Gómez-Arroyo S (2001) Partículas suspendidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos y mutagenicidad en el Suroeste de la Ciudad de México. *Contaminación Ambiental* 17(4): 193-204.
- Bravo JL, Nava MM, Muhlia A (2000) Relaciones entre la magnitud del valor máximo de ozono, la radiación solar y la temperatura ambiente en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Contaminación Ambiental* 16(2): 45-44.
- Correa AG, Muñoz RC, Cardoso GC (2002) Análisis de ozono y 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. 14pp.

- Correa AG (2004) Contaminantes atmosféricos en la zona metropolitana de la ciudad de México. Instituto Politécnico Nacional Universidad Autónoma Metropolitana México 280p.
- Davydova-Belitskaya V, Skiba YN, Bulgakov SN, Martínez A (1999) Modelación matemática de los niveles de contaminación en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México. Parte I, microclima y monitoreo de la contaminación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 15 (2): 103-111.
- Ferrán MA (2001) SPSS para Windows análisis estadístico. España MCGRAW-HILL. 421 pp.
- Hernández-Cadena L, Téllez-Rojo MM, Sanin-Aguirre LH, Lacasaña-Navarro M, Campos A, Romieu I (2000) Relación entre consultas a urgencias por enfermedad respiratoria y contaminación atmosférica en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Salud Pública de México*. 42(4): 288-297.
- Jiménez JCH (2002) Análisis de valores extremos de la concentración de ozono en la ciudad de México Tesis profesional. UJAT División Académica de Ciencias Básicas Cunduacán Tabasco 95p.
- Montgomery DC, Peck EA, Vining GG (2006) Introducción al análisis de regresión lineal (3a. ed.) México D.F. CECOSA. 588 pp.
- Sáez M, Pérez-Hoyos S, Tobías A, Saurina C, Barceló MA, Ballester F (1999) Métodos de series temporales en los estudios epidemiológicos sobre contaminación atmosférica. *Rev Esp Salud Pública*. 73(2): 133-143.
- Varó PG, Carratalá AG (2002) Evolución de los niveles de inmisión de contaminación atmosférica en una ciudad industrial (ALCOY) desde 1989 a 2000. *Revista Salud Ambiental*, 2(1): 8-15.
- Valdés AM, Bautista RM, Ramos SH, Magaña EV (2004) Distribución espacial y estacional de las inmisiones de bióxido de azufre (SO₂) en la zona norte de Chiapas y centro de Tabasco. *KUXULKAB' Revista de Divulgación*. División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 10(19): 33-36.
- Vázquez CA (2006) Aplicación de un modelo de dispersión para determinar las concentraciones de monóxido de carbono (CO) emitidos por motores diesel de un pozo petrolero. Tesis profesional Universidad Juárez Autónoma de Tabasco División Académica de Ciencias Biológicas Villahermosa Tabasco 106p.