

APLICACION Y VERIFICACION DE UN MODELO DE DIFUSION - DEPOSITO DE CONTAMINANTES  
EN LA ATMOSFERA DE LA CIUDAD DE LA PLATA (PROV. BUENOS AIRES)

Nicolás A. Mazzeo

Departamento de Meteorología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Universidad de Buenos Aires  
Buenos Aires, República Argentina

Resumen

El deterioro del medio ambiente en algunas zonas del planeta adquiere grandes magnitudes. Respecto a la contaminación del aire, la estimación cuantitativa de la concentración de contaminantes mediante modelos de difusión constituye el único método destinado a: predecir niveles de contaminación; determinar los efectos de futuras fuentes de emisión sobre la calidad del aire; y evaluar los resultados que se obtendrían disminuyendo las emisiones de contaminantes.

Se aplica un modelo de difusión-depósito de contaminantes atmosféricos en el área de la ciudad de La Plata que considera una distribución espacial de contaminantes del tipo gaussiano. Se obtiene una climatología de la contaminación por partículas y se comparan los valores estimados por el modelo con los observados.

Abstract

The deterioration of the environment in some regions of the planet acquires great magnitudes. In relation to air pollution, the quantitative estimation of the concentration of pollutants by means of diffusion models constitutes the only method used to: forecast levels of pollution, determine the effects of future sources on the air quality; and to evaluate the results that will be obtained diminishing the emission of pollutants.

We apply a diffusion-deposit model of atmospheric pollutants in the area of La Plata city. The vertical distribution of the pollutants is assumed to be Gaussian. In this way it is obtained a climatology of the pollution by particles and we compare these values estimated by the model to those previously observed.

## INTRODUCCION

El deterioro del medio ambiente, debido especialmente a la incesante actividad humana, está alcanzando en algunas zonas de nuestro planeta tal magnitud que es necesario realizar un esfuerzo tecnológico para mantener su calidad. Por ello, la solución al problema creado por la contaminación ambiental debe encararse intergubernamental y nacionalmente en todos sus aspectos: político, legal, económico y técnico-científico.

Sin embargo, de los tres grandes recursos naturales, aire, agua y suelo, sólo el primero no puede ser purificado por el hombre una vez contaminado, pues los contaminantes emitidos a la atmósfera son diluidos o removidos exclusivamente mediante procesos naturales. Por ejemplo, mientras que el agua de los ríos puede y a veces se lleva a cabo, ser depurada artificialmente, el aire no tiene posibilidad de serlo. Por otra parte los contaminantes emitidos a la atmósfera desde diferentes clases de fuentes se mezclan y no pueden ser distinguidos.

Esto significa que la estimación numérica de la concentración de contaminantes en el aire adquiere singular importancia. Con ese objeto son utilizados los modelos de difusión atmosférica (Lazzeo, 1974b).

Un modelo de difusión atmosférica está constituido por una o un sistema de ecuaciones matemáticas que describen el proceso de transporte y dispersión de los contaminantes en el aire y permite estimar la concentración de éstos en función de la intensidad de emisión de las distintas fuentes y de las características topogeográficas y meteorológicas de la zona.

Estos modelos pueden ser utilizados con los siguientes objetivos:

- determinar las contribuciones relativas de diferentes clases de fuentes emisoras a la contaminación atmosférica;
- encontrar la mejor ubicación de los muestreadores de contaminantes o de estaciones meteorológicas destinadas a la vigilancia de la calidad del aire en la zona;
- predecir los niveles de contaminación del aire;
- determinar los efectos sobre la calidad del aire de futuras fuentes de emisión de contaminantes que podrían derivar del avance de la industrialización y/o del crecimiento demográfico.
- evaluar los resultados obtenidos mediante la disminución de las emisiones de contaminantes a la atmósfera.

Desde 1958 fueron desarrollados diferentes modelos de difusión atmosférica urbana (Lucas, 1958; Clarke, 1964; Turner, 1969; UCLPA, 1970; NATO, 1972). Todos ellos presentan una base común: están elaborados utilizando la hipótesis de la "pluma gaussiana" aplicada a contaminantes emitidos desde una fuente puntual (Pasquill, 1962). Las diferencias entre los distintos modelos se encuentra en el procedimiento de suma de las fuentes distribuidas en un área y en la inclusión de diferentes parámetros meteorológicos. Sin embargo, al ser aplicados surge otra diferencia apreciable: el tiempo de computación empleado para encontrar los valores numéricos de las concentraciones. El mayor tiempo de computación constituye una desventaja cuando los modelos son utilizados en la predicción rutinaria de niveles de contaminación, debido a que el cálculo de la concentración de contaminantes es uno de los elementos constituyentes del sistema de evaluación y control de la calidad del aire de una zona. De esta forma, parece justificable la utilización de modelos de difusión atmosférica "simples" pero físicamente realistas para determinar las concentraciones de contaminantes en el aire (NATO, 1973).

#### DESCRIPCION DEL MODELO DE DIFUSION ATMOSFERICA UTILIZADO

En el año 1970 F.A. Gifford (Gifford y Hanna, 1970) desarrolló las bases de un modelo de difusión atmosférica urbana que posteriormente fue modificado introduciendo distintas alternativas y simplificaciones (Gifford y Hanna, 1972; Hanna, 1972; Hanna, 1973).

La base conceptual de este modelo lo constituye el concepto de la pluma recíproca (Gifford, 1959) en el cual el origen de coordenadas se encuentra en el punto receptor de contaminantes.

La concentración en superficie de contaminantes en el aire se encuentra mediante la integración de las fuentes emisoras distribuidas en áreas "viento arriba", expresada de la siguiente forma:

$$\chi_o(0,0) = \int_0^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Q_a(x,y)}{\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} dy \quad (1)$$

donde  $\chi_o(0,0)$  es la concentración de contaminantes en aire en superficie

$Q_a(x,y)$  es la intensidad de las fuentes de emisión

$\sigma_y, \sigma_z$  son las desviaciones normales de la distribución espacial (en las direcciones  $y, z$ ) de los contaminantes.

$\bar{u}$  es la velocidad media del viento

$x$  es el eje en la dirección del viento medio (es considerado positivo "viento arriba" del receptor).

$y$  es el eje horizontal perpendicular a la dirección del viento medio.

$z$  es el eje vertical.

Dado que las plumas de contaminantes tienen generalmente reducida dimensión horizontal (por ejemplo, están comprendidas en ángulos menores que  $20^\circ$ ) se puede suponer que las intensidades de las fuentes emisoras dependen sólo de la distancia  $x$  y por lo tanto se puede expresar que  $Q_a(x,y) = Q_a(x)$ . De esta manera la ecuación (1) queda:

$$\chi_o(0,0) = \int_0^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Q_a(x)}{\bar{u} \sigma_z} dx \quad (2)$$

Por otro lado, fue establecida la siguiente expresión para la desviación normal vertical (Gifford y Hanna, 1972)

$$\sigma_z = a x^b \quad (3)$$

donde  $a$  y  $b$  son coeficientes que dependen de la estabilidad atmosférica.

Generalmente, la emisión de contaminantes de áreas urbanas está distribuida en retículos cuadrados. Teniendo en cuenta ello, se puede integrar la ecuación (2) introduciendo la expresión (3) y resulta:

$$\chi_o(0,0) = \sum_{i=0}^n C_i Q_{ai} \quad (4)$$

donde  $i=0$  para el retículo del punto receptor

$i = 1, 2, \dots, n$  cuando las mallas se encuentran ubicadas, a continuación de la del receptor en la dirección de los ejes  $x$  positivos.

Los coeficientes están representados por las siguientes expresiones:

$$C_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{(\Delta x/2)^{1-b}}{\bar{u} a^{(1-b)}}$$

$$C_i = C_0 \left[ (2i+1)^{1-b} - (2i-1)^{1-b} \right] \quad \text{para } i \geq 1$$

donde  $\Delta x$  es el lado del retículo.

La ecuación (4) es válida cuando el aire fluye en una dirección. Pero, la aplicación del modelo para la climatología de la contaminación del aire necesita de la distribución del viento en diferentes direcciones y por lo tanto es necesario realizar la suma sobre todas esas direcciones:

$$\chi_0(x, y) = \sum_{j=1}^N f_j \sum_{i=0}^m C_i Q_{ai} \quad (5)$$

donde  $N$  es el número total de direcciones consideradas.

$f_j$  es la frecuencia de ocurrencia del viento en la dirección  $j$ .

Cuando se considere el depósito "seco" de contaminantes en el suelo (Mazzeo, 1970; Mazzeo, 1971) la expresión (5) se transforma en la siguiente:

$$W_s = v_d \sum_{j=1}^N f_j \sum_{i=0}^m C_i Q_{ai} \quad (6)$$

donde  $W_s$  es el flujo de contaminantes depositados en el suelo por la acción de la gravedad.

$v_d$  es la velocidad de depósito de los contaminantes.

Otro de los procesos que toma parte en el depósito de los contaminantes sobre la superficie terrestre es la acción de la precipitación pluvial o depósito "húmedo" (Mazzeo, 1970). Este mecanismo puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$\frac{d\chi}{dt} = -\Lambda \chi$$

donde  $\Lambda$  es el coeficiente de remoción de contaminantes por acción de la precipitación.

Entonces el flujo de contaminantes depositados sobre el suelo por este efecto puede ser expresado de la siguiente manera:

$$W_p = \Lambda \int_0^{\infty} \chi(z) dz$$

Si la distribución vertical de los contaminantes es gaussiana y utilizando la ecuación (3) al promediar sobre un retículo cuadrado resulta:

$$W_p = \Lambda \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{2a}{(2+b)} \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^b \sum_{j=1}^N f_j \sum_{i=0}^m C_i Q_{ai} \quad (7)$$

Por lo tanto, el depósito total de contaminantes sobre el suelo puede expresarse de la siguiente manera:

$$\omega_T = \omega_s + \omega_b = \left[ v_d + \lambda \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{2a}{(2+b)} \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^b \right] \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^m C_i Q_{ji} \quad (8)$$

La expresión (8) constituye una modificación original de la ecuación (5).

#### APLICACION A LA CIUDAD DE LA PLATA

En este trabajo, la ecuación (8) será aplicada en la ciudad de La Plata (Prov Buenos Aires) para determinar la contaminación por partículas sedimentables. Algunos estudios de la contaminación atmosférica en dicha ciudad fueron realizados (Nieto, 1970; Mazzeo y Nicolini, 1974). De acuerdo con lo extraído de esos trabajos se puede suponer que, en general, la contaminación del aire urbano proviene de la generación de contaminantes externa a la ciudad (principalmente de la zona industrial ubicada al NE de la metrópolis) y de la emisión interna (provocada, en especial, por el parque automotor y la actividad doméstica).

La información de emisión de material particulado a la atmósfera fue obtenida de un inventario realizado para el transporte automotor de pasajeros y el consumo de gas natural en la ciudad (Mazzeo y otros, 1975). Estos valores fueron adecuados a condiciones más realistas, considerando la emisión de partículas que originan otras fuentes: vehículos particulares, incineración domiciliaria y otros procesos. Para ello se modificaron los valores obtenidos en (Municipalidad C.B.A. 1972) introduciendo un factor extraído de un trabajo realizado en otra ciudad de nuestro país.

En este trabajo no se consideran los contaminantes generados fuera de la ciudad.

En la figura 1, en el tope de cada malla, se encuentra el valor de la emisión de partículas emitidas a la atmósfera ( $\text{kg}/\text{km}^2\text{-año}$ ). La velocidad media y la distribución de frecuencias de direcciones del viento en el área urbana de La Plata (Mazzeo y otros, 1972) están contenidas en la Tabla.

Las clases de estabilidad atmosférica, definidas por una modificación (Turner, 1964) del esquema sugerido por F. Pasquill (USACE, 1968) fueron obtenidas de una elaboración realizada para la zona (Mazzeo y otros, 1972). De ese estudio se concluye que la categoría de estabilidad más frecuente en La Plata es la neutralidad atmosférica.

Con el objeto de determinar las desviaciones normales en la dirección vertical se utilizó una expresión desarrollada por F. Pasquill (Pasquill, 1971) y que se basa en la hipótesis de la semejanza aplicada a la difusión de contaminantes en el aire en funciones empíricas de la distribución espacial de los contaminantes.

La ecuación que contiene  $\sigma_z$  en función de la distancia  $x$  es la siguiente:

$$\sigma_z/x = a k^2 / [\ln(c \frac{\sigma_z}{a z_0}) - 1] \quad (9)$$

donde  $a = 1.30$

$c = 0.6$

$k = 0.4$

$z_0$  es el parámetro de rugosidad del terreno.

El parámetro de rugosidad para el área de La Plata fue estimado mediante la siguiente expresión:

$$z_0 = \frac{h}{2A} \quad (10)$$

donde  $h$  es la altura media de la edificación

$A$  es la relación entre el área total y el área construida

La expresión (9) puede ser aproximada, para el rango  $0,1 \text{ km} \leq x \leq 10 \text{ km}$ , a la ecuación (3) y resulta:

$$\sigma_z = 1.0 x^{0.7}$$

donde  $a = 1.0 \text{ m} \quad (1-0.7)$

$b = 0.7$

El valor numérico de la velocidad de depósito de las partículas ( $V_d$ ) fue considerado igual a  $1,5 \text{ cm/s}$  (Mazzeo y otros, 1971; USAEC, 1968) mientras que el coeficiente de remoción ( $\Lambda$ ) fue adoptado igual a  $10^{-4} \text{ 1/seg}$  (USAEC, 1968).

Los valores del flujo de partículas depositadas sobre el suelo fueron calculados en cada retículo mediante la expresión (E) y están incluidos en la Figura 1 (números escritos entre paréntesis) en  $\text{ton/km}^2 \times 30 \text{ días}$ .

En la misma Figura se encuentran los valores de los depósitos observados mediante muestreos durante los años 1973-74 (números incluidos en el extremo superior derecho de cada malla) (Mazzeo, 1975).

#### COMPARACION DE VALORES CALCULADOS Y OBSERVADOS

En la Figura 2 están representados los valores del depósito calculados y obser

vados. Se desprende que dos de ellos se dispersan notoriamente. Estos valores pertenecen a las dos estaciones muestreadoras ubicadas al NE de la ciudad y por lo tanto en el límite con el parque industrial. La diferencia mencionada podría obedecer a la incidencia, no considerada de la contaminación debida al parque industrial.

Como la contaminación proveniente de las zonas industriales generalmente procede de fuentes que pueden ser consideradas como distribuidas en línea perpendicular al viento, la concentración (y por lo tanto el depósito) varía con la distancia según la siguiente expresión (Sutton, 1953):

$$\frac{\chi(x_1)}{\chi(x_2)} = \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{0.9} \quad (11)$$

Luego los valores numéricos del depósito de contaminantes en el suelo pueden ser reformados de la siguiente manera: la primera fila de retículos del NE de la ciudad se modificará mediante la suma del valor de la diferencia entre el valor calculado y el observado, y la segunda fila por la aplicación de la expresión (11).

En la figura 3 se incluyen los valores del depósito de contaminantes en el suelo y las isolíneas de igual depósito en la ciudad de La Plata.

La Tabla siguiente presenta los valores observados y los calculados (sin incluir los dos retículos del NE de la ciudad):

<u>Observados</u>	<u>Calculados</u>
2.4	2.0
4.5	3.9
10.9	10.8
5.1	5.4
11.8	12.4
4.2	3.8

Los valores están en  $\text{ton}/\text{km}^2 \times 30$  días.

La prueba de "t de Student" permite comprobar que los valores observados y los calculados pueden ser considerados semejantes para un nivel de significancia del 1%.

#### CONCLUSIONES

De lo expuesto se puede extraer lo siguientes:

- Los modelos de difusión atmosférica urbana, en este caso particular el modelo considerado, constituyen un sistema sumamente útil con el objeto de calcular la concentración (depósito) de contaminantes en una ciudad. Esto es importante

si se tiene en cuenta lo costoso de la instalación de la cantidad necesaria de muestreadores para evaluar y controlar la contaminación urbana.

- De la Figura 3 se puede notar que existe el 10% de la ciudad de La Plata con depósito de contaminantes mayor que los límites establecidos por la legislación (Decreto-Ley 20284/73 sobre la Preservación de los Recursos del Aire) que establece que el  $D_{max} = 1.0 \text{ mg/cm}^2 \times 30 \text{ días} = 10 \text{ ton/km}^2 \times 30 \text{ días}$ .
- Lo expuesto anteriormente implica la necesidad de ejercer el control sobre la emisión de partículas al aire en esa zona. Para tal fin el modelo aplicado puede ser un instrumento eficaz.
- La contribución a la contaminación por parte del parque industrial a la zona límite urbana situada al NE de la ciudad parece ser importante (aproximadamente 70% del total).

#### BIBLIOGRAFIA

- Clarke, J.F. 1964: A simple diffusion model for calculating point concentrations from multiple sources; *Journal Air Poll., Control Assoc.* 14.
- Gifford, F.Z., 1959: Computation of pollution from several sources; *Inter. Journal of Air Poll.* 2.
- Gifford, F.A., Hanna, S.R., 1970: Urban air pollution modeling. Proc. Meeting of the Inter. Union of Air Poll. Preven. Assoc.
- Gifford, F.A., Hanna, S.R., 1972: Modelling urban air pollution; *Atmosph. Environ.* 6.
- Hanna, S.R., 1972: An air quality model for Knox County; Tennessee. ATDL 55.
- Hanna, S.R., 1973: Application of a simple dispersion model to total industrial region. ATDL 63.
- Lucas, D.H., 1958: The atmospheric pollution of cities; *Inter. Journal of Air Poll.* 1.
- Mazzeo, N.A., 1970: Deposición de aerosoles dispersados en la atmósfera. *METEOROLOGICA* 1.
- Mazzeo, N.A., Miller, C., Micheloni, R., Van der Elst, M., 1971: Estudio experimental atmosférico de la velocidad de depósito de aerosoles; *METEOROLOGICA* 2.
- Mazzeo, N.A., Nicolini, M., Micheloni, C., 1972 a: Aspectos climatológicos de la contaminación atmosférica en el área de La Plata (Prov. de Buenos Aires); *METEOROLOGICA* 3.

- Mazzeo, N.A., Nicolini, M., Micheloni, R., 1972 b: Condiciones de estabilidad atmosférica y capacidad de difusión vertical de contaminantes en la ciudad de La Plata; Ingeniería Sanitaria XV.
- Mazzeo, N.A., Nicolini, M., 1974 a: Estudio preliminar de la contaminación potencial de la atmósfera en la zona de La Plata; Congreso de Saneamiento, Tucumán.
- Mazzeo, N.A., 1974 b: Inserción de un modelo de calidad del aire en el control de la contaminación atmosférica; METEOROLOGICA 5-6.
- Mazzeo, N.A., Nicolini, M., Tripode, J., 1975: Estimación de emisiones de contaminantes originados por el transporte automotor y por el uso de gas natural en la ciudad de La Plata; Saneamiento XI.
- Mazzeo, N.A., 1975 b: Análisis del polvo depositado en la ciudad de La Plata (a publicar).
- Municipalidad de la Ciudad de Buenos Aires, 1972: Estudio de la preservación del aire en la Ciudad de Buenos Aires.
- N.A.T.O., 1972: Proceedings of the third meeting of expert panel on air pollution modelling. N.A.T.O./CCMS N° 14.
- Nieto, A., 1970: Consideraciones generales sobre el estado actual de la atmósfera de la ciudad de La Plata; Informe Técnico N° 4, Instituto Biológico de la Provincia de Buenos Aires.
- Pasquill, F., 1962: Atmospheric diffusion; Van Nostrand.
- Pasquill, F., 1971: Atmospheric dispersion of pollution; Quart. Journal Roy. Met. Soc. 97.
- Sutton. O.G., 1953: Micrometeorology; Mc Graw Hill.
- Turner, D.B., 1964: A diffusion model for an urban area; Journal App. Met. 3.
- Turner, D.B., 1969: Urban atmospheric dispersion model - Past, present and future USMS, 338.
- USAEC, 1968: Meteorology and atomic energy.
- USEPA, 1970: Proceedings of symposium on multiple source urban diffusion models; AP-86.

12123	7.4 5713	4717	7436	8188	7.2 5535
(2.9)	(2.0)	(1.6)	(2.5)	(2.7)	(1.9)
19298	28305	11455	14159	17662	6157
(6.9)	(10.1)	(4.3)	(5.3)	(6.3)	(2.0)
24343	41114	11.9 40576	22986	19019	6765
(8.3)	(15.0)	(12.4)	(9.0)	(7.2)	(2.3)
4.2 7346	18383	10.9 27597	20722	17413	4919
(3.8)	(6.8)	(10.8)	(8.2)	(6.4)	(1.3)
3555	4154	15750	19710	5.1 15154	5611
(1.1)	(1.4)	(5.9)	(7.4)	(5.4)	(1.9)
2.4 4979	1318	4012	4.5 7918	8272	15102
(2.0)	(0.5)	(1.4)	(3.9)	(2.7)	(4.5)

Fig. 1 Emisión de partículas en la ciudad de La Plata ( $\text{kg}/\text{km}^2$  año).

Depósito calculado de partículas sobre el suelo (estos valores se encuentran entre paréntesis en  $\text{ton}/\text{km}^2$  año).

Depósito observado (extremo superior derecho en  $\text{ton}/\text{km}^2$  año).

El recuadro remarcado corresponde a los límites de la ciudad.

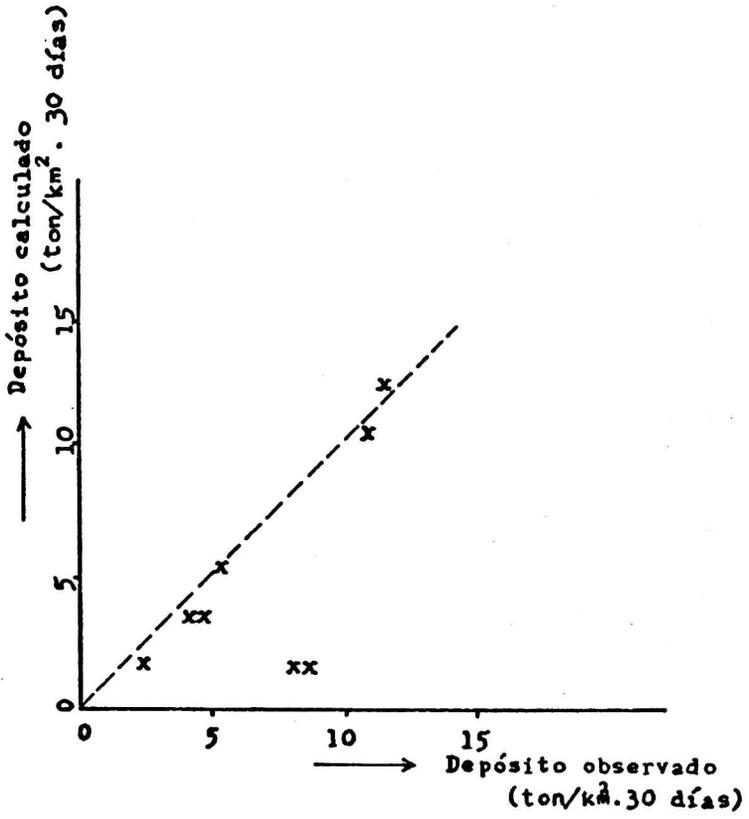


Fig. 2 Depósito calculado y depósito observado en la ciudad de La Plata.

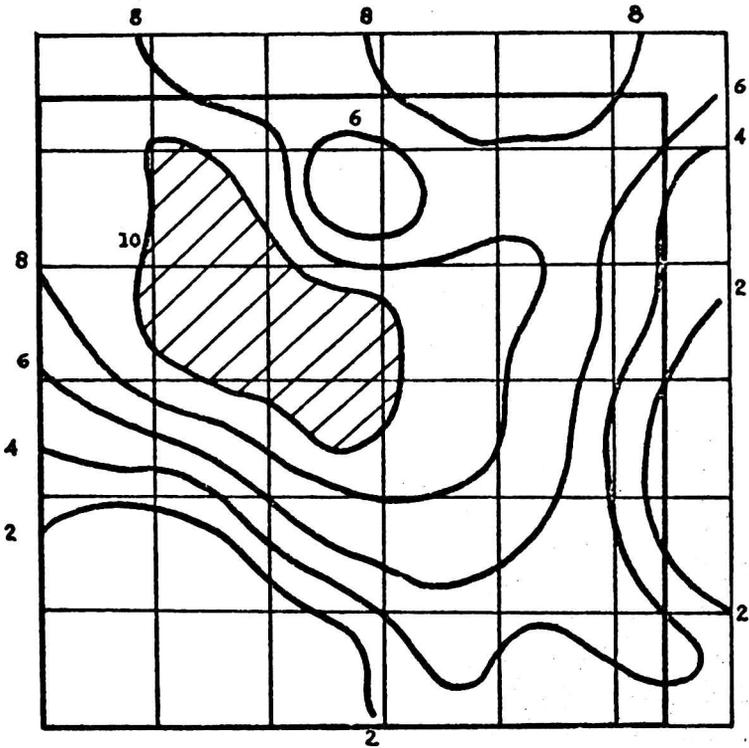


Fig. 3 Líneas de igual depósito de contaminantes para la ciudad de La Plata.  
 El cuadrado remarcado corresponde a los límites de la ciudad. El depósito está en  $\text{ton}/\text{km}^2$  30 días.