

Caracterización e identificación de fuentes de partículas de carbono negro en el monumento de la Alhambra

Diego Patrón Aguilera^{1,2}

¹*Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada, Granada, España.*

²*Departamento de Física Aplicada, Universidad de Granada, Granada, España.*
diegopatron@correo.ugr.es

Abstract. Urban air pollution is a matter of great concern due to its harmful effects on human health and also to its role in the aesthetic damage and soiling of indoor/outdoor cultural heritage (historic monuments and artworks). In this sense, traffic-related pollutants as Black Carbon (BC) play an important role in the chemical reactions that occurs at building surfaces and may cause undesirable aesthetic effects related to black crust formation, decohesion or darkening. In European urban areas, road traffic is the main source of air pollution and BC is a good primary tracer for traffic emissions. Thus, characterization of this primary product of incomplete combustion of carbonaceous fuels close to monuments can help us to provide information and operational guidance for a sustainable management by the competent authorities. The main aim of this study is to characterize BC concentration at the Alhambra monument (UNESCO World Cultural Heritage) and its surrounding area from October 2015 to April 2016 and identify its local and regional sources. We also aim to investigate the meteorological and atmospheric conditions that favor higher concentrations in this historic building. In addition, this work analyses the influence of surface thermal inversions on BC concentrations at Granada and the monument area. The results indicate that traffic emissions close to the Alhambra are the main source of BC aerosol. The highest concentrations were observed during an extended stagnant episode, reflecting the large impact that can have the synoptic conditions on BC over the Alhambra and its surroundings. At the monument, BC was 60% higher during inversion days. However, it was not possible to find a significant correlation between the strength or intensity of the surface inversion with BC.

Keywords: Black Carbon, traffic emissions, Alhambra monument, aethalometer, meteorological conditions, surface thermal inversions, preventive measures.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, en el contexto de una creciente preocupación por la contaminación atmosférica en las áreas urbanas, el foco de atención se ha centrado en el estudio de las partículas carbonáceas del aerosol atmosférico relacionadas con las emisiones del tráfico, la quema de biomasa o los incendios, entre las que destacan las de carbono negro (BC, siglas en inglés), principalmente debido a su importante contribución a la contaminación del aire en las ciudades, también por ser el principal agente responsable del ennegrecimiento de los monumentos y por su papel relevante en las reacciones químicas que ocurren en la superficie de los edificios históricos (Bonazza et al., 2005). El BC es el constituyente de la materia particulada más efectivo en la absorción de la radiación solar. No debe confundirse con el carbono marrón (BrC, siglas en inglés) que es la fracción del carbono orgánico que absorbe radiación solar preferentemente en el UV y se origina a partir de la quema de biomasa.

El BC es un buen trazador de las emisiones del tráfico, principal fuente de contaminación en las ciudades. Por lo tanto, caracterizar este tipo de material particulado en las proximidades de los monumentos puede ser muy útil para proveer información y formular guías operativas que permitan realizar una gestión sostenible del patrimonio histórico y cultural (Ghedini et al., 2011).

La Alhambra es Patrimonio Mundial de la UNESCO desde 1984, y está sometida a la presión que ejercen tanto el turismo de masas como la propia ciudad de Granada. En este sentido, uno de los objetivos de este trabajo es caracterizar e identificar las fuentes de BC en el entorno de este monumento.

Otro objetivo fundamental es conocer la posible influencia de las condiciones meteorológicas locales y sinópticas en los niveles de BC. En este estudio analizaremos también con más detalle el efecto sobre el BC de las inversiones térmicas en superficie, frecuentes en esta zona durante el período invernal. Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se proponen algunas medidas de prevención para la conservación del conjunto monumental de la Alhambra.

ESTACIONES DE MEDIDA

La mayoría de los instrumentos se instalaron en el Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA-CEAMA), en Granada (37.16° N, 3.58° W, 680 m s.n.m.), una ciudad de tamaño medio (235.800 habitantes), escasamente industrializada, donde el tráfico y las calefacciones domésticas (en invierno) constituyen las principales fuentes locales del aerosol atmosférico.

Las medidas de BC fueron tomadas en tres lugares diferentes: 1) IISTA-CEAMA (680 m s.n.m.), representativa de las condiciones de la ciudad, situada a 500 m de la autovía de circunvalación de Granada; 2) La Mimbre, situada en la colina de la Sabika (780 m s.n.m.), es un edificio singular, próximo al acceso principal del monumento y al aparcamiento de la Alhambra, que se encuentra a 470 m del conjunto monumental; 3) Patio de los Leones (772 m s.n.m.), ubicado en el interior de la Alhambra. Esta estación se encuentra a 2000 m del IISTA-CEAMA.

INSTRUMENTACIÓN Y MÉTODOS

Las concentraciones de BC fueron medidas con dos etalómetros AE31 y una unidad del modelo AE33 desde octubre hasta diciembre de 2015 en La Mimbre y hasta abril de 2016 en las otras dos estaciones. Estos instrumentos miden los coeficientes de absorción de las partículas en 370, 420, 520, 590, 660, 880 y 950 nm. Los valores medidos se han corregido siguiendo las recomendaciones de la red ACTRIS. Además, se ha utilizado el valor de la atenuación específica ofrecida por el fabricante para convertir los coeficientes de absorción (880 nm) en concentraciones de BC. El Exponente de Ångström de Absorción (EAA, 370-880 nm) se ha calculado a partir del ajuste lineal entre el logaritmo de las medidas de absorción y el logaritmo de la longitud de onda. Los valores de EAA=1 indican que el BC es el componente absorbente dominante en el aerosol, mientras que un EAA>1.4 se relaciona con la presencia de otros componentes, como los que proceden de la quema de biomasa (Kirchstetter et al., 2004).

La velocidad y la dirección del viento se midieron con una estación meteorológica ubicada en el IISTA-CEAMA. Estos valores se han utilizado para aplicar el método de

la Función de Probabilidad Condicionada Bivariada (CBPF, siglas en inglés), considerando el percentil 90 del EAA y de la concentración de BC, con el que se localizaron las fuentes principales de partículas carbonáceas (Uria-Tellaetxe y Carslaw, 2014).

Aplicando el modelo del Etalómetro (Sandradewi et al., 2008) se obtuvieron los coeficientes de absorción atribuibles a las partículas emitidas por el tráfico $\sigma_{\text{abs}}(950 \text{ nm})_t$ y a las que proceden de la quema de biomasa $\sigma_{\text{abs}}(950 \text{ nm})_{\text{qb}}$, determinándose previamente, de forma empírica, los valores más adecuados para EAA_t y EAA_{qb} .

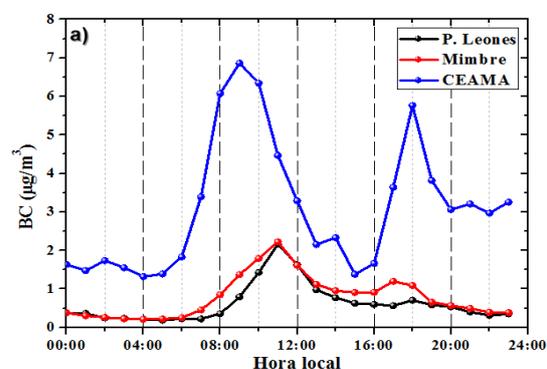
Para analizar las condiciones meteorológicas durante los eventos extremos, identificados como aquellos días en los que concentración media de BC superó el percentil 95 de la distribución en el Patio de los Leones, se obtuvieron retro trayectorias de 120 horas con el modelo HYSPLIT 4 y también mapas sinópticos de superficie del ARL-NOAA.

Mediante el radiómetro de microondas (RPG-HATPRO, Radiometer Physics GmbH, Alemania) se obtuvieron 72 perfiles diarios de temperatura por debajo de los 2000 m s.n.s. durante el período de estudio, en 25 puntos independientes de la troposfera, con una resolución vertical de 10 a 200 metros. Con estos datos, se calculó la fuerza de las inversiones térmicas como la diferencia de temperatura entre la cima y la base, cada hora, y la intensidad diaria, como el producto de la fuerza por su duración en horas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como era de esperar, la concentración media de BC en el IISTA-CEAMA ($2.8 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) fue mucho mayor que la registrada en La Mimbre ($0.7 \pm 0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), menos afectada por el tráfico debido a su localización en una zona con una circulación de vehículos limitada, situada sobre la colina de la Sabika y rodeada por vegetación. También fue mayor que en el Patio de los Leones ($0.6 \pm 0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), dentro del monumento de la Alhambra y más alejado del impacto directo del tráfico. Por otro lado, los valores medios del EAA (370-880 nm) fueron de 1.1 ± 0.1 en las tres estaciones, indicando que, en general, las partículas de BC fueron el componente absorbente predominante del aerosol atmosférico durante todo el período de estudio en estos tres lugares.

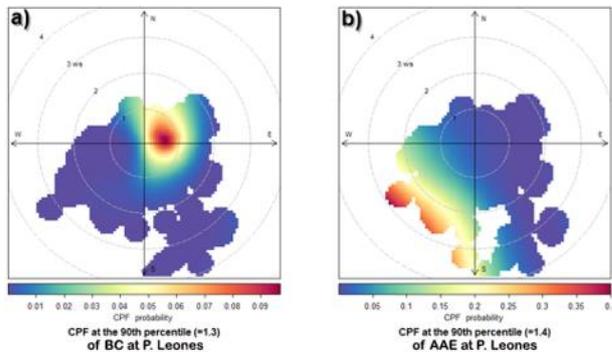
Las concentraciones medias de BC mostraron un claro ciclo diurno en las tres estaciones (Figura 1) que refleja la influencia del tráfico sobre la Alhambra y, especialmente, en el IISTA-CEAMA. El retraso en el pico matinal de BC que se observó



en el entorno del monumento puede deberse a una dinámica del tráfico distinta a la de la ciudad, ya que los desplazamientos vinculados al turismo ocurren más tarde. El EAA presentó un ciclo diario justamente opuesto al de las concentraciones de BC.

FIGURA 1. Evolución diaria de la concentración de BC durante el período de estudio en las tres estaciones experimentales.

Los resultados del método CBPF evidencian el impacto del tráfico que existe alrededor de la Alhambra y permiten identificar una fuente principal hacia el este, donde se ubican tanto el aparcamiento como el acceso principal de vehículos al monumento (Figura 2a). También se detecta una fuente de partículas más absorbentes en la región



UV (carbono marrón), asociadas con valores más altos del EAA, hacia el SO, donde se encuentra la Vega de Granada (Figura 2b). Esto se relaciona con las prácticas agrícolas de esa zona (quema de rastrojos y restos de cultivo) y con la quema de biomasa para calefacción doméstica.

FIGURA 2. Resultados del método CBPF (a) para las concentraciones de BC y (b) los valores de EAA mayores que el percentil 90, en función de la velocidad y la dirección del viento, en la estación del Patio de los Leones durante el período de noviembre a diciembre de 2015.

Las estimaciones realizadas mediante el modelo del Etalómetro en el Patio de los Leones muestran que la contribución de las partículas vinculadas a las emisiones del tráfico durante el período de estudio fue de un 86 % ($\sigma_{\text{abs}}(950 \text{ nm})_t = 5.3 \pm 2.9 \text{ Mm}^{-1}$), claramente mayor que la de las partículas procedentes de la quema de biomasa, del 14 % ($\sigma_{\text{abs}}(950 \text{ nm})_{\text{qb}} = 0.9 \pm 0.6 \text{ Mm}^{-1}$), de modo que esta última es una fuente cuantitativamente menos importante que el tráfico del entorno de la Alhambra.

Se identificaron siete eventos extremos en la serie de concentraciones de BC del Patio de los Leones, destacando los del 11 de noviembre y el 1-2 de diciembre. Todos los casos coinciden con velocidades del viento inferiores al P25 de la serie, ausencia de lluvias y presencia de inversiones térmicas intensas y duraderas en superficie, relacionadas con una anómala situación de bloqueo anticiclónico que tuvo lugar en la Península Ibérica entre noviembre y diciembre de 2015.

Por otro lado, la concentración media de BC en la Alhambra fue un 60% más elevada en presencia de inversiones térmicas. En este tipo de situaciones, los vientos son mucho más débiles de lo habitual, afectando a la dispersión horizontal de las partículas y a las contribuciones procedentes de la ciudad, donde el incremento del BC atribuible a las inversiones térmicas fue de un 58%. Finalmente, no se encontraron buenas correlaciones entre los niveles de BC y parámetros como la fuerza o la intensidad de las inversiones, debido probablemente a que también intervienen otras variables meteorológicas y diferentes combinaciones de las mismas.

CONCLUSIONES

El tráfico del entorno de la Alhambra constituye la principal fuente de las partículas de BC que afectan al conjunto monumental. La quema de biomasa relacionada con las prácticas agrícolas en la Vega de Granada y con los sistemas de calefacción doméstica son fuentes cuantitativamente menores.

En situaciones de estancamiento en las capas bajas de la atmósfera, como las que tuvieron lugar entre noviembre y diciembre de 2015, con una anómala situación de

bloqueo anticiclónico en la Península Ibérica, los niveles de BC pueden alcanzar valores no deseables para la buena conservación del monumento. Concretamente, las inversiones térmicas tienen una gran influencia sobre las concentraciones de BC tanto en La Alhambra como en el resto de la ciudad, aunque también intervienen otras variables meteorológicas en la explicación de estos episodios extremos.

Para garantizar un equilibrio entre el desarrollo local de la comunidad y la conservación del monumento, de acuerdo con los compromisos adoptados en la Declaración de Budapest sobre el Patrimonio Mundial de 28 de junio de 2002, se debe poner en práctica una estrategia de prevención y conservación eficaz, siendo necesario realizar un seguimiento de las variables meteorológicas y de la evolución de los contaminantes en las proximidades de la Alhambra. En este trabajo se proponen algunas medidas preventivas relacionadas con la reducción del tráfico en situaciones de estancamiento o con una mayor apuesta por el transporte público movido por energías más limpias.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el gobierno andaluz a través del proyecto P12-RNM-2409 y por el Ministerio de Economía y Competitividad mediante el proyecto CGL2013-45410-R, así como por el Programa Horizonte 2020 de la Unión Europea a través del proyecto ACTRIS-2 (grant agreement No 654109). También ha sido posible gracias a la colaboración del Patronato de la Alhambra y Generalife y al programa FEDER por el uso de la instrumentación.

Agradezco la acogida y la disponibilidad a todas las personas que conforman el grupo de Física de la Atmósfera del IISTA-CEAMA.

REFERENCIAS

Bonazza, A., Sabbioni, C., Ghedini, N., 2005. Quantitative data on carbon fractions in interpretation of black crusts and soiling on European built heritage. *Atmospheric Environment*, 39(14), 2607–2618.

Ghedini, N., Ozga, I., Bonazza, A., Dilillo, M., Cachier, H., Sabbioni, C., 2011. Atmospheric aerosol monitoring as a strategy for the preventive conservation of urban monumental heritage: The Florence Baptistery. *Atmospheric Environment*, 45(33), 5979–5987.

Kirchstetter, T. W., T. Novakov, and P. V. Hobbs, 2004. Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon. *J. Geophys. Res.*, 109(D21), D21208.

Lyamani, H., Fernández-Gálvez, J., Pérez-Ramírez, D., Valenzuela, A., Antón, M., Alados, I., Titos, G., Olmo, F.J., Alados-Arboledas, L., 2012. Aerosol properties over two urban sites in South Spain during an extended stagnation episode in winter season. *Atmos. Environ.*, 62, 424–432.

Sandradewi, J., Prévôt, A. S. H., Szidat, S., Perron, N., Alfarra, M. R., Lanz, V. A., Weingartner, E., Baltensperger, U., 2008. Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter. *Environ. Sci. Technol.*, 42, 3316–3323.

Uria-Tellaetxe, I., Carslaw, D.C., 2014. Conditional bivariate probability function for source identification. *Environ. Model. Softw.* 59, 1–9.