

LA DETECCIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LOS BOSQUES: LOS DOSÍMETROS PASIVOS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AIRE

G. SANCHEZ¹; M.J. SANZ²; F. SANZ²

1. SPCAN-DGCN, Ministerio de Medio Ambiente. Gran Vía de San Francisco, 5. 28005 Madrid. e-m:gerardo.sanchez@dgcn.mma.es
2. Fundación CEAM. Parque Tecnológico, C/ Charles Darwin 14, 46980 Valencia. e-m: mjose@ceam.es

RESUMEN

Actualmente el Servicio de Protección Contra Agentes Nocivos (DGCN, Ministerio de Medio Ambiente) en colaboración con el CEAM está utilizando los dosímetros pasivos como herramienta para evaluar la calidad del aire en los bosques. Para ello se han iniciado diversos proyectos entre los que se encuentra la evaluación de la calidad ambiental en el entorno natural de una gran área urbana (en la Comunidad de Madrid, en colaboración con la Consejería de Medio Ambiente). Escogiendo como ejemplo el ozono, los primeros resultados indican que las concentraciones más altas se registran en la zona de la Sierra, alcanzándose en localidades como Braojos promedios diarios de hasta 70 ppb. Se observan además dos máximos en las concentraciones, uno a final de la Primavera y otro al final del Verano en todas las estaciones.

P.C.: contaminación atmosférica, bosques, dosímetros pasivos.

SUMMARY

The "Servicio de Protección Contra Agentes Nocivos" (DGCN, Ministerio de Medio Ambiente) in collaboration with Fundación CEAM is using passive samplers as a tool for the evaluation of the air quality in forested areas. For that reason several projects are been set up, one of them consists in the evaluation of the concentration of several pollutants in the airshild of a big city (Madrid) in collaboration with the "Conserjería de Medio Ambiente". When the ozone is considered, the preliminary results from 2000 indicate that the higher values are registered in the North west (south facing slopes of the Mountains), i.e in Braojos 24 h averages can reach 70 ppb in late summer. And, two maximums are observed in all stations, one in late Spring and one in late summer.

K.W.: air pollution, forest, pasive samplers.

INTRODUCCIÓN

El cambio acelerado de las condiciones ambientales tiene una repercusión inmediata y profunda en nuestro medio. La presencia de contaminantes atmosféricos no sólo interfiere directamente de forma puntual en la vegetación, los episodios agudos locales de daños son únicamente la cresta de la ola de una modificación mucho más profunda y grave que se puede estar produciendo a medio plazo. El efecto de unos niveles crecientes de contaminantes en la atmósfera es un desequilibrio interno en el funcionamiento del bosque, desde sus niveles más internos (estrés fisiológico) hasta los más amplios (modificaciones del ecosistema). Fenómenos como la menor resistencia ante plagas o enfermedades, o una capacidad de amortiguamiento mermada frente a un estrés climático puntual, son ejemplo de cómo la vegetación sufre el efecto de la contaminación, pero estos daños no pueden ser atribuibles directamente a dicho factor, debido al enmascaramiento producido por los agentes oportunistas, que son los que realmente se observan sobre el arbolado con síntomas de decaimiento.

La evaluación del estado de vitalidad de un sistema forestal necesita entre otros parámetros de referencia el conocimiento de la calidad ambiental reinante en el mismo, del aire que circula y que la vegetación al final asimila en su funcionamiento fotosintético. La problemática que los sistemas forestales presentan para a la hora de realizar evaluaciones de la calidad atmosférica de su entorno puede sintetizarse en los siguientes puntos: a) corresponden a zonas de dimensiones considerables situadas en áreas remotas donde no es posible disponer de electricidad o un lugar adecuado para la instalación de equipos sofisticados para la mediación de contaminantes gaseosos y, b) son bastante

heterogéneas, de compleja topografía, por lo que las concentraciones de los contaminantes en un solo punto (que es lo que mide un monitor en continuo) no suelen representar adecuadamente todo el territorio (MILLÁN et al., 2000).

Debido a esta problemática, algunos grupos de investigación han venido utilizando los denominados dosímetros pasivos. Los primeros intentos para utilizar este tipo de dispositivos en áreas remotas datan de hace más de 100 años (FOX, 1873). Su interés reside en la posibilidad de estimar la concentración de algunos contaminantes gaseosos en lugares remotos o su utilización en extensas redes espaciales. Este último ha sido uno de sus usos más comunes durante los últimos años, permitiendo la determinación de la existencia o no de los llamados gradientes de contaminación, incluso en el interior de los mismos doseles vegetales (ADEMA et al. 1993). El uso de dosímetros pasivos en entornos cerrados como almacenes ha sido utilizado para gases como el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de nitrógeno, ozono, amoníaco, PCBs, sulfuro de hidrógeno, formaldehído, y volátiles orgánicos (VOCs), en problemas relacionados con la salud humana. Los efectos de los contaminantes en la vegetación (cultivada y natural) son de uso más reciente. Un ejemplo interesante es su aplicación en los Parques Nacionales de Estados Unidos (metodología y resultados en <http://www2.nature.nps.gov/ard/gas/passives.htm>), comprobándose su enorme utilidad por ejemplo el caso del ozono. También se han realizado esfuerzos similares en algunos países de la Europa del Este como (Polonia, BYZNEROWICZ coms. pers.).

CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS

Los dosímetros pasivos se basan en dos principios físicos: absorción y adsorción.

Absorción es el método que utiliza tubos de difusión con un filtro como superficie donde la sustancia es retenida. El flujo unidireccional de un gas a través de un gas b viene dado por la ley de Fick:

$$F_1 = - D_{ab} d C_1 / dZ$$

donde, F_1 = flujo de gas ($\text{mol cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), D_{ab} = coeficiente del gas a en el gas b ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$), C_1 = concentración del gas a en el gas b (mol cm^{-3}), Z = longitud de la difusión (cm).

La cantidad de gas transferido (Q_a mol) en t segundos para un cilindro de radio r viene dado por las dos ecuaciones siguientes:

$$Q_a = F_a (\pi r^2) t \text{ mol}$$
$$Q_a = - D_{ab} (C_a - C_0)(\pi r^2)t / Z \text{ mol}$$

donde C_0 es la concentración que se registra en la superficie absorbente, $(C_1 - C_0)/Z$ es el gradiente de concentración a lo largo del cilindro de longitud Z , y si la eficiencia del absorbente para eliminar el gas a es alta el término C_0 es 0.

Hay cuatro consideraciones a tener en cuenta en el diseño de un dosímetro pasivo: linealidad de la reacción o respuesta con respecto a la concentración en el aire del compuesto a determinar, especificidad de la reacción del absorbente para el contaminante de interés, efectos de la turbulencia del aire en la eficiencia de captura del dispositivo y correlación de los valores obtenidos por el dispositivo con los valores obtenidos por un muestreador en continuo (calibración).

Los dispositivos que se utilizan en este estudio permiten determinar cuatro de los gases considerados contaminantes de mayor impacto en las especies vegetales, tanto contaminantes primarios (SO_2 y NH_3) como secundarios (O_3 , y NO_2). El método de trabajo consiste en la instalación en el lugar elegido de los dispositivos de captación pasiva o dosímetros, con dos réplicas por tipo de dispositivo y localización. Los dispositivos van montados en dos carcasas, una para el SO_2 , NO_2 y NH_3 y otra para los de O_3 , que evitan que se mojen o que el proceso de difusión sea interferido por el viento. Ambas carcasas se fijan a un poste a 2,5 m de altura en un área abierta dentro de la superficie forestal objeto de estudio, o en su entorno inmediato, cuidando de que no hayan obstáculos o fuentes de contaminación puntuales excesivamente cerca (carretera, o posible emisor antropogénico de contaminantes de cualquier tipo).

Los dispositivos varían en función del gas considerado. Para el ozono los dispositivos constan de un cuerpo de polipropileno de 26 mm de largo por 15 mm de diámetro con dos cavidades, donde

se alojan dos filtros de fibra de vidrio impregnados con una disolución que contiene nitrito entre dos mallas de acero inoxidable. Las cavidades se encuentran cerradas con dos tapas de polipropileno provistas de perforaciones. El nitrito al entrar en contacto con ozono, se oxida a nitrato, posteriormente, este nitrato es analizado por cromatografía iónica (IC Dionex). Para el NO_2 el dispositivo consiste en un pequeño aro de polipropileno (10 mm de altura, 20 mm de diámetro interno y 25 mm de diámetro externo), cerrado por un lado con un tapón de polietileno, sobre el que se coloca un filtro de fibra de vidrio de 25 mm de diámetro impregnado con una solución de Trietanolamina. Una malla de acero inoxidable (0,08 mm de diámetro de malla, 0,125 mm de medida de malla y 38,5% de porosidad), se coloca en el otro extremo del tapón de polietileno, y una membrana de teflón se deja sobre la malla, quedando cerrado el tapón de polietileno mediante una aro situado sobre la malla. El dispositivo utilizado para el SO_2 es el mismo que para el NO_2 . Pero en este caso, la disolución absorbente viene dada por una disolución de sosa en metanol y SO_2 recogido por el absorbente, se analiza como sulfato por cromatografía iónica. Por último el dispositivo para NH_3 consiste en un tubo de teflón de 3,5 cm de longitud y 1 cm de diámetro interno, cerrado por ambos lados por dos tapones de polietileno y dentro del cual, se sitúan dos mallas de acero inoxidable (4 mallas/mm) de 1,2 cm de diámetro impregnadas con ácido sulfúrico. Las mallas se sitúan en el fondo del tubo, en el interior de uno de los tapones de polietileno. El amoníaco es transportado por difusión molecular hasta el fondo del tubo, siendo fijado en forma de sulfato de amonio por el ácido sulfúrico contenido en las mallas de acero inoxidable, dónde es retenido para su posterior medida mediante un Espectrofotómetro CARY IV, Varian.

Se consideran para esta comunicación el caso de una red de 12 puntos en los alrededores de Madrid, donde se han colocado los dispositivos pasivos. El contaminante elegido como ejemplo (aunque se dispone de datos que no se presentan sobre los otros tres que anteriormente se han mencionado) es el ozono, por ser uno de los de más amplia distribución. Los puntos se han distribuido de forma que, en función de la orografía, régimen de vientos y posibles focos, se abarcase el mayor espectro posible de situaciones forestales. Se hace referencia a la localización por el término municipal en que se inscribe el área forestal donde están ubicados los dosímetros.

RESULTADOS

Un ejemplo de los resultados que se pueden obtener utilizando dosímetros pasivos se expone a continuación, basado en los datos de las concentraciones de ozono en Madrid (red descrita anteriormente). Debido a que no existe espacio para la presentación de las tablas de datos, simplemente se expone la interpretación de la situación, en cuanto a la calidad ambiental de los lugares analizados por las concentraciones de ozono registradas. Los datos de origen están disponibles a través de los autores del presente trabajo. Los valores analizados son los acumulados durante el periodo de exposición en ppm.h (AOT) para cada una de las estaciones y periodos de muestreo. Los promedios diarios se obtienen de las AOT y del periodo de exposición. El periodo de estudio que se ha elegido para este ejemplo es el comprendido entre el 15/04/2000 y el 28/08/2000, con periodos de muestreo quincenales en todos los puntos. Las estaciones de muestreo se han separado en tres sectores para el análisis de los resultados: Sector Norte-Noroeste, laderas de la Sierra (Braojos, Miraflores, Cercedilla y El Escorial); Sector Oeste, estaciones más bajas en la zona de la rampa pre-serrana (Galapagar Navalgamella y San Martín de Valdeiglesias); Sector Sur-suroeste (Villaviciosa de Odon, La Marañosa y Belmonte) y Sector Norte-Noreste (Belvis y Valdeaveruelo).

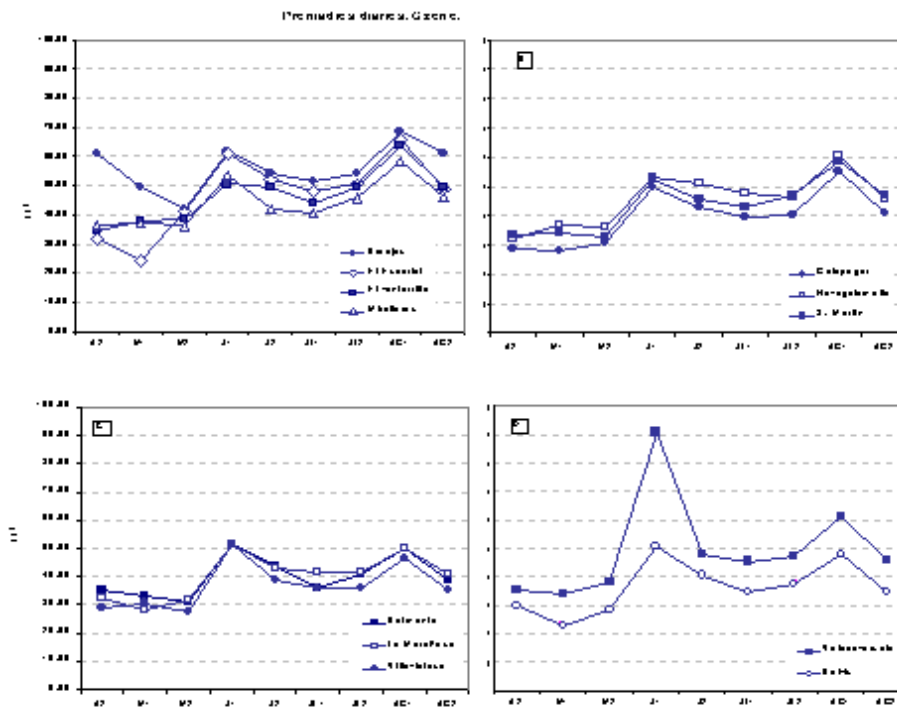


Figura 1. Promedios diarios de ozono para cada uno de los sectores considerados (ppb). A. Sector Nor-Noroeste, Sierra. B. Sector Oeste, zona de las Navas. C. Sector Sur. D. Sector Norte-Noreste. Desde la segunda quincena de Abril a finales de Agosto de 2000.

En la zona de la Sierra (Sector Norte-Noroeste), especialmente en El Escorial, Braojos y el Ventorrillo es donde se registran unos valores de AOT mayores. Braojos presenta el máximo observado en todo el periodo considerado y para todas las estaciones, en la segunda quincena de Abril con 32.020 ppb.h. En general en este sector se observan tres máximos, en Primavera (finales de Abril), en Julio (primera quincena) y en Verano (Agosto). Miraflores presenta máximos menores y mínimos mayores.

En el Sector Oeste, las concentraciones son más bajas, aunque se observa el mismo comportamiento general, con tres máximos en los mismos periodos. Las tres estaciones presentan concentraciones muy parecidas, siendo en Galapagar ligeramente inferiores.

Sector Norte-Noreste: la estación más cercana a Madrid y a la Autovía es la que presenta una AOT más baja, aunque como en el caso anterior aparecen en ambas estaciones tres máximos en los mismos periodos.

Por último en el Sector Sur es donde se registran las AOT más bajas, especialmente en Villaviciosa (estación muy cercana a Madrid). Como en los sectores anteriores se observan para las tres estaciones máximos para los mismos periodos que en todos los casos anteriores.

Si se realizase un análisis de los promedios diarios para cada quincena (Figura 1), se observa el mismo tipo de comportamiento que en los resultados globales, pero es este caso los valores se normalizan al periodo de exposición. Los promedios más altos se registran en general en las laderas de la Sierra, por ejemplo Braojos alcanza en la segunda mitad Agosto valores de 70 ppb de promedio diario. En todas estas estaciones el máximo de Agosto es el más alto. Mientras que en las estaciones del Sur y Norte (más cercanas a Madrid y en la planicie) el máximo más alto sería el correspondiente a la primera quincena de Junio, o el de Agosto, no superando normalmente el valor de 50 ppb. El valor de 90 ppb registrado para la primera quincena de Junio en Valdeavuelo, corresponde a valores probablemente anómalos debido a que los dispositivos aparecieron mal colocados y mojados, este fue el único caso en en que se observaron problemas en el muestreo.

DISCUSIÓN

El uso de la técnica de dosimetría pasiva presenta una serie de ventajas y de desventajas en comparación con los monitores en continuo (monitores activos) de contaminantes, que pueden resumirse de la siguiente forma:

Característica	Dosímetro pasivo	Monitor activo
Desde cuando se ha usado	1800	1950
Complejidad de su uso en campo	Bajo (+)	Alto (-)
Coste	Bajo (+)	Alto (-)
Horas de trabajo en campo requeridas	Bajo (+)	Alto (-)
Mantenimiento en campo	Bajo (+)	Alto (-)
Coste de análisis de laboratorio	Modeado-alto (-)	Ninguno-moderado (+/-)
Resolución temporal medidas	Bajo (+)	Alto
Requerimientos energéticos	Ninguno (+)	Necesario (-)
Especificidad de las medidas	Interferencias posibles (+/-)	Interferencias posibles (+/-)
Interferencias meteorológicas	Posibles (-)	Poco probables (+)
Límite de detección	Relativamente alto (-)	Relativamente bajo (+)
Detección de episodios cortos	Bajo (-)	Alto (+)
Costo de su uso a nivel regional	Bajo (+)	Alto (-)

El símbolo (+) indica ventaja y el (-) indica desventaja (fuente: KRUPPA & LEGGE, 2000)

Ello permite considerarla como una técnica útil para determinado tipo de estudios, como los seguimientos sanitarios de los bosques en amplias zonas. La utilización de los dosímetros pasivos permite ver cambios (dinámica) de la calidad del aire en amplias zonas a lo largo del año, así como tener una información espacial más completa. En el caso de la cuenca de Madrid, se observa con esta herramienta la aparición de dos picos en las concentraciones de todas las localizaciones, al final de la primavera y del verano, aunque la magnitud de las concentraciones no es la misma para todos los sectores. Ello indica que existe una continuidad en la masa de aire en toda la cuenca y que las diferentes concentraciones se deben a la cercanía a las fuentes de los precursores y/o a estar en zonas de mayor o menor producción de ozono.

CONCLUSIONES

Los dosímetros pasivos son una herramienta útil para ciertos estudios, especialmente aquellos en los que se pretende cubrir una amplias zonas, además de determinar de un modo económico en amplias zonas boscosas la concentración de contaminantes, que presentan concentraciones crónicas a escala regional, como en el caso del área mediterránea y el seguimiento de las concentraciones y de los daños asociados a altos niveles de ozono troposférico.

Su utilidad es limitada para concentraciones episódicas, como puede ser el caso de impactos puntuales muy agudos de dióxido de azufre, dado que integran periodos de tiempo superiores a 24 h (por lo general de una o dos semanas). Actualmente en España el Servicio de Protección Contra Agentes Nocivos (DGCN, Ministerio de Medio Ambiente) en colaboración con el CEAM está aplicando dicha metodología y obteniendo los primeros resultados en tres proyectos que intentan de un modo coordinado y complementario a la vez, prediseñar lo que sería en el futuro un “mapa” de la calidad atmosférica de nuestros bosques:

- Red de dosímetros en los Parques Nacionales, con la utilidad adicional de elemento para una adecuada gestión en conservación y uso público de estos espacios,
- Red de dosímetros en las parcelas instrumentadas del Sistema Paneuropeo para el Seguimiento Intensivo y Continuo de los Ecosistemas Forestales (Red CE de Nivel II), donde en combinación con datos meteorológicos, de deposición, analítica de aguas, sanidad forestal, biodiversidad y otros, se pretende caracterizar el funcionamiento de sistemas forestales tipo (representativos) a nivel europeo.
- Red de dosímetros en el entorno natural de una gran área urbana. Su instalación y seguimiento en la Comunidad de Madrid, en colaboración con la Consejería de Medio Ambiente permite conocer las modificaciones de las áreas forestales sometidas a la presión de un gran entorno urbano (contaminante) cercano, sus modificaciones, y además mejorar en las técnicas y métodos de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

La Generalitat Valenciana, la DG 6 de la UE y BANCAIXA han apoyado los trabajos desarrollados en esta línea de investigación, junto a la DGCN del Ministerio de Medio Ambiente. Por orden alfabético, los equipos de campo de ESMA y TECMENA han colaborado en los trabajos de

puesta y recogida de los dispositivos.

BIBLIOGRAFÍA

FOX, C.B. (1873). *Ozone and Antozone*. J. and A. Churchill, London.

MILLÁN, M.M., MANTILLA, E., CARRATALÁ, A., SALVADOR, R., SANZ, M.J., ALONSO, L. & NVAZO, M. (2000) *Ozone Cycles in the Western Mediterranean Basin: Interpretation of Monitoring data in complex coastal terrain*. Journal of Applied Meteorology, 39:487-508.

ADEMA, E.H., MAJESTRIK, V., & BINEK, B. (1993). *The determination of HN₃ concentration gradients in a spruce forest using passive sampling technique*. Water, Air & Soil Pollution 69: 321-335.

KRUPPA, S. & LEGGE, A. (2000). *Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assesment from an ecological perspective*. Environmental Pollution 107: 31-45.