

## **CÓMO ESTIMAR LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA SALUD\***

**Bart D. Ostro**

La contaminación atmosférica por material particulado respirable (PM10) es una mezcla heterogénea de sustancias químicas y partículas de tamaño menor a 10 micrones, a la que regularmente está expuesta la mayoría de la población. En Santiago, durante los meses de invierno, las concentraciones de PM10 sobrepasan en varias ocasiones los límites que aconsejan las normas norteamericanas de calidad ambiental. Por otro lado, estudios epidemiológicos realizados en los Estados Unidos han detectado una asociación entre PM10 y diversas consecuencias adversas para la salud, entre las que se incluyen mortalidad prematura, ingresos en hospitales, visitas a salas de urgencia, ataques de asma, síntomas respiratorios y disminuciones

---

BART D. OSTRO. Ph. D. en Economía, Brown University. Actualmente se desempeña como Jefe de Unidad de Contaminación Atmosférica y Epidemiología en la Oficina de Evaluación de Peligros Ambientales para la Salud, de la Agencia de Protección Ambiental de California. Su responsabilidad fundamental es formular las recomendaciones de la Agencia para generar estándares de calidad del aire para el Estado de California y dirigir investigaciones sobre los efectos en la salud de los contaminantes atmosféricos. El Dr. Ostro ha sido consultor de varias instituciones, entre otras, de la EPA de los Estados Unidos de Norteamérica, de las Secretarías de Estado y de Energía, Organización Mundial de la Salud, el Banco Mundial, el Banco de Desarrollo de Asia y de los gobiernos de Tailandia, Indonesia, México, Chile, República de Corea, Canadá y Unión Europea.

\* Trabajo presentado en el seminario organizado por el Centro de Estudios Públicos el 22 de mayo de 1997. En esta edición se incluye también el comentario de Juan Pablo Illanes a la exposición de Bart D. Ostro.

*Estudios Públicos*, 69 (verano 1998).

de la función pulmonar. Es importante, por consiguiente, tratar de cuantificar los impactos de estas concentraciones, ya que ello permite poner en perspectiva los posibles beneficios de controlar la contaminación y, a la vez, priorizar las políticas públicas respecto del control de la contaminación *versus* otras inversiones en salud pública. Para estimar los efectos en la salud asociados con la contaminación, en este trabajo se propone una metodología basada en estudios de series cronológicas que relacionan cambios diarios en la contaminación atmosférica con la incidencia diaria de un efecto sobre la salud. De especial interés aquí —se señala— es la relación entre exposición a material particulado y mortalidad, ya que los efectos sobre la mortalidad tienden a dominar los costos económicos de la contaminación atmosférica. En el caso de Santiago, a partir de datos locales disponibles, al aplicar esta metodología se obtiene un cambio porcentual estimado en mortalidad del orden de 1% asociado a cambios de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en concentraciones de PM10.

**E**l contaminante atmosférico “material particulado”, a veces llamado también “polvo u hollín”, es uno al que está expuesto regularmente la mayoría de la población. Por lo general, éste se monitorea en el aire ambiente como PM10, y comprende las partículas de menos de 10 micrones de diámetro. El PM10 es una mezcla heterogénea de sustancias químicas y partículas de diversos tamaños, e incluye partículas directamente emitidas al aire tales como hollín de diesel, polvo proveniente de caminos o de trabajos agrícolas, o partículas inherentes a la quema de madera o procesos industriales. También se produce a través de reacciones fotoquímicas en las cuales participan gases tales como los óxidos de azufre o los óxidos de nitrógeno generados por la combustión de combustibles. Actualmente, los habitantes de numerosas urbes en todo el mundo, incluida la población de Santiago, están expuestos a concentraciones muy altas de este contaminante.

Chile ha experimentado un crecimiento económico muy rápido desde comienzos de los años 80, con el consiguiente aumento de la circulación de automóviles y autobuses. Hoy día viven en Santiago 4,7 millones de personas, casi un tercio de la población total del país. El uso de combustible fósil para producir energía, así como los procesos industriales, el polvo que flota y el resuspendido contribuyen a su vez a la contaminación del aire. Debido a que la ciudad está ubicada en una cuenca rodeada de montañas, con condiciones atmosféricas bastante estables, muchas veces se ve

impedida la dispersión natural de las partículas. Por consiguiente, durante los meses de invierno las concentraciones de PM10 sobrepasan en varias ocasiones los límites que aconsejan las normas norteamericanas de calidad ambiental. Tratar de cuantificar los impactos de estas concentraciones puede ayudar de manera importante a determinar cuáles son las políticas públicas y privadas adecuadas para controlar la contaminación.

### 1. El uso de métodos cuantitativos

En la década pasada, docenas de estudios epidemiológicos han dado cuenta de una relación entre PM10 y diversas consecuencias adversas, entre las cuales se incluyen mortandad prematura, ingresos en hospitales, visitas a salas de urgencia, ataques de asma, síntomas respiratorios y disminuciones de la función pulmonar. Los estudios epidemiológicos proporcionan evidencia "del mundo real" de las relaciones entre contaminación atmosférica y salud, a partir de exposiciones y condiciones de vida normales. Aunque persisten todavía muchas incertidumbres, estos estudios se pueden usar para evaluar las consecuencias en la salud y la economía de los actuales niveles de contaminación atmosférica, y para calcular los posibles beneficios que se obtendrían con la disminución de los niveles de contaminación. El desarrollo de una estimación cuantitativa permitirá poner en perspectiva los probables beneficios derivados del control de la contaminación, y ayudará a priorizar la toma de decisiones públicas en materia de control de la contaminación *versus* otras inversiones en salud pública.

La Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos ha intentado estimar los beneficios que tendría para la salud y para la economía una reducción de la contaminación atmosférica, relativa a diferentes concentraciones ambientales (EPA, 1984). Posteriormente, en distintos lugares escogidos de Estados Unidos se realizaron análisis de los beneficios económicos de los programas de mejoramiento de la calidad del aire, en los que se incluyó información adicional y se incorporaron mejoramientos metodológicos (Chestnut *et al.*, 1987). Recientemente se dieron a conocer, tanto para Estados Unidos en su conjunto como para los planes de control de la contaminación que se están considerando en el sur de California, estimaciones generales de los beneficios que tiene para la salud el control de material particulado u ozono (Hall *et al.*, 1992; Krupnick y Portney, 1991). Una metodología similar se utilizó para estimar los beneficios de reducir el plomo en la gasolina (Schwartz *et al.*, 1985). La investigación epidemiológica en los últimos años ha proporcionado pruebas adicionales

de los efectos de la contaminación atmosférica en la salud y aporta una base significativa para predecir diversas consecuencias adversas que están asociadas a la exposición a contaminación atmosférica.

Usando estos últimos estudios, Ostro (1994) generó una metodología para estimar los efectos de las concentraciones ambientales de material particulado, ozono y plomo sobre la salud. Luego se aplicó esta metodología para determinar los impactos de una exposición a las actuales concentraciones de contaminación atmosférica en Jakarta, Indonesia.

La metodología es una herramienta que puede ser fácilmente entendida y adaptada a otros países. Puede contribuir a identificar incertidumbres, priorizar futuras investigaciones y puede ser fácilmente mejorada para incluir datos más recientes. Además, le permite al usuario determinar la sensibilidad de los resultados a diversos supuestos del modelo.

## 2. Metodología

Para estimar los impactos en la salud asociados con la contaminación atmosférica, se deben resolver tres factores: las relaciones dosis-respuesta, las poblaciones susceptibles de ser afectadas y los cambios en los niveles de la contaminación atmosférica que se están estudiando. El resultado de estos tres factores genera el impacto total en la salud. La aplicación de un valor económico a cada efecto en la salud generará un costo económico asociado al cambio que se proyecta en los niveles de contaminación atmosférica.

El desarrollo de funciones dosis-respuesta implica la selección de estimaciones que relacionan exposición a contaminación atmosférica con ciertos efectos para la salud. Las funciones dosis-respuesta que correlacionan efectos de morbo-mortalidad con concentraciones de contaminación atmosférica son tomadas de estudios epidemiológicos que han sido publicados, apoyados a su vez en la literatura de toxicología humana clínica y animal. Sin embargo, es difícil aislar los efectos de un contaminante atmosférico específico en estos estudios, puesto que los contaminantes tienden a interactuar en el medio ambiente natural. El hallazgo de una relación estadísticamente significativa entre un efecto en la salud y un contaminante atmosférico específico no es prueba de causalidad. La inferencia de causalidad se fortalece, no obstante, si los resultados epidemiológicos se duplican en varios estudios o si se observa una gama de efectos adversos para la salud en relación con un contaminante dado. Idealmente, sólo se deberían usar estudios que cumplan con criterios adecuados de diseño estadístico y

metodología. Esto incluye: controles adecuados de posibles variables confundentes; uso de datos sobre contaminación y salud representativos y de alta calidad; y un cuidadoso y completo análisis de datos que incluya la sensibilidad de los resultados a otras formas funcionales, a las especificaciones del modelo y a puntos de datos relevantes.

El desarrollo de estimaciones dosis-respuesta implica la selección de estudios científicos que provean las mejores estimaciones de un efecto. A partir de ese o esos estudios, se determina un efecto marginal (o pendiente), el cual proporciona una estimación del cambio en la probabilidad de un efecto específico en la salud asociado con un cambio de PM10, manteniéndose otros factores constantes.

El próximo paso en la cuantificación supone determinar la población pertinente a ser incluida. Idealmente, se pueden desarrollar exposiciones para toda un área metropolitana, usando monitores fijos o modelos de dispersión. Para ciertos efectos sobre la salud relacionados con contaminación, la población pertinente puede incluir toda la población expuesta. Para otros efectos pueden existir subgrupos especialmente sensibles, tales como niños, personas asmáticas o ancianos. Para determinar la correspondiente proporción de población dentro de cada uno de estos subgrupos se deben usar datos locales. A estas poblaciones se les asignan luego exposiciones a contaminación, basándose en lugar de residencia y, a veces, lugar de trabajo.

El tercer factor en el proceso de cuantificación consiste en determinar el cambio de la calidad del aire que se está estudiando (es decir, el o los contaminantes que interesan). Por consiguiente, se debe representar la concentración ambiental actual y, a la vez, una concentración "meta" apropiada, tal como una norma de calidad ambiental (o un nivel de umbral).

### 3. Supuestos básicos

Un supuesto básico de esta metodología es que la relación entre concentraciones ambientales, medidas en monitores fijos, y los efectos posteriores en la salud puede ser extrapolada desde las áreas originales de estudio a las áreas de aplicación de la metodología. Los estudios epidemiológicos muestran que cuando las concentraciones en monitores fijos varían, hay un cambio en la incidencia observada de muchos efectos en la salud. Aunque los monitores no miden directamente exposiciones, sí proveen una medida general de la calidad del aire que obviamente está relacionada con la exposición final. La metodología propuesta depende principalmente de

estudios de series de tiempo que relacionan cambios diarios en la contaminación atmosférica con la incidencia diaria de un efecto en la salud. Los modelos, por lo general, controlan la influencia de factores que varían con el tiempo, tales como condiciones meteorológicas, estación, día de la semana y otros contaminantes. Otros factores permanecen generalmente constantes durante el período de estudio, lo cual minimiza la probabilidad de confusión. Por ejemplo, si se hiciera un estudio durante un período de tres meses, y las visitas diarias a la sala de urgencia se relacionaran con PM10, es muy poco probable que los hábitos de consumo de cigarrillos, la exposición por motivos ocupacionales, la dieta, los patrones de ejercicio y actividad, o la exposición intradomiciliaria cambiaran diariamente y estuvieran correlacionados con concentraciones diarias de material particulado en forma suficiente como para dirigir la relación observada. La extrapolación de los resultados de estos estudios epidemiológicos supone que la relación espacial entre monitores de contaminación y población y la composición de PM10 es generalmente similar. Así, se espera que un cambio de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en PM10 produzca el mismo aumento de riesgo en el área de aplicación de la metodología que en el área de estudio original. Obviamente, sería beneficioso usar la mayor cantidad posible de datos y resultados epidemiológicos del área en estudio.

#### 4. Un ejemplo en que se usa la mortalidad

De especial interés es la relación reportada entre exposición a material particulado (incluyendo parámetros tales como PM10, material particulado total en suspensión, coeficiente de neblina y humo negro) de corto plazo (es decir, diaria) y mortalidad. Los efectos sobre la mortalidad tienden a dominar los costos económicos de la contaminación atmosférica. En los últimos años, varios estudios han dado cuenta de una relación usando específicamente PM10. Esto reduce la necesidad de convertir los resultados de mediciones que utilizan un conjunto de parámetros a otros. Estos estudios han sido llevados a cabo principalmente en Estados Unidos, donde el PM10 ha sido registrado en forma rutinaria. Sin embargo, ya que en Santiago se han registrado concentraciones diarias de PM10 durante varios años, se ha efectuado un estudio similar con datos locales. Por lo tanto, podemos comprobar explícitamente la conveniencia de extrapolar los resultados de distintas ciudades de los Estados Unidos a Santiago para fines de cuantificación. El Cuadro siguiente resume los hallazgos de estos estudios. Para Santiago, se utilizan los resultados del modelo usando una exposición acu-

mulativa de 3 días. El Cuadro indica que muchas de las estimaciones se concentran alrededor de un cambio de 1% por cada  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM10. La media de los valores es aproximadamente 0,8%, con estimaciones límites inferiores y superiores de 0,43 y 1,23%, respectivamente. Esta estimación es similar a la obtenida en los últimos estudios realizados en Europa Occidental por los estudios APHEA, la cual fluctuaba entre 0,40 y 1,0% por cada  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de humo negro con una estimación ponderada combinada de 0,80 por ciento (Zmirou *et al.*, 1996). Muchas veces se considera que el humo negro es aproximadamente igual al PM10. Por lo tanto, al parecer es razonable extrapolar el riesgo relativo de mortalidad (es decir, el cambio porcentual del efecto sobre la salud relativo a la línea de base de la población) de la exposición a PM10. La reproducción de los resultados en diversas poblaciones y en climas diferentes es un resultado epidemiológico poderoso. Al parecer, el factor que preocupa es la contaminación atmosférica por material particulado, ya que se ha encontrado un efecto en estudios

CAMBIO PORCENTUAL ESTIMADO EN MORTANDAD ASOCIADO A CAMBIO DE  $10 \mu\text{g}/\text{M}^3$  EN PM10. BASADO EN ESTUDIOS DONDE SE MIDIÓ EL PM10

Ciudad	Autor	Central	Bajo	Alto
Utah Valley	Pope <i>et al.</i> , 1992	1,5	0,9	2,1
St. Louis	Dockery <i>et al.</i> , 1992	1,5	0,1	2,1
Kingston, TN	Dockery <i>et al.</i> , 1992	1,6	-1,3	4,6
Birmingham	Schwartz <i>et al.</i> , 1993	1,0	0,2	1,5
Chicago	Ito <i>et al.</i> , 1995	0,6	0,1	1,0
Los Angeles	Kinney <i>et al.</i> , 1995	0,5	0,1	1,1
Santiago, Chile	Ostro <i>et al.</i> , 1996	1,0	0,6	1,4
6 ciudades	Schwartz <i>et al.</i> , 1996	0,8	0,5	1,1
Promedio ponderado		0,83	0,43	1,23

realizados en muchas ciudades y en diversas estaciones del año, lo que incluye una amplia gama de climas, distintas composiciones químicas del material particulado y distintas poblaciones. Por ejemplo, una magnitud similar del efecto del material particulado ha sido informada en áreas con niveles altos y bajos de ozono, áreas con niveles altos y bajos de dióxido de azufre, áreas con correlación alta y baja con ozono y dióxido de azufre, y en áreas donde las partículas alcanzan su punto más alto tanto en invierno como en verano.

Es importante señalar que también se ha informado de relaciones cuantitativas entre exposición a partículas de largo plazo y mortandad (Pope *et al.*, 1995; Dockery *et al.*, 1993). Estas estimaciones indican que los efectos de una exposición crónica son varias veces más altos que los de una exposición aguda (es decir, diaria). Asimismo, las partículas ambiente se han relacionado con muchos resultados diferentes de morbilidad (Pope y Dockery, 1994).

En Chile, futuras investigaciones y recopilaciones de datos pueden ayudar a reducir algunas de las incertidumbres inherentes a esta metodología. Por ejemplo, monitores adicionales de PM10 ubicados fuera de la zona comercial central mejorarían la asignación de exposiciones a la población. También sería útil el monitoreo de partículas finas (material particulado de menos de 2,5 micrones de diámetro), ya que es probable que estas pequeñas partículas sean más tóxicas que algunas de las partículas más grandes incluidas en el PM10. Otros estudios epidemiológicos sobre diversas consecuencias para la salud ayudarían a verificar los efectos sugeridos a partir de estudios realizados en Estados Unidos y Europa. Finalmente, estudios locales sobre el valor económico que les asignan las personas a ciertas consecuencias en la salud y a las disminuciones de riesgo, eliminarían la necesidad de extrapolar de estudios llevados a cabo fuera de Chile.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chestnut, L. G.; Ostro, B. D. y Rowe, R. D. (1987). "Santa Clara Criteria Air Pollutant Benefit Analysis". Preparado por U. S. Environmental Protection Agency, Region 8, San Francisco, California.
- Dockery, D. W.; Schwartz, J. y Spengler, J. D. (1992). "Air Pollution and Daily Mortality: Associations with Particulates and Acids Aerosols". *Environ. Res.*, 59, pp. 362-373.
- . Pope, C. A.; Xu Xiping *et al.* (1993). "An Association between Air Pollution and Mortality in Six U. S. Cities". *New England Journal of Med.*
- Hall, J. V.; Winer, A. M.; Kleinman, M. *et al.* (1992). "Valuing the Health Benefits of Clean Air". *Science*, 255, pp. 812-816.
- Kinney, P. L.; Ito, K. y Thurston, G. D. (1995). "A Sensitivity Analysis of Mortality/PM10 Associations in Los Angeles". *Inhal. Toxicol.*, 7, pp. 59-65.
- Krupnick, A. J. y Portney, P. R. (1991). "Controlling Urban Air Pollution: A Benefit-Cost Assessment". *Science*, 252, pp. 522-528.
- Ito, K.; Kinney, P. L. y Thurston, G. D. (1995). "Variations in PM10 Concentrations within Two Metropolitan Areas and Their Implications for Health Effects Analysis". *Inhal. Toxicol.*, 7, pp. 735-748.
- Ostro, B. (1994). "Estimating the Health Effects of Air Pollution: A Method with an Application to Jakarta". *Policy Research Working Paper # 1301*, Banco Mundial, Washington, D C, mayo.



- ; Sánchez, J. M.; Aranda, C. y Eskeland, G. (1995). "Air Pollution and Mortality: Results from a Study in Santiago, Chile". *J. Exp. Anal Environ. Epidemiol.*
- Pope, C. A. III; Schwartz, J. y Ramson, M. R. (1992). "Daily Mortality and PM10 Pollution in Utah Valley". *Arch. Environ. Health*, 47, pp. 211-217.
- y Dockery, D. W. (1994). "Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution". *Annu. Rev. Public Health*, 15, pp. 107-132.
- . Thun, M. J.; Namboodiri *et al.* (1995). "Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U. S. Adults". *Am. J. Resp. Crit. Care Med.*, 151, pp. 669-674.
- Schwartz, J. (1991). "Air Pollution and Daily Mortality in Birmingham, Alabama". *Am. J. Epidemiol.*, 137, pp. 1136-1147.
- . Pitcher, H. T.; Levin, R.; Ostro, B. D. y Nichols, A. (1985). "Costs and Benefits of Reducing Lead in Gasoline: Final Regulatory Impact Analysis". US. EPA, Office of Policy Analysis, febrero.
- . Dockery, D. W. y Neas, L. M. (1996). "Is Daily Mortality Associated Specifically with Fine Particles?" *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 46, pp. 927-939.
- US. Environmental Protection Agency (1984). "Regulatory Impact Analysis on the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter". Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, N. C. febrero.
- Zmirou, D.; Schwartz, J.; Saez, M. *et al.* (1996). "Time-Series Analysis of Air Pollution and Cause-Specific Mortality: A Quantitative Summary in Europe". (Estudio Aphea), presentado en la Sociedad Internacional de Epidemiología Ambiental, Edmonton, Canadá, junio. □